

ATTI
DELLA
ACCADEMIA LIGURE
DI SCIENZE E LETTERE

IN CONTINUAZIONE DEGLI
ATTI DELLA REALE ACCADEMIA LIGURE DI SCIENZE E LETTERE
ATTI SOCIETÀ DI SCIENZE E LETTERE DI GENOVA
ATTI SOCIETÀ LIGUSTICA DI SCIENZE E LETTERE
ATTI SOCIETÀ LIGUSTICA DI SCIENZE NATURALI E GEOGRAFICHE
E DELLE
MEMORIE DELL'ACCADEMIA DELLE SCIENZE, LETTERE ED ARTI DI GENOVA
MEMORIE DELL'ACCADEMIA IMPERIALE DELLE SCIENZE E BELLE ARTI DI GENOVA
MEMORIE DELL'ISTITUTO LIGURE DI GENOVA

Serie VII – Volume VI/1 – 2024



Comitato scientifico:

Mario Pestarino (Presidente), Vincenzo Lorenzelli (Presidente emerito),
Adriana Saccone, Maria Stella Rollandi, Giulio Manuzio, Maria Linda
Falcidieno, Augusta Giolito, Nicola Corradi, Antonio Garzilli.

© Accademia Ligure di Scienze e Lettere
Palazzo Ducale – Piazza G. Matteotti 5 – 16123 Genova
Tel. 010 565570
e-mail: segreteria@accademialigurediscienzelettere.it
www.accademialigurediscienzelettere.it

ISSN 1122-651X

Autorizzazione del Tribunale di Genova n. 340 del 20 aprile 1955

Realizzazione editoriale: Arta, Genova, www.artastudio.it

Stampato in Italia / Printed in Italy

La pubblicazione del presente volume è stata resa possibile grazie al contributo
del Ministero della Cultura.



INDICE

Tomo 1

Composizione dell'Accademia – Anno 2024	XI
---	----

INAUGURAZIONE DELL'ANNO ACCADEMICO 2025

Relazione consuntiva del Presidente	3
-------------------------------------	---

Tornate pubbliche, conferenze e incontri culturali	13
--	----

BEPPE MANZITTI

<i>“Il mondo è stato creato per finire in un libro”. Origini della scrittura, del libro e della stampa</i>	20
--	----

SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE, NATURALI E MEDICHE

INCONTRI DI STUDIO E ANNIVERSARI

Verso l'ecopiano urbanistico, paesaggistico, energetico a scala globale e locale

MARIO AGOSTINO ROCCA <i>Cambiamento climatico</i>	43
--	----

GIOVANNI SPALLA <i>Verso l'ecopiano ecumenico europeo. Natura, energia e paesaggio per un nuovo ordine urbanistico</i>	53
---	----

PIER ENRICO ZANI <i>L'autonomia energetica dei Dipartimenti scientifici di Valle Puggia</i>	98
--	----

Commemorazione di Giulio Passatore

GIULIO MANUZIO
Ricordo di Giulio Passatore 109

MAURO GIANNINI
La fisica nucleare a Genova e non solo 112

RELAZIONI E CONTRIBUTI

MARZIA BO
Mar Ligure profondo: esplorazioni, scoperte e vulnerabilità 139

MARTINO BOLOGNESI
Il mondo delle (macro)molecole biologiche attraverso gli "occhi" della biologia strutturale 171

GUIDO BUSCA
L'industria chimica: ruolo nella produzione di benessere e di inquinamento ambientale, e nella futura defossilizzazione della società 178

DANIELE CAVIGLIA
Impiego opportunistico di collegamenti radio a microonde per il monitoraggio delle precipitazioni e la mitigazione del rischio alluvionale 208

DAVIDE DE PIETRI TONELLI
Quei centimetri che cambiano la vita: scoperte, sfide e opportunità nella nuova era della genomica 224

ALBERTO DIASPRO
Il microscopio atomico e l'intelligenza artificiale 245

MARCO GROTTI
Isotopi, svelatori di misteri 273

GIANCARLO ICARDI – VINCENZO PAOLOZZI	
<i>Le vaccinazioni tra passato e futuro: dalla variolizzazione alle innovative piattaforme vaccinali</i>	287
GIULIO MANUZIO	
<i>La fusione nucleare e i suoi problemi.</i>	
<i>Ovvero: come cuocere pizze senza un forno</i>	301
PAOLO MODENESI	
<i>Licheni: dal passato al presente</i>	310
GIOVANNI PETRILLO	
<i>Chimici artisti. Artisti chimici</i>	329
ENZO PRANZINI	
<i>La strategia di Noè. Come adattarsi al mare che avanza</i>	359
LORENZO ROBBIANO	
<i>Meraviglie della matematica, espressioni della creatività</i>	387
ENRICA ROCCOTIELLO	
<i>L'uomo, il verde urbano e le soluzioni basate sulla natura (NbS). Un connubio possibile?</i>	408
SAVERIO RUSSO	
<i>Perché le costruzioni degli antichi romani sono durate così a lungo? Il mistero svelato</i>	421
STEFANO SCHIAPARELLI	
<i>L'archeozoologia nell'era dell'intelligenza artificiale</i>	429
STEFANO SOLARINO	
<i>Dalla penna al pennino. I terremoti prima del sismografo</i>	444
MAURO TAIUTI	
<i>Dalle profondità dello spazio agli abissi del mare: il lungo viaggio dei neutrini</i>	459

FORUM SUL CAMBIAMENTO CLIMATICO

MARIO PESTARINO	
<i>Prefazione</i>	467
ALFONSO BELLINI	
<i>Il debito ambientale</i>	470
FERDINANDO BOERO	
<i>Come funziona il mondo</i>	487
BENEDETTO ROCCHI	
<i>Interdipendenze tra sistema economico e risorse idriche</i>	499
GIORGIO ROTH	
<i>Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse idriche</i>	515

Tomo 2

SCIENZE MORALI, LETTERARIE, STORICHE, ECONOMICHE E GIURIDICHE

INCONTRI DI STUDIO E ANNIVERSARI

Mario Morasso, scrittore militante

DUCCIO TONGIORGI	
<i>“Il demone della gara”. Note sulla rappresentazione letteraria del recordman</i>	539
PIER LUIGI FERRO	
<i>Il carteggio tra Mario Morasso e la direzione de “Il Marzocco” (1897-1915)</i>	553
SARA GREGORI	
<i>“Ecco quello che non succede a Napoli”: Morasso sulle pagine del “Mattino”</i>	607

STEFANO VERDINO <i>Mario Morasso su "Ars et Labor" e "L'illustrazione italiana"</i> <i>nel tempo di guerra</i>	621
--	-----

***Bianca Montale tra archivi,
ricerca storica e memorialistica***

RAFFAELLA PONTE <i>Bianca Montale e l'Istituto Mazziniano</i>	639
FRANCO CONTORBIA <i>Una testimone alta e impavida</i>	647
STEFANO VERDINO <i>Bianca Montale memorialista</i>	651
BIANCA MONTALE <i>Agonia e morte del Risorgimento</i>	659

***Joseph Conrad (1857-1924)
tra Ottocento e Novecento***

FAUSTO CIOMPI <i>Come non si deve leggere Conrad e perché vale la pena farlo: sull'alterità conradiana e la promiscuità degli studi</i>	667
GIUSEPPE SERTOLI <i>Parlare, far parlare, tacere. Conrad e il problema della voce narrante</i>	704
NICOLETTA VALLORANI <i>Citizen Kurtz. Il cuore di tenebra da Joseph Conrad a Orson Welles</i>	719
LUISA VILLA <i>Victory: An Island Tale: padri, figli e tempeste</i>	733

*Le radici fenomenologiche
del pensiero di Franco Basaglia.
Un dialogo tra filosofia e psichiatria
a cento anni dalla nascita*

OSCAR MEO

*Le origini dell'orientamento umanistico in psichiatria:
Karl Jaspers e Ludwig Binswanger*

757

PAOLO FRANCESCO PELOSO

*Una fenomenologia applicata all'istituzione:
filosofia e psichiatria in Franco Basaglia*

778

*Giacomo Puccini
a cento anni dalla morte*

MARCO PESCIOTTO

Storie di amori perduti

803

STEFANO VERDINO

Appunti su Puccini drammaturgo

818

*Grandezza e limiti della ragione in Kant.
In occasione del trecentesimo anniversario
della nascita del filosofo*

FRANCESCO CAMERA

Kant. La ragione e il suo "oltre"

829

OSCAR MEO

*Forme della razionalità in Kant. I rapporti fra la metafisica
e le scienze*

850

RELAZIONI E CONTRIBUTI

ȘTEFAN ANDREESCU	
<i>Ultime notizie sul principe Vlad l'Impalatore – Dracula</i>	873
FRANCO ARATO	
<i>Aldo Palazzeschi e gli imperi mancati: una polemica politica</i>	883
CORRADO BOLOGNA	
<i>Riccardo di San Vittore nei Cantos di Ezra Pound</i>	907
LUCA CODIGNOLA	
<i>Europei e africani lungo la costa atlantica: il Quattrocento. Una interpretazione</i>	922
ANTONETTA DE ROBERTIS	
<i>Le Sibille, Augusto e la Sibilla Tiburtina a Genova. Un percorso iconografico fra istanze devote, necessità politiche e autocelebrazione aristocratica</i>	944
CLAUDIO FERRARI	
<i>Il ruolo del Canale di Suez per la navigazione commerciale</i>	968
MARIA FLORA GIUBILEI	
<i>Pietro Gaudenzi a Genova. Formazione artistica e pensionati (1896-1909)</i>	982
GIULIO MANUZIO	
<i>Un uomo dell'Oriente: Utagawa Hiroshige e le sue celebri stampe</i>	1002
GIULIO ODERO	
<i>Pianeta Musica: consigli d'autore</i>	1009
MASSIMO OLDONI	
<i>Sei personaggi oltre il Medioevo</i>	1019
MARGHERITA ORSERO	
<i>Tra Pisa e Genova. Genesi e valore dell'Inferno di Chantilly</i>	1027

MARIO RICCOMAGNO
*L'attuale crisi in Mar Rosso: gli effetti sugli scambi commerciali
internazionali e sulla libertà di navigazione* 1045

GIOVANNI SCIROCCO
Anna Kuliscioff, fra tutela della salute e diritto al lavoro 1054

RICCARDO SPINELLI – ELISA TIZZONI – ANDREA ZANINI
*Lo sviluppo turistico delle Cinque Terre: una storia
di “incauto” successo?* 1064

LOURDES VELÁZQUEZ
Il tempo, il cosmo e la storia nel pensiero Maya 1095

SERGIO VINCIGUERRA
*Giuseppe Zanardelli uno statista di altri tempi
ma ancora attuale* 1108

PREMIO DI RICERCA “LUIGI BRIAN”

ENEA DELFINO
*Iniziare a comprendere: i primi passi di una ricerca antropologica
in un contesto ospedaliero kenyota* 1127

COMPOSIZIONE DELL'ACCADEMIA

Anno 2024*

Consiglio Direttivo

Prof. Mario Pestarino	- <i>Presidente</i>
Prof. Vincenzo Lorenzelli	- <i>Presidente Emerito</i>
Prof.ssa Adriana Saccone	- <i>Vice Presidente</i> <i>e Presidente della Classe di Scienze</i>
Prof.ssa Maria Stella Rollandi	- <i>Vice Presidente</i> <i>e Presidente della Classe di Lettere</i>
Prof. Giulio Manuzio	- <i>Segretario della Classe di Scienze</i>
Prof.ssa Maria Linda Falcidieno	- <i>Segretario della Classe di Lettere</i>
Prof.ssa Augusta Giolito	- <i>Bibliotecario</i>
Prof. Nicola Corradi	- <i>Segretario Generale</i>
Dott. Antonio Garzilli	- <i>Amministratore</i>

* al 31 dicembre



INAUGURAZIONE DELL'ANNO ACCADEMICO 2025

17 DICEMBRE 2024



RELAZIONE CONSUNTIVA DEL PRESIDENTE

Prof. Mario Pestarino

Gentili Ospiti, care Colleghe e cari Colleghi,

vi rivolgo il mio più cordiale benvenuto a questa cerimonia di inaugurazione del 228° anno accademico.

Consentitemi di ricordare alcuni aspetti della storia della nostra Istituzione che ritengo possano essere utili in particolare ai nuovi Accademici corrispondenti.

La nostra Accademia nasce come Istituto Nazionale nel 1798, all'inizio della Repubblica Ligure. Nel manifesto pubblicato il 4 ottobre 1798, giorno dell'Inaugurazione dell'Istituto Nazionale, è scritto: "Venite a cooperare alla pubblica felicità. Sono miei i vostri lumi: per me soltanto vi dotò di talento la natura: l'Istituto è il centro in cui dovete unirvi a fine di formare una massa di luce generale, che diffusa sopra tutta la nazione, perfezioni i costumi, prepari le sagge leggi e distrugga i pregiudizi che annientano la ragione...". La cerimonia di insediamento si svolse a Genova, con particolare solennità e con la partecipazione delle alte cariche della Repubblica Ligure.

Mi piace ricordare altresì quanto ha scritto a suo tempo il nostro Accademico Giovanni Battista Varnier: "L'Istituto Nazionale, un poco accademia e un poco centro organizzativo della istruzione pubblica, fu definito Centro di istruzione e di educazione pubblica; dunque, rappresentò il motore della ricerca scientifica in ambito locale e della trasmissione e organizzazione territoriale del sapere".

Nel 1809 l'Istituto Nazionale divenne Accademia Imperiale di Scienze, Lettere ed Arti che scomparve con la caduta dell'impero napoleonico.

Nel 1889 alcuni professori della Facoltà di Scienze dell'Università di Genova decisero di meglio definire le finalità dell'Accademia e la

trasformarono in Società Ligustica di Scienze Naturali e Geografiche, nel cui Statuto, all'articolo 2, fu scritto: "L'Accademia ha per iscopo di contribuire con studi, pubblicazioni, conferenze e col conferimento di premi e borse (di studio) al progresso così delle Scienze fisiche, naturali, matematiche e mediche, come delle Scienze morali, storiche e letterarie, avvicinando e collegando gli studiosi, collaborando allo sviluppo allo sviluppo e alla diffusione del sapere".

Dal 1798 ad oggi, figure scientificamente autorevoli hanno fatto parte della nostra Accademia la cui denominazione è cambiata più volte nel tempo così come ha avuto diverse sedi, ma ha mantenuto gli scopi indicati nel sopracitato art. 2.

Ad oggi l'Accademia ha un organico costituito da 167 Soci:

- 92 Soci Effettivi: 48 della Classe di Scienze e 44 della Classe di Lettere;
- 75 Soci Corrispondenti: 34 della Classe di Scienze e 41 della Classe di Lettere.

Inoltre, i Soci Accademici Onorari sono attualmente 12.

Sulla base di questo organico è stato predisposto l'Annuario 2024 che, a seguito della modificazione statutaria, riporterà tutti i dati al 31 dicembre 2024 e sarà disponibile per tutti gli Accademici da gennaio 2025.

Il Consiglio Direttivo e l'Assemblea degli Accademici effettivi hanno approvato le proposte di nomina di 2 nuovi Accademici Onorari, 9 nuovi Accademici Effettivi e 29 nuovi Accademici Corrispondenti che entreranno in carica il 1° gennaio 2025.

Purtroppo, nel corso dell'anno sono mancati gli Accademici:

- Giulio Passatore, Accademico Onorario, già professore ordinario di Istituzioni di Fisica teorica dell'Università di Genova (7 gennaio 2024);
- Giuliano Fierro, Accademico Onorario, Presidente dell'Accademia dal 2015 al 2017, già professore ordinario di Geologia marina dell'Università di Genova (23 gennaio 2024);
- Sergio Poli, Accademico Effettivo della Classe di Lettere, già professore ordinario di Lingua e Letteratura francese dell'Università di Genova (4 aprile 2024);

- Eugenio Ceroni, Accademico Corrispondente della Classe di Scienze, ingegnere (26 maggio 2024);
- Francesco Surdich, Accademico Effettivo della Classe di Lettere, già professore ordinario di Storia delle esplorazioni geografiche dell'Università di Genova (6 agosto 2024);
- Luigi Surdich, Accademico Effettivo della Classe di Lettere, già professore ordinario di Letteratura italiana dell'Università di Genova (27 agosto 2024);
- Emilio Maura, Accademico effettivo della Classe di Scienze, medico e psichiatra (27 settembre 2024);
- Enrico Beltrametti, Accademico Onorario, già Magnifico Rettore e professore ordinario di Fisica teorica dell'Università di Genova (12 dicembre 2024).

A questi cari amici va il nostro ricordo affettuoso e riconoscente e alle Loro famiglie il rinnovo delle più sentite condoglianze.

In questo anno accademico siamo riusciti ad attuare un consistente numero di attività culturali grazie all'impegno di tutti gli Accademici e ai contributi economici ottenuti dal Ministero della Cultura, dal Ministero dell'Università e della Ricerca (5xmille) e dalla Fondazione Carige, ai quali esprimiamo il nostro doveroso ringraziamento.

Conferenze e convegni

La nostra consolidata tradizione, ben nota anche agli amici dell'Accademia che si avvalgono delle nostre attività di diffusione culturale, prevede che ogni lunedì e giovedì si svolga un incontro accademico fondato su una conferenza tenuta da un Accademico o da Colleghi invitati.

In questo anno 2024 abbiamo realizzato un totale di 58 conferenze.

Inoltre, nell'ambito del Forum sul Cambiamento Climatico, articolato in tre sessioni, sono state svolte complessivamente 9 conferenze, alcune tenute da nostri Accademici.

Nel corso di quest'anno si sono svolti i seguenti convegni:

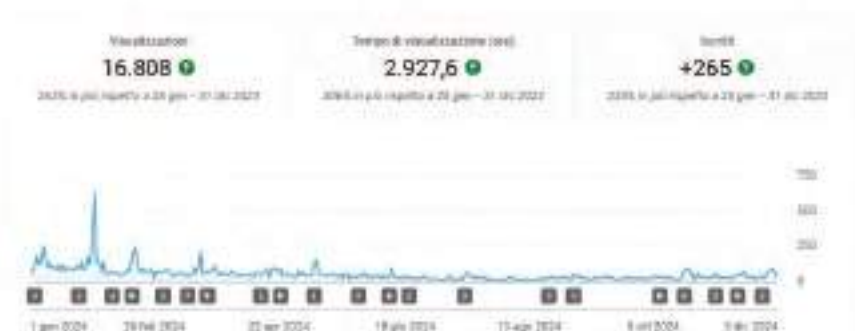
- "Stefano Morasso, scrittore militante" (22 febbraio), organizzato dall'Accademico Stefano Verdino.
- "L'opera di Bianca Montale (archivi, ricerca storica, memorialistica)" (4 marzo), organizzato dall'Accademico Stefano Verdino.

- “Giornata in ricordo di Maria Guendalina Cattaneo Della Volta” (Sestri Levante, 21 aprile), organizzata dagli Accademici Maria Stella Rollandi e Beppe Manzitti, da Giuseppe Isolero e dall’Associazione Amici del Carlo Felice e del Conservatorio Paganini.
- “Giornata di studio in onore di Giuliano Fierro” (Università di Genova, 4 giugno), organizzata dall’Accademico Nicola Corradi.
- “Verso l’ecopiano urbanistico paesaggistico energetico a scala globale e locale. Il Progetto pergola giardino solare applicato agli insegnamenti universitari di Valle Puggia e ad aree urbane, industriali e portuali di Genova” (16 settembre), organizzato dall’Accademico Giovanni Spalla e da Pier Enrico Zani.
- “Lo sviluppo turistico delle Cinque Terre: una storia di ‘incauto’ successo?” (11 novembre), organizzato dall’Accademico Andrea Zanini.
- “Joseph Conrad (1857-1924) tra Ottocento e Novecento” (25 novembre), organizzato dall’Accademico Giuseppe Sertoli.

Ogni singolo evento è stato trasmesso in streaming attraverso la piattaforma Zoom e la registrazione audiovisiva, dopo un necessario lavoro di editing, è stata inserita nel canale YouTube dell’Accademia (https://www.youtube.com/channel/UC56syF7ZUUueSK5_XM232LQ).

Esaminando i dati forniti da YouTube risulta che nel 2024 i nostri video hanno raggiunto un totale di 16.808 visualizzazioni, corrispondenti a circa 3.000 ore di tempo di visualizzazione (dati quadruplicati rispetto alle statistiche 2023). Anche gli iscritti sono aumentati in maniera proporzionale.

I tuoi video hanno ricevuto 16.808 visualizzazioni nel 2024



In totale siamo vicini alla soglia di 500 iscritti, grazie alla quale verranno sbloccate alcune funzionalità di monetizzazione su YouTube.

Le principali fonti di visualizzazione sono state le seguenti:



Ogni conferenza è stata preannunciata attraverso Facebook e Instagram raggiungendo un buon numero di visite:



Questi dati che vi ho mostrato sono una preziosa documentazione sul complesso dei nostri eventi culturali che rimarranno fruibili anche nel tempo da parte di studiosi, studenti e altre persone interessate.

Eventi patrocinati

Nel corso dell'anno l'Accademia ha patrocinato numerosi eventi:

- Centro Paganini e Amici di Paganini: "L'editoria paganiniana tra passato e futuro", una giornata di studi dedicata al grande violinista e compositore genovese (13 gennaio).
- Nell'ambito delle manifestazioni di Genova Capitale Italiana del Libro 2023: conferenza di Luigi Giannitrapani, "Il Gattopardo di Giuseppe Tomasi di Lampedusa", in collaborazione con Amici dei Musei Liguri e di Palazzo Ducale e Palazzo Ducale Fondazione per la Cultura (28 febbraio).
- Ciclo di tre conversazioni sulla musica intitolato "Pianeta musica: consigli d'autore", organizzato dal Centro Paganini per la ricerca e la didattica e curate da Giulio Odero (19 settembre, 30 settembre, 14 ottobre).
- Presentazione del numero 22 (2023) di "Itineraria", contenente gli atti del convegno "Genova medievale, Genova moderna. Cultura, letteratura, prospettive e sinergie", organizzata dall'Accademico Stefano Pittaluga (29 ottobre).
- Serie di quattro conferenze intitolata "Paesaggi identitari – paesaggi limite, dal mare alle Alpi", organizzata da Milena Matteini, Associazione Giardini e Paesaggi (ottobre-novembre).
- Evento intitolato "Genova dice sì alla Carta Etica dello Sport femminile", organizzato dall'Accademica Maria Clelia Galassi e dal Soroptimist International Italia (8 novembre).
- Ciclo di dieci conversazioni su "L'Arte contemporanea dal secondo dopoguerra a oggi", organizzato da Amici dei Musei (20 novembre, 4 dicembre, gennaio-aprile 2025).
- Giornata di studi sul tema "Il demoniaco al tempo di Paganini tra musica, arte, letteratura", organizzata dal Centro Paganini (6 dicembre).
- Presentazione del libro *Ludwig van. Vita e opere di Beethoven*, organizzata dal Centro Paganini (10 dicembre).
- Evento su "L'attualità di Mario Fazio (Alassio 1924 - Pietra Ligure 2004)", a cura di Giovanna e Lorenzo Fazio (19 dicembre).

Sono stati consolidati i rapporti di collaborazione con diverse associazioni culturali della Liguria; con alcune di esse sono stati attuati protocolli di collaborazione:

- Accademia culturale di Rapallo;
- Associazione Amici dei Musei;
- Associazione Giardini e Paesaggi;
- Centro Paganini e Associazione Amici di Paganini;
- Società degli Amici del Museo di Storia Naturale “Giacomo Doria” di Genova;
- Società Economica di Chiavari;
- Teatro Necessario di Genova.

Corsi e attività didattiche

È continuata la collaborazione con UNIAUSER (Università popolare dell’età libera) per ospitare, nella nostra sala conferenze, corsi tenuti sia da nostri Accademici sia da studiosi scelti concordemente.

Atti e pubblicazioni

Nel corso dell’anno è stato pubblicato il V Volume della VII Serie degli Atti dell’Accademia, che raccoglie l’attività svolta nel 2023. Il volume contiene altresì gli Atti del secondo Seminario permanente sulla “Transizione ecologica ed energetica. Il sapere e il saper fare” tenutosi nei mesi di ottobre e novembre del 2023.

Sono stati pubblicati due volumi della Collana di Studi e Ricerche. Il volume LXXII raccoglie gli Atti del Convegno di Studi “Mario Manlio Rossi tra Irlanda, Scozia e Inghilterra” tenutosi il 20 febbraio 2023; il volume LXXIII raccoglie gli Atti del Convegno di Studi “Raccontare a piccoli e grandi. I libri di Beatrice Solinas Donghi, 1923-2023” tenutosi il 23 marzo 2023.

Ricordo che ormai da due anni tutte le nostre pubblicazioni sono messe online sul sito web dell’Accademia e rese così disponibili a tutti gli studiosi interessati.

Questo ha permesso di portare al minimo la tiratura dell’edizione a stampa, comunque indispensabile per soddisfare i doverosi omaggi agli Autori e ai Curatori nonché per rispettare gli accordi di scambio esistenti con altre Accademie nazionali e internazionali e diversi Enti culturali.

È in fase di preparazione il VI Volume della VII Serie degli Atti che raccoglierà i contributi delle conferenze e degli incontri svolti nel 2024 e gli atti del Forum sul Cambiamento climatico.

Biblioteca

La Biblioteca dell'Accademia è stata ulteriormente potenziata e ha continuato a rendere disponibile la consultazione al pubblico. Con i contributi assegnati dal MIC è stato inoltre possibile rinnovare le strutture della biblioteca. L'Accademia ha continuato altresì ad incrementare il patrimonio librario acquistando nuovi libri, anche se, purtroppo, in questo anno il MIC non ha distribuito il contributo straordinario concesso negli anni precedenti per l'acquisto di libri di editori italiani.

Premi di Studio e di Ricerca

L'attività istituzionale di erogazione di Premi di Studio e di Ricerca è resa possibile tradizionalmente dal reddito dei donativi e lasciti che, purtroppo, subisce anno dopo anno una riduzione significativa.

Tuttavia, il Consiglio Direttivo ha assegnato, sia pure in forma ridotta, un Premio di Laurea grazie al reddito dell'apposito lascito istituito per volontà del Prof. Luigi Brian, già Presidente della nostra Accademia. La Commissione di valutazione, dopo attento esame delle domande, ha dichiarato vincitore per il Premio di Laurea il Dott. Hélios Debrassine per la tesi dal titolo "The Humans Behind the Myths: Investigating the Diffusion of Mythological Motifs with Genetic Data".

Nel corso di quest'anno è stato anche consegnato al Dott. Gianluca Cerruti il saldo del valore di € 1.500,00 del Premio di Studio biennale finanziato dal nostro Accademico Beppe Manzitti e intitolato alla memoria del padre Francesco Manzitti. Rinnovando i più sentiti ringraziamenti al donatore, auspichiamo che il Premio di Studio possa costituire un esempio e uno stimolo per essere imitato, valorizzando così le tante personalità che hanno onorato il mondo aziendale, accademico e culturale della nostra Città e della nostra Regione.

Riconoscimenti agli Accademici

Anche quest'anno associamo alla presentazione dei premi da noi dedicati ai giovani la segnalazione dei riconoscimenti, dei premi e delle onorificenze ottenuti dai membri dell'Accademia nel corso dell'anno accademico. L'elenco che segue attesta il prestigio e l'impegno culturale, professionale e sociale dei nostri Accademici. A loro esprimiamo le nostre più sentite felicitazioni, con i migliori auguri di un proficuo proseguimento delle loro attività.

Gabriella AIRALDI	Conferimento da parte del Comune di Genova della Medaglia Colombiana in quanto “illustre storica di fama internazionale e autrice di importanti pubblicazioni” (12 ottobre 2024).
Massimo BACIGALUPO	Conferimento del Premio speciale Poesia 2024 nell’ambito del Pisa Book Translation Awards (4 ottobre 2024).
Giorgio BAVESTRELLO	Elezione a Preside della Scuola di Scienze matematiche, fisiche e naturali dell’Università di Genova (dal 1° novembre 2024).
Alberto DIASPRO	Nomina a Cavaliere della Repubblica. Conferimento del Premio Enrico Fermi della Società Italiana di Fisica, come riconoscimento dei suoi importanti risultati ottenuti nel campo della microscopia ottica. Conferimento del Premio Pericu per la sua notevole attività di divulgazione scientifica (17 dicembre 2024).
Antonio GUERCI	Nomina a Chevalier des Palmes Académiques da parte dello Stato francese (ottobre 2024).
Giancarlo ICARDI	Nomina a Cavaliere della Repubblica.
Emanuele MAGI	Elezione a Direttore del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (DCCI) dell’Università di Genova (dal 1° novembre 2024).
Aristide F. MASSARDO	Conferimento del titolo di Dottore <i>honoris causa</i> da parte del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell’Università Aristotele di Salonicco (AUTH) (Grecia).
Patrizia PEREGO	Elezione a Preside della Scuola Politecnica dell’Università di Genova (dal 1° novembre 2024).
Raffaella PONTE	Nomina a Ispettore Archivistico Onorario concessa dalla Direzione Generale Archivi del Ministero della Cultura (23 gennaio 2024).
Daniela PREDA	Elezione a Direttore del Dipartimento di Scienze Politiche e Internazionali (DiSPI) dell’Università di Genova (dal 1° novembre 2024).

Micaela ROSSI	Elezione a Preside della Scuola di Scienze Umanistiche dell'Università di Genova (dal 1° novembre 2024).
Andrea ZANINI	Nomina a Presidente del CeSAT, Centro Servizi di Ateneo Territoriale dell'Università di Genova (dal 30 novembre 2024).

Concludo questa mia relazione con un affettuoso e sentito ringraziamento al nostro Presidente emerito, prof. Vincenzo Lorenzelli, per il significativo contributo dato alla nostra Accademia, augurandogli di poter ritornare al più presto tra di noi.

Ringrazio tutto il Consiglio Direttivo che mi ha validamente e costantemente sostenuto durante questo anno accademico, il Revisore dei Conti dott. Giuseppe Lombardo per la sua puntuale verifica dei rendiconti amministrativi e ovviamente tutto il corpo accademico.

Vorrei altresì ringraziare la dott.ssa Maria Bibolini per il suo costante e valido impegno nella gestione della Biblioteca, la dott.ssa Laura Fantino per il continuo e insostituibile supporto nella gestione delle attività di Segreteria e il nostro storico collaboratore volontario sig. Bruno Settembrini.

Nella certezza che la nostra Accademia attraverso i propri componenti saprà sempre onorare il motto che compare nel suo simbolo “Nil volentibus arduum”, dichiaro aperto l'anno accademico 2025, 228° dalla fondazione.

TORNATE PUBBLICHE, CONFERENZE E INCONTRI CULTURALI

Sono aperte non solo agli Accademici ma anche a tutti gli interessati, grazie a una capillare opera di comunicazione.

Gennaio

Lunedì 15 ARISTIDE FAUSTO MASSARDO, Accademico, *Just Transition = f(En). Energy, Entropy, Exergy, Efficiency, Effectiveness, Engineering, Electricity, Environment, Economics, Electrolysis, Excess, E-fuels, E-storage ... Europe!*

Giovedì 18 ALBERTO DIASPRO, Accademico, *Il microscopio atomico e l'intelligenza artificiale.*

Lunedì 22 MARGHERITA ORSERO, Università di Genova, Florida International University, *Tra Pisa e Genova. Genesi e valore dell'inferno di Chantilly.*

Giovedì 25 ENRICO DI BELLA, Università di Genova, *Le prospettive demografiche dell'UE fra invecchiamento e nuove tecnologie.*

Lunedì 29 ALESSANDRO VERRI, Università di Genova, *Un punto di vista eretico sull'intelligenza artificiale.*

Febbraio

Giovedì 1 PAOLO MAZZARELLO, Università di Pavia, *Camillo Golgi e l'origine delle neuroscienze.*

Lunedì 5 JOSÉ ENRIQUE RUIZ-DOMÈNEC, Università Autonoma di Barcellona (Spagna), *Sei storici in cerca del Mare Mediterraneo.*

Giovedì 8 LUCA CODIGNOLA BO, Accademico, *Gesuiti ed ex Gesuiti sulla frontiera nord-atlantica (1762-1814). Fu vera soppressione?*

Lunedì 12 LUIGI CAROBENE, Associazione Italiana per lo Studio del Quaternario, *Testimonianze degli eventi geologici che hanno modellato la superficie terrestre negli ultimi 2,6 milioni di anni.*

Giovedì 15 DAVIDE DE PIETRI TONELLI, IIT - Istituto Italiano di Tecnologia, *Quei centimetri che cambiano la vita: scoperte, sfide e opportunità nella nuova era della Genomica.*

Giovedì 22 Convegno *Mario Morasso, scrittore militante*, a cura di STEFANO VERDINO, Accademico, con interventi di: DUCCIO TONGIORGI, Direttore DIRAAS, Università di Genova; PIER LUIGI FERRO, Italianista, Savona; SARA GREGORI, Dottoranda DIRAAS, Università di Genova; STEFANO VERDINO, Accademico.

Lunedì 26 MARCO GROTTI, Università di Genova, *Isotopi, svelatori di misteri.*

Giovedì 29 EMANUELE ANGELUCCI, Accademico, *La terapia cellulare: ultima frontiera della ricerca medica.*

Marzo

Lunedì 4 Convegno *L'opera di Bianca Montale (archivi, ricerca storica, memorialistica)*, a cura di STEFANO VERDINO, Accademico, con interventi di: RAFFAELLA PONTE, Accademica; DINO COFRANCESCO, Accademico; STEFANO VERDINO, Accademico; FRANCO CONTORBIA, già Professore dell'Università di Genova.

Giovedì 7 SERGIO VINCIGUERRA, Accademico, *Giuseppe Zanardelli (1826-1903) uno statista d'altri tempi, ma ancora attuale.*

Lunedì 11 GUIDO BUSCA, Accademico, *L'Industria Chimica: ruolo nella produzione di benessere e di inquinamento ambientale, e nella futura defossilizzazione della società.*

Giovedì 14 MARZIA BO, Università di Genova, *Mar Ligure profondo: esplorazioni, scoperte e vulnerabilità.*

Lunedì 18 OSCAR MEO e PAOLO FRANCESCO PELOSO, Accademici, *Le radici fenomenologiche del pensiero di Franco Basaglia. Un dialogo tra filosofia e psichiatria a cento anni dalla nascita.*

Giovedì 21 CORRADO BOLOGNA, Scuola Normale Superiore di Pisa, *L'Arca della mente. Il Riccardo di San Vittore di Ezra Pound*.

Lunedì 25 PAOLO MODENESI, già Professore dell'Università di Genova, *Licheni: dal passato al presente*.

Aprile

Giovedì 4 BARBARA MAZZOLAI, IIT - Istituto Italiano di Tecnologia, *I nuovi robot? Crescono e si muovono come le piante*.

Lunedì 8 ȘTEFAN ANDREESCU, Università di Bucarest (Romania), *Ultime notizie sul principe Vlad l'impalatore – Dracula*.

Giovedì 11 MARTINO BOLOGNESI, Accademico dei Lincei, Professore Emerito dell'Università di Milano, *Il mondo delle (macro)molecole biologiche attraverso gli "occhi" della biologia strutturale*.

Lunedì 15 ENRICA ROCCOTIELLO, Università di Genova, *L'uomo, il verde urbano e le soluzioni basate sulla natura (NBS). Un connubio possibile?*

Giovedì 18 GIOVANNI PETRILLO, Accademico, *Chimici artisti, Artisti chimici*.

Lunedì 22 CLAUDIO FERRARI, Accademico, *Il ruolo del Canale di Suez nella navigazione commerciale*.

Lunedì 29 PIETRO LAZAGNA, già Docente di Scuola Superiore, *La Fondazione Demetrio Canevari. Un bilancio a quattrocento anni di distanza*.

Maggio

Giovedì 2 ORIETTA MONTICELLI, Università di Genova, *Plastica... non solo da petrolio*.

Lunedì 6 STEFANO SOLARINO, Accademico, *Dalla penna al pennino: i terremoti prima del sismometro*.

Giovedì 9 MAURA BOFFITO, già Professore dell'Università di Genova, *Coppedè e medievalismo in architettura*.

Lunedì 13 DENISE BEZZINA, Università di Genova, *Le risorse delle donne: spazi di iniziativa nell'economia a Genova nei secoli XII-XIV*.

Giovedì 16 GIANCARLO ICARDI, Accademico, *Le vaccinazioni tra passato e futuro: dalla variolizzazione alle innovative piattaforme vaccinali.*

Lunedì 20 MAURO TAIUTI, Università di Genova, INFN, *Dalle profondità dello spazio agli abissi del mare: il lungo viaggio dei neutrini.*

Mercoledì 22 LOURDES VELÁZQUEZ, Università Panamericana di Città del Messico, *Interpretazione della matematica nella cultura maya.*

Giovedì 23 MASSIMO OLDONI, Professore Emerito dell'Università di Roma "La Sapienza", *Sei personaggi oltre il Medioevo.*

Lunedì 27 GIULIO MANUZIO, Accademico, *Le stampe di Hiroshige, un uomo dell'Oriente.*

Giovedì 30 ENZO PRANZINI, Università di Firenze, *La strategia di Noè. Come adattarsi al mare che avanza.*

Giugno

Lunedì 3 STEFANO SCHIAPARELLI, Università di Genova, *La Zooarcheologia: un affascinante viaggio all'interno dell'interazione tra gli esseri umani e gli altri animali.*

Giovedì 6 FERDINANDO FASCE, Accademico, *Un americano alla corte di re Artù. Mark Twain e il Medioevo.*

Lunedì 10 GIOVANNI SCIROCCO, Università di Bergamo, *Matteotti. L'ultimo discorso.*

Giovedì 13 DANIELE CAVIGLIA, Accademico, *Impiego opportunistico dei collegamenti radio a microonde per il monitoraggio delle precipitazioni e la mitigazione del rischio alluvionale.*

Settembre

Lunedì 16 *Verso l'ecopiano urbanistico paesaggistico energetico a scala globale e locale. Il Progetto pergola giardino solare applicato agli insediamenti universitari di Valle Puggia e ad aree urbane, industriali e portuali di Genova*, con interventi di: MARIO ROCCA, Università di Genova; MARCO FOSSA, Università di Genova; GIOVANNI SPALLA, Accademico; PIER ENRICO ZANI, Fisico; DANIELE CUNEO, graphic designer.

Giovedì 19 GIULIO ODERO, Musicologo, *Dietro il sipario.*

Lunedì 23 LAURA CANCEDDA, IIT - Istituto Italiano di Tecnologia, *Dalla ricerca di base a una startup per farmaci per il Sistema Nervoso Centrale: una strada lunga e tortuosa.*

Giovedì 26 SAVERIO RUSSO, Accademico, *Perché le costruzioni degli antichi romani sono durate così a lungo? Svelato finalmente il mistero.*

Lunedì 30 GIULIO ODERO, Musicologo, *Musica dal vivo e musica riprodotta.*

Ottobre

Giovedì 3 FRANCO ARATO, Accademico, *Aldo Palazzeschi e gli imperi mancati: una polemica politica.*

Lunedì 7 ALESSANDRO MORELLI, già Professore dell'Università di Genova, *Sonno e anestesia sono ancora oggi misteriosi, oppure la funzione energetica della mielina ci consente di decifrare il meccanismo di entrambi?*

Giovedì 10 Forum sul cambiamento climatico, sessione “Cambiamento climatico e biodiversità”: ANTONELLO PASINI, Fisico del clima, CNR, Roma, *La crisi climatica recente: una sfida per tutti noi*; FERDINANDO BOERO, Presidente Fondazione Anton Dohrn, Napoli, *Come funziona il mondo*; ALESSANDRO CHIARUCCI, Università di Bologna, *Sfide per la conservazione della biodiversità nell'Antropocene.*

Lunedì 14 GIULIO ODERO, Musicologo, *Il linguaggio musicale.*

Giovedì 17 FRANCA BALLETTI, già Professore dell'Università di Genova, *Genova: la formazione della città contemporanea fra Ottocento e Novecento.*

Lunedì 21 FRANCESCO LATINO CHIOCCI, Università di Roma “La Sapienza”, *Pericolosità geologiche nei mari italiani.*

Giovedì 24 Forum sul cambiamento climatico, sessione “Fra centro e periferia: politiche del territorio”: ALFONSO BELLINI, Geologo, Studio Associato Bellini, Genova, *Il debito ambientale*; DARIO FORNARA, Direttore di Ricerca del Gruppo Davines – Rodale Institute European Regenerative Organic Center (EROC), Parma, *Come accelerare la transizione*

ecologica: sinergie tra agricoltura biologica rigenerativa e cosmetica; DANIELA MINETTI, Regione Liguria, Settore politiche della natura e delle aree interne, protette e marine, parchi e biodiversità, *La dimensione territoriale locale fra qualità ambientale e competitività: progetti e casi di studio*.

Lunedì 28 MARIA FLORA GIUBILEI, Storica dell'arte, *Per la conoscenza dell'opera del pittore genovese Pietro Gaudenzi (1880-1955). Nuovi documenti, celebri mentori ed esposizioni personali*.

Giovedì 31 LUCA CRESCENZI, Università Ca' Foscari Venezia, *La critica della cultura di Franz Kafka*.

Novembre

Lunedì 4 LORENZO ROBBIANO, Accademico, *Meraviglie della Matematica. Teoremi, espressioni della creatività*.

Giovedì 7 LIBERATO MANNA, IIIT - Istituto Italiano di Tecnologia, *L'affascinante chimica dei Quantum Dots*.

Lunedì 11 *Lo sviluppo turistico delle Cinque Terre: una storia di "incauto" successo?*, con interventi di: RICCARDO SPINELLI, Università di Genova; ELISA TIZZONI, Università di Genova; ANDREA ZANINI, Accademico.

Giovedì 14 Forum sul cambiamento climatico, sessione "Gestione delle acque": GIORGIO ROTH, Preside della Scuola politecnica, DICCA, Università di Genova, *Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse*; BENEDETTO ROCCHI, DISEI, Università di Firenze, *Interdipendenze tra sistema economico e risorse idriche*; ELISABETTA TROVATORE, Direttore scientifico e Commissario ARPAL, *Monitoraggio e modellistica dell'Agenzia regionale per la Protezione dell'Ambiente a servizio della gestione integrata delle acque in un contesto di cambiamento climatico*.

Lunedì 18 MARIO RICCOMAGNO, Avvocato, *L'attuale crisi in Mar Rosso: gli effetti sugli scambi commerciali internazionali e sulla libertà di navigazione*.

Giovedì 21 GIULIO MANUZIO, Accademico, *La fusione nucleare e i suoi problemi ovvero come cucinare pizze senza il forno*.

Lunedì 25 Convegno *Joseph Conrad (1857-1924) tra Ottocento e Novecento*, a cura di GIUSEPPE SERTOLI, Accademico, con interventi di:

FAUSTO CIOMPI, Università di Pisa; GIUSEPPE SERTOLI, Accademico; NICOLETTA VALLORANI, Università di Milano; LUISA VILLA, Accademica.

Giovedì 28 MARCO PES CETTO, Medico e Musicologo e STEFANO VERDINO, Accademico, *Giacomo Puccini a cento anni dalla morte: storie di amori perduti*.

Dicembre

Lunedì 2 MAURO GIANNINI, già Professore dell'Università di Genova e GIULIO MANUZIO, Accademico, *La fisica nucleare: a Genova ma non solo*.

Giovedì 5 AGNESE SEMINARA, Università di Genova, *L'intelligenza artificiale per capire il comportamento animale in un ambiente fisico imprevedibile*.

Lunedì 9 FRANCESCO CAMERA, Università di Genova e OSCAR MEO, Accademico, *Grandezza e limiti della ragione in Kant. In occasione del trecentesimo anniversario della nascita del filosofo*.

Giovedì 12 GIAN ANDREA ROLLANDI, Medico, *Evoluzione della tomografia computerizzata (tc): da Hounsfield alla Spectral tc*.

BEPPE MANZITTI

*“Il mondo è stato creato per finire in un libro”.
Origini della scrittura, del libro e della stampa*

Lettura magistrale per l'inaugurazione dell'Anno Accademico 2025

L'umanità deve molto al libro.

La nostra esistenza ha avuto nel libro il suo utensile più versatile e insieme uno dei suoi emblemi più gloriosi. La vita emotiva, interiore, degli uomini ha trovato nei libri quelle comprensioni, quel colloquio, quelle intime corrispondenze a sé che non sempre gli altri uomini sono stati in grado di offrire. Leggere è sempre un viaggio, un andar via per ritrovarsi; pur essendo solitamente un atto sedentario ci restituisce alla nostra condizione di passeggeri su questa terra.

Il libro appare come una sorta di ruota del sapere e dell'immaginario che le rivoluzioni tecnologiche temute o annunciate, dal computer ai social network all'e-book, non potranno mai cancellare del tutto. Se parliamo di durata nel tempo solo la carta ha permesso nei secoli precedenti a quello in cui oggi viviamo la conservazione delle parole che gli uomini scrivevano.

Sono arrivate fino a noi le prime opere, dei disegni dell'arte rupestre preistorica: rettangoli, rombi, segni e righe, graffiti incisi sulle pareti di grotte scoperte in Europa, in Africa e in America. Dopo il disegno l'uomo creerà il vero e proprio mezzo di comunicazione tra sé e gli altri esseri umani, la scrittura: in Oriente, intorno al 3500 a.C. con la scrittura pittografica e, nel 3100, in Egitto con i geroglifici (dal greco *hieros*, sacro, e *glyphhein*, incisione). Il pittogramma nasce in Mesopotamia, in una regione prossima alle foci del Tigri e dell'Eufrate, nella città sumera di Ourouk. Si tratta di una scrittura costituita da segni che rappresentano “cose” (dal latino *pictus*, immagine, e dal greco *gramma*, iscrizione), in pratica mar-

chi, timbri. A ogni cosa il suo segno, infinite cose infiniti segni. Sia in Egitto che in Mesopotamia la scrittura nasce sotto forma di immagine: tre triangoli accostati rappresentano ad esempio una catena montuosa.¹

La parola “libro” deriva dal latino *liber*. Il termine designava in origine la sottile parte interna della corteccia di alcuni alberi che, insieme alla pietra, è stata utilizzata come supporto delle prime forme di scrittura. Il termine greco *biblion* invece deriva da *byblos*, papiro. Ha dato origine alla parola “bibbia” e ricompare in molti vocaboli quali biblioteca, bibliofilo e così via.

Nella classica terna “leggere, scrivere e far di conto”, l’attività che storicamente è venuta per prima è stata proprio il far di conto. Una volta conclusi, i conteggi dovevano essere conservati e archiviati.

Una tesi assai diffusa che risale già a Platone contrappone l’oralità alla scrittura, a tutto favore della prima, che essendo più vera, diretta, spontanea, naturale sarebbe stata sovrastata ed espropriata dalla seconda, per definizione strumento del potere. Ma in realtà, al suo nascere, la scrittura si sovrappone all’oralità senza interromperne la tradizione. Essa realizza quel che l’oralità non sa e non può fare, ossia per l’appunto far di conto, per poi metterne per iscritto i risultati.

La seconda fase nella lunga storia del libro ha inizio nella metà del III millennio a.C. ed è costituita dalla scrittura sillabica. L’idea che la ispira è quella di connettere i segni non alle cose ma alle corrispondenti parole o, più precisamente, alle sillabe da cui le parole sono costituite.

Quella egiziana e quella mesopotamica, come già accennato, sono le prime vere scritture in grado di dare un senso compiuto e articolato alla frase. Si scrive su tutto, sulla pietra polita, sulle piccole scaglie di pietra, in Mesopotamia sull’argilla, in tavolette formattate, supporto per la scrittura economico e molto agevole, utilizzando uno stilo dalla punta triangolare che imprime un segno a forma di cuneo. L’intera epopea di Gilgamesh sta tutta in ventidue tavolette.

In Egitto invece si scrive su fogli ottenuti spianando, incollando, incrociando, seccando e verniciando le fibre tratte dal midollo di una ciperacea, il *Cyperus papyrus*. Scrive in un suo saggio molto coinvolgente e ben documentato la filologa spagnola Irene Vallejo:

¹ È interessante notare come quasi tutte le lingue basate su un sistema ideografico siano scomparse nel corso del tempo, ad eccezione del cinese.

L'uomo, dopo aver scritto su pietra, fango, legno e metallo, vedeva il linguaggio prendere casa nella materia viva. Il primo libro nacque quando le parole trovarono rifugio nel midollo di una pianta acquatica. E in quel modo il libro divenne subito un oggetto flessibile, leggero, pronto a viaggiare e vivere avventure.²

Dato che il papiro non può essere piegato né scritto su entrambi i lati, i primi libri assumono la forma di rotolo, *volumen* in latino, da cui il termine “volume”. I rotoli composti da foglie incollate l'una accanto all'altra, che potevano raggiungere una dozzina di metri di lunghezza, venivano avvolti attorno a bastoni di legno o d'avorio; le colonne scritte si attestavano tra le 25 e le 45 righe.

Il papiro è un supporto costosissimo e di grande qualità, una mirabile superficie sottile, leggera ma consistente. Fra tutti i materiali impiegati nel corso della storia è senza dubbio alcuno il più bello e il più elegante. Non sarà solo il materiale per eccellenza del mondo antico, ma sopravvivrà fino ad oggi nelle parole che in inglese, francese, spagnolo e tedesco designano la carta: *paper*, *papier*, *papel*, *Papier*.

Al testo scritto, qualunque sia il suo supporto materiale, si riconosce una certa autorevolezza, perché nella sua origine latina *auctoritas* ha la stessa radice di “autore”. La loro autorevolezza appare evidente nei codici liturgici, giuridici, scientifici e tecnici proprio perché per la sua struttura intrinseca la scrittura è normativa e prescrittiva.

Le parole “scriba”, “scritto”, “iscrizione” collegano l'atto dello scrivere al potere, a forme di governo, tant'è vero che “proscrizione” appartiene alla stessa famiglia lessicale che proclama l'esilio o la privazione della libertà.

In quel tempo c'è tutto, tranne il libro. Nel senso che quelli delle scritture sillabiche sono testi, non libri. Di quel che sarà poi il libro mancano innanzitutto la lunghezza, ma poi, e principalmente, la forma e l'aspetto concluso. Il lascito più importante delle scritture logosillabiche è anche un altro e cioè quello dell'apertura di scuole per insegnare a scrivere. Dallo scrivere deriva infatti il nome di chi possiede questa abilità: lo scriba. L'iconografia egizia abbonda di immagini di scribi intenti

² Irene Vallejo, *Papyrus. L'infinito in un giunco. La grande avventura del libro nel mondo antico*, Firenze, Giunti-Bompiani, 2021 (ed. orig. Madrid, Siruela, 2019).

a vergare geroglifici. Queste raffigurazioni non esistono affatto ad Atene o a Roma, dove il lavoro di copiatura era riservato agli schiavi.

In compenso sia i greci che i romani ci hanno lasciato numerose scene di lettura e molti testi che testimoniano anche il commercio dei libri e la volontà di collezionarli e di proteggerli. Ne è dimostrazione l'esistenza in età ellenistica di grandi biblioteche come quella di Pergamo in Asia Minore e di Alessandria d'Egitto che avrebbero raccolto più di 500.000 volumi, un dato che presuppone l'esistenza di una rete ben organizzata di botteghe di copisti.

La successiva trasformazione della scrittura avviene tra la fine del II e l'inizio del I millennio a.C. e giacché il baricentro della cultura si sposta verso Occidente, gli scenari sono ormai le coste del Mediterraneo orientale e poi l'area egea e greca. L'idea della nuova scrittura è quella di legare i segni non più alle sillabe, ma ai singoli suoni. Siamo così arrivati all'alfabeto. Una formidabile semplificazione che offre la possibilità di una perfetta sovrapposizione al parlato, trasformando il sonoro in visivo.

Peraltro fra le tante cose che sappiamo una è destinata a diventare un carattere permanente del libro in quanto tale: la sua lunghezza. O, per meglio dire, la possibilità di essere lunghi, molto lunghi. Più lunghi comunque di qualsiasi performance orale. Dunque il libro trascrive l'orale, ma aggiunge una caratteristica che l'orale non può avere.

Agli albori dell'età cristiana il libro cambia forma. Si passa dal *volumen* al *codex*, un assemblaggio di fascicoli o quaderni cuciti assieme che conferiscono al libro l'aspetto che ha conservato fino ad oggi. Più maneggevole del rotolo, che va tenuto con due mani, più facile da riporre e meno ingombrante, il *codex* ha l'ulteriore vantaggio di ospitare la scrittura sia sul recto che sul verso. Il suo uso si generalizza tra il II e il IV secolo con il diffondersi del cristianesimo. Il rapporto tra l'uomo e il libro ne risulta dunque modificato, dando origine a consuetudini rimaste in uso anche oggi, specie nell'organizzazione dei testi: il titolo, la divisione in capitoli, la numerazione dei fogli eccetera.

Il *codex* offre inoltre un supporto ideale per l'illustrazione. Nasce allora la tecnica della miniatura, termine che deriva da "miniare" ovvero "colorare di rosso", dal colore rosso del *minium*, nome con cui nel Medioevo si era soliti chiamare il cinabro usato per dipingere le iniziali dei codici. Di fatto le miniature rappresentano, insieme agli affreschi, la fonte principale per la pittura dell'Alto Medioevo praticata fino al

XII secolo nei monasteri, per poi diventare un mestiere urbano, in botteghe laiche concentrate nei quartieri universitari.

Il libro merita di conseguenza di essere protetto e da questa necessità di conservazione nasce la rilegatura. Portato a termine il suo lavoro il copista cuce i fascicoli con bande di cuoio fissate a delle assicelle in legno in seguito rivestite di pelle. La rilegatura porta con sé alcune novità formali. Affinché si possano assemblare i fascicoli nel giusto ordine, alla fine di ciascuno viene apposto un numero progressivo, la cosiddetta segnatura. Nel Quattrocento si inizia anche a numerare i fogli. Il frontespizio è ancora una rarità; il testo inizia in genere nella parte alta del primo foglio e può essere preceduto dal titolo in latino – *incipit* – scritto in inchiostro colorato e in caratteri più grandi, spesso senza indicare il nome dell'autore. Molte opere si chiudono con una semplice menzione, l'*explicit*, anche se alcuni copisti prendono l'abitudine di raggruppare in una formula finale alcune informazioni sul libro: il titolo, accompagnato talvolta dal nome dell'autore, il nome del destinatario, data e luogo dell'opera, tuttora in uso per edizioni pregiate, il cosiddetto colophon (dal greco *kolophon*, estremità).

Nel corso del Medioevo si fondono diversi tipi di scrittura: l'onciale, dal latino *uncia*, caratterizzato da lettere arrotondate e di grande formato, l'elegante e minuscola carolingia, ispiratrice, secoli dopo, della scrittura umanistica del Quattrocento. La fine del XII secolo è anche l'epoca della scrittura gotica, alta, stretta e spigolosa, diffusa in particolare nel Nord Europa. Scrivendo a Boccaccio Petrarca si lamenta di questa grafia che da lontano fa bruciare gli occhi e da vicino li affatica.

Anche la lettura cambia, poiché l'occhio si trova di fronte una pagina per volta e non due o tre colonne come nel rotolo.

Il trionfo della nuova forma del libro è legato anche all'impiego di una diversa materia prima, il cui uso si perpetua per oltre un millennio: la pergamena. Con ogni probabilità i sovrani di Pergamo avrebbero sviluppato, sin dal II secolo prima di Cristo, l'industria della pergamena per non dipendere più dall'Egitto per l'approvvigionamento di papiro (si tratta di una antica guerra commerciale a tutti gli effetti). La pergamena è una materia di origine animale: dopo una lunga lavorazione le pelli di pecora, capra o vitello vengono trasformate in un supporto più morbido e solido rispetto al papiro. La pergamena più pregiata è fabbricata con le pelli di vitellina e capretti nati morti.

Per realizzare una singola opera servono numerose pelli (una quindicina per un volume di medio formato), il che comporta costi di fabbricazione notevoli. Per contenerli, alcune pergamene vengono riutilizzate raschiandone il testo. Gli studiosi chiamano questo genere di documento, che consente anche attraverso appositi sistemi scientifici di far riapparire il testo cancellato, palinsesto – termine che a noi oggi sembra appartenere soltanto al mondo della televisione. La pergamena non subisce particolari evoluzioni e si diffonde progressivamente in Occidente, al punto che in epoca medievale, prima dell'invenzione della stampa, essa costituirà il supporto principale per la scrittura.

Dopo la caduta dell'Impero romano la civiltà bizantina vede fiorire ricche biblioteche e svilupparsi un'arte della miniatura destinata a influenzare quella di tradizione occidentale.

In Europa la cultura latina trova rifugio tra le mura dei conventi e tra il VI e l'VIII secolo tutta l'Europa vede sorgere numerosi monasteri. Ogni monastero è dotato di uno *scriptorium*, una sala riservata alla scrittura (chi non ricorda lo *scriptorium* avvelenato da misteri nel romanzo di Umberto Eco, *Il nome della rosa*?).

Gli strumenti di cui si serve il monaco sono semplici: un calamaio d'argilla o di corno bovino contenente l'inchiostro, la piuma d'oca, uno stilo a mina di piombo, un compasso e i fascicoli di pergamena su cui scrivere. Suscita commozione leggere l'annotazione di un monaco: "Il libro che qui giunge al termine – si legge alla fine di un codice – fu portato a compimento con umiltà e devozione".

I manoscritti trasmettono in primo luogo opere devozionali, ma si ricopiano anche testi giuridici, grammatiche e opere latine. Il latino è sopravvissuto alla caduta dell'Impero romano e si diffonde anche come lingua della Chiesa, mentre il parlato se ne allontana progressivamente perché ormai il latino è divenuto incomprensibile ai più. Infatti a cominciare dall'VIII secolo anche il volgare appare in testi italiani, francesi e spagnoli. Nondimeno secoli dopo, come sappiamo, Dante scriverà ancora in latino.

L'idea di collezionare libri è molto antica. Il culto della pagina scritta, e più tardi del libro, è antico quanto la scrittura. Già i romani desideravano possedere rotoli e collezionarli. Se abbiamo perso dei libri, è per altre ragioni. Se ne sono fatti sparire alcuni per ragioni di censura religiosa o di furore politico, come i roghi nazisti del 1933, o perché le biblioteche

tendevano ad andare in fiamme alla prima occasione, allo stesso modo delle cattedrali, essendo fatte le une e le altre in gran parte di legno.

Ma le ragioni per cui i libri bruciavano erano le stesse che spingevano le persone a conservarli in un luogo sicuro e dunque a collezionarli. Così fece il monachesimo. Quale luogo, infatti, è più sicuro di un monastero?

Alla fine del Medioevo è databile la nascita delle grandi biblioteche regie e universitarie. Il migliaio di manoscritti che Carlo V il Saggio (1364-1380) depositò al Louvre, la donazione del duca Humphrey alla Bodleiana di Oxford o quelle destinate all'Università di Bologna ne sono esempi, tra molti altri.

Nell'Italia del XV secolo fioriscono le collezioni ducali, le sale di lettura degli ecclesiastici e degli umanisti. Poi nell'Europa occidentale, grazie alla formazione di una classe media, di una borghesia privilegiata e colta, l'età del libro e l'atto classico del leggere raggiungono il loro pieno sviluppo. I primi libri pubblicati in Francia vedono la luce nella sede della Sorbona.

Gli addetti ai lavori – copisti, miniatori, rilegatori – si organizzano in corporazioni. Nelle grandi sedi universitarie europee si diffonde il sistema detto della pecia. Le autorità universitarie affidano a un libraio, detto *stationarius*, l'*exemplar* ufficiale e autorizzato di un'opera, consentendogli di "affittare" i fascicoli o pezzi (in latino *peciae*) ad amanuensi e studenti che provvedono a copiarli.

Secondo Umberto Eco

il libro appartiene a quella generazione di strumenti che, una volta inventati, non possono più essere migliorati. Appartengono a questi strumenti la forbice, il martello, il coltello, il cucchiaino e la bicicletta: nessuna barba di designer danese, per tanto che cerchi di migliorare la forma di un cucchiaino riuscirà a farla diversa da com'era duemila anni fa. [...] Il libro è ancora la forma più maneggevole, più comoda per trasportare l'informazione.³

Sia che scegliamo di far risalire l'invenzione del libro ai primi *codices*, sia che ci riferiamo ai più antichi rotoli di papiro, ci troviamo di fronte

³ Jean-Claude Carrère e Umberto Eco, *Non sperate di liberarvi dei libri*, Milano, Bompiani, 2009, pp. 16-17.

a oggetti che per quante mutazioni abbiano subito si sono comunque mostrati straordinariamente fedeli a sé stessi, fino ai nostri giorni.

Di rado un grande inventore è stato tanto celebre e controverso quanto Gutenberg. Né la leggenda che lo ha elevato al rango di benefattore dell'umanità né gli scarsi inconfutabili documenti che lo riguardano facilitano il lavoro degli studiosi, al punto che è stata messa in discussione la paternità di una scoperta di portata universale.

Johann Gutenberg (1400-1468) era nato da una famiglia di orefici a Magonza, dove tra il 1448 e il 1454 perfezionò il procedimento di fusione dei punzoni, delle matrici di metallo e di impressione mediante torchio da vino. Certo di aver raggiunto le capacità tecniche necessarie Gutenberg mise in cantiere un progetto ambizioso: stampare una Bibbia – ora conosciuta come la Bibbia delle 42 linee, dal numero di righe di ogni pagina – completata presumibilmente nel 1455.

Questa edizione rappresenta un vero monumento tipografico: sono serviti più di tre milioni di segni e circa trecento caratteri tipografici differenti ispirati dalla scrittura gotica in uso per i manoscritti liturgici.

In una lettera del 1455 ne scrive il legato pontificio Enea Silvio Piccolomini (il futuro papa Pio II), allora segretario dell'imperatore Federico III, esaltandone la perfezione e la chiarezza, precisando che la si poteva leggere anche senza occhiali.

Siamo quindi arrivati all'invenzione della stampa.

La rivoluzione gutenberghiana non si sarebbe diffusa così rapidamente in Europa se non fosse stato disponibile un supporto più economico e più morbido della pergamena e cioè la carta, la cui invenzione è collocata nel II secolo (ma è probabilmente più antica e già prodotta nell'Estremo Oriente). Utilizzata in un primo momento nei paesi musulmani affacciati sul Mediterraneo, più tardi si diffuse in Europa, dapprima in Spagna e poi, nel XIII secolo, in Italia.

La parola "pagina" ha un'origine etimologica nella civiltà contadina mediterranea; infatti il latino *pagina* indicava una vigna di forma rettangolare, ma deriva anche da *pangere*, che significa segnare i limiti di un terreno.

Il libro cartaceo più antico risale agli anni 1451-1452, lo stesso periodo in cui Gutenberg lavorava alla sua Bibbia. Già nel 1480 si contano almeno cento città che ospitano un laboratorio di stampa, delle librerie e la presenza attiva di venditori ambulanti. Fino all'anno 1501

circa duecentocinquanta città europee hanno prodotto i cosiddetti incunaboli. Questo termine, apparso nel Seicento, deriva dal latino *incunabula*, fasce dei bambini, e indica che nel periodo dal 1450 circa al 1500 l'arte tipografica era ancora agli inizi, *in cuna*, in culla.

Sorto nell'Italia del XIV secolo con Petrarca quale precursore, l'Umanesimo si impone nelle cerchie intellettuali del secolo successivo. Gli umanisti si emancipano dalla tradizione medievale e scavano nelle biblioteche in cerca di testi dell'antichità dimenticati o negletti. Gli stampatori non restano ai margini di questo movimento e si mettono al lavoro per correggere i frequenti benché inevitabili refusi degli amanuensi.

Lo stampatore più celebre dell'Umanesimo rinascimentale è Aldo Manuzio (1450-1515), latinista ed ellenista che diventa editore di testi classici, in particolare di testi greci in versione originale. Fonda la sua officina tipografica, quasi un'accademia di umanisti, a Venezia dove tra il 1494 e il 1515 pubblicherà 150 opere, cui seguiranno numerose altre stampate dai suoi eredi e successori. Accanto a opere dotte, stamperà i primi libri in formato tascabile per gli studenti e sarà il primo ad utilizzare il corsivo italiano, che richiama la grafia dei manoscritti umanisti. Il suo libro più celebre e prezioso è l'*Hypnerotomachia Poliphili* (Sogno di Polifilo), un volume con illustrazioni, che può a giusto titolo essere considerato uno splendido precursore dei moderni libri illustrati. Altrettanto conosciuti sono il motto e il logo della sua stamperia: *Festina lente*, ben rappresentato da un delfino guizzante aggrovigliato a un'ancora.

Alberto Savinio (1891-1952), pseudonimo di Andrea De Chirico, fratello di Giorgio, noto e fecondo scrittore, pittore e musicista, autore di una copiosa produzione giornalistica, ha così definito la tipografia:

La tipografia è un'arte. Questa verità nessuno osa contestarla. Noi italiani meno che meno, che l'arte della tipografia, e fino dai suoi lontani esordi, abbiamo saputo innalzarla alla sua massima eccellenza. Ma arte o non arte, la tipografia resta per sempre e fondamentalmente un mezzo: il più grande mezzo di conoscenza che l'uomo ha inventato.⁴

Il Cinquecento è un secolo segnato da avvenimenti di immensa portata storica. Nel 1517 Martin Lutero (1482-1546) affigge a Witten-

⁴ Alberto Savinio, *Refusi. Scritti sull'errore tipografico*, Roma, Elliot, 2025, p. 15.

berg le sue 95 Tesi di denuncia delle indulgenze entrando in rottura con il papato. La stampa garantisce una diffusione straordinaria alla sua riforma, raggiungendo tirature eccezionali per l'epoca: ad esempio si contano ben 430 edizioni di traduzioni della Bibbia. Nel clima di conflitto e di intolleranza religiosa che attraversa il continente il libro susciterà diffidenza e ostilità. Tutti i mestieri legati al libro vengono posti sotto sorveglianza, e in alcuni casi soppressi: divieti di pubblicare, vendere o importare alcuni testi, proibizione della lettura in lingua volgare, autodafé di libri, persecuzioni contro autori e stampatori imprigionati o addirittura condannati a morte.

Anche la reazione della Chiesa si affida al lavoro dell'editoria: la carta stampata – si trattasse di un libro, di un pamphlet o di un manifesto – era l'unico mezzo di comunicazione e di propaganda del tempo. Il Concilio di Trento (1545-1563), che segna l'inizio della Controriforma, ribadisce la dottrina della Chiesa intraprendendo un'ampia revisione della liturgia che si rivelerà un buon affare per i librai. Opere di erudizione religiosa e libri di pietà assumeranno eccezionali dimensioni di diffusione.

Nel 1559, sotto il pontificato di Paolo IV, viene emanato dal Sant'Uffizio l'*Index librorum prohibitorum*, l'elenco ufficiale delle pubblicazioni contrarie alla fede e alla morale, che comprende tutte le traduzioni in volgare della Bibbia, validando solo la Vulgata, la versione latina fissata da san Gerolamo nel IV secolo. Si tratta di una capillare, estesa e radicale operazione censoria che colpirà non solo opere contrarie alla dottrina della Chiesa o immorali, ma anche la letteratura e la scienza. L'Indice verrà poi regolarmente aggiornato e sarà abolito solo nel 1966 dal Concilio Vaticano II.

Fino al 1520-1525 la struttura del libro ricorda molto gli incunaboli; dopo questa data tenderà a liberarsi dall'aspetto medievale e a inventare forme nuove. La struttura della pagina diventa più ariosa e sistematica. Compaiono la punteggiatura e nuovi caratteri di tipo fonetico: accenti, apostrofi e quant'altro. Non si conoscono ancora con precisione le cifre della produzione libraria europea nel Cinquecento, ma si possono stimare in 75.000 le edizioni in Francia, oltre 100.000 in Germania, tra 50.000 e 75.000 in Italia. Venezia, Parigi e Lione sono i principali centri editoriali. In Germania e nei Paesi Bassi la produzione è più capillare (Anversa, Colonia, Norimberga, Strasburgo...), mentre la Spagna appare defilata.

Il libro viaggia molto, ma lentamente. È una merce pesante e fragile e per queste ragioni nella maggior parte dei casi viene trasportata “in bianco”, ovvero in fogli non rilegati, per diminuirne il peso e poter realizzare in seguito le rilegature secondo i gusti della clientela.

Le fiere costituiscono un’occasione d’incontro per i librai e la circolazione dei testi. A Francoforte stampatori, editori e librai si ritrovano alla Büchergasse, la “via dei libri”. Preziosi strumenti di diffusione e di scelta sono i cataloghi che iniziano a essere stampati a partire dal 1564. Si diffonde l’uso del colophon che riporta un certo numero di informazioni relative allo stato civile del libro, ad esempio il nome dell’autore, dello stampatore, la data e il luogo della stampa.

L’eredità di Gutenberg, il torchio a mano, verrà gradualmente soppiantato dalla pressa meccanica e la produzione della carta, ancora fabbricata agli inizi del XVII secolo a fogli singoli, viene meccanizzata; nel 1798 il tedesco Alois Senefelder inventa l’incisione su pietra (la litografia) che conoscerà un immediato successo in ambito editoriale.

Grazie all’urbanizzazione, all’alfabetizzazione e alla diffusione di giornali e periodici la produzione libraria esploderà letteralmente, diventando produzione “di massa”. Gli scrittori più in voga pubblicano i loro romanzi a puntate sui giornali e riviste e i lettori passano in breve tempo da poche migliaia a decine di migliaia. Gli editori ormai diventati “impresa” ricorrono anch’essi alla vendita seriale delle opere più popolari in fascicoli a basso prezzo, infarciti di pagine pubblicitarie, i cosiddetti *feuilletons*.

La storia del libro e l’evoluzione dell’editoria nell’Ottocento, nel Novecento e nel nuovo millennio meriterebbero una più estesa e approfondita trattazione a parte.

* * *

La lettura, cui l’uomo si è dedicato da tempo immemorabile, sta attraversando, come è noto, delle trasformazioni tecnologiche in rapida e continua evoluzione che incidono in profondità sulle abitudini, sui costumi e sui comportamenti della società in cui viviamo.

Il grande scrittore viennese Stefan Zweig (1881-1942) ci offre questa riflessione:

Senza età, immutabile nei tempi, energia compressa [...] il libro non ha nulla da temere dalla tecnologia giacché essa stessa non impara for-

se, non si perfeziona attraverso il libro? Ovunque e non soltanto nelle nostre vite individuali, il libro diventa l'alfa e l'omega di ogni sapere e l'inizio di ogni scienza.⁵

Il saggio è stato scritto nel 1931. Utopia visionaria di uno scrittore pensata quasi cento anni fa? Forse, se il MIT ha dichiarato che nel 2020 l'arte della fabbricazione del libro scomparirà come l'arte del fabbro.

La verità, se si può parlare di verità su un tema così ampio e in continua evoluzione, come si è soliti dire, sta nel mezzo.

Quella che definiamo realtà virtuale quali effetti avrà sull'atto di leggere, sulla funzione dei libri e sui sistemi della loro distribuzione? Difficile prevederlo. Cercherò di proporre diversi punti di vista, fatti concreti e reali che sono sotto gli occhi di tutti, aspirando solo ad aprire la porta per una riflessione: sta a ognuno di noi farsi un'opinione o raggiungere una convinzione.

Ma non creiamoci illusioni: questa meta è, e resterà, irraggiungibile perché ogni giorno ci propone una sorpresa e quindi un'ulteriore riflessione. Chi scrive non è uomo di scienza, ma intenso e assiduo lettore; pertanto cammina su un terreno per lui inesplorato con la speranza di incontrare lungo la strada un bivio che incroci il futuro del libro e la moderna tecnologia.

Di certo non assisteremo a un moderno bibliocausto. In ogni momento della storia dell'umanità censura, ignoranza, autodafé, inquisizione, incendi di grandi biblioteche hanno segnato il cammino del libro. C'è da sperare che le innovazioni tecnologiche possano mitigare in futuro l'enormità di queste perdite, mediante la loro riproduzione preventiva, anche se l'originale andrà purtroppo perduto per sempre.

Continuano ancora ai giorni nostri le distruzioni di libri, le persecuzioni, la privazione della libertà e l'uccisione di scrittori da parte di regimi totalitari. Resta sempre attuale la celebre previsione di Heinrich Heine scolpita nel testo di una sua tragedia del 1823, nella quale, commentando un'ondata di autodafé antisemita, scrive che "laddove si bruciano libri si finisce col bruciare anche gli uomini".⁶ Ma mi pongo

⁵ Stefan Zweig, *Il libro come accesso al mondo e altri saggi*, Milano, Archinto, 2021, pp. 29-30.

⁶ Heinrich Heine, *Almansor*, Milano, Libreria Editrice, 1876 (ed. orig. *Almansor. Eine Tragödie*, 1823).

subito un interrogativo spiazzante e cioè se nella società della globalizzazione siamo informati di tutto e possiamo agire di conseguenza.

L'Olocausto sarebbe stato possibile se fosse esistito internet? Certo non possiamo esserne sicuri, ma tutto il mondo avrebbe saputo immediatamente cosa stava accadendo. La stessa considerazione si presta a molte analogie con ciò che possiamo sapere sulla Cina, sulla Russia e sull'Iran e su altri paesi soffocati da una pesante e capillare censura interna.

La censura totale e definitiva è ormai per fortuna praticamente inattuabile. Il solo pericolo è che l'informazione che circola diventi in verificabile e che diventiamo tutti degli informatori, più o meno benevoli, più o meno qualificati, più o meno partigiani che allo stesso tempo si trasformano in inventori inondando il mondo di fake news.

La domanda da porsi, che resta pur sempre senza risposta, è la seguente: il libro scomparirà a causa della comparsa di internet?

A ben riflettere con internet per certi versi siamo tornati all'alfabeto. Se mai avessimo pensato di essere entrati totalmente nella civiltà delle immagini, ecco che il computer ci ha reintrodotti nella galassia Gutenberg e tutti ci troviamo ormai costretti a leggere e per leggere occorre un supporto, che non può che essere per l'appunto il computer.

Immaginiamo di rimanere due ore al computer per leggere un romanzo: i nostri occhi diventeranno delle palle da tennis. Inoltre il computer ha bisogno dell'energia elettrica e non ci permette di leggere nella vasca da bagno né disteso su un fianco a letto. Certo possiamo continuare ad utilizzarlo mentre siamo in viaggio su un treno collegato alla presa di corrente, ma è lecito chiedersi se sarà meglio leggere *Guerra e pace* in e-book o in volume.

Comunque, se anche il libro elettronico finisse per imporsi, non c'è ragione che esso riesca a far uscire dalle nostre case e dalle nostre abitudini il libro stampato. L'e-book non ucciderà il libro. Più o meno come l'invenzione di Gutenberg non ha eliminato da un giorno all'altro l'uso del *codex*, né quest'ultimo ha fatto cessare il commercio del papiro o dei *volumina*; c'è da prevedere che le abitudini e le pratiche coesistano a lungo. Del resto, la televisione ha forse eliminato il cinema?

È comunque evidente che d'ora in poi la lettura diventerà sempre di più un continuo traffico elettronico. Internet è interattivo, la pagina web è dinamica e consente la formazione di gruppi che condividono interessi comuni come non è mai stato possibile in passato. Vedremo.

Ci sono ovviamente i pro e i contro. Certo un imprenditore potrà portarsi a casa relazioni e bilanci memorizzati su un supporto digitale, ma questo esempio ci indica un uso particolare, non ordinario.

Un indubbio vantaggio è quello di consentirci di leggere testi stampati secoli fa. Chi di noi non ha mai constatato che le progressive e continue innovazioni tecnologiche non ci consentono più di vedere una videocassetta o un cd-rom di appena qualche anno fa? Le cantine delle nostre case ne sono ricolme. Da un lato con questi strumenti, in continua evoluzione, ci sforziamo di conservare la memoria, il sapere e la conoscenza correndo però il rischio di perdere tutto se non si provvede a un continuo aggiornamento del sistema.

È quasi paradossale, a ben pensarci, che ancora oggi si riesca a leggere un manoscritto ricopiato con pazienza oltre dieci secoli fa, mentre non si possono più vedere i contenuti di una videocassetta o di un dischetto risalente a pochi anni prima, a meno di non aver conservato vecchi computer e vari vetusti apparecchi.

L'Intelligenza Artificiale (acronimo: I.A.) porterà benefici al futuro del mondo? Domanda complessa che può avere infinite differenti risposte, anche perché è in costante e rapida evoluzione. È stata coniata la definizione di "illuminismo oscuro" sintetizzando in due sole parole la perenne volontà dell'uomo di aprirsi liberamente al progresso, a nuovi saperi, che sono anche potenziali portatori di pericolose dinamiche, "oscuri" perché imprevedibili e ingovernabili.

Sul punto le opinioni e le previsioni sono molteplici e contrastanti. Volendo riassumere, con una forzatura, le divergenti scuole di pensiero potremmo dire che si fronteggiano, da un lato, i tecno-ottimisti e, dall'altro, i tecno-pessimisti. Il pensiero dei primi si può riassumere nella loro convinzione che la tecnologia sia in grado di realizzare tutte le ambizioni e il potenziale degli umani: è la punta di diamante del progresso. Eravamo al buio e abbiamo inventato l'illuminazione, al freddo e abbiamo inventato il riscaldamento, avevamo pandemie e abbiamo creato i vaccini... Ci illudiamo insomma che la nostra conoscenza scientifica, la *techné*, diventi forza capace di governare la società, *kratos*. I secondi, i tecno-pessimisti, pur non negando l'evidenza evolutiva creata dall'I.A. vedono il pericolo nel fatto che essa non è in grado di sviluppare un pensiero etico e morale, il senso del bene e del male. Noi stessi abbiamo creato questi dilemmi etici, uno per molti altri, ad esempio, l'eutanasia,

e l'I.A. non ci può aiutare, anzi può rappresentare un rischio per l'intrinseca sua capacità di creare sistemi e strumenti sempre più moderni e performanti, ma sprovvisti di sentimenti di bontà e di giustizia.

Vi è comunque convergenza di opinioni, motivata da indiscutibili successi, sul fatto che l'I.A. e gli algoritmi siano in grado di dare risposte rapide e affidabili a problemi quantificabili ben definiti: sottoponiamogli un obiettivo preciso e ci indicheranno il mezzo migliore per raggiungerlo sulla base delle conoscenze attuali.

Ci è sufficiente pensare all'infinita quantità di microchip presenti nei computer, nelle auto e nei telefoni cellulari, questi ultimi divenuti ormai un'appendice del nostro corpo. Questi e molti altri strumenti – basti pensare alle sole applicazioni medicali – sono portatori di progresso e di miglioramento della nostra vita.

Che effetto hanno i social network sul linguaggio? Lo impoveriscono o lo arricchiscono? Sicuramente lo cambiano, come dimostra il fatto che abbiamo accolto parole come “influencer”, “trend” eccetera.

Il linguaggio è infatti estremamente dinamico e ne è dimostrazione la sua perenne evoluzione nel tempo.

Prendo spunto da un dibattito tra esperti pubblicato di recente su “La Lettura”, l'inserto settimanale del “Corriere della Sera”, che sintetizzo qui di seguito.

Una ricerca dell'Università di Nottingham ha rilevato dati statistici che portano ad alcune riflessioni non prive di significato. Dopo due, tre settimane di uso del cellulare come strumento didattico i ragazzi erano portati a considerarlo non più un telefonino ma uno strumento di lavoro. Ci sono ragioni psicologiche ed emotive che portano a rifugiarsi in quello strumento. Un tempo accadeva con la televisione, con le serie tv o con Tik Tok. Il punto da sottolineare è quello di non attribuire la causa soltanto al dispositivo. Se i ragazzi hanno bisogno di stare eccessivamente sui social è perché hanno necessità di un rifugio, di prendere distanza da una vita che percepiscono come priva di senso o che causa sofferenza.

Vi è poi un altro fenomeno molto diffuso ed estremamente serio, come è ben noto: quello del materiale pornografico. Secondo un rapporto di Save the Children in Italia il 73% dei minori ha fruito di tali contenuti.⁷

⁷ Colloquio a cura di Jessica Chia, “La Lettura”, 15 dicembre 2024.

All'opposto, un'opportunità di grande rilievo sociale è la digitalizzazione delle grandi biblioteche. Per fare un esempio di questa elettrizzante evoluzione, più di ottanta milioni di volumi della Biblioteca del Congresso di Washington sono consultabili online.

La Bibliothèque Nationale de France François-Mitterrand ha tre sezioni: una mediateca, una fonoteca e una iconoteca. Enormi magazzini che tuttavia non sono altro che archivi locali se paragonati al web che è veramente la *bibliotheca universalis* di un racconto del 1904 di Kurd Laßwitz (1848-1910)⁸ che prende spunto dall'idea di Leibniz di una biblioteca illimitata, il sogno metafisico di Borges, la Biblioteca di Babele. La celebre casa editrice Penguin ha messo a disposizione un migliaio di classici in formato digitale. Quotidianamente vengono messi online nel web tre milioni di byte di nuove informazioni e di rimandi.

Il panorama che si apre dinanzi a noi è vasto e complesso e ci offre una moltitudine di punti d'osservazione. Prendiamo ad esempio la distribuzione commerciale del libro che ha potenti concorrenti in Amazon ed e-Bay, per citare solo i più famosi. Continueremo ad andare in libreria? E in quanti, visto che le statistiche (dati ISTAT) ci dicono che nella nostra regione, la Liguria, nel 2023 il 60% della popolazione non ha letto neppure un libro? Resisteranno meglio le grandi catene o le piccole librerie? Ogni giorno assistiamo alla chiusura di edicole, nonostante abbiano cercato di resistere diversificando l'offerta e puntando sulla vendita di libri. Stefano Salis, editorialista de "Il Sole 24 Ore", in una recente corrispondenza da Londra ci segnala che la più grande libreria della capitale britannica, Foyles, ha ampliato i suoi spazi: alla riapertura c'erano centinaia di persone in attesa di entrare, che certamente non erano solo passanti incuriositi.

Il futuro di quest'arte millenaria è tutto in divenire. Anche perché, e qui concludo con un esempio, il presente è in perenne evoluzione e competizione ed è finanche battagliero. Il 23 maggio 2024 diverse testate americane hanno segnalato che Amazon stava rendendo difficoltose le vendite sulla sua piattaforma dei libri dell'editore Hachette perché il gruppo francese aveva rifiutato il prezzo di 9,99 dollari per tutti gli e-book. Più di novecento scrittori hanno di conseguenza sottoscritto una lettera in difesa della cultura e di Hachette sulle pagine del "New York Times".

⁸ Kurd Laßwitz, *La biblioteca universale e altre fantasie*, Villaggio Maori, Catania, 2016.

Ritengo opportuno, a beneficio del lettore, chiudere questo intervento con parole sul libro e sull'incantesimo della lettura espresse da personaggi di ben più alta cultura di chi scrive. Eccole: in un'opera di Diderot, *Jacques le fataliste et son maître* (1796), leggiamo questa domanda: "Ma chi sarà il padrone? Lo scrittore o il lettore?". Niccolò Machiavelli si è abbandonato a immaginare un momento di tranquillità e di pace durante il suo esilio in Val di Pesa: "Venuta la sera, mi ritorno a casa ed entro nel mio scrittoio; e in su l'uscio mi spoglio quella veste cotidiana [...] e mi pasco di quel cibo che solum è mio e ch'io nacqui per lui [...] non sento per quattro hore di tempo alcuna noia, sdimentico ogni affanno, non temo la povertà, non mi sbigottisce la morte".⁹ Umberto Eco, come sempre arguto e acuto, ha scritto: "Chi non legge, a settant'anni avrà vissuto una sola vita: la propria. Chi legge avrà vissuto cinquemila anni: c'era quando Caino uccise Abele, quando Renzo sposò Lucia, quando Leopardi ammirava l'Infinito. Perché la lettura è un'immortalità all'indietro".

Sono debitore, nella stesura di questo saggio, dell'utile consultazione, tra i numerosi altri, di due libri in particolare.

Il primo raccoglie un dialogo tra lo sceneggiatore cinematografico, autore teatrale, romanziere, poeta e saggista francese Jean-Claude Carrière e Umberto Eco, coordinato da Jean-Philippe de Tonnac e tradotto dal francese da Anna Maria Lorusso: *Non sperate di liberarvi dei libri* (Milano, Bompiani, 2009). Il secondo, intitolato semplicemente *Libro* (Torino, Bollati Boringhieri, 2014), è stato scritto da Gian Arturo Ferrari, che nei primi anni novanta è stato Direttore dei Libri Mondadori e in seguito, dal 1997 al 2009, Direttore della Divisione Libri di tutte le testate editoriali del gruppo Mondadori.

⁹ Niccolò Machiavelli, *Lettera a Francesco Vettori*, 10 dicembre 1513.

SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE,
NATURALI E MEDICHE

INCONTRI DI STUDIO E ANNIVERSARI

VERSO L'ECOPIANO URBANISTICO,
PAESAGGISTICO, ENERGETICO
A SCALA GLOBALE E LOCALE

16 settembre 2024

MARIO AGOSTINO ROCCA

Cambiamento climatico

Questo articolo fa seguito a quelli dei colleghi Luca Banfi e Antonino Briguglio, apparsi sugli “Atti dell’Accademia Ligure di Scienze e Lettere” nel 2022 [1, 2], che hanno sviscerato ed esposto esaurientemente gli effetti chimico-fisici che causano l’effetto serra nelle atmosfere planetarie e i metodi di indagine geologica. Do pertanto tali conoscenze per acquisite e mi concentrerò sulle preoccupanti previsioni per il prossimo futuro che emergono dal dibattito attuale tra climatologi.

Al momento in cui scrivo i dati scientifici indicano che la temperatura media del pianeta è di circa $1,2^{\circ}\text{C}$ più calda rispetto al periodo preindustriale. Questo aumento può sembrare piccolo ma va confrontato con la variazione di circa 7°C della temperatura media tra l’attuale fase temperata e i passati periodi glaciali ed è già causa di drammatici eventi meteorologici. Conosciamo con accuratezza la temperatura media della terra degli ultimi 800.000 anni grazie a carotaggi dei ghiacci polari [2]. Nella figura 1, ripresa dall’articolo del collega Banfi [1], riporto la variazione della concentrazione di CO_2 degli ultimi 400.000 anni. Si noti nell’ingrandimento nel secondo pannello la rapida ascesa negli ultimi decenni. In figura 2 mostro la correlazione fra temperatura media e concentrazione di CO_2 nell’atmosfera, anch’essa deducibile dal carotaggio dei ghiacci polari, per gli ultimi 800.000 anni. Come si vede la concentrazione di CO_2 passa da minimi intorno a 200 ppm (parti per milione) per i periodi glaciali a massimi intorno a 280 ppm nei periodi temperati. La correlazione tra i due fenomeni non è di per sé significativa perché, se la concentrazione di CO_2 causa il riscaldamento dell’atmosfera, è anche

vero che il riscaldamento del pianeta fa sì che gli oceani rilascino CO_2 nell'atmosfera. Dai dati di figura 2 quindi non si può stabilire quale sia la causa e quale sia l'effetto dei fenomeni osservati. Tuttavia, le oscillazio-

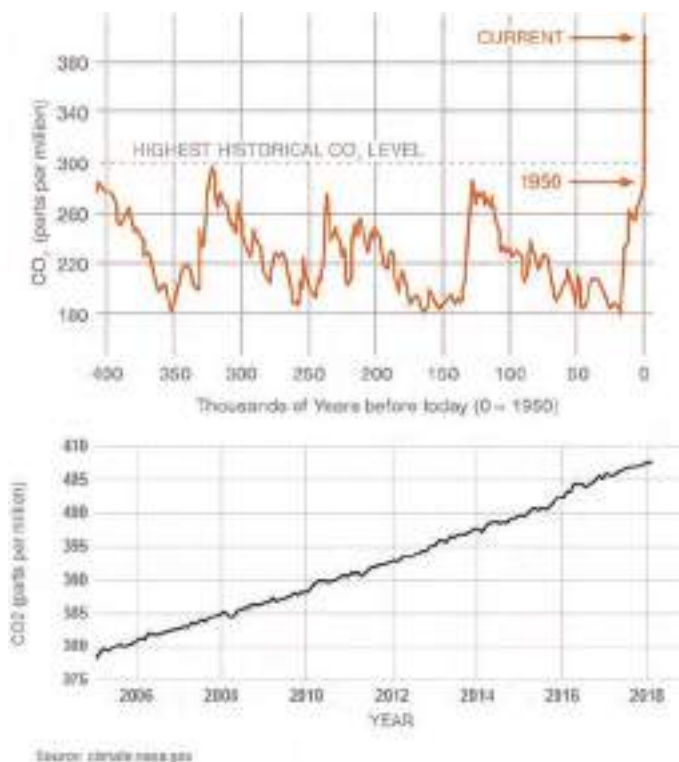


Figura 1. Negli ultimi 400.000 anni la concentrazione della CO_2 nella atmosfera ha oscillato su una scala temporale di millenni tra 200 ppm e 280 ppm. Ultimamente ha raggiunto il valore record di 410 ppm con un incremento lineare negli ultimi 30 anni [1].

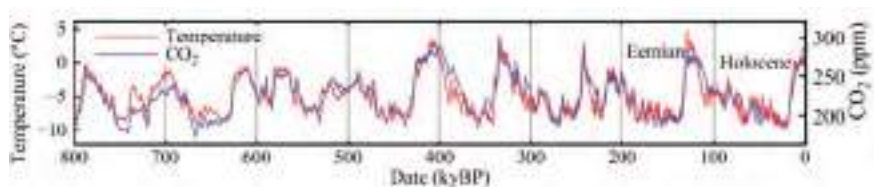


Figura 2. Correlazione tra la concentrazione della CO_2 nella atmosfera e la temperatura media della Terra negli ultimi 800.000 anni. BP (Before Present) indica prima della data attuale [figura ripresa con permesso dalla ref. 3].

ni causate da cause naturali occorrono su tempi dell'ordine di millenni mentre il salto della concentrazione di CO_2 da 250 ppm a 410 ppm è avvenuto in pochi decenni. Per la comunità scientifica non vi sono pertanto dubbi sull'origine antropica del fenomeno.

Nel 1965 Roger Revelle [4] lanciò per primo l'allarme sostenendo che l'umanità stava conducendo un azzardato esperimento geofisico su vasta scala bruciando in pochi decenni i carburanti fossili accumulati nel corso di centinaia di milioni di anni e immettendone il carbonio nell'atmosfera sotto forma di CO_2 . Nel 1979 Jule Gregory Charney pubblicava un articolo per la National Academy of Sciences degli Stati Uniti in cui prevedeva che a un raddoppio della concentrazione di CO_2 ($\times 2\text{CO}_2$ nel seguito) avrebbe corrisposto un aumento della temperatura media di $3 \pm 1,5$ °C aggiungendo tuttavia che la capacità termica degli oceani avrebbe potuto posticipare gli effetti di svariati decenni [5].

Nel 1980 il presidente USA Jimmy Carter firmò l'Energy Security Act che includeva contributi per energie fossili non convenzionali quali l'estrazione di gas e petrolio tramite fratturazione degli scisti rocciosi (procedure note anche come *shale oil extraction e fracking*). Il Congresso degli Stati Uniti chiese in quell'occasione all'Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti di esprimersi sui possibili effetti sul clima dell'abuso dei carburanti fossili. Il rapporto uscì tre anni dopo, nel 1983 [6]. Esso concludeva che il $\times 2\text{CO}_2$ avrebbe comportato un aumento di temperatura compreso tra 1,5 °C e 4,5 °C assumendo una inerzia termica della Terra di 15 anni. Se questa assunzione fosse stata realistica il cambiamento climatico non sarebbe stato una vera minaccia, dato che l'aumento non si era verificato nei tempi previsti.

Il tempo di risposta del sistema Terra venne tuttavia messo in discussione dal climatologo James Hansen che dimostrò in un articolo apparso nel 1984 che un valore più corretto per la risposta climatica del nostro pianeta è dell'ordine del secolo [7]. Con questa assunzione a $\times 2\text{CO}_2$ sarebbe corrisposto un aumento compreso tra 2,5 °C e 5 °C ma su tempi decisamente più lunghi di quelli considerati nei precedenti modelli climatici. Gli effetti nefasti del cambiamento climatico vennero in un primo momento riconosciuti in un convegno anche dal presidente della Exxon E.E. David [8]. Quindi già 40 anni fa era evidente sia al mondo scientifico che a quello industriale che vi era una seria minaccia per l'umanità e che il cambiamento climatico si sarebbe manifestato con effetti dilazionati nel tempo.

James Hansen è una voce autorevole. È un astrofisico che negli anni Sessanta e Settanta del secolo scorso ha studiato la composizione dell'atmosfera di Venere, pianeta che soffre di un micidiale effetto serra che comporta temperature alla superficie dell'ordine di 350 °C, e ha lavorato per la NASA sui dati ottenuti dalle sonde Pioneer che sorvolavano Venere negli anni Ottanta. Applicando gli stessi modelli scientifici alla Terra conclude che l'attività umana e la conseguente immissione di CO₂ nell'atmosfera avevano causato, già in quegli anni, un aumento di 1 °C rispetto al livello della temperatura media terrestre nei tempi preindustriali. Nel 1988 era stato convocato dal Congresso degli Stati Uniti e aveva lanciato per primo l'allarme per le conseguenze sul clima connesso all'uso massiccio di combustibili fossili.

Sempre nel 1988 venne istituito dalle Nazioni Unite il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (*International Panel on Climate Change*, IPCC), organismo scientifico incaricato di vigilare sui cambiamenti climatici [9]. Questo gruppo di lavoro, cui hanno collaborato migliaia di scienziati, ha prodotto una serie di rapporti concludendo nell'ultima edizione del 2023 che a ×2CO₂ sarebbe corrisposto un aumento di 3 °C [10]. In tale rapporto, conseguenze catastrofiche quali la modifica delle correnti oceaniche e un forte aumento del livello degli oceani vengono descritti come eventi a grande impatto ma con piccola probabilità di realizzarsi almeno entro la fine del XXI secolo anche negli scenari più estremi. Che le già fosche previsioni dell'IPCC fossero troppo ottimistiche è tuttavia dimostrato a posteriori dal fatto che l'aumento della temperatura media atteso dall'IPCC per la fine degli anni 2020 è stato ormai quasi raggiunto.

Hansen e i suoi collaboratori contestarono in particolar modo che i modelli usati dai climatologi fossero poco sensibili a fattori quali l'immissione di acqua dolce causata dallo scioglimento dei ghiacci polari e la presenza in atmosfera di polveri e altri inquinanti. La temperatura media della Terra è infatti influenzata non solo all'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, che blocca l'irraggiamento infrarosso dalla Terra verso lo spazio, ma anche da parametri quali la copertura di neve e ghiacci sulla terra ferma e la nuvolosità che, modificando l'albedo terrestre, influenzano la quantità di radiazione solare riflessa direttamente verso lo spazio. Tali parametri dipendono a loro volta dalla temperatura terrestre generando una controreazione che ne amplifica gli effetti avversi sul clima.

Queste conclusioni sono state recentemente pubblicate da J.E. Hansen et al. in un articolo apparso sull'“Oxford Open Climate Change” con il titolo *Global Warming in the Pipeline* [3] che a oggi ha totalizzato ben 27.000 visualizzazioni. In esso viene rideterminata la variazione della temperatura media a seguito di $\times 2\text{CO}_2$ calcolando la sensitività del clima all'equilibrio (*Equilibrium Climate Sensitivity*, ECS) analizzando i dati paleoclimatici degli ultimi 66 milioni di anni. Lo sbilanciamento attuale nell'equilibrio termico della Terra causato da $\times 2\text{CO}_2$ è dell'ordine di 4 Wm^{-2} (più precisamente era di $4,6 \text{ Wm}^{-2}$ nel 2023 con una derivata di $0,5 \text{ Wm}^{-2}$ per decade) per cui un corpo nero della dimensione del nostro pianeta e in assenza di effetti di retroazione dovrebbe riscaldarsi di $1,2^\circ\text{C}$ per tornare all'equilibrio termico [11]. Introducendo le retroazioni, il modello di J.E. Hansen et al. [3] stima invece un aumento di 4°C per cui l'effetto diretto del CO_2 contribuisce solo per il 30% ($1,2^\circ\text{C}/4^\circ\text{C}$) al riscaldamento globale e nella formula dell'ECS

$$\text{ECS} = 1,2^\circ\text{C}/(1-g)$$

bisogna considerare un parametro $g \sim 0,7$, determinato dalla somma di molti fattori, quali la variazione del vapor acqueo, della copertura di nubi, dell'albedo terrestre a seguito dello scioglimento dei ghiacci e delle nevi.

Questi parametri sono stati stimati da J.E. Hansen et al. analizzando i dati del paleoclima riportati dal progetto CLIMAP [12] per l'ultimo periodo glaciale culminato circa 20.000 anni fa. In particolare, viene valutato l'effetto sul clima del riscaldamento superficiale degli oceani conseguente alla riorganizzazione delle correnti oceaniche e del conseguente mescolamento con le acque più profonde che porta a stimare in 100 anni il tempo di risposta dell'atmosfera terrestre a effetti forzanti. L'altro importante punto dell'analisi scientifica di J.E. Hansen et al. riguarda il ruolo delle polveri presenti nell'atmosfera che spiega la differenza tra l'effetto serra osservato al momento attuale e quello atteso dai dati paleoclimatici. Per il 2022 trova infatti una differenza di circa $1,5^\circ\text{C}$ tra il riscaldamento atteso e quello misurato. L'andamento della variazione della temperatura media che ne consegue è riportato in figura 3.

Secondo Hansen et al. l'assenza di effetti climatici all'inizio del secolo scorso è pertanto dovuta al massiccio inquinamento provocato su vaste regioni nel primo periodo industriale (ricordate le nebbie su

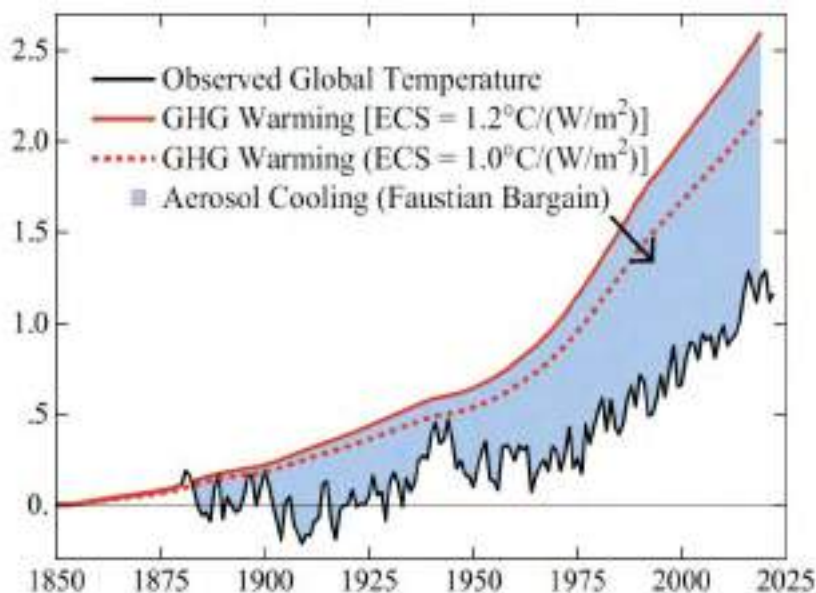


Figura 3. Aumento della temperatura media osservato (linea nera) e atteso (linee rosse) per due valori di ECS. L'area azzurra corrisponde al raffreddamento conseguente alla presenza di polveri dovute agli inquinanti immessi nell'atmosfera. Il picco osservato nel periodo della Seconda guerra mondiale è un artefatto dovuto al fatto che i dati scientifici per quegli anni sono molto disomogenei [figura ripresa con permesso dalla ref. 3].

Londra e la pianura padana?). Definisce l'effetto un "patto Faustiano" perché il credito verrà riscosso nel momento in cui non essendo più tollerabile l'inquinamento, che causa milioni di morti ogni anno, si introdurranno norme via via più stringenti per ridurlo, cosa che sta avvenendo in questi ultimi anni. Al momento la maggiore sorgente di immissione di polveri nell'atmosfera viene identificata nel trasporto navale che usa combustibili molto sporchi.

L'importanza di questo effetto è dimostrata dalla stabilità della temperatura terrestre negli ultimi 6.000 anni (si veda la figura 4). La temperatura media della Terra è cresciuta infatti dalla fine della glaciazione ma si è stabilizzata al tempo in cui l'umanità ha cominciato a deforestare ampie zone del pianeta e a implementare l'agricoltura influenzando l'albedo della Terra. I nostri antenati sarebbero pertanto già stati in grado di influenzare il clima globale.

In figura 5 riporto l'effetto dei diversi agenti forzanti che agiscono sul clima identificati da J.E. Hansen et al. e la loro somma (curva nera). Come si vede concentrazione di gas serra e inquinamento si sono bilanciati a lungo per cui gli effetti del cambiamento climatico si dispiegano solo ora che sono state attuate politiche volte a limitare l'inquinamento. Il risultato per

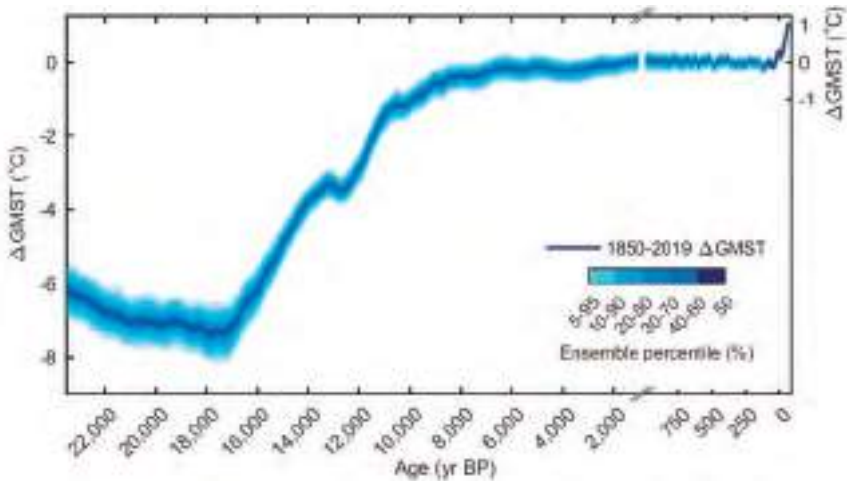


Figura 4. *Variazione della temperatura media della terra negli ultimi 22.000 anni. Si noti la crescita dopo l'epoca glaciale che si interrompe all'epoca in cui l'umanità introduce agricoltura e disboscamento [figura ripresa con permesso dalla ref. 3].*

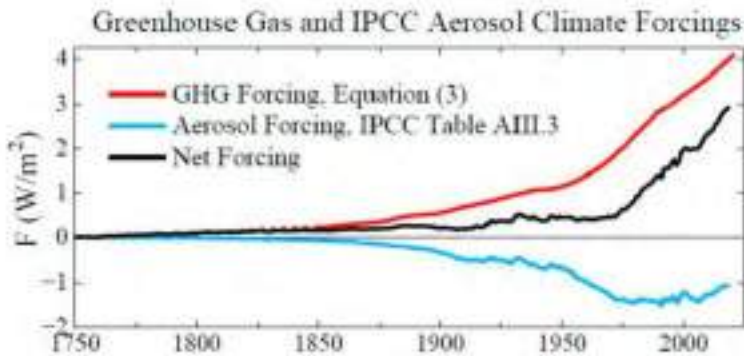


Figura 5. *Effetto positivo dei gas serra (curva rossa) e negativo dell'inquinamento (curva blu) ed effetto globale (curva nera) negli ultimi 250 anni [figura ripresa con permesso dalla ref. 3].*

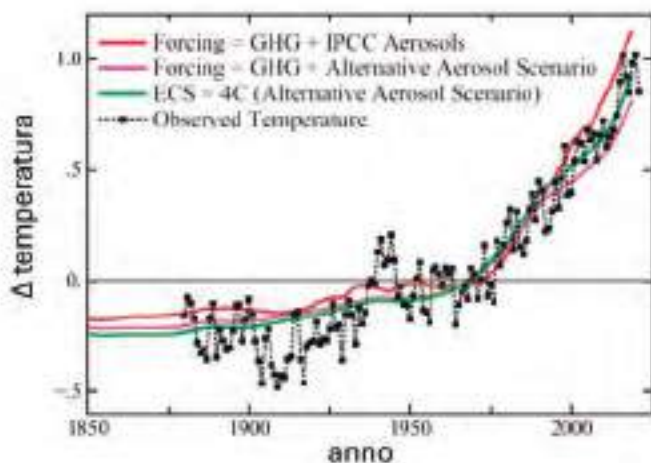


Figura 6. *Variazione della temperatura media prevista da J.E. Hansen et al. e da loro confrontata con i dati sperimentali della NASA [13] [figura ripresa con permesso dalla ref. 3].*

la temperatura media è riportato in figura 6. Il modello con l'inclusione dell'effetto degli aerosol riproduce molto bene i dati sperimentali.

In conclusione, sia secondo l'IPCC [10] sia secondo l'articolo di J.E. Hansen et al. [3], dobbiamo preoccuparci per il prossimo futuro. Infatti, anche azzerassimo oggi le emissioni di anidride carbonica, gli effetti sul clima persisterebbero per un lungo periodo e le misure necessarie per contrastare il cambiamento climatico sono difficili da implementare dato che mettono in discussione il sistema stesso di produzione industriale su cui si basa il nostro benessere. Il pericolo è globale e deve essere affrontato globalmente con la collaborazione di tutte le nazioni, ma non è quello che accade visto che gli Stati Uniti si sono ritirati dagli accordi di Parigi e in Europa la priorità è l'implementazione del riarmo e l'aumento delle spese militari.

La soluzione non sta né nel ritorno all'energia nucleare, giacché i problemi ad essa associati (scorie, rischio proliferazione nucleare) non sono stati risolti, né nella fusione nucleare che necessita ancora di svariati decenni per essere implementabile. Dobbiamo pertanto produrre energia pulita generandola localmente e in maniera diffusa mediante centrali eoliche e fotovoltaiche.

In particolare, i pannelli fotovoltaici dovrebbero essere installati sui tetti di tutte le case e una città come Genova ha una quantità sufficiente di tetti piatti per raggiungere o arrivare vicina alla neutralità energetica [14]. Non è facile, ma è possibile! L'università dovrebbe dare l'esempio rendendo i suoi edifici meno energivori e a impatto energetico nullo installando pannelli fotovoltaici che ne coprano i consumi come proposto dall'architetto Giovanni Spalla e dal fisico Pier Enrico Zani per gli edifici del Polo di Valletta Puggia.

Bibliografia

- [1] Banfi L. *Lo sbilancio dell'anidride carbonica: come uscirne?*. Atti Accad. Ligure Sci. Lett. 2022;VII(IV):41-60.
- [2] Briguglio A. *Climate and Paleoclimate: New Frontiers and Challenges in Paleontology*. Atti Accad. Ligure Sci. Lett. 2022;VII(IV):61-70.
- [3] Hansen J.E., Sato M., Simons L., Nazarenko L.S., Sangha I., Kharecha P., Zachos J.C., von Schuckmann K., Loeb N.G., Osman M.B., Jin Q., Tselioudis G., Jeong E., Lacis A., Ruedy R., Russell G., Cao J., Li J. *Global Warming in the Pipeline*, Oxford Open Climate Change 2023;3(1).
- [4] Revelle R., Broecker W., Craig H. et al. *Appendix Y4 atmospheric carbon dioxide*. In: Hornig J., York H.F., Branscomb L.M. et al. (eds.). *Restoring the Quality of Our Environment*. Report of the Environmental Pollution Panel President's Science Advisory Committee. Washington: The White House, 1965, 111-133.
- [5] Charney J., Arakawa A., Baker D. et al. *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. Washington: National Academy of Sciences Press, 1979.
- [6] Nierenberg W.A. *Changing Climate: Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee*. Washington: National Academies Press, 1983.
- [7] Hansen J.E., Lacis A., Rind D. et al. *Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms*. In: Hansen J.E., Takahashi T. (eds.). *Climate Processes and Climate Sensitivity*. American Geophysical Union 1984;29:130-163.
- [8] David E.E. Jr. *Inventing the future: energy and the CO2 "Greenhouse Effect"*. In: Hansen J.E., Takahashi T. (eds.). *Climate Processes and Climate Sensitivity*. American Geophysical Union 1984;29:1-5.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change. *History of the IPCC*. <https://www.ipcc.ch/about/history>.
- [10] IPCC. *Climate Change 2023*. Sixth Assessment Report (AR6) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

- [11] Bode H.W. *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. New York: Van Nostrand, 1945.
- [12] CLIMAP Project Members. *Seasonal reconstruction of the Earth's surface at the last glacial maximum*. Geol Soc Amer Map and Chart Series 1981;36(1).
- [13] Hansen J.E., Ruedy R., Sato M. et al. *Global surface temperature change*. Rev Geophys 2010;48:RG4004.
- [14] Marco Fossa, comunicazione personale.

Cambiamento climatico

Stiamo assistendo in questi decenni a un incremento della temperatura media della Terra che avviene su una scala di tempi estremamente più breve delle oscillazioni di temperatura documentate per il passato. La Terra ha ormai raggiunto un incremento della temperatura media rispetto all'era preindustriale che le più pessimistiche previsioni dell'International Panel on Climate Change davano per la fine degli anni Venti e solo per gli scenari più sfavorevoli. Come mai? Un recente articolo di James E. Hansen et al. (Oxford University Press, settembre 2023), sul quale voglio attrarre l'attenzione dei lettori, analizza questo fenomeno.

Parole chiave: cause cambiamento climatico; effetto serra; inquinamento atmosferico.

Climate Change

We are currently witnessing an increase in the world average temperature which occurs over a way faster timescale than any previously documented average temperature oscillation. Currently Earth has witnessed an increase of the average temperature with respect to the preindustrial era which the International Panel on Climate Change forecasted to be expected only by the end of the 2020-ies and only for the worst scenarios. Why that? A recent paper by James E. Hansen et al. (published by Oxford University Press in September 2023), on which I want to draw the attention of the readers, addresses this question.

Keywords: origins of climate change; greenhouse effect; atmospheric pollution.

GIOVANNI SPALLA

Verso l'ecopiano ecumenico europeo

Natura, energia e paesaggio per un nuovo ordine urbanistico:

“Città planetaria, città esistente e pergola giardino solare”.

Il caso delle periferie urbane di Genova (Certosa, Lagaccio, Rimessa storica AMT Staglieno, Campus Valle Puggia, ex Ilva Cornigliano)

A. L'ECOPIANO ECUMENICO EUROPEO

1. *Eco-urbanistica come integrazione natura energia paesaggio:
la metafora del volo del biancone*

L'eco-urbanistica è l'arte di riconoscere la stratificazione della città e del territorio, intrecciando natura, energia e paesaggio in una visione unitaria. Come il biancone (*Circaetus gallicus*), che scruta il paesaggio dall'alto per cogliere le connessioni ecologiche prima di scendere in picchiata su un punto preciso, così l'eco-urbanista analizza il territorio nel suo complesso, comprendendo le relazioni tra insediamenti e ambiente, per poi intervenire con progetti mirati. Questa doppia prospettiva – visione globale e azione locale – è necessaria affinché la città, non un organismo vivente ma un manufatto storico stratificato, venga restaurata e riqualificata senza perdere la sua identità.

L'eco-urbanistica si fonda su tre principi inscindibili:

- a. Tutela del paesaggio naturale e costruito, affinché il patrimonio storico e ambientale non venga compromesso.¹
- b. Restauro della città esistente, per conservare la memoria stratificata degli insediamenti umani.²

¹ Benevolo, L. (1993). *La città nella storia d'Europa*. Laterza.

² Choay, F. (1992). *L'allegoria del patrimonio*. Officina Edizioni.

c. Recupero delle aree urbane, terrestri e marittime degradate, restituendo loro funzione e valore in armonia con l'ambiente.³

A Bordeaux, la pedonalizzazione del centro e il restauro delle facciate settecentesche hanno ricostituito il rapporto tra la città e il paesaggio fluviale, migliorando la qualità urbana e la connessione con la Garonna.⁴ A Lisbona, il recupero della Baixa Pombalina ha rispettato la coerenza architettonica originaria, inserendo energie rinnovabili e mobilità sostenibile, senza alterarne la struttura.⁵ A Berlino, il restauro critico dell'Isola dei Musei ha conservato la stratificazione storica, integrando elementi contemporanei senza cancellare le tracce del tempo.⁶

Anche i territori marini richiedono un approccio eco-urbanistico: l'esperienza della Laguna di Venezia dimostra che solo un equilibrio tra conservazione ambientale e gestione delle attività urbane può garantire la sopravvivenza di un patrimonio così fragile.⁷ Il Piano del Litorale Catalano, invece, ha salvaguardato paesaggi costieri dall'eccessiva cementificazione, ripristinando dune e biodiversità marina.⁸

L'eco-urbanistica è dunque un atto di sapienza: non un'imitazione del passato, né un'astratta innovazione, ma un equilibrio tra storia e futuro, in cui la città e il territorio vengono letti nella loro profondità temporale, per essere custoditi e restituiti alle generazioni future in una sintesi armonica fra natura, energia e paesaggio.

2. *Un piano paesaggistico olistico per un'Europa multipolare: il "Progetto Unesco Eirene di Italia Nostra". Le fortificazioni genovesi nel mondo*

Per realizzare un ecopiano olistico europeo è necessario, prima, costruire un'Europa unitaria dei popoli, senza frontiere, di pace, bellezza, biodiversità, capace di contrastare il degrado ambientale, le disuguaglianze territoriali sociali e i cambiamenti climatici.

³ Secchi, B. (2000). *Prima lezione di urbanistica*. Laterza.

⁴ Bordeaux Métropole. (2020). *Stratégie de requalification du centre historique*. UNESCO.

⁵ Lisboa Câmara Municipal. (2018). *Plano de Salvaguarda da Baixa Pombalina*.

⁶ Chipperfield, D. (2010). *Intervention on the Museumsinsel*, Berlin. Journal of Architectural Heritage.

⁷ UNESCO. (2019). *Venice and its Lagoon: Conservation Challenges and Strategies*.

⁸ Generalitat de Catalunya. (2021). *Litoral Protegit: Plans de restauració costera*.

Gli alti obiettivi individuati dalla Conferenza Internazionale di Mosca del 15 novembre 2022 sono finalizzati a bloccare l'aggravarsi del conflitto tra Occidente e Russia e a cercare una via diplomatica per "creare sia uno spazio di dialogo globale per la pace, sia un movimento contro la guerra e contro le sanzioni", ma tali obiettivi sono anche rivolti a impedire l'escalation nucleare, scenario apocalittico che ci rimanda alla citazione di Albert Einstein: "I know not with what weapons World War III will be fought, but World War IV will be fought with sticks and stones". E alla frase di Jean-Paul Sartre: "Quand les riches se font la guerre, ce sont les pauvres qui meurent". Soltanto che nel caso di una guerra nucleare anche i ricchi muoiono tutti.

Mi corre l'obbligo di ringraziare gli organizzatori di questa Conferenza perché essi l'hanno fondata sui principi di "uguaglianza e dialogo per un mondo multipolare", visti in una prospettiva di pace; in questa stessa luce, ma in un contesto diverso, è stato redatto il nostro "Progetto Unesco Eirene di Italia Nostra", ricerca scientifica che, avendo per oggetto la conoscenza, il restauro e la pianificazione delle città storiche fortificate, si è sviluppata all'insegna della dea greca della Pace. I primi risultati sono stati pubblicati sui numeri speciali 248/2021 e 258/2022 di "Galileo", rivista scientifica diretta da Enzo Siviero (figura 1).



Figura 1. Giovanni Spalla illustra il "Progetto Eirene di Italia Nostra", Conferenza Internazionale di Mosca del 15 novembre 2022. Foto di Stefania Zini e Nikita Khokhlov.

Siamo arrivati alla determinazione della necessità storica che la UE debba dotarsi di un Piano Paesaggistico Olistico Europeo, quale strumento urbanistico unitario a grande scala territoriale, capace contemporaneamente sia di contrastare i cambiamenti climatici, sia di tutelare l'ambiente e il patrimonio storico, essendo esso di eccezionale valore, il più consistente del pianeta per qualità urbanistica e bellezza architettonica.

In questa prospettiva abbiamo riproporzionato il "Progetto Unesco Eirene", inserendo in esso tutte le categorie d'uso delle aree, ivi comprese quelle degradate, soggette ai fenomeni dei cambiamenti climatici. Abbiamo preso in considerazione non solo le fortificazioni genovesi ma anche tutte le altre fortificazioni, veneziane, tartare, russe eccetera.

In sostanza abbiamo reso compatibile il Progetto Eirene con il Piano Paesaggistico Europeo, istituendo un rapporto inscindibile tra fortificazioni, centri storici e paesaggi culturali e naturali e aree degradate, aree tutte da tutelare e valorizzare sia dal diritto urbanistico che da quello penale.

Per poter attuare una simile innovazione di Piano Paesaggistico Europeo, integrato con il Progetto Eirene, è urgente rifondare l'attuale pianificazione urbanistica e territoriale europea, sostituendo il modello tradizionale, autoritario, burocratico, coloniale, con un modello paesaggistico, ecologico, più ancorato alla stratificazione storica e geologica del suolo e più solidale con chi lo abita, lo lavora e lo usa.

Proponiamo questo non per una volontà di dominio tecnico e sociale, ma per acquisire, attraverso la ricerca scientifica, dei modelli mentali, operativi ed etici, più coerenti sia con le dinamiche complesse degli ecosistemi, sia con i funzionamenti delle aree urbane e metropolitane, entrambi dominati dallo sviluppo consumistico e speculativo del neoliberalismo capitalistico.

Ne consegue che l'UE dovrà non solo dotarsi di una più inclusiva Costituzione Europea, ma soprattutto attuare a pieno i principi enunciati nella Convenzione per la Protezione del Patrimonio Mondiale Culturale e Naturale (1972) e nella Convenzione Europea del Paesaggio (2000), principi da rivedere alla luce dei crescenti impatti devastanti che stanno subendo le città e i paesaggi culturali e naturali, dell'Europa e non solo, a causa degli effetti dei cambiamenti climatici e degli inquinamenti derivanti dall'uso e riuso delle fonti fossili.

La risoluzione della crisi climatica attraverso la transizione ecologica comporta la riduzione drastica delle emissioni di CO₂ e la decar-

bonizzazione, passando dalle fonti fossili a quelle rinnovabili, cosa che non si può ottenere se la scala degli interventi urbanistici è circoscritta ai confini comunali, regionali e anche nazionali, perché essa non corrisponde alla scala degli effetti dei cambiamenti climatici.

Nel caso in cui gli interventi di contrasto ai cambiamenti climatici riguardassero gli insediamenti urbani e agricoli appartenenti a un ecosistema fluviale, costiero o marino, che attraversa più stati, non c'è dubbio che essi debbano essere coordinati da un unico strumento urbanistico, esteso alle aree degli stati interessati, e che lo strumento di pianificazione più adeguato è il "Piano Paesaggistico Olistico". Tale Piano, potendo operare in un regime di pace, con le frontiere aperte, senza vincoli di confini, nel rispetto dei diritti naturali e sociali, è in grado di studiare, tutelare restaurare e valorizzare, quali beni comuni, la biodiversità, gli ecosistemi, il paesaggio marino e terrestre e il patrimonio culturale e naturale, all'insegna del principio universalistico secondo il quale la bellezza del pianeta è Patrimonio dell'Umanità, da trasmettere alle nuove generazioni, attraverso processi sempre più generalizzati di cittadinanza attiva.

3. *Ecopiano paesaggistico e territoriale della Regione Liguria*

Secondo l'articolo 117 della Costituzione la potestà legislativa, in materia di urbanistica, è stata affidata alle Regioni con precisi vincoli e obblighi comunitari.

La Regione Liguria non è riuscita in vent'anni, dall'emanazione del decreto legislativo n. 42 del 22 gennaio 2004, a redigere, approvare e attuare il Piano di Coordinamento Paesaggistico (PCPRL) in attuazione del suddetto decreto.

Tanto il Piano Paesaggistico Regionale quanto il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio sono strumenti di legge, considerati, secondo la maggioranza della cultura di destra, di impedimento all'attuazione degli interventi in tempi brevi.

Gli otto anni di governo delle amministrazioni comunale e regionale hanno impedito, infatti, di salvaguardare, riqualificare e contrastare gli squilibri del territorio ligure, e di integrare energia e paesaggio a scala globale e locale, non avendo a disposizione né lo strumento di pianificazione

paesaggistica, né l'essersi dotati, per tempo, di un rilievo scientifico dello stato di fatto e di pregresso dell'uso del suolo, sottosuolo e soprassuolo.

Infatti, le tavole dello stato di fatto elaborate dalla Regione Liguria si riducono a un elenco di analisi areali, mai ricondotte a un'unica tavola di sintesi delle destinazioni d'uso allo stato di fatto 2025 del territorio della Liguria. La Regione Liguria si è impegnata nel 2017, ai sensi del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (art. 135 e art. 143), a regolare le prescrizioni e previsioni di tutela e restauro del paesaggio ligure, attraverso la redazione e l'approvazione del Piano Paesaggistico Territoriale Regionale (PPTR), piano che avrebbe dovuto innovarsi integrando natura/biodiversità, energia e paesaggio e mai portato a termine fino a oggi.

B. LA CITTÀ PLANETARIA INTEGRA NATURA, ENERGIA E PAESAGGIO PER RIQUALIFICARE LA CITTÀ ESISTENTE

1. *Teoria e prassi, città e potere nella storia*

La teoria è il volo dell'idea, la prassi è il passo dell'azione. Ma l'una senza l'altra si dissolve: la teoria senza prassi è chimera, la prassi senza teoria è cieca. Da Aristotele a Marx, il pensiero ha inseguito questa tensione, tentando di costruire un ponte sull'abisso. "La prassi è la verità della teoria" (*Tesi su Feuerbach*).

Il potere, architetto invisibile, modella lo spazio, impone gerarchie, iscrive nel territorio la propria volontà. La città non è solo dimora dell'uomo, ma scenografia del dominio. "Chi governa lo spazio, governa l'essere" (Foucault, *Sorvegliare e punire*, III). Tuttavia, ogni città è anche un'opera d'arte collettiva, dove l'estetica urbana riflette l'anima di una civiltà.

La città greca: Platone, Aristotele e Ippodamo di Mileto

La *pólis* greca è il primo esperimento della "ragione che diventa pietra, del pensiero che si fa spazio". Platone (*La Repubblica*, IV) sogna la città perfetta, armonia di classi e funzioni, ordine geometrico imposto dall'alto. Aristotele (*Politica*, VII) la riporta sulla terra: la città è una relazione viva, un tessuto organico di differenze.

Ippodamo di Mileto, considerato il padre dell'urbanistica occidentale, introduce la griglia ortogonale, la razionalizzazione dello spazio urbano come ordine e previsione. Ma ogni geometria è anche una gabbia: la razionalità urbanistica greca è la prima forma di biopolitica.

La città romana: Vitruvio e Timgad

Roma non sogna la città, la impone. Se la *pólis* era comunità, l'*urbs* è dominio. Vitruvio (*De Architectura*, I) codifica il principio: *firmitas, utilitas, venustas* – solidità, funzionalità, bellezza. Ma la bellezza romana è sottomissione dello spazio al potere: la strada rettilinea, il cardo e il decumano, sono infrastrutture portanti simboli, della città romana, di cui il foro è il centro dell'attività politica, amministrativa, ed economica, come l'*agorà* lo era per i greci.

Timgad, la città africana di Traiano, è il paradigma, quale scacchiera perfetta, dell'ordine assoluto. Ma la storia è più forte della forma: Roma cade, Timgad si dissolve nella sabbia, ma il loro patrimonio culturale si conserva. Ogni città perfetta è un'illusione, un'architettura contro il tempo.

La città medievale: sant'Agostino e san Tommaso

Dopo il crollo di Roma la città si commisura alla trascendenza. Sant'Agostino (*De Civitate Dei*, XIX) la divide in due: la città degli uomini, corrotta e caduca; la città di Dio, eterna e perfetta. Il Medioevo costruisce città come rifugi e preghiere: mura difensive, cattedrali gotiche come slancio verso il cielo.

San Tommaso (*Summa Theologiae*, I-II) riporta la città sulla terra: l'ordine urbano è specchio dell'ordine divino. Ma l'ombra medievale è già segnata dal potere temporale della Chiesa: la città non è più comunità, ma teocrazia, le cui vestigia sono un patrimonio storico da conservare e tutelare.

La città rinascimentale e manierista: Alberti e Palladio

Con il Rinascimento la città si risveglia. Alberti (*De Re Aedificatoria*, II) riprende Vitruvio e lo innalza a regola aurea: la bellezza è proporzione, la città è un meccanismo di equilibrio. Ma è una razionalità fragile: il manierismo già ne incrina le certezze.

Palladio (*I Quattro Libri dell'Architettura*, III) concepisce, studiando e rilevando la Roma romana, la città universale come microcosmo dell'or-

dine universale. Ma l'ordine è una maschera: dietro la perfezione si nasconde l'inizio del dominio borghese sulla città, come proprietà privata.

La Rivoluzione francese: Ledoux, Diderot e il Terrore

La Rivoluzione rifonda la città, ma la trasforma in un campo di battaglia. Ledoux (*L'Architecture considérée*, IX) disegna la città ideale come pedagogia sociale, ogni edificio un insegnamento. Diderot (*Encyclopédie*, V) vede nella città la culla del progresso.

Ma il Terrore inventa la ghigliottina, la quale non è solo uno strumento, è un'architettura politica, un dispositivo urbano di giustizia e di morte. I principi di libertà, uguaglianza e fratellanza sono il lascito costituzionale alle nuove generazioni. La città moderna nasce da questi principi rivoluzionari.

La città planetaria e la crisi della città esistente

La città si espande fino a dissolversi. Lefebvre (*La production de l'espace*, XII) lo aveva previsto: il capitalismo non costruisce più città, ma spazio omogeneo. La città planetaria è il trionfo del mercato sul territorio.

2. *La città planetaria: trasformare l'esistente in ecocittà e riqualificare il suo patrimonio urbano e territoriale*

La città planetaria è la soluzione per la trasformazione della città esistente, che integra il recupero e il restauro del patrimonio storico e paesaggistico, alternando riflessione filosofica e slancio poetico.

Nel vasto arazzo dell'evoluzione urbana la città planetaria emerge non come strumento di dominio, ma come visione radicale per la metamorfosi delle città esistenti in eco-città, armoniosamente integrate con la natura. Questa concezione rappresenta una risposta audace alle sfide poste dalla finanziarizzazione oligarchica, che ha spesso ridotto le città a meri strumenti del capitale.

Le città geometriche ideali, con i loro assi cartesiani e la loro simmetria, sono state storicamente espressioni sia del potere politico sia della ricerca di una bellezza architettonica e urbanistica. Dall'antica Mileto, pianificata da Ippodamo, passando per le visioni rinascimentali di città ideali, fino agli interventi ottocenteschi del barone Haussmann a

Parigi, la geometria urbana ha spesso cercato di coniugare ordine e bellezza. Tuttavia, queste stesse strutture possono diventare strumenti di controllo, soffocando la spontaneità e la vitalità delle comunità urbane.

La città planetaria si propone come un paradigma che superi queste dicotomie; essa è un modello urbanistico di obiettivi sostenibili e metodi di operatività modulare, capace di incidere e di adattarsi alla città esistente, il cui suolo, sottosuolo e soprassuolo vengano esaminati, rilevati e definiti, nonché sottoposti a ipotesi di intervento di bonifica e di trasformazione attraverso progetti di restauro e recupero che utilizzino le potenzialità edilizie, infrastrutturali, patrimoniali e sociali. La città planetaria, a questo punto del processo di riqualificazione, è in grado di mettere a disposizione degli abitanti del quartiere spazi riqualificati e ristrutturati secondo le loro esigenze e aspirazioni.

Questo approccio implica una profonda revisione delle pratiche urbanistiche e architettoniche in atto. La partecipazione attiva delle comunità locali diventa fondamentale, così come l'integrazione di tecnologie sostenibili e l'adozione di politiche che promuovano l'equità sociale e l'accesso universale ai servizi urbani.

La città planetaria, quindi, rappresenta una visione olistica e inclusiva dell'urbanistica, dove teoria e prassi si fondono per creare spazi urbani che siano al contempo funzionali, sostenibili e profondamente umani. È una chiamata a ripensare le nostre città, non come meri agglomerati di edifici, ma come ecosistemi complessi, in cui l'uomo, la natura e la cultura coesistono in armonia.

C. UN NUOVO ORDINE ARCHITETTONICO E URBANISTICO: LA PERGOLA SOLARE GIARDINO LUMINOSO

Abbiamo buoni motivi teorici e pratici per considerare la città planetaria, che non è concepita come una utopia astratta, una necessità storica, purché su di essa si concentrino risorse economiche, scientifiche, progettuali, partecipative finalizzate alla riqualificazione e al risanamento della città esistente. A questo fine abbiamo messo a punto, in prima approssimazione, un nuovo ordine architettonico, energetico e urbanistico, costituito da un sistema costruttivo estetico di travi e pilastri reticolari in acciaio, tanto flessibile da essere in grado di coprire

piccole e grandi luci e di portare in sicurezza ed efficienza pannelli fotovoltaici disposti a guglia lineare.

Per arrivare a questa ben definita scelta di un nuovo ordine, nostro punto di partenza è stato non solo l'antico sistema trilitico classico (i cui sostegni verticali sono le colonne con base, fusto e capitello e i sostegni orizzontali gli architravi con metope, triglifi e cornici), ma anche la trattatistica romana, rinascimentale, novecentesca e contemporanea.

Tale nuovo sistema costruttivo, energetico e paesaggistico ha generato l'ecoprogetto della "pergola planetaria solare giardino luminoso", soluzione in travi reticolari d'acciaio che abbiamo applicato in diverse situazioni urbane e territoriali, quali le coperture di strade, autostrade e parcheggi, insediamenti terrestri e marini, purché non siano zone soggette a vincoli ambientali, storici e paesaggistici.

La struttura della pergola planetaria è concepita per sostenere moduli fotovoltaici bifacciali verticali e orizzontali, con il doppio scopo di produrre energia e allo stesso tempo di permettere la crescita sottostante di giardini luminosi destinati all'uso sociale comunitario dei quartieri e di proteggere i raccolti agricoli da stress di onde di calore. Tale innovativa pergola, essendo stata progettata come una struttura integrata a eco-architetture modulari, può costituire un criterio metodologico flessibile per riqualificare insediamenti urbani e territoriali, esistenti e nuovi: periferie industriali, aree agricole, sistemi portuali, autostrade, ferrovie, edifici pubblici e privati ecc. Importante, quindi, è l'analisi delle strutture meccaniche in relazione alla loro sicurezza ed economicità.

La pergola planetaria è anche fondamento di un nuovo paradigma eco-morfologico architettonico e della costituzione di estese comunità energetiche (CER), base della totale transizione energetica da fonti rinnovabili.

I progetti di comunità energetica urbanistica, tramite la pergola, strumento di rinnovamento spaziale paesaggistico, sono finalizzati a difendere e a rigenerare gli insediamenti urbani, agricoli, industriali, portuali per contrastare le disuguaglianze territoriali, ecologiche e sanitarie. Si fa riferimento sia a concezioni teoriche e pratiche di contrasto alle emergenze climatiche, sia a precisi casi esistenti e immaginari.

La città planetaria, così verificata attraverso le infinite e varieghe situazioni stratificate della città esistente, è una visione eminentemente progettuale e sociale, capace di sovvertire i paradigmi esausti della pianificazione pubblica contemporanea, ponendo al centro l'integrazione

tra città storica e contemporanea, territorio terrestre e marino, energia rinnovabile e paesaggio naturale e culturale.

Si tratta di superare la città consumistica e segregante quale modello urbano, sempre più privatistico, di separazione e di conflitto fra ricchi e poveri, fra centro e periferia, fra le architetture spettacolari formalistiche delle “gated-communities/condominios-fechados” e le periferie residenziali e industriali, degradate, inquinate e in parte abbandonate, frutto dei meccanismi speculativi gestiti dalle oligarchie economiche.

L'urbanistica tradizionale ha smesso di essere un'arte urbana e territoriale al servizio della collettività, perché è divenuta un dispositivo amministrativo di esclusione, cioè uno strumento del dominio proprio del potere pubblico, attraverso il controllo delle destinazioni d'uso e degli strumenti urbanistici regionali metropolitani e comunali.

La Città Planetaria si pone come atto di ricomposizione, una strategia che reintegra ciò che è stato disgiunto e ristabilisce un equilibrio tra uomo, ambiente e tecnologia.

In questo nuovo ordine urbano la natura non è più confinata in aree residuali ma diviene struttura portante della città, riconquistando il suo ruolo di matrice spaziale e sociale. Le aree abbandonate o marginalizzate – periferie industriali dismesse, lotti urbani inutilizzati, infrastrutture obsolete – vengono riconvertite in un sistema di spazi pubblici produttivi, dove il verde non è solo estetica ma energia, risorsa, alimento e diritto collettivo. La vegetazione diventa infrastruttura ecologica, capace di generare ossigeno, mitigare il clima, filtrare le acque, riattivare i cicli naturali interrotti dal dominio del cemento.

Ma questa trasformazione non è solo ambientale: è un atto politico di riappropriazione dello spazio urbano da parte della società civile, un ribaltamento della città come strumento di accumulazione oligarchica. L'energia, oggi monopolizzata da sistemi centralizzati, viene decentrata e integrata nell'architettura stessa attraverso un paesaggio tecnologico diffuso, fatto di pergole fotovoltaiche, superfici produttive, edifici bioclimatici capaci di generare risorse, anziché consumarle. L'autosufficienza energetica diventa un nuovo diritto urbano, sottratto alla speculazione e restituito alla gestione collettiva.

La città non è più un agglomerato di volumi e funzioni separate, ma un “manufatto” unitario in cui spazio pubblico, infrastruttura ecologica e architettura civile si fondono in una nuova estetica non più formale, ma

etica. Il linguaggio architettonico spettacolare, che ha ridotto la città a una collezione di monumenti autoreferenziali, lascia spazio a un'urbanistica dei diritti, dove la bellezza non è privilegio, ma esperienza quotidiana.

Gli spazi non vengono disegnati per essere fotografati, ma per essere vissuti, attraversati, abitati nella loro dimensione più autentica. L'architettura si libera dalla rigidità della composizione formale e diventa materia fluida, capace di adattarsi alle esigenze della comunità, di trasformarsi con essa, di accogliere nuove forme di uso e partecipazione.

Questa rivoluzione non può avvenire attraverso i meccanismi di pianificazione tradizionale, troppo spesso piegati agli interessi privati e incapaci di cogliere la complessità del reale. La Città Planetaria nasce da un processo partecipativo, in cui la pianificazione è guidata da consigli popolari, composti da cittadini consapevoli, formati attraverso un metodo scientifico-sapienziale che restituisce loro la capacità di governare lo spazio. Gli urbanisti, gli architetti, gli scienziati non sono più tecnocrati che impongono visioni astratte, ma facilitatori di un processo collettivo, in cui la città è costruita dal basso, modellata sulle esigenze reali, capace di rispondere ai bisogni sociali senza rinunciare alla qualità estetica.

In questa nuova configurazione la città non è più un oggetto, ma un processo in divenire, una struttura aperta che evolve con chi la abita. Il concetto stesso di proprietà si trasforma: gli spazi pubblici diventano beni comuni, gli edifici si pensano come organismi modificabili, il territorio è visto non come merce, ma come ecosistema da custodire e rigenerare. Il modello economico urbano si sposta dalla speculazione finanziaria alla produzione di valore sociale, restituendo centralità al lavoro, alla cultura, all'innovazione sostenibile.

La Città Planetaria non è un'utopia astratta, ma una necessità storica. Il modello della città consumistica ha mostrato il suo fallimento: ha prodotto disuguaglianza, disgregazione, crisi ecologica e alienazione sociale. È tempo di una nuova idea di città, capace di ricucire ciò che è stato lacerato, di trasformare il conflitto in progetto, di restituire alla società il diritto di costruire il proprio spazio di vita. L'integrazione fra natura, energia e paesaggio diventa la chiave per un nuovo umanesimo urbano, in cui la bellezza non è privilegio, ma condizione essenziale dell'abitare. La città non è più un luogo da subire, ma un'opera collettiva, un'architettura di relazioni, un paesaggio condiviso in cui l'uomo torna finalmente a essere parte del mondo e non suo dominatore.

D. IL CASO DELLE PERIFERIE URBANE DI GENOVA

1. *Ecoprogetto Lagaccio: restauro e riuso del proiettficio e della polveriera, quale patrimonio storico militare, destinati a spazi pubblici per il quartiere*

Al Lagaccio, la pergola è prevista sopra il tetto del proiettficio e della polveriera, salvaguardandone gli spazi e le strutture di valore storico culturale. In tale complesso militare, che ha subito diverse trasformazioni dal Seicento alla Prima guerra mondiale, si producevano munizioni, proiettili e polvere; il complesso, con i suoi lucernari a doppia falda, è oggi abbandonato, e soprattutto privo di significato estetico e di interesse urbanistico per la collettività. Esso rappresenta una risorsa di spazio da destinarsi a centro di servizi di comunità del Lagaccio che richiede una risoluzione urbanistica innovativa.

La trave reticolare in acciaio del carro ponte all'interno dello spazio del proiettficio (135×13 m) era utilizzata per il trasporto di materiali pesanti, come munizioni, esplosivi e altre forniture militari, mediante carrelli scorrevoli su una travatura metallica. Si propone che tale carro ponte venga utilizzato, una volta restaurato e riconvertito, per la nuova funzione del complesso militare, cioè come centro di comunità di servizi culturali, sociali, sanitari, sportivi e per lo spettacolo. In particolare, potrà essere utilizzato per il trasporto di attrezzature e materiali pesanti (come per esempio scenografie, attrezzature audiovisive, lampade e luci, strumenti musicali) necessari per allestire spettacoli teatrali o performance artistiche o per svolgere in modo versatile le più diverse attività educative che i rappresentanti del quartiere del Lagaccio decideranno di svolgere all'interno del maestoso spazio storico del proiettficio, rimesso a nuovo e rigenerato dalla luce proveniente dall'alto delle vetrate dei suoi lucernari.

Lo schema spaziale della pergola planetaria solare giardino luminoso prevede che essa sia collocata sulle coperture del proiettficio e della polveriera, orientata secondo l'asse nord-sud corrispondente a quello della valle del Lagaccio. Tale pergola è costituita da un sistema a maglia ortogonale di travi reticolari portanti su pilastri triangolari; la sua superficie è trasparente e areata in modo che sotto di essa possano crescere le piante di un giardino solare.

Il disegno del suo tracciato è disposto in modo tale che gli spazi sottostanti diventino un centro socioculturale, sportivo e commercia-

le e didattico che collega il proiettificio al nuovo parco e alla caserma Gavoglio, costituendo un'unità urbanistica di notevoli dimensioni e di forte contenuto di destinazione socioculturale pubblica.

Il tetto di tale pergola è costituito da linee e superfici parallele coperte non totalmente da moduli di pannelli solari, disposti a guglie da 36° e da 150° sul giardino sottostante.

Si tratta di un intervento innovativo non solo perché il quartiere del Lagaccio si dota di un centro multifunzionale di servizi culturali, sociali e commerciali, ma anche come intervento di restauro conservativo del proiettificio e della polveriera, secondo il principio della salvaguardia della stratificazione storico-urbanistica della città, che è sempre in evoluzione e conservazione.

È bello pensare che chi passerà sul tetto giardino della pergola Lagaccio potrà vedere e capire, attraverso i lucernari vetrati, gli spazi storici delimitati da potenti murature, un tempo utilizzati per fini militari e ora riutilizzati come centro servizi pubblici e privati (figura 2-10).



Figura 2. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta assonometrica della pergola a guglie lineari sopra il tetto giardino del proiettificio e della polveriera.*

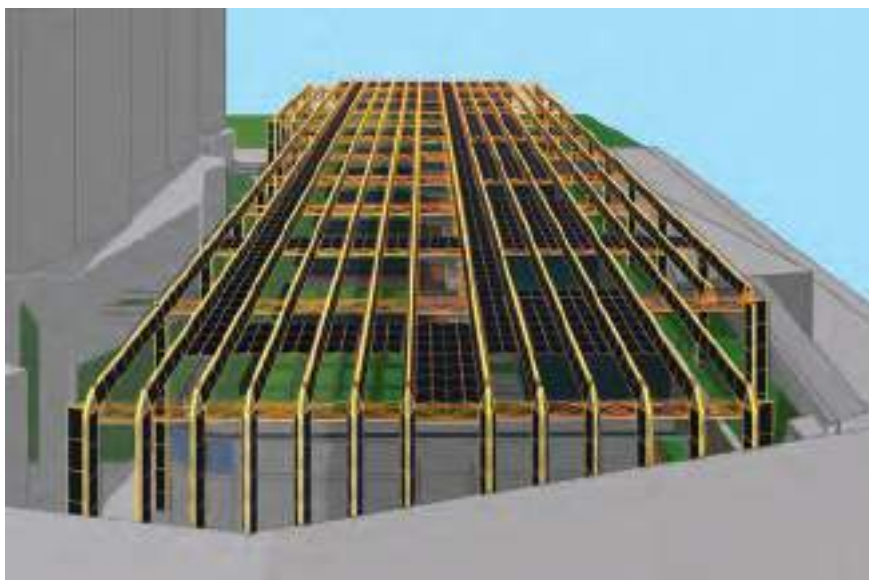


Figura 3. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta prospettica, da nord, della pergola a guglie lineari sopra il tetto giardino del proiettificio e della polveriera.*



Figura 4. *Ecoprogetto Lagaccio. Prospetto a porticato della facciata sud.*

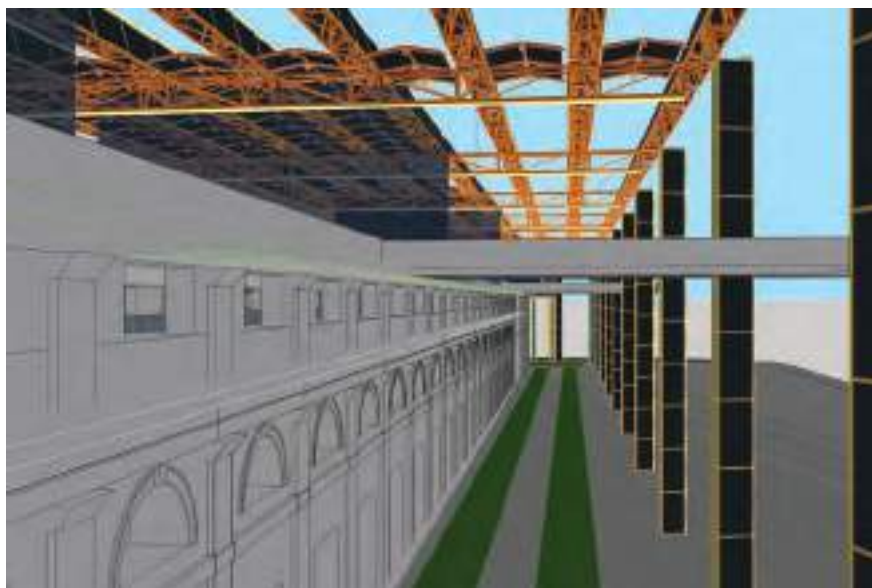


Figura 5. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta interna del porticato ovest con la facciata a elementi neoclassici della polveriera.*



Figura 6. *Ecoprogetto Lagaccio. Sezione prospetto della facciata ovest a elementi neoclassici della polveriera.*



Figura 7. *Ecoprogetto Lagaccio. Prospetto ovest del porticato e della facciata a elementi neoclassici della polveriera.*

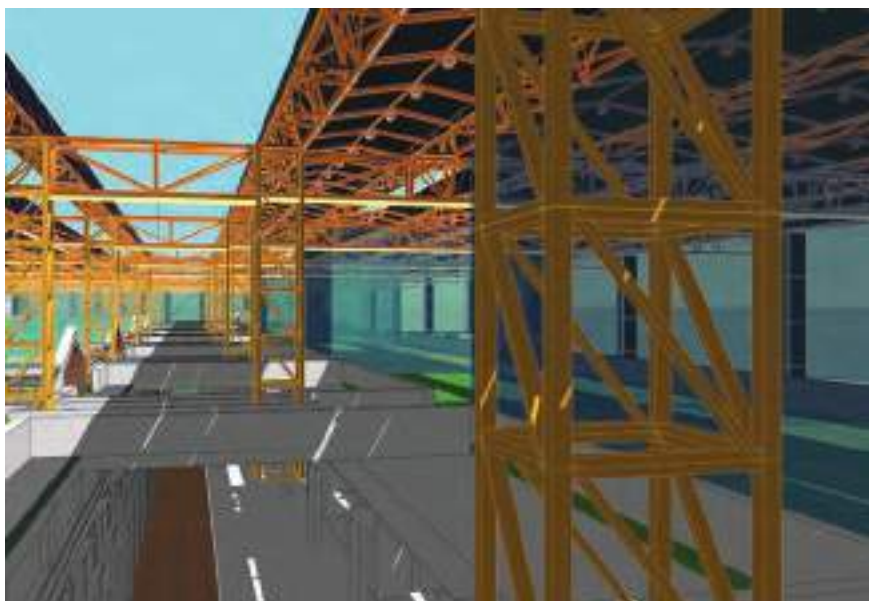


Figura 8. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta del tetto giardino della pergola con guglie lineari; in primo piano il vicolo di separazione tra proiettificio e polveriera.*

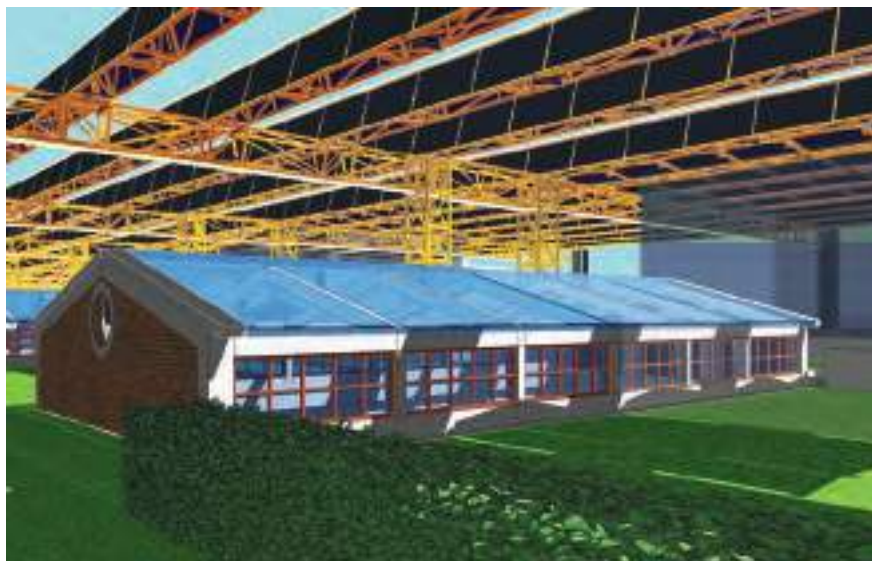


Figura 9. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta del tetto giardino della pergola a guglie lineari: in primo piano uno dei lucernai del proietttificio.*

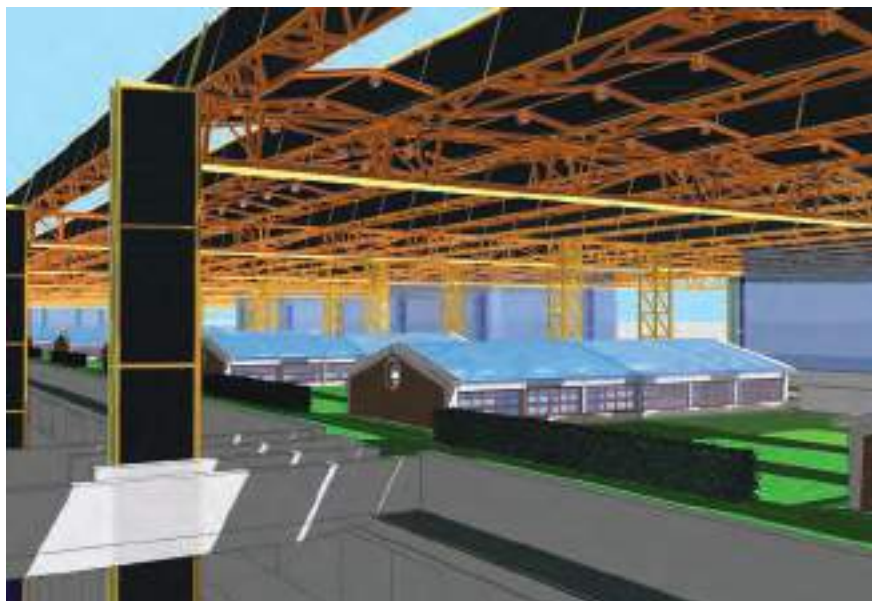


Figura 10. *Ecoprogetto Lagaccio. Veduta del tetto giardino della pergola a guglie lineari con la sequenza dei lucernai del proietttificio.*

2. *Ecoprogetto Certosa area Facchini: recupero del patrimonio storico industriale per un nuovo polo scolastico e sociale della Valpolcevera*

Le Officine Ferroviarie di Certosa a Genova sono un'importante testimonianza storica, architettonica, urbanistica e industriale e rappresentano un pezzo significativo della storia industriale del paese. Questa struttura è stata costruita nel XIX secolo e ha svolto un ruolo fondamentale, con la costruzione e la manutenzione di locomotive e vagoni ferroviari, nello sviluppo dell'industria ferroviaria e delle infrastrutture ferroviarie in Italia.

Sotto il profilo architettonico e urbanistico esse sono caratterizzate da un design industriale unico, che riflette l'estetica dell'epoca in cui sono state costruite. La struttura è composta da grandi capannoni, officine e uffici, che testimoniano l'importanza e la grandezza dell'industria ferroviaria dell'epoca. Situate nel quartiere di Rivarolo, sono un elemento significativo del tessuto urbano di Genova che ha contribuito alla formazione e all'evoluzione del paesaggio urbano della zona.

Inoltre, tali officine rappresentano un serbatoio di conoscenze e competenze nel campo dell'ingegneria e della meccanica. Esse sono un patrimonio storico, architettonico, urbanistico e industriale di grande valore il cui recupero per spazi sociali e scopi educativi, come ad esempio per la costituzione di un polo scolastico dall'asilo nido al liceo scientifico a indirizzo umanistico e tecnologico, può favorire lo sviluppo di nuove generazioni di professionisti nel settore. Il loro recupero potrebbe contribuire, oltre che alla valorizzazione di tali strutture, all'arricchimento della comunità locale.

Le Officine Ferroviarie di Certosa sono costituite da grandi capannoni, officine e uffici, che occupano una vasta area. Queste strutture sono dotate di ampi spazi interni, necessari per la lavorazione e la manutenzione delle locomotive e dei vagoni ferroviari, e riflettono lo stile architettonico industriale dell'epoca in cui sono state costruite. Caratterizzate da linee semplici e funzionali, sono prive di elementi decorativi superflui: l'accento è posto sulla loro funzionalità e praticità.

Il loro recupero potrebbe permettere di riqualificare l'area e creare spazi sociali per gli abitanti del quartiere, preservando l'evoluzione tecnologica e storica delle capriate Polonceau, dalle prime con i puntoni in legno fino alle travi reticolari.

Le Officine sono caratterizzate dall'uso di materiali quali il ferro nelle capriate Polonceau e il vetro nelle finestre a nastro. Le strutture in ferro sono utilizzate per le parti portanti e per creare ampie volte e tettoie. Il vetro è ampiamente utilizzato per consentire alla luce naturale di penetrare negli spazi interni. Vi sono elementi architettonici distintivi, come ad esempio le ampie finestre ad arco, che permettono l'ingresso della luce naturale e conferiscono un carattere di leggerezza delle strutture. Altre caratteristiche includono le grandi porte per l'accesso dei treni e i dettagli di lavorazione presenti nelle parti in ferro. Gli spazi e le strutture portanti sono stati progettati in modo da potersi adattare alle diverse esigenze lavorative. Le strutture interne sono organizzate in modo flessibile, con ampi spazi aperti che possono essere suddivisi e riorganizzati in base alle necessità.

Queste caratteristiche architettoniche distintive rendono le Officine Ferroviarie di Certosa un prezioso esempio di architettura industriale dell'epoca e conferiscono loro un'importante rilevanza storica ed estetica.

Le Officine Ferroviarie sono delimitate a ovest dal torrente Polcevera e a est dalla ferrovia Genova Rivarolo-Arquata Scrivia; l'asse longitudinale è orientato nord-sud.

L'ecopiano e l'ecoprogetto di Certosa, che integrano urbanistica, architettura ed energia e paesaggio, sono finalizzati:

- al recupero degli spazi storici delle ex Officine Ferroviarie, destinati a nuove funzioni sportive, sociali, sanitarie e culturali;
- alla ricostruzione di edifici demolibili, destinati al polo scolastico comprendente asilo nido, scuola dell'infanzia, scuole medie, liceo scientifico a indirizzo umanistico e tecnologico-digitale;
- alla costituzione di una comunità energetica locale capace di alleviare il costo esorbitante della luce per cinquemila famiglie.

L'ecoprogetto di Certosa è il primo esempio di integrazione, nelle città e periferie urbane, tra moduli fotovoltaici e il nuovo ordine architettonico di pergola planetaria solare giardino luminoso.

Gli elementi distintivi della tipologia insediativa sono caratterizzati da:

- compattezza del corpo edilizio lineare, lungo circa 500 m e largo 24 m, solcato da una strada-corridoio intermedia larga 6 m, la quale ha la funzione di servire aule, laboratori e servizi collettivi del nuovo polo scolastico e gli spazi industriali dell'Area Facchini rinnovati per

accogliere un polo sportivo (edificio shed), un centro civico, una mensa scolastica e servizi di comunità;

- flessibilità e modularità delle strutture reticolari di copertura (travi con guglie) e di facciata (pilastri con guglie), le quali portano il sistema dei moduli a guglie, sia del corpo edilizio lineare che del giardino pergola a tre piani con passerelle aventi ringhiere/siepi;

- espressività simbolica e tipologica dell'insediamento lineare, modulare, sociale e scolastico di Certosa, in quanto esso è ritmato da quattro portali urbani contenenti ciascuno le scale d'accesso e di sicurezza e gli ascensori per accedere ai tre livelli, nonché agli spazi collettivi accessibili alla comunità scolastica e di quartiere (biblioteche tradizionali e digitali ecc.)

- piacevolezza e accoglienza dei giardini con vasche, giochi e piante d'acqua delle quattro piazze corrispondenti ai quattro portali e della pergola giardino a tre livelli coperta da un tetto con aperture per illuminare la vegetazione sottostante (figure 11-24).



Figura 11. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Veduta assonometrica da nord-est. In primo piano le nuove pilastrate intermedie e continue, i cui portali d'accesso sono marcati da un biancone digitale e il complesso ferroviario storico restaurato, costituendo un nuovo fronte urbanistico, prospettante sul Polcevera; in secondo piano la pergola giardino a tre livelli e una pergola sul piano del ferro, asse Genova-Milano.*

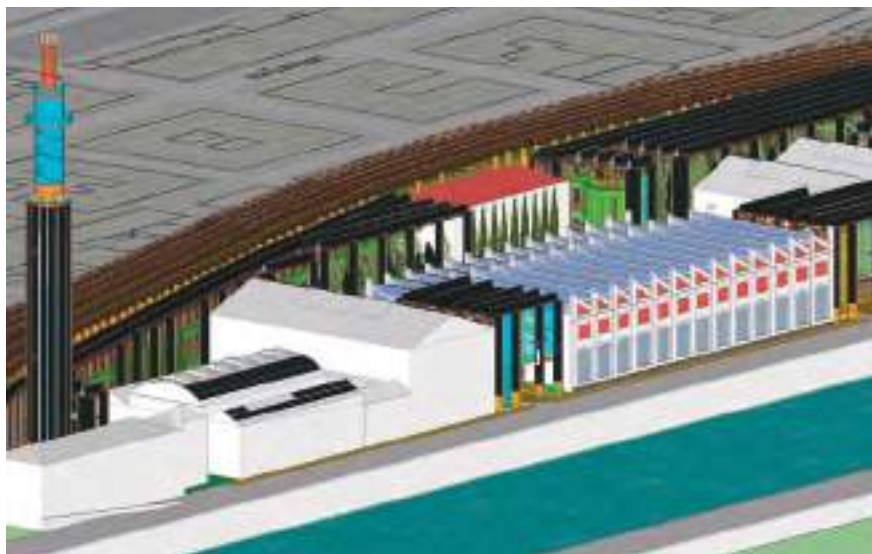


Figura 11a. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Particolare della veduta assometrica di cui alla fig. 11.*

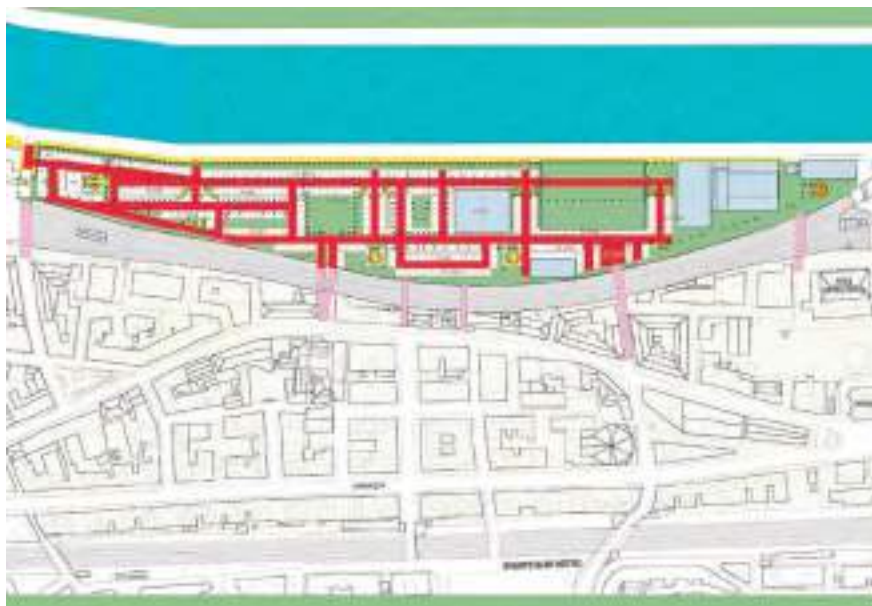


Figura 12. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Planimetria del parcheggio in sotterraneo; in rosso le strade di distribuzione, in bianco gli stalli, pari a 600 per piano.*



Figura 13. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Planimetria del piano terreno del polo scolastico classico-digitale (dall'asilo nido e scuole elementari alla scuola media e liceo scientifico sperimentale). Il corridoio-strada interno costituisce l'asse urbanistico rettilineo e continuo, che distribuisce le aule, a due a due, dotate di servizi e di spazi per il verde scolastico e per la tecnologia didattica digitale.*



Figura 14. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Planimetria con pannelli fotovoltaici.*

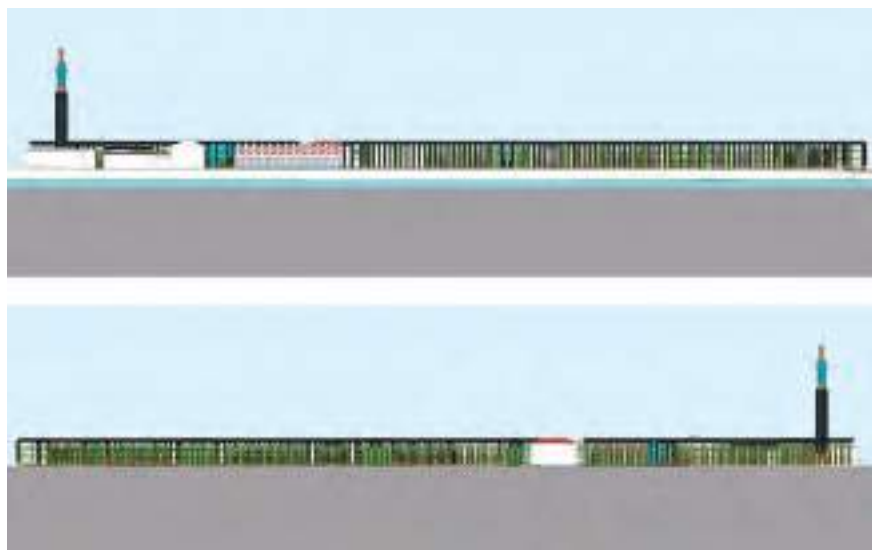


Figura 15. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Sopra: prospetto superiore ovest sul Polcevera; sotto: prospetto est su ferrovia Genova-Milano.*

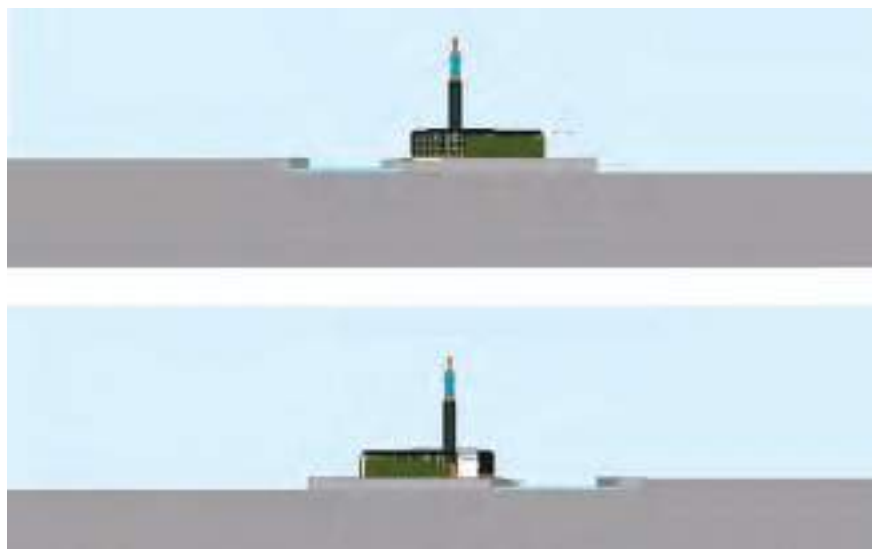


Figura 16. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Sopra: prospetto-sezione sud; sotto: prospetto-sezione nord.*

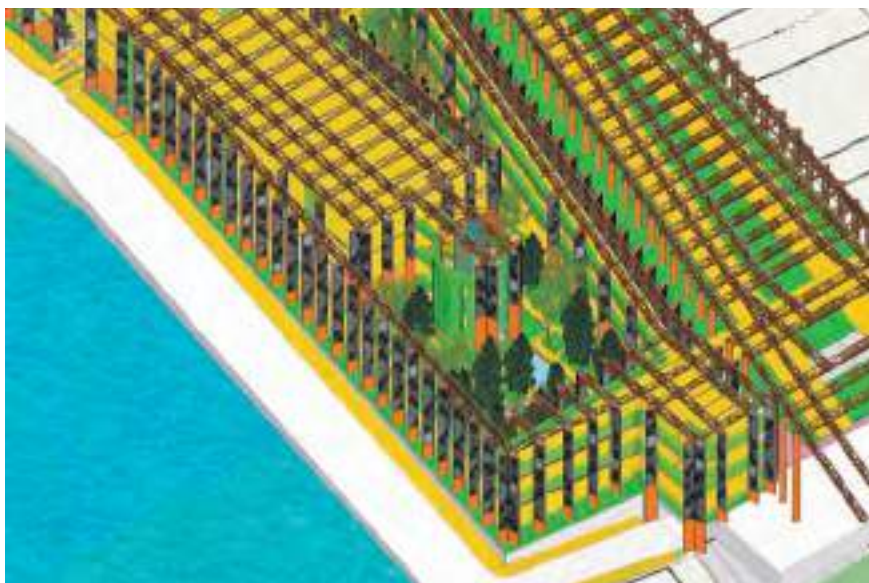


Figura 17. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Particolare della testata sud, con il giardino piantumato.*

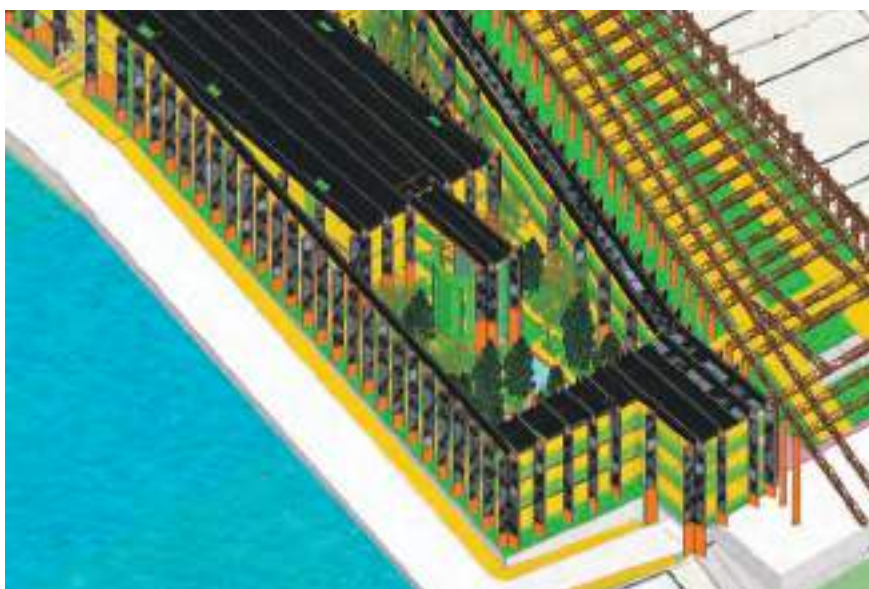


Figura 18. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Particolare della testata sud, con le coperture a guglie fotovoltaiche (36°, 156°).*



Figura 19. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Particolare del prospetto sul Polcevera del polo scolastico e vedute sia di un portale d'accesso con biancone digitale, sia, in trasparenza, dell'interno dell'aula magna-teatro con grande occhio vetrato sopra il palcoscenico.*



Figura 20. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Particolare del prospetto sul Polcevera del polo scolastico e vedute sia di parte dell'edificio storico industriale a shed, sia di un portale d'accesso con biancone digitale.*



Figura 21. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Veduta interna della pergola giardino, con pannelli schermo digitale contenenti solidi platonici disegnati da Leonardo.*



Figura 22. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Interno del giardino del polo scolastico; a sinistra, la pilastrata con vetrate antirumore e, al centro, scala-giardino cilindrica.*



Figura 23. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Veduta della piazza giardino, con in fondo il portale d'accesso.*

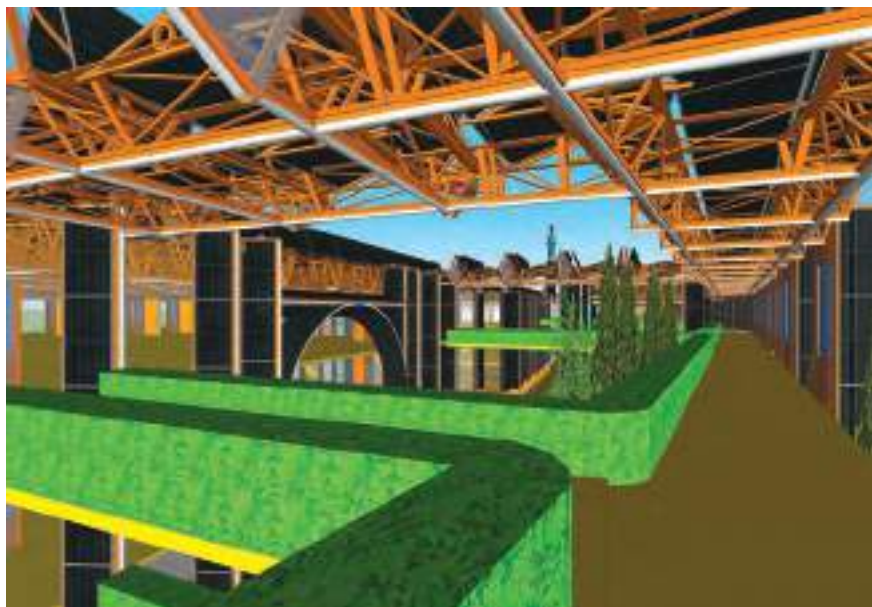


Figura 24. *Ecoprogetto Certosa area Facchini. Veduta del 3° livello della pergola, sulla sinistra l'occhio vetrato dell'aula magna/teatro.*

3. *Rimessa storica AMT di Staglieno*

Dall'esame dei documenti storici relativi alla rimessa di Staglieno (Uite-AMT) disponibili nell'archivio della Fondazione Ansaldo Struppa-Genova (1901 rilievo della facciata originaria; 1951 rilievo della nuova facciata) abbiamo ricavato il valore storico documentale sia della sequenza di capriate Polonceau con relativi appoggi a terra, sia del grande spazio interno illuminato dalle finestre a nastro (lunghe ben 215 m), che secondo Le Corbusier sono uno dei cinque punti che caratterizzano l'architettura moderna.

Tale documentazione, insieme ai rilievi fatti sul posto, è stata la base di partenza del nostro ecoprogetto di restauro e recupero, il cui incarico ideale ci è stato affidato direttamente dal Comitato di via Vecchia, quale espressione della volontà popolare di prevedere tutti quei servizi di comunità che mancano al quartiere e alla Valbisagno.

Il nostro ecoprogetto prevede infatti il restauro e la ricomposizione del grande spazio interno dominato dalle capriate Polonceau e dei relativi fondi archivoltati originariamente destinati a stalle per i cavalli che trainavano omnibus e i tram, nonché il rifacimento in loco dell'estesa copertura.

Abbiamo pensato sia di ricostruire le capriate Polonceau che sono state abbattute nel tempo, sia di sostituire le lamiere ondulate di copertura con una nuova struttura autoportante isolante in legno sulla quale abbiamo collocato una teoria di pannelli fotovoltaici che lasciano spazi aperti sui quattro nuovi giardini secondo una planimetria a schema ipodameo che possa contenere funzioni modulari intercambiabili.

I prospetti su via Bobbio, su via Vecchia e sulle due trasversali, che formano un perimetro rettangolare continuo di 514 m (2×215 m + 2×42 m), rispecchiano rigorosamente le dimensioni preesistenti dei muri, dei varchi e delle finestre riadattandole alla nuova funzione.

La veduta ricostruttiva della rimessa storica di Staglieno riassume, in maniera sintetica, l'unitarietà e l'espressività del nostro ecoprogetto, in quanto esso è capace di salvaguardare e valorizzare le strutture industriali di valore storico e sociale e, contemporaneamente, di fornire nuovi spazi vitali di servizio al quartiere e alla Valbisagno, che è sprovvista degli standard urbanistici previsti dal DM 2-4-1968 n. 42 e sm (figure 25-29).



Figura 25. Progetto di restauro della Rimessa storica AMT di Staglieno, destinato a Centro servizi di comunità della Valbisagno; in rosso le due Polonceau accoppiate.

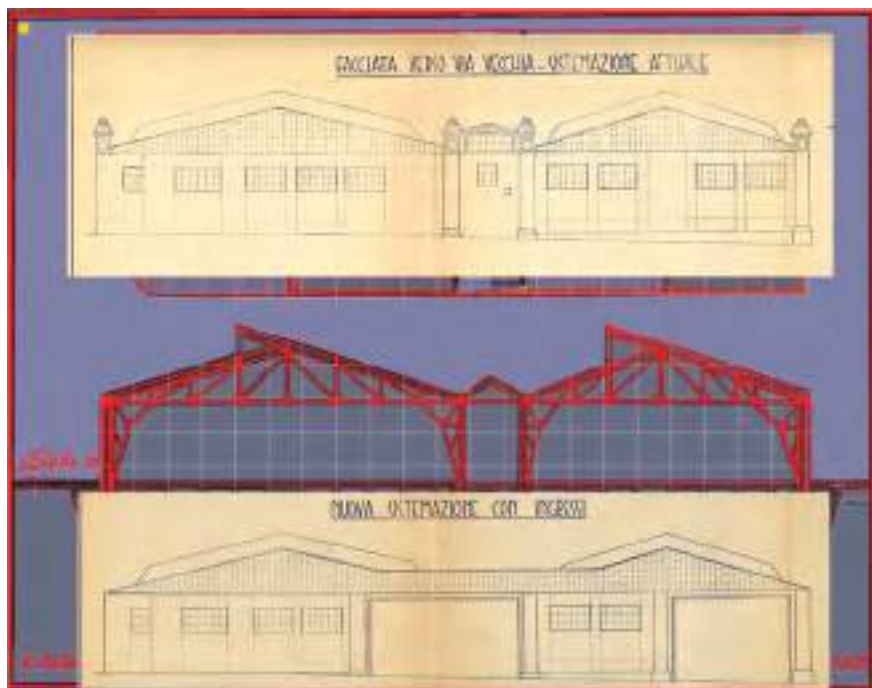


Figura 26. Progetto di restauro della Rimessa storica AMT di Staglieno. Documenti d'archivio. Sopra: 1901, rilievo della facciata originaria; sotto: 1951, rilievo della nuova facciata, in rosso sezione della rimessa, con struttura a triplice Polonceau con i due apici finestrati a nastro.



Figura 27. Progetto di restauro della Rimessa storica AMT di Staglieno. Planimetria; in rosso gli spazi, in azzurro i percorsi.

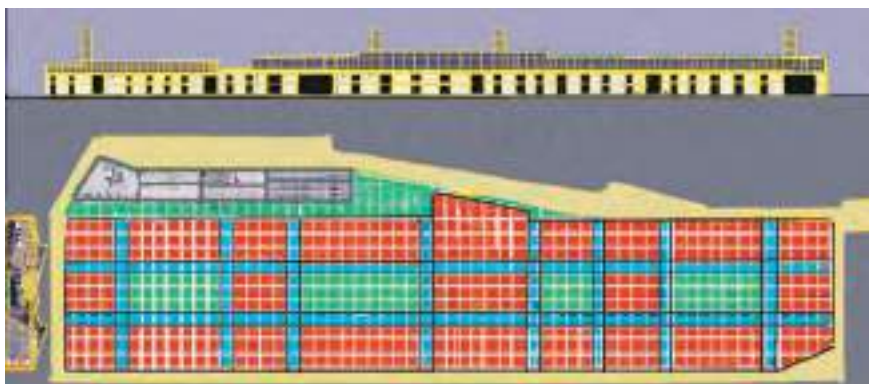


Figura 28. Progetto di restauro della Rimessa storica AMT di Staglieno. Planimetria con prospetti su via Bobbio e a sinistra su via Vecchia.



Figura 29. Progetto di restauro della Rimessa storica AMT di Staglieno. Veduta prospettica con facciata su via Vecchia a triplice Polonceau.

4. Ecoprogetto Ziqqurat Campus Valle Puggia - CUS Unige

L'edificio universitario di Valle Puggia, costruito nel periodo del 1968 a firma di Lionello Calza e Tommaso Badano, è oggi sede dei Dipartimenti di Chimica e Chimica Industriale, Fisica, Informatica, Bio-ingegneria, Robotica e Ingegneria dei sistemi, Matematica dell'Università di Genova. Sorge nel levante cittadino, in una vasta area verde in cui, oltre al complesso universitario, ci sono campi sportivi e un parcheggio pubblico.

I progettisti del nuovo complesso di Valle Puggia del 1968, dopo aver definito, in collaborazione con i docenti delle facoltà coinvolte, il fabbisogno e le caratteristiche dello spazio, immaginarono tale edificio, da noi denominato Ziqqurat, diviso in tre fasce orizzontali che ospitano i locali per i docenti, le aule per la didattica e gli spazi per la ricerca, determinandone quindi la forma, prevalentemente orizzontale. L'edificio, che è servito da un blocco scala e ascensore inclinato che interrompe

l'orizzontalità del prospetto e che segue la sezione scalettata dei primi cinque piani dell'edificio, scaturì da una condizione al contorno, paesaggistica e architettonica, in cui l'università si inseriva.

Il Polo di Valle Puggia comprende il Palazzetto dello Sport per incontri della massima serie di pallavolo e di pallacanestro, oltre a molte altre discipline (arti marziali, scherma, calcio a 5, tiro con l'arco ecc.).

Il nostro ecoprogetto, infatti, prevede due unità urbanistiche distinte, ma spazialmente collegate: la prima comprende gli attuali Dipartimenti di Scienze (Ziqqurat), sulle cui coperture articolate sono distribuiti i pannelli fotovoltaici, in modo da salvaguardarne le caratteristiche architettoniche e strutturali; la seconda unità, costituita da una nuova configurazione urbanistica a forma di esoscheletro, ingloba le unità sportive esistenti con le strutture della pergola planetaria solare giardino luminoso, in modo da valorizzare l'area intensamente boscata di Valle Puggia.

L'ecoprogetto è destinato non solo a produrre la quantità di energia capace sia di soddisfare l'enorme consumo energetico dei dipartimenti del polo universitario (2/3 MW), sia di consentire la costituzione di una CER a favore degli abitanti del quartiere, ma anche a mettere a disposizione dell'università nuovi spazi attrezzati per:

1) uno studentato localizzato al primo piano dell'asse urbanistico intermedio tra Ziqqurat e CUS (3.300 mq) e al piano tetti della palestra esistente (2.000 mq);

2) nuovi spazi di servizio, ricavati sulle aree esistenti (2.700 mq), già in uso, del parcheggio e della mensa universitari per una nuova mensa e un nuovo parcheggio coperto e una sala polifunzionale;

3) una nuova torre tecnologica su un'area di sedime di 150 mq, alta circa 65 m e contenente spazi utili per 600 mq.

La nuova configurazione urbanistica, energetica, architettonica, che hanno assunto i due insediamenti universitari (Ziqqurat e CUS), applicando il principio dell'esoscheletro e della modularità non comporta aumenti di consumo del suolo, tranne una minima parte per servizi e spazi tecnologici.

In Valle Puggia germoglia una visione architettonica che trascende i confini del luogo: è Ziqqurat, il sogno del campus universitario che si fa metafora della città planetaria nascente. Dove sorgeva un semplice insediamento accademico ora si erge un'idea incarnata in una struttura: l'antica città di pietra e asfalto si trasfigura in un organismo urbano

aperto al mondo. Ziqqurat non è solo costruzione materiale, ma simbolo di trasformazione: eleva l'esistente verso un orizzonte più ampio, come una scala ideale dalla città terrena alla città planetaria, abbracciando in sé il passato e il futuro, il locale e l'universale.

Questa architettura si presenta con un esoscheletro possente, una trama di colonne e travi che avvolge gli edifici come l'ossatura di un essere vivente (figura 30). In questa armatura esposta si legge un messaggio morale: nulla è celato. La struttura porta in luce il proprio sostegno, dichiarando la volontà di un'alleanza trasparente fra tecnica e natura. L'esoscheletro, con la sua modularità ritmica, ricorda i tronchi e i rami di una foresta artificiale, in cui moduli ripetuti, simili ma vari, si collegano tra loro a comporre un organismo unitario. È un ordine nuovo e vivo, dove ogni modulo aggiunge una nota al coro architettonico, come cellule in crescita che generano tessuti urbani rinnovati. Qui la modularità non è mera ripetizione, ma melodia di forme che promette espansione e adattabilità, segno di una città in grado di evolvere senza smarrire l'armonia.



Figura 30. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Veduta prospettica da sud-est. In primo piano pergola energetica CUS con asse urbanistico tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica, in secondo piano edificio universitario esistente Ziqqurat.*

Sopra questo scheletro urbano si stende una pergola solare, immensa ala di metallo e vetro che dona insieme ombra e luce. La pergola è un tetto che non chiude ma accoglie, una seconda volta celeste sotto cui l'uomo e il sapere si raccolgono. I pannelli fotovoltaici incastonati in questa struttura brillano al sole e ne catturano i raggi: compiono un'epifania moderna, trasformando la luce in energia viva. Come foglie di un albero futuribile, questi pannelli convertono il dono quotidiano del sole in linfa elettrica che scorre a nutrire aule e laboratori. Il sole si unisce all'ingegno umano in una nuova alleanza e la pergola ne diviene tempio. Sotto di essa sorge un giardino luminoso, dove la natura cresce guidata dalla mano gentile della tecnica: alberi e piante convivono con l'acciaio e il silicio, in uno spazio in cui l'ombra è feconda quanto la luce.

Gli spazi pubblici, cuore pulsante di Ziqqurat, emergono come piazze elevate e camminamenti sospesi: campi aperti dello spirito comunitario. Ogni angolo di questo complesso invita all'incontro e alla condivisione: l'architettura stessa insegna, fungendo da pedagogo silenzioso. Camminando sotto le arcate dell'esoscheletro o tra i filari della pergola, lo studente e il cittadino vengono educati a una nuova sensibilità: apprendono, senza parole, che l'uomo non è separato dalla natura, ma fa parte di un tutto armonico. Questi spazi comuni sono agorà moderne dove il sapere circola libero e le idee mettono radici come gli alberi nel giardino sottostante. La comunità qui trova un luogo per riconoscersi e crescere insieme. L'architettura di Ziqqurat aspira a rigenerare non solo lo spazio, ma anche le coscienze assopite, ridestando il senso di appartenenza a una civiltà più alta.

In Ziqqurat si riflette un ideale di pace e di unione tra i popoli. La sua ombra non separa ma unisce, offrendo riparo a chiunque passi sotto. È come se questo campus fosse il microcosmo di un'umanità riconciliata: sotto la vasta pergola solare, simbolo di un cielo condiviso, le differenze si compongono in una superiore armonia. Qui si respira l'unità europea ecumenica nel rispetto delle diversità: la conoscenza, coltivata entro queste strutture, parla una lingua universale che valica confini e mari. La città planetaria auspicata prende forma concreta: non più città isolate, ma nodi di una rete globale di idee, energie pulite e pace operosa. Ziqqurat è visione di un futuro in cui la bellezza architettonica diviene linguaggio comune, capace di elevare lo spirito oltre le barriere.

Questa bellezza non è un lusso, ma un ordine necessario che dà forma alla libertà. Nell'armonia delle sue linee e nella funzionalità poetica dei suoi spazi l'architettura rivela come la forma bella possa guidare l'uomo verso un vivere più libero e giusto. Bellezza come ordine significa che ogni elemento è al suo posto – l'esoscheletro, la modularità, la pergola solare – e contribuisce a creare un cosmo umano dove la libertà non è caos ma un ordine vivo in cui ciascuno trova spazio per esprimersi senza infrangere l'armonia comune. Così Ziqqurat si offre allo sguardo come riflessione costruita, come discorso di pietra, metallo e luce che ci parla di una rinnovata alleanza tra l'uomo e il creato. È una preghiera laica elevata al sole, un canto di speranza in forma di campus; un faro di civiltà che, rigenerando uno spazio, rigenera anche la visione di ciò che la città e l'umanità possono diventare nel segno perenne della pace e della bellezza (figure 31-43).



Figura 31. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Assonometria: sotto, del nuovo CUS e Studentato, in rosso, i percorsi pedonali, in giallo, con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 32. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Planimetria: sotto, del nuovo CUS e Studentato, in rosso, i percorsi pedonali, in giallo, con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 33. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Planimetria con strutture portanti a vista del nuovo CUS e Studentato, in rosso, i percorsi pedonali, in giallo, con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 34. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Assonometria con strutture portanti a vista del nuovo CUS e Studentato, in giallo i percorsi pedonali con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 35. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Planimetria con coperture in PF del nuovo CUS e Studentato, in giallo i percorsi pedonali con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 36. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Assonometria con coperture a moduli PF, sotto del nuovo CUS e Studentato, con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica; sopra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 37. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Veduta prospettica, a sinistra, in primo piano torre tecnologica, con asse urbanistico visto da nord-ovest; a destra, edificio universitario esistente Ziqqurat.*



Figura 38. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Prospetto da sud: a sinistra, fianco dell'edificio esistente Ziqqurat; a destra, pergola della mensa, della palestra e della torre tecnologica.*



Figura 39. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Prospetto da est: in primo piano il nuovo CUS e Studentato, con asse urbanistico sud-ovest/nord-est tra scala giardino cilindrico e torre tecnologica in secondo piano; sopra, edificio esistente Ziqqurat.*



Figura 40. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Assonometria dei particolari: in basso pergola CUS e al centro il pozzo d'aerazione delle gallerie ferroviarie; pergola asse urbanistico sud-ovest/nord-est e, a sinistra, scala in diagonale dell'edificio esistente Ziqqurat.*



Figura 41. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Veduta degli spazi interni del CUS: a destra, il pozzo d'aerazione delle gallerie ferroviarie; a sinistra, studentato; al centro, scala giardino cubico, palestra e torre tecnologica.*



Figura 42. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Veduta interna dello studentato, sull'asse urbanistico sud-ovest/nord-est.*



Figura 43. *Ecoprogetto Campus Valle Puggia CUS Unige. Veduta della pergola dell'asse urbanistico sud-ovest/nord-est: in primo piano la scala giardino cilindrico; a destra, salone polifunzionale della mensa; in fondo, la torre tecnologica.*

5. *Ecoprogetto ex Ilva Cornigliano: riqualificazione produttiva ambientale ed energetica per il quartiere e la città*

Acciaierie di Cornigliano, storico complesso siderurgico di Genova, venne controllato dalla Finsider e dal Gruppo Riva tramite l'ILVA; dal 2018 è di proprietà di ArcelorMittal Italia che ha rilevato l'ILVA e dal 2020 è in corso il passaggio alla statale Invitalia, solo dopo aver garantito sia le prospettive occupazionali e salariali degli attuali lavoratori, sia le bonifiche ambientali e sanitarie degli spazi di lavoro, del sottosuolo e delle aree contermini.

Infine, dopo aver avviato una sostenibile innovazione tecnologica e digitale dell'attuale sistema produttivo sarà possibile attuare l'idea del nostro ecoprogetto ex Ilva Cornigliano, che qui ci proponiamo di lanciare, applicando alla sua area di pertinenza la pergola solare giardino luminoso, capace di produrre ben 150 MW e un'area destinata a tetto-parco-giardino di ben 75 ettari a favore del quartiere e della città.

Ci auguriamo che presto il Comune possa dotarsi di una variante generale del PUC capace di innovare e integrare questo complesso siderurgico con il suo contesto urbanistico contermini (figure 44 e 45).



Figura 44. *Ecoprogetto (in fieri) ex Ilva Cornigliano: planimetria generale con i mega portali-percorsi come struttura modulare con tetti giardino.*

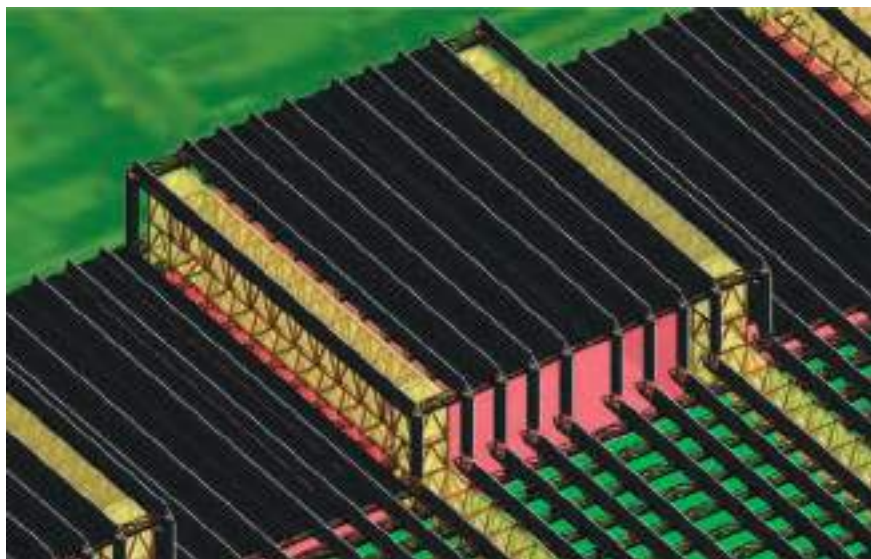


Figura 45. *Ecoprogetto (in fieri) ex Ilva Cornigliano: particolare della megastruttura portante la pergola solare con guglie fotovoltaiche da 36° e 150°. L'applicazione dell'esoscheletro permette di aggiungere alla struttura esistente nuovi spazi (in rosso).*

Verso l'ecopiano ecumenico europeo

L'ecopiano ecumenico europeo nasce dall'urgenza di trasformare la città esistente in una città sostenibile socialmente. Si propone un paradigma eco-urbanistico capace di integrare natura, energia e paesaggio, in una visione stratificata storicamente. La pergola giardino solare ci consente nuove strategie per la transizione energetica, la rigenerazione urbana e la giustizia territoriale. I casi studio di Genova dimostrano l'applicabilità del modello, orientato a restituire alla città la sua funzione politico-culturale.

Parole chiave: ecopiano ecumenico europeo; nuovo ordine urbanistico; città planetaria; pergola giardino solare.

Towards the European Ecumenical Ecoplan

The European Ecumenical Ecoplan arises from the urgency to transform the existing city into a socially sustainable one. It proposes an eco-urban paradigm capable of integrating nature, energy, and landscape within a historically layered vision. The solar garden pergola enables new strategies for energy transition, urban regeneration, and territorial justice. The Genoa case studies demonstrate the model's applicability, aimed at restoring the city's political and cultural function.

Keywords: european ecumenical ecoplan; new urban planning order; planetary city; solar garden pergola.

La redazione degli ecoprogetti di Giovanni Spalla, qui presentati, non sarebbe stata possibile senza i preziosi contributi di:

- PIER ENRICO ZANI, fisico: elaborazione tecnico-scientifica dei progetti energetici;
- DANIELE CUNEO, graphic designer: modellazione 3D in continua evoluzione;
- ANDREA DEL GROSSO, docente di Tecnica delle costruzioni; consulenza tecnica ingegneria;
- LUIGI GAMBAROTTA, docente di Scienza delle costruzioni: verifica statico-strutturale;
- ENRICA ROCCOTIELLO, docente di Botanica ambientale applicata: consulenza botanica per l'ambiente urbano e naturale;
- MARIO ROCCA, docente di Fisica sperimentale della materia e applicazioni: consulenza programmazione attività scientifica universitaria;
- VALTER SCELSI, docente di Composizione architettonica: delegato del Rettore dell'Università di Genova al Polo territoriale di Valletta Puggia;
- TIZIANA BEGHIN, dottoressa in economia e commercio; assessore al turismo e commercio del Comune di Genova, già europarlamentare: Progetto UE "Le politiche energetiche della UE. Il caso del progetto della pergola solare a Genova, 2024";
- STEFANO GIORDANO, vigile del fuoco, consigliere regionale: consulenza per l'inclusione sociale e la sicurezza eco-urbanistica;

Cittadinanza attiva - contributi partecipativi di:

- RAFFAELLA CAPPONI, presidente del Comitato Via Vecchia e strade limitrofe;
- ENRICO D'AGOSTINO, presidente del Comitato Liberi Cittadini di Certosa;
- MAURA OLMI, presidente del Comitato Giardini Malinverni;
- CROCIFISSA CAPIZZI detta "Fifetta", rappresentante storica Donne di Cornigliano;
- DAVIDE MINZONI, vice-segretario circolo PD Guido Rossa di Cornigliano e consigliere Municipio VI Medio Ponente.

PIER ENRICO ZANI

*L'autonomia energetica dei Dipartimenti scientifici
di Valle Puggia*

La produzione fotovoltaica mondiale

Il totale di impianti fotovoltaici installati sul nostro pianeta nel 2024 è pari a 592 GigaWatt e potrà raggiungere nei prossimi 25 anni, con costi competitivi, una potenza capace di produrre circa 22.000 Terawattora elettrici che, assieme ad altre fonti rinnovabili, potranno rendere marginali le fonti energetiche da gas e inutili quelle nucleari di nuova generazione, su cui attualmente c'è un ampio dibattito.

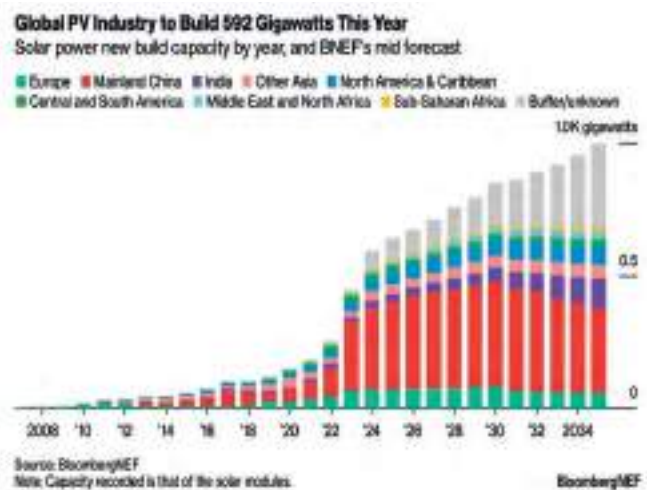


Figura 1. Nuova capacità di impianto per anno di energia fotovoltaica e previsione media.

I consumi “tutto elettrico” della città di Genova sono facilmente calcolabili confrontandoli con quelli medi italiani; richiedono, comunque, l’installazione di impianti solari non solo sul mare ma anche sul territorio ligure, soprattutto nell’ambito cittadino.

Gli impianti solari installati in ambito cittadino sono incentivati dall’approvazione del decreto Comunità Energetiche Rinnovabili che introduce un importante concetto di consumo elettrico localizzato e soprattutto condiviso. Il decreto, infatti, incentiva la nascita di edifici energeticamente indipendenti ma uniti in Comunità elettrica alimentata dalla stessa cabina primaria favorendo il consumo gestito consapevolmente nelle ore di produzione solare.

Le città moderne, quindi, dovranno poter installare impianti fotovoltaici sui terreni liberi da vincoli, sui tetti di case e condomini, su aree dismesse industriali e quindi all’interno della struttura urbana cittadina.

I possibili esempi di impianti fotovoltaici sono descritti nella figura 2 così come il costo esemplificativo di un MegaWatt.

È interessante notare che l’80% dei costi deriva da lavoro interno al paese; solo i pannelli solari provengono dall’estero, per di più ottenibili da una filiera produttiva gigantesca.



Figura 2. Esempio di struttura dei costi tipici e due principali sistemi impiantistici a terra o a pergola.

La Ziggurat

Nasce quindi l'idea di un impianto fotovoltaico in città a Valle Puggia come esempio paradigmatico. I consumi elettrici dei tre edifici che ospitano i Dipartimenti di Fisica, Chimica, Matematica e Informatica derivano in buona parte dalle necessità di servizi funzionanti 24 ore continue e raggiungono circa 4.000.000 kWh elettrici annui (figura 3).

Ecco in breve i consumi elettrici dei Dipartimenti Scientifici di Valle Puggia:

Consumi Elettrici 2023:	Totale: 3.704.295 kWh
(approssimazione: 4.000.000 kWh annui)	

DIFI - Via Dodecaneso 33:	1.591.728 kWh
---------------------------	---------------

DIMA/DIBRIS - Via Dodecaneso 35:	645.944 kWh
----------------------------------	-------------

DCCI - Via Dodecaneso 31:	1.466.623 kWh
---------------------------	---------------

Consumo orario medio: circa 450 kWh.

Il dimensionamento dell'impianto solare deve quindi massimizzare la produzione elettrica durante le ore di sole; per questo sono necessari circa 3.000 kW picco e una batteria di congrua capacità per l'alimentazione notturna (8-10 MWh).

Ecco la soluzione proposta: la Ziggurat.



Figura 3. *La Ziggurat*.

L'edificio che ospita i Dipartimenti ha una conformazione molto complessa che poco si adatta ad accogliere moduli solari in maniera coerente ed elettricamente sensata. Si è quindi pensato di attrezzare un sistema innovativo urbanistico energetico basato sul disegno

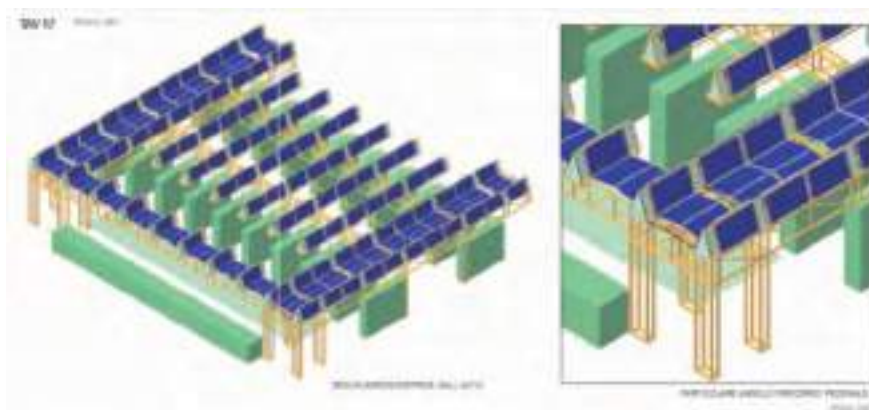


Figura 4. *Pergola Planetaria Giardino Luminoso.*

dell'architetto Giovanni Spalla e sui calcoli energetici progettati dal dott. Pier Enrico Zani.

La “Pergola Planetaria Giardino Luminoso” permette con la sua altezza sia la produzione di energia elettrica sia il rispetto dell'attuale sistemazione della Valle Puggia con i sottostanti impianti sportivi esistenti e giardini alberati.

La Pergola Planetaria è basata su una struttura metallica di travi reticolari a vista che sostengono moduli fotovoltaici HJT bifacciali a doppio vetro sistemati in cuspidi di vari angoli. L'alternarsi calcolato di spazi coperti da cuspidi permette di scegliere la percentuale di insolazione incidente sul terreno e controllare sia zone di ombra sia zone in cui è possibile gestire alberi e giardini.

La Pergola Planetaria inoltre offre molti vantaggi alla produzione fotovoltaica permettendo con le strutture a cuspidi lo sfruttamento dell'albedo del terreno sottostante tramite la bifaccialità dei moduli e il loro raffrescamento con i moti d'aria convettivi ascensionali.

Da ultimo una nota relativa alla manutenzione: grazie alla verticalità dei moduli le cuspidi sono praticamente autopulenti.

La potenza installata

Le possibilità di installare moduli fotovoltaici sono molte e variano da 2 fino a 3 MW di picco. La relativa producibilità elettrica dipende

dall'esposizione solare più o meno favorevole e varia da 2.200 fino a un massimo di 3.300 MWh annui.

La scelta delle varie sistemazioni verrà decisa seguendo sia fattori estetici sia le onerosità impiantistiche ed economiche.

La necessità elettrica notturna obbliga l'installazione di molta potenza fotovoltaica per coprire i consumi fin dalle prime ore del mattino e fino alle ultime della sera.



Figura 5. *Produzione e consumo elettrico: solstizio inverno/estate il surplus è base di Comunità Energetica.*

Naturalmente saranno possibili efficientamenti spostando il più possibile i consumi durante le ore di insolazione.



Figura 6. *Sezione della struttura della Pergola Planetaria Giardino Luminoso.*



Figura 7. *Pianta definitiva. 3 Megawatt di picco massima.*

Il ritorno economico della produzione elettrica è notevole soprattutto pensando che si tratta di un impianto fotovoltaico in città.

Infatti, il valore della Produzione Elettrica con 0,2 euro/kWh e usufruendo degli incentivi derivanti dalla Comunità Energetica è pari a circa 660.000 euro annui con un tempo di ritorno dell'investimento di 9-10 anni. I partecipanti alla comunità energetica otterranno un ritorno economico annuo totale massimo di 300.000 euro sui loro consumi per 20 anni.

Conclusione

Le “Pergole Planetarie Giardino Luminoso” progettate con l'architetto Giovanni Spalla possono essere facilmente inserite nel tessuto urbano delle città senza consumo di nuovo territorio, rispettando vincoli estetici, il verde esistente e quello di nuovo impianto. Possono giocare un ruolo importante come strumento urbanistico/energetico per il recupero di terreni ex industriali abbandonati e degradati.

L'energia rinnovabile prodotta delle pergole può rendere economica la loro installazione con due effetti: il ritorno economico congruo con i costi delle strutture stesse e un introito sufficiente a coprire i costi di giardini, giardinieri e guardiani.

Bibliografia

La letteratura scientifica e tecnico-commerciale è estremamente ampia e in continua evoluzione. Si indicano qui di seguito alcuni indirizzi utili per un aggiornamento continuo:

- PV magazine. *China solar dominance is not an issue*: <https://www.pv-magazine.com/2024/07/24/chinas-solar-dominance-not-an-issue/#>
- *Levelized Cost of Energy of all Source 2024*. July 2024: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus>
- PV magazine Italia: <https://www.pv-magazine.it>
- PV magazine International (per dati commerciali e impiantistici): <https://www.pv-magazine.com>
- PV-TECH (per informazioni tecniche e tecnologiche): <https://www.pv-tech.org>
- Quale Energia. <https://www.qualenergia.it>
- Rinnovabili. Rivista online. <https://www.rinnovabili.it>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. *Energy-Charts* (grafici interattivi di produzione storici e in diretta di energia elettrica totale dei paesi EU): <https://energy-charts.info/?l=en&c=DE>

L'autonomia energetica dei Dipartimenti scientifici di Valle Puggia

Gli impianti fotovoltaici installati a livello mondiale nel 2024 hanno raggiunto i 592 GigaWatt. Nei prossimi 25 anni la produzione elettrica rinnovabile fotovoltaica può arrivare a 22.000 Terawattora annui che, assieme alle fonti eoliche, possono sopperire alle necessità mondiali di energia. In questo contesto, sono state valutate le necessità energetiche dei Dipartimenti di Fisica, Chimica, Matematica e Informatica dell'Università di Genova situati in Valle Puggia, tenuto conto che questi Dipartimenti sono in attività sia giorno che notte con un notevole consumo elettrico pari a circa 4.000.000 Kwh anno. La strategia da applicarsi nel caso specifico può essere così esemplificata: costruzione di un impianto solare di potenza almeno pari a 3.000 kW in modo da sfruttare al meglio le ore di sole e caricare le batterie per coprire i consumi notturni e gestione dell'energia non consumata tramite una Comunità Energetica collegando quattro Istituti scolastici, i Dipartimenti universitari in Albaro e l'ospedale San Martino (tutti alimentati dalla stessa cabina primaria). La soluzione proposta "Pergole Planetarie Giardino Luminoso" può essere la soluzione perfetta che ingloba le strutture sportive esistenti accomunando giardini alberati, energia solare, architettura e urbanistica. Il progetto prende il nome di "La Ziggurat".

Parole chiave: fotovoltaico; architettura; edificio a energia quasi zero.

Energy Autonomy of the Scientific Departments of the University of Genoa

Photovoltaic systems installed worldwide in 2024 reached 592 GigaWatts. In the next 25 years, renewable photovoltaic electricity production can reach 22,000 Terawatt hours per year which, together with wind sources, can meet the world's energy needs. In this context, the energy needs of the Departments of Physics, Chemistry, Mathematics and Computer Science of the University of Genoa located in Valle Puggia were assessed, taking into account that these Departments are active both day and night with a significant electricity consumption of approximately 4,000,000 Kwh per year. The strategy to be applied in this specific case can be exemplified as follows: construction of a solar plant with a power of at least 3,000 kW in order to make the most of the hours of sunshine and charge the batteries to cover night-time consumption and management of the unconsumed energy through an Energy Community connecting four schools, the university departments in Albaro and the San Martino hospital (all powered by the same primary cabin). The proposed solution "Pergole Planetarie Giardino Luminoso" can be the perfect solution that incorporates existing sports facilities by combining tree-lined gardens, solar energy, architecture and urban planning. The project is called "La Ziggurat".

Keywords: photovoltaic; architecture; net zero energy buildings.

COMMEMORAZIONE DI GIULIO PASSATORE

2 dicembre 2024

Commemorazione di Giulio Passatore, eccellente professore universitario e accademico onorario dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere che gli dedica un breve ricordo e la conferenza di Mauro Giannini "La fisica nucleare a Genova e non solo".

GIULIO MANUZIO

Ricordo di Giulio Passatore

Ho conosciuto Giulio quando lui era un giovanissimo assistente e io uno studente che iniziava il corso di laurea che allora si chiamava “Fisica pura”. Nel corso degli anni siamo diventati amici, abbiamo collaborato per la stesura del testo di un paio di libri di Fisica per le scuole medie superiori e ho comunque sempre seguito la sua carriera e la sua vita. Di quest’ultima non posso dire molto perché Giulio era persona molto riservata. Una villetta a Genova Pegli, un giardinetto cui dedicarsi e fare un poco il contadino, una moglie gentile, due figli e una vita che sicuramente, nonostante le ovvie e inevitabili asperità, è stata piana e soddisfacente, almeno fino a quando la moglie si è ammalata e lo ha lasciato. Per fortuna mi risulta che uno dei figli gli sia stato poi sempre vicinissimo.

Una vita che gli ha lasciato molto tempo e molte energie da dedicare alla ricerca, all’insegnamento e alla sua carriera accademica, che è iniziata in un periodo di grandi cambiamenti nella strutturazione degli istituti universitari.

I vecchi istituti, tipicamente, consistevano di un bell’edificio, di un unico grande docente depositario di una qualche branca della scienza, di un feroce bidello-portiere che custodiva la sacralità dell’edificio e impediva l’accesso a qualunque possibile disturbatore e, infine, di un certo numero di silenziosi tecnici e di un piccolo numero di “assistenti”, tutti speranzosi di succedere, più avanti, al grande professore.

All’Istituto di Fisica dell’Università di Genova, dopo la Seconda guerra mondiale, era arrivato il prof. Antonio Borsellino che, come teorico, aveva lavorato nel campo dell’elettrodinamica quantistica e aveva ben meritato una cattedra (ancora oggi si parla dell’angolo di Borsellino).

Rompendo ogni tradizione il prof. Borsellino chiamò a far parte dell'istituto il prof. Ettore Pancini che, ugualmente, aveva pienamente meritato una cattedra universitaria, producendo nuovi e importanti risultati (sperimentando sulle proprietà dei mesoni) nel campo della fisica delle particelle.

Entrambi i professori volevano aprire le porte dell'istituto soprattutto agli studenti di fisica (penso che, se avesse potuto, il prof. Pancini ci avrebbe tenuto in istituto giorno e notte) e volevano dotarlo di personale sia tecnico che universitario (il prof. Pancini si dedicò soprattutto a costruire moderne e funzionali *facilities* di ricerca a cominciare da un'officina meccanica di prim'ordine popolata da un numero rilevante di tecnici anch'essi di prim'ordine).

Il desiderio dei professori Borsellino e Pancini di popolare l'istituto con persone di valore ha fatto sì che Giulio Passatore, neolaureato con ottimo risultato e con una brillante tesi di laurea, venisse rapidamente assunto come assistente. Giulio ebbe invece maggiori difficoltà nella scelta della sua attività di ricerca. Infatti, l'elettrodinamica quantistica era un campo ormai praticamente esaurito e il prof. Borsellino, poco dopo, avrebbe cominciato con grande successo a occuparsi di biofisica. Il prof. Pancini, essendo un fisico sperimentale, non aveva a disposizione strutture adeguate per continuare le sue ricerche. Giulio non ebbe dunque la fortuna di iniziare la sua attività sotto la guida e in continua interazione con una personalità forte e fortemente interessata al suo lavoro. Dovette dissodare in proprio dei nuovi campi. E fu così che si dedicò alla fisica nucleare: il prof. Giannini illustrerà a breve i contributi forniti da Giulio entro l'enorme ambito della fisica nucleare.

Mi resta da dire, con grande rispetto e piacere, di Giulio grandissimo didatta.

Auguro a chiunque di trovare o di aver trovato almeno un insegnante che gli abbia fatto capire la bellezza del "capire". È una acquisizione che non si perde più. Ma trovare insegnanti che fanno questi miracoli non è facile!

A mio avviso un eccellente didatta non solo deve conoscere alla perfezione la sua materia, non solo deve essere in grado di esporla in modo piano, ma deve anche possedere un particolare tipo di sensibilità che gli permette di elaborare nella sua testa, e poi di proporre spiegazioni capaci di agganciare ed entusiasmare chi ascolta. Occorre sensibilità nei riguardi

della cultura media degli uditori, un pizzico di teatralità, un monitoraggio continuo del grado di attenzione dei presenti, per essere pronto a cambiare strategia se appaiono distratti, e certamente anche molto altro.

Da una decina di anni, utilizzando moderni sistemi di indagine, sono cominciati gli studi di cosa avvenga a livello cerebrale quando si ricevono spiegazioni di uno stesso argomento, somministrate in modi diversi. L'obiettivo è di capire in quali situazioni e con quali modalità una esposizione provoca effetti che stimolano l'attenzione e soprattutto l'apertura dei canali della memorizzazione. Il futuro ci dirà meglio dei meccanismi reali. Per il momento, tutto è invece affidato alla sensibilità e alle capacità personali.

Giulio certamente possedeva tutte queste caratteristiche!

Riuscire a essere un buon insegnante, ovviamente, vuol anche dire avere una notevole cultura generale: e anche questa era ottimo patrimonio di Giulio (mi fa piacere ricordare qui che il nostro si dichiarava un fan di Giordano Bruno e mi risulta che tenesse sul comodino una copia del *De rerum natura*).

Giulio Passatore ha tenuto per moltissimi anni la cattedra di Istituzioni di Fisica Teorica presso l'Università di Genova. Tutti i suoi allievi ricordano con piacere e gratitudine la sua figura, le belle lezioni, gli appunti chiari e preziosi e l'aver acquisito conoscenze importanti. Ne sono testimonianza anche i numerosi messaggi di ricordo e condoglianza circolati alla notizia della sua scomparsa.

Ma la sua attività didattica non finiva certamente qui. Giulio è stato un instancabile divulgatore della scienza con particolare riferimento alle scuole medie superiori, dove ha profuso una notevole parte della sua attività. Si è sempre tenuto in contatto con numerosi insegnanti a livello regionale e non si sottraeva mai alle richieste di interventi e seminari. Va dunque ricordato come un operatore culturale importante che ha messo a disposizione di una platea piuttosto vasta il proprio impegno e la propria ricerca di massima chiarezza e lucidità.

Anche dopo il pensionamento si è dedicato a varie attività di divulgazione e, di più, ha lasciato un "quasi libro" sulla fisica, sul divenire e su molte connessioni tra la fisica e la filosofia.

Un grande e compianto amico!

Ciao Giulio!

MAURO GIANNINI

La fisica nucleare a Genova e non solo

“As the nucleus has been subjected to more and more penetrating probes, it has continued to reveal unexpected facets and to open new perspectives”. [1] Questa affermazione di Aage Bohr, premio Nobel per la fisica nel 1975, indica che il nucleo reagisce in modo diverso a seconda della sonda con cui viene analizzato e questo ha portato a costruire diversi modelli. Questa considerazione ha avuto senso fin dall’inizio, cioè fin da quando il nucleo è stato “visto”. Ma per capire che cosa significhi “vedere” un nucleo è istruttivo sapere come sia stato scoperto.

1. *La scoperta del nucleo*

Su suggerimento di Ernest Rutherford, i suoi collaboratori Wilhelm Geiger e Ernest Marsden hanno studiato la deflessione di particelle α da parte del nucleo di oro. A tale scopo hanno utilizzato le particelle α di energia 4 MeV¹ emesse da una sorgente di RadioC (²¹⁴Po) in collisione con una sottile lamina di ¹⁹⁷Au (figura 1).

Il risultato è stato sorprendente: molte particelle venivano diffuse all’indietro. Il commento di Rutherford fu: “è come se una palla di cannone sparata contro un foglio di carta tornasse indietro e vi colpisse”.

Il motivo di tanta sorpresa risiede nel fatto che a quei tempi (siamo nella prima decade del Novecento) si pensava che l’atomo fosse costituito da una carica positiva, diffusa in tutto il volume di dimensioni di

giannini@ge.infn.it

¹ Si ricorda che 1 eV è pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

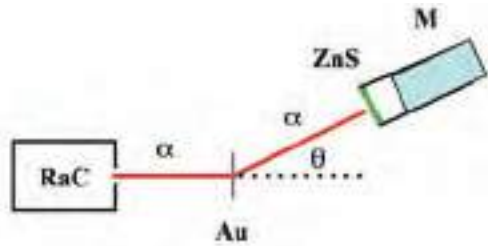


Figura 1. *L'esperimento di Geiger-Marsden. θ è l'angolo di deflessione delle particelle α , ZnS uno schermo di solfuro di zinco su cui l'urto delle particelle α provoca delle scintille, osservate tramite il microscopio M.*

circa 10^{-8} cm, entro la quale galleggiassero gli elettroni, dando luogo a un sistema elettricamente neutro. Le particelle α interagiscono debolmente con gli elettroni, ma dovrebbero interagire debolmente anche con la carica elettrica diffusa su tutto il volume dell'atomo. Tuttavia, il rimbalzo all'indietro implica la presenza di un oggetto molto pesante concentrato in un piccolo volume.

Rutherford ebbe quindi l'idea che il nucleo di oro potesse essere pensato come una particella puntiforme di carica positiva e che l'interazione con la particella α fosse dovuta alla repulsione tra due particelle cariche positivamente. Su queste basi fu in grado di calcolare (nel 1911) il numero di particelle α deviate a causa della repulsione elettrica e i suoi risultati si dimostrarono in perfetto accordo con le ulteriori misure di Geiger e Marsden. Fu anche in grado di determinare che le particelle α potevano avvicinarsi al nucleo di Au fino a circa 10 fm, dove 1 fm, detto anche Fermi, vale 10^{-15} m, mettendo in evidenza che il nucleo è molto più piccolo delle dimensioni atomiche.

Il modo in cui è stato "visto" il nucleo è molto simile alle osservazioni che si fanno con un microscopio. In questo caso si ha un fascio di luce incidente su un bersaglio e la luce diffusa è rilevata da un osservatore. Un oggetto di dimensioni d è osservabile se la luce ha una lunghezza d'onda $\lambda \leq d$, ma la luce non può essere usata per studiare sistemi nucleari, poiché la sua lunghezza d'onda è compresa nell'intervallo $4-8 \cdot 10^{-7}$ m.

Si possono tuttavia usare altre sonde, perché a una particella di massa m e velocità v può essere attribuita una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ (lunghezza d'onda di De Broglie), dove $p = mv$ è la quantità di moto e $h = 6.6261 \cdot 10^{-34}$ J s è la costante di Planck.

Le particelle α dell'esperimento di Geiger-Marsden hanno una lunghezza d'onda di circa 7 fm, confrontabile con le dimensioni del nucleo. In queste condizioni si possono osservare i gradi di libertà collettivi dei nuclei, quelli cioè in cui il nucleo si comporta come un tutto. Se si usano particelle con lunghezza d'onda sempre più piccole si possono rivelare gli effetti dovuti ai costituenti del nucleo.

2. Alcune proprietà fondamentali dei nuclei

I nuclei sono composti da Z protoni (scoperti da Rutherford nel 1919) e da N neutroni (scoperti da James Chadwick nel 1932). Z è il numero atomico e coincide con il numero di elettroni, mentre $A=Z+N$ è il numero di massa.

Una lunga serie di osservazioni ha mostrato che i raggi nucleari hanno un andamento descritto dalla formula $R = R_0 A^{1/3}$, dove $R_0 = 1.2$ fm. Considerando in prima approssimazione il nucleo come una sfera di raggio R ne segue che il suo volume V è proporzionale al numero di massa A , cioè il rapporto A/V (la densità) è praticamente costante.

I raggi nucleari si deducono dalla determinazione della distribuzione di carica dei nuclei.

A tale scopo si considera l'urto elastico tra elettroni di alta energia (≥ 1 GeV) e nuclei, illustrato nella figura 2a), dove sono indicate le quantità di moto iniziali e finali dell'elettrone. Essendo l'urto elastico tra elettrone e nucleo c'è scambio solo di una quantità di moto q , che,

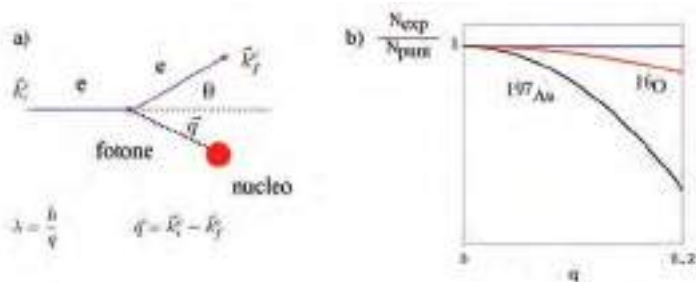


Figura 2. a) Urto elastico tra elettroni e nuclei; b) Il rapporto tra il numero N_{exp} di elettroni diffusi risultante dalle misure per alcuni nuclei e il numero N_{punt} corrispondente al caso di bersaglio puntiforme, in funzione del momento trasferito q .

crescendo con l'aumentare dell'angolo di diffusione, dà luogo a una lunghezza d'onda $\lambda = h/q$ sempre più piccola: ad es. nel caso di elettroni con energia di 1 GeV la lunghezza d'onda è di circa 1.2 fm.

Se si considera il rapporto tra il numero di elettroni diffusi da nuclei diversi e da un oggetto puntiforme, si vede, come riportato in figura 2b), che quanto più grande è il nucleo, tanto più la curva, in funzione di q , si discosta da una retta.

La densità di carica di diversi nuclei è mostrata in figura 3. All'interno del nucleo la densità è uniforme e praticamente indipendente da A . Deviazioni da questo comportamento si manifestano per i nuclei più leggeri, in particolare per ${}^4\text{He}$.

L'andamento della densità di carica in funzione della distanza r dal centro del nucleo è ragionevolmente approssimato dalla formula di Woods-Saxon, che è riportata nell'inserto della figura 3.

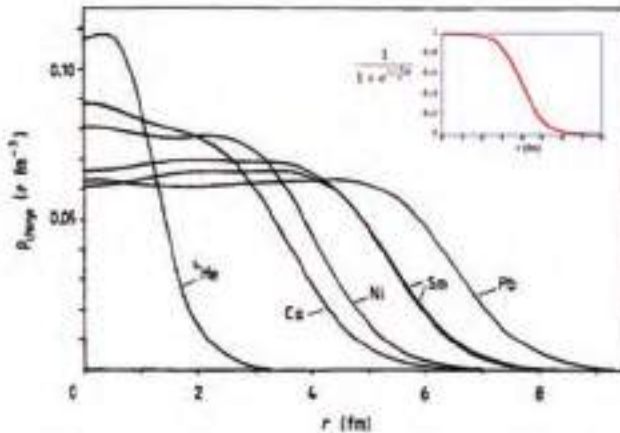


Figura 3. Densità di carica di diversi nuclei in funzione della distanza r dal centro del nucleo.

Per quanto riguarda la massa di un nucleo M_A , questa non è uguale alla somma delle masse dei suoi costituenti $ZM_p + NM_n$ (essendo M_p e M_n la massa del protone e del neutrone, rispettivamente), ma inferiore: $M_A < ZM_p + NM_n = M_A + B$, dove il difetto di massa B è l'energia di legame, cioè l'energia che occorre fornire al nucleo per disintegrarlo in tutti i suoi componenti. Dalle misure mediante gli spettrometri di massa, si può verificare (v. figura 4) che il rapporto B/A è praticamente

costante per la maggior parte dei nuclei, con le eccezioni dei nuclei leggeri e di quelli pesanti, situazioni che permettono il verificarsi, rispettivamente, della fusione e della fissione.

Queste proprietà di V e B sono legate ad altrettante caratteristiche della forza nucleare.

La proporzionalità tra V e A significa che aumentando A i nucleoni non si ammucchiano, similmente a quanto succede aumentando il volume di un liquido; quindi, la forza nucleare deve avere una componente repulsiva a piccole distanze, che impedisce ai nucleoni di avvicinarsi.

In un sistema di particelle legate da una qualche forza ci si aspetta che l'energia complessiva sia proporzionale al numero di coppie che interagiscono, cioè $A(A-1)/2$. Qui si ha invece proporzionalità con il numero di nucleoni, il che vuol dire che un nucleone, ovunque si trovi all'interno del nucleo, risente dello stesso numero di legami (tranne che in superficie). Ciò è possibile se la forza nucleare ha un raggio d'azione finito e minore delle dimensioni del nucleo, tipicamente dell'ordine del fm.

Queste considerazioni hanno portato alla formulazione del cosiddetto modello a goccia per il nucleo, in cui si descrive l'energia di legame B come una somma di termini: quello dominante è detto di volume ($\approx A$), al quale si aggiungono correzioni dovute alla superficie ($\approx A^{2/3}$), alla repulsione elettrica tra i protoni ($\approx Z(Z-1)/A^{1/3}$) e al fatto che sono favoriti i nuclei con valori di Z e N confrontabili ($\approx (N-Z)^2/A$).

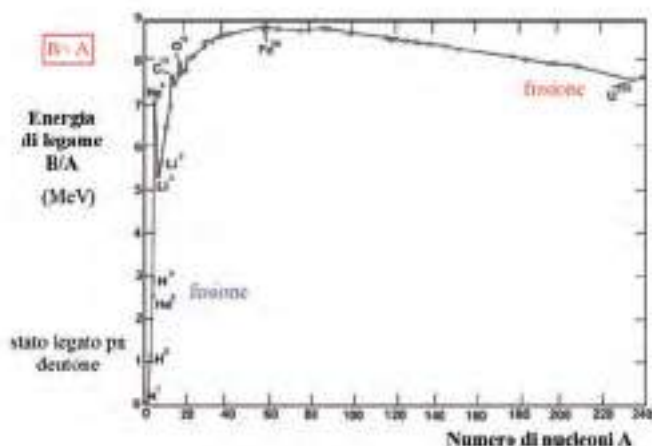


Figura 4. Il rapporto B/A ottenuto dalle misure delle masse nucleari.

I coefficienti di questi termini sono adattati in modo da avere un accordo con i dati sperimentali, ottenendo quella che è nota come formula semi-empirica di massa (o di Bethe-Weiszäcker).

3. Reazioni nucleari

Le reazioni nucleari sono processi del tipo $p_1 + N_1 \rightarrow p_2 + N_2$, dove N_1 e N_2 sono due nuclei, anche diversi, p_1, p_2 sono particelle (e, p, n, ...) o nuclei e possono essere suddivise in due grandi categorie: elastiche, in cui l'energia cinetica iniziale E_{cin}^i è uguale a quella finale E_{fin}^f e anelastiche, per le quali $E_{\text{cin}}^i > E_{\text{fin}}^f$.

L'urto di particelle α che ha portato alla scoperta del nucleo e la diffusione di elettroni utilizzata per la determinazione della densità di carica nucleare sono esempi della prima categoria. L'urto di protoni o neutroni su nuclei è un'altra reazione elastica molto studiata, la quale viene descritta mediante il cosiddetto modello ottico, che sarà introdotto più avanti.

Nelle reazioni anelastiche, grazie alla differenza di energia cinetica $E_{\text{cin}}^i - E_{\text{cin}}^f$ i nucleoni si possono riorganizzare e formare nuclei diversi, come avviene, ad es., nella reazione $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{C} + p$, con la quale Rutherford ha scoperto il protone nel 1919 e nella formazione artificiale di nuclei radioattivi (Joliot-Curie, Fermi...).

In particolare, è in questo modo che si è arrivati alla costruzione della carta dei nuclidi (v. figura 5). Le date riportate nella figura [2] mostrano come la conoscenza dei nuclei sia aumentata nel tempo, fino ad arrivare a un totale di circa 4000 nuclidi, di cui solo circa 250 sono stabili. Si tratta di una ricerca tuttora in corso con frequenti nuove acquisizioni, tra le ultime (settembre 2024) il nucleo ${}^{34}\text{K}$.

L'energia in eccesso nelle reazioni anelastiche può portare i nuclei in stati eccitati e ciò è possibile perché i nuclei hanno una struttura interna, cioè non sono puntiformi. Un esempio è dato dalla reazione anelastica $p + {}^{27}\text{Al}$ mostrata in figura 6a): l'assorbimento del protone porta a uno stato eccitato del nucleo ${}^{28}\text{Si}$ che si diseccita emettendo un raggio γ^2



² I raggi γ sono radiazioni elettromagnetiche come le onde luminose ma con frequenze molto più elevate.

Questo processo è caratterizzato dal fatto che il numero di γ emessi è molto alto, il proiettile è assorbito dal nucleo bersaglio dando luogo alla formazione di un nucleo composto e tutto ciò è facilitato dalla presenza di stati eccitati del nucleo composto.

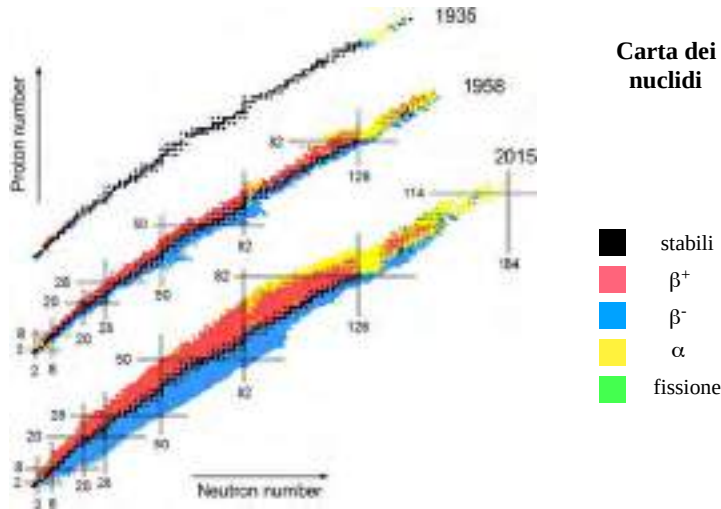


Figura 5. La scoperta di nuovi nuclei, con lo stato dell'arte nei vari anni [2].

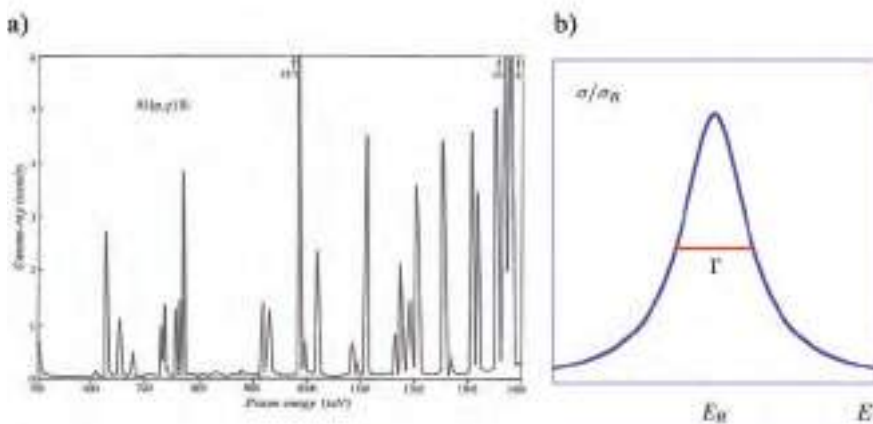


Figura 6. a) I risultati delle misure della reazione anelastica $Al(p,\gamma)Si$; b) la rappresentazione della formula di Breit-Wigner.

Si ha il cosiddetto fenomeno della risonanza, che viene descritto dalla formula di Breit-Wigner, il cui grafico è riportato in figura 6b)

$$\sigma = \sigma_R \frac{\Gamma^2}{(E - E_R)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

dove σ è la cosiddetta sezione d'urto, determinata a partire dai conteggi effettuati nell'esperimento, E è l'energia del protone incidente (σ_R e E_R sono i corrispondenti valori alla risonanza). La quantità Γ è chiamata larghezza della risonanza ed è legata alla vita media τ con cui il nucleo composto decade dalla relazione $\hbar$

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} \quad (\hbar = \frac{h}{2\pi})$$

se la larghezza è circa 10 KeV la vita media è circa cento volte più grande del tempo impiegato dal protone ad attraversare il nucleo e il protone perde completamente la sua individualità; inoltre, essendo le energie dei protoni circa 1 MeV hanno lunghezze d'onda molto grandi (≈ 30 fm) e si ha la tipica situazione in cui il nucleo si comporta come un tutto.

4. *Struttura dei nuclei*

Prima di affrontare il problema della struttura dei nuclei, conviene considerare che cosa avviene a livello atomico.

Negli atomi si ha un centro di forza, il nucleo (considerato puntiforme) e la dinamica che tiene legati gli elettroni è nota, in quanto si tratta dell'attrazione elettrica. Con l'avvento della fisica quantistica, si sa che gli elettroni possono stare in livelli energetici discreti, caratterizzati da diversi numeri quantici: energia, momento angolare l , spin $s=1/2$, con due componenti $\pm 1/2$. Inoltre, in base al principio di Pauli, valido per tutte le particelle con spin semi-intero (i fermioni), due elettroni con gli stessi numeri quantici non possono stare nello stesso stato o shell (guscio) e quindi, aggiungendo elettroni, quando la shell è piena si deve passare alla shell successiva. Un atomo con tutte le shell piene è particolarmente stabile e non interagisce con gli altri atomi (v. gas nobili).

Per i nuclei la situazione è diversa, in quanto non si ha un centro di forza e la dinamica nucleare non è nota a priori.

Tuttavia, è stato osservato che ci sono nuclei particolarmente stabili con energie di legame superiori ai loro vicini e con momento angolare totale nullo (sono sferici). Ciò si verifica se Z oppure N hanno uno dei seguenti valori (i cosiddetti numeri “magici”)

$$2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$

Anche i nucleoni sono fermioni (hanno spin $\frac{1}{2}$) e aumentando Z , N i nucleoni non si accumulano ma si dispongono in livelli energetici diversi determinati da una forza media agente sui nucleoni stessi.

Queste considerazioni sono alla base del modello a shell per i nuclei, formulato da Maria Goeppert Mayer e Johann Hans Jensen (premi Nobel per la fisica nel 1963).

I primi numeri magici si spiegano facilmente. Secondo la meccanica quantistica, in uno stato con un dato l ci possono stare solo $2l+1$ nucleoni, che diventano $2(2l+1)$ se si tiene conto dei due possibili stati di spin. Nello stato più basso $l=0$ (stato s)³, ci possono stare 2 nucleoni (primo numero magico), mentre nella shell p ci stanno 6 nucleoni, che aggiunti a quelli della shell s danno luogo al secondo numero magico $2+6=8$, come mostrato nella figura 7a). In modo analogo si trova il terzo numero (20) ma procedendo oltre si avrebbe 40 come prossimo numero magico e non 28.

Per poter descrivere correttamente i numeri magici successivi è stato necessario tenere conto che anche a livello nucleare si manifesta una forza di “spin-orbita”, proporzionale al prodotto scalare tra spin e momento angolare orbitale. In tal caso si ha una diversa energia a seconda che s e l siano paralleli o antiparalleli e i livelli con l definito si suddividono in due shell caratterizzate dal valore del momento angolare totale $j=l\pm\frac{1}{2}$: il numero massimo di nucleoni in una shell con dato j è quindi $2j+1$. Nelle shell più alte aumenta la suddivisione dei livelli, con l'effetto che alcuni livelli con alto j si distaccano notevolmente dalle altre con lo stesso l , la suddivisione dei livelli è quindi quella mostrata in figura 7b) (i numeri inquadriati sono i vari numeri magici).

³ Nella classificazione degli stati si usa la notazione spettroscopica, secondo la quale gli stati con $l=0, 1, 2, 3, \dots$ sono indicati con le lettere $s, p, d, f, \dots$, rispettivamente.

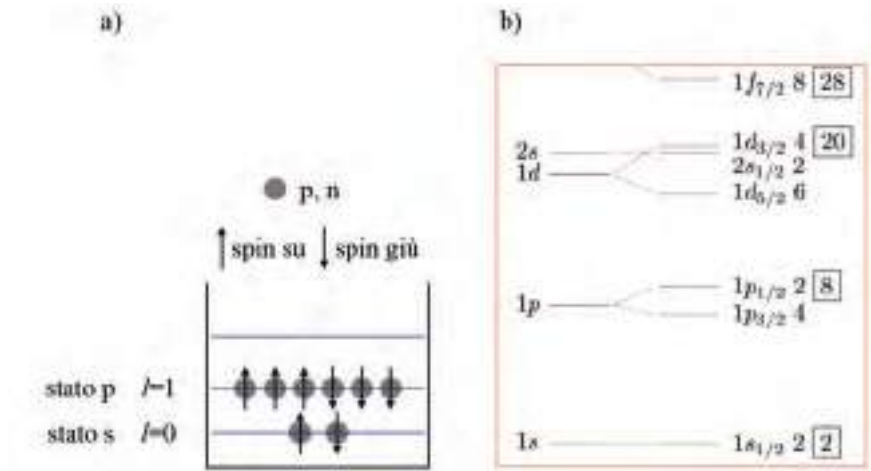


Figura 7. a) La spiegazione dei primi due numeri magici 2, 8; b) il modello a shell con interazione di spin-orbita.

Quando la shell con dato j è piena, il momento angolare totale è zero. Se si aggiunge o toglie un nucleone da una shell piena, il momento angolare del nucleo è specificato completamente dal nucleone aggiunto o mancante. Ecco alcuni esempi

${}^4\text{He}$: $Z=2$, $N=2$ spin 0 ${}^{16}\text{O}$: $Z=8$, $N=8$ spin 0 (sono nuclei doppiamente magici)
 ${}^{17}\text{O}$: $Z=8$, $N=9$ spin 5/2 ${}^{41}\text{Ca}$: $Z=20$, $N=21$ spin 7/2 ${}^{39}\text{K}$: $Z=19$, $N=20$ spin 3/2

queste e moltissime altre previsioni del modello a shell sono in perfetto accordo con i dati sperimentali.

In figura 5, i numeri magici sono evidenziati con delle doppie barre orizzontali e verticali. Una conferma importante della validità del modello a shell è rappresentata dal ${}^{208}\text{Pb}$, avente $Z=82$ e $N=126$. Ci sono speculazioni sulla probabile presenza di una “isola di stabilità” per Z superiori, ma per ora non c’è alcun riscontro sperimentale, siamo arrivati all’Oganesson, con $Z=118$, che è instabile.

5. Il modello ottico

Il modello a shell si basa sulle proprietà dei singoli nucleoni e quindi non c’è un comportamento collettivo. Lo stesso avviene nella descri-

zione dell'urto elastico nucleone-nucleo tramite il Modello Ottico. Tale nome è dovuto al fatto che si può vedere un'analogia tra il meccanismo con cui avviene l'urto dei nucleoni e il comportamento della luce quando attraversa un mezzo rifrangente (v. figura 8).

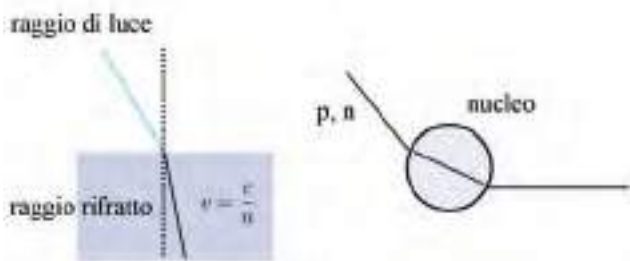


Figura 8. *La deflessione della luce in confronto con l'urto elastico tra nucleoni e nuclei.*

Nel caso della luce, la deviazione del raggio è descritta dall'indice di rifrazione n , che ha alcune caratteristiche importanti: dipende dalla frequenza (dispersione della luce) e ha una parte immaginaria per tener conto del fatto che il raggio rifratto ha un'intensità minore di quello incidente.

La deflessione dei nucleoni è determinata da una forza, dovuta all'interazione con tutti i nucleoni del nucleo. Tale forza è determinata da un potenziale, che, come l'indice di rifrazione, dipende dall'energia del nucleone incidente e presenta una parte immaginaria: infatti il flusso di particelle diffuse elasticamente è minore del flusso incidente, in quanto sono possibili molti processi anelastici alternativi all'urto elastico: eccitazione del nucleo, emissione di nucleoni...

In entrambi i casi, indice di rifrazione e potenziale ottico, si può scrivere una relazione tra parte immaginaria e parte reale, detta relazione di dispersione, che è una diretta conseguenza del principio generale di causalità, nel senso che la diffusione deve essere temporalmente successiva all'incidenza.

Sfruttando questa relazione, Giulio Passatore, in alcuni lavori della fine degli anni Sessanta del secolo scorso [3, 4], ha studiato il comportamento del potenziale ottico, in particolare la sua dipendenza dall'energia e la cosiddetta non-località. L'importanza di tali lavori è testimoniata dal fatto che sono stati riportati in un libro dedicato alle reazioni nucleari [5] (v. figura 9) e che siano tuttora citati.

6.7. The dispersion theory of the optical potential

The generalized optical potential of Feshbach† (§ 6.2) satisfies the dispersion relation in the energy variable

$\text{Re } v(E, \mathbf{r}, \mathbf{r}')$

$$= v_0(\mathbf{r}) + \sum_n \frac{A_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{E - E_n} + \frac{\mathcal{P}}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{Im } (v', \mathbf{r}, \mathbf{r}')}{E' - E} dE', \quad (6.107)$$

where v_0 , A_n , and E_n are real and ϵ is the threshold for the inelastic processes. This relation is based on very general causality requirements.‡ In principle it allows the real part of the potential to be calculated from a complete knowledge of the imaginary part, but there are many practical difficulties. In particular, while it is known that the generalized optical potential has a complicated non-locality and energy dependence, so that the energy dependence of an equivalent local potential is partly inherent and partly due to the non-locality, it is not clear to what extent this non-locality is important in eqn (6.107). This can be investigated by a comparison of the observed local potentials with eqn (6.107); any discrepancy then indicates non-local effects. This has been done by Passatore (1967), who applied eqn (6.107) to the interior of a heavy nucleus at high energies, when the poles disappear and the relation becomes

$$\text{Re } U(E) = C + \frac{\mathcal{P}}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{Im } U(E')}{E' - E} dE'. \quad (6.108)$$

A second practical difficulty is the rather fragmentary knowledge of the imaginary part of the observed optical potential over the wide energy range required, together with the ambiguity between volume and surface absorption. However, using the best available data, and overcoming relativistic difficulties by analytic continuation of the non-relativistic potential, Passatore was able to compare the phenomenological real optical potential with that calculated from eqn (6.108). The results showed good qualitative agreement from about 20 to 70 MeV, but a definite divergence at higher energies indicated the importance of non-local effects in this region.

In a subsequent paper, Passatore (1968) included the effect of the non-locality and found that the dispersion relation is in good over-all

† H. Feshbach, *A. Rev. nucl. Sci.* **8**, 40, 1958.

‡ J. M. Cornwell and H. Ruderhans, *Phys. Rev.* **126**, 1474, 1962.

§ Lippenschild, *Nucl. Phys.* **89**, 97, 1960.

|| Passatore, *Nucl. Phys. A* **98**, 664, 1967.

|| Passatore, *Nucl. Phys. A* **119**, 91, 1968.

Figura 9. Riproduzione parziale del paragrafo del libro [5] in cui sono descritti i lavori di Giulio Passatore. L'eq. (6.108) in particolare riporta la relazione di dispersione del potenziale ottico.

L'andamento del potenziale ottico è dato dall'equazione

$$V_{opt}(r, E) = -V_L(E) \frac{1}{1 + e^{\frac{r-R_A}{a}}}$$

dove R_A è il raggio del nucleo, a un parametro che descrive lo spessore della superficie del nucleo e r la distanza dal centro del nucleo. Come si vede, anche qui interviene la stessa forma di Woods-Saxon che descrive l'andamento della densità e non a caso, poiché l'interazione dipende da quanta materia nucleare il nucleone incidente incontra durante il suo passaggio.

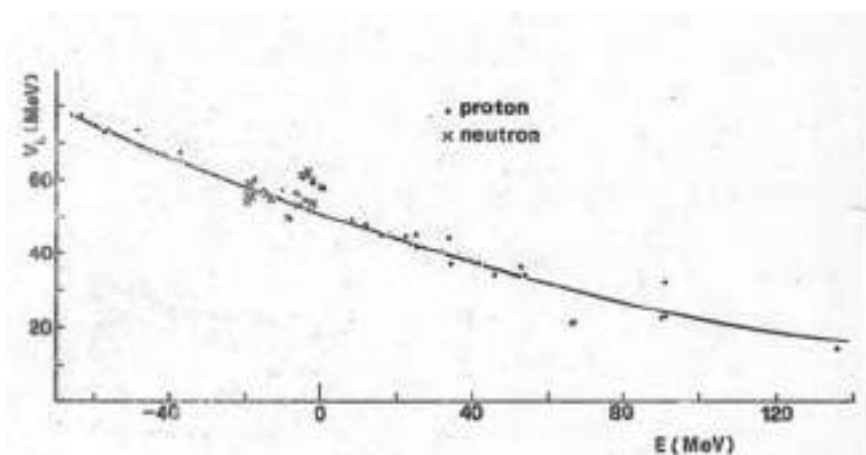


Figura 10. Il potenziale ottico che descrive sia gli stati legati, sia gli stati relativi all'urto elastico nucleone-nucleo [6].

L'intensità $V_L(E)$ dipende dall'energia in modo semplice, come mostrato dalla figura 10, che riporta i risultati di un'analisi sistematica successiva effettuata sugli stati legati (del modello a shell) e sull'urto elastico nucleone-nucleo [6].

6. La forza nucleare

Negli atomi i componenti sono noti, si tratta del nucleo (puntiforme) e degli elettroni, ma è nota anche la dinamica, che è l'interazione elettromagnetica. La difficoltà della loro descrizione teorica sta nel fatto che si tratta di un problema a molti corpi.

Nel caso nucleare si sa che è un insieme di protoni e neutroni, ma la dinamica non è nota a priori, occorre individuarla.

Ciò che si sa fin dall'inizio è che la forza nucleare ha un corto raggio d'azione e oltre a una parte attrattiva, che possa fornire il legame necessario a tenere uniti i nucleoni, deve anche avere una parte repulsiva a piccole distanze.

La forza nucleare deve comunque rispettare alcuni principi generali costituiti dalle leggi di conservazione. Oltre a quelle valide per ogni sistema fisico, cioè conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare, ce ne sono alcune tipiche della forza nucleare, tra cui la conservazione dello spin isotopico e del numero barionico.

Etichettare i protoni e i neutroni come nucleoni non è una semplificazione stenografica ma ha un significato più profondo. La massa dei nucleoni è di circa 940 MeV^4 , con una differenza $M_n - M_p$ pari a circa 1.3 MeV . Se si prescinde dall'interazione elettromagnetica il protone e il neutrone sono indistinguibili e si può pensare che siano due stati di un'unica particella, il nucleone.

Similmente al caso dello spin, possiamo dire che il nucleone abbia uno spin detto isotopico $I = \frac{1}{2}$, con componenti $I_z = +\frac{1}{2}$ per il protone e $I_z = -\frac{1}{2}$ per il neutrone: costituiscono quello che è chiamato doppietto di spin isotopico. La descrizione formale di questo spin isotopico è identica a quella dello spin.

Analizzando i livelli energetici di vari nuclei si può arrivare a stabilire che la forza nucleare, a parità di altri numeri quantici, è indipendente dallo stato di carica dei nucleoni. Un esempio di tale analisi è mostrato in figura 11.

Nella parte a) abbiamo i due nuclei ^3He , ^3H , che hanno spin $\frac{1}{2}$ e la stessa parità + (cioè, sono simmetrici per riflessione spaziale), ma diversa composizione in termini di protoni e neutroni. La loro differenza di massa è circa 0.8 MeV , valore estremamente più piccolo della loro massa di circa 2800 MeV : si possono considerare quindi come un doppietto di spin isotopico.

Nella parte b) della figura 11 sono riportati i livelli energetici dei tre nuclei ^{10}Be , ^{10}B , ^{10}C , che possono essere considerati formati da una

⁴ Grazie al fatto che a una massa m corrisponde un'energia $E=mc^2$, è usuale specificare la massa mediante la sua energia.

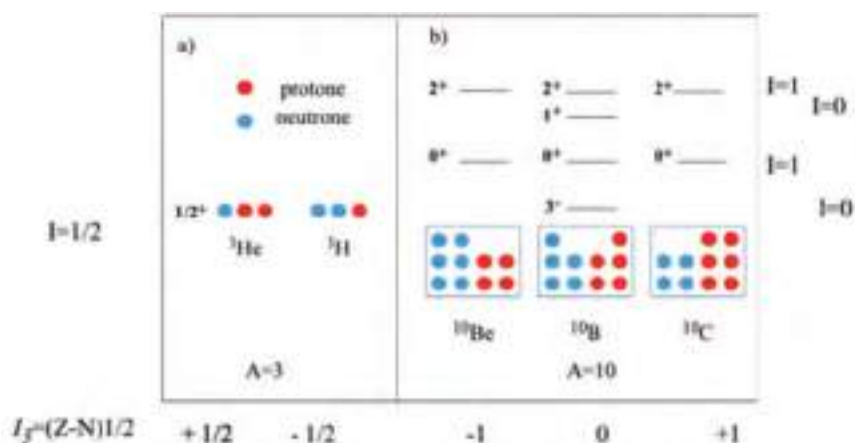


Figura 11. Confronto tra i livelli energetici di nuclei con masse molto simili. a) ${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$; b) ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{10}\text{C}$.

parte comune fatta di quattro protoni e quattro neutroni, alla quale vengono aggiunti due neutroni, un protone e un neutrone o due protoni, rispettivamente. Nonostante la differente composizione, i livelli si aggregano in multipletti: in questo caso singoletti e tripletti, visto che una coppia di nucleoni con spin isotopico $\frac{1}{2}$ possono avere spin isotopico complessivo 0 oppure 1 (vale la stessa legge di composizione dello spin).

Ma a che cosa è dovuta la forza nucleare? La forza elettrica che tiene legati gli atomi può essere attribuita allo scambio di un fotone, il quanto associato all'interazione elettromagnetica. L'interazione tra una particella α e il nucleo di oro è descritta dal diagramma della figura 12a) e il potenziale elettrico $V_{\text{em}}(r)$ è proporzionale a $1/r$, dove r è la distanza α -Au. Basandosi su questa situazione, Yukawa nel 1935 ha ipotizzato che l'interazione tra due nucleoni fosse dovuta allo scambio di una particella dotata di massa (v. figura 12b)). In tal caso si può dimostrare che il potenziale corrispondente $V_{\text{yuk}}(r)$ ha un andamento molto diverso

$$V_{\text{yuk}}(r) \sim \frac{e^{-\frac{r}{a}}}{r} \quad a = \frac{\hbar}{mc}$$

infatti, a causa della presenza di a all'esponente, diminuisce rapidamente al crescere della distanza e descrive così il fatto che la forza nucleare ha un raggio d'azione finito.

Il parametro a è tanto più piccolo quanto più grande è la massa della particella scambiata. Per avere un raggio d'azione dell'ordine di circa 1.4 fm la massa m deve essere circa 140 MeV, un valore intermedio tra la massa dell'elettrone (0.5 MeV) e quella del protone: perciò la particella ipotizzata da Yukawa è stata chiamata mesone.

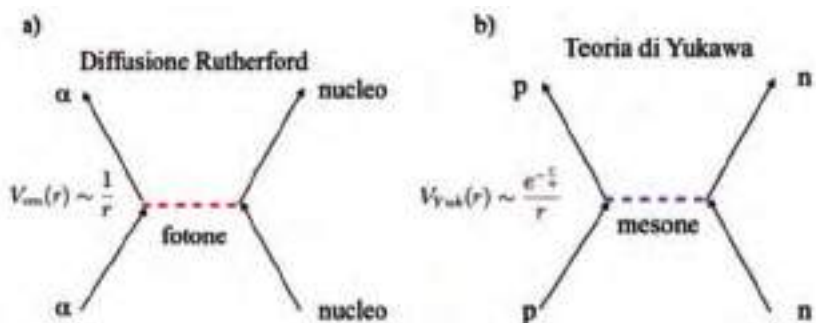


Figura 12. a) L'interazione tra particelle α e nucleo di Au dovuta allo scambio di un fotone; b) l'interazione p - n attribuita da Yukawa allo scambio di un mesone.

In realtà ci sono diversi mesoni che possono essere scambiati tra due nucleoni, come mostrato dalla Tabella 1.

Nome	massa (MeV)	J^P	I
π	140	0^-	1
f_0	500	0^+	0
ρ	770	1^-	1
ω	782	1^-	0
α_0	980	0^+	1

Il mesone di Yukawa è stato identificato con il mesone π , che si presenta in tre stati di carica π^+ , π^0 , π^- (tripletto di spin isotopico) ed è responsabile della parte a più lungo raggio d'azione della forza nucleare. L'attrazione è fornita principalmente dal mesone f_0 (detto anche mesone σ).

La forma dei potenziali dovuti allo scambio dei vari mesoni è calcolabile, restano tuttavia alcuni parametri liberi che sono determinati in modo da riprodurre le proprietà del deutone (unico stato legato del sistema pn), la diffusione elastica tra nucleoni (di fatto tra pp e pn) e l'andamento repulsivo a piccole distanze.

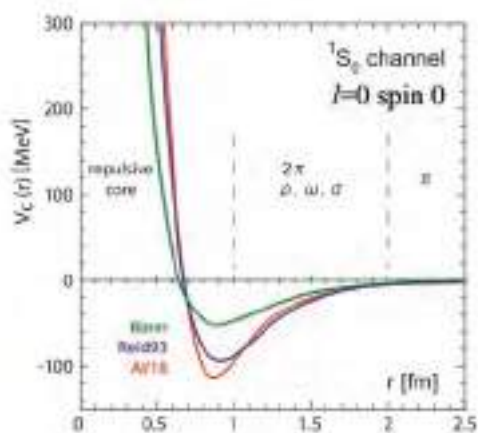


Figura 13. Tre esempi di potenziale NN per lo stato con $l=0$ e spin 0: Bonn [7], Reid93 [8], AV18 [9].

Una caratteristica peculiare della forza nucleare è la sua dipendenza dallo spin e dal momento angolare della coppia dei nucleoni. Inoltre esistono diversi potenziali mesonici etichettati con il nome degli autori (Reid, Feshbach-Lomon, Bryan-Scott...) o della loro città (Parigi, Bonn, Urbana, Argonne...). In figura 13 è riportato il grafico del potenziale per l'urto con spin 0 e momento angolare 0 determinato da alcuni di questi gruppi.

Avendo a disposizione un potenziale tra nucleoni si possono calcolare le proprietà dei nuclei utilizzando l'equazione fondamentale della meccanica quantistica, l'equazione di Schrödinger. Similmente al caso atomico si tratta di un problema a molti corpi, la cui risoluzione è ottenibile con metodi approssimati (ad es. Hartree-Fock).

Viceversa, per i nuclei leggeri sono disponibili soluzioni numeriche molto accurate, finora per A che va da 3 a 7, ottenendo energie di legame e densità in accordo con i dati.

6. A distanze sempre più piccole

La figura 14a) mostra che cosa succede se nuclei o protoni vengono colpiti da raggi γ con energie che spaziano da 10 MeV a circa 10^5 MeV.

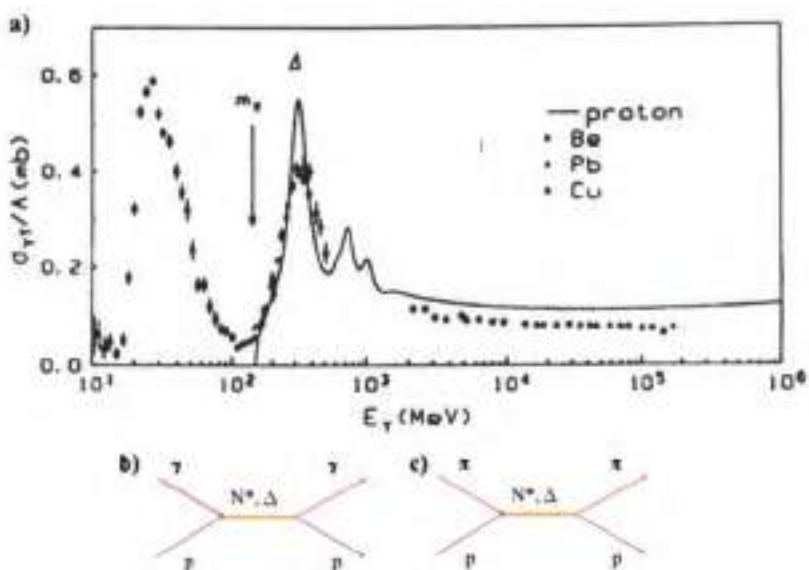


Figura 14. a) L'assorbimento di fotoni da parte di nuclei o protoni in un ampio intervallo di energie; produzione delle risonanze barioniche con assorbimento di fotoni b) o di mesoni π c).

Nei nuclei l'assorbimento di fotoni con energie da 10 MeV in su dà luogo a picchi molto alti: si tratta della cosiddetta risonanza gigante, che può essere spiegata come un'oscillazione dei protoni rispetto ai neutroni e siamo quindi in presenza di un fenomeno collettivo, in linea col fatto che la lunghezza d'onda dei fotoni è di circa 120 fm.

Se l'energia dei fotoni supera i 100 MeV, si formano una serie di picchi molto pronunciati. La natura di questi risulta evidente dal fatto che anche la curva continua, che rappresenta l'assorbimento di fotoni energetici da parte del protone, ha diversi picchi. Si tratta di un fenomeno di eccitazione dei protoni, che produce le cosiddette risonanze barioniche. I picchi sono molto larghi, con larghezze Γ dell'ordine di 120 MeV, corrispondenti a vite medie di circa 10^{-23} s.

Il meccanismo di formazione delle risonanze è mostrato nella figura 14b). In seguito all'assorbimento del fotone si produce uno stato eccitato intermedio che successivamente decade in tempi molto brevi. La stessa cosa avviene, ma con maggiore frequenza, se si usano mesoni π invece di fotoni (v. figura 14c)).

Il primo picco è dato dall'eccitazione della risonanza $\Delta(1238)^5$, che può avere quattro stati di carica: Δ^- , Δ^0 , Δ^+ , Δ^{++} , ha quindi spin isotopico $I=3/2$ (anche lo spin vale $3/2$), il secondo picco è la risonanza $N(1520)$, con $I=1/2$ e spin $3/2$, mentre il terzo picco è la risonanza $N(1688)$, con $I=1/2$ e spin $5/2$.

Particle Data Group 2024

Barion Summary Table

$B_a=1$

Legend:
N N
Δ Δ
strane strane

Particle	Mass (MeV)	Spin (J)	Parity (P)	Isospin (I)	Strangeness (S)	Decay Width (MeV)	Production
$N(938)$	938	1/2	+	1/2	0	0	pp
$N(1192)$	1192	1/2	+	1/2	0	0	pp
$N(1238)$	1238	3/2	+	3/2	0	0	pp
$N(1440)$	1440	1/2	+	1/2	0	0	pp
$N(1520)$	1520	3/2	-	1/2	0	0	pp
$N(1688)$	1688	5/2	+	1/2	0	0	pp
$\Delta(1238)$	1238	3/2	+	3/2	0	0	pp
$\Delta(1600)$	1600	3/2	-	3/2	0	0	pp
$\Delta(1900)$	1900	3/2	+	3/2	0	0	pp
$\Delta(2190)$	2190	3/2	+	3/2	0	0	pp
$\Lambda(1115)$	1115	1/2	+	0	-1	0	pp
$\Lambda(1520)$	1520	3/2	-	0	-1	0	pp
$\Lambda(1600)$	1600	3/2	-	0	-1	0	pp
$\Lambda(1800)$	1800	3/2	+	0	-1	0	pp
$\Lambda(2280)$	2280	3/2	+	0	-1	0	pp
$\Sigma(1192)$	1192	1/2	+	1	0	0	pp
$\Sigma(1385)$	1385	3/2	+	1	0	0	pp
$\Sigma(1670)$	1670	3/2	-	1	0	0	pp
$\Sigma(1940)$	1940	3/2	+	1	0	0	pp
$\Sigma(2130)$	2130	3/2	+	1	0	0	pp
$\Xi(1318)$	1318	1/2	+	1/2	-1	0	pp
$\Xi(1530)$	1530	3/2	+	1/2	-1	0	pp
$\Xi(1670)$	1670	3/2	-	1/2	-1	0	pp
$\Xi(1940)$	1940	3/2	+	1/2	-1	0	pp
$\Xi(2130)$	2130	3/2	+	1/2	-1	0	pp
$\Omega(1370)$	1370	1/2	+	0	-2	0	pp
$\Omega(1530)$	1530	3/2	+	0	-2	0	pp
$\Omega(1670)$	1670	3/2	-	0	-2	0	pp
$\Omega(2130)$	2130	3/2	+	0	-2	0	pp

Figura 15. Le risonanze barioniche note [9].

Queste sono tre tra le tantissime risonanze barioniche che sono state scoperte. Il grande numero di risonanze note risulta evidente dalla figura 15, che mostra la tabella riportata in [9]. Nel riquadro in rosso, oltre al nucleone, sono elencate le risonanze con $I=1/2$ mentre quelle con $I=3/2$ sono inquadrare in blu. In giallo invece abbiamo delle risonanze dette strane per motivi che vedremo tra poco.

A fianco di queste risonanze barioniche esistono anche risonanze o stati eccitati dei mesoni, in numero anche maggiore di quelle barioniche.

⁵ Il numero tra parentesi è la massa espressa in MeV.

Le risonanze barioniche o mesoniche (dette cumulativamente adroniche) sono caratterizzate da un numero quantico, il numero barionico B_a , che vale 1 per tutte le particelle della figura 15, -1 per le relative antiparticelle, 0 per i mesoni e A per i nuclei. Un aspetto interessante del numero barionico è che si conserva in qualunque reazione si consideri. Ricordiamo che il protone è il barione con la massa più piccola (il neutrone è un po' più pesante) quindi non può decadere in nessuna delle particelle note con massa inferiore, pena la violazione del principio di conservazione del numero barionico. Ci sono stati molti esperimenti volti a verificare la possibilità di decadimento e si è arrivato a determinare che la vita media del protone è superiore a 10^{30} anni. Il protone è quindi stabile e assicura la stabilità per tutti gli atomi e le molecole che esistono.

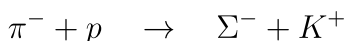
Siamo di fronte a una situazione simile a quella degli atomi e dei nuclei, in entrambi i casi abbiamo una dimensione finita e uno spettro di eccitazione, aspetti caratteristici di un sistema che non è puntiforme ma ha una struttura interna con dei costituenti: nuclei ed elettroni per gli atomi, protoni e neutroni per i nuclei.

Anche i nucleoni hanno una dimensione (il raggio del protone è circa 0.8 fm) e uno spettro di eccitazione, le risonanze barioniche, è stata quindi introdotta l'idea di costituenti elementari, i quark.

Al momento dell'ipotesi dei quark, formulata in modo indipendente da Murray Gell-Mann e Yuval Neeman nel 1964, si conoscevano molte meno particelle. Oltre a quelle di tipo N^* o Δ , c'erano delle particelle dal comportamento strano, nel senso che sono prodotte in coppie mediante interazioni forti, cioè del tipo di quelle responsabili del legame dei nuclei, ma decadono tramite interazioni deboli, della stessa natura dei decadimenti radioattivi β .

La spiegazione di questo comportamento risiede nel fatto che queste particelle sono caratterizzate da un numero quantico S, chiamato stranezza, assente nelle particelle di tipo N^* o Δ , che è conservato nei processi con interazioni forti ma non nelle interazioni deboli.

Ad es. nell'urto tra mesoni π^- e protoni sono prodotti un barione strano Σ^- (massa 1197 MeV) con $S=-1$ e un mesone K^+ (massa 494 MeV) e $S=+1$



che decadono nel modo seguente

$$\Sigma^- \rightarrow \pi^- + n \qquad K^+ \rightarrow \pi^- + \pi^0$$

con evidente violazione della conservazione della stranezza S .

7. *I quark*

Sono stati introdotti tre quark u (up), d (down), s (strange) con carica elettrica frazionaria $2/3$, $-1/3$, $-1/3$, rispettivamente; in tal modo si possono descrivere i numeri quantici spin isotopico e stranezza delle particelle con interazioni forti (gli adroni) che sono considerati stati legati di quark secondo lo schema

barioni	3 quark	mesoni	1 quark e 1 antiquark
protone	uud	π^+	$u\bar{d}$
neutrone	udd	π^-	$\bar{u}d$
Δ^{++}	uuu	K^+	$u\bar{s}$
Σ^-	dds		

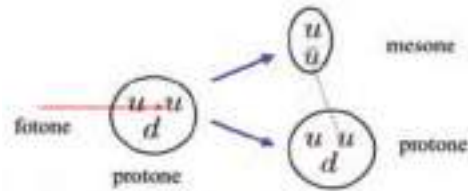
Per descrivere anche tutti gli adroni trovati successivamente è stato necessario introdurre altri 3 quark, con le rispettive cariche elettriche

$$\begin{pmatrix} \text{up} \\ \text{down} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{charm} \\ \text{strange} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{top} \\ \text{bottom} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Q = \frac{2}{3} \\ Q = -\frac{1}{3} \end{matrix}$$

I quark sono stati “visti” nell’urto altamente anelastico elettroni-protoni (Deep Inelastic Scattering, DIS), dove si mostra che il conteggio degli elettroni diffusi ha un andamento costante in funzione di q , tipico dell’urto su un oggetto puntiforme (v. figura 2b)).

L’introduzione dei quark ci fa entrare in un mondo pieno di sorprese.

Tra queste c’è il confinamento dei quark nel senso che qualunque tentativo di strappare un quark da un protone comporta la produzione di una coppia quark-antiquark con la produzione di un mesone



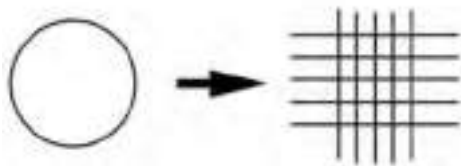
Si tratta di una situazione analoga a quella di una calamita: se si prova a spezzarla, non vengono isolati i poli magnetici ma si forma una coppia N-S



Inoltre, ciascun quark può stare in tre stati diversi, con la conseguente necessità di introdurre un nuovo numero quantico, detto colore, che assume le denominazioni Red, Blue, Green. In questo contesto tutti gli adroni osservati hanno colore zero e ciò si manifesta nel fatto che i barioni sono formati da tre quark di colori diversi q_R , q_B , q_G e i mesoni da coppie quark-antiquark.

Infine, la dinamica tra i quark è dovuta allo scambio di mesoni di massa nulla e dotati di colore (gluoni), cioè la cosiddetta Cromodinamica quantistica (Quantum Chromodynamics, QCD).

In linea di principio, tutte le proprietà degli adroni e tutte le proprietà dei nuclei devono essere determinate dalla QCD, le cui equazioni sono molto complicate e non si riescono a risolvere se non in modo approssimato, mediante la tecnica del reticolo. Significa che, ad es., nel caso del protone, invece di essere considerato un oggetto continuo, lo si pensa ricoperto da un reticolo (nello spazio-tempo)



Si ottengono risultati in ragionevole accordo con i dati sperimentali.

Per quanto riguarda la fisica nucleare si hanno risultati preliminari sulla forza nucleare, mostrati in figura 16. Come si vede il potenziale dipende dallo stato della coppia di nucleoni e l'andamento in funzione della distanza è molto simile quello dei potenziali dati dalla teoria mesonica. Di particolare interesse il fatto che sia prevista una forte repulsione a piccole distanze.

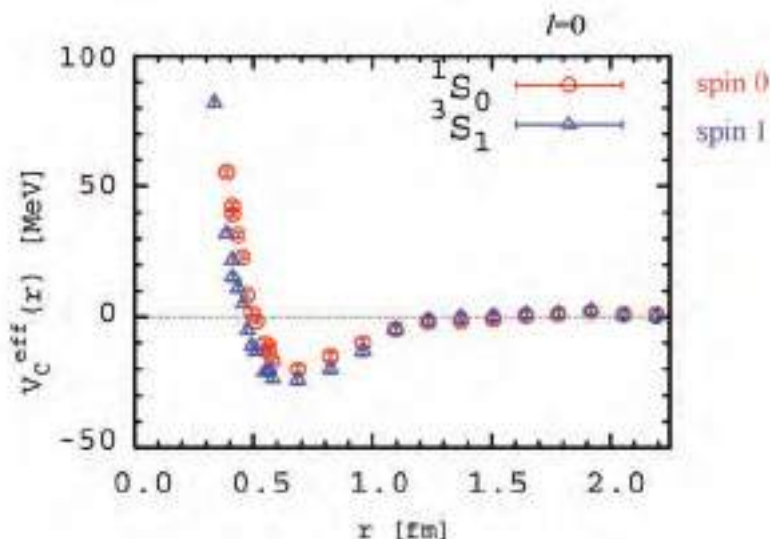


Figura 16. Il potenziale NN per gli stati con $l=0$ e spin 0 o 1 determinato utilizzando la QCD [10].

Bibliografia

- [1] Bohr A. *Rotational motion in nuclei*. Nobel Lecture 1975.
- [2] Adamian G.G. et al. *How to extend the chart of nuclides?* Eur. Phys. J. A 2020;56:47. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00046-7>
- [3] Passatore G. *On a dispersion relation for the potential in the optical model*. Nucl. Phys. A 1967;95:694-704.
- [4] Passatore G. *On the energy dependence of the empirical optical potential*. Nucl. Phys. A 1968;110:91.
- [5] Hodgson P.E. *Nuclear Reactions and Nuclear Structure*. Clarendon Press, Oxford, 1971.

- [6] Giannini M., Ricco G. *An energy-independent potential model for bound and scattering states*. Ann. of Phys. 1976;102:458.
- [7] Machleid R. *The Meson theory of nuclear forces and nuclear structure*. Adv. Nucl. Phys. 1989;19:189.
- [8] Stoks V.G.J. et al. *Construction of high quality NN potential models*. Phys. Rev. 1994;C49:2959.
- [9] Wiringa R. et al. *An Accurate nucleon-nucleon potential with charge independence breaking*. Phys. Rev. 1995;C51:38.
- [9] Navas S. et al. (Particle Data Group). *The review of particle physics*. Phys. Rev. D 2024;110:030001.
- [10] Aoki S. et al. *Theoretical foundation of the nuclear force in QCD and its applications to central and tensor forces in quenched lattice QCD imulations*. Prog. Theor. Phys. 2010;123:89-128. <https://doi.org/10.1143/PTP.123.89>

La fisica nucleare a Genova e non solo

Si illustrano brevemente le principali proprietà del nucleo e dei suoi costituenti. Le indagini tramite reazioni elastiche e anelastiche con diversi tipi di particelle hanno permesso di ottenere importanti informazioni sulla struttura del nucleo e la sua dinamica. La relativa descrizione teorica si basa su una serie di modelli (a goccia, a shell, ottico, a quark), ciascuno dei quali corrisponde alle caratteristiche che emergono via via che il nucleo è analizzato con sonde di energie sempre più grandi.

Parole chiave: struttura nucleare; reazioni nucleari; modelli nucleari; struttura a quark.

Nuclear Physics in Genoa and Beyond

The main properties of the nucleus and of its constituents are briefly exposed. The analysis by means of elastic and inelastic reactions with different kind of particles has led to important information on the nuclear structure and on its dynamics. A theoretical description is provided by various models (drop, shell, optical, quark), each of them corresponding to the features emerging as long as the nucleus is tested with probes of increasing energy.

Keywords: nuclear structure; nuclear reactions; nuclear models; quark structure.

RELAZIONI E CONTRIBUTI

MARZIA BO

*Mar Ligure profondo:
esplorazioni, scoperte e vulnerabilità*

1. *In principio era l'Oceano Ligure*

La storia geologica di un bacino ne definisce in larga parte la struttura e le caratteristiche oceanografiche e pertanto influisce sulla sua ricchezza biologica.¹ Ecco perché è importante contestualizzare il Mar Ligure in chiave geologica e biogeografica prima di approfondirne le esplorazioni e le scoperte in chiave biologica. Il bacino ha circa 25 milioni di anni, quindi, in termini geologici, è relativamente recente. In questo arco di tempo, tutto il settore occidentale del Mar Mediterraneo è stato interessato da importanti cambiamenti che hanno incluso fenomeni di estensione continentale e vulcanesimo coincidenti con la scomparsa dell'antico Oceano Ligure.²

In particolare, la frattura del margine meridionale europeo, iniziata nel tardo Oligocene, circa 25 milioni di anni fa, seguita da una progressiva estensione del margine stesso verso sud, ha causato il distaccamento di grandi frammenti continentali associabili alle attuali Corsica, Sardegna e isole Baleari, andati poi incontro a rotazione. Tale movimento, che nel Miocene (circa 15 milioni di anni fa) è stato interessato da importanti fenomeni di vulcanesimo e ha determinato la formazione di imponenti montagne sottomarine, è cessato nel tardo Pliocene, circa 2 milioni di anni fa, a seguito dello scontro dei frammenti con l'arco appenninico. Il risultato di questo processo è stato l'apertura del Golfo del Leone e del Mar Ligure così come li conosciamo ora.²

Nell'arco della storia geologica più recente del bacino si riconoscono importanti stravolgimenti nella composizione delle biocenosi marine che hanno in vario modo contribuito alla definizione delle attuali comunità del Mediterraneo.¹ *In primis* la chiusura dell'antico Oceano Tetide, 10 milioni di anni fa, nel Miocene, e in particolare la completa chiusura del collegamento tra il proto-Mediterraneo e l'Oceano Indiano. Tale evento ha bloccato l'ingresso di fauna tropicale di origine indo-pacifica e il bacino è stato colonizzato da quel momento in poi solo da fauna di origine atlantica. Questo almeno fino a circa 5.6 milioni di anni fa, quando ha avuto inizio la cosiddetta crisi di salinità messiniana. Con la chiusura del precursore dell'odierno Stretto di Gibilterra, l'area mediterranea viene sottoposta a fasi cicliche di disseccamento e inondazione per circa 700.000 anni con formazione di evaporiti spesse anche 3 km nelle aree più profonde del bacino. Si trattò ovviamente di un momento molto rilevante per la fauna e la flora mediterranee poiché si verificò un profondo cambiamento caratterizzato da estese morie. La riapertura dello Stretto, quasi un milione di anni dopo, coincidente con la successiva inondazione del bacino, riaprì la colonizzazione atlantica. In epoca più recente, a partire da 2 milioni di anni fa, nel Pleistocene, la regione viene interessata da intense glaciazioni e successive fasi interglaciali, fino a circa 11.000 anni fa, termine dell'ultima grande glaciazione. Questo periodo è stato quindi caratterizzato da una alternanza di colonizzazioni da parte di specie calde (durante i periodi interglaciali) provenienti dall'Atlantico tropicale e specie fredde (durante i periodi glaciali) provenienti cioè dall'Atlantico settentrionale e dal Mar Glaciale Artico e pertanto definite ad affinità boreale. Attualmente la fauna, in particolare quella profonda, è a predominanza boreale, sebbene le specie adattate a condizioni più fredde si siano estinte nel bacino o siano andate incontro a forte regressione. Infine, l'apertura del Canale di Suez a partire da fine Ottocento ha innescato un ulteriore stravolgimento nella biodiversità mediterranea consentendo l'ingresso di specie tropicali dal Mar Rosso, le cosiddette specie lessepsiane. La loro espansione dal bacino levantino a quello occidentale è considerata indice di una progressiva tropicalizzazione del Mar Mediterraneo e ben rappresenta i cambiamenti climatici in atto; tuttavia, rimangono ancora molto limitati i casi di specie lessepsiane in profondità dove la temperatura è stabilmente più fredda che in superficie.³

2. *Il Mar Ligure oggi*

Il Mar Ligure è individuato oggi come quel tratto di mare abbracciato dalle coste liguri che si estende verso la Corsica. Si tratta di un bacino di circa 400 km², con una profondità massima di 2.850 m nella cosiddetta piana batiale ligure, ed è caratterizzato da una piattaforma continentale molto stretta, che cade in profondità in alcuni punti già attorno agli 80 m, rispetto ai 120-150 m canonici per il Mar Mediterraneo. Il bacino è mediamente oligotrofico, ovvero ha uno scarso carico organico, sebbene la biomassa marina superficiale sia stagionalmente fortemente influenzata da fenomeni atmosferici importanti che riversano in mare ingenti quantità di sedimento terrestre proveniente da una fitta rete fluviale comprensiva di 76 fiumi a carattere prevalentemente torrentizio.^{4, 5} Ciò determina una certa instabilità della piattaforma continentale e la formazione di importanti canyon sottomarini lungo i quali risale acqua profonda che stimola localmente elevati livelli di produttività. In particolare, il bacino occidentale, che supera i 2.500 m di profondità, è caratterizzato da una piattaforma continentale stretta, incisa da 16 canyon interessati da

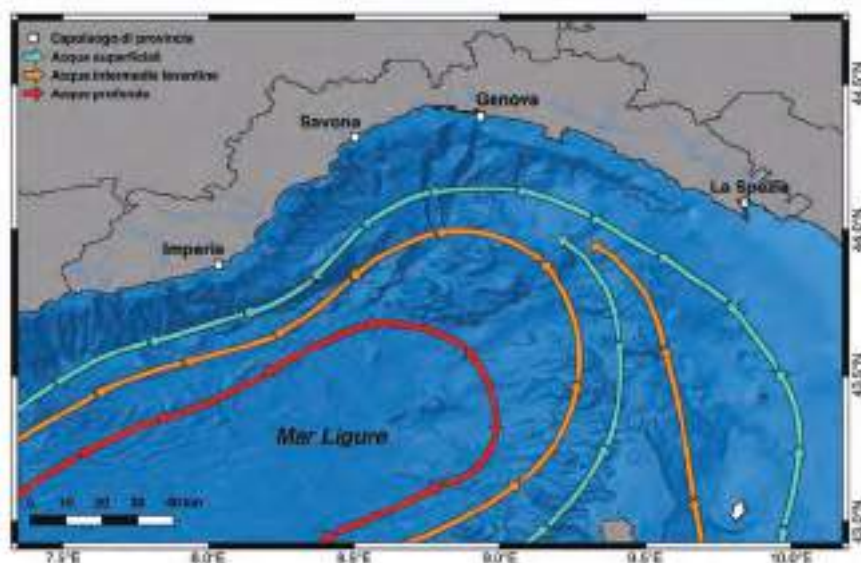


Figura 1. *Struttura batimorfologica del Mar Ligure e principali masse d'acqua.*⁶

forti correnti di *upwelling*. Al contrario il bacino orientale è caratterizzato da una piattaforma più ampia e da soli tre sistemi di canyon, sebbene di ampia portata.

Il Mar Ligure è alimentato da tre imponenti masse d'acqua che risalgono verso nord lungo entrambe le coste della Corsica. Una massa d'acqua superficiale (in azzurro), una profonda (in rosso) e una intermedia (in arancione), che nel bacino ligure si muovono da est verso ovest (figura 1). L'acqua intermedia o levantina viaggia tra i 300 e i 700 m di profondità e investe la scarpata continentale e i canyon di acqua fredda e ricca di nutrienti. Questa massa d'acqua si mescola stagionalmente con acqua superficiale carica di materia organica che, raffreddata dai potenti venti settentrionali che spirano dall'arco alpino costiero, scende in profondità. Questa massa d'acqua rappresenta un importante veicolo di cibo, ossigeno e carbonato di calcio sotto forma di aragonite per le comunità profonde.

3. *La biologia marina in Mar Ligure e la sfida del mare profondo*

La biologia marina in Mar Ligure ha radici relativamente antiche.^{7, 8} La prima metà dell'Ottocento è riconosciuta come l'epoca delle liste di specie. Pesci, cefalopodi, alghe, coralli e molluschi, raccolti prevalentemente dai pescatori, sono i protagonisti delle prime pubblicazioni scientifiche legate alla flora e alla fauna ligure. Segue un eccitante periodo di spedizioni e raccolte sia in Mediterraneo che oltre i suoi confini. Ma è con la biologia della pesca, iniziata a fine Ottocento da Corrado Parona, zoologo dell'Università di Genova, e sancita dall'istituzione, nel 1910, della Società Ligure-Sarda per la Protezione della Pesca, che hanno inizio i primi veri studi sulle comunità marine, come testimoniato, tra gli altri, dal famosissimo manuale di biologia marina di Raffaele Issel, allievo di Parona (figura 2).⁹ A partire dagli anni Cinquanta, l'avvento della subacquea e della fotografia subacquea rivoluzionano lo studio degli organismi marini e danno il via a quella che si confermerà negli anni a venire come uno degli ambiti scientifici genovesi più solidi, investigato da un gran numero di ricercatori e ancora oggi punto di forza dell'istituzione accademica, come ben raccontato da un volume di recente pubblicazione a cura del prof. Giorgio Bavestrello, zoologo genovese (figura 2).⁸



Figura 2. *Il famoso Manuale di Biologia marina di Raffaele Issel e il recente volume sulla storia della biologia marina sul Promontorio di Portofino a cura di Giorgio Bavestrello.*

Se da una parte lo studio delle comunità costiere è da sempre stato caratterizzato da un grande fermento scientifico, lo studio delle comunità profonde è stato decisamente più frammentario e scarso di approcci di ampio respiro. Questo è vero anche per il Mar Ligure. Le campagne di pesca a strascico batiale, portate avanti per oltre un secolo, hanno senza dubbio rappresentato la principale fonte di conoscenze delle comunità profonde,¹⁰ sebbene il metodo di raccolta, ampiamente distruttivo, non permettesse di caratterizzare la struttura, l'ecologia e il funzionamento delle comunità nel loro complesso.¹¹ Un primo tentativo venne fatto nel 1957 con una campagna oceanografica pionieristica del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francese condotta con la nave *Calypso* davanti al Promontorio di Portofino per studiare un rilievo madreporico di profondità.^{12,13} Vi sono stati dei rilievi puntiformi tramite batiscafo negli anni Novanta¹⁴ e più recentemente la subacquea tecnica scientifica ha spostato il li-

mite batimetrico di esplorazione diretta dell'uomo apportando diverse nuove conoscenze^{15, 16} seppure con ovvie limitazioni di profondità, tempi e sicurezza.

Non è stata certamente la scarsità di interesse verso la profondità a limitare per lungo tempo gli studi nel mare profondo, ma piuttosto la mancanza di tecnologie di investigazione profonda non distruttive che consentissero, con budget ragionevoli e in sicurezza, di effettuare studi di comunità sulle biocenosi della parte più profonda della piattaforma continentale, oltre il tradizionale limite dei 40 m della subacquea ricreativa, e lungo la scarpata e piana batiale. A partire dagli anni 2000, i veicoli filoguidati, o ROV, sono diventati disponibili per operazioni scientifiche routinarie dando il via a una vera rivoluzione nell'ambito della biologia marina. Ovviamente esplorare ambienti estremi non richiede solo i veicoli ma un sistema di supporto molto complesso di imbarcazioni di appoggio idonee ad operare in mare aperto anche a diverse decine di miglia di distanza dalla costa, attrezzature accessorie (scanner del fondale, telecamere, sonar...), e tecnici meccanici e informatici in grado di ovviare ai frequenti danni cui i veicoli vanno incontro in profondità.

I ROV sono solo uno degli strumenti ora disponibili per l'esplorazione profonda. Oggi esiste infatti una pletora di apparecchiature per l'investigazione diretta e indiretta dei fondali, per la mappatura, il prelievo, la manipolazione e lo studio continuativo nel tempo (come le telecamere temporizzate o *lander*). Alcuni hanno definito questo particolare momento che stiamo vivendo una nuova epoca d'oro per la biologia marina¹⁷, dopo quella delle grandi spedizioni scientifiche ottocentesche, per la vastità di scoperte che si stanno susseguendo grazie all'innovazione tecnologica.

In virtù della disponibilità di queste tecnologie, negli ultimi 15 anni, il laboratorio di Zoologia Marina del Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), dell'Università degli Studi di Genova, si è dedicato allo studio dei mari italiani profondi in collaborazione con altre università e diversi enti o fondazioni di ricerca e monitoraggio ambientali nazionali e internazionali (ISPRA, ARPAL, CNR, SZN, Ramoge, Fondazione AzioneMare). Il risultato di questo lavoro è un archivio di quasi 650 immersioni effettuate tra 40 e 2.500 m di profondità lungo un gradiente latitudinale di cir-

ca 600 miglia nautiche dal Mar Ligure al Canale di Sicilia coprendo le secche rocciose costiere della piattaforma continentale profonda, numerosi canyon e diverse montagne sottomarine per una copertura del fondale di circa 700.000 m² (figura 3).¹⁸ I siti sono stati mappati con una cartografia di dettaglio tridimensionale, il materiale video e fotografico, rappresentato da centinaia di ore di filmati e quasi 30.000 foto, è stato analizzato minuziosamente per censire tutte le specie presenti. Le specie sconosciute sono state indagate dal punto di vista tassonomico e tutte queste informazioni sono state mappate in uno spazio georiferito.

Il censimento visivo globale ha permesso di identificare 566 taxa appartenenti a 13 phyla differenti e corrispondenti a circa il 60% delle specie megabentoniche, ovvero di grandi dimensioni, note nel Mediterraneo profondo, per molte delle quali non erano disponibili immagini nel proprio ambiente naturale.¹⁸ Tra queste, spugne, cnidari, molluschi e pesci rappresentano i taxa più frequentemente osservati.

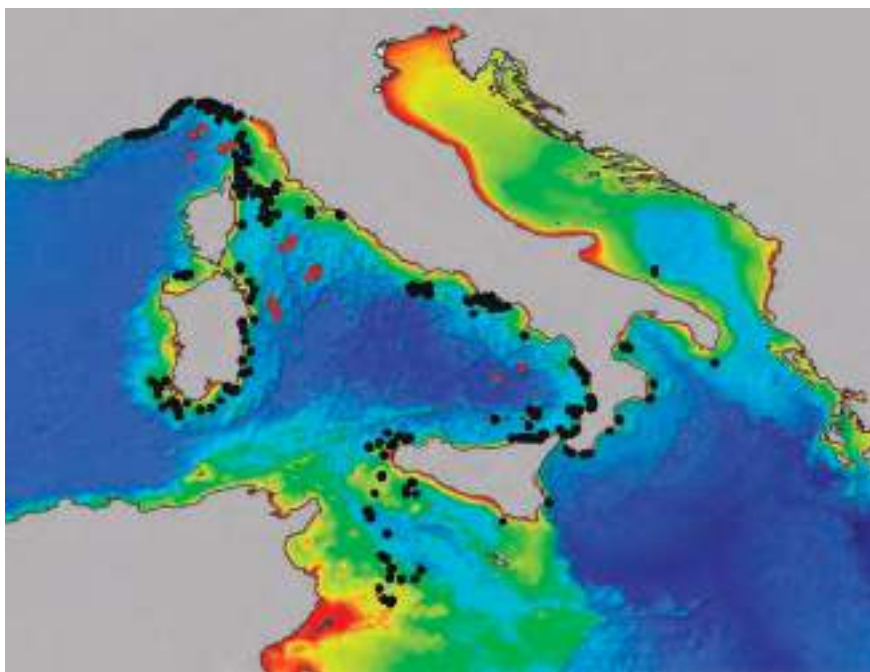


Figura 3. *Mappa dei siti investigati lungo le coste italiane (2006-2023).*¹⁸

4. *Il Mar Ligure profondo: la zona mesofotica*

Nel Mar Ligure è stato effettuato circa il 30% delle immersioni ROV totali sia per motivi di pura esplorazione sia di monitoraggio. Questo bacino ospita circa il 70% delle specie globali, rappresentando una delle aree a maggiore ricchezza tra i mari italiani.

I primi studi effettuati in questa regione, condotti tra il 2012 e il 2018, hanno riguardato la zona mesofotica, che comprende i fondali che si estendono dai 40 ai 200 m di profondità a ridosso del gradino continentale, a non più di poche miglia di distanza dalla costa. Si tratta di un ambiente caratterizzato da un certo grado di idrodinamismo che investe secche rocciose sparse e i fondi incoerenti circostanti. A parte qualche informazione molto frammentaria derivata da immersioni tecniche, si trattava di ambienti praticamente sconosciuti che sono stati investigati, in Mar Ligure, nella loro quasi totalità a partire dai settori a ridosso dei più importanti promontori.⁵ In particolare sono stati considerati 10 settori dislocati lungo i 350 km di costa della Liguria, da Ventimiglia a La Spezia, e un totale di circa 80 siti. Sono state individuate 12 diverse tipologie di comunità megabentoniche, di cui 8 dominate da vaste aggregazioni di organismi arborescenti e di grandi dimensioni (definite specie strutturanti o ingegnere), a cui di solito si fa riferimento con il termine di foreste marine, a sottolinearne l'analogia strutturale con le foreste terrestri. Questi ambienti sono riconosciuti per la loro grande valenza ecologica e il ruolo che svolgono nell'attrarre biodiversità e nel formare zone di rifugio per gli invertebrati ma anche per la fauna ittica, inclusa quella di pregio, target della pesca artigianale e ricreativa. In Mar Ligure, le foreste animali includono principalmente aggregazioni di idrozoi, briozoi, spugne e gorgonie, ma più sporadicamente comprendono anche aggregazioni di policheti, coralli molli, coralli neri e sclerattinie (figura 4). La loro posizione è stata mappata individuando le principali caratteristiche ambientali di profondità, substrato, e inclinazione che possono influenzarne la distribuzione. Inoltre, è stata calcolata l'abbondanza delle principali specie strutturanti in tutte le foreste individuate. Tale mappatura rappresenta uno strumento conoscitivo e gestionale senza precedenti in ambito italiano.

Tra le foreste mesofotiche di maggior rilevanza in Mar Ligure vi è sicuramente quella formata dalla sclerattinia coloniale *Dendrophylia cornigera* (Lamarck, 1816).¹⁹ Si tratta di una specie Atlanto-Medi-

terranea, ad affinità boreale, segnalata generalmente su rocce affioranti con densità modeste oppure in forma di estese tanatocenosi relitte dei periodi glaciali. Tuttavia, in Mar Ligure, in particolare sulla Secca del Mantice (Savona), è stata caratterizzata una rara aggregazione di questa specie su fondo incoerente, tra 80 e 120 m di profondità, di circa un ettaro di estensione (figura 4). L'unicità di questo studio (con solo un altro ritrovamento simile in Mediterraneo), l'estensione della *facies*, la densità delle colonie (fino a 35 colonie m⁻²) e la ricchezza della fauna associata, rendono il sito di grande valore naturalistico e sono valsi a questa specie il titolo di “Oro giallo del Mar Ligure”.

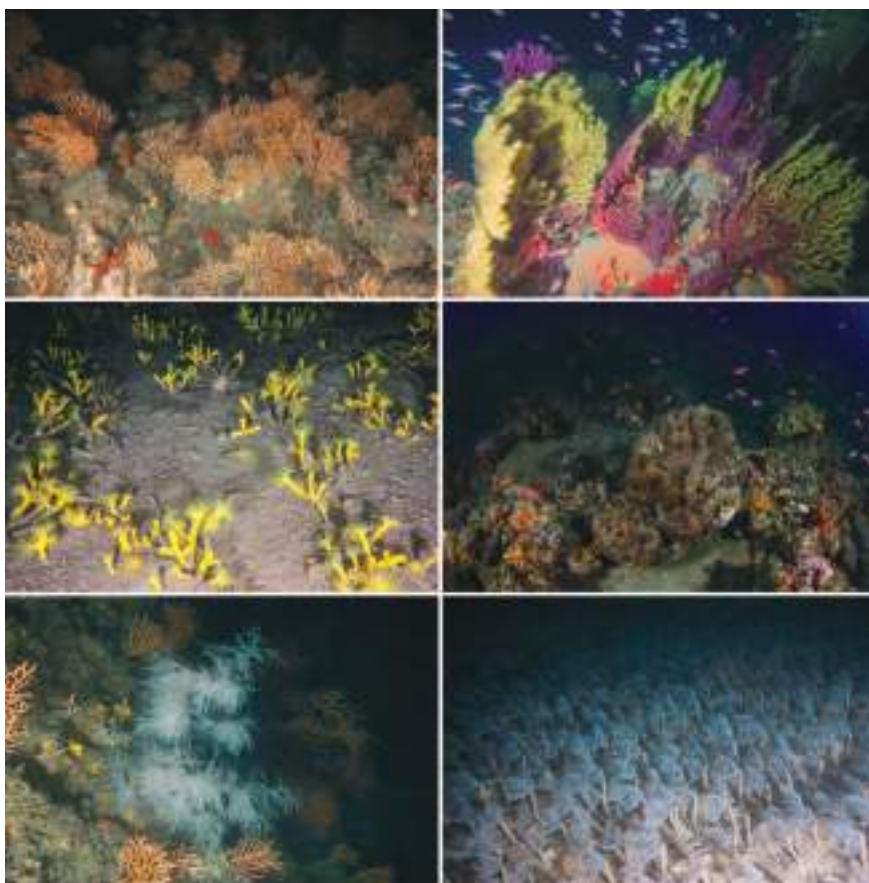


Figura 4. Foreste di organismi strutturanti lungo la piattaforma continentale ligure. Dall'alto al basso e da sinistra a destra: Eunicella cavolini, Paramuricea clavata, Dendrophyllia cornigera, Sarcotragus foetidus, Antipathella subpinnata, Bispira riccardi.

Sempre in questo ambito, ha avuto particolare rilievo lo studio di un nuovo ecosistema mesofotico temperato dominato da spugne keratose massive.²⁰ I fondi a spugne del Mar Ligure, localizzati principalmente nel Ponente ligure nei pressi di Varazze, Savona, Imperia e Sanremo, prosperano tra 40 e 70 m di profondità, e sono caratterizzati da dense aggregazioni di ircinidi, in particolare *Sarcotragus foetidus* Schmidt, 1862 in grado di raggiungere 65 cm di altezza e densità di 8 individui m⁻² (figura 4). È stata stimata una copertura complessiva di circa 200 ettari principalmente su fondi rocciosi frammentati in prossimità di foci fluviali ad elevato carico organico, fonte di cibo per questi organismi sospensivori. Si tratta di un *unicum* del Mar Ligure, e le ragioni di tale unicità rimangono ancora oggetto di discussione considerato che è stato rilevato un generale hotspot di diversità delle spugne in questo bacino rispetto al resto del Mediterraneo.²¹ Certo è che la diversità associata a questi ambienti unitamente alla fragilità data dalla loro esposizione li rende particolarmente vulnerabili agli impatti meccanici.

Gli studi condotti tramite ROV non solo hanno permesso di caratterizzare le biocenosi nel loro complesso, ma hanno fornito numerosi nuovi dati biologici ed ecologici su singole specie o su gruppi di specie (ad esempio, spugne, antozoi, molluschi, brachiopodi, echinodermi, pesci). Un importante contributo su larga scala ha riguardato la diversità della fauna a molluschi eterobranchi.²² È stato dimostrato che questi piccoli gasteropodi marini, tradizionalmente considerati tipici di acque superficiali, si estendono ampiamente in acque mesofotiche, ma, con qualche eccezione, la loro spiccata stenofagia impedisce loro di scendere in acque più profonde non trovando più la loro fonte di cibo, spesso rappresentata da specie arborescenti o massive. La fauna mesofotica ad eterobranchi è particolarmente ricca in Mar Ligure considerata la grande ricchezza di ambienti strutturati e pertanto la presenza di potenziali prede, in particolar modo le spugne e gli idrozoi.

Tra i principali esempi di biodiversità svelata riguardanti il Mar Ligure rientra senza dubbio anche la descrizione di un piccolo platelminta policlade chiamato *Anthoplana antipathellae* Bo & Betti, 2019 che vive come simbionte obbligato sul corallo nero arborescente *Antipathella subpinnata* (Ellis & Solander, 1786) (figure 4, 5).²³

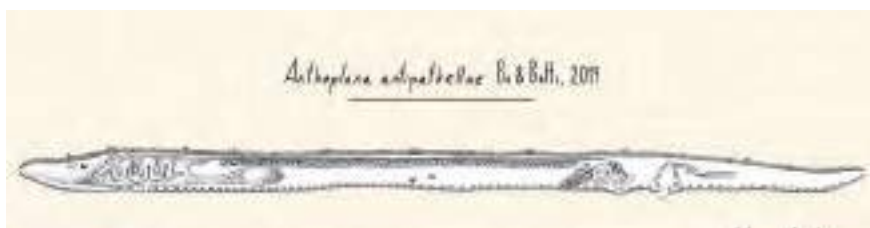


Figura 5. *Schema anatomico di Anthoplana antipathellae (disegno di Giorgia di Muzio).*

Nel materiale tipo utilizzato per descrivere questo nuovo genere e nuova specie vi sono anche campioni prelevati su una foresta di corallo nero situata sulla secca fonda del Promontorio di Portofino. Si tratta di un organismo molto criptico, non più lungo di 2 cm, che vive sulle ramificazioni del corallo cibandosi del suo cenenchima e deponendo caratteristiche capsule ovigere circolari. Nonostante l'ospite fosse conosciuto in Mediterraneo da oltre 200 anni, questa piccola specie, che nei campioni raccolti si disfa rapidamente o si secca, è stata individuata solo ora grazie alla possibilità di studiare gli ambienti mesofotici *in situ*.

Un altro interessante esempio in questo senso è rappresentato dalla nuova specie di anellide polichete *Bispira riccardi* (Giangrande, Putignano, Enrichetti, 2021), ad oggi conosciuta solo per il Mar Ligure.²⁴ Si tratta non solo di una nuova specie, ma anche di un nuovo organismo strutturante in particolare di fondi incoerenti fangosi sui quali può formare dense aggregazioni anche di 950 individui m⁻² (figura 4). Questo verme, che raggiunge i 20 cm di lunghezza e vive stabilmente all'interno di un tubo verticale semi-infossato nei sedimenti, forma popolazioni tra i 60 e 90 m di profondità, in particolare nelle aree antistanti Sanremo, Vado Ligure e Arenzano. Come nel caso dei fondi a spugne, anche i fondi a *B. riccardi* sono poli di attrazione a tutti i livelli, dalla meiofauna alla megafauna e la loro distribuzione è legata all'input trofico proveniente da foci fluviali. Si ritiene che questi organismi influenzino in maniera significativa la quantità di materia organica che arriva nei sedimenti e che pertanto fungano da polo di attrazione per una ricca meiofauna e abbiano un ruolo importante nel cosiddetto *pelagic-benthic coupling* dei fondi mesofotici.

Se i ROV sono in grado di restituire una panoramica puntiforme della diversità in un dato sito in un dato momento, è pur vero

che l'impiego di altre tecnologie oggi disponibili, come le telecamere temporizzate, o *lander*, sono in grado di fornire una visione dinamica nel breve o lungo termine. In questo senso, in Mar Ligure, sono state recentemente effettuate alcune ricerche pioneristiche incentrate sulla diversità e il ruolo della fauna vagile negli ambienti di foresta animale delineando per la prima volta il funzionamento delle biocenosi crepuscolari. Il monitoraggio continuo tramite *lander* del fondo a *B. riccardi* di Arenzano a 64 m di profondità ha permesso, per esempio, di raccogliere in soli 5 giorni oltre 14.000 osservazioni relative ai tassi di contrazione ed espansione della corona branchiale dei policheti.²⁴ Lo studio ha mostrato che questa attività, alimentare e respiratoria, è positivamente influenzata dalla temperatura e dalla corrente e che risponde rapidamente agli eventi meteorologici esterni, dimostrando per la prima volta una profonda connessione tra le masse d'acqua superficiali e le comunità bentoniche mesofotiche sottostanti. La medesima tecnologia è stata poi impiegata anche all'interno di una foresta di *A. subpinnata* (figura 4), situata a Bordighera a 63 m di profondità.²⁵ Tale studio ha spostato l'attenzione su una specie strutturante di maggiori dimensioni (circa 1 m di altezza) dimostrando, in circa 20 giorni di osservazioni continue (per oltre 100.000 fotografie), l'effetto attrattivo dell'aggregazione sulla fauna ittica per ragioni trofiche o di rifugio. Lo studio ha anche delineato le transizioni della comunità ittica nel corso della giornata in funzione dell'utilizzo delle diverse porzioni della foresta (*forest floor*, *canopy* e colonna d'acqua sovrastante), delle strategie alimentari delle singole specie e delle condizioni ambientali, come corrente e torbidità. Ha anche permesso di descrivere per la prima volta il ciclo giorno/notte della castagnola rossa *Anthias anthias* (Linnaeus, 1758) all'interno della foresta e il suo pattern di sonno/veglia in termini di fedeltà ai siti di riposo, durata del sonno e fattori scatenanti il risveglio, apportando un punto di vista del tutto innovativo allo studio del ruolo delle foreste.

Infine, un importante sforzo è stato rivolto allo studio della biologia riproduttiva delle specie strutturanti mesofotiche con particolare riguardo ai coralli neri. La biologia riproduttiva rappresenta un importante tassello nella comprensione della fragilità di una specie e pertanto nella definizione delle migliori strategie di conservazione di questi ambienti. Tuttavia, al crescere della profondità, aumentano in maniera significativa le difficoltà relative al monitoraggio e al campionamento

degli organismi; ecco perché sono ancora molto limitati gli studi di questo tipo. La disponibilità di ROV e di subacquei tecnici, nonché di acquari per il mantenimento *in vivo* degli organismi, hanno però permesso di condurre alcune ricerche di grande interesse scientifico in Mar Ligure. *In primis* è stata fatta luce sui pattern riproduttivi di sette specie di antipatari mediterranei dimostrando come tutte, indipendentemente dalla profondità e dal sito, abbiamo un'unica fase di *spawning* verso la tarda estate.²⁶ Sono state poi condotte diverse ricerche sulla specie mediterranea più carismatica, *A. subpinnata*. Il mantenimento in acquario di alcune colonie ha permesso di caratterizzare per la prima volta alcuni fenomeni di riproduzione asessuale, come la frammentazione e il *bail-out*,^{27, 28} che conferiscono a questa specie una spiccata plasticità in termini riproduttivi e una notevole capacità di dispersione. Tale capacità è dimostrata dall'ampia distribuzione di questa specie in Mediterraneo, come confermano gli elevati livelli di connettività genetica tra le popolazioni costiere e il rilevamento di fenomeni di clonazione (tramite 2bRAD).²⁹ Al contrario le popolazioni *offshore* risultano più isolate e pertanto più fragili nei confronti di fenomeni di stress.

Unitamente agli studi sulla biologia riproduttiva sono state effettuate anche alcune indagini riguardanti l'ecologia trofica di *A. subpinnata* e i rapporti con il microbioma. Nel primo caso, l'analisi degli isotopi stabili del carbonio e dell'azoto nei sedimenti, nei tessuti del corallo e nelle varie componenti planctoniche ha permesso di individuare una dieta stagionale basata su piconanoplancton in autunno e mesozooplancton in primavera, fornendo un nuovo tassello nella comprensione di come tali foreste influenzino il *pelagic-benthic coupling* in zona mesofotica.³⁰ Tale studio ha anche dimostrato come le popolazioni a 60 m risentano del picco di calore estivo, tollerando per brevi periodi temperature di 16 °C. Tale fenomeno, oltre a rappresentare il possibile *trigger* alla riproduzione sessuale, suggerisce anche una certa resistenza della specie a limitati incrementi di temperatura dell'acqua nell'ottica delle sempre più frequenti anomalie termiche (le cosiddette *Marine Heat Waves*)³¹, come peraltro dimostrato in ambiente controllato.³² Infine, relativamente al microbioma, è stato ricostruito il profilo genetico della comunità batterica associata ad *A. subpinnata* (tramite sequenziamento della regione 16S rRNA) dimostrando una diversità molto pronunciata, la marcata assenza di una comunità microbica *core*,

e una grande variabilità sito-specifica.³³ Ciò dimostra che le condizioni locali possono influenzare il microbioma associato e potenzialmente il riciclo dei nutrienti del corallo olobionte, ma al contempo tale flessibilità potrebbe garantire, a differenza di quanto accade in gorgonie strutturanti mesofotiche, una maggiore capacità di acclimatamento agli stress ambientali.

5. *Il Mar Ligure profondo: le aree offshore*

L'esplorazione profonda si è successivamente spostata dalla piattaforma continentale profonda alle zone *offshore* e in particolare ai canyon e alle vette delle montagne sottomarine, o *seamount*, localizzati tra poche e diverse decine di miglia nautiche dalla costa. Tali aree si collocano generalmente sotto ai 150-200 m di profondità e pertanto rientrano nella classica definizione di mare profondo.

I canyon sono profonde incisure della piattaforma continentale che generalmente si estendono in direzione perpendicolare alla costa e si trovano propicienti a foci fluviali. Sebbene in generale i canyon siano influenzati dall'apporto di materiale sedimentario da parte dei fiumi, in Mar Ligure i canyon non sono sempre direttamente connessi alle foci. Ciononostante, mantengono il tipico forte idrodinamismo che caratterizza queste strutture batimorfologiche, sia in senso discendente che ascendente. In Mar Ligure, la piattaforma continentale di Levante è incisa da tre canyon, dei quali due (Polcevera e Bisagno) costituiscono insieme uno dei più importanti sistemi del Mar Mediterraneo, mentre il Canyon di Levante è noto per la sua estensione (circa 80 km) e per la sua inusuale direzione est-ovest che, a partire da Monterosso, lo porta a sfociare nei canyon genovesi.⁵ Nonostante la loro rilevanza, queste strutture non sono mai state investigate nel loro complesso, in particolar modo dal punto di vista biologico. Eppure era noto, grazie allo scarto dello strascico, che in alcune aree di pesca ai gamberi antistanti Portofino e Deiva Marina vi erano tanatocenosi sub-fossili di madrepora di profondità, i cosiddetti coralli bianchi.^{12, 13} Negli anni Sessanta, il Tenente di Vascello Nicola Fusco aveva pubblicato una carta nautica con la distribuzione, tra le altre cose, dei banchi di corallo con l'intento di aiutare i pescatori professionisti ad evitare afferrature.³⁴ Più recentemente, investigazioni profonde



Figura 6. Un reef a *Madrepora oculata* nel Canyon di Deiva Marina (550 m).³⁶

tramite ROV hanno confermato la presenza di una tanatocenosi davanti a Portofino nei pressi della famosa cala Di Terra le Rame¹¹ e di una bio-costruzione vivente di *Madrepora oculata* Linnaeus, 1758, nel Canyon di Levante davanti a Monterosso.³⁵ Ma è solo tramite il progetto Curiosity finanziato dall'Università di Genova nel 2020-2021, che vengono esplorate sistematicamente tutte le zone storiche a corallo individuate dal Fusco e in particolare le aree all'interno o in prossimità del Canyon di Levante (e del ramo di Deiva Marina) tra 400 e 600 m di profondità.³⁶ Vengono individuati banchi sub-fossili, residui dell'ultima era glaciale, e biocostruzioni viventi di *M. oculata* (e in parte anche di *Desmophyllum pertusum* [Linnaeus, 1758], mai segnalato vivo in Mar Ligure) per un totale di quasi 9 km², elevando di fatto il Mar Ligure di Levante a 9^a Provincia mediterranea a coralli bianchi (figura 6).

Nell'ambito di questa ricerca è stato accentuato il ruolo attrattivo di questi ambienti strutturati che diventano oasi di diversità per la megafauna bentonica³⁶, ma anche per la criptofauna, in particolare quella a spugne in grado di sfruttare le cavità tra le ramificazioni morte raggiungendo elevati livelli di diversità e abbondanza.³⁷ Questo substrato

biogenico diventa inoltre un ottimo supporto per l'insediamento di altre specie strutturanti longeve, come le gorgonie, tra le quali se ne annoverano alcune da sempre considerate molto rare, ma che invece qui formano estese foreste profonde, come *Placogorgia coronata* Carpine & Grasshoff, 1975, *Placogorgia massiliensis* Carpine & Grasshoff, 1975 e *Acanthogorgia armata* Verrill, 1878.^{11, 36, 38} Sono attualmente in corso indagini tramite telecamera temporizzata per valutare la diversità e il ruolo delle specie ittiche associate alle biocostruzioni e l'influenza dei parametri ambientali in zona batiale.

Le esplorazioni ROV in Mar Ligure si sono concentrate anche sui *seamount*. Si tratta di elevazioni rocciose generalmente di origine vulcanica che si ergono di oltre 100 m sulla piana batiale o abissale, raggiungendo in alcuni casi anche la zona eufotica.³⁹ In Mediterraneo sono conosciuti oltre 250 montagne sottomarine, di cui 6 sono localizzate in Mar Ligure, oltre 20 miglia nautiche dalla costa (figura 7) e includono il massiccio del Monte Doria, a est del sistema di canyon genovesi (comprendente i *seamount* Ulisse, Penelope e Janua), il *seamount* Occhiali e la Secca di Santa Lucia a nord di Capo Corso, e il *seamount* Spinola, nella zona più profonda della piana batiale ligure.

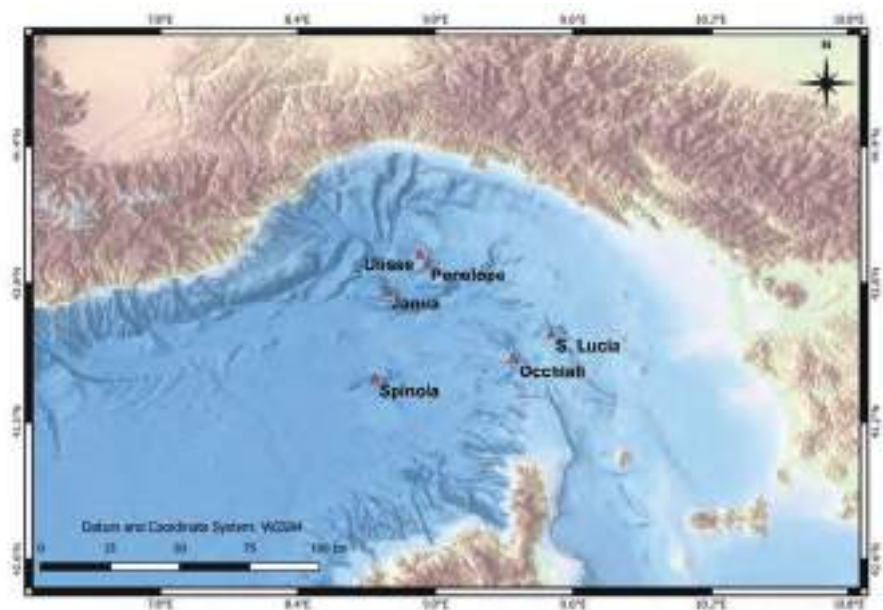


Figura 7. Localizzazione dei *seamount* liguri.

Nell'ambito del progetto BioMount (SIR-MIUR 2015-2018) e successivamente nell'ambito della cooperazione internazionale Ramoge nel 2018 sono state esplorate le vette di tutti i monti liguri toccando le profondità più elevate per il bacino. I monti liguri comprendono cime mesofotiche e batiali e il particolare idrodinamismo che le caratterizza favorisce elevati livelli di produttività secondaria, alte concentrazioni di materia organica e di conseguenza l'insediamento di ricche comunità bentoniche dominate da specie strutturanti arboreescenti e filtratrici come gorgonie e coralli neri.

Le esplorazioni hanno permesso di caratterizzare in maniera molto dettagliata il complesso Ulisse-Penelope, le cui vette si attestano attorno a 400-500 m di profondità e sono dominate da foreste di *Callogorgia verticillata* (Pallas, 1766) e *Villogorgia bebrycoides* (von Koch, 1887) insediate su tanatocenosi di coralli bianchi.⁴⁰ Hanno inoltre permesso di segnalare per la prima volta in Mediterraneo la rara gorgonia atlantica *Chelidonisis aurantiaca* (Studer, 1890), sulla vetta del monte Janua a oltre 800 m di profondità, insieme alla spugna esattinellide *Farrea bowerbanki* (Boury-Esnault, Vacelet & Chevaldonné, 2017).⁴¹ Tale scoperta è rilevante perché non solo conferma l'eccezionale affinità della fauna batiale ligure con quella atlantica, ma definisce per la prima volta in Mediterraneo le caratteristiche biocenotiche di un monte del piano batiale inferiore. Uno studio su larga scala incentrato su quattro specie di brachiopodi mediterranei ha inoltre evidenziato la netta preferenza di queste specie per habitat rocciosi ad alto idrodinamismo all'interno di canyon o sulle cime dei *seamount*, suggerendo come questi ambienti possano ospitare alte densità di organismi filtratori non necessariamente strutturanti ma comunque rilevanti per il *pelagic-benthic coupling*.⁴²

Di particolare rilievo è stata infine la scoperta, effettuata nell'ambito delle esplorazioni Ramoge, sui versanti profondi dei monti Janua, Ulisse e Spinola di resti fossili della grande gorgonia *Paragorgia arborea* (Linnaeus, 1758).⁴³ Tale identificazione è stata possibile comparando la struttura tridimensionale interna dei fossili con quella di colonie viventi. La presenza di cospicui frammenti appoggiati sul fondale e cristallizzati da una deposizione idrogenica di ferro-manganese, risalenti a circa 11.000 anni fa, unitamente alla mancanza di segnalazioni di colonie vive, rappresentano una evidenza importante dell'estinzione di questa

specie dal Mediterraneo. *Paragorgia arborea* oggi si trova prevalentemente in zone oceaniche polari suggerendo che questa specie sia andata incontro a una rapida regressione al termine dell'ultima glaciazione pleistocenica. I resti trovati rappresentano la seconda documentazione esistente di una gorgonia estinta in Mediterraneo e il primo caso di resti fossili perfettamente conservati di scleriti di ottocoralli. Ad oggi certamente una straordinaria unicità del Mar Ligure.

6. *Una coesistenza difficile: l'impronta umana nel Mar Ligure profondo*

Il problema dell'impatto antropico nel mare profondo, con particolare riguardo alla spazzatura, rappresenta una questione globale. Tale impatto dipende in larga misura dalle attività di pesca demersale e agli attrezzi da pesca abbandonati o perduti accidentalmente, e in parte dall'urbanizzazione costiera e dal traffico marittimo. L'impatto umano sulle comunità bentoniche profonde si può quantificare in maniera indiretta valutando lo scarto della pesca una volta che questo viene portato a bordo, oppure in maniera diretta, studiando la spazzatura *in situ* tramite i ROV. Quest'ultimo approccio permette di classificare e quantificare l'abbondanza di materiale di origine antropica sul fondo e anche di valutarne l'impatto sulle specie megabentoniche, in particolare quelle strutturanti, andando a valutare le afferrature e i loro effetti, come danni meccanici, epibiosi e necrosi (figura 8).⁴⁴ La capacità di una specie di resistere e rispondere a tali danni dipende dalle sue caratteristiche strutturali così come dai suoi tassi di crescita e recupero. Mediamente si ritiene che le specie strutturanti delle foreste di corallo o dei fondi a spugne siano poco resilienti e con tassi di crescita limitati; pertanto, sono definite specie fragili e gli ambienti che formano sono definiti vulnerabili (VME, *Vulnerable Marine Ecosystems*).

Nei mari italiani non esiste un sito che non presenti tracce umane, con un significativo decremento lungo il gradiente costa-largo e lungo il gradiente batimetrico.⁴⁴ Il Mar Ligure, in virtù dell'elevata urbanizzazione costiera, dell'elevato numero di porti, delle quasi 800 unità navali di pesca professionale e delle oltre 200.000 licenze di pesca ricreativa, rappresenta, insieme al Golfo di Napoli, una delle aree più pesantemente impattate del Mar Mediterraneo.^{44, 45}



Figura 8. *Impatto della pesca sulle comunità profonde.*

Uno studio ROV su larga scala che ha interessato l'intero arco ligure ha messo in luce la connessione tra l'impatto della piccola pesca demersale (effettuata con tramagli, palamiti e monofilo) e le secche rocciose mesofotiche.⁴⁵ Queste ultime, dominate da foreste animali tridimensionali sono ricche di specie commerciali (che qui trovano rifugio, zone di alimentazione e riproduzione) e pertanto sono indirettamente il target degli attrezzi da pesca artigianali. In questo studio la spazzatura è stata ritrovata in tutti gli 80 siti investigati con densità massime di 7.900 oggetti per ettaro (le più alte a livello europeo) e con una prevalenza di oggetti legati alla piccola pesca e alla pesca ricreativa. La spazzatura urbana, rappresentata principalmente da plastica, rimane concentrata nei siti più costieri vicino alle foci fluviali e ai grandi porti. Lo studio riporta la distribuzione georiferita delle principali categorie di oggetti rappresentando un archivio di riferimento senza precedenti per la regione e per l'intero territorio italiano.

Tra i siti costieri più impattati spicca senza dubbio la Secca dei Maledetti, un sito di interesse comunitario situato al largo di Vado Ligure nel Ponente.⁴⁶ Si tratta di un gradone roccioso di circa 1 km localizzato tra 54

e 130 m di profondità, sede di una ricca foresta plurispecifica di gorgonie e in particolare della più importante popolazione mesofotica di *Coralium rubrum* Linnaeus, 1758 della Liguria^{5, 47}, ma interessato dalla pesca tramite tramaglio da aragosta. Questo sito è stato oggetto di uno studio pionieristico in ambito mesofotico poiché ha unito la caratterizzazione bionomica e di vulnerabilità delle comunità bentoniche alla caratterizzazione dello sforzo di pesca, un elemento che spesso manca nelle valutazioni di impatto ambientale ma che è fondamentale per la gestione. In particolare, è stato quantificato il rischio di afferratura attraverso appositi questionari e sono stati calcolati i tassi di cattura delle specie bentoniche più fragili e la compromissione dell'integrità del substrato coralligeno. Lo studio ha rilevato che in media il 40% degli antozoi strutturanti mostrava tracce di impatto, quasi esclusivamente dovuto ad attrezzi da pesca con una densità sul fondo di 0,5 oggetti m⁻². Particolarmente sofferente la popolazione di corallo rosso con un livello di impatto superiore a quello di quasi ogni altra area a corallo rosso a livello italiano, con alcune eccezioni per il Canale di Sicilia, fortemente depredato però dalla pesca illegale.⁴⁸ La pesca sui Maledetti rimuove un elevato numero di specie bentoniche, in prevalenze specie carbonatiche a scheletro fragile, che rappresentano circa il 90% dei taxa raccolti. Circa il 65% del peso del materiale raccolto è poi rappresentato da frammenti di coralligeno. Si tratta certamente di un costo ambientale notevole a fronte di un guadagno in termini di catture commerciali molto modesto.

Studi di impatto antropico sono stati condotti anche nei siti *off-shore*, maggiormente interessati dalla pesca a strascico. Le aree di pesca, comprese generalmente tra 300 e 700 m di profondità, sono state identificate monitorando i percorsi delle barche, dotate, per legge, di sistema di posizionamento. Tali aree sono localizzate prevalentemente a ridosso dei canyon su fondi incoerenti ma occasionalmente possono investire zone di fondo duro o biogenico frammentato e in particolare i rilievi che ospitano le biocostruzioni a corallo bianco.^{11, 13, 36} Il risultato è l'asportazione di porzioni di biocostruzioni o specie ad esse associate. Interpolando i tracciati delle barche da pesca con la mappatura tridimensionale del fondale è possibile ottenere una panoramica delle zone sfruttate e delle aree pristine. Queste ultime spesso riservano interessanti sorprese come popolazioni di gorgonie di fondo incoerente (*Acanella* sp.) considerate localmente estinte dallo strascico in quanto

sessili e con tassi di crescita estremamente lenti, pertanto non compatibili con l'azione di aratura continua dei fondali operata da questo tipo di pesca.³⁶

Infine, una considerazione riguardante l'impatto della pesca ricreativa demersale *offshore*. Tale modalità di pesca, generalmente effettuata tramite palamiti di profondità, è di difficile monitoraggio. Le barche da pesca non sono tracciate e le catture non sono controllate. Tuttavia, vi sono numerose prove che le recenti innovazioni tecnologiche (in termini di profondità raggiunte dai palamiti, capacità di localizzazione dei rilievi e capacità di cattura dei target) abbiamo ampiamente incrementato l'efficienza di questa tipologia di pesca, operata prevalentemente su siti sensibili per le motivazioni di cui sopra. Non sorprende quindi che significative tracce di impatto della pesca ricreativa siano state trovate sulle biocostruzioni a coralli bianchi nei canyon³⁶ o sui *seamount*, inclusi alcuni molto profondi.^{40, 41} L'intensità di tale pesca su siti *offshore* può avere degli effetti a lungo termine senza che il sistema sia in grado di recuperare. Per esempio, la rimozione di specie vulnerabili a crescita lenta come la cernia di fondale *Polyprion americanus* (Bloch & Schneider, 1801) dal monte Ulisse negli anni Settanta si è rivelata permanente a distanza di 50 anni, suggerendo che la colonizzazione di questi ambienti lontani da costa sia stocastica e che la popolazione, una volta intaccata, non riesca a sopravvivere e si estingua localmente.⁴⁰

7. La conservazione e il monitoraggio del Mar Ligure profondo

Oggi lo sforzo per proteggere le comunità bentoniche di pregio è diventato prioritario a livello globale, poiché è stato dimostrato come un ambiente sano fornisca innumerevoli servizi ecosistemici e importanti ricadute anche per coloro che sfruttano le risorse, in particolare gli stock commerciali. È possibile agire a diversi livelli in base alle condizioni socio-economiche storiche e attuali di un dato sito così come in base alle caratteristiche biologiche ed ecologiche delle sue componenti che ne definiscono la fragilità (ad esempio longevità, scarsa dispersione larvale, rarità, ruolo ecologico, complessità strutturale).⁴⁹ Possono essere riconosciute almeno quattro diverse azioni, non mutuamente esclusive tra loro, di cui segue qualche esempio per il Mar Ligure:

- *Esplorazione, conoscenza e divulgazione*

È fondamentale aggiornare le conoscenze continuando ad esplorare i fondali profondi, che risultano ancora ampiamente sconosciuti. Ciò permette di incrementare le informazioni sulla diversità, il ruolo delle specie, la distribuzione delle biocenosi, i fattori che influenzano tale distribuzione. Nello scorso decennio è stato fatto uno sforzo considerevole a livello mediterraneo per valutare il livello di rischio di estinzione di diverse specie strutturanti (Red List IUCN), basandosi sulle più aggiornate conoscenze biologiche ed ecologiche.⁵⁰ Di fatto questo processo ha portato alla loro inclusione nelle convenzioni internazionali di protezione⁵⁰, primo passo per individuare siti meritevoli di tutela. È stato inoltre aggiornato il Manuale degli Habitat di riferimento del Mar Mediterraneo RAC/SPA includendo un vasto numero di nuove biocenosi profonde, allo scopo di portare all'attenzione della comunità scientifica e non la maggiore complessità ecosistemica del bacino e le principali minacce.⁵¹

È importante anche fornire un'adeguata documentazione riguardante i parametri legati allo sforzo di pesca (o altri impatti antropici che agiscono sul fondo), come la quantità e il tipo di attività deputate a ottenere un certo profitto, per quantificare non solo il disturbo meccanico ma anche la sostenibilità di una certa azione in termini di perdita ecologica e resa economica.⁴⁶ Ciò permette di prendere decisioni gestionali in maniera più consapevole ed equilibrata non solo degli aspetti ambientali, ma anche socio-economici. In questo senso, la valutazione economica dei servizi ecosistemici degli ambienti strutturati profondi può offrire uno strumento aggiuntivo nella dislocazione dei fondi e nello sviluppo e attuazione dei piani di gestione.⁵²

Particolarmente utile è la creazione e il continuo aggiornamento di mappe georiferite relative alla distribuzione e alla composizione delle comunità bentoniche, degli ecosistemi vulnerabili e delle pressioni antropiche.⁵³ Tali mappe offrono uno strumento applicativo immediato ed efficace nella pianificazione spaziale delle aree da tutelare o delle attività antropiche. In Mar Ligure è stata mappata, sulla base delle conoscenze acquisite, la prima rete di ecosistemi marini vulnerabili. In particolare, sono state identificate 14 aree mesofotiche dominate da vari tipi di foreste animali, tre aree batiali a coralli bianchi e due *seamount* popolati da comunità batiali profonde, tutte minacciate da vari tipi di pesca professionale e ricreativa.⁵³

Infine, la divulgazione rimane fondamentale per comunicare le scoperte e i fondamenti scientifici alla comunità e per dialogare con gli utilizzatori del territorio e va fortemente promossa. Il gruppo di ricerca *Deep sea* del DISTAV da anni è impegnato in attività di divulgazione attraverso conferenze, seminari, mostre fotografiche e video per sensibilizzare sull'importanza degli ambienti profondi.

- *Monitoraggio dello stato ambientale*

A partire dal 2015, la Commissione Europea ha avviato un programma di monitoraggio ambientale marino chiamato *Marine Strategy Framework Directive* basato su 11 descrittori in grado di fornire informazioni circa lo stato di salute di un ecosistema e in grado di aiutare gli enti gestionali a perseguire il cosiddetto GES o *Good Environmental Status*. Tale programma ha permesso di creare, per la prima volta, una *baseline* italiana di informazioni standardizzate circa la biodiversità degli ambienti mesofotici dominati da coralligeno e foreste animali e il loro stato di salute in termini di struttura delle popolazioni, integrità del fondale, e abbondanza, tipologia e impatto del *marine litter*.⁵ Successivamente il programma ha iniziato il vero e proprio monitoraggio dei siti di riferimento allo scopo di valutare, su base triennale, il cambiamento dello stato di salute ed eventualmente prendere delle decisioni per andare nella direzione del GES. Alcuni esempi liguri di elaborazione di questi dataset temporali riguardano sia lo studio degli andamenti nel tempo di densità di specie carismatiche come l'ofiuroideo *Astrospartus mediterraneus* (Risso, 1826) in funzione degli apporti di sedimento⁵⁴, sia lo studio degli andamenti nel tempo dell'impatto antropico sulle gorgonie strutturanti in funzione delle anomalie termiche e del diverso sforzo di pesca nei vari settori del bacino.⁵⁵

Un monitoraggio su larga scala deve necessariamente partire dallo sviluppo di protocolli di lavoro standard, approntati, nel caso del mare profondo, *ex novo*, sulla base delle conoscenze acquisite e sulle modalità di lavoro innovative (ad esempio mappature Multibeam, transetti ROV, fotogrammetria). Ciò è stato fatto sia per gli ambienti mesofotici⁵⁶ sia per quelli batiali dominati da coralli bianchi.⁵⁷

Inoltre, allo scopo di definire in maniera quantitativa lo stato ambientale di un dato sito nel tempo si è reso necessario lo sviluppo di indicatori di stato ecologico multi-parametrici che tenessero conto, all'interno delle

specificità dell'ambiente strutturato da antozoi arborescenti, di parametri di struttura e di impatto.⁵⁶ Nei contesti mesofotici l'indice MACS considera da una parte la biodiversità associata, la complessità *dell'understory* e della *canopy*, mentre dall'altra considera la sedimentazione, l'impatto meccanico sulle specie strutturanti e la spazzatura, caratterizzando i descrittori D1, diversità biologica, D6, integrità del substrato, e D10, spazzatura. Il valore finale dell'indice può essere letto nel suo complesso oppure interpretato nelle sue componenti in modo da dare una lettura più rappresentativa della complessità degli ecosistemi naturali. I siti mesofotici del Mar Ligure risultano mediamente "moderati". È attualmente in corso lo sviluppo di un indicatore ecologico di stato ambientale anche per le biocostruzioni batiali a coralli bianchi sfruttando il medesimo approccio.⁵⁸

- *Ripristino dello stato ambientale*

Esiste la possibilità di attuare azioni di mitigazione degli impatti antropici sul fondale in siti particolarmente meritevoli ma danneggiati attraverso progetti di ripristino del buono stato di salute dell'ambiente. Queste azioni includono la pulizia dei fondali da reti e lenze perse. In Mar Ligure uno studio pilota è stato effettuato sulla Secca dei Maledetti con l'intento di valutare, su una piccola area di circa 100 m², la fattibilità della rimozione degli attrezzi a profondità mesofotiche, le possibili tecniche (indirette o dirette), le vie per lo smaltimento del materiale (considerato rifiuto speciale), l'effetto della rimozione sulle comunità (nel breve e lungo termine).⁵⁹ Tale studio ha messo in luce le numerose difficoltà, tecniche e di sicurezza, delle operazioni nonché il possibile impatto sulle gorgonie impigliate, suggerendo come all'aumentare della profondità la possibilità di pulire efficacemente i fondali diminuisca sensibilmente. Nell'ambito di questa ricerca è però stato possibile stimare il tempo di permanenza degli attrezzi recuperati sul fondale utilizzando come bioindicatori gli organismi del *fouling* e in particolare il loro stadio di sviluppo, come suggerito in uno studio sperimentale parallelo condotto sul Promontorio di Portofino.⁶⁰

Un'altra possibilità è relativa al ripristino degli ecosistemi, o *restoration*, tramite trapianti. Questa azione implica, nel caso delle comunità profonde, il prelievo di colonie o di loro porzioni da siti in buone condizioni o dallo scarto della pesca e il loro trasferimento in zone impattate per le quali era nota la presenza della biocenosi. Sebbene negli

ultimi anni queste azioni, ampiamente utilizzate in ambienti costieri, si stiano estendendo anche agli ambienti profondi, esistono ancora pochi esempi in Mediterraneo (ad esempio, progetto REDRESS) e nessuno in Mar Ligure. Al momento tali progetti rimangono studi sperimentali di fattibilità con costi elevati, logistica complessa e tassi di sopravvivenza modesti. Come nel caso delle azioni di pulizia, uno dei principali problemi è legato ai bassi tassi di crescita delle specie: il successo di queste operazioni andrebbe monitorato su scale temporali di decenni, impraticabile all'interno delle normali tempistiche dei progetti scientifici e poco spendibile a livello di opinione pubblica.

- *Definizione di aree protette*

Un'ultima azione, generalmente con più implicazioni socio-economiche, riguarda la possibilità di allargare o istituire una zona di protezione. In Italia, mentre gli ambienti profondi costieri rientrano sotto la giurisdizione regionale e nazionale, gli ambienti oltre le 12 miglia nautiche, i *seamount*, si trovano in acque internazionali, in zone economiche esclusive o in zone di protezione ecologica. Questo è da tener presente sia durante il processo di proposta della zona sia per la parte di gestionale e controllo, che probabilmente rappresentano gli aspetti più impegnativi. Esistono diverse possibilità di protezione in ambito mediterraneo, da quelle meno stringenti, come le aree specialmente protette di interesse mediterraneo (ASPIM), tra le quali rientra il Santuario Pelagos che abbraccia buona parte del Mar Ligure, a quelle con regolamenti più stringenti per le attività antropiche, come i siti di interesse comunitario (SIC) e le zone speciali di conservazione (ZSC) facenti parte della Rete Natura 2000 dell'Unione Europea e rispondenti alla Direttiva Habitat 92/43/CE, le aree marine protette (AMP) e le zone di restrizione alla pesca (FRA). Queste ultime includono tutti i fondali mediterranei oltre i 1.000 m di profondità. In Mar Ligure alcune secche rocciose mesofotiche, come la Secca dei Maledetti, sono state definite SIC (diventando poi ZSC) sebbene nessuna abbia un piano di gestione operativo. Recentemente è stato effettuato uno studio che propone l'allargamento dell'AMP del Promontorio di Portofino al fine di includere l'importante secca profonda di Punta del Faro che rappresenta una zona di coralligeno profondo con foreste di gorgonie e coralli neri.⁶¹ Per quanto riguarda i *seamount* la proposta di FRA suggerita per le cime del

massiccio Doria⁴⁰ al momento è stata accettata come SIC per il monte Ulisse con il divieto di qualsiasi attività antropica volta a danneggiare il fondale. Non esiste invece ancora nessuno strumento di protezione dei siti batiali a coralli bianchi del Mar Ligure, suggerendo che la strada da percorrere in termini di conservazione è ancora molto lunga. La Strategia Nazionale per la Biodiversità nell'ambito dell'Agenda 2030 dell'ONU per lo Sviluppo Sostenibile, tuttavia, prevede la protezione di almeno il 30% dei mari italiani entro il 2030, di cui il 10% con aree a protezione integrale. In questo senso gli ambienti profondi *offshore* possono rappresentare un obiettivo importante.

Ringraziamenti

Gli studi portati avanti in questi anni non sarebbero stati possibili senza il contributo di un gran numero di persone, *in primis* il prof. Giorgio Bavestrello, promotore e sostenitore di nuove idee, e tutto il gruppo di lavoro *Deep sea* dell'Università degli Studi di Genova (Francesco Enrichetti, Margherita Toma, Martina Coppari, Federico Betti, Marco Bertolino, Gabriele Costa, Martina Canessa, Alessandra Cosma). A questi si aggiungono anche Simonepietro Canese, i colleghi di ISPRA, ARPAL, Centre Scientifique de Monaco, Ramoge, l'ing. Guido Gay (Fondazione AzioneMare), Acquario di Genova, Carabinieri Subacquei di Genova, i colleghi ecologi e geologi del DISTAV, la prof.ssa Federica Costantini (UniBo), gli equipaggi delle navi oceanografiche e i tesisti che hanno collaborato negli anni alla raccolta dei dati. Questa panoramica è dedicata alla memoria del prof. Riccardo Cattaneo-Vietti che ne avrebbe apprezzato la valenza scientifica e storica.

Bibliografia

- [1] Bianchi C.N., Morri C., Chiantore M., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A. *Mediterranean Sea biodiversity between the legacy from the past and a future of change*, in *Life in the Mediterranean Sea: a Look at Habitat Changes*, a cura di Stambler N., New York, Nova Science Publisher, 2012, pp. 55.

- [2] Rosenbaum G., Lister G.S., Duboz C. *Reconstruction of the tectonic evolution of the western Mediterranean since the Oligocene*. Journal of the Virtual Explorer 2002;8:107-130.
- [3] Galil B.S., Danovaro R., Rothman S.B.S., Gevili R., Goren M. *Invasive biota in the deep-sea Mediterranean: an emerging issue in marine conservation and management*. Biological Invasions 2019;21:281-288.
- [4] Cattaneo-Vietti R., Albertelli G., Aliani S., Bava S., Bavestrello G., Benedetti Cecchi L., et al. *The Ligurian Sea: present status, problems and perspectives*. Chemistry & Ecology 2010;6:319-340.
- [5] Enrichetti F., Dominguez-Carrió C., Toma M., Bavestrello G., Betti F., Canese S., et al. *Megabenthic communities of the Ligurian deep continental shelf and shelf break (NW Mediterranean Sea)*. Plos-One 2019;14:e0223949.
- [6] Enrichetti F., Bo M. *Studio propedeutico all'individuazione delle aree di esclusione per l'immersione in mare dei materiali di escavo dei fondali marini ai sensi del D.M. 173 del 2016*. Rapporto tecnico DISTAV-ARPAL, 2020, pp. 26.
- [7] Cattaneo-Vietti R., Mojetta A. *The essential role of diving in marine biology*. Bulletin of Environmental and Life Sciences 2021;3:1-44.
- [8] Bavestrello G., Betti F., Bianchi C.N., Bo M., Cappanera V., Corradi N., et al. *Il Promontorio di Portofino: 150 anni di storia di biologia marina*. Notiziario SIBM, 2022, 81: pp. 63.
- [9] Issel R. *Biologia marina: Forme e fenomeni della vita nel mare*. Milano. Ulrico Hoepli, 1918, pp. 607.
- [10] Relini G. *La pesca batiale in Liguria*. Biologia Marina Mediterranea 2007;14:190-244.
- [11] Enrichetti F., Bavestrello G., Coppari M., Betti F., Bo M. *Placogorgia coronata first documented record in Italian waters: use of trawl bycatch to unveil vulnerable deep-sea ecosystems*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 2018;28:1123-1138.
- [12] Blanc J.J., Pérès J.M., Picard J. *Coraux profonds et thanatocoenoses quaternaires en Méditerranée*. Collège International des Sciences Territoriales CNRS 1959;83:185-192.
- [13] Rossi L. *Contributo allo studio della fauna di profondità vivente presso la Riviera Ligure di Levante*. Doriana 1958;2:1-13.
- [14] Tunesi L., Diviacco G., Mo G. *Observations by submersible on the biocoenosis of the deep-sea corals off Portofino Promontory (northwestern Mediterranean Sea)*, in *Proceedings of the First International Symposium on Deep-sea Corals*, a cura di Willison J.H.M. et al., Canada, Halifax, pp. 76-87.

- [15] Cerrano C., Danovaro R., Gambi C., Pusceddu A., Riva A., Schiaparelli S. *Gold coral (Savalia savaglia) and gorgonian forests enhance benthic biodiversity and ecosystem functioning in the mesophotic zone*. Biodiversity and Conservation 2010;19:153-167.
- [16] Di Camillo C.G., Boero F., Gravili C., Previati M., Torsani F., Cerrano C. *Distribution, ecology and morphology of Lytocarpia myriophyllum (Cnidaria: Hydrozoa), a Mediterranean Sea habitat former to protect*. Biodiversity and Conservation 2013;22:773-787.
- [17] Danovaro R., Snelgrove P.V.R., Tyler P. *Challenging the paradigms of deep-sea ecology*. Trends in Ecology & Evolution 2014;29:465-475.
- [18] Toma M., Bavestrello G., Bertolino M., Betti F., Enrichetti F., Angiolillo M., et al. *Large-scale census of mesophotic and bathyal biodiversity from the Italian seas*, in *Scientific National Forum on Biodiversity*, 2024, Università di Palermo.
- [19] Enrichetti F., Toma M., Bavestrello G., Betti F., Giusti M., Canese S., et al. *Facies created by the yellow coral Dendrophyllia cornigera (Lamarck, 1816): origin, substrate preferences and habitat complexity*. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 2023;195:104000.
- [20] Enrichetti F., Bavestrello G., Betti F., Coppari M., Toma M., Pronzato R., et al. *Keratose-dominated sponge grounds from temperate mesophotic ecosystems (NW Mediterranean Sea)*. Marine Ecology 2020;41:e12620.
- [21] Toma M., Bo M., Bavestrello G. *Mesophotic distribution of some common shallow-water sponges*, in *5th International Workshop on taxonomy of Atlanto-Mediterranean Deep-sea and cave sponges*, Rapallo, 2023.
- [22] Toma M., Betti F., Bavestrello G., Cattaneo-Vietti R., Canese S., Cau A., et al. *Diversity and abundance of heterobranchs (Mollusca, Gastropoda) from the mesophotic and bathyal zone of the Mediterranean Sea*. The European Zoological Journal 2022;89:160-182.
- [23] Bo M., Bavestrello G., Di Muzio G., Canese S., Betti F. *First record of a symbiotic relationship between a polyclad and a black coral with description of Anthoplana antipathellae gen. et sp. nov. (Acotylea, Notoplanidae)*. Marine Biodiversity 2019;49:2549-2570.
- [24] Enrichetti F., Baldrighi E., Bavestrello G., Betti F., Canese S., Costa A., et al. *Ecological role and phylogenetic position of a new habitat-forming species (Canalipalpata, Sabellidae) from the Mediterranean mesophotic soft bottoms*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 2022;265:107737.
- [25] Bo M., Costa A., Coppari M., Enrichetti F., Bavestrello G., Di Caro A., et al. *Diel rhythms of fish frequentation in a temperate mesophotic antipatharian forest and sleeping behaviour of the red swallowtail perch Anthias anthias (Linnaeus, 1758)*. Marine Biology 2024;171:166.

- [26] Coppari M., Andruccioli A., Grinyo J., Bavestrello G., Canese S., Bo M. *Unveiling the reproductive biology of mesophotic and bathyal Mediterranean black corals*, in *3rd Mediterranean Symposium on the conservation of Dark Habitats*, UNEP SPA/RAC, Genova, 2022.
- [27] Coppari M., Mestice F., Betti F., Bavestrello G., Castellano L., Bo M. *Fragmentation, re-attachment ability and growth rate of the Mediterranean black coral *Antipathella subpinnata**. *Coral Reefs* 2019;38:1-14.
- [28] Coppari M., Fumarola L., Bramanti L., Romans P., Pillot R., Bavestrello G., et al. *Unveiling asexual reproductive traits in black corals: polyp bailout in *Antipathella subpinnata**. *Coral Reefs* 2020;39:1517-1523.
- [29] Terzin M., Paletta M.G., Matterson K., Coppari M., Bavestrello G., Abbiati M., et al. *Population genomic structure of the black coral *Antipathella subpinnata* in Mediterranean Vulnerable Marine Ecosystems*. *Coral Reefs* 2021;40:751-766.
- [30] Coppari M., Ferrier-Pages C., Castellano M., Massa F., Olivari E., Bavestrello G., et al. *Seasonal variation of the stable C and N isotopic composition of the mesophotic black coral *Antipathella subpinnata* (Ellis & Solander, 1786)*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2020;233:106520.
- [31] Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C.N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C. et al. *A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999*. *Ecology Letters* 2000;3:284-293.
- [32] Godefroid M., Zeimes T., Bramanti L., Romans P., Bo M., Toma M., et al. *Low vulnerability of the Mediterranean antipatharian *Antipathella subpinnata* (Ellis & Solander, 1786) to ocean warming*. *Ecological Modelling* 2023; 475:110209.
- [33] de Water J.A.J.M., Coppari M., Enrichetti F., Ferrier-Pagès C., Bo M. *Local conditions Influence the prokaryotic communities associated with the mesophotic black coral *Antipathella subpinnata**. *Frontiers in Microbiology* 2020;11:537813.
- [34] Fusco N. *Il fondo del mare da Sestri Levante alla foce dell'Arno, da Capo di Noli a Sestri Levante, dal confine francese a Capo di Noli con annesse carte di pesca n. 6, n. 7 e n. 8*, a cura di Ministero Marina mercantile, Direzione Generale della Pesca Marittima, Roma, 1967, 1968, 1972.
- [35] Fanelli E., Delbono I., Ivaldi R., Pratellesi M., Cocito S., Peirano A. *Cold-water coral *Madrepora oculata* in the eastern Ligurian Sea (NW Mediterranean): historical and recent findings*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 2017;27:965-975.
- [36] Bo M., Enrichetti F., Betti F., Gay G., Quarta G., Calcagnile L., et al. *The cold-water coral province of the eastern Ligurian Sea (NW Mediter-*

- anean Sea): historical and novel evidences*. *Frontiers in Marine Science* 2023;10:1114417.
- [37] Costa G., Bo M., Enrichetti F., Bertolino M. *Sponges associated with white corals from the deep eastern Ligurian Sea*, in *3rd Mediterranean Symposium on the conservation of Dark Habitats*. UNEP SPA/RAC, Genova, 2022.
- [38] Enrichetti F., Bavestrello G., D'Aprile E., Bo M. *Deep-sea octocorals from bathyal cold-water coral ecosystems of the Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea)*, in *European Coral Reef Symposium*, Napoli, 2024.
- [39] Würtz M., Rovere M. *Atlas of the Mediterranean seamounts and seamount-like structures*, a cura di IUCN, Gland, Switzerland and Málaga, 2015, pp. 276.
- [40] Bo M., Coppari M., Betti F., Enrichetti F., Bertolino M., Massa F., et al. *The high biodiversity and vulnerability of two Mediterranean bathyal seamounts support the need for creating offshore protected areas*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 2021;31:737-747.
- [41] Bo M., Coppari M., Betti F., Massa F., Gay G., Cattaneo-Vietti R., et al. *Unveiling the deep biodiversity of the Janua Seamount (Ligurian Sea): first Mediterranean sighting of the rare Atlantic bamboo coral *Chelidonisis aurantiaca* Studer, 1890*. *Deep-Sea Research Part I*, 2020;156:103186.
- [42] Toma M., Enrichetti F., Bavestrello G., Canese S., Cau A., Andaloro F., et al. *Brachiopod Fauna from the Deep Mediterranean Sea: Distribution Patterns and Ecological Preferences*. *Diversity* 2022;14:753.
- [43] Bo M., Sartoretto S., De La Bernardie X., Quarta G., Tracy D., Calcagnile L., Fabbri M.-C. *Focus sul primo ritrovamento in Mediterraneo, con la campagna Ramoge 2018, di resti di Paragorgia arborea, una specie ormai estinta*, in *Conferenza Accordo Ramoge. Risultati della Campagna di esplorazione 2022*, Direzione Marittima di Genova, 2024.
- [44] Bo M., Bava S., Canese S., Angiolillo M., Cattaneo-Vietti R., Bavestrello G. *Fishing impact on deep Mediterranean rocky habitats as revealed by ROV investigation*. *Biological Conservation* 2014;171:167-176.
- [45] Enrichetti F., Dominguez-Carrió C., Toma M., Bavestrello G., Betti F., Canese S., et al. *Assessment and distribution of seafloor litter on the deep Ligurian continental shelf and shelf break (NW Mediterranean Sea)*. *Marine Pollution Bulletin* 2020;51:110872.
- [46] Enrichetti F., Bava S., Bavestrello G., Betti F., Lanteri L., Bo M. *Artisanal fishing impact on deep coralligenous animal forests: a Mediterranean case study of marine vulnerability*. *Ocean and Coastal Management* 2019;177:112-126.
- [47] Toma M., Bo M., Cattaneo-Vietti R., Canese S., Canessa M., Cannas R., et al. *Basin-scale occurrence and distribution of mesophotic and upper*

- bathyal red coral forests along the Italian coasts*. Mediterranean Marine Science 2022;23:484-498.
- [48] Toma M., Bo M., Giudice D., Canese S., Cau A., Andaloro F., et al. *Structure and status of the Italian red coral forests: what can a large-scale study tell?* Frontiers in Marine Science 2022;9:1073214.
- [49] FAO. *International Guidelines for the Management of Deep-Sea Fisheries in the High Seas*, Roma, 2009, pp. 73.
- [50] Otero M.D.M., Numa C., Bo M., Orejas C., Garrabou J., Cerrano C. *Overview of the conservation status of Mediterranean Anthozoa*, a cura di International Union for Conservation of Nature, Málaga, 2017, pp. 73.
- [51] Montefalcone M., Tunesi L., Ouerghi A. *A review of the classification systems for marine benthic habitats and the new updated Barcelona Convention classification for the Mediterranean*. Marine Environmental Research 2021;69:105387.
- [52] Paoli C., Montefalcone M., Morri C., Vassallo P., Bianchi C.N. *Ecosystem functions and services of the marine animal forests*, in *Marine Animal Forests*, Springer, Cham, 2017, pp. 1271-1312.
- [53] Enrichetti F., Coppo S., Dagnino A., Bavestrello G., Bo M. *Detailed seafloor cartography leads to the identification of benthic vulnerable marine ecosystems*, in *1st Conference of Conservation Biology for Early Career Researchers, Conservation of Marine Systems*, Roma, 2023.
- [54] Canessa M., Betti F., Bo M., Enrichetti F., Toma M., Bavestrello G. *Possible Population Growth of *Astrospartus mediterraneus* (Risso, 1826) (Ophiuroidea, Gorgonocephalidae) in the Mediterranean Sea*. Diversity 2023;15: 122.
- [55] Canessa M., Bertolotto R., Betti F., Bo M., Dagnino A., Enrichetti F., et al. *Variation in the health status of the Mediterranean gorgonian forests: The synergistic effect of Marine Heat Waves and fishing activity*. Biology 2024;13:642.
- [56] Enrichetti F., Bo M., Morri C., Montefalcone M., Toma M., Bavestrello G., et al. *Assessing the environmental status of temperate mesophotic reefs: A new, integrated methodological approach*. Ecological Indicators 2019;102:218-229.
- [57] Angiolillo M., Bo M., Toma M., Giusti M., Salvati E., Giova A., et al. *A baseline for the monitoring of Mediterranean upper bathyal biogenic reefs within the marine strategy framework directive objectives*. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 2023;194:103963.
- [58] Angiolillo M., Enrichetti F., Giusti M., Toma M., Rende S.F., Bo M., et al. *The monitoring of Mediterranean upper bathyal biogenic reefs within the Marine Strategy Framework Directive*, in *European Coral Reef Symposium*, Napoli, 2024, pp. 50.

- [59] Bo M., Enrichetti F. *Azione pilota di pulizia dei fondali*, in *Relazione conclusiva FLAG Gruppo di Azione Costiera Savonese*, FEAMP 2014-2020 Misura 4.63. Codice Progetto Regione Liguria 01/FL/2016/LI.
- [60] Enrichetti F., Bavestrello G., Betti F., Rindi F., Tregrosso A., Bo M. *Fate of lost fishing gears: Experimental evidence of biofouling colonization patterns from the northwestern Mediterranean Sea*. *Environmental Pollution* 2021;268:115746.
- [61] Enrichetti F., Bavestrello G., Betti F., Cappanera V., Massa F., Merotto L., et al. *High megabenthic complexity and vulnerability of a mesophotic rocky shoal support the enlargement of a NW Mediterranean MPA*. *Diversity* 2023;5:933.

Mar Ligure profondo: esplorazioni, scoperte e vulnerabilità

Per quasi duecento anni la ricerca marina nel Mar Ligure si è concentrata soprattutto in ambito costiero. Pertanto, vi era un importante gap conoscitivo riguardo alle comunità che popolavano gli ambienti profondi. Negli ultimi quindici anni, tuttavia, esplorazioni sistematiche effettuate lungo tutto l'arco ligure mediante mezzi filoguidati, tra i 40 m e i quasi 2000 m di profondità, hanno consentito di raccogliere, in modo non distruttivo, uno degli archivi più estesi oggi disponibili per il bacino mediterraneo. Le indagini esplorative sono servite anche per avviare attività di monitoraggio, sviluppare strumenti di gestione efficienti e creare una baseline per comprendere meglio i cambiamenti climatici attuali e futuri e mitigare le tracce che l'uomo ha lasciato dietro di sé, anche nei luoghi più remoti del pianeta.

Parole chiave: Mar Ligure; ROV; foreste animali; impatto della pesca; conservazione.

Deep Ligurian Sea: Explorations, Discoveries and Vulnerability

For almost 200 years, marine research in the Ligurian Sea was mainly concentrated along the coasts. Therefore, there was a vast knowledge gap regarding communities that populated the deep seabed. In the past 15 years, however, systematic explorations carried out along the entire Ligurian arc through remotely operated vehicles, between 40 m to nearly 2000 m depth, made it possible to collect, in a non-destructive way, one of the most extensive archives available today for the Mediterranean basin. The exploratory surveys also served perfectly for starting monitoring activities, developing efficient management tools and creating a baseline to better understand current and future climate changes and mitigate the traces that man left behind, even in the most remote places on the planet.

Keywords: Ligurian Sea; ROV; animal forests; fishing impact; conservation.

MARTINO BOLOGNESI

*Il mondo delle (macro)molecole biologiche
attraverso gli “occhi” della biologia strutturale*

Conoscere la struttura atomica della materia è sempre stato un sogno di tutti i ricercatori, nei campi fisico e chimico. Un passo fondamentale in questa direzione si ebbe nel 1912 con i primi esperimenti di diffrazione dei raggi-X da parte di Max von Laue (su cristalli di solfato di rame), che dimostrarono la natura periodica dei cristalli e l'applicabilità dei raggi-X per studiarne la struttura atomica intrinseca. A von Laue verrà assegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1914. I suoi esperimenti, assieme a studi di altri scienziati del periodo, confermarono la necessità della scelta dei raggi-X come sorgente di radiazione elettromagnetica per lo studio della struttura della materia. Infatti un principio base dell'ottica e delle microscopie insegna che per poter distinguere i dettagli di un qualsiasi “oggetto” è necessario disporre di una fonte di “luce” a lunghezza d'onda paragonabile con le dimensioni dei dettagli che si vogliono esaminare (meglio ancora se questa lunghezza d'onda fosse minore). Pertanto, volendo distinguere gli atomi costitutivi la materia (tecnicamente si direbbe “risolvere” questi dettagli), che hanno dimensioni tipiche dell'ordine di 1 Å (10^{-10} metri), è necessario ricorrere a una zona dello spettro elettromagnetico di lunghezze d'onda corrispondenti, da cui l'uso dei raggi-X (a volte detti raggi-X duri, in questa zona dello spettro).

L'applicazione dei raggi-X in cristallografia di materiali inorganici o organici a basso peso molecolare ha riscontrato una lunghissima serie di successi fin dagli anni Trenta del Novecento grazie allo sviluppo di teorie, metodi di calcolo, strumentazione cristallografica di laboratorio.

A partire dal 1962, anno in cui il premio Nobel fu conferito a Max Perutz e John Kendrew per le strutture cristallografiche di emoglobina e mioglobina, ad oggi almeno dodici premi Nobel hanno evidenziato ricerche cristallografiche, sia per studi metodologici che per la determinazione della struttura tridimensionale di importanti proteine (v. sotto).

In ambito biologico era noto fin dai primi anni del Novecento come alcune proteine potessero esser cristallizzate, ma la applicabilità di questi cristalli a uno studio strutturale pareva al di fuori di ogni possibile approccio sperimentale. La tecnologia della seconda metà del Novecento, invece, ha fornito via via strumenti molto potenti per affrontare queste sfide. Gli sviluppi della biologia molecolare e della biochimica hanno consentito di produrre proteine ricombinanti in quantità significative e con alti gradi di purezza (essenziali per la produzione di cristalli). Le risorse di calcolo veloce si sono diffuse ovunque, e a costi contenuti. Le sorgenti di raggi-X hanno raggiunto livelli di intensità impensabili attraverso lo sfruttamento della radiazione di sincrotrone (v. European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble – European Synchrotron Radiation Facility [ESRF]). È oggi possibile, tramite l'accesso alle grandi "facilities" internazionali di "luce di sincrotrone", eseguire esperimenti di diffrazione su cristalli proteici usando campioni cristallini di dimensioni micrometriche e in tempi dell'ordine di decine di secondi. Tutto ciò ha portato a un importante avanzamento delle nostre conoscenze sulla struttura delle proteine. Il Protein Data Bank, il deposito internazionale che raccoglie tutte le strutture tridimensionali di proteine determinate dalla ricerca pubblica (il privato farmaceutico non pubblica...) contiene oggi (giugno 2024) più di 220.000 deposizioni (<https://www.ebi.ac.uk/pdbe/>). Questo risultato, oltre ad avere un valore intrinseco per la ricerca di base e applicata, costituisce la base di dati su cui gli algoritmi di intelligenza artificiale (*Machine Learning*) stanno conseguendo risultati molto significativi per la predizione delle strutture tridimensionali di proteine non ancora studiate sperimentalmente o difficilmente accessibili. Un passo avanti della scienza di dimensioni epocali, le cui positive implicazioni e ricadute non sono ancora del tutto visibili (Lane 2022).

Se da un lato i raggi-X hanno costituito per decenni l'approccio di elezione per studiare la struttura tridimensionale delle macromolecole, e con crescente efficienza, la necessità di disporre di campioni

cristallini per l'applicazione dei raggi-X ha spesso costituito una barriera difficile da sormontare. D'altro canto, da un punto di vista teorico la microscopia elettronica avrebbe potuto, da tempo, offrire uguali opportunità per lo studio della struttura della materia biologica. Quando gli elettroni utilizzati per l'*imaging* in microscopia elettronica vengono accelerati con potenziali di 200-300 kV all'interno dell'ottica dello strumento, la loro lunghezza d'onda equivalente (secondo l'equazione di De Broglie) è dell'ordine di qualche centesimo di Å; un valore più che sufficiente per "risolvere" atomi e dettagli fini a livello molecolare. In effetti, da diversi decenni, campioni di materiale inorganico venivano analizzati tramite microscopia elettronica fornendo immagini a risoluzione atomica più che soddisfacenti. Ciò non si applica, tuttavia, alla materia biologica che notoriamente richiede un ambiente acquoso, difficilmente tollera il vuoto spinto necessario per la microscopia elettronica, e viene danneggiata da radiazione ad alta energia e intensità (il pennello elettronico nel caso specifico). I campioni biologici-molecolari, se studiati secondo un approccio di microscopia elettronica classica, vengono rapidamente danneggiati in maniera eccessiva e irreversibile.

Gli ostacoli che per anni hanno limitato l'applicazione della microscopia elettronica allo studio ad alta risoluzione di proteine, e macromolecole biologiche in genere, sono stati sorpassati nel secondo decennio degli anni 2000, attraverso l'applicazione di due importanti strategie sperimentali. Da un lato, per contenere il danno da radiazione i campioni da esaminare (tipicamente una gocciolina di volume inferiore al μL della soluzione contenente la proteina da studiare) viene rapidamente raffreddata a temperature criogeniche (circa $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$) e mantenuta tale durante tutto l'esperimento. Dall'altro, attraverso l'uso di una nuova generazione di detector molto sensibili, la dose di elettroni che colpisce e analizza il campione è estremamente limitata, e applicata in una serie di piccoli impulsi in sequenza. Questi accorgimenti sono risultati decisivi per una soddisfacente conservazione della struttura e natura delle macromolecole biologiche analizzate e, grazie anche a importanti sviluppi teorici e prestazioni computazionali, hanno portato a una vera e propria rivoluzione nel campo della Biologia Strutturale (Kühlbrandt 2014; Nogales 2016). Infatti, l'applicazione della crio-microscopia elettronica in campo biologico è risultata vin-

cente da molti punti di vista. Offre la possibilità di analizzare campioni che difficilmente potrebbero essere cristallizzati, sia per natura intrinseca che per le grosse dimensioni (es. le proteine di membrana, i complessi macromolecolari, i nucleosomi, i virus – Fuchsbauer et al. 2019). Le analisi richiedono meno di un decimo di mg del campione, e possono giungere a compimento nel giro di 1-2 settimane.

Coerentemente con quanto descritto, la crio-microscopia elettronica applicata allo studio dei complessi cellulari, proteine, virus e materia biologica in genere, ha ricevuto un immediato riconoscimento, nel 2017, attraverso il premio Nobel assegnato a Jacques Dubochet, Joachim Frank e Richard Henderson, con la motivazione “... for developing cryo-electron microscopy for the high-resolution structure determination of biomolecules in solution” (Swuec et al. 2018). Analogamente, l’Electron Microscopy Data Bank (<https://www.ebi.ac.uk/emdb/>) ha visto uno sviluppo esponenziale di strutture depositate nel corso degli ultimi 5-6 anni, risultato di una estesa diffusione della metodologia e della disponibilità di *facilities* internazionali che, come nel caso della cristallografia, offrono accesso a strumentazione di livello elevato (<https://www.esrf.fr/home.html>).

Come accennato sopra, alcune classi di proteine si prestano particolarmente bene all’analisi strutturale attraverso crio-microscopia elettronica. Tra queste, una prima classe è sicuramente rappresentata dalle proteine di membrana, che difficilmente danno luogo a cristalli utilizzabili in cristallografia. Si è aperto così un orizzonte di ricerca fertile e importante, ad esempio sullo studio dei canali ionici cardiaci, quali il canale HCN4 (Hyperpolarization-activated cyclic-nucleotide-gated channel 4; Saponaro et al. 2021) responsabile delle correnti pacemaker che regolano la frequenza del battito del cuore attraverso il controllo del flusso di ioni (prevalentemente Na⁺). La struttura tridimensionale dettagliata di HCN4, determinata attraverso crio-microscopia elettronica, ha permesso di studiare i meccanismi di selezione e conduzione degli ioni attraverso il poro interno alla proteina, quindi attraverso la membrana cellulare. Il canale HCN4 è anche il bersaglio di uno dei principali farmaci per la terapia delle tachicardie; pertanto, conoscere la struttura interna della proteina e delle zone di riconoscimento del farmaco permette di ottimizzare la molecola terapeutica, potenziandone l’azione attraverso nuove varianti di sintesi.

Col crescere dell'età media della popolazione, l'impatto delle malattie degenerative, dovute a cause intrinseche e non a patogeni esterni, risulta sempre più evidente e preoccupante nelle prospettive della società. Come nel caso della malattia di Alzheimer, dovuta all'aggregazione della proteina A β a livello neuronale, le amiloidosi sistemiche sono malattie che possono colpire diversi organi e sono dovute all'aggregazione in forma fibrillare di diverse proteine. Nel caso delle amiloidosi sistemiche dovute a catene leggere di immunoglobuline l'organo interessato (cuore o reni) subisce uno stress, anche meccanico, che ne può compromettere il funzionamento in modo letale. Le catene leggere delle immunoglobuline sono polipeptidi di circa 220 aminoacidi, che nel caso specifico si aggregano in fibrille amiloidi di lunghezza indefinita, e queste a loro volta si aggregano in formazioni voluminose insolubili, che si depositano nell'organo.

Lo studio della struttura delle fibrille amiloidi è potuto decollare in maniera precisa solo quando le fibrille stesse (*ex vivo*) sono state esaminate tramite crio-microscopia elettronica, secondo i metodi sopra esposti. Nessun altro metodo di indagine precedente aveva consentito di entrare nel dettaglio dell'organizzazione strutturale dell'amiloide con pari precisione e sfruttando campioni di provenienza biotica. In accordo con le generiche evidenze disponibili in precedenza la crio-microscopia elettronica ha evidenziato la natura super-elicoideale delle fibrille, che risultano costituite da strati di proteina organizzati in struttura β , uniti l'uno all'altro lungo l'asse di allungamento della fibrilla da legami idrogeno. Il cuore della fibrilla tende ad avere natura prevalentemente idrofobica. Come risultato, la fibrilla amiloide risulta essere una struttura allungata praticamente all'infinito, fortemente impaccata e legata tra uno strato e l'altro e, di fatto, allungabile all'infinito in quanto ogni strato proteico espone donatori e accettori di legami idrogeno pronti per ricevere e stabilizzare un ulteriore strato (Swuec et al. 2019). Tutto ciò è in accordo con studi termodinamici che assegnano agli aggregati amiloidi un minimo energetico assoluto nel panorama dei processi di ripiegamento delle proteine, indicativo quindi di massima stabilità. Va infine notato che nel raggiungere la conformazione compatibile con l'aggregazione amiloide la proteina (la catena leggera di una immunoglobulina, nel caso specifico) abbandona il proprio ripiegamento globulare nativo ("fold") per assumere una struttura terziaria praticamente

planare, che entra come nuovo strato nella fibrilla in crescita; l'asse di allungamento della fibrilla è normale al piano del "fold" bidimensionale amiloide (Schulte et al. 2022).

La crio-microscopia elettronica, che studia la "singola particella" (per indicare che ci si focalizza su un preciso bersaglio molecolare, proteina, complesso, fibrilla, particella virale...) sta dimostrando enormi potenzialità; potremmo dire che i risultati che vengono prodotti al momento attraverso questo approccio stanno "saturando" la letteratura biologo-strutturale. A breve, sulla scala di 2-4 anni, si attendono gli sviluppi della crio-tomografia elettronica, un ulteriore passo avanti nello studio della materia biologica. Di fatto, attraverso l'approccio tomografico è possibile arrivare a determinare la struttura tridimensionale di complessi molecolari, formazioni subcellulari e, entro certi limiti di organelli, ad alta risoluzione e osservati nel loro reale ambiente cellulare. I progressi in questa direzione sono evidenti e alla portata della strumentazione già oggi disponibile. Le ricadute che avremo sulle nostre conoscenze della biologia molecolare e della biochimica cellulare sono enormi.

Bibliografia

- Fuchsbauer O., et al. *Cas9 Allosteric Inhibition by the Anti-CRISPR Protein AcrIIA6*. Mol. Cell. 2019;76(6):922-937 e927.
- Kühlbrandt W. *Biochemistry. The resolution revolution*. Science 2014;343:1443.
- Lane T.J. *Protein structure prediction has reached the single-structure frontier*. Nat. Methods. 2022;20:170-173.
- Nogales E. *The development of cryo-EM into a mainstream structural biology technique*. Nat. Methods. 2016;13(1):24-27.
- Saponaro A., et al. *Gating movements and ion permeation in HCN4 pacemaker channels*. Mol Cell. 2021;81(14):2929-2943 e2926.
- Schulte T., et al. *Cryo-EM structure of ex vivo fibrils associated with extreme AA amyloidosis prevalence in a cat shelter*. Nat. Commun. 2022;13(1):7041.
- Swuec P., Santo N., Bolognesi M. *Crio-microscopia elettronica di bio-macromolecole. Il Nobel per la Chimica 2017*. La Chimica e l'Industria on Line. 2018;II(1) <http://dx.medra.org/10.17374/CI.2018.100.1.8>
- Swuec P., et al. *Cryo-EM structure of cardiac amyloid fibrils from an immunoglobulin light chain AL amyloidosis patient*. Nat. Commun. 2019;10(1):1269.

Il mondo delle (macro)molecole biologiche attraverso gli "occhi" della biologia strutturale
La conoscenza della struttura tridimensionale delle macromolecole biologiche costituisce il presupposto per comprenderne i meccanismi di azione. La cristallografia a raggi-X, e più recentemente la crio-microscopia elettronica, offrono strumenti di indagine potenti, che permettono di decodificare le strutture di enzimi, proteine di trasporto, anticorpi, proteine di membrana, complessi con acidi nucleici (es. il ribosoma), a risoluzione atomica. Questi risultati trovano importanti applicazioni nella progettazione di farmaci e vaccini secondo approcci razionali. I progressi conseguiti in questo settore della ricerca sono stati riconosciuti dalla assegnazione di numerosi premi Nobel.

Parole chiave: struttura proteine; macromolecole biologiche; raggi-X; crio-microscopia elettronica; biologia strutturale.

Accessing the World of Biological Macromolecules through Structural Biology

Knowledge of the three-dimensional structure of biological macromolecules is the prerequisite for understanding their mechanisms of action. X-ray crystallography, and more recently cryo-electron microscopy, offered exceptional investigation tools, which allowed us to decode the structures of enzymes, transport proteins, antibodies, membrane proteins, complexes between proteins and nucleic acids (e.g. the ribosome), at atomic resolution. The results provided by structural biology find important applications in the design of new drugs and vaccines based on modern and rational approaches. Progress in this broad area of research has been recognized by the awarding of numerous Nobel prizes.

Keywords: proteins structure; biological macromolecules; X-rays; cryo-electron microscopy; structural biology.

GUIDO BUSCA

L'industria chimica: ruolo nella produzione di benessere e di inquinamento ambientale, e nella futura defossilizzazione della società

1. *L'industria chimica e il benessere nelle società avanzate*

È evidente che il mondo occidentale, di cui l'Unione Europea e l'Italia fanno parte, rappresenta il luogo geografico dove si realizza il massimo benessere, a cui tendono anche tutte le nazioni meno sviluppate. Questo benessere è il prodotto di numerosi fattori che trovano comunque il loro fondamento nello sviluppo delle tecnologie. Uno dei dati più significativi che dimostrano questo stato di benessere è la nostra longevità (la speranza di vita alla nascita in Italia nel 2022 è stimata in 80,5 anni per gli uomini e in 84,8 anni per le donne) il che si deve in buona parte all'igiene, alla buona qualità dell'acqua, alla disponibilità di prodotti chimici come farmaci, detersivi e disinfettanti, e di apparecchiature biomediche.

Un altro aspetto del benessere è la disponibilità di tecnologie e apparecchiature per le telecomunicazioni, prodotte, come le attrezzature biomediche, tramite l'utilizzo di semiconduttori, metalli conduttori, materiali superconduttori e magnetici, plastiche che consentono l'assemblamento dei dispositivi. Altri fattori che contribuiscono al nostro benessere sono la disponibilità di energia elettrica e di apparecchiature elettrodomestiche, nonché la mobilità dovuta allo sviluppo di veicoli e dei corrispondenti sistemi di propulsione. Tutte queste tecnologie sono basate su strutture meccaniche anch'esse realizzate alla disponibilità di metalli strutturali, materiali magnetici e conduttori elettrici, ceramiche isolanti, e carburanti.

L'industria chimica, che produce i composti chimici e i materiali essenziali per tutte queste tecnologie, ha certamente un ruolo centrale, quindi, nello sviluppo e nel mantenimento del benessere di cui l'uomo gode o a cui tende.

2. *Inquinamento ambientale, prevenzione ambientale, e chimica*

La produzione di composti chimici e materiali implica l'uso di risorse naturali, come i minerali e le materie prime fossili, e la loro estrazione e lavorazione, realizzate spesso tramite molteplici stadi, fino all'ottenimento del prodotto finito. Tutto ciò (estrazione delle materie prime, trasporto delle stesse e dei prodotti intermedi fino ai luoghi di lavorazione, impianti di trattamento e conversione, fabbriche di montaggio ecc.) danno inevitabilmente luogo a un forte impatto ambientale. Nel corso di questo sviluppo industriale, principalmente realizzato nel secolo XX, ci si è anche resi conto di quanto l'ambiente sia sensibile alle emissioni (a volte anche quantitativamente abbastanza limitate) di sostanze: molti di questi fenomeni sono stati evidenziati a partire dalla seconda metà del secolo scorso, e sono stati tecnicamente risolti evitando l'uso di sostanze persistenti (esempio i clorofluorocarburi responsabili del consumo dell'ozono stratosferico), riducendo sostanzialmente le emissioni (per esempio di anidride solforosa che causa le piogge acide e di polveri) grazie a carburanti più puliti e a sistemi di abbattimento, ecc. La qualità dell'aria che oggi si respira nelle grandi città occidentali è di molti ordini di grandezza migliore di quella che si respirava settant'anni fa, da tutti i punti di vista, con una costante ed enorme riduzione degli inquinanti, arrivando vicino alla loro concentrazione "naturale" per molti di essi. Nel frattempo, lo sviluppo delle tecniche chimico-analitiche consente di evidenziare anche sostanze potenzialmente inquinanti o tossiche anche se presenti in quantità davvero minime (picogrammi su litro), e ciò spinge a migliorare ulteriormente le tecniche di prevenzione ambientale e di affrontare altre problematiche prima ignote, anche perché non rilevabili.

Se quindi le attività chimiche sono certamente all'origine di buona parte dell'inquinamento ambientale, la chimica è anche la protagonista della rilevazione delle problematiche ambientali e della loro soluzione. Cosa che si è già sostanzialmente realizzata per la maggior parte di queste.

3. *La futura transizione energetica*

Le preoccupazioni associate agli effetti a volte drammatici del riscaldamento globale, attribuito all'eccesso di effetto serra dovuto alle emissioni di gas di origine fossile, soprattutto anidride carbonica, spingono a realizzare nel prossimo futuro una rivoluzione tecnologica, usualmente detta "transizione energetica". Le emissioni di gas serra di origine fossile sono infatti soprattutto associate alle attività di produzione di energia elettrica per l'industria e il settore civile, di energia termica (riscaldamento soprattutto domestico) e di energia meccanica per l'industria e il trasporto.

È quindi opinione comune la necessità di convertire le attività di produzione di energia (finora largamente basate sulla combustione di materie prime fossili con la produzione di anidride carbonica di origine, appunto, fossile), utilizzando invece le energie naturali (del sole, del vento e dell'acqua), trasformandole in energia elettrica, termica e meccanica, senza emettere almeno virtualmente gas serra. In questo senso sarà necessario utilizzare tecnologie alternative, alcune delle quali sono già commerciali ma non per questo mature, altre ancora più o meno lontane dalla commercializzazione ma più o meno promettenti.

In realtà non pare affatto ovvio, oggi, a nessun livello, stabilire in maniera affidabile quali tecnologie siano realmente utilizzabili e sostenibili energeticamente, sul piano del consumo dei materiali e degli impatti sull'ambiente, su scala globale, e siano realmente ottimali rispetto ad altre. In questo momento, il mondo industriale sta sperimentando in maniera accelerata tecnologie almeno parzialmente immature, molto diverse tra loro e alternative, anche utilizzando finanziamenti statali che ne rendono possibile il sostentamento. D'altra parte, gli organismi statali e sovranazionali pare vadano abbastanza alla cieca, a volte più orientati in maniera ideologica e spinti da interessi particolari, piuttosto che con un approccio razionale e scientifico. È chiaro che, a regime, queste tecnologie dovranno essere davvero sostenibili da tutti i punti di vista, anche economico.

In questa rassegna cercherò di evidenziare in maniera critica pro e contro delle nuove tecnologie oggi considerate più promettenti, sottolineando un aspetto che spesso passa sotto silenzio: il ruolo centrale che l'industria chimica ha e continuerà necessariamente ad avere nel mondo industrializzato anche dopo la transizione energetica.

4. *Decarbonizzazione o defossilizzazione? Biocombustibili sì o no?*

Il termine più usato per definire la prossima transizione energetica è il termine *decarbonizzazione*, che indica l'abbandono di tutte le tecnologie che emettono ossidi di carbonio¹. Altri però preferiscono sottolineare che ciò che è necessario è eliminare le tecnologie che emettono ossidi di carbonio di origine fossile, mentre quelle che emettono ossidi di carbonio di origine atmosferica non contribuiscono all'accumulo di gas serra, e potrebbero comunque venire utili. Per questo si parla di *defossilizzazione*².

Questo secondo approccio consente l'utilizzo delle biomasse (legno, rifiuti alimentari, agricoli e del giardinaggio, rifiuti dell'allevamento, biogas) come fonti di energia, che sarebbe invece escluso da chi parla di decarbonizzazione. In questo potrebbe rientrare anche l'uso della CO₂ direttamente captata dall'atmosfera trasformata in e-fuel.

Il limite principale dell'approccio basato sulle biomasse per produrre combustibili e carburanti sta nella limitata disponibilità di materie prime vegetali non commestibili e non competitive con il mercato del cibo. In realtà, un'accurata gestione delle risorse naturali e delle foreste potrebbe consentire, soprattutto in alcune nazioni, di rendere disponibili ingenti quantità di biomasse senza ridurre la massa di materiale vegetale vivente e attiva. D'altra parte, politiche di fertilizzazione di zone aride e desertiche possono consentire addirittura un aumento significativo della massa vegetale insieme alla disponibilità di biomassa a scopi chimici. L'ENI, per fare un esempio, sta operando per promuovere la coltivazione di ricino in alcune zone aride dell'Africa, al fine di produrre olio di ricino, non alimentare, da usare per produrre carburanti sostenibili per l'aviazione³, insieme contribuendo alla fertilizzazione e allo sviluppo umano di tali territori. L'ipotizzata produzione di alghe in grandi quantità a scopo energetico è una tecnologia ancora da sviluppare a livello commerciale, che presenta difficoltà e problematiche anche ambientali non risolte, ma ancora considerata promettente⁴.

Escludere a priori queste tecnologie pare, comunque, più una posizione dogmatica, forse influenzata da motivi di politica commerciale, piuttosto che razionale e scientifica.

Come vedremo, almeno nel prossimo futuro non sarà possibile escludere le tecnologie che fanno uso delle biomasse o per lo meno di CO₂ atmosferica, almeno per alcune tecnologie.

5. *Valutazione delle tecnologie*

Nel momento di una significativa transizione tecnologica, è opportuno valutare le tecnologie più promettenti da diversi punti di vista. Infatti, le informazioni sulle tecnologie realmente disponibili o ancora in fase di sperimentazione sono spesso incomplete e influenzate dai fortissimi interessi economici di chi le sta sviluppando ed è interessato a realizzarle a livello industriale.

5.1. *Valutazione del Livello di Maturità Tecnologica*

In particolare, per le tecnologie innovative è necessario valutare il livello di sviluppo e di disponibilità delle tecnologie da realizzare o su cui puntare, e oggi ciò viene universalmente fatto valutando il cosiddetto Technology Readiness Level (TRL). Nella tabella si riportano le definizioni della Commissione Europea e della International Energy Agency (IEA) dei diversi livelli del TRL. Quasi tutte le agenzie internazionali indicano nove livelli di TRL. In pratica, solo le tecnologie che hanno raggiunto il TRL 9 sono realmente disponibili a livello commerciale, tutte le altre essendo ancora in via di sviluppo. Altri enti, come la International Energy Agency (IEA), aggiungono due ulteriori livelli, TRL 10 e TRL 11, evidenziando come, dopo aver raggiunto il livello commerciale, una tecnologia possa essere ancora ulteriormente sviluppata fino a raggiungere un livello di completa stabilità. Si può d'altra parte notare che, nel passato, numerose tecnologie considerate molto promettenti non hanno mai raggiunto il livello commerciale (fermandosi quindi a $TRL \leq 8$) mentre altre tecnologie, raggiunto il livello commerciale, sono state poi abbandonate essendosi dimostrate non competitive o dannose. Tanto per fare esempi, tecnologie come la fissione nucleare a neutroni lenti o l'idroelettrico vengono valutati da IEA a TRL 11 (ormai stabili), le tecnologie dell'auto elettrica e del fotovoltaico a base di silicio cristallino a TRL 9 (commerciali ma non ancora stabili, in via di miglioramento evolutivo), la tecnologia della fissione nucleare (pur da molti considerata come la tecnologia che risolverà ogni problema energetico e ambientale) a TRL 2-3 (non esiste ancora una prova sperimentale della sua reale fattibilità)⁵.

Tabella 1 *Definizione dei livelli di maturità tecnologica secondo UE e secondo IEA*

TRL	Comunità Europea Horizon 2020 ⁶	IEA ⁷
1	I principi fondamentali sono osservati	Initial idea: basic principles have been defined
2	Il concept tecnologico è formulato	Application formulated: concept and application of solution have been formulated
3	Prova sperimentale del concept	Concept needs validation: solution needs to be prototyped and applied
4	La tecnologia viene validata in laboratorio	Early prototype: prototype proven in test conditions
5	La tecnologia viene validata in settori rilevanti (settori di interesse industriale in caso di tecnologie abilitanti fondamentali)	Large prototype: components proven in conditions to be deployed
6	La tecnologia è dimostrata in settori rilevanti	Full prototype at scale: prototype proven at scale in conditions to be deployed
7	Dimostrazione del sistema prototipale in ambiente operativo	Pre-commercial demonstration: solution working in expected conditions
8	Sistema prototipale completo e qualificato	First-of-a-kind commercial: commercial demonstration, full-scale deployment in final form
9	Sistema provato in ambiente operativo (produzione competitiva in caso di tecnologie abilitanti fondamentali, o nello spazio).	Commercial operation in relevant environment: solution is commercially available, needs evolutionary improvement to stay competitive
10		Integration at scale: solution is commercial but needs further integration efforts
11		Proof of stability: predictable growth

5.2. Valutazione degli impatti delle tecnologie: le tecnologie per la produzione di energia elettrica

Secondo i dati disponibili, le tecnologie che producono le maggiori emissioni di gas serra sono le tecnologie per la produzione dell'energia elettrica. Per valutare le tecnologie disponibili e quelle potenzialmente alternative, se ne devono considerare alcune proprietà e impatti. Numerosi studi si rivolgono alla valutazione delle tecnologie alternative per la produzione di energia elettrica secondo tali criteri, che sono riportati nella tabella 2.

Tabella 2 *Criteri per la valutazione delle tecnologie per la produzione di energia elettrica*

1	Potenziali rischi per la sicurezza umana ¹³
2	Effetto sul valore estetico o sulla qualità del territorio ¹¹
3	Continuità o discontinuità
4	Prevedibilità o imprevedibilità
5	Limiti per l'applicazione ⁸
6	Consumo di materiali ^{9,10}
7	Occupazione di territorio o limitazioni al suo uso ¹¹
8	Effetti sulla salute umana ^{8, 12, 13}
9	Impatti sugli ecosistemi ^{8, 12}
10	Uso o consumo di acqua ¹⁴
11	Effetti sociali (occupazionali o sulla soddisfazione della popolazione) ¹⁰
12	Costi di capitale, costi operativi e costo livellato ¹⁵

Sulla base di questi criteri, discuteremo brevemente le caratteristiche delle tecnologie che possono essere largamente utilizzate per la produzione di energia elettrica virtualmente senza emissioni di gas serra, e, successivamente quelle disponibili per la propulsione dei veicoli. Tali valutazioni saranno basate su dati della letteratura scientifica sull'argomento, che sono citati nella bibliografia.

6. *Limiti e problematiche delle tecnologie per la produzione di energia elettrica*

Nell'ottica di una totale decarbonizzazione della società, includendo la conversione di tutti i veicoli almeno terrestri a propulsione elettrica o a idrogeno elettrolitico, oltre a convertire interamente la produzione elettrica a tecnologie che non producano direttamente emissioni di gas serra, sarebbe necessario, aumentare molto la produzione totale di energia elettrica, di un fattore che potrebbe essere fino a 4¹⁶. Tra le molte tecnologie ipotizzabili, quelle che sono di fatto oggi disponibili (TRL $\geq$ 9) e largamente utilizzabili sono: la fissione nucleare, l'idroelettrico, il fotovoltaico, l'eolico e l'utilizzo delle biomasse.

6.1. *La fissione nucleare*

La tecnologia nucleare oggi largamente utilizzata per la produzione di energia elettrica è quella cosiddetta "a neutroni lenti", applicata sin

dagli anni Cinquanta del XX secolo e che oggi è realizzata con più di 400 reattori nel mondo. È certamente una tecnologia matura (TRL 11 secondo IEA) ma trova il suo principale limite nei potenziali enormi rischi di emissioni di materiale radioattivo in caso di incidente, e, direi soprattutto, nella preoccupazione che tali rischi generano nella popolazione. Tutta la filiera tecnologica è critica dal punto di vista degli effetti sulla salute umana, essendo basata comunque sull'estrazione e sulla lavorazione di minerali radioattivi a base di uranio, sulla produzione e il trasporto del combustibile nucleare radioattivo, di rifiuti radioattivi (l'uranio impoverito) e di scorie fortemente radioattive (combustibile nucleare esausto). A favore di questa tecnologia vanno costi operativi piuttosto bassi a fronte di costi di capitale moderatamente alti a parità di potenza installata, la continuità con il conseguente ruolo stabilizzante per la rete, la limitata occupazione del territorio.

I vantaggi della tecnologia di fissione nucleare a neutroni veloci, già utilizzata ma molto limitatamente e ancora in sviluppo (TRL 10 secondo IEA) si basano essenzialmente sul fatto che si evita il processo di arricchimento isotopico e si ha un maggiore consumo del combustibile nucleare, con una forte riduzione della produzione di rifiuti radioattivi.

6.2. *L'idroelettrico*

Anche l'idroelettrico è una tecnologia largamente sperimentata e stabile da oltre un secolo (TRL 11), dotata di discreta continuità e prevedibilità, benché possa essere influenzata negativamente da fenomeni di siccità o dalla discontinuità nella portata dei corsi d'acqua utilizzati. I costi di capitale sono piuttosto elevati ma i costi operativi sono molto bassi. Fra i limiti dell'idroelettrico notiamo che è una tecnologia limitata dalla natura, necessariamente montuosa o almeno collinare, del territorio, e dalla forte occupazione e limitazione dell'uso del territorio stesso, benché l'impatto sul valore estetico del territorio possa spesso essere considerato positivo (molti laghi artificiali hanno notevole valore turistico). Questa tecnologia è anche associata all'utilizzo di grandi quantità d'acqua, e a un notevole consumo di materiali essendo basata su strutture di dimensioni spesso gigantesche. Va comunque notato che tale tecnologia è già ampiamente sfruttata in molte nazioni (in particolare in Italia) ed è perciò quasi satura, non essendovi molti corsi d'acqua adatti ancora da utilizzare, per lo meno per impianti di grandi dimensioni.

6.3. *Il fotovoltaico*

La tecnologia fotovoltaica oggi disponibile commercialmente (TRL 9) è quella basata sul silicio, monocristallino o policristallino. Il silicio è l'elemento più diffuso sulla crosta terrestre dopo l'ossigeno, in forma di minerali a base di diossido o di silicato. Per ottenere però l'effetto fotovoltaico è necessario silicio elementare cristallino iperpuro (al 99.99999%), un processo estremamente energivoro, oggi realizzato principalmente in Cina¹⁷. Si opera la riduzione delle sabbie silicee con carbone in forni elettrotermici a 2.050 °C, e complessi processi di raffinazione realizzati convertendo il silicio impuro a triclorosilano con acido cloridrico ad alta pressione, distillandolo, condensandolo e decomponendolo a 1.200 °C in presenza di idrogeno, per poi cristallizzare il silicio amorfo. Per il silicio monocristallino, si aggiunge lo stadio di crescita dei cristalli, realizzato alla sua temperatura di fusione, a 1.414 °C, con un ulteriore significativo aumento di consumi¹⁸. Il risultato di tutto ciò è che la produzione del silicio grado solare è tra i processi più energivori dell'industria¹⁹, con un consumo di energia elettrica di oltre 200 kWh/Kg_{Si}, un consumo di carbone di 27 Kg_C/Kg_{Si}, e notevoli emissioni di CO₂: 84 Kg_{CO2}/Kg_{Si}²⁰. A seconda del tipo di silicio utilizzato e del luogo dove viene utilizzato, un pannello fotovoltaico impegna i primi 2-8 anni di utilizzo a produrre l'energia che è stata consumata per produrlo^{21, 22}. Tenendo conto che il tempo di vita dei pannelli solari è dato nell'intervallo 20-30 anni, con una garanzia comunemente di 25 anni, il 10-30 % dell'energia che un pannello può produrre nella sua vita è stata già consumata nella sua costruzione. Nonostante ciò, il costo del silicio di grado solare non è particolarmente elevato (meno di 10 €/kg), ma costituisce solo una parte del costo del singolo modulo²³, che necessita anche di quantità significative di acciaio, rame, argento e alluminio, vetri speciali, adesivi ecc. D'altra parte, il costo del pannello rappresenta all'incirca solo il 35-50% del costo dell'intero impianto, che cresce notevolmente se viene dotato di un sistema di accumulo dell'energia con batterie al litio.

Il risultato è che il costo di capitale del fotovoltaico è piuttosto alto: secondo alcuni autori la tecnologia fotovoltaica a silicio policristallino è in assoluto quella dotata largamente dei maggiori costi di capitale a parità di potenza installata: oltre 4,500 \$/kW¹⁵ per centrali termiche (circa il triplo dei costi delle centrali attuali a gas naturale a ciclo combi-

nato), che corrisponde bene al fatto che in Italia il costo di un impianto a tetto da 3 kW con accumulo costi tra i 13.000 e i 18.000 €. Benché i costi operativi siano piuttosto bassi, i costi di manutenzione (ad esempio pulizia frequente dei pannelli necessaria per mantenere una buona efficienza, che consuma una notevole quantità d'acqua, e verifiche elettriche per limitare il non trascurabile rischio di incendi²⁴) non sono trascurabili, in particolare per il fotovoltaico "a tetto". Il risultato è che il costo livellato attuale delle tecnologie fotovoltaiche, pur fortemente diminuito negli anni²⁵, e previsto ancora in riduzione, è comunque oggi comparabile o più alto rispetto a quello delle tecnologie fossili²⁶. Al di là dei dati numerici, è comunque importante notare che le energie rinnovabili non sono a costo zero (come alcuni sembrano pensare), in quanto la trasformazione delle energie naturali (l'energia radiante del sole in questo caso) in energia elettrica implica apparecchiature costose e tempi di vita delle stesse piuttosto limitati.

Lo sviluppo e la commercializzazione (ancora non raggiunta) di nuovi e alternativi materiali fotovoltaici, come le cosiddette perovskiti di Sn e Pb, o i materiali fotovoltaici organici, potrebbe ridurre i costi energetici, e quelli economici, della tecnologia fotovoltaica. Per ora anche il riciclo del silicio "solar grade" dai pannelli fuori uso è quasi inesistente.

Tra le altre problematiche del fotovoltaico c'è la sua discontinuità giorno/notte, che destabilizza fortemente le reti elettriche e implica l'adozione di costosi sistemi di accumulo energetico, la sua imprevedibilità rispetto ai fenomeni climatici, la dipendenza geografica della sua efficienza, ben superiore nelle zone tropicali dove l'irraggiamento è forte, e minima nelle polari. In zone temperate come l'Italia, dove nel periodo invernale normalmente sono più presenti perturbazioni e annuvolamenti, il rendimento medio invernale del fotovoltaico circa 1/3 di quello estivo, ed è del 35-50 % maggiore mediamente al sud rispetto al nord²⁷.

Praticamente il fotovoltaico si può realizzare "a terra" o "a tetto". È chiaro che il fotovoltaico a terra produce una forte occupazione di territorio o una forte limitazione del suo uso²⁸, ed è difficilmente compatibile con zone altamente popolate e antropizzate, come la maggior parte del territorio italiano. Se realizzato in zone non antropizzate, ha un significativo effetto negativo sulla fauna¹³, oltreché ovviamente sulla flora. Anche l'"agrivoltaico" implica con ogni evidenza una fortissima

limitazione dell'attività agricola e di allevamento. D'altra parte, il fotovoltaico "a tetto" ha fortissimi limiti, almeno nelle città storiche, dato che le superfici dei tetti sono in realtà ridotte rispetto alla densità di popolazione, e solo una minima frazione dei tetti ha una esposizione favorevole ad una alta efficienza del fotovoltaico, e non è utilizzato altrimenti. La superficie necessaria per produrre l'energia tipicamente consumata da una famiglia (30-50 m²) nel migliore dei casi in Italia è tra un terzo e la metà dell'area dell'appartamento medio familiare (ca. 100 m², nelle città), per cui mediamente un tetto di un condominio (se ben orientato e non utilizzato altrimenti) se coperto di pannelli fotovoltaici può produrre energia solo per due o tre famiglie o due o tre piani.

D'altra parte, il fotovoltaico a tetto può accoppiarsi meglio con attività che utilizzino strutture basse ad alta superficie come quelle di capannoni industriali, allevamenti, posteggi ecc²⁹. Però, per molte aziende abbastanza energivore, la superficie del tetto spesso è largamente insufficiente a produrre tramite il fotovoltaico l'energia elettrica consumata.

È per questo che il grande potenziale del fotovoltaico riguarda zone tropicali poco abitate e poco fertili, come si trovano nel Nord Africa. L'ipotesi di "utilizzo" di territori nordafricani per produrre energia elettrica per l'Europa³⁰ pone certamente grossi problemi di natura politica e implica anche l'utilizzo di tecnologie efficienti per il trasporto dell'energia per lunghe distanze.

Si deve anche notare che il riciclo del silicio "solar grade" e degli altri componenti dai pannelli non funzionanti non si realizza al momento in maniera significativa. Tali pannelli vanno accumulandosi e si prevede raggiungano quantità molto importanti di rifiuto fotovoltaico se non si realizzeranno praticamente processi di riciclo³¹.

6.4. *L'eolico*

Le tecnologie eoliche trovano la loro massima efficienza in presenza di venti forti e continui. Ciò le rende tecnologie molto efficienti in zone come il Mare del Nord e nel nord della Scozia. L'efficienza dell'eolico in zone abitualmente prive di forti venti, come l'Italia e i suoi mari, è invece notevolmente limitata e dotata di una forte discontinuità e aleatorietà climatica. Questa discontinuità ha un forte effetto negativo sulla stabilità delle reti. L'eolico trova anche limiti marcati nella sua rumorosità, che lo rende incompatibile con zone abitate, nella limitazione d'uso

del territorio (o del mare nel caso dell'eolico off-shore), nella riduzione di qualità estetica del territorio e nel grande consumo di materiali³² dovuto alle dimensioni delle strutture (basamenti di cemento e strutture di acciaio per l'eolico on-shore), materiali magnetici a base di terre rare, lubrificanti, materiali metallici conduttori, materiali compositi per le pale. È stato anche rilevato un notevole effetto negativo dell'eolico sulla vita dei volatili, a causa della loro collisione con le pale³³.

Anche in questo caso il costo di capitale è elevato, in particolare per gli impianti offshore in zone di mare profondo^{20, 34}. Anche in questo caso i costi livellati dell'energia sono oggi confrontabili con quelli delle tecnologie a base di materie prime fossili, e sono e saranno comunque non trascurabili anche nel futuro. L'elemento più debole della struttura degli impianti eolici sono le pale, costituite da compositi sofisticati di materie plastiche e materie vetrose. Le pale sono comunque soggette a erosione, e hanno una vita media valutata sui 20 anni. La dimensione a volte enorme delle turbine più potenti dà anche luogo a un certo rischio di gravi incidenti¹³. Anche di questi materiali si stanno accumulando rifiuti costituiti principalmente da pale consumate o rotte, visto che non sono ancora state sviluppate tecnologie per il loro recupero³⁵.

6.5. *Energia da biomasse*

Il legno viene usato da millenni come combustibile per il riscaldamento delle abitazioni e per alimentare le cucine. In realtà, questa "tecnologia" non è ottimale per la salute dell'uomo, perché il fumo di legna è altamente inquinante e tossico³⁶, contenendo molti composti organici volatili (COV), alcuni dei quali altamente tossici (ad esempio il benzene e le diossine), oltre a polveri di carbone incombusto.

Da molti secoli, per ottenere un combustibile solido la cui combustione sia più pulita, si può previamente ricorrere alla pirolisi del legno in ambiente povero di ossigeno, ottenendo la carbonella (oggi chiamata biochar). La carbonella brucia meglio del legno, avendo un contenuto in carbonio molto superiore, e avendo quindi un potere calorifico superiore, e produce un fumo più povero di COV. La carbonella veniva usata già qualche millennio fa come combustibile e anche come riducente nella produzione del ferro.

Recenti studi confermano l'effetto negativo sulla salute dell'uso domestico del legno come combustibile³⁷, ben peggiore dell'uso di com-

bustibili fossili ma “puliti”, come il gas naturale. Sono state però sviluppate tecnologie che consentono l’abbattimento degli inquinanti dal fumo di legna negli impianti di produzione di energia, come gli inceneritori di biomasse e rifiuti³⁸, che rappresentano una tecnologia commerciale per la produzione di energia (TRL 9). Anche per il riscaldamento domestico, le stufe catalitiche a convezione consentono la purificazione dei gas di scarico ed evitano il contatto diretto dell’uomo con il fumo.

Come detto, il limite principale di queste tecnologie sta nella disponibilità reale di biomasse, che è scarsa in molti luoghi, e comunque nella cura necessaria per non ridurre la quantità di massa vegetale vivente e la produzione di cibo.

Un altro modo di utilizzare le biomasse a scopo energetico è la produzione e l’utilizzo del biogas. Infatti, la fermentazione è un processo naturale di bio-decomposizione delle biomasse, che produce essenzialmente una miscela di metano e CO_2 , che viene appunto chiamato biogas. Esso si disperde naturalmente nell’atmosfera e contribuisce, nonostante la sua origine biologica, all’effetto serra. Ciò avviene ovunque in natura per trasformazione della biomassa morta e in particolare nelle discariche dove i rifiuti ricchi di biomasse vengono accumulati. Tale processo può venir opportunamente favorito e accelerato nei digestori anaerobici e anche gestendo opportunamente le stesse discariche, bagnando adeguatamente la discarica e isolandola, e, con opportuni impianti di cattura, i biogas possono venire raccolti e utilizzati. Il biogas dopo un semplice processo di purificazione, può essere bruciato producendo energia, o può venir separato producendo biometano³⁹, che può essere introdotto nella rete nazionale del gas e utilizzato come il gas naturale, per esempio per produrre idrogeno. Le tecnologie di trattamento e *upgrading* del biogas sono già disponibili commercialmente (TRL 9).

7. Le tecnologie dell’idrogeno

L’idrogeno può venire considerato il combustibile ideale perché la sua combustione di per sé produce solo energia e acqua senza produrre, in particolare, ossidi di carbonio. L’idrogeno (se prodotto senza coprodurre CO_2 di origine fossile) potrebbe anche risultare un utile intermedio per consumare o riciclare la CO_2 prodotta da altri processi o

catturata dall'aria stessa (riducendo quindi il cosiddetto eccesso di effetto serra) e le biomasse, consentendo la produzione di e-fuels e biocombustibili, o altri composti organici utili, e per sostituire il carbone come riducente nei processi metallurgici come la produzione dell'acciaio.

7.1. *La produzione dell'idrogeno "verde"*

Solo molto recentemente sono state trovate significative quantità di idrogeno elementare (H_2) in alcune formazioni geologiche, sulla terra, definito idrogeno "bianco". In realtà, comunque, l'idrogeno molecolare dovrà principalmente essere prodotto a partire da altre materie prime. Per questo l'idrogeno è un potenziale vettore energetico, più che una fonte di energia.

L'idrogeno si produce oggi essenzialmente a scopi chimici, da fonti fossili (soprattutto gas naturale nel mondo occidentale o carbone in Cina) producendo CO_2 come coprodotto, ma coproducendo anche energia (idrogeno "grigio" e "marrone"). Tali processi possono essere modificati, in linea di principio, separando e utilizzando o confinando la CO_2 (idrogeno "blu"). Il limite di questo approccio sta nella scarsa richiesta di utilizzo della CO_2 e nei limiti e nei costi del suo stoccaggio "definitivo".

Si realizza però già da oltre un secolo la produzione elettrolitica dell'idrogeno (detto idrogeno "verde") dall'acqua, senza coproduzione di CO_2 . Questo processo, estremamente oneroso per il suo notevolissimo consumo energetico, e quindi molto costoso anche quando viene realizzato tramite l'utilizzo di energie rinnovabili, viene oggi realizzato utilizzando energie principalmente non rinnovabili (la rete elettrica) laddove le quantità di idrogeno necessarie sono piccole e si preferisce evitare un processo complesso e lo stesso stoccaggio e trasporto dell'idrogeno, come in alcuni impianti metallurgici.

Sono oggi in corso di sviluppo progetti per realizzare su larga scala la produzione elettrolitica dell'idrogeno "verde" dall'acqua, usando energia rinnovabile⁴⁰. La tecnologia delle celle alcaline è sostanzialmente disponibile anche se non ancora ottimizzata per grandi scale (TRL 9) mentre tecnologie alternative, potenzialmente più efficienti, basate su celle a combustibile invertite (PEMEC e SOEC) sono già in avanzato stato di sviluppo (TRL 8-9).

Un fatto che viene oggi sostanzialmente trascurato, proprio in vista di una "decarbonizzazione" che esclude l'uso delle biomasse, è che le biomasse possono essere fonti di idrogeno rinnovabile, con diverse

tecnologie. In generale, dal momento che le biomasse sono sostanze organiche derivanti da un processo di riduzione chimica dell'anidride carbonica reso possibile dall'energia solare tramite la fotosintesi clorofilliana, consentono di produrre idrogeno con un consumo energetico molto minore rispetto alla sua produzione dall'acqua, che è una delle sostanze più stabili in assoluto. I processi però per produrre idrogeno da biomasse o sostanze da esse derivate sono piuttosto complessi. Si tratta del processo di gassificazione delle biomasse⁴¹, che incontra in realtà difficoltà tecnologiche notevoli (TRL 7-8), o quello di *steam reforming* del biometano, potenzialmente pronto essendo identico al processo che da un secolo si realizza con il gas naturale. Sono in studio e già piuttosto evolute diverse altre tecniche, come lo *steam reforming* del bioetanolo (TRL 8)⁴², ma resta la diffidenza per i processi che usano le biomasse in relazione (come già detto) alla probabile limitata disponibilità delle stesse per una gestione sicura della massa vegetale vivente.

7.2. Utilizzo dell'idrogeno

L'Idrogeno, come detto, produce energia "pulita" per reazione con l'ossigeno dell'aria, producendo acqua come prodotto. L'idrogeno può esser bruciato con aria. In questo caso, però, la combustione può produrre anche ossidi di azoto (NO_x) per la reazione dei gas dell'aria (azoto più ossigeno), che diventa significativa se la temperatura sale sopra i 1.000-1.200 °C. Può quindi essere necessario uno stadio di abbattimento di questi inquinanti, come d'altra parte realizzato anche oggi. Se si realizza in motori a combustione interna, simili a quelli attuali a benzina o diesel o in motori jet, la combustione dell'idrogeno produce ovviamente energia termica che viene convertita in energia meccanica per la propulsione di veicoli. Alternativamente, la combustione dell'idrogeno può essere realizzata per la produzione di energia elettrica con turbine a gas (ciclo semplice) o a gas e vapore (ciclo combinato)⁷.

L'utilizzo considerato più interessante dell'idrogeno è però quello del suo uso con le celle a combustibile (*fuel cells*), con una produzione diretta molto efficiente di energia elettrica e senza produzione di NO_x . Benché molte tecnologie siano state studiate e sviluppate negli ultimi oltre cento anni, le uniche celle a combustibile oggi commerciali e utilizzate per i veicoli a idrogeno (TRL 9) sono le cosiddette PEMFC (*Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cells*)⁴³. Una singola cella PEM

produce normalmente una tensione di circa 0.7 V e correnti comprese fra 300 e 800 mA/cm². Si producono quindi *stacks* di diverse decine o centinaia di celle collegate elettricamente in serie per ottenere voltaggio e potenza desiderate. Queste celle, di per sé molto efficienti nel convertire l'energia, hanno un principale difetto nella necessità di metalli nobili negli elettrodi. In particolare, utilizzano necessariamente il platino o il palladio, metalli estremamente costosi (costi oltre i 26 €/g per il Pt e oltre i 30 €/g per il Pd) e critici per la loro limitata disponibilità.

Resta comunque vero che la produzione elettrolitica dell'idrogeno "verde" è molto energivora e teoricamente può produrre solo la stessa quantità di energia (elettrica) che è stata consumata per produrlo, ma nella pratica se ne produce inevitabilmente di meno. L'uso dell'idrogeno "verde" per produrre energia elettrica ha quindi senso solo in situazioni molto particolari. L'uso dell'idrogeno verde ha però molto senso, in linea di principio, per alimentare veicoli a motore elettrico senza produrre inquinamento.

7.3. Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno

In realtà però l'uso dell'idrogeno trova limitazioni dovute alla sua bassissima densità energetica volumetrica, associata alla sua minima densità⁴⁴. Infatti, per poter stoccare o trasportare significative quantità di idrogeno è necessario liquefarlo a temperature bassissime (circa 20 K, -250 °C), oppure comprimerlo a pressioni elevate, di norma 700 bar. In entrambi i casi sono necessari serbatoi spessi e pesanti, il che rende inutile l'alta densità energetica gravimetrica dell'idrogeno. Nella pratica quindi la densità energetica delle tecnologie basate sull'idrogeno, pur ben superiore a quella delle tecnologie basate sulle batterie al litio (vedi oltre), è significativamente inferiore a quelle basate sui carburanti liquidi. Inoltre, sia la liquefazione sia la compressione dell'idrogeno consumano molta energia, che corrisponde al 30% o al 18% della sua stessa energia, per liquefazione e compressione a 700 bar, rispettivamente. Numerosi altri metodi di trasporto e di stoccaggio dell'idrogeno, usando l'assorbimento in leghe metalliche, l'adsorbimento in solidi microporosi e il trasporto tramite idrogenazione/deidrogenazione di liquidi, sono stati sviluppati e testati fino a stadio pilota (fino a TRL 6-8). Questi metodi consentono di trasportare a pari volume più idrogeno che il trasporto dell'idrogeno stesso (liquido o compresso), ma sono resi non

competitivi dalla spesa energetica degli stadi di carica dell'idrogeno e del recupero dello stesso, oltretutto del trasporto in senso opposto della fase deidrogenata. In realtà, per il trasporto dell'idrogeno per lunghe distanze, si sta considerando l'ipotesi di utilizzare i gasdotti oggi usati per il gas naturale. La cosa è possibile, ma bisogna tener conto che, data la minore densità energetica volumetrica dell'idrogeno rispetto al gas naturale, a pari pressione e portata l'idrogeno trasporta circa 1/4 dell'energia trasportata dal gas naturale, e che la compressione dell'idrogeno richiede un consumo molto maggiore di energia rispetto a quella del gas naturale⁴⁵. In conclusione, il trasporto dell'idrogeno è comunque molto inefficiente. L'uso dell'idrogeno verde (prodotto tramite energia elettrica con l'elettrolisi dell'acqua e utilizzato per produrre energia elettrica tramite le celle a combustibile) per trasportare energia può essere competitivo con il trasporto di energia elettrica tramite cavo solo laddove ci siano grossi problemi di utilizzo della rete elettrica⁴⁶.

8. *Limiti e problematiche delle tecnologie per i veicoli a zero emissioni*

Per valutare le tecnologie di propulsione dei veicoli è necessario considerare la densità energetica, volumetrica e gravimetrica, del sistema di propulsione. Come si può vedere nella figura 1 gli idrocarburi liquidi, siano essi i classici combustibili liquidi derivati dal petrolio, benzina o diesel, o analoghi prodotti derivati da biomasse (*biofuels*) o per idrogenazione della CO_2 con idrogeno verde (*e-fuels*), hanno una densità energetica enormemente più elevata delle batterie sia su base volumetrica sia su base gravimetrica. In altri termini, un sistema propulsivo convenzionale (serbatoio di carburante più motore a combustione interna) trasporta molta più energia rispetto al sistema degli autoveicoli elettrici (batteria più motore elettrico) sia a parità di volume che a parità di peso. Nella pratica, le batterie al litio, che pur sono le batterie dotate di maggior densità energetica, sono estremamente grosse e pesanti.

8.1. *Veicoli elettrici a batteria*

La tecnologia attuale è basata sulle batterie al litio, già ampiamente usata per l'alimentazione di elettrodomestici, personal computer,

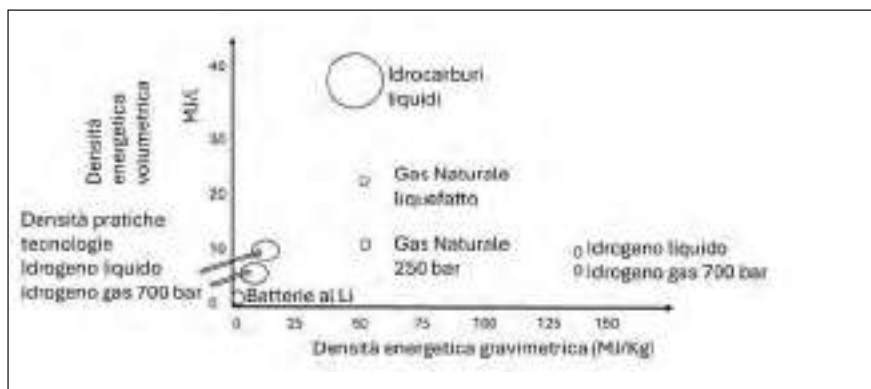


Figura 1. *Densità energetiche di sistemi di propulsione.*

smartphone. Questa tecnologia utilizza la capacità della grafite, come materiale elettrodico, di intercalare atomi di litio formalmente metallico nel corso della ricarica e di rilasciare ioni litio nella fase di scarica. D'altra parte questa famiglia di tecnologie utilizza per l'altro elettrodo composti inorganici, generalmente ossidi misti di Co, Ni, Mn e/o Fe, che possano incorporare ioni Li^+ in fase di scarica, e rilasciarlo in fase di carica con associata ossidazione di parte degli atomi del metallo di transizione. È anche necessario un elettrolita liquido o solido che sia in grado di trasportare lo ione Li^+ . Si tratta di dispositivi che hanno, relativamente ai più classici dispositivi o materiali per l'accumulazione di energia, densità energetiche molto basse: $< 0.002 \text{ MJ/l}$ e $< 0.001 \text{ MJ/kg}$ contro 38.7 MJ/l e 45.8 MJ/Kg per il carburante diesel. Tenendo conto che una singola cella produce un potenziale di poco superiore ai 3 V, ne sono necessarie parecchie (da un centinaio a diverse migliaia a seconda della dimensione delle batterie usate e della potenza necessaria del pacco batteria), gestite con opportuni sistemi di raffreddamento⁴⁷ e riscaldamento a freddo.

I più grossi limiti quindi di questa tecnologia sono, appunto, il notevole peso e volume dei pacchi delle batterie a parità di energia accumulata, rispetto ai volumi dei serbatoi di carburante delle automobili con motore a combustione interna. Nella pratica, i veicoli elettrici vengono caricati con il maggior numero possibile di celle elettrochimiche, per massimizzare l'autonomia. Di fatto, per non penalizzare l'abitabilità, si occupa con le batterie e il motore elettrico grosso modo lo stesso

volume occupato dal serbatoio di carburante e dal motore a combustione interna nelle auto convenzionali. Il risultato è che l'autonomia è men che dimezzata, generalmente nell'intervallo 150-500 km, e il peso aumentato del 30-50% rispetto alle auto convenzionali. L'aumento di peso riduce l'efficienza energetica (comunque molto elevata) delle batterie stesse e dei motori elettrici, e implica l'uso di pneumatici speciali, risultando comunque in un maggior consumo di pneumatici e sistemi frenanti, e quindi un certo effetto inquinante per l'elevata emissione di polveri da gomme e freni. Tutto ciò è aggravato dalla lentezza della ricarica, generalmente dell'ordine della mezz'ora per una ricarica parziale.

La propulsione elettrica a batteria è quindi adatta a veicoli che debbano realizzare viaggi brevi intervallati da soste prolungate o comunque gestibili con sequenze viaggio breve/sosta con ricarica, programmabili. Quindi è adatta per veicoli che, in relazione alla massa ridotta (e.g. < 30 ton) e alla necessità di autonomie limitate (e.g. <300 km) necessitino di basse potenze (e.g. < 200 kW)⁴⁸ come veicoli da città (motociclette o auto personali per uso cittadino), bus cittadini e furgoni per la consegna di merci in città, yacht, battelli e natanti di piccole dimensioni. Infatti, questi veicoli elettrici sono oggi disponibili commercialmente (TRL 9).

La bassa densità energetica delle batterie al litio non si adatta invece a veicoli che, a causa di masse elevate e/o necessità di autonomie significative, necessitino di alte potenze (e.g. > 200 kW), come grossi camion per il trasporto su scala internazionale, navi oceaniche e aerei di lunga percorrenza.

I veicoli elettrici sono anche soggetti a una particolare problematica di sicurezza relativa all'inflammabilità delle batterie dovuta alla reattività del litio ridotto e dell'intercalato litio-grafite verso ossigeno e acqua e anche all'inflammabilità dei solventi usati nell'elettrolita. Benché la combustione delle batterie non sia un fenomeno molto frequente, si verifica però periodicamente con esiti disastrosi, con la combustione dell'intera vettura o anche di molte vetture in depositi di veicoli elettrici, anche perché non è ancora stata identificata un'efficace procedura di spegnimento di tali incendi, né sono state emanate procedure di sicurezza a tale scopo.

Un altro difetto dei veicoli elettrici è la difficoltà di riparazione dei sistemi di batterie in caso di guasto. Le batterie infatti sono, come detto, costituite da moduli ciascuno composto da numerose celle elettrochi-

miche. Per esempio, una delle più piccole citycar elettriche, la Smart EQFORTWO⁴⁹ è equipaggiata con una batteria agli ioni di litio da 17,6 kWh per un'autonomia di soli 130 km, composta da tre moduli da 32 celle "a sacchetto" ciascuno, quindi 96 celle dello spessore di circa un centimetro della dimensione rettangolare di alcuni decimetri di lato. Invece le Tesla utilizzano batterie costituite da migliaia di celle cilindriche molto più piccole: nella Tesla mod. 3 long range il pacco batterie pesa 480 kg e ha le dimensioni di 2,18 m × 1,5 m × 0,33 m: è costituito da 4416 celle tipo 2170 (21 mm diametro, 70 mm di lunghezza⁵⁰) in quattro moduli, per un totale di 82 kWh e un'autonomia superiore ai 600 km. Se una singola cella ha dei difetti o malfunzionamenti, spesso si deve cambiare l'intero pacco batteria, che (se non fosse in garanzia, perché per esempio accidentato), costa quasi la metà dell'intera automobile.

La produzione delle batterie al litio ione implica anche l'utilizzo di grandi quantità di minerali critici, circa 5 volte rispetto ai veicoli convenzionali a combustione interna, quali quelli del litio stesso, la grafite stessa, il cobalto e il nickel. Questo problema si sta riducendo con l'uso già commerciale degli elettrodi al fosfato di ferro, privi quindi di nickel e cobalto. Sono in corso studi per la produzione di batterie basate su principi simili ma meno impattanti dal punto di vista dei materiali, benché ancora queste ricerche siano a livelli di sviluppo abbastanza lontani alla commercializzazione. D'altra parte, queste batterie alternative (per esempio quelle al sodio, se mai saranno competitive) risolverebbero solo uno dei diversi problemi delle batterie al litio.

Anche per le batterie, va notato che ancora non si realizzano in maniera significativa tecnologie che consentano il recupero dei materiali o degli elementi (in particolare il litio) dalle celle rotte⁵¹, le quali al momento si accumulano come rifiuto elettronico e pericoloso. L'Unione Europea ha comunque emanato normative per il loro corretto trattamento⁵².

8.2. *Veicoli a idrogeno*

Come detto, l'idrogeno "verde" è un possibile carburante per veicoli a zero emissioni. L'idrogeno può essere usato come carburante per motori a combustione interna e jet, oppure tramite le celle a combustibile PEM e motori elettrici. In entrambi i casi però si fanno i conti con il limite dovuto alla ridotta densità energetica dell'idrogeno e quindi una autonomia limitata, ma superiore a quella dei veicoli elettrici. L'uso

dell'idrogeno con motori a combustione interna per motociclette e automobili è una tecnologia quasi commerciale (realizzata per esempio da Yamaha e Toyota^{53, 54}, TRL 8-9), che riceve interesse anche di grandi marchi come la Ferrari che ha recentemente brevettato un nuovo tipo di motore a combustione interna a idrogeno⁵⁵.

La stessa Toyota sta anche producendo già da qualche anno un modello a idrogeno con celle a combustibile PEM (TRL 9), la Mirai. Questo veicolo ha due serbatoi per l'idrogeno compresso fino a 700 bar del volume totale di 142.2 litri, e un sistema di 330 celle PEM in serie che occupano 31 litri di volume e pesano 52 kg, con una potenza massima di 128 kW, un motore sincrono a magneti permanente e una batteria costituita da 84 celle al litio ione dal peso di 44.6 kg⁵⁶.

Oltre alla Toyota Mirai oggi in Italia è disponibile solo un altro modello di automobile a idrogeno e celle PEM, la Hyundai Nexa. In realtà la commercializzazione di veicoli a idrogeno è oggi paralizzata dalla quasi totale assenza di infrastrutture per la distribuzione di idrogeno.

Però, le tecnologie a idrogeno, celle PEM e motore elettrico sembrano essere quelle verso le quali si stanno orientando i costruttori di mezzi che necessitano di potenze elettriche piuttosto elevate (> 200 kW) come treni e autocarri per carichi pesanti⁴⁸. In questo caso si usano *stacks* di diverse centinaia di celle, utilizzati singoli, a coppie o multipli. Il camion a idrogeno Hyundai XCIENT utilizza due *stacks* da 120 kW costituiti ognuno da 480 celle⁵⁷. I più recenti camion GenH2 di Daimler Truck sono basati sul tradizionale camion a lungo raggio Mercedes-Benz Actros, e hanno un peso lordo di 40 tonnellate con un carico utile di 25 tonnellate. Essi sono dotati di un sistema di celle a combustibile da 300 kW (2×150 kW), e una batteria integrata in grado di fornire ulteriori 400 kW (per un lasso di tempo limitato). La capacità di accumulo della batteria è relativamente bassa (70 kWh), poiché il suo compito sussiste principalmente nel fornire supporto di potenza alla *fuel cell* in caso di necessità. I due serbatoi di idrogeno liquido in acciaio inossidabile del camion GenH2 hanno una capacità di stoccaggio di 44 kg ciascuno, che li rendono adatti per coprire distanze fino a 1000 km⁵⁸.

Un sistema di grande importanza in questi veicoli è quello necessario per il raffreddamento e riscaldamento delle celle che deve mantenere *fuel cell* e batteria alla temperatura di esercizio appropriata.

L'autonomia è limitata a causa del grande ingombro e peso del serbatoio a idrogeno cui si aggiunge il volume non piccolo delle celle PEM, ma è comunque superiore a quella dei comparabili veicoli elettrici a batteria. L'autonomia raggiungibile con veicoli a idrogeno non è comunque sufficiente per veicoli di grande peso e potenza, come le navi transoceaniche e gli aerei intercontinentali. In realtà si parla di navi e aerei a idrogeno, pensando non alla propulsione principale del mezzo (che resta a base di gasolio marino e kerosene) ma all'uso dell'idrogeno per produrre energia elettrica dei servizi in cabina, oppure ci si riferisce a veicoli molto piccoli per tragitti molto brevi.

9. *Biocarburanti ed e-fuels*

Come detto, per veicoli di enormi dimensioni e tragitti, come le navi oceaniche (ad oggi trainate da grandi motori Diesel⁵⁹) e gli aerei transcontinentali⁶⁰ (la cui propulsione è oggi prodotta da 2 o 4 motori Jet a kerosene), non sono pensabili né la trazione elettrica né quella a idrogeno. L'unica soluzione per la “defossilizzazione” è l'uso di biocarburanti o di *e-fuels*, cioè carburanti liquidi tipo gasolio o kerosene ma realizzati con materie prime rinnovabili (biomasse o CO₂ atmosferica e idrogeno rinnovabile), senza modificare il sistema di propulsione.

I cosiddetti biocarburanti di prima generazione sono già largamente prodotti e utilizzati (TRL $\geq$ 9): essi sono il bioetanolo usato come additivo delle benzine e il bioDiesel per i motori Diesel, che oggi in Europa possono essere additivati ai corrispondenti carburanti fossili in ragione di non più del 10% e del 7% rispettivamente. Sono già disponibili oggi dei biocarburanti più evoluti detti HVO⁶¹ (*Hydrogenated Vegetable Oils*, olii vegetali idrogenati) disponibili nella versione Diesel per auto, camion e navi, e nella versione kerosene, per gli aerei Jet. In questo secondo caso vengono anche indicati come SAF (*Sustainable Aviation Fuel*, carburante aereo sostenibile). Si ottengono da olii vegetali possibilmente non edibili (olio di frittura esausto o olii non alimentari come quelli di ricino e di jatropha) per idrodeossigenazione catalitica. Se il processo è realizzato con idrogeno verde sono dei materiali completamente rinnovabili. Per ora questi idrocarburi liquidi analoghi ai carburanti fossili si miscelano con gli stessi, ma in linea di principio si possono usare puri,

essendone sostanzialmente identici. Sono certamente molto più costosi e la loro produzione è certamente per ora limitata dalla disponibilità di materie prime per produrli. Nel futuro si pensa di poter utilizzare materie prime di origine algale o derivate dalla fertilizzazione di zone aride o desertiche.

Oltre agli HVO, utili per produrre carburanti tipo gasolio e tipo kerosene, in realtà è possibile produrre con tecniche diverse anche bio-benzine⁶². In realtà, una volta che fosse stabilita la liceità dell'uso delle biomasse nell'ottica della defossilizzazione dell'aviazione e dello shipping, tornerebbe ragionevole non escludere l'uso delle stesse anche per i veicoli a combustione interna di dimensioni minori, come le auto e i camion per lunghi percorsi, senza quindi escludere l'uso di motori termici.

Gli *e-fuels* sono combustibili rinnovabili alternativi, prodotti da idrogeno verde e molecole di origine non fossile come azoto e CO₂, con processi che sono anche chiamati "power-to-liquids", perché di fatto convertono energia elettrica (con cui si produce l'idrogeno verde) in carburanti liquidi. È possibile a partire da idrogeno e CO₂ produrre tutti gli idrocarburi, quindi e-metano, e-benzine, e-Diesel ed e-kerosene. I processi sono simili ad alcuni già usati a partire da ossidi di carbonio derivati da gassificazione del carbone, e sono quindi quasi pronti, con minime modifiche del catalizzatore e del processo⁶³. Gli e-fuel che paiono maggiormente interessanti oggi sono l'e-ammoniaca (prodotta da azoto atmosferico e idrogeno verde) e l'e-metanolo. In realtà, benché l'e-ammoniaca sia vista oggi con molto interesse, la forte tossicità dell'ammoniaca (che è un gas a pressione atmosferica e temperatura ambiente) viene forse trascurata. L'uso dell'e-metanolo, sostanzialmente un'ottima benzina, pare una soluzione ancor più interessante, ed è in fase di sperimentazione avanzata come carburante navale dalla Maersk⁶⁴. Anche il metanolo è tossico, ma essendo un liquido, la pericolosità è molto inferiore ed è gestibile più facilmente.

10. *La chimica, l'industria chimica e la transizione energetica*

Quanto sopra evidenzia come tutte le tecnologie che con ogni probabilità verranno più ampiamente utilizzate nel prossimo futuro per realizzare la transizione energetica ad oggi presentano difficoltà e criticità notevoli. È quindi necessario ottenere un netto miglioramento delle

stesse o individuare nuove tecnologie basate, in qualche caso, anche su principi radicalmente diversi e rivoluzionari.

I dati analizzati evidenziano anche che la chimica è la disciplina centrale (non potrebbe non esserlo) per lo sviluppo delle nuove tecnologie energetiche. Tra i vari rami della chimica da cui si attendono sviluppi decisivi certamente abbiamo l'elettrochimica, principalmente coinvolta nello sviluppo delle batterie (delle quali sarebbe necessario aumentare fortemente la densità energetica e la velocità di carica, oltretutto l'impatto sui materiali critici) e le celle a combustibile (di cui si dovrebbe soprattutto cercare di ridurre il costo eliminando la necessità dell'uso dei metalli nobili e aumentare il tempo di vita). Tali problematiche sono essenzialmente oggetto di ricerca nel settore della chimica (o scienza) dei materiali in quanto le prestazioni delle celle elettrochimiche dipendono in maniera pressoché esclusiva dai materiali che le compongono. Va anche detto che le tecnologie oggi utilizzabili e in via di sviluppo mostrano limiti quasi invalicabili, per cui sarebbe necessario individuare tecnologie "rivoluzionarie" basate su principi diversi.

Il reale utilizzo su larga scala delle celle a combustibile sarà però quasi totalmente dipendente dall'efficienza, invero di per sé bassa, relativa all'uso dell'idrogeno verde (elettrolitico), i cui costi energetici di produzione sono (e non possono non essere) molto grandi, e il cui trasporto e stoccaggio è (e non può non essere) significativamente inefficiente.

Un aspetto ben lontano dall'essere stato chiarito, e che verrà quindi determinato dagli ulteriori sviluppi della ricerca e delle tecnologie, è il potenziale uso delle biomasse nelle tecnologie energetiche. Infatti, l'uso delle biomasse consente, in linea di principio, la produzione di idrogeno e di biocombustibili e biocarburanti con costi energetici ben minori rispetto alle tecnologie che utilizzano idrogeno elettrolitico. L'aspetto centrale che consentirebbe l'ampio uso delle biomasse è la disponibilità di grandi quantità delle stesse senza limitare la massa di materia vegetale vivente, né la produzione agroalimentare. Ciò può avvenire sia da un uso opportuno e cauto delle foreste e dei rifiuti delle tecnologie agroalimentari, sia dalla fertilizzazione di territori aridi, sia dalla produzione di materiali vegetali come le microalghe. L'uso ottimale delle biomasse implica comunque anche l'ottimizzazione delle tecnologie chimiche, già parzialmente sviluppate allo scopo, o lo sviluppo di nuove.

Come detto, una delle criticità delle nuove tecnologie energetiche è l'assenza quasi totale di procedure tecniche per il recupero dei corrispondenti rifiuti. Si sta notando già ora l'accumulo di materiale di rifiuto dovuto ai pannelli solari dismessi, le pale eoliche danneggiate, le batterie non funzionanti. Tali rifiuti si sommano ai già ingenti rifiuti tecnologici non biodegradabili (in particolare quelli elettronici e plastici) che stiamo producendo. Dato anche il grande costo energetico che la produzione di tali oggetti ha, si tratta anche di un enorme spreco di energia. Indubbiamente uno dei punti fondamentali per una vera rivoluzione tecnologica sarebbe relativa all'obbligo di determinare con precisione per ogni oggetto messo sul mercato una tecnologia che consenta, una volta giunto al fine vita, il suo riuso o il recupero di materiale chimico da esso. Tali tecnologie, oggetto di molti studi ma non ancora realizzate su scala industriale, sono costose ma consentirebbero il recupero di materiali la cui produzione è molto costosa (ad esempio il silicio grado solare, come tale e quindi riutilizzabile). È chiaro che questo approccio, che ha aspetti meccanici (relativi allo smontaggio di apparecchiature complesse) e chimici, è veramente fondamentale per il futuro della nostra civiltà tecnologica.

Bibliografia

- [1] Rockström A., Gaffney O., Rogelj J., Meinshausen M., Nakicenovic N., Schellnhuber H.J. *A roadmap for rapid decarbonization. Emissions inevitably approach zero with a "carbon law"*. Science 2017;355:1269-1271.
- [2] Schneider T. *Ways to Defossilization*. MTZ Worldw 2021;82:14-15.
- [3] <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2022/07/eni-launches-first-production-vegetable-oil-biorefining-kenya.html>
- [4] Maliha A., Abu-Hijleh B. *A review on the current status and post-pandemic prospects of third-generation biofuels*. Energy Systems 2023;14:1185-1216.
- [5] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>
- [6] https://ec.europa.eu/isa2/sites/isa/files/technology_readiness_revisited_-_icegov2020.pdf
- [7] <https://www.iea.org/reports/innovation-gaps>
- [8] Hemeida M.G., Hemeida A.M., Senjyu T., Osheba D. *Renewable energy resources technologies and life cycle assessment: Review*. Energies 2022;15: 9417.

-
- [9] Wang S., Hausfather Z., Davis S., Lloyd J., Olson E.B., Liebermann L., Núñez-Mujica G.D., McBride J. *Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios*. Joule 2023;7:309-332.
- [10] Kis Z., Pandya N., Koppelaar R.H.E.M. *Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction*. Energy Policy 2018;120:144-157.
- [11] Lovering J., Swain M., Blomqvist L., Hernandez R.R. *Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape*. PLoS ONE 2022;17:e0270155.
- [12] Smith K.R., Frumkin H., Balakrishnan K., Butler C.D., Chafe Z.A., Fairlie I., Kinney P., Kjellstrom T., Mauzerall D.L., McKone T.E., McMichael A.J., Schneider M. *Energy and Human Health*. Annu. Rev. Public Health 2013;34:159-188.
- [13] Rahman A., Farrok, O., Haque M.M. *Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2022;161:112279.
- [14] Spang E.S., Moomaw W.R., Gallagher K.S., Kirshen P.H., Marks D.H. *The water consumption of energy production: an international comparison*. Environ. Res. Lett. 2014;9:105002.
- [15] Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. *The levelized cost of energy and modifications for use in electricity generation planning*. Energy Reports 2023;9:495-534.
- [16] Tamor M.A., Stechel E.B. *Electrification of transportation means a lot more than a lot more electric vehicles*. iScience 2022;25:104376.
- [17] Yang D., Liu J., Yang J., Ding N. *Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade*. J. Cleaner Prod. 2015;94:35-45.
- [18] Bye G., Ceccaroli B. *Solar grade silicon: Technology status and industrial trends*. Solar Energy Materials & Solar Cells 2014;130:634-646.
- [19] Maldonado S. *The Importance of New "Sand-to-Silicon" Processes for the Rapid Future Increase of Photovoltaics*. ACS Energy Lett. 2020;5:3628-3632.
- [20] Ma L., Yu Z., Ma W., Qing S., Wu J. *Assessment and Study on the Impact on Environment by Multi-crystalline Silicon Preparation by Metallurgical Route*. Silicon 2019;11:1383-1391.
- [21] Dai-Prá L.B. *Comparison between the Energy Required for Production of PV Module and the Output Energy Throughout the Product Life Time*. Journal of Energy and Power Engineering 2015;9:592-597.

-
- [22] <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>
- [23] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/utility-scale-pv-investment-cost-structure-by-component-and-by-commodity-breakdown>
- [24] <https://www.vigilfuoco.it/allegati/biblioteca/FotovoltaicoBassa.pdf>
- [25] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary.pdf?rev=-99943124d5804ae38da7a7a6661f2cc7
- [26] Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 16.0 <https://www.lazard.com/media/nltb551p/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>
- [27] <https://www.fotovoltaiconorditalia.it/idee/quanto-produce-impianto-fotovoltaico-3-kw-giorno>
- [28] van de Ven D.J., Capellan-Peréz I., Arto I., Cazcarro I., de Castro C., Patel P., Gonzalez-Eguino M. *The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy*. Scientific Reports 2021;11:2907.
- [29] Fakour H., Imani M., Lo S.L., Yuan, M.H., Chen C.K., Mobasser S., Muangthai I. *Evaluation of solar photovoltaic carport canopy with electric vehicle charging potential*. Scientific Reports 2023;13:2136.
- [30] <https://e360.yale.edu/features/africa-europe-solar-wind-power>
- [31] Seo, B., Kim J.Y., Chung J. *Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts*. Waste Management 2021;128:45-54.
- [32] Rueda-Bayona J.G., Cabello Eras J.J., Chaparro T.R., *Impacts generated by the materials used in offshore wind technology on Human Health, Natural Environment and Resources*. Energy 2022;261:125223.
- [33] Kumara H.N., Babu I S., Rao G.B., Mahato S., Bhattacharya M., Rao N.V.R., Tamiliniyan D., Parengal H., Deepak, D., Balakrishnan A., Bilaska M. *Responses of birds and mammals to long-established wind farms in India*. Scientific Reports 2022;12:1339.
- [34] <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs>
- [35] Liu P., Barlow C.Y. *Wind turbine blade waste in 2050*. Waste Management 2017;62:229-240.
- [36] Naeher L.P., Brauer M., Lipsett M., Zelikoff J.T., Simpson C.D., Koenig J.Q., Smith K.R. *Woodsmoke health effects: a review*. Inhal Toxicol. 2007;19:67-106.
- [37] Kim K.H., Jahan S.A., Kabir E. *A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels*. J. Hazard Mater. 2011;192:425-431.
- [38] Singh R., Shukl A. *A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass*, Renew. Sustain. Energy Rev. 2014;29:854-864.

- [39] Ardolino F., Cardamone G.F., Parrillo F., Arena U. *Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021;139:110588.
- [40] Zainal P.S., Ker P.J., Mohamed H., Ong H.C., Fattah I.M.R., Rahman S.R.A., Nghiem L.D., Mahlia T.M.I. *Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2024;189:113941.
- [41] Akbarian A., Andooz A., Kowsari E., Ramakrishna S., Asgari S., Cheshmeh Z.A. *Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy*. Bioresource Technology 2022;362:127774.
- [42] Chen W.H., Biswas P.P., Ong H.C., Hoang A.T., Nguyen T.B., Dong C.D. *A critical and systematic review of sustainable hydrogen production from ethanol/bioethanol: Steam reforming, partial oxidation, and autothermal reforming*. Fuel 2023;333:126526.
- [43] Bhaskar K., Solomon J., Sathyamurthy R., Anaimuthu S., Vinayagam N.K. *A review on PEM fuel cells used for automotive applications, models and hydrogen storage for hybrid electric fuel cell vehicle*. SAE Technical Paper 2020-01-5173, 2020.
- [44] Muhammed N.S., Gbadamosi A.O., Abdulrasheed A.A., Epelle E.I., Haq B., Patil S., Kamal D.A.S.M.S. *Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy*. J. Energy Storage 2023;73:109207.
- [45] Elberry A.M., Thakur J., Santasalo-Aarnio A., Larmi M. *Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems*. Int. J. Hydrogen Energy 2021;46:15671-15690.
- [46] Aba M.M., Sauer I.L., Amado N.B. *Comparative review of hydrogen and electricity as energy carriers for the energy transition*. Int. J. Hydrogen Energy 2024;57:660-678.
- [47] Maiorino A., Cilenti C., Petruzzello F., Aprea C. *A review on thermal management of battery packs for electric vehicles*. Appl. Thermal Engineering 2024;238:122035.
- [48] Cullen D.A., Neyerlin K.C., Ahluwalia R.K., Mukundan R., More K., Borup R., Weber A., Myers D., Kusoglu A. *New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation*. Nature Energy 2021;6:462-474.
- [49] <https://insideevs.it/features/703148/smart-eq-fortwo-come-e-fatta/>
- [50] <https://www.sicurauto.it/news/auto-elettriche-ibride/batterie-al-litio-tesla-cosa-cambia-tra-le-celle-1865-2170-e-4680/>; <https://www.automobile360.it/quante-celle-di-batterie-ci-sono-in-una-tesla-modelli-a-confronto/>

-
- [51] Duan X. Zhu W., Ruan Z., Xie M., Chen J., Ren X. *Recycling of lithium batteries. A review*. Energies 2022;15:1611.
- [52] <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20220228STO24218/new-eu-rules-for-more-sustainable-and-ethical-batteries>
- [53] <https://ultimatemotorcycling.com/2022/11/11/kawasaki-reveals-electric-and-hydrogen-powered-motorcycles/>
- [54] <https://driving.ca/auto-news/technology-news/yamaha-is-building-a-high-performance-hydrogen-v8-for-toyota>
- [55] <https://www.tomshw.it/automotive/lidrogeno-piace-anche-a-ferrari-non-solo-elettriche-in-futuro-2024-03-28>
- [56] Toyota Mirai MY23, Scheda Tecnica, disponibile su internet.
- [57] Pirasa M., De Bellisa V., Malfia E., Novella R., Lopez-Juarez M. *Adaptive ECMS based on speed forecasting for the control of a heavy-duty fuel cell vehicle for real-world driving*. Energy Conv. Manag. 2023;289:11717.
- [58] <https://hydrogen-news.it/daimler-truck-fornisce-la-prima-flotta-di-camion-a-idrogeno-genh2/>
- [59] Ronya Z.I., Mofijurc M., Hasana M.M., Rasula M.G. Jahirula M.I., Ahmede S.F., Kalamc M.A., Badrudding I.A., Yunus Khang T.M., Showb, P.L. *Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals*. Fuel 2023;338:127220.
- [60] Afonso F., Sohst M., Diogo C.M.A., Rodrigues S.S., Ferreira A., Ribeiro I., Marques R., Rego F.F.C., Sohoul A., Portugal-Pereira J., Policarpo H., Soares B., Ferreira B., Fernandes E.C., Lau F., Suleman A. *Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review*. Progress in Aerospace Sciences 2023;137:1008782.
- [61] Di Blasio G., Ianniello R., Beatrice C. *Hydrotreated vegetable oil as enabler for high-efficient and ultra-low emission vehicles in the view of 2030 targets*. Fuel 2022;310:122206.
- [62] Busca G. *Production of Gasolines and Monocyclic Aromatic Hydrocarbons: From Fossil Raw Materials to Green Processes*. Energies 2021;14:4061.
- [63] Busca G., Spennati E., Riani P., Garbarino G. *Mechanistic and compositional aspects of industrial catalysts for selective CO₂ hydrogenation processes*. Catalysts 2024;14:95.
- [64] <https://www.shippingitaly.it/2024/04/06/battezzata-astrid-maersk-seconda-nave-della-flotta-maersk-a-metanolo/>

L'industria chimica: ruolo nella produzione di benessere e di inquinamento ambientale, e nella futura defossilizzazione della società

L'industria chimica ha un ruolo dominante nel fornire prodotti chimici e materiali per le tecnologie che consentono il benessere nei paesi industrializzati. L'attività chimica ha spesso contribuito alla degradazione dell'ambiente, ma anche allo sviluppo delle tecnologie che consentono la protezione ambientale. Tuttavia, non ci si può nascondere che le principali tecnologie, che saranno probabilmente largamente applicate dopo l'attesa transizione tecnologica, presentano numerosi gravi inconvenienti, difficoltà e le criticità, ed è quindi necessario introdurre efficaci e radicali miglioramenti. In particolare, elettrochimica e scienza dei materiali hanno un ruolo centrale nello sviluppo di batterie e celle a combustibile più performanti, economiche e leggere, nonché di materiali fotovoltaici meno impattanti. È altresì necessario sviluppare tecnologie alternative per il rifornimento dei trasporti marittimi transoceanici e dell'aviazione transcontinentale, dove la propulsione elettrica a batterie e a idrogeno non è proponibile. È anche necessario sviluppare la produzione di biomasse senza competere con l'alimentazione e l'uso del suolo, anche favorendo la fertilizzazione di aree aride.

Parole chiave: scienza dei materiali; materiali elettrochimici; materiali fotovoltaici; idrogeno; efficienza; transizione energetica; produzione di rifiuti; impatto ambientale; biomasse.

The Chemical Industry: Role in the Production of Well-being and Environmental Pollution, and in the Future Society Defossilization

The chemical industry plays a dominant role in providing chemicals and materials for technologies that ensure well-being in industrialized countries. Chemical activity has often contributed to environmental degradation, but also to the development of technologies that allow for environmental protection. However, one cannot ignore the fact that the main technologies that are likely to be widely applied after the anticipated technological transition present numerous serious drawbacks, difficulties, and critical issues, and therefore it is necessary to introduce effective and radical improvements. In particular, electrochemistry and materials science have a central role in the development of more efficient, economical, and lightweight batteries and fuel cells, as well as less impactful photovoltaic materials. It is also necessary to develop alternative technologies for refueling transoceanic maritime transport and transcontinental aviation, where electric propulsion is not yet feasible. It is also necessary to develop biomass production without competing with food and land use, also promoting the fertilization of arid areas.

Keywords: materials science; electrochemical materials; photovoltaic materials; hydrogen; efficiency; energy transition; waste production; environmental impact; biomasses.

DANIELE CAVIGLIA

*Impiego opportunistico dei collegamenti radio a microonde
per il monitoraggio delle precipitazioni
e la mitigazione del rischio alluvionale*

Introduzione

Negli ultimi anni, numerosi studi hanno evidenziato un incremento sia nella frequenza che nell'intensità degli eventi meteorologici estremi. Il rapporto AR6 dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [1], sottolinea che, dal 1950 a oggi, oltre alle anomalie sulla temperatura, si è osservato un aumento nella frequenza e nell'intensità degli eventi di precipitazione intensa. Anche a livello nazionale, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha documentato variazioni significative negli estremi climatici in Italia, evidenziando un aumento degli eventi estremi di temperatura e precipitazione negli ultimi decenni [2].

Molteplici sono le implicazioni significative per l'ambiente e la società, di questa tendenza preoccupante verso un clima sempre più estremo. In particolare, le cosiddette alluvioni lampo (*flash-flood*) costituiscono uno dei pericoli principali per l'incolumità delle persone e delle cose, soprattutto nelle zone fortemente antropizzate, ma non solo.

In questo quadro si è sviluppata presso l'Università di Genova l'attività di ricerca che sarà presentata in questo lavoro, che ha avuto come fine primario quello di mettere a disposizione degli operatori del settore, *in primis* la Protezione Civile, una grande quantità di nuovi dati sulle precipitazioni, acquisiti in tempo reale, così da arricchire quanto viene ottenuto con le strumentazioni tradizionali, in modo che le decisioni operative da prendere durante gli eventi abbiano una più ampia e dettagliata base di conoscenza.



Figura 1. *Mappa di Genova: in rosso è evidenziato il confine del bacino del Fereggiano. In azzurro sono rappresentati i principali torrenti (rielaborata da <https://www.google.com/maps>).*

Lo spunto che ha fatto nascere l'idea base di questa ricerca è derivato dall'osservazione di quanto accadde a Genova il 4 novembre 2011 con l'alluvione del Fereggiano che provocò ingentissimi danni e sei vittime.

Un rapporto dell'ARPAL [3] descrive dettagliatamente l'evento. I dati principali indicano che il bacino del Fereggiano è molto piccolo (circa $4,5 \text{ km}^2$) e presenta una pendenza media del 10%. Si estende tra una quota di circa 550 m e il fondovalle, distante solo 5 km. Questo comporta un tempo di corrvazione molto breve, tra i 10 e i 15 minuti. In altre parole, una goccia d'acqua caduta nella parte superiore del bacino raggiunge il fondo in pochissimo tempo. Ciò rende il bacino estremamente rapido e pericoloso, specialmente in occasione di nubifragi intensi.

Nella mappa di figura 1 si può notare il bacino del Fereggiano evidenziato in rosso: se ne può intuire la vulnerabilità, soprattutto tenendo conto del fatto che la parte terminale, prima di confluire nel torrente Bisagno è tombata. Si può anche rilevare che il bacino in questione confina con quello del torrente Sturla: tuttavia durante l'evento del 4 novembre 2011 l'intensità della pioggia è stata localizzata, colpendo

maggiormente il Fereggiano rispetto allo Sturla. Questo esempio dimostra come una pioggia intensa e localizzata possa provocare danni in aree specifiche, lasciandone altre vicine relativamente intatte.

Il monitoraggio delle precipitazioni

La mappa della pioggia ricostruita dall'ARPAL (figura 2) evidenzia come la zona di Genova sia stata colpita con particolare intensità [3]. Come si può osservare dal confronto tra le figure 1 e 2, la definizione spaziale della mappa pluviometrica risulta limitata, essendo dell'ordine di chilometri o decine di chilometri, non sufficienti per descrivere con precisione la realtà locale. Questo deriva dal fatto che le stazioni della rete pluviometrica della Regione Liguria (circa 230) sono disposte per lo più a distanze di svariati chilometri l'una dall'altra [4]. Anche nella zona di Genova, dove la densità delle stazioni è maggiore, le distanze tra i pluviometri restano significative, con conseguente sparsità dei dati rispetto alle caratteristiche molto accidentate del territorio.

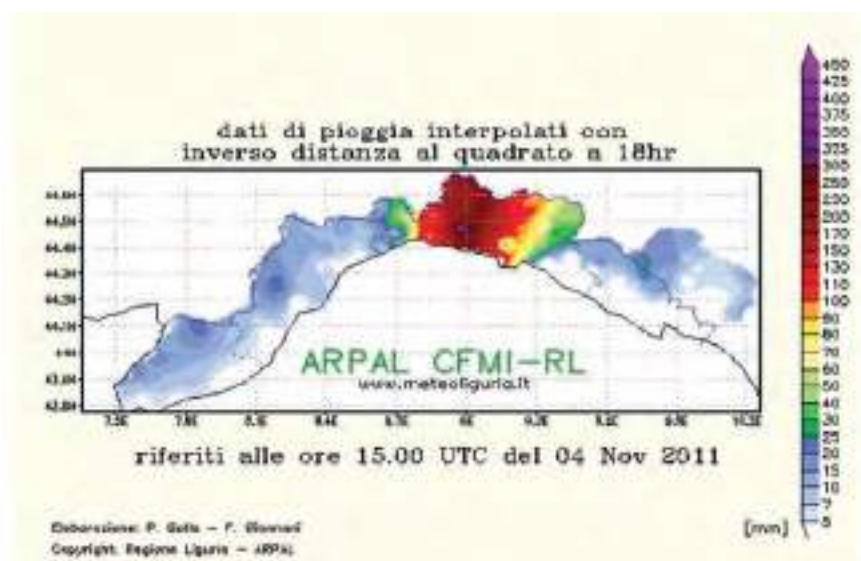


Figura 2. Piogge cumulate dalle 21 UTC del 3/11/2011 alle 15 UTC del 4/11/2011 (18 ore) – Fonte ARPAL (da [3], fig. 15).

Oltre ai pluviometri, un altro strumento utilizzato per il monitoraggio delle precipitazioni è il radar meteorologico. Questo sistema, che sfrutta il fenomeno della retrodiffusione (*backscattering*) delle onde elettromagnetiche, permette di stimare l'intensità della pioggia. Tuttavia, un radar meteorologico è molto costoso, con un prezzo di installazione di diversi milioni di euro, e un costo di conduzione e di manutenzione significativo.

In Italia la rete radar meteorologica è composta da 24 stazioni [5]: ciascun radar opera in banda C (intorno ai 5 GHz) ed effettua la copertura del territorio tramite due movimenti di scansione del fascio a microonde: una scansione orizzontale di 360° e una verticale tipica di 20°-30° rispetto all'orizzonte; il corrispondente dato viene fornito ad intervalli di 5-10 minuti. Tuttavia, la risoluzione spaziale a lunghe distanze è limitata: un'angolazione di 1° a 100 km di distanza corrisponde a una copertura di diversi chilometri, ovvero con una definizione spesso insufficiente alla mappatura efficace di territori complessi come quello italiano. Inoltre, la copertura radar è spesso limitata dal profilo orografico, che ostacola il segnale radar in alcune aree. Per esempio, nelle zone coperte dal radar installato sul Monte Settepani (unico in Liguria) la vista radar è bloccata in alcune direzioni a causa delle montagne.

Smart Rainfall System: dalla necessità all'innovazione

La necessità di migliorare il monitoraggio delle precipitazioni nasce quindi dalla spinta a ricavare ulteriori dati, con una risoluzione spaziale e temporale più elevate rispetto a quelle ottenibili con gli strumenti tradizionali, necessari soprattutto per rilevare con la maggior precisione possibile fenomeni estremi come i nubifragi improvvisi.

Un modo per rispondere a questa sfida è nato dalla considerazione che la pioggia interferisce con la propagazione delle onde elettromagnetiche in genere, non solo di quelle prodotte dai radar meteorologici, ma anche, ad esempio, di quelle che trasportano il segnale televisivo satellitare abitualmente captato dalle antenne presenti capillarmente sui tetti delle case. Generalmente la banda utilizzata è la Ku, e in particolare in Europa viene utilizzato l'intervallo di frequenze tra 10.7 GHz e 12.75 GHz.

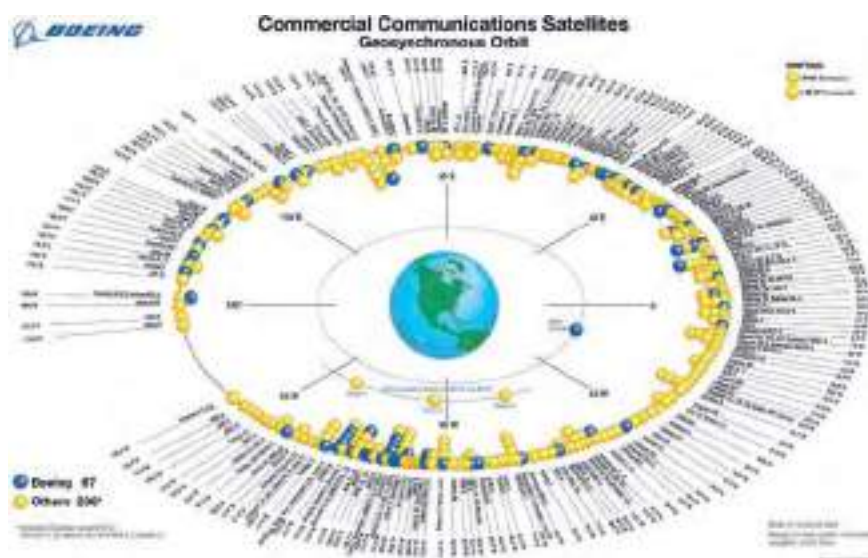


Figura 3. *Rappresentazione dei satelliti usati per la diffusione di programmi radiofonici e televisivi: in ciascuna posizione (indicata con l'angolo rispetto al sud) possono essere presenti più satelliti: si parla allora di “costellazioni”.*

I satelliti in questione sono collocati in orbita geostazionaria sull’equatore e appaiono fissi nel cielo a un osservatore presente sulla superficie terrestre. Si possono contare centinaia di satelliti usati per la trasmissione dei segnali radiofonici e televisivi, come si può vedere dalla figura 3.

L’attività di ricerca che ha poi portato alla definizione del sistema che verrà descritto nel seguito è iniziata quindi a fine 2011 e, dopo una fase di sperimentazione condotta presso il Dipartimento DITEN dell’Università di Genova ha consentito il deposito di un brevetto nel 2012 [6]. Lo sviluppo del progetto ha poi permesso nel 2014 di dar vita ad Artys, società spin-off dell’Università di Genova, oggi divisione di Darts Engineering srl, che ha trasformato l’idea iniziale in un prodotto che è stato denominato *SRS – Smart Rainfall System*.

Architettura e funzionamento dello “Smart Rainfall System”

Il sistema SRS sfrutta il segnale ricevuto dalle antenne presenti sulle parabole satellitari comunemente installate sui tetti delle abitazioni. Il

segnale televisivo a microonde trasmesso dai satelliti attraversa l'atmosfera e, in caso di cielo sereno, raggiunge la superficie terrestre con una potenza generalmente costante nel tempo (figura 4). In corrispondenza del punto di ricezione viene captato dalle due piccole antenne contenute nel *Low Noise Block* (LNB) presente sul braccetto della parabola (quest'ultima è in effetti solamente un riflettore). Viene trasferito in frequenza in banda L (da 950 MHz a 2150 MHz) e, tramite un cavo coassiale, portato solitamente al decoder che lo trasforma in un segnale (audio/video) fruibile dall'utente.

In caso di presenza di precipitazioni il fascio a microonde proveniente dal satellite subisce un'attenuazione tanto che, nel caso di precipitazioni molto intense, può succedere che la ricezione sia parzialmente o totalmente compromessa.

Smart Rainfall System (SRS) basa la propria efficacia sulla misura dell'intensità del segnale ricevuto. Al posto del decoder (o anche in parallelo ad esso) è collocato un circuito elettronico di misura che costituisce il sensore vero e proprio del sistema.



Figura 4. Nella figura è rappresentato il cosiddetto "footprint", ovvero la zona dove viene irradiato un particolare fascio a microonde dei satelliti Eutelsat Hot Bird 13° Est, con evidenziati, con vari livelli di colore, le aree a potenza ricevuta costante. La linea verde rappresenta il collegamento tra la stazione di terra (nell'esempio è indicata la posizione di Genova) e il satellite. Fonte: <https://www.satbeams-com/footprints>.

nel caso illustrato, per ogni punto di misura (rappresentati dai pallini blu) sono presenti due segmenti che indicano la direzione “di vista” di due satelliti diversi. A seconda dell’orografia e della posizione specifica è infatti possibile scegliere per ogni punto qual è la migliore combinazione al fine di ottenere la miglior copertura per il territorio considerato.

Struttura del sensore

Il sensore è costituito da due parti la prima delle quali è il *Low Noise Block* (LNB) già citato, di produzione commerciale e disponibile a basso costo sul mercato dei componenti per la TV satellitare, e la seconda è il circuito elettronico di misura dell’intensità del segnale proveniente dal cavo discendente dall’LNB e che provvede inoltre alla trasmissione al server del valore della potenza rilevata.

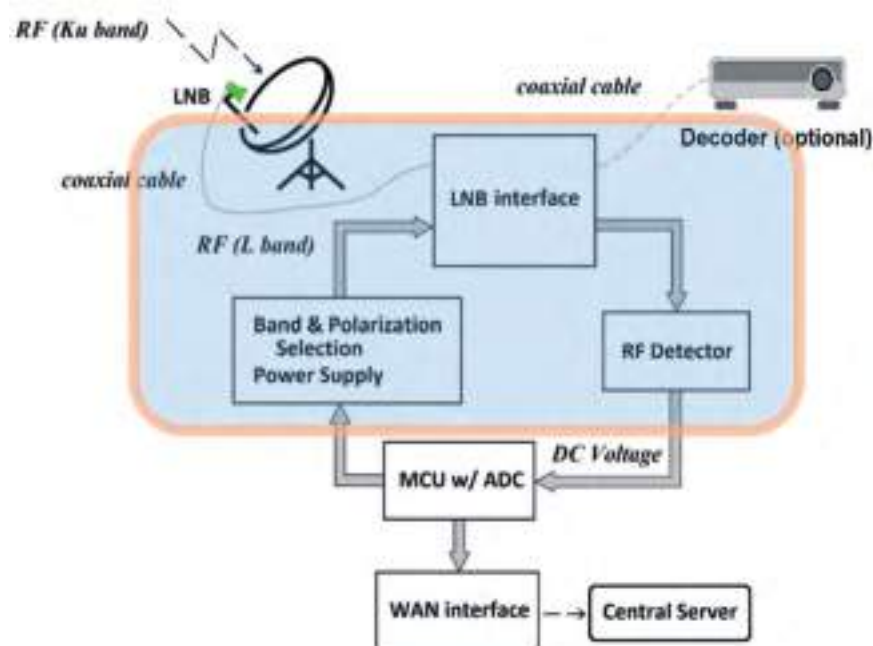


Figura 6. Schema a blocchi del sensore SRS. Nella cornice si trova il circuito di misura e all'esterno le interfacce: quelle principali sono verso l'antenna (tramite cavo coassiale) e verso il server centrale tramite una connessione WAN (Wide Area Network). Fonte: da [7], fig. 2.

Nello schema a blocchi di figura 6 sono rappresentate le parti principali: vi è infatti un'interfaccia a radiofrequenza tra il cavo proveniente dallo LNB e il sensore vero e proprio. Questo fornisce una tensione che viene letta dall'unità microcontrollore, che gestisce sia la successione delle misure (una al minuto), sia la composizione dei dati così ricavati in un pacchetto, sia l'invio del pacchetto al server centrale. Maggiori dettagli possono essere trovati in Colli et al. [7].

Per passare dalla potenza del segnale al valore della stima dell'intensità di precipitazione è necessario applicare un modello di attenuazione tenendo conto della geometria del sistema, illustrata in figura 7.

Il tratto rosso scuro rappresenta la proiezione a terra del segmento della retta che congiunge l'antenna al satellite, la cui lunghezza è determinata da due punti: uno corrisponde ovviamente alla posizione dell'antenna, l'altro all'intercetta tra il segmento di retta che congiunge antenna e satellite con la superficie posta alla quota di condensazione (c.d. zero termico) dove inizia la formazione delle gocce.

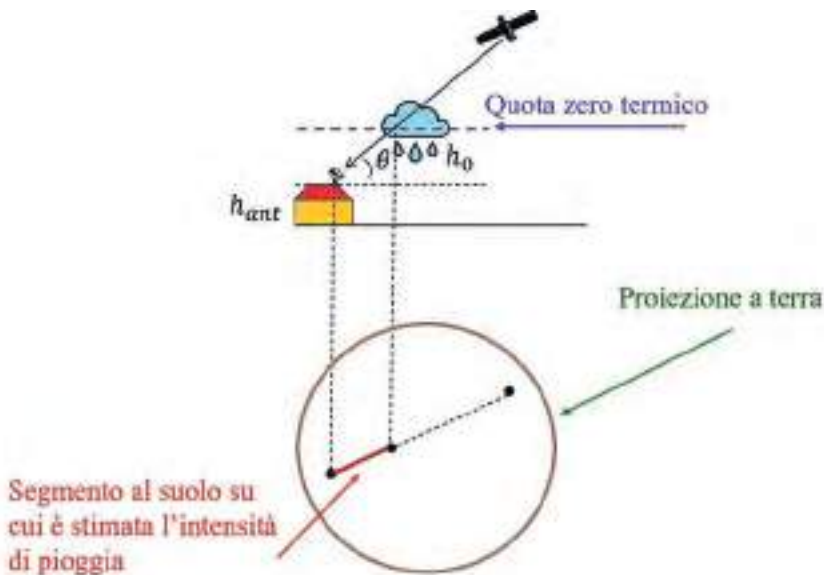


Figura 7. Rappresentazione schematica della propagazione del segnale a microonde attraverso la pioggia. L'angolo Θ rappresenta l'elevazione del satellite, l'altezza h_0 la quota di condensazione, e l'altezza h_{ant} la quota ove è posta l'antenna. Fonte: rielaborato da [7], fig. 1.

La lunghezza del percorso fino alla quota dello zero termico può essere calcolata in base alla conoscenza delle posizioni geografiche dell'antenna ricevente e del satellite, ossia,

$$l = \frac{h_0 - h_{ant}}{\sin \theta} \quad (1)$$

Infine, si ottiene il tasso di pioggia al di sotto del percorso così specificato tenendo conto che l'uscita del sensore è correlata al tasso di pioggia R dalla seguente relazione (derivata dal modello ITU [8])

$$v(t) = v_0 e^{-blR(t)^a} \quad (2)$$

Dove

- v_0 è il valore della linea di base (ovvero, l'uscita in assenza di pioggia)
- a e b sono due parametri del modello ITU, che dipendono dalla posizione geografica dell'antenna ricevente e dalla polarizzazione delle onde elettromagnetiche
- l è la sezione del percorso che collega il satellite alla stazione ricevente che si trova tra questa e l'isoterma a 0°C .

Invertendo tale relazione si ottiene

$$R(t) = \left[\frac{1}{bl} \ln \left(\frac{v_0}{v(t)} \right) \right]^{1/a} \quad (3)$$

Nella figura 8 è rappresentato un esempio di un caso reale: vi sono confrontati il valore di tensione rilevato dal sensore e proporzionale alla potenza del segnale satellitare rilevato, espresso in dBm, rappresentato dalla linea verde, la stima della precipitazione ricavata dall'eq. 3, (linea azzurra) e la pioggia cumulata sui 30 minuti precedenti rilevata da un pluviometro tradizionale posto sulla linea di proiezione a terra del fascio a microonde. L'intervallo di misura è di 7 ore e 30 minuti. È da notare che la misura viene effettuata dal sensore SRS come media sul minuto di 60 misurazioni fatte con cadenza di un secondo. Ciò giustifica, rispetto alle dinamiche dei fenomeni atmosferici, la classificazione del sistema come operante “*in tempo reale*”.

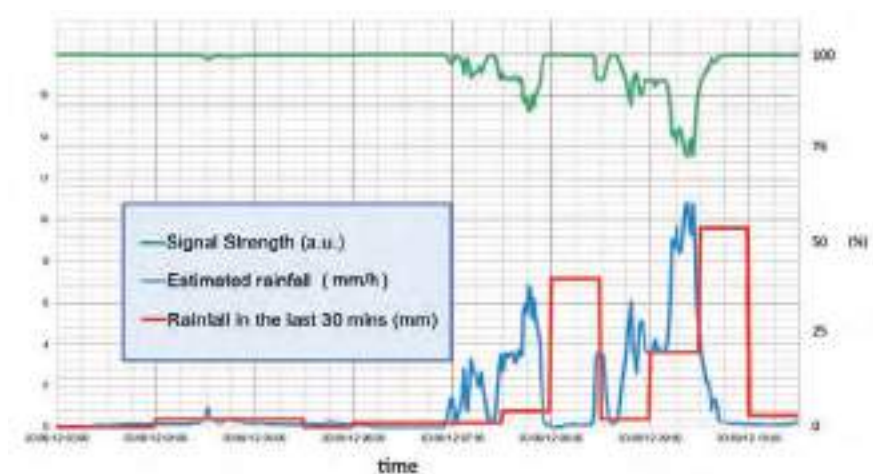


Figura 8. Confronto tra il valore di potenza del segnale satellitare rilevato in caso di pioggia (linea verde - scala a destra in percentuale del massimo), la stima della precipitazione (linea azzurra - asse a sinistra in mm/h) e la pioggia cumulata su 30 minuti rilevata da un pluviometro tradizionale posto sulla linea di proiezione a terra del fascio (asse a sinistra, in mm). L'intervallo di misura è di 7 ore e 30 minuti.

Avendo a disposizione dati di questo tipo provenienti da una rete di sensori della tipologia illustrata nella figura 5 è possibile ricavare mappe pluviometriche simili a quelle ottenibili con i radar, ma dotate di una maggior definizione spaziale e temporale. È da rilevare come l'applicazione di tecniche di *Machine learning* [9, 10] consenta di ottenere risultati robusti ed affidabili.

Risultati della sperimentazione del sistema di allertamento

Un esempio è mostrato nella figura 9 e si riferisce alla rete dispiegata nel bacino del torrente Polcevera, grazie a un progetto della Città Metropolitana di Genova [11]. Essa si riferisce al 22 gennaio 2021 ed è stata rilevata alle ore 16, quando ha avuto inizio in quella zona un evento pluviometrico significativo che ha raggiunto valori di precipitazione piuttosto intensi tra le 17 e le 18.30, con la conseguenza del verificarsi di un allagamento sulla Strada Provinciale 35 nei pressi dell'attraversamento ferroviario.

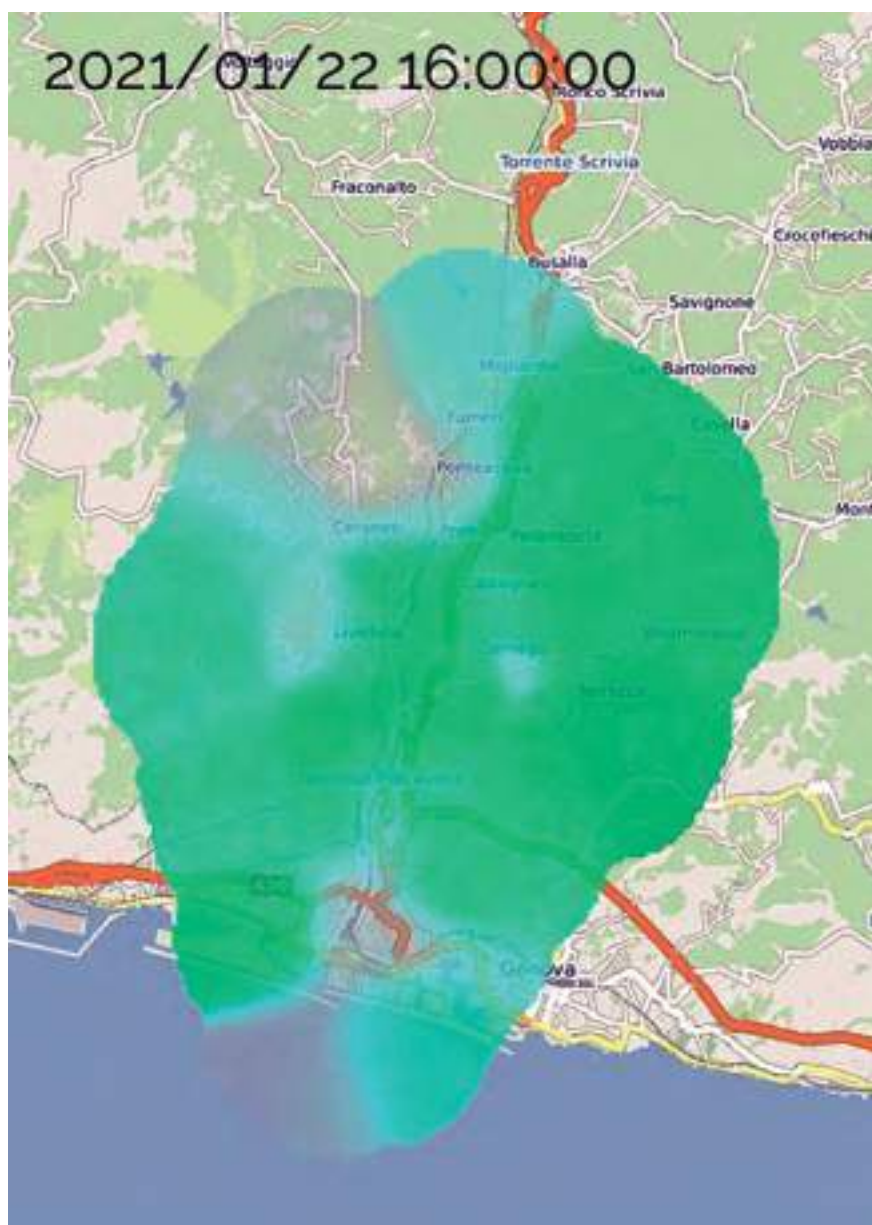


Figura 9. *Mapa pluviometrica ricavata dal sistema SRS sulla base dei dati delle stazioni presenti nel bacino del torrente Polcevera alle ore 16 del 22 gennaio 2021. L'intensità del colore corrisponde alla intensità di precipitazione. Per gentile concessione di Artys, una divisione di Darts Engineering.*

La descrizione dell'evento è particolarmente interessante perché illustra le potenzialità del sistema.

È innanzitutto da considerare che oltre ai dati pluviometrici in tempo reale è necessario tener conto di altri fattori. Ad esempio, un dato importantissimo è la quantità di pioggia caduta nei giorni precedenti: infatti, a seconda che il terreno sia secco o già imbevuto d'acqua, la risposta del bacino può essere molto differente. Il sistema prende quindi in considerazione quanti più dati possibile, inclusi i dati storici e le indicazioni contenute nel Piano di gestione del rischio alluvionale (P.G.R.A.) della Regione Liguria.

Nella figura 10 è esemplificato quanto accaduto in quel giorno: la mappa sulla sinistra rappresenta l'intensità di precipitazione sul bacino della Valpolcevera rilevata alle 18.30. La barra laterale illustra il codice colore dell'intensità e da un'osservazione della mappa si possono notare punti corrispondenti a valori tra 60 e 80 mm/h. In quel momento, le piogge erano particolarmente intense nel centro della città e nella bassa Valpolcevera, ma non tali da generare un immediato pericolo di alluvione. La parte destra della figura si riferisce alla zona indicata dal cerchietto rosso nella mappa di sinistra. In essa la zona celeste della



Figura 10. Bacino del torrente Polcevera: nel riquadro di sinistra è riportata la mappa di intensità di pioggia rilevata alle 18.30; nel riquadro in basso al centro sono rappresentate le barre dinamiche delle piogge cumulate a vari intervalli temporali, nella mappa grande sono riportate le fasce di esondabilità secondo il P.G.R.A. Nel riquadro in basso a destra è rappresentata una fotografia del voltino della ferrovia (identificato sulla mappa dal cerchietto rosso) scattata alle ore 19.03. Per gentile concessione di Artys, una divisione di Darts Engineering.

mappa di destra evidenzia la perimetrazione della massima area allagabile, definita dal P.G.R.A., mentre un cerchio rosso indica la posizione del voltino della ferrovia nella zona critica del quartiere di San Quirico. Il riquadro in basso al centro della figura illustra gli istogrammi delle precipitazioni cumulate su durate di 15, 30, 60 e 120 minuti, riferiti alla cella di calcolo contenente la fascia di esondazione.

Alle 18.30, gli istogrammi hanno mostrato il superamento della prima soglia pluviometrica per la durata di 120 minuti. Questo ha portato all'attivazione della fascia di esondazione del P.G.R.A. con tempo di ritorno di 50 anni, rappresentata in giallo sulla mappa.

Successivamente, alle 19.03, è stato documentato un allagamento presso l'attraversamento ferroviario sulla Strada Provinciale, situato all'interno dell'area critica segnalata (riquadro in basso a destra). Questo caso rappresenta un esempio di successo del *now-casting* del rischio di alluvione basato sulle misure in tempo reale fornite dal sistema SRS.

Conclusioni

Il sistema *Smart Rainfall System* rappresenta un importante avanzamento tecnologico nella gestione del rischio idrogeologico, dimostrando come soluzioni innovative possano essere sviluppate a partire da tecnologie esistenti, come le antenne satellitari domestiche.

Grazie alla sua capacità di fornire dati pluviometrici in tempo reale con un'elevata risoluzione spaziale e temporale, SRS ha il potenziale per integrare e, in alcuni casi, superare i limiti delle tradizionali reti di monitoraggio pluviometrico e radar meteorologico [12].

I risultati sperimentali ottenuti nel bacino del torrente Polcevera evidenziano l'efficacia del sistema nel supportare le decisioni operative in condizioni critiche, riducendo i tempi di reazione e migliorando l'accuratezza delle previsioni. Inoltre, la semplicità di installazione e i costi contenuti rendono il sistema facilmente scalabile anche a livello nazionale e internazionale.

In un contesto climatico in evoluzione, tecnologie come quelle illustrate in questo lavoro possono giocare un ruolo chiave nella mitigazione dei rischi associati agli eventi meteorologici estremi, contribuendo a una gestione più sostenibile e resiliente del territorio.

Bibliografia

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- [2] <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/cambiamenti-climatici/eventi-estremi>
- [3] *Genova. 4-9 novembre 2011. Rapporto di evento meteo-idrologico*. Quaderni ARPAL, 2, 2012.
- [4] OMIRL - Osservatorio Meteo Idrologico della Regione Liguria, <https://omirl.regione.liguria.it/#/map>
- [5] Dipartimento della Protezione Civile. *La rete radar meteorologica nazionale*. <https://tinyurl.com/2kuhcjv6>
- [6] Federici B., Gragnani G., Parodi G., Randazzo A., Caviglia D., Pastorino M., Sguerso D., Caridi A., Montecucco C. *Sistema e metodo di monitoraggio di un territorio*. Brevetto italiano n. IT ITGE20120071A1. Ufficio Italiano Brevetti e Marchi; 2012.
- [7] Colli M., et al. *A field experiment of rainfall intensity estimation based on the analysis of satellite-to-earth microwave link attenuation*. In: Saponara S., De Gloria A. (eds.). *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*. ApplePies 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 573. Springer Cham.; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11973-7_17
- [8] Recommendation ITU-R P.838-3 *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/r-rec-p.838-3-200503-1!pdf-e.pdf
- [9] Gianoglio C., Colli M., Zani S., Caviglia D.D. *An online training procedure for rain detection models applied to satellite microwave links*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters: 2023;20:1-5: Art no. 1002405.
- [10] Gianoglio C., Alyosef A., Colli M., Zani S., Caviglia D.D. *Rain discrimination with machine learning classifiers for opportunistic rain detection system using satellite micro-wave links*. Sensors 2023;23:1202.
- [11] Zani S., Colli M., Delucchi A., Caviglia D.D. *Gestione avanzata dei sistemi di drenaggio urbano tramite tecnologie IoT*. In: “Fondazione AMGA - Bando Project 4.0 - Progetti di ricerca 2019-2020, aprile 2023”; ISBN: 978-88-94738-50-6.
- [12] Colli M., Cassola F., Martina F., Trovatore E., Delucchi A., Maggiolo S., Caviglia D.D. *Rainfall fields monitoring based on satellite microwave down-links and traditional techniques in the city of Genoa*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2020;58:6266-6280. doi: 10.1109/TGRS.2020.2976137

Impiego opportunistico dei collegamenti radio a microonde per il monitoraggio delle precipitazioni e la mitigazione del rischio alluvionale

Il cambiamento climatico sta determinando un incremento nella frequenza e intensità degli eventi meteorologici estremi, tra cui le precipitazioni intense e localizzate che spesso danno luogo ad alluvioni lampo. In questo lavoro si descrive un innovativo sistema di monitoraggio che sfrutta l'attenuazione del segnale satellitare per stimare in tempo reale l'intensità delle precipitazioni. Esso consente di ottenere mappe pluviometriche ad alta risoluzione spaziale e temporale, integrando le informazioni raccolte da una rete capillare di sensori a basso costo. Verrà illustrato il principio di funzionamento del sistema, i risultati sperimentali ottenuti in Liguria, e le potenzialità applicative nel contesto della gestione del rischio alluvionale.

Parole chiave: atmosfera; precipitazioni; trasmissione televisiva satellitare; microonde; attenuazione per dispersione.

Opportunistic Remote Sensing Using Satellite Microwave Radio Links for Rainfall Monitoring and Flood Risk Mitigation

Climate change is leading to an increase in the frequency and intensity of extreme weather events, including intense, localised rainfall that often results in flash floods. This paper describes an innovative monitoring system that uses satellite signal attenuation to estimate rainfall intensity in real time. It makes it possible to obtain high spatial and temporal resolution rainfall maps by integrating the information collected by a capillary network of low-cost sensors. The operating principle of the system, the experimental results obtained in Liguria, and the potential applications in the context of flood risk management will be illustrated.

Keywords: atmosphere; precipitation; satellite TV broadcasting; microwaves; scattering attenuation.

DAVIDE DE PIETRI TONELLI

*Quei centimetri che cambiano la vita: scoperte, sfide
e opportunità nella nuova era della genomica*

All'alba del secondo millennio, la comunità scientifica e l'umanità tutta plaudono alla lettura dell'intera sequenza del genoma umano: "la Scoperta!", ottenuta grazie alle considerevoli risorse messe a disposizione da grandi consorzi internazionali pubblici¹ e privati², è oggi ritenuta tra le più importanti dell'ultimo millennio. Come tratteremo di seguito, la decodifica del genoma umano ha già avuto profonde conseguenze in svariati campi come la comprensione dell'evoluzione, della biologia e nella medicina. Ciononostante, per stessa ammissione degli autori: "Troviamo umiliante osservare la sequenza umana che ora sta venendo alla luce [...] in pratica, la nostra capacità di trasformare queste informazioni in comprensione è ancora dolorosamente inadeguata"¹. Ma come spesso accade con le grandi scoperte, le sorprese non si sono fatte attendere, sollevando domande a cui stiamo ancora cercando di rispondere. Potremo un giorno prevedere quando e di cosa ci ammaliamo? La genetica è in grado di spiegare i meccanismi delle malattie? Come è regolata l'espressione genica? Queste sono alcune delle domande che esploreremo in questo articolo. Prima di addentrarci nelle implicazioni legate alla conoscenza del genoma umano, è fondamentale fare una breve panoramica sulla sua scoperta.

Il viaggio della genetica: dal DNA alle rivoluzioni tecnologiche

Il percorso scientifico che ha portato alla decodifica del genoma rappresenta un esempio straordinario di ricerca multidisciplinare che,

fondata su solide nozioni fondamentali in vari campi facilitate da innovazioni tecnologiche rivoluzionarie, ha reso possibili traguardi altrimenti impensabili. Le ricerche originali su cui si basa la decodifica del genoma umano risalgono alla fine del XIX secolo, con gli studi dei pionieri Johann Gregor Mendel³ e Charles Robert Darwin⁴. A loro si deve il merito di aver compreso la logica alla base del trasferimento delle informazioni genetiche tra le generazioni (ereditarietà) e della selezione delle caratteristiche (fenotipo). Questo risultato stupefacente, considerando le conoscenze e i mezzi tecnologici disponibili all'epoca, fu reso possibile grazie all'osservazione sperimentale diretta (empirica) e a una straordinaria logica deduttiva. Gli esperimenti furono condotti su modelli molto diversi tra loro: dalle piante dell'orto agli animali tropicali, come tartarughe e coralli. Queste scoperte fondamentali hanno sollevato la domanda successiva: quali sono le molecole che custodiscono le informazioni genetiche? Domanda, a cui pochi anni dopo i (bio)chimici Johann Friedrich Miescher⁵ e Phoebus Aaron Theodore Levene⁶ daranno una prima risposta, identificando la sostanza acida (chiamata "nucleina") e i componenti fondamentali (azoto, carbonio, idrogeno) degli "acidi nucleici", ovvero l'acido desossiribonucleico (il DNA) e l'acido ribonucleico (l'RNA).

Come anticipato, altrettanto fondamentali per "la Scoperta" sono state le nuove tecnologie. La diffrazione ai raggi X ha permesso di rivelare la struttura a doppia elica del DNA, mentre l'invenzione del metodo per il sequenziamento del DNA ha consentito ai consorzi internazionali di ottenere la sequenza completa del genoma. Questo processo è stato ulteriormente velocizzato grazie allo stratagemma noto come "shotgun sequencing", che prevede la frammentazione casuale del DNA e il successivo riallineamento dei frammenti tramite metodi computazionali. La tecnica per il sequenziamento del DNA, nota come metodo di Sanger⁷, si deve a all'omonimo Frederick Sanger, e gli è valsa il suo secondo premio Nobel per la Chimica nel 1980. La scoperta dei raggi X invece ha radici più lontane. Si deve a Wilhelm Conrad Röntgen il quale descriveva la capacità di "un nuovo tipo di raggi" di attraversare materiali opachi alla luce ordinaria, inclusa la possibilità di impressionare lastre fotografiche⁸. Questa applicazione dei raggi X è stata successivamente studiata e sviluppata da William H. Bragg e suo figlio William Lawrence. Premi Nobel per la Fisica nel

1915, i due ricercatori hanno scoperto la formula matematica nota come “Legge di Bragg”, che descrive la diffrazione dei raggi X quando questi interagiscono con un cristallo di materiale biologico come il DNA, appunto. La diffrazione dei raggi X ha permesso di risolvere la struttura a “doppia elica” del DNA. Inizialmente, questa scoperta fu accreditata ai ricercatori James Watson (Stati Uniti), Francis Crick (Regno Unito) e Maurice Wilkins (Regno Unito), e solo recentemente è stata riconosciuta anche a Rosalind Franklin, che aveva prodotto la famosa “fotografia 51” al microscopio elettronico, utilizzata dai primi per dedurre la struttura del DNA. La ricostruzione tridimensionale della struttura del DNA, partendo da un’immagine bidimensionale, ha richiesto un notevole sforzo deduttivo, probabilmente facilitato da numerose pinte di “Eagle’s DNA” (figura 1). Questo lavoro valse ai tre pionieri il premio Nobel per la Medicina nel 1962.



Figura 1. *The Eagle’s DNA*, una tipica “English bitter” servita nell’omonimo pub di Cambridge, nel Regno Unito. Questo locale è famoso per essere stato frequentato da Watson, Crick e Wilkins, e si narra che sia stato il luogo della scoperta della struttura del DNA.

Concludono la breve cronistoria della Scoperta Marshall W. Nirenberg, Har G. Khorana e Robert W. Holley che hanno decodificato il “messaggio” celato nel genoma, ovvero la scoperta della funzione dei 4 nucleotidi (A, T, G, C) e del meccanismo alla base della sintesi delle proteine. I tre scienziati hanno lavorato in modo indipendente e le loro ricerche, considerate nell'insieme, hanno svelato il modo in cui l'informazione genetica si traduce in proteine. Le loro ricerche hanno dimostrato che i nucleotidi sono organizzati in 64 “parole” (triplette di nucleotidi chiamati codoni) di cui 61 responsabili per la codifica dei 20 aminoacidi (i blocchi essenziali delle proteine) e tre codoni utilizzati come terminazione della sintesi proteica (noti come “codoni di Stop”). Grazie a queste scoperte i tre ricercatori hanno ricevuto il premio Nobel per la Medicina nel 1968. In particolare, Nirenberg ha scoperto la prima “parola” del codice genetico, ovvero una sequenza di tre nucleotidi di Uracile (UUU) che codifica per l'amminoacido Fenilalanina, e quindi ha continuato a decifrare il codice di altri 19 amminoacidi sintetizzando diverse combinazioni di RNA. Khorana ha dimostrato che un RNA con tre unità, di cui due ripetute (UCU CUC UCU), produceva un peptide con due amminoacidi che si alternavano, dimostrando che UCU codifica per l'amminoacido Serina e CUC codifica per la Leucina. Lo scienziato ha anche mostrato che gli RNA con quattro unità ripetute che comprendevano UAG, o UAA, o UGA producevano solo tripeptidi, rivelando che queste tre “parole” sono codoni di stop. Holley ha scoperto il legame diretto tra l'RNA messaggero e le proteine ovvero l'RNA di trasferimento (o tRNA). Questa molecola funziona come un “corriere espresso” che trasporta l'amminoacido corretto “alla fabbrica” che sintetizza le proteine: il Ribosoma (figura 2). La sintesi proteica, infatti, è un meccanismo biochimico che agisce in modo simile ad una “catena di montaggio”. In questo meccanismo, il Ribosoma si lega al RNA messaggero e, come in un “nastro trasportatore”, scorre lungo il messaggero leggendo i codoni che via via incontra. A ogni codone, il Ribosoma accoglie il tRNA e verifica che l'amminoacido ad esso collegato corrisponda alla sequenza dell'RNA messaggero, e infine incorpora l'amminoacido nella sequenza proteica nascente. Successivamente, il Ribosoma si sposta sul codone seguente liberando il tRNA che ha appena rilasciato il suo amminoacido e accoglie il tRNA successivo. In questo modo, si forma progressivamente una proteina, che viene rilasciata quando il Ribosoma raggiunge un codone di stop.

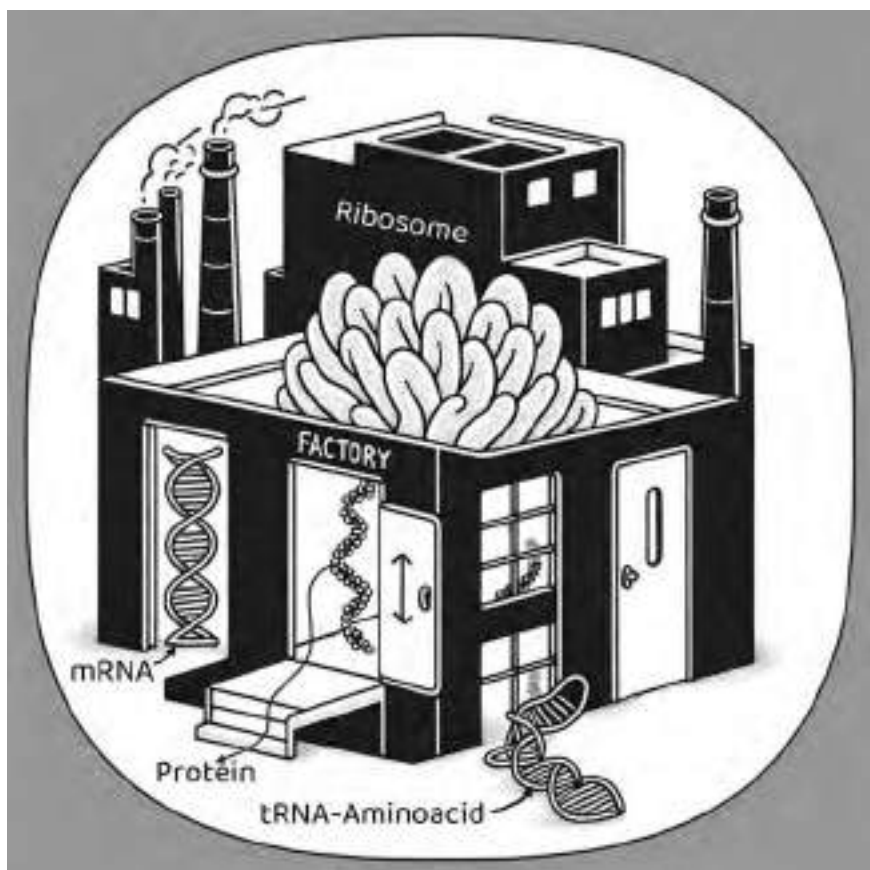


Figura 2. Il Ribosoma: la “fabbrica” delle proteine che “traduce” il linguaggio della genetica (triplette di nucleotidi) dal RNA messaggero (mRNA) in sequenze riconosciute dal RNA di trasferimento (tRNA) che trasporta al ribosoma gli aminoacidi essenziali per la sintesi delle proteine.

Sorprese e domande “post-genomiche”: genoma codificante e DNA spazzatura

“La Scoperta”, unitamente alla decodifica dei genomi di molti altri organismi, ad esempio *Drosophila melanogaster* (il moscerino della frutta, la cui sequenza genomica è stata ottenuta nel 2000), *Danio rerio* (Zebrafish, un pesce tropicale molto utilizzato per studi di genetica la cui sequenza genomica è stata ottenuta nel 1999), *Mus musculus* (il topo, il genoma del primo mammifero ottenuto nel 2002), e il *Pan troglodytes*

(lo Scimpanzé, il genoma del primo primate non-Umano sequenziato nel 2005) hanno fornito i dati che i ricercatori attendevano per cercare di comprendere il meccanismo dell'evoluzione. Cosa ci rende Umani?... Ecco, la prima sorpresa: studi filogenetici (disciplina che studia le relazioni evolutive tra organismi, analizzando le somiglianze e le differenze genetiche) dimostrano che nei diversi genomi il numero di geni che codificano per proteine (o geni codificanti) non aumentava in relazione alla maggior complessità della specie. Ovvero, contrariamente a quanto ipotizzato prima della "Scoperta", si è osservato che specie evolutivamente inferiori all'Uomo, quali ad esempio il topo, hanno nei rispettivi genomi un numero di geni codificanti che non è inferiore rispetto agli Umani. Infatti, la differenza nel numero di geni codificanti tra topi e Umani è circa il 10% (20.000-25.000 geni codificanti nei primi; 19.000-20.000 negli ultimi, a seconda dei metodi utilizzati per ottenere le stime). Questa differenza si riduce a meno dell'1% tra Umani e Scimpanzé.

Ma allora, cosa rende la specie Umana unica? Sebbene la comunità scientifica non sia ancora in grado di fornire una risposta definitiva, di seguito esploreremo ipotesi plausibili basate sui dati attualmente disponibili. Prima di addentrarci nelle ipotesi attualmente più accreditate, è necessaria una premessa sull'epigenetica. Definita dal suo fondatore Conrad H. Waddington come: "La scienza che studia le interazioni tra geni e il loro ambiente, che portano a cambiamenti fenotipici, che possono essere trasmessi attraverso le divisioni cellulari e generazioni"⁹, l'epigenetica è la disciplina della biologia che studia la regolazione dell'espressione dei geni (ovvero la capacità di produrre o meno gli RNA messaggeri che "traducono" il codice genetico in sequenze di aminoacidi utilizzati per sintetizzare le proteine). Le regolazioni epigenetiche non richiedono modifiche nella sequenza dei geni, o più precisamente, non in modo permanente. Le regolazioni epigenetiche, infatti, sono sensibili a variabili esterne (ad esempio l'ambiente e lo stile di vita) e influenzano l'ereditarietà delle caratteristiche fenotipiche acquisite da un organismo durante la vita. Di fatto i meccanismi epigenetici costituiscono un "ponte" tra la genetica, l'ambiente e lo stile di vita. Per questo motivo, non è oggi possibile (e forse mai lo sarà) prevedere quando e di cosa ci ammalaremo semplicemente leggendo il genoma di un individuo. Dopotutto, questa potrebbe non essere una cattiva notizia! Ottenere questo tipo certezza potrebbe aprire scenari con importanti risvolti morali, etici e persino pericolose

derive sociali. Infatti, alcuni degli scenari conseguenti alla conoscenza del genoma sono stati anticipati in racconti di fantascienza, come *Il mondo nuovo*¹⁰, e anche soggetto di pellicole cinematografiche come *Gattaca - La porta dell'universo*, film del 1997 diretto da Andrew Niccol, interpretato da Ethan Hawke, Uma Thurman e Jude Law. In entrambi i racconti di fantascienza, il “determinismo genetico” è solo una parte del problema. La conoscenza del genoma, insieme all'eugenetica (ovvero le pratiche mirate a migliorare il patrimonio genetico di un individuo), facilitata oggi dall'ingegneria genetica (ad esempio, il metodo CRISPR/Cas che utilizza forbici molecolari per modificare le sequenze genomiche), viene ipotizzata come la causa della lotta di classe tra individui con patrimonio genetico “selezionato” e quelli con patrimonio genetico “naturale”. Al fine di scongiurare questi rischi, i decisori politici hanno prontamente reagito alla “Scoperta” con approfondite discussioni che hanno portato a stringenti regolamentazioni a livello internazionale. Ad esempio, l'articolo 3 della Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea (2000/c 364/01) sancisce “il divieto delle pratiche eugenetiche, in particolare di quelle aventi come scopo la selezione delle persone”. Sebbene la carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea limiti determinate pratiche nella genetica per tutelare la dignità umana, essa riconosce simultaneamente il diritto alla salute, garantendo che tali limitazioni non debbano essere interpretate come restrizioni alla libertà della ricerca scientifica mirata ad avanzare la conoscenza medica e migliorare la salute umana.

La conoscenza genomica ha già esercitato, e continuerà ad avere, un impatto positivo sulla medicina. È ben noto come lo studio del genoma umano abbia portato alla scoperta di mutazioni e varianti genetiche, facilitando la diagnosi precoce di malattie ereditarie e permettendo di comprendere i loro meccanismi. La genetica ha permesso di comprendere meglio il cancro, come ad esempio con l'identificazione delle mutazioni nel gene BRCA1, noto anche come il “gene di Angelina Jolie,” che sono associate a un alto rischio di sviluppare tumori. L'identificazione di mutazioni genetiche chiave che guidano la progressione del cancro sta contribuendo allo sviluppo di nuove strategie terapeutiche come la “medicina di precisione” e “personalizzata” (ovvero strategie mirate a specifici bersagli, diverse per ciascun paziente). I recenti progetti genomici come il “100.000 Genomes Project” nel Regno Unito, l'iniziativa “Precision Medicine Initiative” avviata dall'amministrazione Obama negli Stati Uniti e

l'ambizioso progetto di sequenziamento di 3 milioni di genomi umani, 3 milioni di genomi di animali e 3 milioni di piante e di microorganismi lanciato dal Beijing Genomics Institute in Cina, sono alcuni esempi dei crescenti sforzi globali per mappare il DNA di un vasto numero di individui o organismi. Questi progetti non solo hanno lo scopo di creare una vasta risorsa di dati genomici, ma soprattutto di applicare queste informazioni per migliorare la salute umana e la comprensione della biologia, e accelerare le ricerche in una varietà di campi, tra cui l'agricoltura, la biologia ambientale e l'industria con potenzialità enormi. In Italia, le iniziative genomiche si stanno moltiplicando (sebbene con scale molto inferiori sia di popolazione che di investimenti, rispetto ai progetti citati). Un esempio di ricerca genomica in corso in Italia è il "Progetto 5000 genomi" della Valle d'Aosta¹¹ che mira a sequenziare il genoma di 5.000 abitanti della omonima regione. Il progetto si focalizza principalmente sul sequenziamento del genoma umano per malattie complesse, ma include anche il sequenziamento del genoma dello stambecco in collaborazione con il Parco Nazionale del Gran Paradiso. Questo dimostra come l'approccio integrato della genomica possa avere impatti positivi sia sulla salute umana che per la biodiversità. Nonostante l'apparente limite nei numeri delle iniziative Italiane rispetto a quelle internazionali, la sequenza di piccole popolazioni ha il vantaggio di consentire l'identificazione di varianti genetiche rare. Le popolazioni piccole o "inbred" (consanguinee) spesso condividono un pool genico più limitato, il che facilita l'identificazione di varianti genetiche rare consentendone anche un miglior tracciamento. Infatti, lo studio di piccole popolazioni, consente una semplificazione dell'interpretazione dei dati genomici, poiché c'è una maggiore omogeneità genetica all'interno della popolazione, e per questo facilita l'identificazione delle associazioni tra varianti genetiche e patologie o fenotipi, consentendo di ottenere risultati clinicamente rilevanti che potrebbero sfuggire negli studi su grandi numeri di genomi.

Quali risposte ancora si celano nei centimetri inesplorati del genoma?

Ritornando alle ipotesi sui meccanismi alla base dell'evoluzione della specie umana e delle patologie che affliggono l'umanità, in questa sezione dell'articolo cercheremo le possibili risposte nei "centimetri

inesplorati” del genoma. La conoscenza del genoma ha permesso di comprendere che di fatto solo il 2% del DNA, ovvero solo 4 centimetri dei circa due metri contenuti in ciascuna cellula Umana, contiene geni codificanti. La rimanente parte del DNA contiene sequenze associate ai geni codificanti, ovvero sequenze regolatorie che sono fondamentali per l'espressione genica, come ad esempio i promotori, i potenziatori (*enhancers*) e i tratti intronici (sequenze di DNA associate ai geni codificanti che vengono trascritte negli RNA immaturi, ma che poi sono eliminate nel RNA maturo). In totale però, anche considerando queste sequenze, solo il 36% del genoma ha una funzione che è collegabile alla codifica di proteine, da cui deriva “la dolorosa inadeguatezza” della nostra capacità di comprensione¹, e il resto?

Con il sequenziamento del DNA Umano, si è scoperto che gran parte del genoma contiene sequenze ripetute e pseudogeni (ovvero geni che nel corso dell'evoluzione si sono duplicati, e in alcuni casi hanno perso la funzione a seguito di eventi di trasposizione o ricombinazioni geniche parziali), per questo motivo definita “DNA spazzatura”. Inoltre, sebbene alcune patologie come certi tipi di cancro siano legate a specifiche mutazioni genetiche, la maggior parte di esse è sporadica (insorge spontaneamente) e/o multifattoriale (coinvolge interazioni complesse tra geni diversi o fattori ambientali). Infatti, le malattie neurodegenerative come l'Alzheimer, il Parkinson possono avere una componente genetica nel 5-10% dei casi. Tuttavia, la maggior parte di esse è considerata non ereditaria. Mentre per la sclerosi multipla e le malattie dello spettro autistico la predisposizione genetica è più complessa e coinvolge l'interazione di diversi geni con fattori ambientali e/o comportamentali (*Epigenetici?*). Di conseguenza, la genetica “classica” non può spiegare completamente l'insorgenza di queste malattie. Pertanto, le risposte si stanno cercando nel “DNA spazzatura”.

Prima di addentrarci nella parte più inesplorata del genoma, è necessaria una breve premessa sugli RNA “non-codificanti”. Ovvero RNA che non codificano proteine, e a lungo ritenuti un meccanismo di regolazione presente esclusivamente in organismi inferiori all'uomo. In alcuni organismi, come il *Caenorhabditis elegans* (un verme che vive nel suolo e un organismo modello molto usato per lo studio della biologia dello sviluppo) alcuni RNA non-codificanti (*i.e.*, endo-siRNA) sono in grado di regolare (tipicamente sopprimere) l'espressione genica senza cambiarne la sequen-

za, attraverso il meccanismo noto come “Interferenza a RNA”. Inoltre, questi RNA non-codificanti sono sensibili alle variabili esterne (ad esempio la temperatura ambientale, la disponibilità di cibo, o “stress”). Infine, questi RNA possono influenzare i meccanismi genetici dell’ereditarietà. Per questi motivi gli RNA non-codificanti e il meccanismo di interferenza a RNA sono ritenuti un sottotipo di meccanismo epigenetico. La scoperta di questo importante meccanismo che controlla il flusso dell’informazione genetica attraverso piccoli RNA non-codificanti si deve ai ricercatori Andrew Z. Fire e Craig G. Mello, che per questa scoperta hanno ricevuto il premio Nobel per la Medicina nel 2006.

I microRNA (miRNA) sono considerati i “fondatori” della vasta famiglia di RNA non-codificanti, e hanno capacità di regolare l’espressione genica della maggior parte dei geni. I primi due miRNA sono stati scoperti nel laboratorio di Sidney Brenner all’inizio degli anni Ottanta proprio in *Caenorhabditis elegans*. Inizialmente identificati come geni “mutanti eterocronici” (ovvero geni che conferiscono alle cellule “l’identità temporale”, durante lo sviluppo) da Marty Chalfie, John Sulston e Robert Horvitz (vincitori, per questa scoperta, del premio Nobel per la medicina nel 2002) che hanno denominato questi geni “*lin-4*” (*lin*, *anomalìa nella linea cellulare*) e “*let-7*” (*letale*). Ci sono però voluti dieci anni prima che Victor Ambros, Gary Ruvkun e colleghi scoprissero che, in realtà, *lin-4* e *let-7* non erano geni codificanti, ma piuttosto trascrivevano (producevano) piccoli RNA non-codificanti con capacità di regolare altri geni, consentendo o inibendo il legame tra il ribosoma e l’RNA messaggero, essenzialmente attivando o disattivando il “nastro trasportatore” che sintetizza le proteine^{12, 13, 14, 15}. Ad oggi, il campo degli RNA non-codificanti è cresciuto enormemente, così come la varietà dei loro sottotipi che sono “catalogati” in base alla lunghezza (ovvero il numero di nucleotidi che li compongono) in “piccoli” (< 200 nucleotidi) e “lungi” (> 200) e denominati in base alla loro struttura (ad esempio, RNA circolari) o alle proteine con cui interagiscono (ad esempio, gli RNA che interagiscono con le proteine “Piwi” chiamati “Piwi-interacting RNA” o piRNA). Attualmente, gli RNA non-codificanti sono stati identificati nella maggior parte delle piante, insetti e animali. Decine di migliaia di studi confermano che gli RNA non-codificanti regolano l’espressione di tutti i geni essenziali per la vita e sono inevitabilmente coinvolti in tutte le malattie umane, come il cancro e la neurodegenerazione¹⁶.

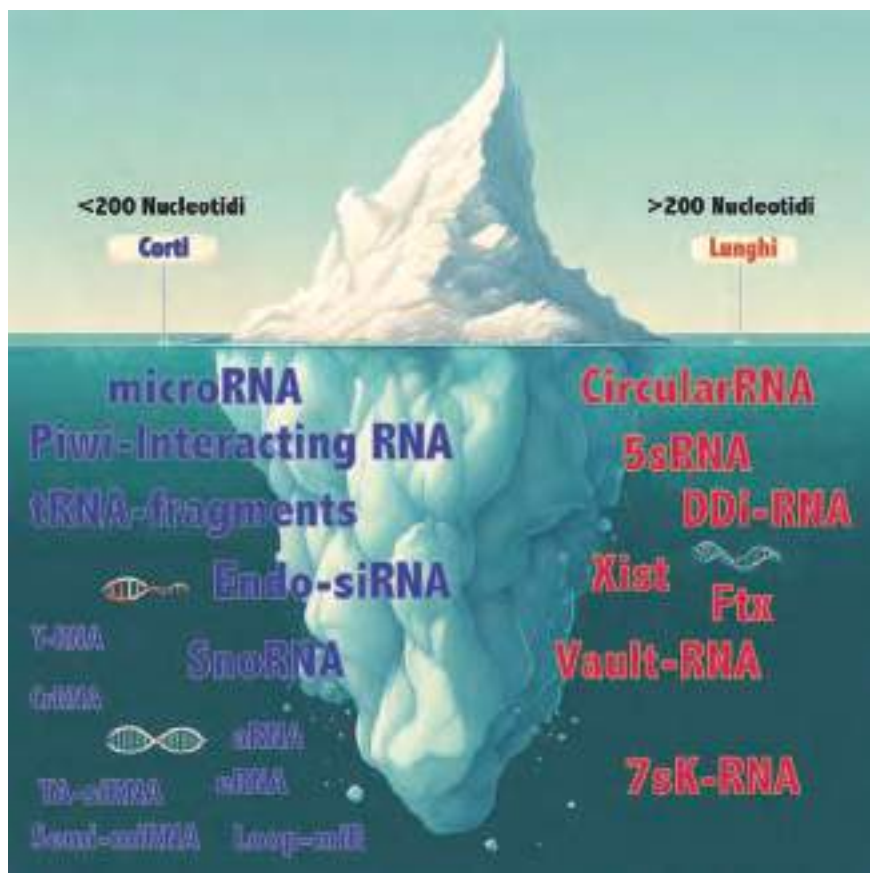


Figura 3. RNA non-codificanti: i diversi sottotipi sono divisi per convenzione in Lunghi (>200 nucleotidi) e Corti (< di 200 nucleotidi) e la cui funzione è ancora largamente ignota.

Ed ecco... immancabile... la seconda sorpresa post-genomica: la maggior parte del “DNA spazzatura” non è semplice spazio tra i geni, ma è trascritto in modo pervasivo^{17, 18}. Ovvero, una porzione variabile tra il 70% e il 90% (a seconda dei metodi utilizzati per le analisi) produce trilioni di molecole diverse di RNA con grande dispendio di energia da parte delle cellule, e alcuni di questi RNA sono stati conservati nell’evoluzione tra organismi distanti milioni di anni¹⁹. Questa parte inesplorata del genoma che è responsabile della produzione di miliardi di molecole di RNA non-codificanti, deve servire a qualche cosa! (figura 3).

Genetica in azione: il ruolo cruciale dell'espressione genica nell'evoluzione e nella salute

A seguito della scoperta degli RNA non-codificanti, oggi è possibile proporre nuove ipotesi a supporto della domanda ancora irrisolta sui meccanismi alla base della maggior complessità della specie umana e delle molte patologie considerate sporadiche. Infatti, oggi sappiamo che il rapporto tra i trascritti codificanti rispetto ai non-codificanti in ogni cellula di organismi evolutivamente inferiori all'uomo, ad esempio in *Drosophila*, è circa 2,4 a 1. Ovvero per ogni RNA codificante proteine, ci sono fino a 2,4 RNA non-codificanti, in ogni cellula del moscerino. Questo rapporto aumenta nella scala evolutiva arrivando fino a 47 a 1 nelle cellule umane²⁰, indicando che a una maggior complessità dell'organismo corrisponde una maggior necessità di RNA non-codificanti. Poiché gli RNA non-codificanti regolano l'espressione della maggior parte dei geni, questa scoperta suggerisce che la complessità degli organismi (e delle patologie) non dipende solo dal numero dei geni codificanti (o dalle mutazioni in essi presenti), ma forse anche dalla loro regolazione (o disregolazione, nel caso delle patologie). Di seguito sono riportati alcuni esempi di regolazione dell'espressione genica, ipotizzati come potenziali meccanismi evolutivi e cause di diverse patologie.

Lo studio del genoma umano ha rivelato che una proporzione variabile tra il 40-45% del nostro DNA trascrive diversi tipi di RNA noti come (retro)trasposoni, sequenze analoghe a quelle dei virus che si sono inserite nel genoma degli eucarioti milioni di anni fa, e come dei "passi-ti" sono in grado di riprodursi autonomamente, ed eventualmente reinserirsi (trasposi) nel DNA creando nuove combinazioni nel genoma^{1, 2}. Questa scoperta ha sollevato ipotesi sull'impatto dei (retro)trasposoni nel generare instabilità genomica, contribuendo all'evoluzione umana e potenzialmente causando patologie quali, ad esempio, le neurodegenerazioni. Queste ipotesi sono ancora dibattute e per questo oggetto di intensi studi²¹. Inoltre, nel nostro genoma esistono delle regioni chiamate HARs (*Human Accelerated Regions*) che sono sequenze conservate tra i mammiferi, inclusi i roditori e i primati, ma che divergono nella nostra specie, rendendole candidate per guidare l'evoluzione del fenotipo umano. Di tutte le HARs note, il 92% mappa in regioni intergeniche o introniche, mentre il restante mappa in pseudogeni, mRNA o

RNA non-codificanti (spesso lunghi). L'analisi bioinformatica predice che molte HARs funzionino come elementi potenziatori che guidano la trascrizione di vari geni, soprattutto nei muscoli e nel cervello²². Un esempio di possibili HAR coinvolge anche i miRNA. Infatti, è noto che il numero dei miRNA aumenta di pari passo con l'evoluzione²³, ma si è anche osservato che l'espressione dei miRNA evolutivamente più recenti è tipicamente inferiore rispetto a quelli più conservati e antichi²².

In entrambi questi esempi esiste certamente una relazione tra la comparsa di nuove sequenze nel genoma e una maggiore necessità di controllo (neutralizzazione) delle stesse. È importante ricordare che l'evoluzione è un processo lento e continuo, e la relazione inversa tra i nuovi miRNA e il basso livello della loro espressione è paradigmatica dell'eterna lotta tra la spinta al cambiamento e omeostasi (mantenimento dello stato). Pertanto, nuovi miRNA poco espressi sono evolutivamente più vantaggiosi rispetto a regolazioni più drastiche e perciò ipotizzati come la causa di piccoli, ma importanti cambiamenti. Non a caso, la funzione di alcuni dei "nuovi" miRNA è coinvolta nel controllo fine della durata del ciclo cellulare nei progenitori neurali (cellule indifferenziate da cui derivano le cellule del sistema nervoso), e ipotizzata come un possibile meccanismo per aumentare la generazione di neuroni nello sviluppo cerebrale dei primati rispetto ai roditori²⁴. Quindi, non stupisce il fatto che la duplicazione o l'espressione incontrollata di alcuni miRNA (anche detti "onco-miR") sia stata correlata a un maggiore rischio di cancro²⁵; dopotutto l'evoluzione avviene sempre ad un costo!

A proposito dell'eterna lotta tra instabilità genomica e i meccanismi soppressivi per ridurre i rispettivi "costi", è doveroso menzionare lo studio filogenetico dei (retro)trasposoni. Infatti, questo campo di ricerca ha rivelato come alcune modifiche nell'espressione dei miRNA (o dei geni da essi regolati) siano avvenuti a causa di eventi di trasposizione²⁶. In altre parole, un po' di "caos genomico" aiuta l'evoluzione, ma ovviamente al costo di un maggior rischio di patologie quali il cancro e la neurodegenerazione. Recenti studi hanno dimostrato che alcune famiglie di (retro)trasposoni, come ERVL (*Endogenous Retrovirus-Like elements*) e altre, si siano già estinti nell'uomo (ovvero non sono più presenti nel genoma Umano), e che i trasposoni a DNA e gli LTR (*Long Terminal Repeats*) abbiano drammaticamente ridotto la loro attività (sono meno presenti nel genoma) negli ultimi 50 milioni di anni

(ovvero a partire della radiazione dei mammiferi). Il motivo della ridotta attività di questi trasposoni non è noto, e oggi si ritiene che quasi tutti questi “parassiti genomici” siano sull’orlo dell’estinzione nell’uomo, ad eccezione delle LINE (*Long Interspersed Nuclear Elements*) che, non a caso, sono oggetto di intenso studio nel sistema nervoso e nell’evoluzione²⁷. Una possibile spiegazione della ridotta capacità di propagazione dei (retro)trasposoni potrebbe essere dovuta alla maggior capacità di salvaguardia del DNA umano, rispetto alle specie evolutivamente più antiche. Un esempio di meccanismo di mantenimento della integrità genomica è costituito dai piRNA, che in diversi mammiferi, tra cui l’uomo, limitano la riproduzione dei (retro)trasposoni nelle cellule germinali delle gonadi (soprattutto maschili) impedendo a questi “parassiti” di propagare “caos” genomico nella progenie²⁸.

Sfide e opportunità future

I dati genomici e le nuove tecniche di analisi e di sequenziamento consentono oggi una maggiore definizione della parte inesplorata del genoma, un tempo definito “DNA spazzatura”. Su questa parte del genoma oggi si concentrano le speranze per scoprire i meccanismi alla base di molte patologie e identificare nuovi bersagli terapeutici. Alcune caratteristiche del genoma non-codificante però complicano queste ricerche, come la presenza (retro)trasposoni, pseudogeni e altre sequenze ridondanti (ripetute) e poco conservate che complicano enormemente la decodifica del genoma. A questo proposito, una recente innovazione tecnologica che permetterà di risolvere meglio le regioni genomiche ridondanti è il metodo di sequenziamento tramite nanopori (*Nanopore Sequencing*). Questo metodo si basa su una tecnologia innovativa utilizzata per determinare la sequenza di DNA o RNA. L’innovazione si deve a David Deamer (USA) che ebbe l’idea di incorporare un nanoporo (un canale proteico di dimensioni nanometriche, ovvero 1 milionesimo di millimetro) nella membrana di un liposoma (piccola vescicola sferica composta da uno o più strati di fosfolipidi), immaginando che il canale potesse far passare i singoli nucleotidi, un po’ come il dentifricio che fuoriesce dal tubetto. Deamer ipotizzò che ogni nucleotide potesse potenzialmente bloccare la corrente ionica mentre passava attraverso il

canale, un concetto successivamente dimostrato da Hagan Bayley. Per due anni, questa idea rimase nel taccuino di Deamer fino a una discussione nel 1991 con il Dan Branton, da cui scaturì la prima pubblicazione che descriveva il concetto di sequenziamento tramite nanopori²⁹. In questo metodo, la molecola di acido nucleico viene spinta attraverso il nanoporo e al passaggio di ciascuna base nucleotidica (A, T; C, G) vengono rilevate variazioni nella corrente elettrica che sono diverse per ciascuna base, consentendo la sequenza del filamento di DNA o RNA senza soluzione di continuità. Ma per quale motivo il sequenziamento del DNA tramite nanopori è considerato oggi rivoluzionario? Il sequenziamento tramite nanopori permette di analizzare lunghi frammenti di DNA o RNA senza doverli frammentare e riassemblare, evitando così difficoltà nel mappare le sequenze ripetute del genoma, e semplificando enormemente l'analisi computazionale. Grazie a questa e altre innovazioni tecnologiche, i costi e i tempi necessari per completare un genoma si sono drasticamente ridotti, permettendo screening su larga scala. Nel 2000, il progetto genoma richiese oltre 20 anni e circa 100 milioni di dollari (2,7 miliardi attuali), mentre attualmente un singolo genoma può essere sequenziato in poche ore al costo di circa 600 dollari, con ulteriori riduzioni previste nel prossimo futuro.

Se da un lato la riduzione dei costi e dei tempi creano nuove opportunità, dall'altro lato però aprono nuove sfide, soprattutto dovute all'immagazzinamento e all'analisi della crescente mole di dati digitali che i progetti genomici stanno generando. Infatti, i dati "grezzi" di un genoma (prima dell'analisi computazionale) richiedono circa 100 Gbyte di memoria, con un costo di immagazzinamento che si aggira intorno ai 25 USD per anno. Mentre un singolo genoma analizzato e ripulito occupa circa 1 Gb e ovviamente costa solo 0,25 USD per anno. Per far fronte a queste esigenze, il National Cancer Institute statunitense ha recentemente investito 19 milioni di dollari per lo storage dei suoi 3.500 genomi. Questa crescente esigenza sta attirando interessi privati, tra cui quelli di multinazionali della Silicon Valley, e non solo, che stanno investendo considerevoli risorse per lo stoccaggio e l'analisi dei dati genomici, aprendo anche alla necessità di nuove regolamentazioni che garantiscano la confidenzialità dei dati genomici prevenendo utilizzi "impropri". Gli enormi progressi, noti a tutti, nella capacità computazionale ottenuta grazie ai nuovi super-computers e

all'Intelligenza Artificiale stanno già rivoluzionando le analisi dei dati genomici (ma che meriterebbero un articolo a parte) e costituiscono ulteriori esempi di tecnologie rivoluzionarie che stanno accelerando la conoscenza genomica.

Ma quali sono le possibili innovazioni che l'approfondita conoscenza del genoma potrà consentire nel futuro? Come risulterà chiaro a questo punto dell'articolo, lo studio del genoma è foriero di risultati sorprendenti che certamente complicano le previsioni. Per quanto riguarda la medicina, è però plausibile ipotizzare che le nuove conoscenze, soprattutto del DNA un tempo definito "spazzatura" e in particolare degli RNA non-codificanti, potrà consentire lo sviluppo di nuove terapie basate su RNA.

La recente pandemia di Sars-Cov2 ha messo in evidenza l'uso dell'RNA per sviluppare nuovi vaccini. Numerose terapie basate su RNA sono già una realtà, con molte altre in arrivo, specialmente nel campo oncologico e delle malattie neurodegenerative. I farmaci a RNA offrono una straordinaria opportunità per sviluppare nuove terapie contro malattie oggi incurabili. Ad esempio, su circa 20.000 geni nel nostro genoma che codificano per 250.000 proteine, meno dell'1% è attualmente utilizzato come bersaglio terapeutico (secondo il database "DrugBank"³⁰). Tuttavia, con la scoperta di trilioni di RNA non-codificanti, è stimabile che 1 milione di questi RNA potrebbero diventare nuovi bersagli per terapie future!

L'aumento delle ricerche sul ruolo dei miRNA nelle malattie umane ha permesso l'identificazione e la caratterizzazione di vari miRNA esclusivamente espressi o mancanti in specifiche malattie umane, tra cui il cancro²⁵. Di conseguenza, un certo numero di miRNA è stato valutato come target (bersaglio) di terapie in trial clinici, e più recentemente, come molecole terapeutiche. Il farmaco Onpattro (Patisiran) è il primo farmaco basato sulla interferenza a RNA approvato dall'autorità di sorveglianza farmacologica statunitense (U.S. Food and Drug Administration, FDA) il 10 agosto 2018, per il trattamento dell'amiloidosi ereditaria da transtiretina (hATTR). Questo farmaco ha fatto da "apripista" nella letteratura "regolatoria", che prima di allora era basata essenzialmente su piccole molecole farmaceutiche. Un esempio più recente è il farmaco Miravirsen (SPC3649) che è un inibitore di miR-122 che forma un complesso oligomerico con il genoma dell'HCV per stabilizzarlo, promuovendo così la replicazione dell'HCV nelle cellule epatiche. Un trial clinico di fase 2

è stato completato nel 2012, ma ad oggi i risultati o gli aggiornamenti non sono ancora disponibili. Un esempio di RNA terapeutici è costituito dagli RNA “mimetici”, ovvero RNA sintetici che “mimano” sequenze e funzioni di RNA naturali, come i miRNA. Il farmaco MRG-201 è attualmente in fase di sperimentazione clinica; MRG-201 è un mimetico di miR-29 che reprime l'espressione del collagene e di altre proteine che promuovono la formazione di cicatrici. Per testare il potenziale clinico del mimetico di miR-29 nel trattamento della formazione di cheloidi e cicatrici fibrose, è stato completato un trial clinico di fase 1 nel 2021. Inoltre, MRG-229, un aggiornamento del mimetico di miR-29 con una maggiore stabilità chimica, ed è stato sviluppato e testato come trattamento per la fibrosi polmonare nella fase preclinica. Simili agli RNA mimetici gli “Aptameri”, ovvero molecole sintetiche di RNA che, pur non essendo naturali, riescono ad interagire con RNA o proteine endogene, bloccandone le funzioni. Questi RNA sono ancora in fase di sperimentazione ma i risultati sono molto promettenti, aprendo la strada a molteplici applicazioni. Simili a questi esempi, terapie con inibitori o mimetici di miRNA sono stati testati clinicamente anche nel cancro. Sebbene un certo numero di queste sperimentazioni sia stato interrotto a causa di problemi clinici e commerciali, molti di esse sono ancora in corso con risultati estremamente promettenti, soprattutto quando combinati con le classiche terapie onco-soppressive³¹.

Ulteriore esempio di RNA non-codificanti potenzialmente interessanti a scopo diagnostico e terapeutico è costituito dai piRNA. Come anticipato, questa famiglia di RNA non-codificanti previene l'instabilità genomica sopprimendo l'espressione degli elementi trasponibili, capacità che è stata primariamente osservata nelle cellule germinali delle gonadi maschili. Di recente, però, la presenza di questa famiglia di RNA è stata identificata nel sistema nervoso dei mammiferi e livelli alterati di piRNA sono stati osservati in diverse neuropatologie, tra cui la neurodegenerazione e nell'invecchiamento. Ma poiché i livelli dei piRNA nei neuroni è notevolmente ridotta rispetto a quelli osservati nelle cellule germinali, la funzione dei piRNA nel sistema nervoso è oggetto di dibattito tra i ricercatori³². Se questa funzione venisse confermata, i piRNA potrebbero in futuro costituire una nuova classe di molecole terapeutiche per strategie mirate alla soppressione degli elementi trasponibili e altri RNA alterati nelle patologie neurali.

Un'ulteriore, e forse più immediata, applicazione della conoscenza derivante dalla ricerca sugli RNA non-codificanti è quella diagnostica³⁰. Crescenti evidenze suggeriscono che molti dei meccanismi fisiopatologici causa dei disturbi dello sviluppo neurale, come i disturbi dello spettro autistico e delle malattie neurodegenerative (l'Alzheimer, il Parkinson, la Sclerosi Laterale Amiotrofica e la Sclerosi Multipla) siano condivisi, mentre vi sono differenze specifiche per ciascuna malattia. Gli RNA non-codificanti come i miRNA e piRNA, i frammenti dei tRNA (tRFs) e altri, sono stati abbondantemente segnalati nel sistema nervoso. Questi RNA possono essere rilasciati in vari fluidi corporei associati a vescicole extracellulari e i livelli alterati di questi RNA non-codificanti, o dei loro bersagli (compresi gli elementi trasponibili), è stata costantemente segnalata nei fluidi corporei di pazienti affetti da queste patologie³¹. Data la numerosità e varietà degli RNA non-codificanti, inclusi miRNA e piRNA, e considerando che queste molecole possono essere rilevate con elevata sensibilità e specificità tramite saggi molecolari ampiamente utilizzati in clinica (come i test per la positività al Sars-Cov2), gli RNA circolanti sono oggi considerati promettenti biomarcatori per molte patologie umane. È pertanto plausibile che nel futuro saranno disponibili saggi rapidi che potrebbero essere utilizzati per screening su popolazioni a rischio. La diagnostica delle malattie neurologiche è di importanza cruciale nell'attuale panorama medico, poiché nuove molecole terapeutiche stanno finalmente emergendo all'orizzonte. Diagnosi tempestive e accurate potrebbero consentire l'identificazione precoce di queste e altre neuropatologie consentendo di attivare strategie terapeutiche o correggere lo stile di vita, prima che i danni diventino irreversibili, migliorando significativamente la gestione e il trattamento di patologie come l'Alzheimer e il Parkinson.

In conclusione, la storia ci insegna che le grandi sfide, quando sono vitali, sono catalizzatori di grandi risorse e delle migliori energie dell'umanità. Ma la storia ci insegna anche che è fondamentale ricordare, citando Albert Einstein che: "Il progresso tecnologico è come un'ascia nelle mani di un criminale patologico". Tuttavia, non dobbiamo temere di usare l'ascia, ma piuttosto imparare a maneggiarla saggiamente. Al fine di non incorrere in pericolose derive, come ci ricorda J. Robert Oppenheimer: "Ora mi sono trasformato in morte, distruttore di mondi", occorre riconoscere la responsabilità che accompagna la conoscenza. Soltanto mantenendo ben salda la consapevolezza dei rischi e agendo

con integrità, possiamo assicurarci che il nostro sapere contribuisca al progresso e al bene dell'umanità. Solo così potremo avanzare verso un futuro migliore per tutti.

Bibliografia

- (1) Lander E.S. et al. *Initial sequencing and analysis of the human genome*. Nature 2001;409(6822):860-921.
- (2) Venter C.J. et al. *The human genome*. Science 2001;291(5507):1304-51. doi: 10.1126/science.1058040
- (3) Mendel G., *Versuche über Pflanzenhybriden*. 1866. https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/mendel_pflanzenhybriden_1866
- (4) Darwin C.R. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 1859. <https://darwin-online.org.uk/>
- (5) Miescher J.F. *Über die chemische Zusammensetzung der Eiterzellen*. 1869. In: *Die Histochemischen und physiologischen Arbeiten von Friedrich Miescher*. Leipzig, Vogel Verlag, 1897, vol. 2, pp. 3-23.
- (6) Levene P.A.T. *The structure of yeast nucleic acid*. J. Biol. Chem. 1919;40:415-424.
- (7) Sanger F. et al. *DNA sequencing with chain-terminating inhibitors*. Proc Natl Acad Sci USA. 1977;74(12):5463-7.
- (8) Röntgen W.C. *Über eine neue Art von Strahlen*. Ann. Phys. 1898:300.
- (9) Waddington C. *The Strategy of the Genes*. 1957; eBook, ISBN 9781315765471
- (10) Huxley A. *Brave New World*. 1932. Ed. Italiana: Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 1933; ISBN 88-04-34248-X.
- (11) <https://5000genomivda.it/it/>
- (12) Ambros V. *A hierarchy of regulatory genes controls a larva-to-adult developmental switch in C. elegans*, Cell. 1989:57.
- (13) Ruvkun G. et al. *Dominant gain-of-function mutations that lead to misregulation of the C. elegans heterochronic gene lin-14, and the evolutionary implications of dominant mutations in pattern-formation genes*. Dev Suppl. 1991:1.
- (14) Lee R.C. et al. *The C. elegans heterochronic gene lin-4 encodes small RNAs with antisense complementarity to lin-14*. Cell. 1993:75.
- (15) Wightman B. et al. *Posttranscriptional regulation of the heterochronic gene lin-14 by lin-4 mediates temporal pattern formation in C. elegans*. Cell. 1993:75.

-
- (16) De Pietri Tonelli D. *Essentials of Noncoding RNA in Neuroscience: Ontogenetics, Plasticity of the Vertebrate Brain*. London, Elsevier/Academic Press, 2017.
- (17) Carninci P. et al. *The transcriptional landscape of the mammalian genome*. Science 2005;309.
- (18) *The ENCODE Project*. Nature 2012;489.
- (19) Clark M.B. *The Reality of Pervasive Transcription*. PLoS Biol. 2011;9(7):e1000625.
- (20) Frith M.C et al. *The amazing complexity of the human transcriptome*. Eur. J. Hum. Genet. 2005;13(8):894-7.
- (21) Faulkner G.J., Carninci P. *Altruistic functions for selfish DNA*. Cell Cycle. 2009;8(18):2895-900.
- (22) Pratt T. et al. *MicroRNA and neocortical evolution*. In: De Pietri Tonelli D. (ed.). *Essentials of Noncoding RNA in Neuroscience: Ontogenetics, Plasticity of the Vertebrate Brain*. London, Elsevier/Academic Press, 2011, pp. 283-299.
- (23) <https://www.mirbase.org/browse/>
- (24) Arcila M.L. et al. *Novel primate miRNAs coevolved with ancient target genes in germinal zone-specific expression patterns*. Neuron. 2014 mar 19;81(6):1255-1262.
- (25) Calin G.A., Croce C.M. *MicroRNA signatures in human cancers*. Nat. Rev. Cancer. 2006;6(11):857-66.
- (26) Petri R. et al. *LINE-2 transposable elements are a source of functional human microRNAs and target sites*. PLoS Genet. 2019;15(3):e1008036.
- (27) Mangoni D. et al. *LINE-1 regulates cortical development by acting as long non-coding RNAs*. Nat Commun. 2023;14.
- (28) Wang X. et al. *Emerging roles and functional mechanisms of PIWI-interacting RNAs*. Nat Rev Mol Cell Biol. 2023;24(2):123-141.
- (29) Kasianowicz J.J. et al. *Characterization of individual polynucleotide molecules using a membrane channel*. Proc Natl Acad Sci USA. 1996;93(24):13770-3.
- (30) Wishart D.S. et al. *DrugBank: a comprehensive resource for in silico drug discovery and exploration*. Nucleic Acids Research. 2006;34 (Database issue).
- (31) Kim T., Croce C.M. *MicroRNA: trends in clinical trials of cancer diagnosis and therapy strategies*. Exp Mol Med. 2023;55:1314-1321.
- (32) Penning A. et al. *Adult Neural Stem Cell Regulation by Small Non-coding RNAs: Physiological Significance and Pathological Implications*. Front Cell Neurosci. 2022;15:781434.

Quei centimetri che cambiano la vita: scoperte, sfide e opportunità nella nuova era della genomica

Il recente sequenziamento del genoma umano ha rivelato un fatto sorprendente: solo “4 cm” degli oltre “2 metri” di DNA in ogni cellula contengono geni che producono (codificano) proteine essenziali per la vita. L'altra parte (98%) del genoma, precedentemente definita “DNA spazzatura”, produce RNA che non codifica per le proteine, ma svolge un ruolo vitale nella regolazione della maggior parte dei geni. Queste nuove molecole, note come RNA non-codificanti, rappresentano un campo largamente inesplorato con un enorme potenziale per le applicazioni diagnostiche e la medicina.

Parole chiave: DNA; RNA non-codificante; microRNA (miRNA); Piwi-interacting RNA (piRNA); aptameri; diagnosi; terapia a RNA; neurodegenerazione; cancro.

Those Centimetres That Change Lives: Discoveries, Challenges, and Opportunities in the New Era of Genomics

The recent reading of the human genome has revealed a surprising fact: only “4 cm” out of over “2 meters” of DNA in each cell contain genes that produce (encode) essential proteins for life. The other part (98%) of the genome, previously referred to as “junk DNA,” produces RNA that does not encode for proteins, but plays a vital role in regulating most genes. These new molecules, known as non-coding RNAs, represent a largely unexplored field with tremendous potential for diagnostic applications and medicine.

Keywords: DNA; non-coding RNA; microRNA (miRNA); Piwi-interacting RNA (piRNA); aptamers; diagnosis; RNA-based therapy; neurodegeneration; cancer.

ALBERTO DIASPRO

Il microscopio atomico e l'intelligenza artificiale

Dedicato a Enrico Beltrametti (1933-2024),
già Magnifico Rettore dell'Università degli Studi di Genova

Prega che la strada sia lunga, non affrettare il viaggio. Itaca ti ha donato il Viaggio meraviglioso. Senza di lei tu non saresti mai partito per la tua via. Visita molte città, per imparare ancora ed ancora dai sapienti. Tieni sempre Itaca a mente: raggiungerla è il tuo ultimo scopo.

K. Kavafis, *Itaca* (1911)

1. “Basta osservare”

Incrociando Gramsci, nei *Quaderni del carcere* iniziati nell'inverno del 1928 (Gramsci 2014), circa lo studio dei fenomeni e delle loro leggi di somiglianza, di coesistenza e di successione che rimandano, nell'ordine, a regolarità, coordinazione e causalità con la *Gestalt*, ovvero “l'idea di forma, struttura e configurazione percettiva degli oggetti reali”, possiamo avventurarci nel metaverso per cogliere la potenza dell'unione di strumentazioni tecnologicamente avanzate e di algoritmi di intelligenza artificiale per rafforzare la nostra capacità di comprendere ciò che abbiamo a disposizione e prendere, in alcuni casi, decisioni conseguenti riguardanti la “configurazione percettiva” degli oggetti reali. Nel 1625 l'*Apiarium* di Federico Cesi, fondatore dell'Accademia dei Lincei, è il



Figura 1. *L'Apiarium* è disponibile in edizione digitale e fisica al Museo Galileo di Firenze sotto l'egida dell'Accademia Nazionale dei Lincei.

manifesto di un grande esperimento che vuole realizzare un metodo per l'ordinamento scientifico di tutte le conoscenze sul mondo fino ad allora raggiunte e in costruzione, unendo il segno scritto e quello figurato (figura 1).

Quello di Federico Cesi è il tempo di Galileo Galilei che con il cannocchiale osserva ciò che è lontano e con il microscopio svela agli occhi un dettaglio prima invisibile, il dettaglio “delle cose minime”. Nel 1665, Robert Hooke, uno dei più grandi scienziati del Seicento, nell'osservare al microscopio sezioni sottili di sughero introduce, per le strutture ripetitive che osservava, il termine “cellula”. Ciò che osservava presentava, infatti, una struttura che assomigliava alle celle di un monastero, cellette o “camerette”. Così Robert Hooke, fisico, biologo, geologo e architetto inglese, forte dello strumento che ha tra le mani, si spinge ad affermare che “e con l'aiuto dei microscopi, non c'è nulla di così piccolo da sfuggire alla nostra indagine” (Hooke 1665). Dai tempi di *Micrographia*, il termine cellula è riferito all'unità morfologico-funzionale degli organismi viventi, quell'unità che trecento anni dopo le osservazioni di Hooke fa affermare a François Jacob, premio Nobel per la Medicina nel 1965 insieme ad André Lwoff e Jacques Monod per “le scoperte riguardanti il controllo genetico della sintesi di virus ed enzimi”, che “con la cellula, la biologia ha scoperto i suoi atomi” (Jacob 1971).

D'altra parte, l'osservazione di cose minute è stata storicamente considerata un modo per migliorare la nostra conoscenza, tanto che Plinio il Vecchio (23-79 d.C.) realizza un capolavoro letterario e scientifico con le osservazioni riportate in *Naturalis historia*, un testo avvincente che tratta di geografia, antropologia, zoologia, botanica, mineralogia e altro ancora. L'osservazione è il tratto che lega Yogi Berra, un giocatore di baseball più famoso di Joe Di Maggio ed eletto nella Baseball Hall of Fame nel 1972, e Richard P. Feynman, un fisico teorico americano che ha ricevuto il premio Nobel per la Fisica nel 1965 insieme a Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga “per il loro lavoro fondamentale nell'elettrodinamica quantistica, con conseguenze profonde per la fisica delle particelle elementari”. “Basta guardare” è l'esortazione di Feynman per comprendere i meccanismi del vivente (Feynman 1959), in perfetto accordo con quel “Si può osservare molto, guardando” di Yogi Berra (Berra and Horton 1989).



Figura 2. *Microscopio ottico di Giovanni Battista Amici, 1812. Museo “Giovanni Boato”, Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Genova (Boato e Bruz-zaniti 1993).*

2. *Lo scenario*

Il microscopio ottico (figura 2), per la sua proprietà di permettere di studiare il vivente senza danneggiarlo grazie alle interazioni luce-materia al di fuori delle bande di assorbimento delle maggiori molecole biologiche come DNA e proteine, ha guadagnato negli anni una rilevanza crescente in biofisica cellulare e molecolare fino al recente “sconfinamento” in biologia strutturale (Liu et al. 2022).

Dal riconoscimento Nobel del 2014, assegnato congiuntamente a Eric Betzig, Stefan W. Hell e William E. Moerner per lo sviluppo della microscopia a fluorescenza super-risolta, la microscopia ottica amplia in modo “vastissimo” la molteplicità e specificità di metodi ottici (Diaspro e Bianchini 2020) introducendo una fondamentale distinzione tra gli sviluppi riguardanti le sonde fluorescenti e quelli riguardanti le soluzioni “ottiche” (Garini et al. 2005) (figura 3).

In questo scenario viene utilizzata la fluorescenza come meccanismo di contrasto per visualizzare in modo specifico componenti cellulari e subcellulari a cui le molecole fluorescenti si legano con elevata affinità biologica e biochimica (Weber 1972; Mondal e Diaspro 2014) (figura 4). Entra lo sviluppo di tecniche e metodi di tipo *label-free* che permettono di ottenere immagini dal microscopio ottico senza la necessità di inserire o fare produr-

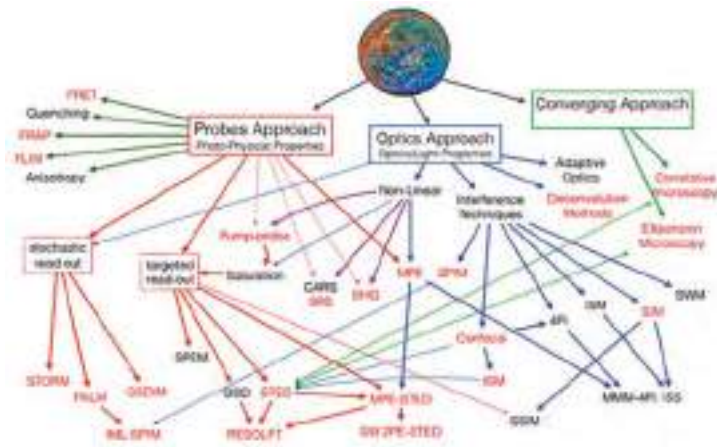


Figura 3. *Panorama della microscopia ottica nella distinzione tra metodi basati sulla progettazione di sonde fluorescenti (probes), di soluzioni ottiche (optics) e di “contaminazioni” (converging).*

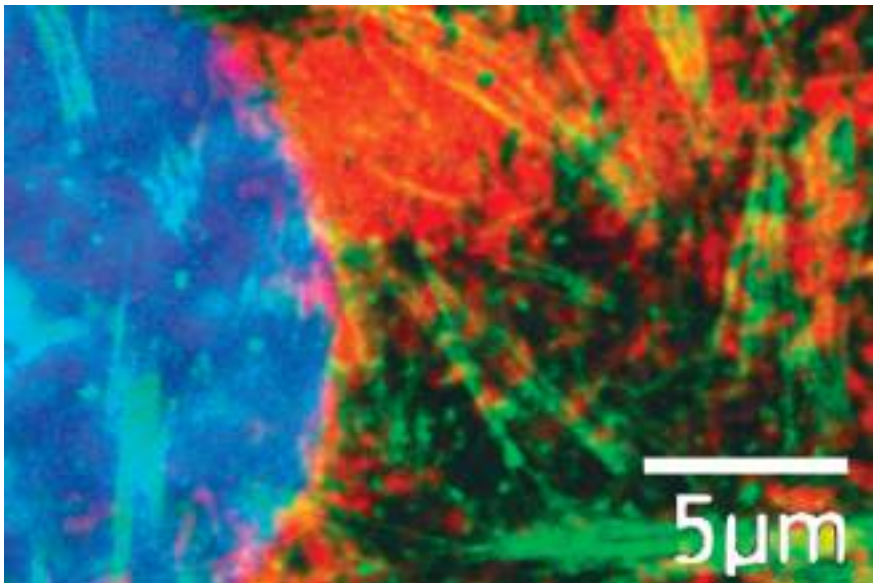


Figura 4. *La specificità che si ottiene attraverso una elevata affinità biochimica delle molecole fluorescenti con componenti cellulari e subcellulari permette di evidenziare, attraverso una emissione di fluorescenza diversificata per lunghezza d'onda, il DNA (blu), elementi del citoscheletro (verde) e unità funzionali (rosso).*

d, la risoluzione spaziale, con una proprietà della materia e un parametro caratteristico della lente:

$$d = \lambda / (2 n \sin \alpha) \quad (1)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione luminosa, n l'indice di rifrazione del mezzo tra la lente e il campione, e α il semiangolo di apertura della lente. La quantità $n \sin \alpha$ è indicata come apertura numerica della lente, NA (*numerical aperture*). La risposta di Giuliano Toraldo di Francia fu positiva. Violando forse le leggi della fisica? Assolutamente no. Si tratta di aggiungere altre informazioni, oltre a quelle raccolte con la apertura numerica della lente. Si tratta di girare intorno al limite di diffrazione piuttosto che cercare di abbatterlo o violarlo (Sheppard 1988). Un insieme di informazioni note a priori permette di ricostruire l'immagine del campione in modo più dettagliato. Chiamiamo questa super risoluzione ottica. Il meccanismo di contrasto a cui si fa riferimento è quella della fluorescenza. Le immagini sono formate componendo un puzzle fatto di tante singole molecole fluorescenti che oggi si riescono a localizzare su scala nanometrica o sub-nanometrica. Quali sono le informazioni in più che possiamo mettere in gioco per andare verso la super risoluzione? Se usiamo il calcolo, considerando il microscopio ottico come un sistema lineare e spazio invariante caratterizzato completamente attraverso la risposta a un impulso di Dirac, possiamo utilizzare il vincolo della soluzione positiva quando applichiamo algoritmi tipici della soluzione di problemi inversi (Bertero e Boccacci 1998). Questo ci permette di migliorare l'accesso al dettaglio rispetto al limite posto dalla diffrazione. Senza entrare nel dettaglio, la figura 6 mostra l'utilizzo del calcolo per estrarre informazioni dettagliate da un insieme di immagini acquisite nello spazio tridimensionale occupato dal campione.

Di fatto si tratta di risolvere il problema di trovare la miglior stima della distribuzione vera di molecole fluorescenti nel campione, $i(x,y,z)$, partendo dall'immagine osservata, $o(x,y,z)$ e da un modello della scatola nera microscopio rappresentata dalla risposta all'impulso del sistema $h(x,y,z)$ secondo la relazione semplificata

$$o(x,y,z) = i(x,y,z) \otimes h(x,y,z) + n(x,y,z) \quad (2)$$

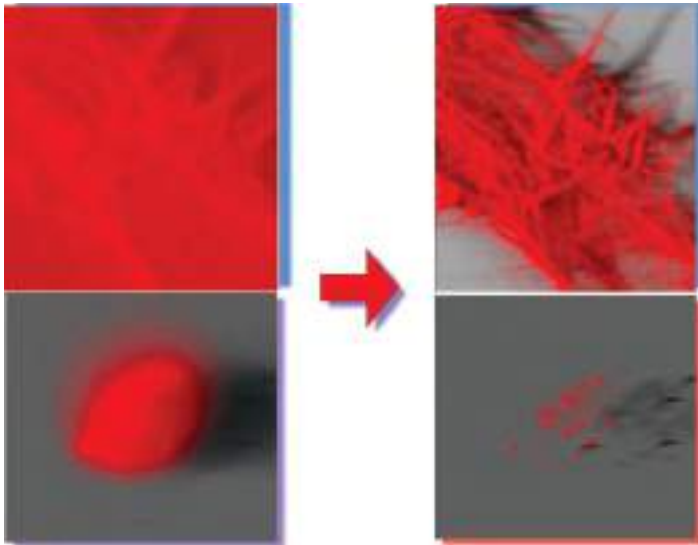


Figura 6. Ricostruzioni da sezioni ottiche, prima (sinistra) e dopo (destra) il calcolo della miglior stima di $i(x,y,z)$ attraverso una operazione di deconvoluzione.

La microscopia ottica computazionale ha un'ampia applicazione in diverse modalità di formazione delle immagini basate su interazione luce-materia (Wang et al. 2025).

L'introduzione di acquisizioni e interrogazioni multiple del campione (Benedetti et al. 1994) è uno dei primi passaggi per migliorare l'accesso al dettaglio nelle tre dimensioni spaziali e viene realizzato negli anni in cui prendono decisamente piede i sistemi a scansione di fascio laser: la microscopia confocale e la microscopia con eccitazione a due fotoni (Diaspro 2001). La cosiddetta illuminazione strutturata, che fornisce informazioni aggiuntive nelle modalità di interrogazione dei campioni agli algoritmi per la ricostruzione del segnale, permette di migliorare decisamente le prestazioni del microscopio ottico in fluorescenza (Heintzmann e Benedetti 2006).

Mats Gustafsson (1960-2011) realizza una brillante ed efficace soluzione con l'illuminazione strutturata proponendo di utilizzare informazioni aggiuntive nella fase di acquisizione delle immagini, interpretando in modo magistrale il suggerimento di Giuliano Toraldo di Francia. Vengono introdotti un reticolo noto con la relativa strutturazione della luce

e una sequenza di acquisizioni per aumentare il “budget” di informazioni a disposizione della ricostruzione del “segnale vero” proveniente dal campione. La strutturazione dell’illuminazione viene dunque ottenuta inserendo lungo il cammino ottico reticoli dalle caratteristiche note, in posizioni differenti note. Per ottenere una immagine in regime di super risoluzione occorre poi un passaggio computazionale (Gustafsson 2000). Una ulteriore modalità di super risoluzione viene realizzata introducendo una interrogazione puntuale a scansione del campione rilevando il segnale da più posizioni scostate in modo noto dall’asse centrale: un sistema di acquisizione che di fatto utilizza più occhi per acquisire il segnale e collocati in posizioni note, ovvero che ricevono le informazioni con uno scostamento o un angolo di vista organizzati in modo noto. La quantità di informazioni aumenta e, poiché sono noti tutti i parametri di raccolta del segnale, l’utilizzo di metodi computazionali permette di aumentare il rapporto segnale/rumore e la risoluzione spaziale. Questa modalità di super risoluzione è prevista teoricamente da Mario Bertero e Roy Pike (Bertero e Pike 1982) e Colin Sheppard (Sheppard 1988) negli anni Ottanta con condizioni tecnologiche non pienamente appropriate. Da un punto di vista sperimentale il passaggio chiave lo realizza Joerg Enderlein utilizzando come sensore una CCD (*Charge Coupled Device*), in uso in microscopia a campo largo (Hiraoka et al. 1987), per realizzare quella che viene chiamata *Image Scanning Microscopy* (ISM) (Mueller e Enderlein 2010). La ISM è il cuore dei microscopi del futuro in grado di offrire prestazioni di super-risoluzione (Sheppard et al. 2017) e spettroscopiche insieme (Castello et al. 2019).

Tra i metodi di super risoluzione vale la pena di citare una ingegnosa soluzione che si basa su una metodologia di preparazione del campione nota come “Expansion Microscopy”, microscopia a espansione (Chen et al. 2015)): si realizza una espansione fisica del campione marcato con molecole fluorescenti da localizzare. L’espansione, un po’ come realizzare un soufflé, colloca le molecole fluorescenti a distanze più grandi del limite di diffrazione. Questo permette di identificare come distinte quelle molecole che rientravano nella “zona di confusione” definita da d , (eq. 1). La microscopia a espansione permette di ottenere super risoluzione in un intervallo piuttosto ampio di dimensioni del campione fino alla nanoscala, come dimostrato riguardo alla organizzazione dei pori nucleari nel nucleo della cellula (Pesce et al. 2019).

3. *Il microscopio atomico*

Questo panorama di stratagemmi, strategie di calcolo e configurazioni ottiche originali è il preludio per quegli sviluppi della microscopia ottica che hanno portato al microscopio atomico, capace di precisione nell'ordine dell'Angstrom per la localizzazione di molecole fluorescenti (Sahl 2024). Lungo il cammino verso la precisione di localizzazione atomica si passa per due metodi che hanno portato E. Betzig, S.W. Hell e W.E. Moerner al riconoscimento Nobel nel 2014 (Diaspro 2014). Dall'intuizione di Toraldo di Francia al Nobel si può affermare che il limite di diffrazione è sgretolato! (Hell 2007). I tre laureati Nobel condividono una stessa idea di base per "aggirare" il limite di diffrazione. È una sorta di "uovo di Colombo" (figura 7): si tratta di trovare il modo di precludere l'emissione simultanea di due sorgenti puntiformi, spet-



Figura 7. *L'uovo di Colombo* di William Hogarth (1697-1764): “La differenza, signori miei, è che voi avreste potuto farlo, io invece l’ho fatto!” (Benzoni 1565).

tralmente identiche ovvero che emettono alla stessa lunghezza d'onda, quando queste sono "troppo" vicine ovvero quando si trovano a distanze più piccole di quelle consentite dalla legge di Abbe.

La soluzione di Hell, Betzig e Moerner è applicabile a tutti quei meccanismi di contrasto per i quali siamo in grado di controllare due stati come assorbimento della luce e trasparenza, spin su o spin giù, polarizzazione in uno stato o nel suo stato opposto. In microscopia in fluorescenza "la lampadina si accende" quando l'intuizione di utilizzare l'emissione stimolata per nascondere l'emissione intorno a una zona di diametro $<d$ viene dimostrata nella costruzione di immagini (Hell e Wichman 1994; Klar et al. 2000) e con l'avvento delle proteine fluorescenti verdi fotoattivabili (Patterson e Lippincott-Schwartz 2002; Lippincott-Schwartz e Patterson 2003; Schneider et al. 2005). Nel primo caso, per ogni interrogazione punto per punto del campione fluorescente, la fluorescenza emessa viene spazialmente selezionata in una regione nanometrica utilizzando un secondo fascio luminoso a forma di toroide. Nel secondo caso si tratta di "convincere" le molecole fluorescenti a non emettere tutte insieme ma singolarmente in modo sparso, ovvero emettono simultaneamente singole molecole fluorescenti che vengono "accese" in posizioni a distanza $>d$ l'una dall'altra (Betzig et al. 2006; Hess, Girirajan e Mason 2006). L'effetto dei due metodi sta nello scalamento di un fattore K_{sr} di d in:

$$d_{sr} = d/K_{sr} \quad (3)$$

Le informazioni aggiuntive alla Toraldo di Francia che portano alla super-risoluzione spaziale dell'eq. (3) riguardano il fatto di conoscere precisamente in che regione dello spazio viene attuata quell'emissione stimolata che confina spazialmente la fluorescenza raccolta dai sensori del microscopio, o la conoscenza del fatto che l'emissione di fotoni da una certa posizione avviene solo da una singola molecola (figura 8).

Le idee dell'emissione stimolata (Harke et al. 2008) e della localizzazione di singole molecole (Deschout et al. 2014) utilizzando la fotoaccensione o fotoconvertibilità unite alla acquistata abilità di maneggiare fasci di luce (figura 9), controllandone precisamente la forma e il direzionamento (Piazza et al. 2018), sono alcuni passaggi importanti per la realizzazione di microscopi ottici con prestazioni sempre più spinte in termini di risoluzione spaziale e temporale.

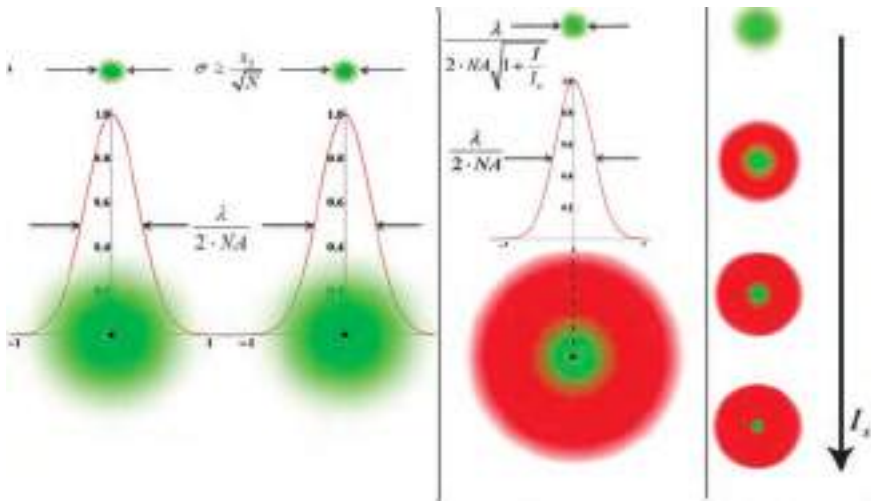


Figura 8. Per la microscopia a singola molecola (sinistra) e quella a selezione della regione di fluorescenza attraverso emissione stimolata (destra), il valore di K_{sr} è riportato come fattore di scala rispetto al limite di Abbe. Qui N è il numero di fotoni raccolti, d_0 è il limite di Abbe, I è l'intensità del fascio di luce utilizzato per innescare l'emissione stimolata e I_s è l'intensità di saturazione, ovvero quella intensità che permette di spopolare gli stati eccitati come $1/e$ (Chacko et al. 2013).

Circa dieci anni fa, emerge un nuovo concetto di interrogazione dei campioni fluorescenti che parte dall'idea di minimizzare il numero di fotoni che concorrono a ottenere la super risoluzione e di svincolarsi dalle caratteristiche della lente del microscopio, sintetizzate dall'apertura numerica, NA . Si tratta di un metodo che rimuove i limiti intrinseci dei metodi a localizzazione di singola molecola, tra questi l'elevato numero di fotoni richiesti con implicazioni in termini di fotodecadimento.

L'avvento di MINFLUX (*minimal emission fluxes*) introduce un nuovo concetto per localizzare gli emettitori di fotoni nello spazio che anziché essere basato sul valore massimo del segnale raccolto utilizza il raggiungimento di un minimo. Sondando gli emettitori, le singole molecole fluorescenti, con intensità locale minima di eccitazione luminosa, MINFLUX minimizza la quantità di fotoni di fluorescenza necessari per un'elevata precisione di localizzazione. Sin dai primi esperimenti sono necessari oltre 20 volte in meno fotoni di fluorescenza rispetto alla più diffusa localizzazione del centroide dei metodi a singola molecola (Balzarotti et al. 2017). MINFLUX ha raggiunto una precisione di circa 1 nanome-

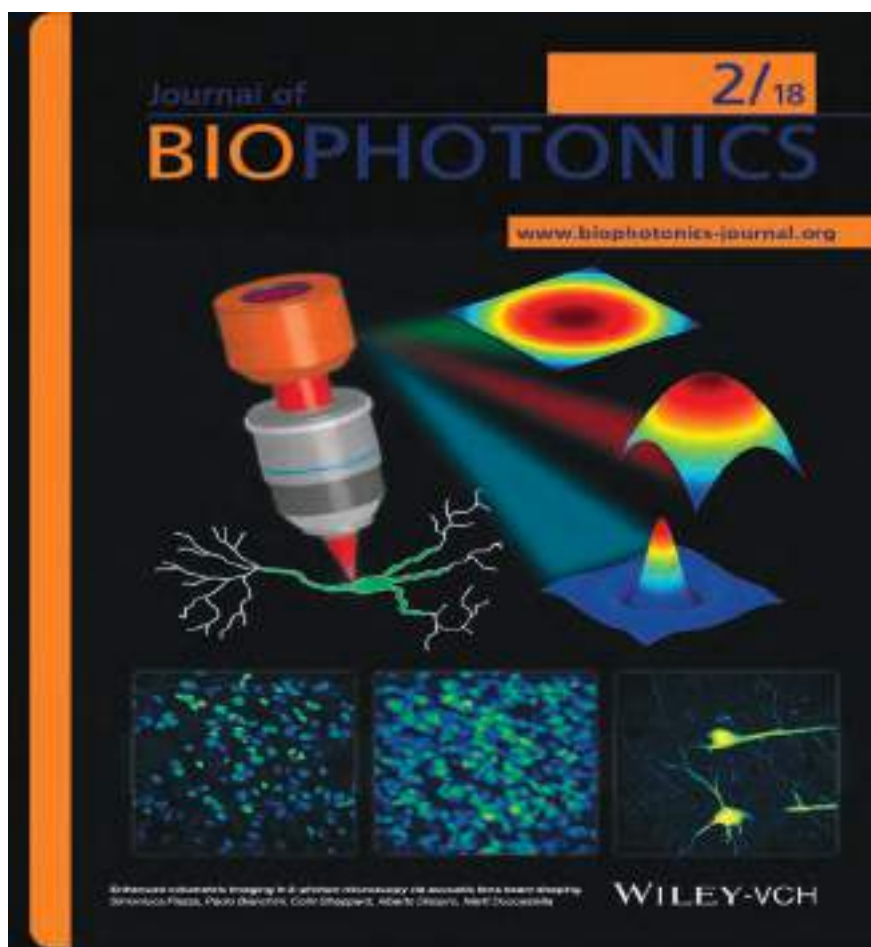


Figura 9. Uno degli elementi chiave per gli sviluppi della moderna microscopia ottica è nella abilità di controllare e modellare le caratteristiche del fascio di luce utilizzato per sondare il campione in esame (Piazza et al. 2018).

tro, risolvendo spazialmente solo molecole che si trovavano a 6 nanometri di distanza. Fin dalle prime dimostrazioni sperimentali vi era l'aspettativa che questa modalità di localizzazione potesse aprire nuovi orizzonti per l'osservazione della dinamica, distribuzione e struttura delle macromolecole nelle cellule viventi. La precisione di localizzazione, σ_{MF} , dipende dall'abilità metrica di confinamento del fascio di luce investigante, L , e dalla quantità di fotoni raccolti uniti da una robusta analisi statistica del segnale raccolto:

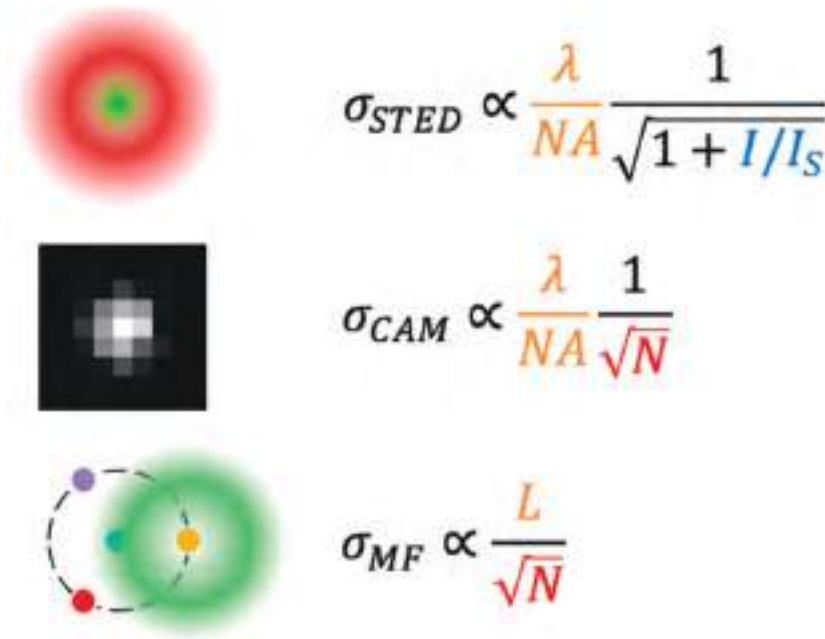


Figura 10. Dall'alto in basso i metodi STED, singola molecola (CAM) e MIN-FLUX (MF) per i quali si nota come la precisione di localizzazione della MIN-FLUX sia svincolata dalle caratteristiche della lente e dipenda dalla possibilità di restringere la regione di interrogazione di tipo toroidale attraverso il diametro L .

$$\sigma_{MF} = L/\sqrt{N} \quad (\text{eq. 4})$$

In questo schema risulta però cruciale, come per altro nei metodi a localizzazione di singola molecola, proprio l'individuazione delle singole molecole da localizzare, siano queste immobili o in movimento. Tecnologicamente L può raggiungere valori nanometrici permettendo di definire la posizione dell'emettitore a bassi flussi di fotoni sulla scala dell'Angstrom (Reinhardt et al. 2023). Questo approccio è estendibile anche al metodo STED (Weber et al. 2023). La figura 10 riporta una rappresentazione grafica della differenza tra le differenti modalità e la figura 11 la strategia di riposizionamento del fascio investigante.

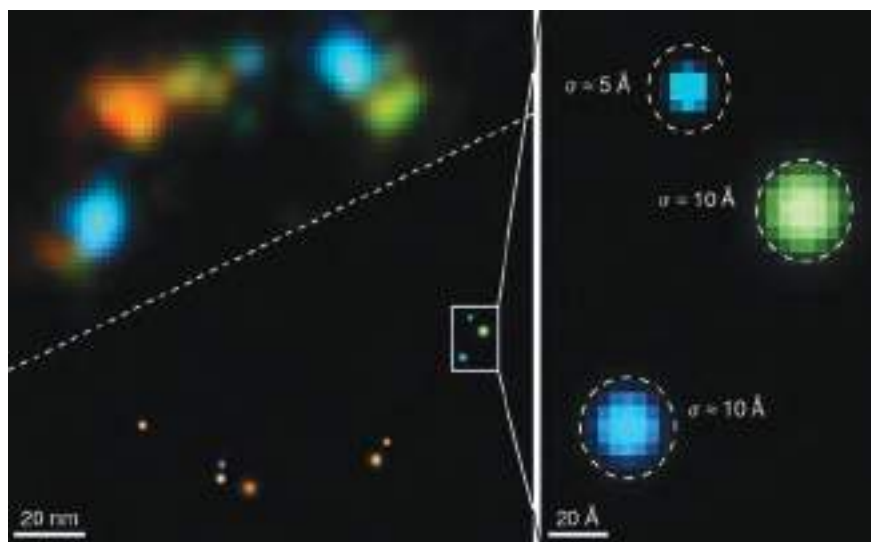


Figura 11. Accesso a informazioni di tipo molecolare con precisione di localizzazione alla scala dell'Angstrom, modificata da Reinhardt et al. 2023.

La microscopia ottica in fluorescenza entra dunque a pieno titolo nella scala dell'Angstrom con la MINFLUX e relative varianti (Salerno et al. 2025). Possiamo dunque definire la microscopia ottica anche atomica aggiungendo che tra le sue prerogative vi sono quelle di poter formare immagini a temperatura ambiente e pressione atmosferica mantenendo inalterate le procedure di marcatura in fluorescenza dei campioni. La microscopia ottica in fluorescenza non solo aggiunge la spettroscopia ad alta risoluzione spaziale ma muove i suoi passi nel dominio della biologia strutturale (Prakash e Curd 2023) (figura 11).

4. *Il microscopio artificiale*

Oggi siamo immersi nell'intelligenza artificiale, siamo fuori e dentro la macchina contemporaneamente, siamo protagonisti e spettatori di una rivoluzione amplificata da quella delle nanotecnologie che pervade non solo ogni attività nella società civile ma, soprattutto, ogni nuovo passaggio del percorso verso la scoperta "in tutti i campi del sapere, dal-

la medicina all'astrofisica", dalla previsione dei disastri naturali ai segreti dell'antichità, dalla ricerca di nuovi pianeti abitabili alla comprensione dei meccanismi molecolari (Cattaneo 2024).

I metodi a super risoluzione fino alla precisione dell'Angstrom sono diventati piuttosto popolari nell'ultima decade e molti quesiti biologici sono stati affrontati in modo originale e con la possibilità di andare oltre il limite principale del microscopio ottico determinato dalle leggi della fisica e sintetizzato nella legge di Abbe. Le immagini prodotte dal microscopio si sono arricchite non solo di un dettaglio inimmaginabile anche per Robert Hooke ma anche di informazioni spettroscopiche su scala molecolare. La microscopia ottica ha dimostrato un'incredibile capacità di gemmare in modalità differenti ognuna dotata di proprie peculiarità come mostrano la figura 3 e la figura 5.

L'insieme di dati disponibile dalle numerose varianti del microscopio ottico costituiscono il nucleo per lo sviluppo di un "microscopio artificiale" che ha lo scopo di trasformare un'interrogazione senza etichetta – *label-free* – del campione in un'immagine basata sulla fluorescenza a contenuto molecolare. Il microscopio artificiale è intelligente perché guidato dall'intelligenza artificiale che ne diventa un componente essenziale insieme alla lente e al sensore per sviluppare una strategia di apprendimento profondo supervisionato con l'ambizioso obiettivo di creare un ambiente virtuale robusto "per vedere ciò che prima non potevamo percepire" (Diaspro 2024).

Un interessante caso di studio è quello legato alla comprensione della visualizzazione dell'organizzazione della cromatina, il complesso DNA-proteine presente nel nucleo della cellula a determinarne il destino, per la quale è importante individuare la relazione struttura-funzione in relazione all'insorgenza e alla cura di patologie oncologiche o neurodegenerative (Narayan et al. 2023). All'inizio degli anni Novanta, per comprendere la relazione tra l'organizzazione della cromatina nel nucleo e possibili patologie, l'uso delle memorie associative è stato utile per associare la distribuzione della cromatina del nucleo allo stato della cellula (Diaspro, Parodi, Zunino 1990) (figura 12). L'uso delle memorie associative era ispirato dai lavori di John J. Hopfield (Hopfield 1982) che con G. Hinton ha ricevuto il premio Nobel per la Fisica nel 2024 per avere utilizzato strumenti della fisica e della biofisica, quelli cari ad Antonio Borsellino, Vincent Torre, Tomaso Poggio e altri scienziati

italiani, per costruire metodi che hanno contribuito a gettare le basi dell'apprendimento delle macchine cambiando radicalmente il paradigma nell'accesso e memorizzazione dei dati: dalle memorie associative al *machine learning*, dalla *back-propagation* alla macchina di Boltzmann (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/summary/>).

Oggi, attraverso un nucleo computazionale costituito da tre moduli basati su una rete neurale convoluzionale (CNN) e un'analisi tICA (*tensor Independent Component Analysis*) sviluppabile per apprendimento automatico non supervisionato è possibile realizzare una strategia di apprendimento profondo supervisionato con l'ambizioso obiettivo di creare un ambiente virtuale robusto “per vedere ciò che prima non potevamo percepire” (Diaspro 2024). In particolare, la trasformazione di dati *label-free* a bassa risoluzione spaziale in immagini in fluorescenza ad alto contenuto molecolare, ovvero senza dover marcare il campione con molecole fluorescenti, costituisce una sfida affascinante e utile al tempo stesso.

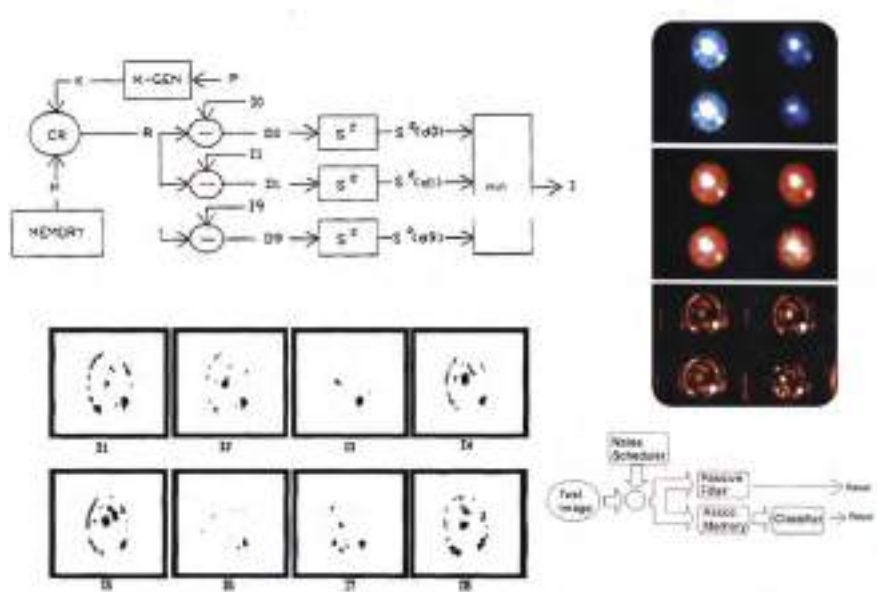


Figura 12. Applicazione delle “memorie associative” alla classificazione e riconoscimento di motivi di organizzazione del complesso DNA-proteine, cromatina, nel nucleo (Diaspro, Parodi, Zunino 1993).

L'organizzazione a super elica del DNA nel nucleo di una cellula e le proteine che ne scandiscono la dinamica realizzano un interessante “campo di battaglia” per legare gli stati di polarizzazione della luce (Diaspro et al. 2023) e i cambiamenti dovuti alla densità di super eliche (Bendandi et al. 2020; Ashraf e Diaspro 2022) con le mappe di condensazione e decondensazione della cromatina osservabili attraverso la fluorescenza (Burgers e Vlijm 2023) (figura 13).



Figura 13. *Gradi di superelicità della cromatina (Ashraf e Diaspro 2022).*

Considerando questa correlazione è possibile addestrare una rete di tipo CNN a trasformare le immagini *label-free* in immagini in fluorescenza, ottenendo un risultato di valenza molecolare senza dover introdurre molecole fluorescenti nel campione (Diaspro, Bianchini e Cuneo 2023) (figura 14).

Risulta interessante trasformare i dati a bassa risoluzione spaziale di tipo *label-free* che si possono raccogliere dal campione sfruttando, ad esempio, come meccanismo di contrasto l'interazione luce-materia in termini di stato polarizzazione della luce in immagini ad elevato contenuto molecolare (figura 15).

Quindi, un primo modulo di IA per il microscopio artificiale ha un duplice scopo: predire un'immagine di fluorescenza da un'immagine senza etichetta, apprendere la specificità data dalle proteine fluorescenti e migliorare il contrasto dell'immagine senza etichetta. Questo facilita l'acquisizione di una raccolta di dati multimodale poiché più immagini

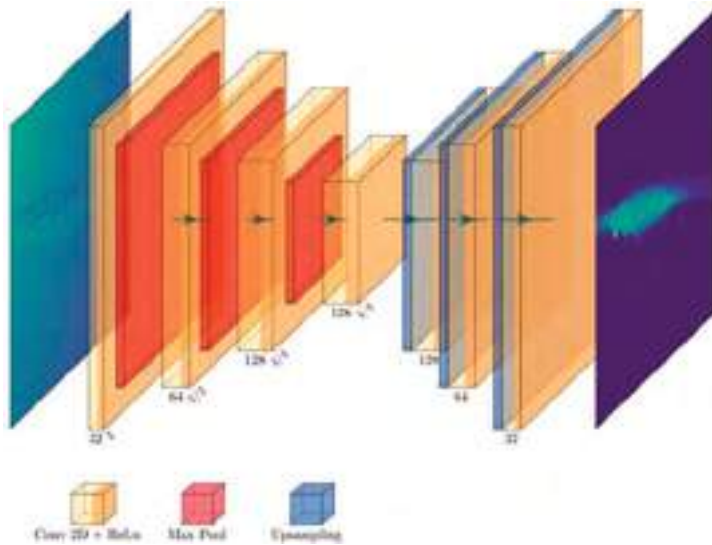


Figura 14. Architettura di rete neurale per apprendimento e trasformazione di immagini label-free in immagini in fluorescenza (Diaspro, Bianchini e Cuneo 2023).

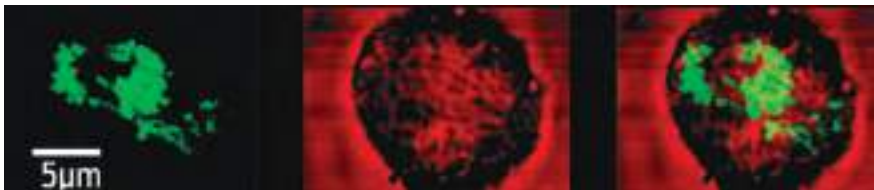


Figura 15. Correlazione tra la distribuzione del DNA nel nucleo attraverso immagini in fluorescenza (verde) e immagini basate sul contrasto label-free ricavabile da elementi della Matrice di Mueller, descrittore degli stati di polarizzazione (Le Gratiet et al. 2021).

di fluorescenza possono essere previste e costruite da una singola immagine senza etichetta. In generale, il microscopio multimodale produce una grande quantità di dati provenienti dalle diverse interazioni luce-campione che devono essere strutturate. Pertanto, il secondo modulo mira a unire i dati provenienti da diversi meccanismi di contrasto. L'obiettivo è realizzare un approccio in grado di trovare automaticamente modelli di cambiamenti correlati e scoprire caratteristiche comuni attraverso più modalità. Vorremmo dedurre gli stessi modelli spaziali attraverso le

modalità da queste caratteristiche. In questo modo sarà possibile fondere le informazioni attraverso diversi meccanismi di contrasto. Matematicamente, il problema della rappresentazione è trovare una proiezione della distribuzione dei dati che porta a una sorta di sistema di coordinate “intrinseco” in cui la struttura dei dati è più evidente. Si può utilizzare l’analisi delle componenti indipendenti (ICA), un modello per trovare componenti significative e spazialmente indipendenti in un ambiente non supervisionato (Groves et al. 2011) al fine di dedurre gli stessi modelli spaziali attraverso differenti meccanismi di contrasto e quindi fondere le informazioni. I dati multimodali sono modellati come una somma di componenti (figura 16) ciascuna delle quali può essere espressa come il prodotto tensoriale di una mappa spaziale ($n = 1, \dots, \text{voxel}$), un indicatore di soggetto ($r = 1, \dots, R$) e un indicatore di modalità ($t = 1, \dots, T$)

$$Y_{n,t,r} = \sum_i^L X_{n,i} W_{t,i} H_{i,r} + \epsilon_{n,t,r} \quad (\text{eq. 5})$$

Dove, $X_{n,i}$ sono le mappe spaziali su n voxel per il componente i , ogni componente i ha una singola mappa spaziale per tutte le modalità; $W_{t,i}$ sono le ponderazioni di modalità per il componente i nella modalità t , indicano quale modalità t usa per esaminare un componente specifico (e quindi in una mappa spaziale); $H_{i,r}$ sono i pesi per il componente i nel soggetto r e formano un collegamento tra le diverse modalità; $\epsilon_{n,t,r}$ è il rumore, dice cioè che non tutto può essere spiegato con la decomposizione (Diaspro, Bianchini e Cuneo 2023).

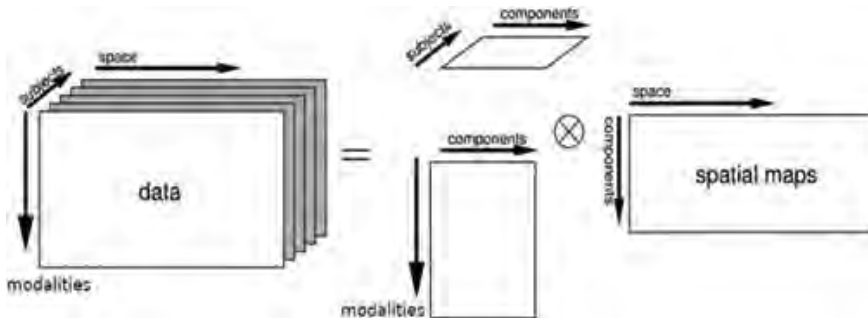


Figura 16. *Il metodo tICA* (tensor Independent Component Analysis).

L'ultimo modulo è responsabile di sfruttare i parametri ottenuti da tICA per prevedere in modo supervisionato se una cellula, studiata con vari metodi di contrasto, è, ad esempio, sana o malata. Il vantaggio dell'uso di tICA è che è facile capire quale modalità è maggiormente responsabile della previsione per ciascun campione.

5. Conclusione

Il microscopio atomico unito all'intelligenza artificiale apre una importante finestra sulla possibilità di ottenere un nuovo modo di formare immagini in modo "liquido" e sintonizzabile (Diaspro et al. 2018) per una migliore comprensione delle relazioni tra struttura e funzione nei sistemi biologici (figura 17).

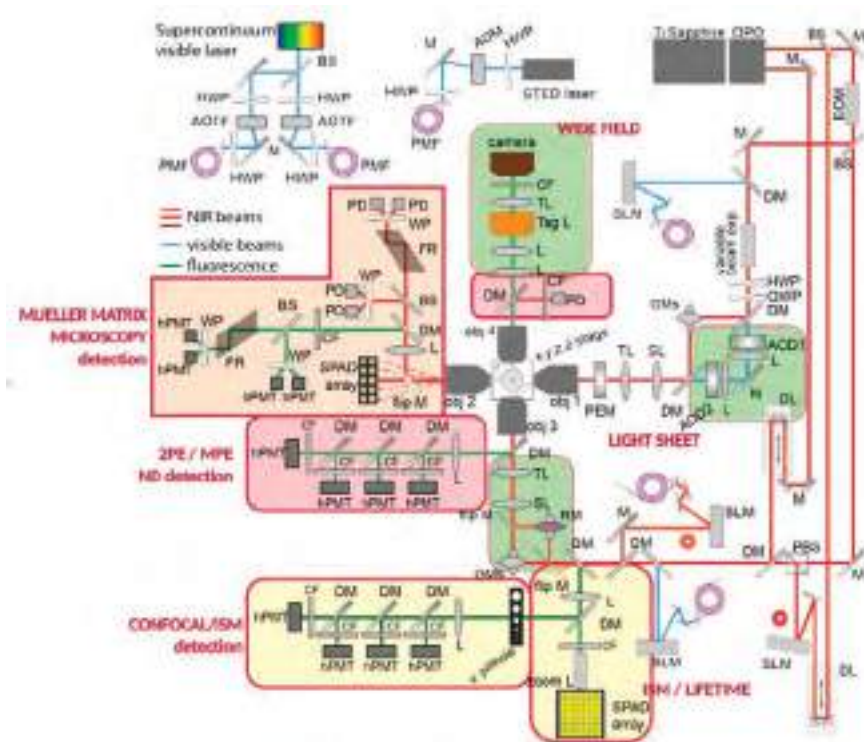


Figura 17. *Architettura multimodale* (Diaspro e Bianchini 2020).

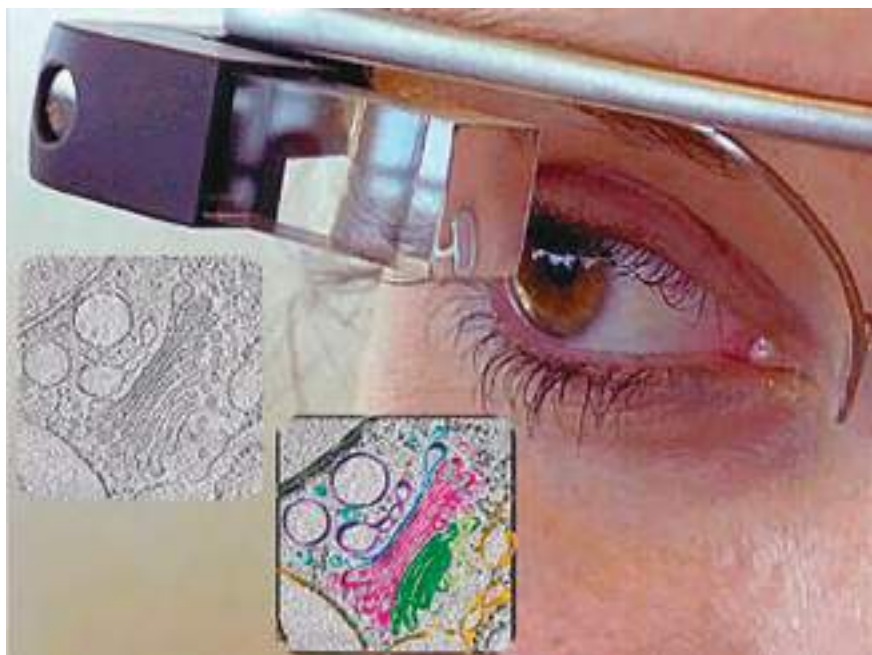


Figura 18. *Rappresentazione creativa della modalità di accesso alle informazioni molecolari (a colori) raccogliendo dati in modalità label-free combinando il microscopio ottico atomico e l'intelligenza artificiale.*

L'ambizioso obiettivo è quello di eliminare la necessità di utilizzare agenti di contrasto quando si esaminano cellule viventi con la prospettiva di eseguire biopsie in tempo reale utilizzando dati senza etichetta. La crescita dell'interesse e il numero crescente di approcci di intelligenza artificiale applicati alle immagini ottenute con precisione molecolare dal microscopio ottico (He et al. 2023) sono incoraggianti e suggeriscono anche che questo rappresenta un passo importante e impegnativo per l'*imaging* computazionale a livello molecolare.

Immaginate un medico o uno scienziato che raccogliendo in modo relativamente semplice informazioni luminose *label-free* da un paziente o da un sistema biologico si trovi trasformate le immagini in mappe ad alto contenuto molecolare come mostrato in figura 18.

Oggi, possiamo entrare in *The Game* di Alessandro Baricco con “uno strumento per osservarci sempre più da vicino e con la consapevolezza di quanto la nostra realtà sia sempre più complessa”, nell'idea che “non sono

le innovazioni a creare uomini nuovi ma nuovi *concetti* di uomo a dare vita a tutte queste innovazioni” (Baricco 2021), che poi il microscopio diventa atomico e l'intelligenza resta naturale, inimitabile e insuperabile anche se la chiamiamo artificiale, “fatta con arte dall'uomo”, come affermò Dante Alighieri.

Ringraziamenti

Part of this work was supported by the PNRR grants SEE-LIFE “StrEngthEning the ItaLIan InFrastructure of Euro-bioimaging” (B53C22001810006, IR0000023), Project “National Center for Gene Therapy and Drugsbased on RNA Technology”, code CN00000041 funded by the European Union–Next Generation EU PNRR MUR–M4C2–Investimento 1.4–Avviso “Potenziamento strutture di ricerca e creazione” di “campioni nazionali di R&S” CUP J33C22001130001, Project NQSTI “NATIONAL QUANTUM SCIENCE AND TECHNOLOGY INSTITUTE”, code PE00000023 funded by the European Union–Next Generation EU PNRR MUR–M4C2–Investimento 1.3–Avviso Creazione di “Partenariati estesi alle università, ai centri di ricerca, alle aziende per il finanziamento di progetti di ricerca di base” CUP J53C22003200005

Bibliografia

- Ashraf M.W., Diaspro A. *On the structural organization of macromolecules using chiral sensitive differential scattering of circularly polarized light*. Optics Communications 2022;522:128639. doi: 10.1016/j.optcom.2022.128639
- Astratov V.N. et al. *Roadmap on label-free super-resolution imaging*. Laser Photonics Rev 2023;17:2200029. doi:10.1002/lpor.202200029
- Balzarotti F. et al. *Nanometer resolution imaging and tracking of fluorescent molecules with minimal photon fluxes*. Science 2017;355:606-612. doi: 10.1126/science.aak9913
- Baricco A. *The Game*. Torino, Einaudi, 2021.
- Bendandi A., Dante S., Zia S.R., Diaspro A., Rocchia W. *Chromatin compaction multiscale modeling: A complex synergy between theory, simulation,*

- and experiment.* Front Mol Biosci. 2020;Feb 25;7:15. doi: 10.3389/fmolb.2020.00015
- Benedetti P.A., Evangelista V., Guidarini D., Vestri S. *Achieving confocal point performance in confocal line microscopy.* Bioimaging 1994;2:122-130.
- Benzoni G. *La historia del mondo nuovo.* Venezia, 1565.
- Berra Y., Horton T. *It Ain't Over.* New York, McGraw-Hill, 1989.
- Bertero M., Pike E.R. *Resolution in diffraction-limited imaging, a singular value analysis.* Optica Acta: International Journal of Optics 1982; 29(6):727-746.
- Bertero M., Boccacci P. *Introduction to Inverse Problems in Imaging.* Boca Raton, CRC press, 1998.
- Betzig E., Patterson G.H., Sougrat R., Lindwasser O.W., Olenych S., Bonifacio J.S., Davidson M.W., Lippincott-Schwartz J., Hess H.F. *Imaging Intracellular Fluorescent Proteins at Nanometer Resolution.* Science 2006;313:1642-1645. doi: 10.1126/science.1127344
- Boato G., Bruzzaniti G. *Strumenti nella fisica dell'Ottocento.* Genova, Sagep, 1993.
- Burgers T.C.Q., Vlijm R. *Fluorescence-based super-resolution-microscopy strategies for chromatin studies.* Chromosoma 2023;132:191-209. doi: 10.1007/s00412-023-00792-9
- Castello M. et al. *A robust and versatile platform for image scanning microscopy enabling super-resolution FLIM.* Nature Methods 2019;16(2):175-178. doi: 10.1038/s41592-018-0291-9
- Cattaneo M. *Rivoluzione AI.* National Geographic Italia, novembre 2024.
- Chacko J.V., Cella Zanacchi F., Diaspro A. *Probing cytoskeletal structures by coupling optical superresolution and AFM techniques for a correlative approach.* Cytoskeleton 2013;70(11):729-740. doi:10.1002/cm.21139
- Chen F., Tillberg P.W., Boyden E.S. *Expansion microscopy.* Science 2015;347(6221):543-548. doi: 10.1126/science.1260088
- Deschout H., Zanacchi F., Mlodzianoski M., Diaspro A., Bewersdorf J., Hess S.T., Braeckmans K. *Precisely and accurately localizing single emitters in fluorescence microscopy.* Nature Methods 2014;11:253-266. doi:10.1038/nmeth.2843
- Diaspro A. (a cura di). *Confocal and Two-photon Microscopy: Foundations, Applications, and Advances.* New York, Wiley-Liss, 2001.
- Diaspro A. *Circumventing the diffraction the limit.* Il Nuovo Saggiatore 2014;30(5-6):45-51.
- Diaspro A. *Oltre l'invisibile.* Prometeo 2024;42(168):16-25.
- Diaspro A., Anthony N., Bianchini P., Cainero I., Di Bona M., Lanza L., Le Gratiet A., Marongiu R., Oneto M., Pelicci S., Pesce L. *LIQUI-*

- TOPY®: A liquid tunable microscope to study chromatin organization in the cell nucleus*. Microsc. Microanal. 2018;24(1):1368-1369. doi:10.1017/S1431927618007328
- Diaspro A., Bianchini P. *Optical nanoscopy*. Riv. Nuovo Cim. 2020;43:385-455. doi:10.1007/s40766-020-00008-1
- Diaspro A., Bianchini P., Callegari F., et al. *Emerging Mueller matrix microscopy applications in biophysics and biomedicine*. Riv. Nuovo Cim. 2023;46:473-519. doi:10.1007/s40766-023-00046-5
- Diaspro A., Bianchini P., Cuneo L. *The Artificial Microscope*. EPJ Web Conf. 2023;287:13012.
- Diaspro A., Parodi G., Zunino R. *Classification of optically-sectioned images of biopolymers by means of associative noiselike coding memories*. Studia Biophysica 1990;139:69-76.
- Diaspro A., Parodi G., Zunino R. *A performance analysis of an associative system for image classification*. Pattern Recognition Letters 1993;14 (11):861-868.
- Einstein A. *On the movement of small particles suspended in stationary liquids required by the molecular-kinetic theory of heat*. Ann Phys 1905;322(8):549-560.
- Feynman R.P. *There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics*, intervento al convegno annuale della American Physical Society Caltech, 29 dicembre 1959; trad. it. in *Il piacere di scoprire*, Milano, Adelphi, 2002.
- Garini Y., Vermolen B.J., Young I.T. *From micro to nano: recent advances in high-resolution microscopy*. Curr. Opin. Biotechnol. 2005;16(1):3-12. doi: 10.1016/j.copbio.2005.01.003
- Gramsci A. *Quaderni del carcere*, a cura di V. Gerratana. Torino, Einaudi. 2014, Q11, XVIII, § 37.
- Groves A.R., Beckmann C.F., Smith S.M., Woolrich M.W. *Linked independent component analysis for multimodal data fusion*. Neuroimage 2011;54(3):2198-2217. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.09.073.
- Gustafsson M.G.L. *Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy*. Journal of Microscopy 2000;198(2):82-87.
- Harke B., Keller J., Ullal C.K., Westphal V., Schönle A., Hel S.W. *Resolution scaling in STED microscopy*. Opt. Express 2008;16(6):4154-4162. doi:10.1364/OE.16.004154
- He Yuezhi, Yao Jing, Liu Lina, Gao Yufeng, Yu Jia, Ye Shiwei, Li Hui, Zheng Wei. *Self-supervised deep-learning two-photon microscopy*. Photon. Res. 2023;11:1-11. doi:10.1364/PRJ.469231

- Heintzmann R., Benedetti P.A. *High-resolution image reconstruction in fluorescence microscopy with patterned excitation*. Appl. Opt. 2006;45:5037-5045. doi:10.1364/AO.45.005037
- Hell S.W. *Far-Field Optical Nanoscopy*. Science 2007;316:1153-1158. doi: 10.1126/science.1137395
- Hell S.W., Wichmann J. *Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy*. Opt. Lett. 1994;19:780-782.
- Hess S.T., Girirajan T.P., Mason M.D. *Ultra-high resolution imaging by fluorescence photoactivation localization microscopy*. Biophys J. 2006 Dec 1;91(11):4258-72.
- Hiraoka Y., Sedat J.W., Agard D.A. *The use of a charge-coupled device for quantitative optical microscopy of biological structures*. Science 1987;238:36-41. doi: 10.1529/biophysj.106.091116
- Hooke R. *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses. With Observations and Inquiries Thereupon*. London, Royal Society, 1665.
- Hopfield J.J. *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1982;79:2554.
- Jacob F. *La logica del vivente. Storia dell'ereditarietà*. Torino, Einaudi, 1971.
- Klar T.A., Jakobs S., Dyba M., Egner A., Hell S.W. *Fluorescence microscopy with diffraction resolution barrier broken by stimulated emission*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2000;97(15):8206-8210.
- Le Gratiet A., Mohebi A., Callegari F., Bianchini P., Diaspro A. *Review on complete Mueller matrix optical scanning microscopy imaging*. Appl. Sci. 2021;11:1632. doi:10.3390/app11041632
- Lippincott-Schwartz J., Patterson G.H. *Development and use of fluorescent protein markers in living cells*. Science. 2003 Apr 4;300(5616):87-91.
- Liu S., Hoess P., Ries J. *Super-resolution microscopy for structural cell biology*. Annu Rev Biophys. 2022; May 9;51:301-326. doi: 10.1146/annurev-biophys-102521-112912
- Mondal P.P.P., Diaspro A. *Fundamentals of Fluorescence Microscopy: Exploring Life with Light*. Berlin, Springer, 2014.
- Mueller C.B., Enderlein J. *Image scanning microscopy*. Phys. Rev. Lett. 2010;104:198101. doi: 10.1103/PhysRevLett.104.198101
- Narayan M.L., et al. *Chromatin structure and function*. Frontiers in Genetics. 2023 Feb 7;14. doi:10.3389/fgene.2023.1140534
- Patterson G.H., Lippincott-Schwartz J. *A photoactivatable GFP for selective photolabeling of proteins and cells*. Science 2002;297:1873-1877: doi: 10.1126/science.1074952

- Pesce L., Cozzolino M., Lanzaò L., Diaspro A., Bianchini P. *Measuring expansion from macro- to nanoscale using NPC as intrinsic reporter*. J Biophotonics 2019;12(8):e201900018
- Piazza S., Bianchini P., Sheppard C.J.R., Diaspro A., Duocastella M. *Enhanced volumetric imaging in 2-photon microscopy via acoustic lens beam shaping*. J. Biophotonics 2018;11(2): e201700050.
- Prakash, K., Curd, A.P. *Assessment of 3D MINFLUX data for quantitative structural biology in cells*. Nat Methods 2023;20:48-51. doi: 10.1038/s41592-022-01694-x
- Reinhardt S.C.M., Masullo L.A., Baudrexel I., Steen P.R., Kowalewski R., Eklund A.S., Strauss S., Unterauer E.M., Schlichthaerle T., Strauss M.T., Klein C., Jungmann R. *Ångström-resolution fluorescence microscopy*. Nature 2023;617:711-716. doi:10.1038/s41586-023-05925-9
- Salerno M., Bazzurro V., Angeli E., Bianchini P., Roushenas M., Pakravanan K., Diaspro A. *MINFLUX nanoscopy: A “brilliant” technique promising major breakthrough*. Microsc Res Tech. 2025, <https://doi.org/10.1002/jemt.24765>
- Sahl S.J. *Direct optical measurement of intramolecular distances with angstrom precision*. Science 2024;386:180-187. doi: 10.1126/science.adj7368.
- Schneider M., Barozzi S., Testa I., Faretta M., Diaspro A. *Two-photon activation and excitation properties of PA-GFP in the 720-920-nm region*. Biophys J. 2005; Aug;89(2):1346-52. doi: 10.1529/biophysj.104.054502
- Sheppard C.J.R. *Super-resolution in confocal imaging*. Optik 1988;80:53-54.
- Sheppard C.J.R. *Resolution and super-resolution*. Microsc Res Tech. 2017;80(6):590-598. doi: 10.1002/jemt.22834.
- Sheppard C.J.R., Castello M., Tortarolo G., Vicidomini G., Diaspro A. *Image formation in image scanning microscopy, including the case of two-photon excitation*. Journal of the Optical Society of America A 2017;34(8):1339-1350. doi: 10.1364/JOSAA.34.001339
- Toraldo di Francia G. *Resolving power and information*. J. Opt. Soc. Am. 1955;45(7):497-501.
- Weber G. *Uses of fluorescence in biophysics: some recent developments*. Annu Rev Biophys Bioeng. 1972;1:553-70. doi: 10.1146/annurev.bb.01.060172.003005
- Weber M., von der Emde H., Leutenegger M., et al. *MINSTED nanoscopy enters the Ångström localization range*. Nat Biotechnol 2023;41, 569-576. doi:10.1038/s41587-022-01519-4
- Wang Z., Peng Y., Fang L., Gao L., *Computational optical imaging: on the convergence of physical and digital layers*. Optica 2025;12:113-130. doi:10.1364/OPTICA.544943

Il microscopio atomico e l'intelligenza artificiale

I moderni microscopi ottici, dalla fluorescenza super-risolta ai meccanismi di contrasto *label-free*, sono potenti fonti di informazioni molecolari, offrendo una visione senza precedenti delle proprietà morfologiche e funzionali delle cellule biologiche su scala nanometrica. La microscopia ottica diventa atomica perché fornisce una precisione di localizzazione di molecole fluorescenti a temperatura ambiente e pressione atmosferica dell'ordine di 1 Å. In questo scenario, l'intelligenza artificiale diventa un componente aggiuntivo del moderno microscopio ottico, rendendolo in grado di trasformare immagini *label-free* in immagini con contenuto molecolare senza la necessità di etichettare i campioni.

Parole chiave: microscopia ottica; super-risoluzione ottica; precisione di localizzazione atomica; intelligenza artificiale; microscopio artificiale; fluorescenza; *label-free*.

Atomic Microscope and Artificial Intelligence

Modern optical microscopes, from super-resolved fluorescence to label-free contrast mechanisms, are potent sources of molecular information. This offers an unprecedented view of biological cells' morphological and functional properties at the nanoscale. Optical microscopy becomes atomic because it provides a localization precision of 1 Å of fluorescent molecules at room temperature and atmospheric pressure. In this scenario, artificial intelligence becomes an additional component of the modern optical microscope, making it capable of transforming label-free images into images with molecular content without the need to label the samples.

Keywords: optical microscopy; optical super-resolution; localization precision at the atomic scale; artificial intelligence; fluorescence; *label-free*.

MARCO GROTTI

Isotopi, svelatori di misteri

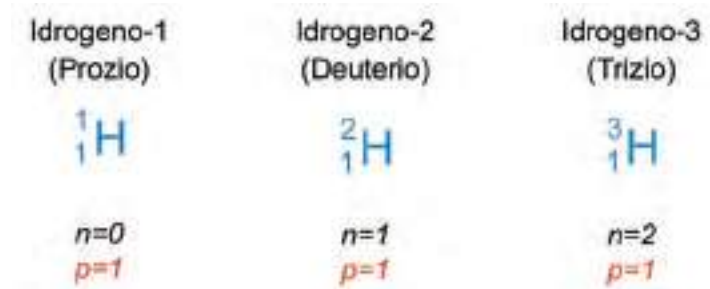
Ogni singola specie atomica caratterizzata da un determinato *numero atomico* Z , pari al numero di protoni, e *numero di massa* A , pari alla somma del numero di neutroni e protoni, è detta *nuclide*, e indicata con il seguente formalismo:



dove X è il simbolo chimico dell'elemento. Gli isotopi (dal greco ἴσος = stesso e τόπος = posto) sono nuclidi che hanno lo stesso numero atomico Z ma differente numero di massa A , e quindi differente massa atomica. Alcuni esempi sono illustrati in figura 1.

La scoperta degli isotopi è attribuita al chimico inglese Frederick Soddy,¹ anche se l'evidenza sperimentale è stata il risultato di diversi studi, nei quali sono degni di nota i contributi di Stefanie Horovitz, Ellen Gleditsch e Ada Hitchins.²

(a)



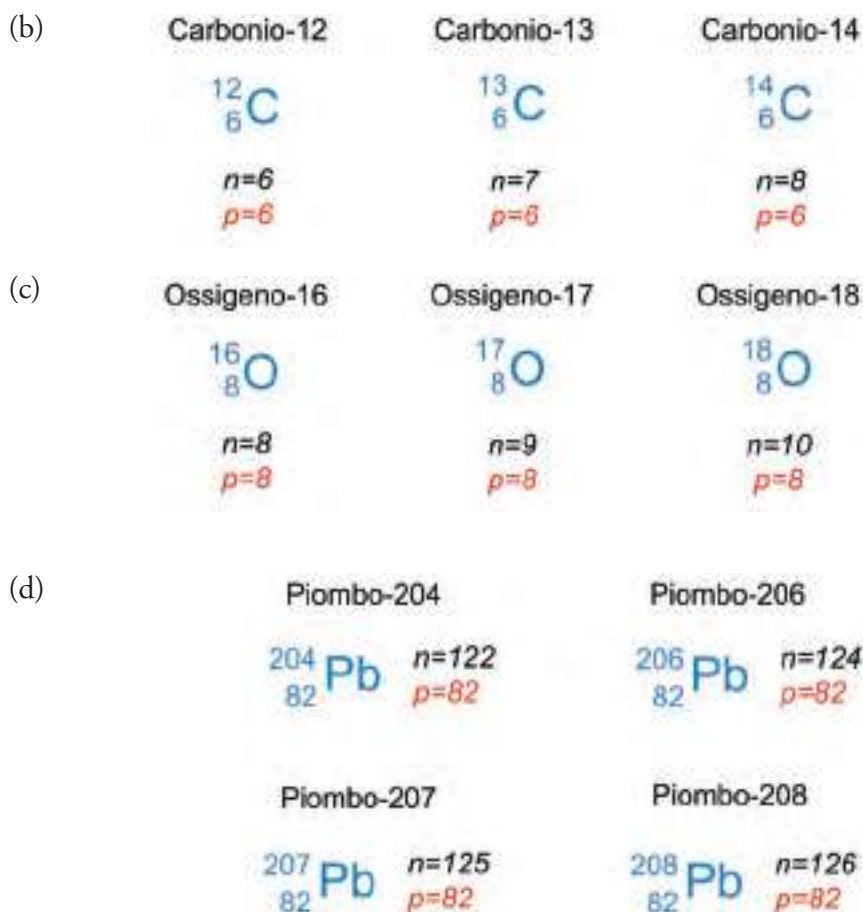


Figura 1. Esempi di isotopi: (a) gli isotopi dell'idrogeno hanno 1 protone ($Z=1$) e, rispettivamente, 0, 1 e 2 neutroni ($A=1, 2$ e 3); (b) gli isotopi del carbonio hanno 6 protoni ($Z=6$) e, rispettivamente, 6, 7 e 8 neutroni ($A=12, 13$ e 14); (c) gli isotopi dell'ossigeno hanno 8 protoni ($Z=8$) e, rispettivamente, 8, 9 e 10 neutroni ($A=16, 17$ e 18); (d) gli isotopi del piombo hanno 82 protoni ($Z=82$) e, rispettivamente, 122, 124, 125 e 126 neutroni ($A=204, 206, 207$ e 208).

La maggior parte degli isotopi naturali sono *isotopi stabili*, mentre altri, detti *isotopi radioattivi* o *radioisotopi*, decadono in nuclidi più stabili, aventi energia inferiore, con emissione di radiazioni ionizzanti, quali raggi gamma, particelle alfa o elettroni.

Per questi ultimi si definisce un *tempo di dimezzamento* ($t_{1/2}$), pari all'intervallo di tempo necessario per dimezzare il numero di atomi iniziali. Tutti gli isotopi illustrati in figura 1 sono stabili, ad eccezione del trizio ($t_{1/2} = 12,32$ anni) e del carbonio-14 ($t_{1/2} = 5700$ anni).

Gli isotopi si dividono, inoltre, in *naturali* e *artificiali*. I primi sono 339 e includono: (a) 252 isotopi stabili, formati durante il processo di nucleosintesi o derivanti dal decadimento di isotopi radioattivi (*isotopi radiogenici*), (b) 34 isotopi radioattivi con tempo di dimezzamento maggiore di 10^8 anni, detti *primordiali* (ad esempio, rubidio-87, bismuto-209, torio-232, uranio-235 e uranio-238), (c) 53 isotopi radioattivi non primordiali, che non si sono estinti in quanto continuamente rigenerati da processi naturali (ad esempio, il carbonio-14 e il trizio si formano per reazione tra i raggi cosmici e l'azoto gassoso presente nell'atmosfera, mentre il radon-222 ($t_{1/2} = 3,825$ giorni) deriva dalla catena di decadimento dell'uranio-238 e del radio-226). Gli isotopi artificiali sono oltre 3.000, di cui 556 con un tempo di dimezzamento superiore a un'ora.

Fondamentali per comprendere l'analisi isotopica e le sue applicazioni sono i concetti di *abbondanza isotopica* e di *frazionamento isotopico*. La prima è *definita come il rapporto tra il numero di atomi di un determinato isotopo di un elemento e il numero di atomi totali dello stesso elemento*. Ad esempio, i due isotopi stabili dell'idrogeno hanno abbondanza del 99,985% (idrogeno-1) e 0,015% (deuterio), quelli dell'ossigeno 99,76% (ossigeno-16), 0,04% (ossigeno-17) e 0,2% (ossigeno-18), e quelli del carbonio 98,89% (carbonio-12) e 1,11% (carbonio-13). Il frazionamento isotopico è l'alterazione dell'abbondanza isotopica naturale degli isotopi stabili in seguito a processi fisici, chimici e biologici o a decadimenti radioattivi che hanno l'isotopo stabile come prodotto finale. Si consideri, ad esempio, il processo di evaporazione dell'acqua. Considerando gli isotopi dell'ossigeno, quest'ultima sarà costituita da molecole di $H_2^{18}O$, oltre che da molecole di $H_2^{16}O$. Poiché, l'evaporazione delle prime richiede maggiore energia rispetto alle seconde, durante il processo fisico di evaporazione si osserverà un arricchimento in $H_2^{16}O$ della fase vapore e un concomitante arricchimento in $H_2^{18}O$ della fase liquida. Per esprimersi in termini quantitativi, occorre introdurre la *notazione delta*:

$$\delta = \frac{R_{\text{campione}} - R_{\text{std}}}{R_{\text{std}}} 1000$$

dove R_{campione} è un dato rapporto isotopico (con l'isotopo più pesante posto al numeratore) nel campione e R_{std} lo stesso rapporto in un campione standard, preso come riferimento. Così, nel citato processo di evaporazione potremmo avere, ad esempio, $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$ nella fase liquida e $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$ nella fase vapore, con il segno meno che indica un arricchimento dell'isotopo più leggero rispetto allo standard. I processi fisici non sono gli unici a determinare un frazionamento isotopico. In ogni reazione chimica, si osserva una piccola differenza di comportamento, sia dal punto di vista cinetico che termodinamico, tra i diversi isotopi di un dato elemento. Ne consegue che i prodotti avranno composizione isotopica lievemente diversa rispetto ai reagenti. Infine, per gli isotopi radiogenici, il decadimento radioattivo dei nuclidi genitori altera la loro abbondanza naturale in funzione della loro concentrazione e del tempo. Esempi rilevanti di questo tipo di frazionamento isotopico sono relativi al piombo e allo stronzio. Il primo ha quattro isotopi (figura 1d), dei quali solo il piombo-204 è costante in natura. I primi tre, infatti, sono il risultato del decadimento radioattivo di torio-232 ($t_{1/2} = 1,401 \cdot 10^{10}$ anni), uranio-238 ($t_{1/2} = 4,466 \cdot 10^9$ anni), e uranio-235 ($t_{1/2} = 0,704 \cdot 10^9$ anni), rispettivamente. Pertanto, i rapporti tra gli isotopi del piombo variano in funzione dei rapporti Pb/U e Pb/Th e del tempo. Analogamente, lo stronzio-87 è il risultato del decadimento beta del rubidio-87 ($t_{1/2} = 4,80 \cdot 10^{10}$ anni), e il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varia in funzione del rapporto Sr/Rb e del tempo. Perciò, i rapporti isotopici naturali di piombo e stronzio in minerali diversi o di diversa provenienza saranno, in generale, diversi.

L'*analisi isotopica* consiste nella misura precisa dell'abbondanza isotopica in campioni di varia natura, mediante tecniche di spettrometria di massa. Tale misura consente di ricavare informazioni uniche, trovando applicazione in svariati settori della ricerca scientifica, quali le scienze ambientali, la geologia, l'archeologia, l'ecologia, i beni culturali, le scienze forensi e la cosmologia. Nel proseguo di questo articolo, saranno brevemente illustrati alcuni esempi applicativi, rappresentativi delle enormi potenzialità dell'analisi isotopica.

Un primo ambito di applicazione riguarda gli studi sul paleoclima, quanto mai necessari per poter capire gli attuali cambiamenti climatici e fare delle previsioni sulle possibili evoluzioni future. In questo contesto, la misura del $\delta^{18}\text{O}$ assume un'importanza fondamentale quale in-

dicatore della temperatura (paleotermometro), consentendo di studiare l'alternanza dei periodi glaciali e interglaciali e le possibili correlazioni con i fattori ambientali.

Infatti, per il processo di frazionamento spiegato in precedenza, l'evaporazione dell'acqua di mare determina un arricchimento nell'isotopo più leggero del vapore acqueo e un concomitante arricchimento nell'isotopo più pesante dell'acqua di mare. Tuttavia, nei periodi interglaciali, le precipitazioni piovose e il ritorno al mare dell'acqua tramite i fiumi ("runoff") chiudono il ciclo dell'acqua, riequilibrando la sua composizione isotopica. Viceversa, nei periodi glaciali, il "runoff" è impedito dalla copertura glaciale, determinando un aumento del $\delta^{18}\text{O}$ dell'acqua di mare e una sua diminuzione nel ghiaccio. Un analogo frazionamento dipendente dalla temperatura si osserva per l'idrogeno, con un aumento del δD nel ghiaccio nei periodi più caldi e una sua diminuzione nei periodi più freddi. Tale "impronta" isotopica, legata alla temperatura, viene quindi immagazzinata nei cosiddetti *archivi climatici*, quali le carote di ghiaccio, i coralli, i foraminiferi planctonici e gli speleotemi. In particolare, le precipitazioni nevose stratificano nelle calotte polari e misure di $\delta^{18}\text{O}$ e δD in campioni via via più profondi consentono di ricostruire le variazioni della temperatura, su ampie scale temporali. Ad esempio, la figura 2 mostra la variazione di temperatura del pianeta negli ultimi 800.000 anni (e la concomitante variazione di CO_2 in atmosfera), determinata mediante la misura del δD nella carota di ghiaccio prelevata a Dome Concordia, sul plateau antartico, nell'ambito del progetto europeo EPICA.^{3,4}

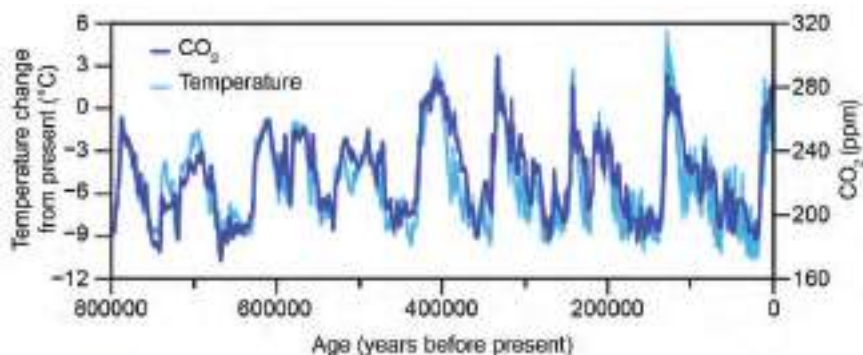


Figura 2. Variazioni di temperatura e CO_2 in atmosfera negli ultimi 800.000 anni (Jouzel et al. 2007; Luthi et al. 2008).^{3,4}

Un altro importante ambito di applicazione dell'analisi isotopica è relativo agli studi di ecologia e, in particolare, alla delucidazione dei complessi flussi di materia ed energia tra i componenti di un ecosistema, denominati reti alimentari o trofiche.

Infatti, i tessuti degli animali sono formati a partire dagli atomi che costituiscono i componenti del cibo che assumono, incorporandone la relativa composizione isotopica. Così, misure di $\delta^{13}\text{C}$ consentono di tracciare i flussi di carbonio attraverso le comunità animali distinguendo, ad esempio, carbonio derivante da piante che utilizzando la fotosintesi C3 da quelle C4, e carbonio di origine acquatica o terrestre. Tuttavia, è stato dimostrato che, per il carbonio e, soprattutto, per l'azoto, i tessuti animali tendono ad arricchirsi nell'isotopo più pesante, rispetto alla loro dieta. Perciò, i valori di $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ aumentano salendo lungo la catena trofica e misure precise di questi rapporti isotopici consentono di definire il livello trofico di appartenenza di un dato organismo e le relazioni preda-predatore tra i componenti di un ecosistema. Tale concetto viene riassunto dalla colorita espressione "Tu sei ciò che mangi... più qualche per mille".

Rimanendo in ambito biologico, un esempio interessante di applicazione dell'analisi isotopica è costituito da uno studio volto a capire le ragioni metaboliche del volo notturno dei pipistrelli.⁵ Infatti, i pipistrelli costituiscono uno dei gruppi di mammiferi di maggior successo, ma le loro attività di foraggiamento sono limitate alle ore del crepuscolo e della notte. Le ipotesi avanzate per spiegare la nicchia notturna dei pipistrelli sono tre: competizione con gli uccelli, maggior rischio predatorio e surriscaldamento corporeo durante il volo diurno. Questo perché, a differenza delle ali piumate degli uccelli, le membrane alari scure e nude dei pipistrelli assorbono efficacemente la radiazione solare a onde corte. Perciò, gli autori dello studio hanno ipotizzato che i pipistrelli dovrebbero affrontare costi di volo elevati durante il giorno, legati a un aumentato movimento delle ali per ridurre il carico termico dovuto alla radiazione solare. Per verificare questa ipotesi, in un singolare esperimento, hanno misurato la temperatura corporea e il tasso metabolico in dieci individui posti, per un breve periodo, in un'apposita camera di volo. In particolare, il tasso metabolico è stato misurato iniettando, per via intraperitoneale, una soluzione acquosa di sodio bicarbonato arricchito di carbonio-13 e misurando il $\delta^{13}\text{C}$ nella CO_2 dell'aria in uscita dalla camera. È stato così osservato che la temperatura corporea interna dei pipistrelli differiva di non più di 2 °C tra

i voli notturni e quelli diurni, mentre i tassi di produzione di CO_2 erano più alti del 15% durante il giorno. I ricercatori hanno così concluso che i voli diurni sono sfavoriti dall'elevato costo metabolico in tali condizioni.

Gli stessi autori hanno inoltre supposto che i pipistrelli ancestrali abbiano evoluto membrane alari dalla pelle scura per ridurre la predazione notturna, il che li ha però resi inclini al surriscaldamento e agli elevati costi energetici durante i voli diurni, di fatto “intrappolandoli” nell'oscurità della notte.

In campo ambientale, uno dei sistemi isotopici più studiati è quello del piombo. Come detto in precedenza, questo elemento ha quattro isotopi stabili, tre dei quali (piombo-208, piombo-207 e piombo-206) sono radiogenici, mentre il piombo-204 è costante in natura. Pertanto, i rapporti tra gli isotopi del piombo nei minerali variano in funzione del rapporto tra il piombo e l'elemento genitore al momento della sua formazione e del tempo. Ne consegue che aree geografiche diverse saranno caratterizzate da una diversa impronta isotopica del piombo, consentendo di usare i rapporti tra i diversi isotopi come indicatori di provenienza. Un esempio è illustrato in figura 3, che mostra i rapporti tra gli isotopi del piombo nel particolato atmosferico campionato in diverse aree del pianeta tra il 1994 e il 1999.⁶

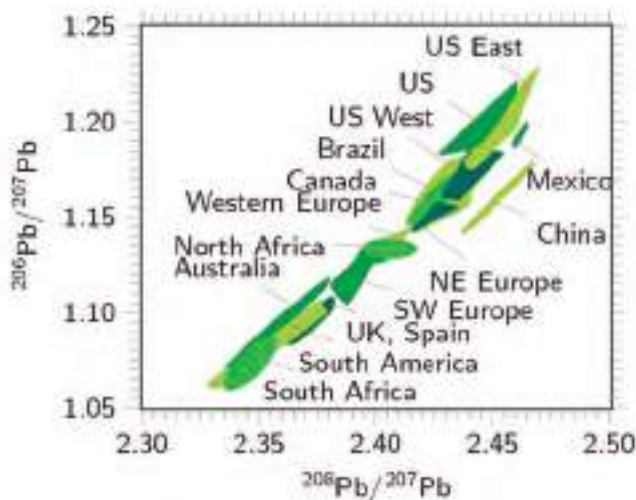


Figura 3. *Mapa dei rapporti isotopici del piombo nel particolato atmosferico campionato in diverse aree del pianeta (Bollhöfer e Rosman 2001).*⁶

Si può osservare come la determinazione dei rapporti isotopici del piombo consenta di differenziare il particolato atmosferico proveniente da aree geografiche diverse, fornendo informazioni utili per l'identificazione delle sorgenti di inquinamento e l'interpretazione dei processi di trasporto su scala globale.

Analogamente, è stata studiata la composizione isotopica del piombo in campioni di neve prelevati sul plateau antartico a diverse profondità. Infatti, la composizione chimica della neve riflette quella dell'atmosfera al momento della deposizione e la misura dei rapporti isotopici del piombo in campioni a diversa profondità hanno consentito di studiare le variazioni temporali delle sorgenti naturali e antropogeniche di questo elemento tossico, in relazione ai cambiamenti nel consumo di benzine arricchite di piombo nell'emisfero meridionale.⁷

Lo stesso tipo di misura è anche utilizzata nel campo dei beni culturali. Infatti, i pigmenti a base di piombo (ad esempio il bianco piombo, denominato biacca) utilizzati nelle pitture conservano una caratteristica impronta isotopica, consentendo di ricavare informazioni utili per lo studio della storia dell'arte o nell'identificazione di falsi. A titolo d'esempio, la figura 4 mostra le differenze nella composizione isotopica del piombo di frammenti di vari dipinti fiamminghi.⁸ Si può osservare come i rapporti di abbondanza isotopica misurati per i pigmenti pittorici di Rubens, Van Dyck e altri pittori fiamminghi mostrino una distribuzione molto stretta, ben distinguibili dai campioni cisalpini (italiani) di dipinti dello stesso periodo. La spiegazione risiede nel fatto che i materiali utilizzati per la preparazione delle pitture sono caratteristici della zona di origine. È anche evidente che campioni di diversa provenienza o periodo storico, ad esempio dei falsi, sarebbero facilmente identificabili sulla base di un'analoga analisi isotopica. Le informazioni ricavabili dall'analisi isotopica sono davvero molteplici. Ad esempio, nello stesso studio, gli autori hanno evidenziato come il campione prelevato dal famoso dipinto di Rubens *La conversione di San Paolo*, e attribuito al periodo romano dell'artista (1600-1608), abbia un'impronta isotopica tipica delle pitture fiamminghe, suggerendo diverse, sorprendenti possibilità, quali un errore nella datazione, l'impiego di materiali portati con sé dall'artista o il reperimento in Italia di pigmenti arrivati dal nord.

Un esempio rappresentativo dell'analisi isotopica in campo alimentare è quello relativo alla misura del rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in campioni di

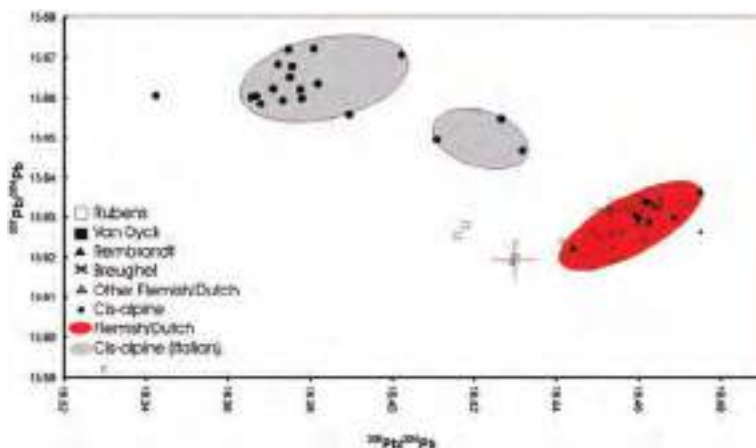


Figura 4. *Rapporti isotopici del piombo in campioni prelevati da vari dipinti del XVI e XVII secolo (Fortunato et al. 2005).*⁸

vino. Infatti, l'impronta isotopica di questo elemento viene trasferita, senza ulteriore frazionamento, dal terreno al vino, rappresentando un importante indicatore di provenienza. L'informazione che se ne ricava è utile nell'individuazione di eventuali frodi, particolarmente rilevante nel caso di vini pregiati. Ad esempio, la figura 5 illustra il rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in vari campioni di vini francesi della regione di Bordeaux, confrontato con lo stesso rapporto in campioni di provenienza diversa o incerta.⁹

Si può chiaramente osservare come i campioni di Bordeaux abbiano una caratteristica impronta isotopica, che consente di discriminarli rispetto a potenziali campioni falsi, anche se esistono delle sovrapposizioni con la marcatura isotopica di alcuni vini italiani. In particolare, dei quattordici campioni sospetti acquistati dalla Cina ed etichettati come Bordeaux, cinque mostrano un rapporto significativamente diverso, indicando una differente origine geografica.

L'identificazione della provenienza mediante l'analisi isotopica trova ampia applicazione anche in campo forense. Un esempio rappresentativo è costituito dalla determinazione del rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in campioni di eroina.¹⁰ Infatti, lo stronzio assimilato dall'oppio o introdotto da contaminazione esterna, ha un rapporto isotopico caratteristico della posizione geografica di produzione, consentendo di identificare

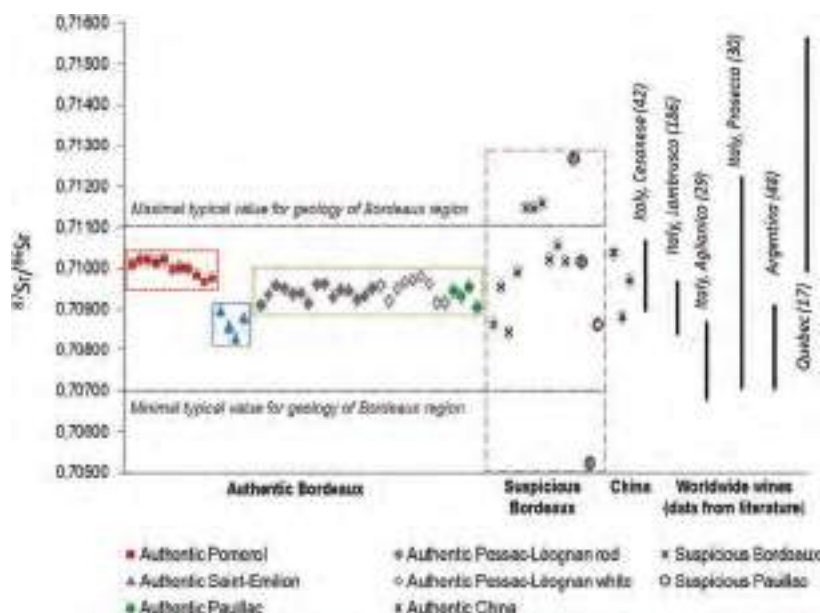


Figura 5. Rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in campioni di vino Bordeaux autentici o sospetti e di campioni di vini di diversa provenienza (Epova et al. 2019).⁹

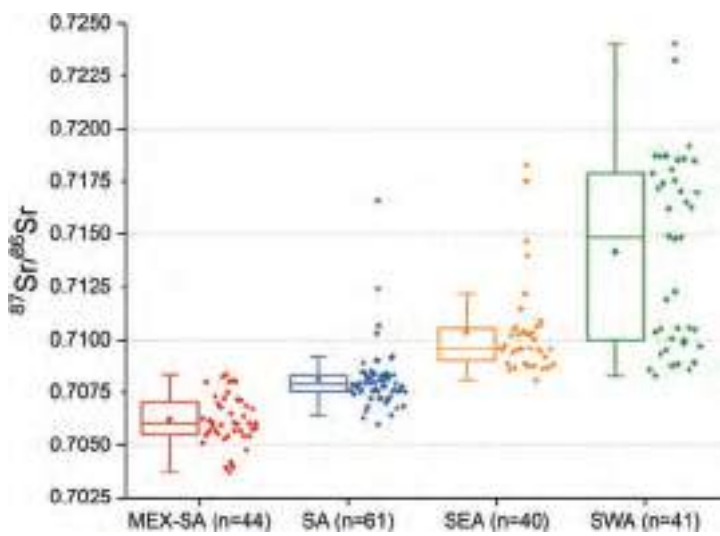


Figura 6. Rapporto isotopico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in campioni di eroina (DeBord et al. 2017).¹⁰

l'origine di un dato campione e tracciare i traffici internazionali di questo stupefacente. In particolare, tale rapporto consente di discriminare campioni provenienti dal Sud-est asiatico, dall'Asia sud-occidentale, dal Sud America ed eroina prodotta in Messico (figura 6).

Un ultimo esempio di applicazione dell'analisi di isotopi stabili riguarda la determinazione del $\delta^{41}\text{K}$ in campioni lunari.¹¹ Tale analisi è stata effettuata allo scopo di chiarire il meccanismo di formazione della Luna e, in particolare, distinguere tra due modelli teorici.

Infatti, il sistema Terra-Luna ha composizioni chimiche e isotopiche uniche rispetto ad altri corpi planetari e qualsiasi modello per spiegare l'origine di questo sistema deve essere in grado di giustificare tali evidenze. In particolare, le rocce lunari hanno mostrato un arricchimento nell'isotopo più pesante del potassio rispetto alla Terra e alle condriti, meteoriti che hanno la stessa composizione chimica delle rocce primordiali del Sistema Solare (figura 7), supportando il modello dell'impatto gigante ad alta energia.

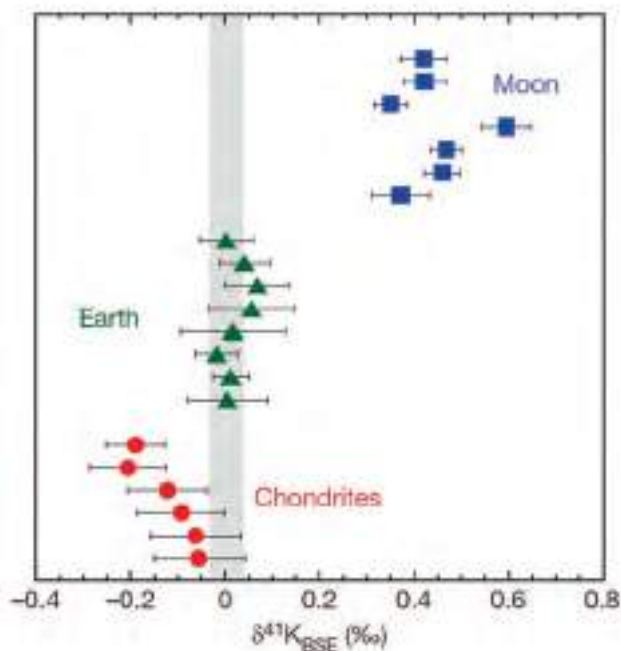


Figura 7. *Composizione isotopica del potassio di campioni lunari, terrestri e nelle condriti (Wang e Jacobsen 2016).*¹¹

A conclusione di questa breve illustrazione delle potenzialità dell'analisi isotopica nei più svariati campi della ricerca scientifica, occorre menzionare l'utilizzo dei radioisotopi nelle datazioni dei campioni. L'esempio più importante è costituito dal carbonio-14, che decade ad azoto-14 emettendo un elettrone e un antineutrino, con un tempo di dimezzamento di 5.700 anni. Le piante fissano il carbonio atmosferico durante la fotosintesi; quindi, il livello di carbonio-14 nelle piante e negli animali quando muoiono è approssimativamente uguale al livello di carbonio-14 nell'atmosfera in quel momento. In seguito, a causa del decadimento radioattivo, la concentrazione diminuisce, in accordo con la legge:

$$C = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dove C_0 è la concentrazione iniziale, t il tempo trascorso (ossia l'età del campione) e τ l'età media del carbonio-14 (pari al tempo di dimezzamento diviso $\ln 2$). Perciò, misurando la concentrazione C di carbonio-14 in un dato campione è possibile calcolare l'età del campione. Il metodo è stato sviluppato alla fine degli anni Quaranta dal chimico-fisico americano Willard Libby, premio Nobel per la Chimica nel 1960, ed è stato applicato in numerosi studi. Tra questi, sono degni di nota:

a) la datazione della transizione Pleistocene/Olocene mediante l'analisi di lignina e cellulosa estratte da campioni della foresta fossile di Two Creeks, nel Wisconsin.¹²

b) la datazione dell'Uomo di Kennewick, scheletro umano fossile di un paleo-americano, al centro di una disputa legale tra il Corpo Ingegneri dell'esercito degli Stati Uniti e i nativi americani.¹³

c) la datazione delle tavolette con iscrizioni in Rongorongo, sistema di glifi scoperto nell'Isola di Pasqua e mai decifrato, rilevante per comprendere l'invenzione della scrittura nella storia umana.¹⁴

d) il controverso caso della datazione della Sacra Sindone.^{15, 16}

In conclusione, l'analisi isotopica rappresenta uno strumento molto potente e versatile per ottenere informazioni uniche e utili in svariati campi della ricerca scientifica. Sebbene l'ottenimento di dati adeguatamente accurati e precisi non sia un obiettivo analitico semplice, quando i requisiti di qualità sono soddisfatti, tali dati sono altamente informativi consentendo, in accordo con il concetto della piramide DIKW,¹⁷ un significativo avanzamento della conoscenza e della capacità di prendere decisioni migliorative per il futuro.

Bibliografia

- [1] Nagel M.C. *Frederick Soddy: From alchemy to isotopes*. Journal of Chemical Education 1982;59(9):739-740.
- [2] Rayner-Canham M., Rayner-Canham G. *Stefanie Horovitz, Ellen Gleditsch, Ada Hitchins, and the Discovery of Isotopes*. Bulletin for the History of Chemistry 2000;25(2):103-108.
- [3] Jouzel J. et al. *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years*. Science 2007;31(5839):793-796.
- [4] Lüthi D. et al. *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present*. Nature 2008;453(7193):379-382.
- [5] Voig C.C., Lewanzik D. *Trapped in the darkness of the night: thermal and energetic constraints of daylight flight in bats*. Proc. R. Soc. B. 2011;278(1716):2311-2317.
- [6] Bollhöfer A., Rosman K.J.R. *Isotopic source signatures for atmospheric lead: the Northern Hemisphere*. Geochimica et Cosmochimica Acta 2001;65(11):1727-1740.
- [7] Bertinetti S. et al. *Isotopic analysis of snow from Dome C indicates changes in the source of atmospheric lead over the last fifty years in East Antarctica*. Chemosphere 2020;255:126858.
- [8] Fortunato G. et al. *Old Masters' lead white pigments: investigations of paintings from the 16th to the 17th century using high precision lead isotope abundance ratios*. Analyst 2005;130:898-906.
- [9] Epova E.N. et al. *Strontium elemental and isotopic signatures of Bordeaux wines for authenticity and geographical origin assessment*. Food Chemistry 2019;294:35-45.
- [10] DeBord J. et al. *Profiling of heroin and assignment of provenance by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio analysis*. Inorganica Chimica Acta 2017;468:294-299.
- [11] Wang K., Jacobsen S. *Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon*. Nature 2016;538:487-490.
- [12] Wallace S. et al. *Radiocarbon age of the Two Creeks forest bed, Wisconsin*. GSA Bulletin 1963;74(6):795-802.
- [13] Taylor R.E. et al. *Radiocarbon dates of Kennewick Man*. Science 1998;280(5367):1171-2.
- [14] Ferrara S. et al. *The invention of writing on Rapa Nui (Easter Island). New radiocarbon dates on the Rongorongo script*. Scientific Reports 2024;14:2794.
- [15] Damon P.E. et al. *Radiocarbon dating of the Shroud of Turin*. Nature 1989;337(6208):611-615.

- [16] Casabianca T. et al. *Radiocarbon dating of the Turin Shroud: New evidence from raw data*. Archaeometry 2019;61(5):1223-1231.
- [17] Rowley J. *The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy*. Journal of Information Science 2007;33(2):163-180.

Isotopi, svelatori di misteri

Cosa lega un quadro di Rubens a una bottiglia di Bordeaux, il traffico di droga all'origine della luna, la neve antartica al volo notturno dei pipistrelli? È l'analisi isotopica, uno dei mezzi più potenti e versatili per ottenere informazioni in campo scientifico. Infatti, i rapporti tra gli isotopi stabili di un elemento presente in un dato campione rappresentano un'inconfondibile "impronta digitale", consentendo di individuarne la provenienza geografica e di tracciare i processi fisici, chimici e biologici che lo hanno coinvolto. In questo articolo saranno brevemente richiamati i concetti fondamentali relativi agli isotopi e alle cause che determinano le variazioni della loro abbondanza naturale, per poi illustrare alcuni esempi applicativi nei diversi campi delle scienze, dall'ambiente ai beni culturali, dall'ecologia alle scienze forensi, dall'archeologia alla cosmochimica.

Parole chiave: isotopi; analisi isotopica; chimica analitica.

Isotopes, Mystery Solvers

What is the link between a painting by Rubens and a bottle of Bordeaux, drug trafficking and the origin of the moon, the Antarctic snow and the nocturnal flight of bats? It is the isotopic analysis, one of the most powerful and versatile tools to obtain information in the scientific field. In fact, the ratios between the stable isotopes of an element in each sample represent a unique "fingerprint", making it possible to identify its geographical origin and to trace the physical, chemical, and biological processes that involved it. In this paper, the fundamental concepts related to isotopes and the causes of the variations in their natural abundance are briefly introduced, before illustrating few representative applications in different fields of science, including environmental studies, cultural heritage, ecology, forensic science, archaeology and cosmochemistry.

Keywords: isotopes; isotopic analysis; analytical chemistry.

GIANCARLO ICARDI – VINCENZO PAOLOZZI

*Le vaccinazioni tra passato e futuro:
dalla variolizzazione
alle innovative piattaforme vaccinali*

Le vaccinazioni hanno avuto un ruolo fondamentale nella lotta alle malattie infettive e nel corso della loro storia si è osservato uno sviluppo delle tecnologie con le quali sono state ottenute.

Tutto è iniziato con il vaiolo, una malattia contagiosa causata da un virus appartenente alla famiglia *Orthopoxviridae*. La malattia è stata responsabile della perdita di circa 400.000 vite europee ogni anno nel corso del XVIII secolo. Tra coloro che sono stati colpiti, la mortalità oscillava tra il 20% e il 60% per gli adulti, raggiungendo addirittura l'80% nei bambini; inoltre, si stima che abbia contribuito a un terzo di tutti i casi di cecità. L'ultimo caso di vaiolo acquisito naturalmente nel mondo è stato diagnosticato nel 1977 in Somalia. È stata una delle malattie più devastanti conosciute dall'umanità e ha causato milioni di morti prima di essere eradicata.¹

Il concetto scientifico di eradicazione ha una definizione molto precisa che si differenzia dal concetto di controllo ed eliminazione.

Per controllo si intende una significativa e consolidata riduzione dei casi di malattia in una popolazione in conseguenza di uno specifico intervento di prevenzione.

Per eliminazione invece si intende una fase successiva al controllo di una malattia infettiva in cui non si osservano più casi clinici in una determinata area geografica.

Infine, l'eradicazione consiste nella rimozione definitiva dell'agente causale e dei suoi serbatoi; in tal modo non si presentano più casi di infezione né di malattia.

Non tutte le malattie infettive possono essere eradicate ma è possibile solo se:

- l'uomo è sorgente e serbatoio;
- l'agente non è soggetto a variabilità antigenica;
- esiste un vaccino efficace e sicuro;
- la malattia è facilmente diagnosticabile;
- la malattia non ha fasi latenti;
- l'immunità è permanente.

Per quanto riguarda il vaiolo, ad esempio, il programma di eradicazione globale è stato iniziato nel gennaio 1967 sotto la guida dell'OMS e si è concluso nell'ottobre 1979. All'inizio del programma di eradicazione globale il vaiolo era endemico in 33 paesi dell'Africa, dell'Asia, dell'Oceania e dell'America del Sud. Nel 1980 venne dichiarato ufficialmente eradicato.²

Le strategie applicate sono state due: la vaccinazione sistematica della popolazione con l'obiettivo di immunizzare almeno 80% della popolazione nei paesi endemici e a rischio e l'accurata segnalazione di tutti i nuovi casi con l'obiettivo di isolare e vaccinare tutti i contatti.

È importante però sottolineare le varie tappe che nella storia hanno portato dalla variolizzazione alle innovative piattaforme vaccinali.

Inizialmente, sfruttando il principio empirico dell'immunizzazione, cinesi, turchi e indiani hanno sviluppato la pratica nota come "variolazione" o "variolizzazione". Questo metodo di prevenzione consisteva nell'infettare deliberatamente individui con l'obiettivo di causare una forma lieve della malattia, conferendo successivamente immunità. La variolazione ha avuto le sue origini probabilmente in Cina, dove i medici al servizio della dinastia Sung adottavano l'approccio di far aspirare ai membri della famiglia imperiale le croste secche di pustole del vaiolo attraverso il naso. Durante il XVII secolo la pratica della variolazione si è diffusa verso l'Occidente. Abitanti del Caucaso, come i circassi, hanno scelto di infettare volontariamente le donne per prevenire deformità causate dal vaiolo, inoculando materiale prelevato dalle pustole di individui malati sottocute. Verso il 1720 la variolazione venne introdotta anche nell'Europa occidentale. Un contributo significativo è venuto dall'esempio di lady Mary Wortley Montagu che ha fatto "variolizzare" suo figlio tramite l'inoculazione di materiale prelevato dalle pustole di individui affetti da una forma

lieve di vaiolo, attraverso graffi sulla pelle. Successivamente, si è adoperata per introdurre questa pratica anche in Inghilterra.³

Le strategie basate su estratti di vaiolo nel passato erano estremamente rischiose. Il vero passo avanti verso una pratica di vaccinazione sicura si è avuta alla fine del 1700, grazie al lavoro di Edward Jenner, medico e naturalista britannico. Jenner ha osservato che le mungitrici che venivano a contatto con le pustole del vaiolo vaccino, una malattia che colpiva le mucche, erano immuni alla forma umana del vaiolo. Per confermare la sua intuizione, Jenner ha deciso di inoculare il fluido prelevato dalle pustole di una mucca malata a James Phipps, il figlio di 8 anni di contadini locali. Successivamente ha esposto il bambino al vaiolo umano diverse volte, ma James è rimasto immune. Questo esperimento scientifico ha fornito la prova che l'infezione con la forma vaccina del vaiolo, che era lieve per gli esseri umani, conferiva immunità al vaiolo umano.

Da qui è derivato il termine “vaccino”, che letteralmente significa “delle mucche”, in riconoscimento dell’origine animale della pratica.³

Qualche anno dopo Louis Pasteur ha scoperto che il midollo spinale dei conigli, precedentemente inoculati sperimentalmente con il virus della rabbia, non era più infettivo dopo 15 giorni di essiccazione.

Il 6 luglio 1885 Joseph Meister, un bambino di 9 anni che due giorni prima era stato attaccato da un cane rabbioso, si è recato presso il laboratorio di Pasteur, dove ha ricevuto una serie di vaccinazioni con sospensione di midollo spinale di coniglio essiccato. Meister non ha sviluppato i sintomi della rabbia e si è ripreso completamente. La tecnica inventata da Pasteur è stata essenziale per lo sviluppo di vaccini contro rabbia, colera, varicella, carbonchio.

Poco dopo il veterinario francese Gaston Ramon alla fine del 1920 ha scoperto il trattamento di disattivazione delle tossine batteriche riscaldandole a 39-40 °C e trattandole con formolo.

Usando questo trattamento i vaccini anti difterite e anti tetano provocavano immunizzazione inoculando soltanto una parte del microrganismo, una sua subunità (in genere proteine), e non più il patogeno intero.

Il primo vaccino contro la poliomielite, sviluppato nel 1952 da Jonas Salk (1914-1995), era costituito da virus disattivati con la formaldeide secondo il metodo scoperto da Ramon.

Successivamente, nel 1937, Max Theiler ha attenuato il virus della febbre gialla mediante il passaggio seriale in embrioni di topo e pollo.

Costringendo il virus a crescere in cellule non umane, Theiler ha introdotto una serie di alterazioni genetiche cieche nel virus e ciò lo rendeva meno capace di provocare malattie, ma ancora in grado di indurre un'immunità protettiva. Per questo lavoro Theiler ha ricevuto nel 1951 il premio Nobel per la Fisiologia e la Medicina; i derivati del vaccino contro la febbre gialla di Theiler sono usati ancora oggi.

Nel XX secolo con questa tecnica sono stati sviluppati i vaccini vivi attenuati del morbillo, parotite, rosolia, varicella e rotavirus.

Un'ulteriore svolta fondamentale è avvenuta nel 1980, quando i biochimici di Stanford Richard Mulligan e Paul Berg hanno pubblicato i risultati dei loro esperimenti che coinvolgevano la trasfezione di cellule renali di scimmia con un gene di *Escherichia coli*, inducendo così le cellule di mammifero a produrre una proteina batterica: nasce così la tecnologia a DNA ricombinante.

Sistemi opportunamente "ingegnerizzati" furono realizzati utilizzando un lievito, *Saccharomyces cerevisiae*, o baculovirus, per esprimere la proteina di superficie del virus dell'epatite B (HBV); da allora sono diventati disponibili vaccini contenenti dette proteine purificate di HBV (1986), papillomavirus umano (2006) e virus dell'influenza (2013).

Il passaggio successivo si è raggiunto con la *reverse vaccinology* (2013). Questa tecnica consente la preparazione di un vaccino a partire dal genoma dell'agente infettivo, individuando i geni che codificano le proteine che fungono da antigeni. In particolare gli step prevedono:

- l'analisi della sequenza genomica;
- la selezione di antigeni, clonazione ed espressione su *Escherichia coli*;
- studi di risposta immunologica di protezione su cavia;
- definizione della composizione vaccinale in base agli studi epidemiologici molecolari;
- inizio fase clinica di fase I, II, III (studi di tollerabilità, sicurezza ed efficacia);
- *follow up* (fase IV).

Questa tecnica è stata utilizzata per meningococco B perché la struttura chimica del polisaccaride capsulare del meningococco B è molto simile a quella di alcune componenti molecolari presenti nel tessuto neuronale umano e quindi può essere considerata come un auto-antigene la cui somministrazione può causare reazioni immunitarie nel ricevente.

Inoltre il polisaccaride capsulare ha una scarsissima immunogenicità, che non viene modificata neppure dal processo di coniugazione con una proteina di trasporto.

Dunque si può affermare che la *reverse vaccinology* abbia diversi vantaggi:

- accesso a ogni antigene di superficie;
- selezionati antigeni presenti in quantità esigua;
- identificazione di antigeni non espressi in vitro;
- identificazione di Ag di microrganismi non coltivabili.

Recentemente sono state applicate nuove tecniche come le piattaforme a DNA e a mRNA. La più recente procedura messa al servizio della vaccinazione SARS-CoV-2 è stata proprio quella a mRNA. Questi vaccini utilizzano una molecola di RNA messaggero contenente le informazioni per produrre la proteina *Spike* di SARS-CoV-2.

La strada per giungere a questo importante risultato inizia nel 1961 con la scoperta dell'RNA messaggero passando per l'identificazione nel 2005 che il nucleoside a RNA modificato non è immunogenico.⁴

L'idea di utilizzare questa tecnica al servizio della vaccinazione è nata negli anni Novanta ma nessuno dei tentativi prima del 2013 ha portato a successi in ambito clinico. Successivamente, con la scoperta dell'associazione dell'mRNA con le nanoparticelle lipidiche la storia è cambiata.

Infatti le caratteristiche peculiari di questa piattaforma sono diverse:

- può essere sviluppata in pochi giorni o mesi sulla base delle informazioni di sequenziamento di un virus target;⁵
- grazie alle elevate rese delle reazioni di trascrizione in vitro, la produzione di mRNA può essere rapida, economica e utilizzabile in larga scala;
- non contiene elementi virali infettivi che comportano rischi di infezione e mutagenesi inserzionale; non contiene conservanti né adiuvanti;
- viene degradato dai normali processi cellulari e la sua emivita in vivo può essere regolata da varie modifiche e metodi di somministrazione;^{6, 7}
- evoca risposte immunitarie robuste da parte delle cellule B e T.⁸

Inoltre i farmaci a base di mRNA hanno un'impronta produttiva piccola e altamente flessibile, infatti:

- tutti i farmaci a base di mRNA nell'ambito di una particolare modalità utilizzano le stesse materie prime e gli stessi processi di produzione;
- la produzione clinica e commerciale può essere effettuata in "ballrooms" GMP utilizzando attrezzature mobili;
- le "ballrooms" possono essere facilmente riconfigurate per produrre prodotti diversi su scale diverse;
- una struttura può produrre molti prodotti diversi e può passare rapidamente da un prodotto all'altro in base alle esigenze.

Se da una parte lo sviluppo della tecnologia ha permesso di ottenere vaccinazioni sempre più efficaci e sempre più sicure, le campagne di sensibilizzazione, comunicazione e la divulgazione della cultura vaccinale hanno permesso di ottenere un'alta copertura vaccinale tra la popolazione e di evitare molte morti causate dalle malattie infettive.

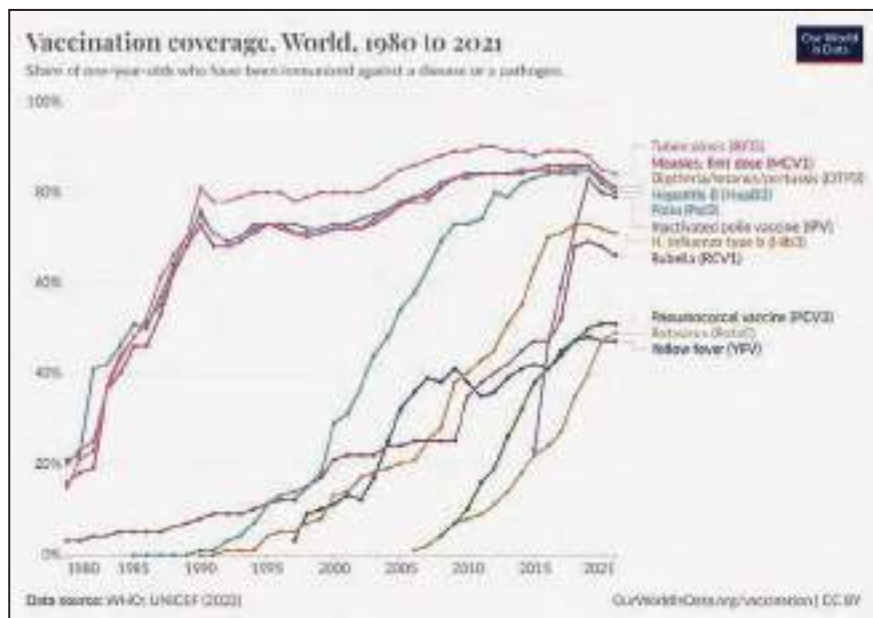


Figura 1. Coperture vaccinali nel mondo dal 1980 al 2021, WHO.

Se infatti si va ad analizzare le coperture a un anno di età (figura 1) a livello mondiale possiamo osservare che è stato superato:

- l'80% di copertura vaccinale per morbillo, difterite, tetano, pertosse ed epatite B
- il 70% di copertura vaccinale per *H. Influenzae* di tipo B
- il 50% di copertura vaccinale per Pneumococco
- il 40% di copertura vaccinale per Rotavirus.

La difterite e la poliomielite però sono malattie ancora da eradicare. Ad oggi infatti la difterite è endemica in Sud-Est Asiatico mentre la poliomielite in Afghanistan e Pakistan.^{9, 10}

Si può affermare che, a livello globale, si è riusciti a ridurre significativamente il numero di casi e ad aumentare le coperture vaccinali non solo per la difterite e la poliomielite, ma anche per il tetano (figg. 2, 3, 4).

In Italia, in particolare, si è raggiunta l'eliminazione della poliomielite, della difterite e della rosolia. L'Italia, insieme a tutta l'Europa, è stata dichiarata polio-free dall'OMS nel 2001.¹¹

Per comprendere quanto le vaccinazioni abbiano avuto un impatto sui tassi di mortalità è stato calcolato che in Italia la vaccinazione per

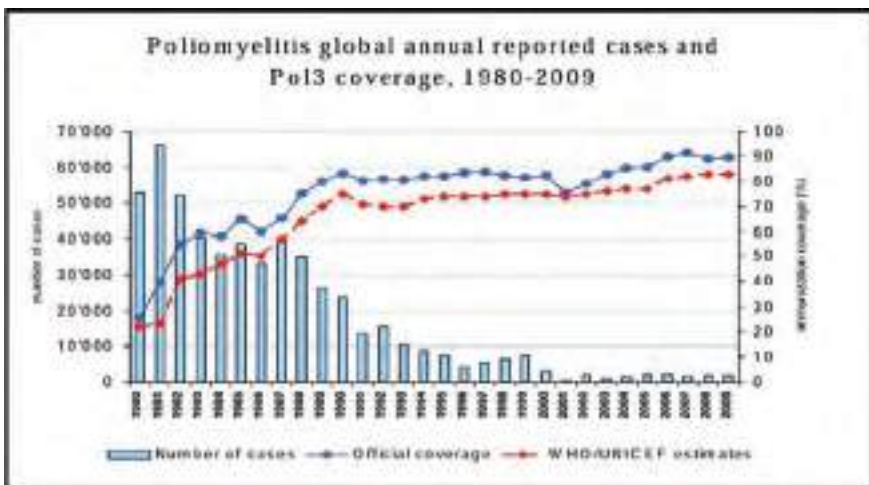


Figura 2. Casi riportati e coperture vaccinali per poliomielite dal 1980 al 2009, WHO.

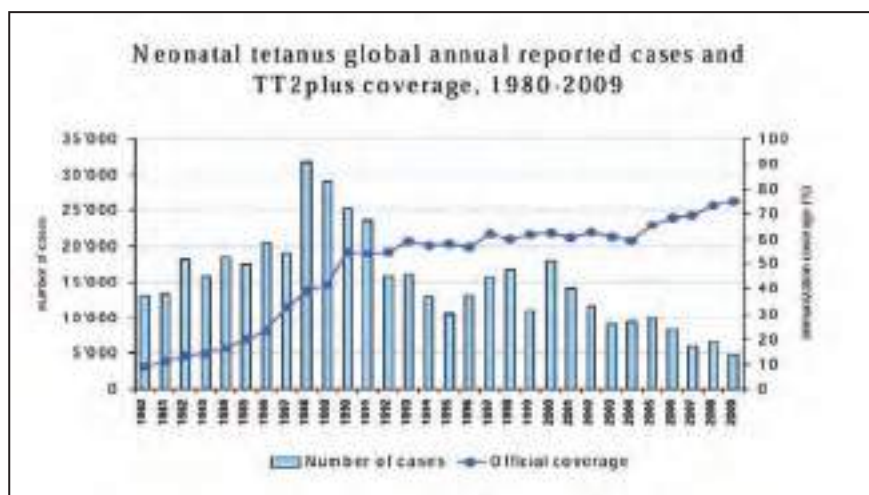


Figura 3. *Casi riportati e coperture vaccinali per tetano neonatale dal 1980 al 2009, WHO.*

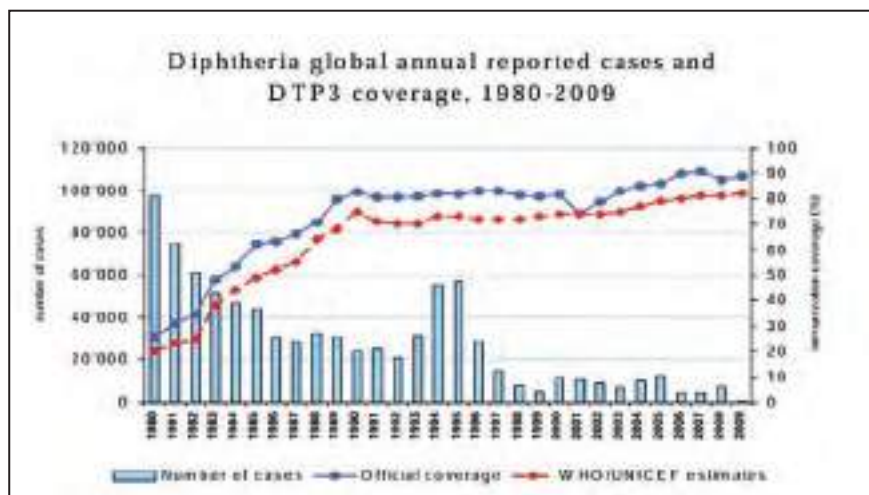


Figura 4. *Casi riportati e coperture vaccinali per difterite dal 1980 al 2009, WHO.*

la difterite nel periodo 1939-2012 abbia salvato circa 27.503 persone, la vaccinazione per il tetano nel periodo 1963-2012 abbia salvato circa 34.946 persone e la vaccinazione per la poliomielite nel periodo 1964-2012 abbia salvato circa 10.799 persone.¹²

Questi sono solo tre esempi ma attualmente sono più di 30 le malattie prevenibili da vaccino e questo ci fornisce un'idea di quante vite abbia salvato e possa salvare questa forma di prevenzione.

In Italia in particolare l'offerta vaccinale è approfondita nel Piano Nazionale di Prevenzione Vaccinale 2023-2025 (PNPV) dove sono elencati tutti gli obiettivi nazionali in ambito vaccinale.

Gli obiettivi individuati dal PNPV 2023-2025 sono:

- mantenere lo stato polio-free;
- raggiungere e mantenere l'eliminazione di morbillo e rosolia;
- rafforzare la prevenzione del cancro della cervice uterina e delle altre malattie HPV correlate;
- raggiungere e mantenere le coperture vaccinali target rafforzando *governance*, reti e percorsi di prevenzione vaccinale;
- promuovere interventi vaccinali nei gruppi di popolazione ad alto rischio per patologia, favorendo un approccio centrato sulle esigenze del cittadino/paziente;
- ridurre le disuguaglianze e prevedere azioni per i gruppi di popolazione difficilmente raggiungibili e/o con bassa copertura vaccinale;
- completare l'informatizzazione delle anagrafi vaccinali regionali e mettere a regime l'anagrafe vaccinale nazionale;
- migliorare la sorveglianza delle malattie prevenibili da vaccino;
- rafforzare la comunicazione in campo vaccinale;
- promuovere nei professionisti sanitari la cultura delle vaccinazioni e la formazione in vaccinologia.

Il calendario nazionale è rappresentato nella figura 5.

L'obiettivo dei programmi di prevenzione vaccinale è duplice: a livello del singolo individuo, quello di proteggere le persone dal rischio di contrarre determinate infezioni e dalle possibili conseguenze avverse a breve e lungo termine che possono verificarsi a causa dell'infezione, incluse forme gravi di malattia, ricovero, decesso; a livello di popolazione, quello di ridurre la circolazione di patogeni trasmissibili da persona a persona in una comunità, attraverso il controllo e, quando possibile, l'eliminazione o l'eradicazione di alcune malattie infettive, e di contrastare le epidemie.¹³

Un focus importante è legato alla vaccinazione per Papilloma Virus (HPV) prevista con il vaccino nove-valente a partire dagli 11 anni. È fondamentale sottolineare come questo sia un vaccino che, come

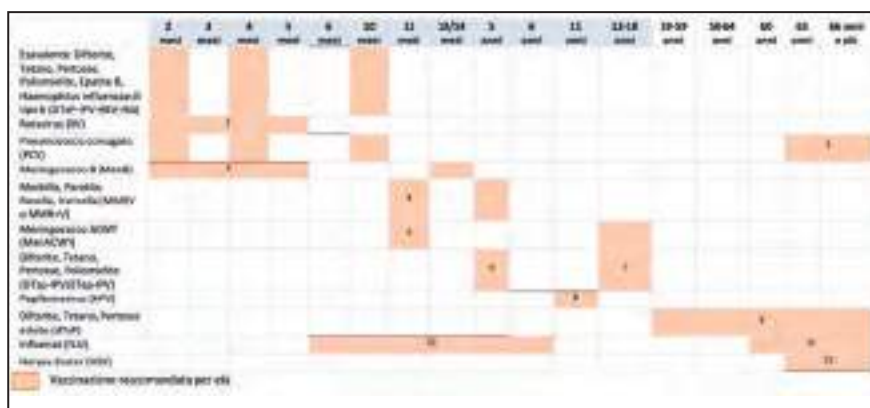


Figura 5. *Calendario vaccinale per età.*

quello per epatite B, previene l'insorgenza di neoplasie. Infatti circa 9 tumori anogenitali su 10 possono essere prevenuti con la vaccinazione nove-valente.¹⁴

I dati delle coperture vaccinali al 31 dicembre 2022 mostrano come nelle ragazze nella coorte delle 2010 (che compiono 12 anni nell'anno di rilevazione) la copertura sia stata del 38,8% mentre nella coorte delle 2009 (ragazze che compiono 13 anni nell'anno di rilevazione) la copertura sia stata pari al 56,2%. Nei ragazzi invece la copertura nella coorte 2010 (che compiono 12 anni nell'anno di rilevazione) risulta del 31,8% mentre nella coorte 2009 (ragazzi che compiono 13 anni nell'anno di rilevazione) risulta del 46,8%.¹⁵

La copertura vaccinale media per HPV in entrambi i sessi è al di sotto della soglia ottimale prevista dal PNPV (95% nel dodicesimo anno di vita).

Anche a livello regionale, nessuna Regione/PPAA. raggiunge il 95% in nessuna delle coorti prese in esame.¹⁵

È in corso una campagna di sensibilizzazione sulla vaccinazione per HPV dal nome "Proteggi il loro futuro" e l'obiettivo principale della campagna è quello di sensibilizzare la popolazione sull'importanza di questa vaccinazione, raccomandata e gratuita agli adolescenti (ragazzi e ragazze) a partire dagli 11 anni di età, prima dell'inizio dell'attività sessuale. Il momento critico per il contagio è nell'adolescenza e nella prima giovinezza.

Le basse coperture sicuramente sono influenzate dal fenomeno definito “*Hesitancy* vaccinale” che consiste nel ritardo nell’adesione o rifiuto della vaccinazione, nonostante la disponibilità di servizi vaccinali.

Questa *Hesitancy* è dovuta a vari fattori:

- ◇ Il ruolo del “Medico di riferimento”
 - Scarse conoscenze
 - Raccomandazioni errate
 - Sovrastima delle incertezze dei genitori
 - Discordanza delle informazioni
- ◇ Il ruolo dei genitori
 - Scarse conoscenze
 - Scarsa consapevolezza (impatto nel maschio, schedula vaccinale)
 - Preoccupazione che parlare della vaccinazione anti-HPV comporti affrontare anche la tematica sessuale
- ◇ Aspetti organizzativi
 - Mancanza di tempo per parlare di vaccinazioni durante la visita
 - MMG/PLS non sono collegati con l’anagrafe vaccinale
 - Soggetti difficili da raggiungere
 - Introduzione sfalsata delle raccomandazioni
- ◇ Criticità legate al vaccino
 - Mancanza di benefici immediati
 - Dubbi sulla necessità, sicurezza, costo, schedula¹⁶

In conclusione, si può affermare che le vaccinazioni con il loro sviluppo tecnologico hanno accompagnato per oltre due secoli la nostra storia permettendo di contrastare le malattie infettive in modo sempre più efficace e sicuro. Grazie ai vaccini infatti sono diminuiti i casi di molte malattie infettive, permettendo di abbattere la mortalità infantile dovuta a queste patologie e di prevenirne le complicanze più gravi. È necessario però affiancare allo sviluppo delle tecnologie anche un impegno costante nella comunicazione e nella formazione in campo vaccinale. È infatti grazie all’informazione che possiamo far comprendere l’importanza della vaccinazione a tutta la popolazione cercando di raggiungere coperture

sempre maggiori. Il vaiolo è stato esempio del fatto che con la vaccinazione è possibile eradicare una malattia salvando così moltissime vite. Con un impegno collettivo, dunque, vaccinandosi, si potrebbero sconfiggere altre patologie infettive e tumorali, come nel caso del Papilloma Virus e dell'epatite B. In questo modo, un giorno, si potrà parlare non solo delle tappe che hanno portato "dalla variolizzazione alle nuove piattaforme vaccinali", ma anche delle tappe che hanno segnato il passaggio dall'era in cui le malattie infettive erano protagoniste a un'era in cui le vaccinazioni le hanno rese comparse.

Bibliografia

- [1] Istituto Superiore di Sanità, Italia. <https://www.epicentro.iss.it/vaiolo/> (consultato il 14 giugno 2024).
- [2] Istituto Superiore di Sanità, Italia. https://www.epicentro.iss.it/vaiolo/pdf/Vaiolo_Storia.pdf (consultato il 14 giugno 2024).
- [3] Ministero della Salute, Italia. https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2586_allegato.pdf (consultato il 14 giugno 2024).
- [4] Sahin U., Karikó K., Türeci Ö. *mRNA-based therapeutics – developing a new class of drugs*. Nat. Rev. Drug. Discov. 2014;13:759-780. <https://doi.org/10.1038/nrd4278>
- [5] Pardi N., Hogan M.J., Porter F.W., Weissman D. *mRNA vaccines – a new era in vaccinology*. Nat. Rev. Drug. Discov. 2018;17(4):261-279.
- [6] Hassett et al. *Optimization of lipid nanoparticles for intramuscular administration of mRNA vaccines*. Mol. Ther. Nucleic. Acids 2019;15:1-11.
- [7] Nelson J. et al. *Impact of mRNA chemistry and manufacturing process on innate immune activation*. Sci. Adv. 2020 Jun 24;6(26):eaaz6893. doi:10.1126/sciadv.aaz6893. eCollection 2020 Jun.
- [8] Zhang L., Li Z., Skrzypczynska K.M., Fang Q., Zhang W., O'Brien S. A. et al. *Single-cell analyses inform mechanisms of myeloid-targeted therapies in colon cancer*. Cell 2020;181(2):442-459. e429. 10.1016/j.cell.2020.03.048
- [9] Ministero della Salute, Italia. <https://www.salute.gov.it/portale/malattieInfettive/dettaglioSchedeMalattieInfettive.jsp?lingua=italiano&id=2&area=Malattie%20infettive&menu=indiceAZ&tab=1#:~:text=La%20differite%20%C3%A8%20ancora%20una,la%20malattia%2C%20in%20particolare%20se> (consultato il 14 giugno 2024).
- [10] Istituto Superiore di Sanità, Italia. <https://www.epicentro.iss.it/polio/documentazione-mondo#:~:text=Al%20momento%20la%20poliomieliti>

- te%20da,Regione%20polio%2Dfree%20nel%202001 (consultato il 14 giugno 2024).
- [11] <https://www.iflow.it/vaccinare/?ZID=151&AID=1043&action=article&ID=91468> (consultato il 14 giugno 2024).
- [12] Pezzotti P, Bellino S., Prestinaci F, Iacchini S., Lucaroni F., Camoni L., Barbieri M.M., Ricciardi W., Stefanelli P., Rezza G. *The impact of immunization programs on 10 vaccine preventable diseases in Italy: 1900-2015 Vaccine*. 2018 Mar 7;36(11):1435-1443. doi: 10.1016/j.vaccine.2018.01.065. Epub 2018 Feb 7.
- [13] Istituto Superiore di Sanità, Italia. <https://www.epicentro.iss.it/vaccini/piano-nazionale-vaccini-2023-2025#:~:text=Gli%20obiettivi%20individuati%20dal%20PNPV,delle%20altre%20malattie%20HPV%20correlate> (consultato il 14 giugno 2024).
- [14] Hartwig S., Baldauf J.-J., Dominiak-Felden G., Simondon F., Alemany L., de Sanjosé S. et al. *Estimation of the epidemiological burden of HPV-related anogenital cancers, precancerous lesions, and genital warts in women and men in Europe: Potential additional benefit of a nine-valent second generation HPV vaccine compared to first generation HPV vaccines*. Papillomavirus Res. 2015;1:90-100. doi 10.1016/j.pvr.2015.06.003
- [15] Ministero della Salute, Italia. <https://www.salute.gov.it/> (consultato il 14 giugno 2024).
- [16] ECDC. <http://ecdc.europa.eu/en/publications/Publications/vaccination-motivating-hesitant-populations-europe-literature-review.pdf> (consultato il 14 giugno 2024).

Le vaccinazioni tra passato e futuro: dalla variolizzazione alle innovative piattaforme vaccinali

I vaccini tramite un loro progresso continuo nel corso della storia sono stati cruciali nel combattere le malattie infettive. La variolazione e il vaccino contro il vaiolo hanno segnato l'inizio di questo progresso, seguiti da altri come il vaccino antirabbico e contro la febbre gialla nel XX secolo. La tecnologia del DNA ricombinante e dell'mRNA ha portato a nuove forme di vaccini, come il vaccino mRNA per Sars-CoV-2 nella lotta alla pandemia. In Italia, le vaccinazioni hanno portato all'eliminazione di malattie come la poliomielite, la difterite e la rosolia ma la sensibilizzazione sull'importanza della vaccinazione rimane cruciale per prevenire la diffusione di malattie infettive.

Parole chiave: vaccinazioni; piattaforme vaccinali; prevenzione; hesitancy vaccinale; storia delle vaccinazioni.

Vaccination Between Past and Future: From Variolisation to Innovative Vaccination Platforms

Vaccines through their continuous progress throughout history have been crucial in combating infectious diseases. The variola and smallpox vaccine marked the beginning of this progress, followed by others such as the rabies vaccine and yellow fever vaccine in the 20th century. Recombinant DNA and mRNA technology led to new forms of vaccines, such as the mRNA vaccine for Sars-CoV-2 in the fight against the pandemic. In Italy, vaccinations have led to the elimination of diseases such as polio, diphtheria and rubella, but awareness of the importance of vaccination remains crucial to prevent the spread of infectious diseases.

Keywords: vaccinations; vaccine platform; prevention; vaccine hesitancy; history of vaccinations.

GIULIO MANUZIO

*La fusione nucleare e i suoi problemi.
Ovvero: come cuocere pizze senza un forno*

Quando si parla di fusione nucleare, spesso si constata una scarsa conoscenza del problema e del suo contesto. Il presente scritto vuole fare il punto della situazione collocandola in un quadro generale.

Verranno anzitutto chiarite alcune nozioni preliminari, poi verrà chiarito il meccanismo delle reazioni nucleari nel sole e finalmente si passerà a discutere dei tentativi di ricavare energia dalle fusioni nucleari sulla terra.

1. *Agitazione termica e temperatura*

Il primo concetto da ricordare è la connessione fra temperatura e agitazione termica. All'interno della materia le particelle che la costituiscono sono in perenne ed eterno movimento. In un gas o in un plasma come quello presente nelle stelle, l'agitazione termica consiste di un movimento caotico caratterizzato da continui urti tra le particelle (con eventuali scambi di energia) e di conseguenti continui cambiamenti della direzione di moto delle particelle. Nei plasmi, l'energia media E delle particelle (che è tutta energia cinetica) è direttamente collegata alla temperatura assoluta T del plasma (temperatura assoluta = temperatura Celsius + 273) da una relazione di proporzionalità diretta ($E = 3kT/2$). È perciò possibile indicare lo stato energetico delle particelle indicando la temperatura a cui si trovano e viceversa. In questo scritto ci riferiremo alla temperatura.

2. Due esempi importanti di reazioni di fusione nucleare

Il secondo concetto da ricordare è proprio quello di significato di fusione nucleare che verrà esemplificato:

a) indicando una reazione di fusione singola che, a partire dall'interazione di un nucleo di deuterio con uno di trizio, porta alla produzione di un nucleo di elio (figura 1) e,

b) indicando una catena di reazioni che porta a costruire ancora un nucleo di elio a partire da quattro nuclei di idrogeno (4 protoni) (figura 2).

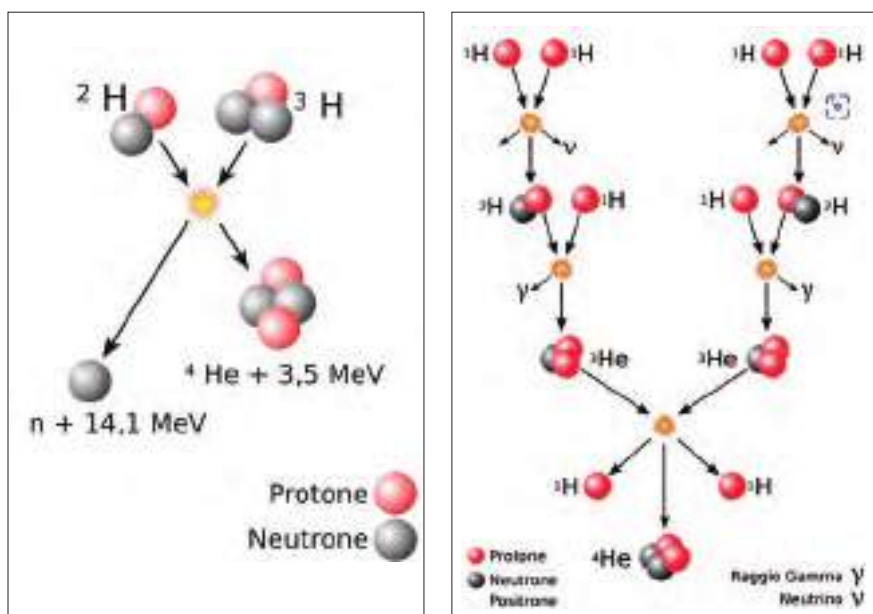


Figure 1 e 2. Produzione di nuclei di elio a partire da deuterio e trizio (1) e da 4 protoni (2). Fonte: Wikipedia.

Si noti (la precisazione diventerà importante nel seguito) che nella prima reazione viene anche prodotto un neutrone e che nella seconda reazione vengono prodotti due neutrini, due raggi gamma e due positroni. Dal momento che i positroni si annichilano rapidamente con elettroni formando ciascuno almeno una coppia di raggi gamma, si può anche semplificare l'affermazione precedente dicendo che la reazione di fusione di figura 2, oltre a produrre un nucleo di elio, produce due neutrini e almeno sei raggi gamma.

Se ci occupiamo di particelle immerse in un plasma, le due reazioni precedenti possono avvenire solo se l'energia di agitazione termica posseduta dal plasma è al di sopra di una temperatura di circa 150 milioni di gradi per la reazione singola e al di sopra di 15 milioni di gradi per la catena di reazioni di figura 2. Il motivo di ciò è dovuto al fatto che le forze nucleari responsabili del processo di fusione agiscono solo a distanze molto ravvicinate e che, quando l'energia dei nuclei è inferiore ai valori indicati, le forze di repulsione coulombiane impediscono ai nuclei di avvicinarsi quanto basta perché le forze nucleari possano entrare in azione.

3. *La fusione nucleare nel sole*

Le stelle si formano per la condensazione di enormi nubi fredde e rarefatte di gas (prevalentemente idrogeno) e di polveri (residui dell'esplosione di stelle che hanno concluso il loro ciclo di vita), quando, per effetto di qualche sollecitazione, le forze gravitazionali cominciano a prevalere sugli effetti dispersivi dovuti alla agitazione termica. A mano a mano che il sistema si contrae, diminuisce l'energia potenziale gravitazionale del sistema e, a causa della conservazione dell'energia, aumenta l'agitazione termica nella nube. La nube si scalda progressivamente e la nube comincia ad emettere luce (fase di protostella). Quando la temperatura al centro della nube raggiunge il valore a cui possono cominciare le reazioni di fusione nucleare (la figura 2 indica uno dei possibili canali di reazione) questo nuovo fenomeno aumenta localmente la temperatura. Infatti, le reazioni di fusione nucleare sono tutte caratterizzate dalla emissione di prodotti di reazione altamente energetici. Il riscaldamento del plasma prodotto da questo nuovo fenomeno arresta la contrazione gravitazionale della stella e il sistema raggiunge una situazione di equilibrio molto stabile. Se vi è un eccesso di fusioni il sistema si espande alquanto, diminuisce l'attività di formazione di nuovi nuclei e la forza di gravità riporta indietro il sistema; viceversa se prevale la gravità, aumenta l'attività di fusione e quindi la forza espansiva della temperatura.

Il nostro sole è in quella situazione di equilibrio da cinque miliardi di anni e continuerà ad esserlo per altri cinque miliardi di anni.

L'equilibrio così raggiunto richiede lo stabilirsi di una seconda forma di equilibrio e precisamente dell'equilibrio tra la quantità di idrogeno "bruciato" nel cuore della stella e l'energia persa dalla superficie della stella per irraggiamento. In un forno per pizze, la quantità di legna che deve essere bruciata per mantenere costante la temperatura del forno dipende dalla capacità delle pareti refrattarie del forno di rallentare il passaggio di energia calorica dall'interno verso l'esterno. Allo stesso modo, nel caso del sole, la quantità di idrogeno che viene "bruciata" nel suo nucleo (che ha le dimensioni di circa 0,2 raggi solari) dipende dal modo in cui le particelle, create durante i processi di fusione, contribuiscono alla dispersione di energia verso il cosmo. Come già precisato, tali particelle sono dei neutrini e dei raggi gamma. I neutrini fuoriescono immediatamente dal sole ma l'energia che essi asportano è relativamente modesta. Molto più importante è l'effetto di dispersione di energia provocato dai raggi gamma. Essi, una volta prodotti, vengono continuamente assorbiti e diffusi dalle particelle cariche che costituiscono il plasma solare. Iniziano dunque un lunghissimo "random walk" nello strato radiativo del sole (che si estende da circa 0,2 a 0,7 raggi solari e dove il plasma non ha importanti moti di massa). Per riuscire a diffondere al di là di tale strato, con brevissimi movimenti a caso tra due successive interazioni con il plasma, essi impiegano tempi dell'ordine di un centinaio di migliaia di anni e la loro energia diminuisce progressivamente con il diminuire della temperatura locale (da circa 7 a 2 milioni di gradi). Essi incontrano poi lo strato convettivo più esterno del sole (da 0,7 a 1 raggi solari) dove il trasporto di energia è più veloce e dove la temperatura scende da circa 2 milioni di gradi alla temperatura della superficie solare che ammonta a 5.500 °C. Mettendosi sempre in equilibrio con l'ambiente in cui essi si trovano, i raggi gamma iniziali si trasformano dapprima in raggi X, poi in radiazioni ultraviolette e, infine, in fotoni della luce visibile. È con questi passaggi che viene portata energia dal nucleo alla superficie del sole. Ed è da questi passaggi che si determina la capacità delle pareti del "forno-sole" di limitare la quantità di energia che deve continuamente essere rifornita al nucleo per compensare le perdite di energia attraverso le pareti (da 0,2 a 1 raggi solari) del "forno-sole" e quindi per mantenere invariata la sua temperatura a 15 milioni di gradi. Il risultato è che la superficie del sole si assesta alla temperatura già indicata di 5.500 °C a cui esso irradia energia nello

spazio circostante secondo le leggi fisiche dell'irraggiamento. È facile calcolare l'ammontare di tale energia. Dalle informazioni che arrivano da satelliti posti al di fuori dell'atmosfera terrestre, sappiamo che il flusso di energia solare che arriva sulla terra è pari a 1350 W/m^2 . Sapendo inoltre che la distanza terra-sole ammonta a 150 milioni di km e calcolando la superficie di una sfera di tale raggio, risulta che la superficie del sole irradia circa $3,9 \cdot 10^{26}$ watt. Dal momento che la fusione di quattro protoni in un nucleo di elio libera circa 32 MeV (circa $5 \cdot 10^{-12}$ joule), se ne deduce che il sole "brucia" 600 milioni di tonnellate di idrogeno ogni secondo. Dai dati ora indicati si può anche dedurre che, per ogni grammo di idrogeno "bruciato", viene liberata una energia di circa $6,5 \cdot 10^{11}$ joule/grammo.

Una idea molto naïf, e anche molto suggestiva, nasce dal confronto tra l'ultimo dato e la quantità totale di energia fossile consumata ogni secondo da noi umani che ammonta a circa $150 \cdot 10^{11}$ joule al secondo. Se riuscissimo a bruciare idrogeno sulla terra (a rendimento unitario) basterebbe bruciare ogni secondo $150/6,5$, e cioè circa 23 grammi di idrogeno, per risolvere ogni problema di rifornimento di energia senza produrre alcun inquinamento!

Ma è solo un bel sogno. L'impresa è del tutto impossibile e il motivo è che non è possibile realizzare un "forno" e cioè un ambiente chiuso, la cui temperatura interna sia di 15 milioni di gradi, in cui confinare dell'idrogeno e dargli il tempo sufficiente perché, senza perdere particelle, possa avvenire una catena di reazioni come quella indicata in figura 2.

4. *Dal sole alla terra*

L'unico modo di produrre energia da fusione nucleare qui sulla terra può consistere nel far avvenire una sola reazione di fusione in ambiente controllato e nello sfruttare opportunamente l'energia delle particelle così prodotte.

La reazione più studiata e sperimentata è la reazione già indicata e mostrata in figura 1.

Se si riesce, con mezzi esterni, a conferire a un plasma di nuclei di deuterio e di tritio una energia corrispondente alla temperatura di

150 milioni di gradi, la reazione di fusione di figura 1 può aver luogo e liberare nuclei di elio (di energia relativamente modesta e difficilmente sfruttabile) e, soprattutto, neutroni notevolmente energetici (17 MeV) che, non essendo trattenuti da nessun sistema di confinamento, andranno a scaricare la propria energia, sotto forma di energia termica, sulle pareti che circondano l'ambiente in cui è avvenuta la fusione. L'energia termica catturata da tali pareti può essere sfruttata in vario modo ma, nella situazione più semplice, può essere utilizzata per produrre vapore d'acqua in pressione che può far ruotare una turbina e un alternatore per produrre energia elettrica. Sarebbe un modo abbastanza ovvio di sostituire la produzione di vapore fatta con combustibili fossili nelle normali centrali elettriche (figura 3).

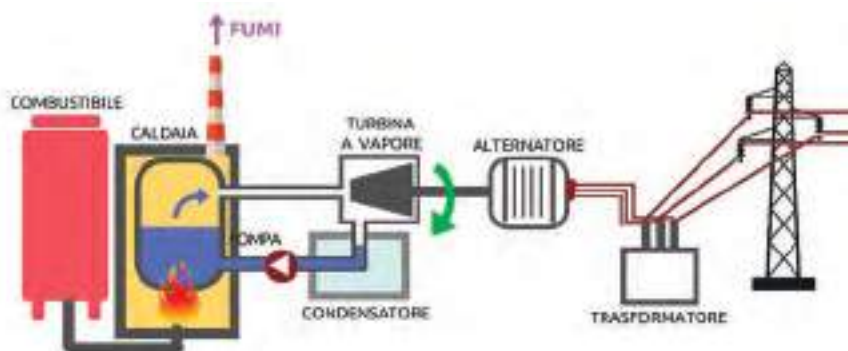


Figura 3. Schema di principio di una centrale termoelettrica.

Fonte: tecnologiaduepuntozero.altervista.org.

Si evince da tale descrizione dei principi di sfruttamento di possibili reazioni di fusione nucleare qui sulla terra che: a) non è vero che si possa mimare sulla terra quanto avviene nel sole; b) non è vero che la fusione nucleare sia “pulita” e cioè che non produca scorie, anche se è vero che si può agire facendo in modo che i neutroni, dopo aver ceduto a una parete la propria energia, possano essere assorbiti da nuclei che, trasformandosi in nuclei radioattivi, non abbiano vite medie ragguardevolmente lunghe; c) va infine notato che occorre prestare attenzione

al bilancio energetico complessivo: si ricava energia dai neutroni prodotti, ma occorre immettere energia nel sistema per portare il plasma di deuterio e trizio alla temperatura di 150 milioni di gradi, occorre energia per ottenere deuterio da idrogeno ricavato per elettrolisi dall'acqua, occorre ancora più energia per procurarsi del trizio che è un isotopo instabile con una vita media di 14 anni, che si forma per azione di raggi cosmici nell'alta atmosfera e viene poi trasportato a terra dalla pioggia in quantità minima e che, dunque, per essere usato come combustibile nucleare va prodotto con acceleratori o reattori. Senza mettere in conto le spese di ammortamento degli impianti.

5. *Due possibili vie di realizzazione pratica*

Per portare un mix di trizio e di deuterio a 150 milioni di gradi si stanno sperimentando oggi principalmente due diversi sistemi.

Il primo, suggestivamente molto comprensibile, consiste nel fornire energia, mediante un elevato numero di laser di potenza, a un sottile strato di atomi di deuterio e di trizio. Tali atomi sono depositati (a una temperatura di -260°C , sulla superficie interna di una piccola sferetta di vetro. Investita da una grande quantità di energia (alcuni megajoule) da circa 200 laser di potenza in tempi brevissimi (frazioni di milionesimo di secondo) la sfera evapora e lo strato di deuterio e trizio viene compresso verso il centro della sfera e, contemporaneamente scaldato alla temperatura di fusione dei nuclei. È la tecnica tipicamente usata dal Lawrence Livermore National Laboratory.

Con grande risonanza mediatica e un poco di imbroglio sui risultati reali, il suddetto laboratorio ha annunciato che il 13 dicembre 2022 ha fornito alla sferetta una energia di 2,05 Megajoule ottenendo dalla fusione deuterio-trizio 3,54 Megajoule e ha dunque sostenuto che, finalmente, si è ottenuta più energia dalla fusione di quanto non se ne sia spesa per produrla. Peccato che, opportunamente interrogati, i portavoce abbiano confessato che l'energia totale necessaria per produrre i 3,52 Megajoule ottenuti ne avessero richiesto complessivamente 300. In questa direzione siamo dunque lontani da un risultato che faccia sperare di utilizzare la fusione nucleare in tempi brevi. Il laboratorio parla di qualche decina di anni ma non indica un programma.

Il secondo tipo di approccio al problema della fusione consiste invece nel confinare sotto vuoto nuclei di deuterio e trizio in presenza di un campo magnetico molto intenso e che abbia delle linee di forza circolari. In tal caso le particelle del plasma sono costrette a rimanere confinate in orbite che spiraleggiano intorno alle linee di forza del campo (figura 4).

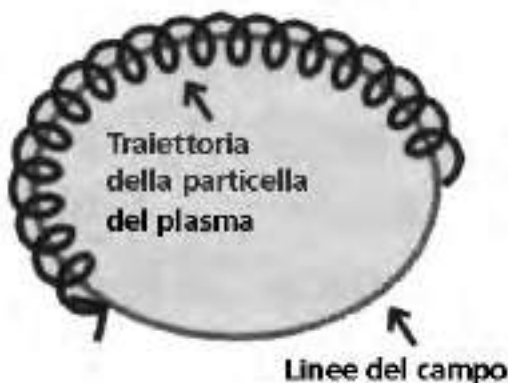


Figura 4. *Moto di particelle cariche in un campo magnetico solenoideale.*

Fonte: S. Baroni, La fusione nucleare. Mito o realtà?, Hoepli, 2003.

Utilizzando opportuni campi elettrici è ora possibile far aumentare l'energia delle particelle del plasma fino alla temperatura di fusione.

Vi sono in giro per il mondo molte sperimentazioni di questo tipo, ma, certamente, la più imponente e la più costosa è ITER. È un esperimento a partecipazione largamente internazionale che è collocato nella bassa Francia e prevede l'uso di giganteschi magneti superconduttori per creare il campo magnetico solenoideale di confinamento del plasma. In internet l'esperimento è abbondantemente descritto e dunque non verrà data qui una sua descrizione dettagliata. Anche nel caso di ITER i tempi sono lunghi. Allo stato attuale si prevede di iniettare plasma nel 2033 e di cominciare a realizzare delle fusioni dal 2039.

In conclusione, al momento attuale non è prevedibile a tempi brevi l'utilizzo delle reazioni di fusione nucleare per alleviare i problemi posti dalla crisi climatica.

La fusione nucleare e i suoi problemi

Lo scritto intende chiarire lo stato della ricerca sulla fusione nucleare. Vengono anzitutto chiariti i concetti base. Viene poi discusso il meccanismo della fusione nucleare nel sole. Infine vengono illustrati due possibili metodi di produzione di energia da fusione nucleare sulla Terra e si fa cenno alla relativa schedula temporale.

Parole chiave: fusione nucleare; funzionamento del sole; centrali termoelettriche; ITER.

The Nuclear Fusion and its Problems

The paper aims to clarify the state of the research on nuclear fusion. After some basic clarification, the fusion processes in the sun will be discussed. Then the possible ways of achieving nuclear fusion on earth, with the intent of producing energy, will be discussed together with their temporal schedules.

Keywords: nuclear fusion; how the sun works; thermoelectric power plants; ITER.

PAOLO MODENESI

Licheni: dal passato al presente

Ricorre quest'anno il bicentenario dell'invenzione del microscopio acromatico di Giovanni Battista Amici: ingegnere, matematico, ottico, astronomo e naturalista. Fino ad allora le immagini al microscopio ottico soffrivano di forti aberrazioni cromatiche, consistenti nella comparsa di aloni colorati e sfuocati ai margini degli oggetti osservati. Il fenomeno era dovuto alla difficoltà di mettere a fuoco, nello stesso punto, luce di diverse lunghezze d'onda. Amici mette a punto un sistema ottico che riduce drasticamente l'aberrazione accoppiando due vetri diversi. La lichenologia moderna nasce da questa innovazione. Nel 1867 le migliorate condizioni di studio permettono a Simon Schwendener, botanico svizzero, di ipotizzare che i licheni non siano semplici vegetali primitivi, come fino ad allora considerati, ma associazioni di un fungo dominante e di una popolazione di alghe terrestri microscopiche.

I licheni sono funghi specializzati nutrizionalmente, da un punto di vista sistematico non costituiscono una entità tassonomica separata, ma sono integrati nel regno dei Funghi. Il termine *Lichenes*, che li definiva come gruppo sistematico, è da considerarsi obsoleto, poiché la lichenizzazione (il sistema associativo di un fungo e una popolazione algale) è solamente una *way of life*, uno stile di vita, fungino. Da ciò deriva che il nome specifico di un lichene – per esempio *Xanthoria parietina* – si riferisce al solo partner fungino, il partner algale ha un altro nome.

I funghi che formano licheni sono circa un quinto – circa ventimila specie – di tutti i funghi e circa la metà degli ascomiceti, i funghi a

coppa e ciò testimonia il successo di questa strategia nutrizionale. Esistono altri esempi di funghi simbiotici, per esempio quelli micorrizici che stabiliscono un rapporto stabile con le radici delle piante superiori da cui derivano idrati di carbonio (Modenesi 2015).

Tra licheni e micorrize esiste tuttavia una evidente differenza che si manifesta, nei primi, nella formazione di un corpo vegetativo, il tallo, che risulta dalle interazioni fra i partner simbiotici. In molti licheni circa il 90% della biomassa tallina è formata dalle ife del fungo, che quindi è il partner predominante. Le ife si organizzano per alloggiare nelle migliori condizioni funzionali la popolazione fotosintetica; da questa esigenza di funzionalità e integrazione derivano delle tendenze evolutive, relative alla forma del tallo, che sono estranee alla “filosofia fungina”, ma che sono proprie di un vegetale fotosintetico. Un tipico corpo fungino, “filosoficamente corretto” è un micelio che si espande nel nutrimento (pane ammuffito, terreno, ospite) per favorire l’assorbimento eterotrofo, mentre un tipo di corpo vegetale autotrofo “filosoficamente corretto” aumenta la superficie di contatto con l’atmosfera, sviluppando un corpo tridimensionale che favorisce gli scambi gassosi e l’assorbimento di energia luminosa necessari per la fotosintesi. Si potrebbe dire che il fungo lichenizzato si accorge che esiste un fattore ambientale determinante per le sue possibilità di successo evolutivo, un fattore generalmente non importante per i funghi, ma essenziale per la popolazione algale che ospita: la luce. Così il tallo lichenico, il fenotipo simbiotico, evolve da forme crostose e fogliose a simmetria dorsoventrale, verso forme decisamente vegetali, dette fruticose (da frutice, arbusto), arborescenti e tridimensionali, in cui si realizza il massimo dispiegamento della superficie di contatto con l’atmosfera. Come già detto, generalmente i funghi che formano licheni sono ascomiceti, i funghi che presentano strutture riproduttive a coppa più o meno concava (ascocarpi) che mantengono nel tallo lichenico. Una piccola percentuale intorno all’1% sono basidiomiceti (funghi a cappello) generalmente tropicali.

L’anatomia del tallo lichenico presenta, generalmente, una tipica divisione in strati funzionali sovrapposti. Lo strato più superficiale (cortex) è formato da ife fungine strettamente agglutinate che formano una struttura compatta, rigida, con funzioni strutturali di sostegno per i più lassi tessuti interni. Il cortex, inoltre, ha ruolo di interfaccia con l’atmosfera

da cui il tallo deriva gas, luce, umidità e nutrienti minerali (deposizioni secche ed umide), essenziali per il metabolismo. Al di sotto del cortex le ife fungine formano un tessuto spugnoso, lasso e ricco di spazi vuoti, la medulla, che nella sua porzione superiore, appena sotto il cortex, ospita la popolazione algale. I due contraenti sono differenziati dalle modalità riproduttive. Il fungo le mantiene, conserva la capacità di riproduzione sessuale formando, in corpi fruttiferi, le spore meiotiche. L'alga le perde, potendosi solo moltiplicare per via asessuale. Sarebbe "imbarazzante" per il fungo lichenizzato avere una popolazione algale indisciplinata, messa in disordine dalla variabilità che deriva dalla riproduzione sessuale, molto meglio farla moltiplicare per avere una popolazione uniforme e produttiva. È questa la logica di un allevamento e, a ben vedere, un tallo lichenico è un allevamento di alghe organizzato da un fungo che forma una struttura comparabile a una serra, adatta a contenerle.

Secondo un interessante punto di vista le strategie di nutrizione fungina (parassitismo, saprotrofismo, simbiosi) mostrano analogie con alcuni aspetti dell'organizzazione delle società umane. Così come da piccole comunità primitive di cacciatori-raccoglitori, la società umana evolve verso comunità di agricoltori, i funghi evolverebbero in modo simile realizzando l'agricoltura con la simbiosi lichenica. Il controllo agricolo sulle risorse alimentari assicura stabilità, possibilità di occupare nuove nicchie ecologiche, aumento della popolazione e formazione di corpi vegetativi sempre più efficienti e autosufficienti. Si stima che circa il 12% degli ecosistemi terrestri siano dominati dai licheni, questo con riferimento alla superficie coperta, cioè al tipo di vegetazione dominante. Il dato può sorprendere ma, se si pensa alle superfici rocciose apparentemente nude, le creste delle montagne, i deserti rocciosi, le tundre polari e alpine, a tutti quei luoghi dove la temperatura, troppo alta o troppo bassa, la mancanza d'acqua, l'estrema irradiazione luminosa pongono seri limiti alla vita delle piante superiori, allora si comprende il dato. In questi luoghi i licheni hanno un vantaggio adattativo potendo vivere per lungo tempo in condizioni di vita sospesa, senza danni irreversibili quando si disidratano e potendo crescere, invece, quando le condizioni diventano favorevoli alla vita anche per poche ore durante il giorno, pagando naturalmente in termini di crescita estremamente lenta. Non bisogna, comunque, pensare che i licheni prosperino solo in ambienti estremi, al contrario, ambienti ricchissimi di specie sono,

per esempio, le foreste tropicali ed equatoriali che ospitano una straordinaria varietà di specie epifite (sulle cortecce) e foliicole (sulle foglie).

Nonostante l'ampiezza della capacità del loro adattamento ecologico, molti licheni sono però sensibili alle variazioni delle loro preferenze ecologiche e sono quindi preziosi testimoni delle alterazioni ambientali. Questo fatto giustifica l'interesse per questi organismi impiegati con successo per il biomonitoraggio ambientale. Questo è un argomento di grande attualità, poiché rappresenta proprio il volano che ha spinto in avanti tutti gli studi che riguardano la biologia e la sistematica dei licheni (Nimis 1988). L'idea di partenza del monitoraggio ambientale utilizzando i licheni è semplice. In breve, è basata su un'osservazione che chiunque può fare osservando le cortecce degli alberi nella sua città, meglio se una grande città: sono nude e non appaiono crescite di licheni ma, allontanandosi dal centro, oltre la periferia urbana, in zone più remote, le cortecce iniziano a popolarsi sempre più densamente. Ancora: quando nelle città si adottano durevoli misure di riduzione dell'inquinamento, si può osservare che dopo pochi anni le cortecce iniziano a ripopolarsi di licheni. L'osservazione che la biodiversità della flora lichenica epifita dipenda dall'impatto dei contaminanti atmosferici risale all'Ottocento, ma è stata dimostrata e resa utilizzabile come strumento conoscitivo solo alla fine degli anni Ottanta del secolo scorso e ora è normalmente impiegata come parametro affidabile per il controllo dell'inquinamento atmosferico, nocivo per gli esseri umani in quanto i meccanismi di tossicità per i licheni e per noi da parte degli inquinanti sono gli stessi.

Dall'Egitto proviene il più antico esemplare di lichene conservato oggi esistente. Si tratta di *Pseudevernia furfuracea*, raccolta oltre tremila anni fa in una località sconosciuta e rinvenuta in un cestino di fibre vegetali intrecciate verso la fine dell'Ottocento da Georg Schweinfurth, botanico ed etnologo tedesco. Il reperto mostra diversi frammenti di talli provenienti da quel cestino, contenuti in una scatola decorata novecentesca e conservati al Museo Botanico di Berlino-Dahlem (Seaward e Sipman 2006). Il ritrovamento è avvenuto in una sepoltura della XXI dinastia (1069-945 a.C.) nel deposito nascosto nei pressi di Deir el Bahari (nascondiglio dB320) (Baumann 1960). Sicuramente l'esemplare non proviene dall'Egitto, dove la specie è assente, oggi così come presumibilmente nell'antichità. L'habitat ideale di *Pseudevernia* nelle

regioni mediterranee è rappresentato da zone più elevate, dai 1000 ai 2000 m. Le zone più prossime all'Egitto da cui è possibile che provenga il materiale sono le montagne del Libano, Cipro, Creta e l'arcipelago greco. Il ritrovamento, assieme ai talli, di frammenti di cortecce di una specie riferibile al genere *Abies*, ha fatto propendere gli studiosi per una probabile origine greca, cretese in particolare. Nel canestro oltre alla specie citata sono presente frammenti di *Usnea plicata* e alcuni steli di *Cymbopogon schoenanthus*. La prima, assente in Egitto, proveniva probabilmente dalla raccolta casuale nel luogo di crescita di *Pseudevernia*, la seconda è un'erba aromatica, presente in Nord Africa, il cui fogliame fragrante è ancora usato come analgesico, antiossidante e deodorante. Il nascondiglio dB320 si trova nella necropoli tebana, e qui furono nascoste oltre cinquanta mummie di sovrani, regine e dignitari provenienti da varie sepolture (Germer 1993). Il sito del ritrovamento era originariamente la tomba di un sacerdote di Amon, morto nel 969 a.C., e della sua famiglia. Divenne in seguito il nascondiglio dove furono depositate altre mummie, prelevate da altre sepolture e qui nascoste per sottrarle ai saccheggiatori di tombe durante un periodo di declino dell'autorità. La tomba venne scoperta nel 1881 dall'archeologo Émile Brugsch che si calò attraverso un camino verticale coperto da pietre e detriti. Il ritrovamento pone due domande: 1) perché era considerato utile per il defunto avere a disposizione un canestro pieno di licheni? 2) quale funzione importante potevano avere, visto che erano importati da altri paesi? Purtroppo, non esiste una risposta certa, non c'è nessuna prova, solo indizi. Il primo indizio riguarda la mummificazione. Questa nell'antico Egitto era la pratica necessaria per ottenere la vita dopo la morte, poiché il Ka, la forza vitale individuale, l'essenza trasmissibile anche ai figli, aveva bisogno del corpo del defunto che doveva rimanere intatto per poter esistere. Il tipo di mummificazione variava secondo la classe sociale alla quale apparteneva l'interessato: ne conosciamo almeno tre tipi, dal più complesso al più semplice, e di conseguenza dal più costoso al più economico (Baumann 1960). Vi erano sacerdoti e tecnici addetti a queste pratiche, che consistevano nell'asportazione dei visceri e del cervello, conservati poi separatamente e sepolti assieme al defunto. Dopo l'essiccazione del corpo con il natron, una miscela naturale di carbonato, bicarbonato, solfato e cloruro di sodio, l'addome era riempito con materiali diversi, per impedirne il collasso e favorirne la conservazione.

Almeno nelle sepolture più costose i materiali erano una miscela complessa e variabile, composta da resine di conifere (cedro, ginepro, pino), mastice (*Pistacia lentiscus* var. *chia*), mirra (*Commiphora* spp.), cera d'api, bitume, cannella o cassia (cannella cinese *Cinnamomum cassia*), cipolla, henna, gomma arabica e, ormai non a sorpresa, *Pseudevernia furfuracea*. Può sembrare una bizzarria l'idea alla base dell'intero processo, ma la composizione del ripieno addominale è molto ragionevole. Tutti questi derivati vegetali hanno una efficacia comune, sono conservanti: insetticidi, antifungini, antibatterici e antiossidanti (Perez-Llano 1944; Huneck 1999). Il bitume, che consiste in una miscela di idrocarburi che impregna rocce o sabbia in zone petrolifere, rappresenta nelle mummie un substrato indisponibile per la proliferazione di microrganismi e determina il colore nero delle ossa e della pelle. Le resine, oltre che conservanti, tendono a polimerizzare formando una fitta rete di legami incrociati tra loro e con le altre sostanze, stabilizzando in questo modo i fragili tessuti del corpo e creando una barriera fisico-chimica alla proliferazione di microrganismi. *Pseudevernia* non era un componente fisso, appare però usata frequentemente, e le determinazioni sicure fatte finora coprono un periodo d'uso superiore ai duemila anni. Le più antiche risalgono all'XI dinastia egizia (2150 a.C.) fino alla XIII, come riferito dagli archeologi Merrillees e Winter nel 1972 che però non riportano i nomi dei defunti interessati (Germer 1988). Non sono riportati anche i nomi di un maschio ignoto della XXIII o XXIV dinastia (743-717 a.C.) e di una donna del III secolo d.C. trovata ad Antinopolis, città romana dell'alto Egitto fondata dall'imperatore Adriano in onore del suo amante Antinoo (Modenesi 2015). Defunti riconosciuti in cui è stata impiegata *Pseudevernia* sono: Mérenptah, quarto faraone della XIX dinastia, tredicesimo figlio di Ramsete II; Siptah (circa 1206-1188 a.C.); Ramsete IV, terzo faraone della XX dinastia (1185 a.C.); Djedptahefanch, sacerdote di Amon della XXI dinastia (Germer 1988, Dawson 1934) e Abothloé, una ragazza egizia, datata in intorno al 700 a.C., di provenienza sconosciuta conservata al Redpath Museum della McGill University in Canada. In quest'ultimo caso sono state eseguite delle analisi chimiche sui campioni di tallo che hanno rilevato, ancora dopo più di 2000 anni, la presenza delle sostanze licheniche tipiche della specie. Il secondo indizio riguarda gli aromi e la co-presenza di un'erba aromatica induce a pensare alla manifattura egizia di unguenti e pro-

fumi. Troviamo una sua rappresentazione nell'opera di James Breasted, un archeologo statunitense. Alla fine dell'Ottocento Breasted iniziò a lavorare a una compilazione di tutti i geroglifici ancora esistenti; l'opera venne pubblicata nel 1907 come *Ancient Records of Egypt* in cinque volumi. La ricostruzione di Breasted è basata sulle incisioni che accompagnano i geroglifici e che mostrano le antiche procedure di manifattura: le erbe aromatiche vengono frammentate e pestate, aggiunte a grasso fuso e mischiate, sagomate in coni e lasciate raffreddare. Sono presenti, inoltre, vasi contenenti vino speziato ed è illustrata la sua filtrazione. L'uso dei coni consisteva nel porli sulla testa e lasciare che il grasso colasse sui capelli profumandoli. Un altro possibile indizio riguarda la panificazione (Modenesi 2015).

Peter Forsskål (1732-1763) è stato un esploratore, orientalista e naturalista svedese che venne ingaggiato nel 1760 da Federico V di Danimarca per partecipare a una spedizione in Arabia con base in Egitto. Morì di malaria durante il viaggio. Venne pubblicato postumo il suo elenco delle piante raccolte nello Yemen e nel basso Egitto: *Flora Ægyptiaco-Arabica sive descriptiones plantarum quas per Ægyptum Inferiorem et Arabiam felicem detexit, illustravit Petrus Forsskål*. Riporto qui il testo e di seguito la traduzione della pagina che riguarda *Evernia prunastri* tradotta gentilmente dal prof. Giovanni Mennella dell'Università di Genova. Un'altra giustificazione per la citazione completa è che spesso viene riportata erroneamente. Forsskål non sostiene che i licheni facciano lievitare il pane, sostiene che erano usati per le proprietà aromatizzanti, come spezie. È l'identico parere di Renate Germer già citata sopra. Inoltre, il testo latino è bello.

Lichen prunastri L. Lichen hic Aegypti indigenus non est; singularem tamen attentionem dignus, propter usum in re pistoria. Nescit Aegyptus artem cereviasiam more europaeo parandi; hinc et fermentum ignorat. Chamir ejus locus adhibetur, quae massa est panis non cocta, et laevissime acescens. Haec mixta cum farina subacta, fermentationem producit. In hoc secreto primus deceptus fui. Plurimum audiui nomen Shibah, herbae cujusdam, mihi ignotae, sine cujus admixtione nullus conficitur panis. Allata mihi fuit Artemisia quam eodem nomine denotant Arabes, propter colorem cinerascens; significant enim Shibah capillos canos. Verum tamen exemplar obtinui, et admirabundus agnovi plantam Hyperboream.

Totis navium oneribus Alexandriam advehitur ex Archipelago, et praesertim Insula Stanchio. Rosettae, Kahirae et aliis loci distribuitur. Hujus lichenis manipulo aqua per duas horas imbuitur; quae panis azymo adjecta gustum conciliat peculiarem et Turcis delicosum. Lichen furfuraceus quoque in usu est, sed parcius affertur.

Lichen prunastri L. Questo lichene non è originario dell'Egitto, ma è degno di uno speciale interesse per l'uso che se ne fa nella panificazione. L'Egitto non conosce il modo di preparare la birra come avviene in Europa, e perciò ignora anche la tecnica della fermentazione. Il suo posto è preso dal chamir, che è una massa di pane non cotta, e appena appena acidula. Essa, mescolata all'impasto della farina, sviluppa la fermentazione. Questo particolare sulle prime mi era sfuggito. Avevo inteso assai spesso il nome "shibah" di un'erba a me ignota, senza la cui mistura non può confezionarsi alcun tipo di pane. Mi fu riferito che gli arabi chiamano col medesimo nome l'artemisia, per il suo colore cenerino: "shibah", infatti, vuol dire "capelli canuti". Alla fine, però, sono giunto in possesso di un esemplare, e con grande sorpresa vi ho riconosciuto una pianta iperborea. Con rotte impegnative viene portata ad Alessandria dall'arcipelago, ma soprattutto dall'isola di Stanchio, e la si smista a Rosetta, Kahirae e in altri luoghi. Una manciata di questo lichene viene tenuto in acqua per due ore e, aggiunta all'azzimo del pane, gli conferisce un gusto particolare e molto gradito ai Turchi. È in uso anche il lichene furfuraceo, ma è assai meno diffuso.

Ho riportato l'intero passo perché troviamo delle assonanze con quello descritto sopra e in altri capitoli. Le illustro schematicamente: 1) impiego di *Evernia prunastri*, più pregiata, aromatica, molto somigliante a *P. furfuracea*, questa usata solo come ripiego, comunque specie intercambiabili; 2) la provenienza dall'arcipelago greco, in particolare da Kos (Stanchio); 3) la confusione possibile con l'artemisia per il colore, il gusto amaro, l'aspetto vagamente simile, almeno da secca, e il nome comune, nome che ritroviamo nel paragrafo riguardante le cucine arabe in questo libro; 4) il significato di capelli bianchi ancora usato nei paesi arabi e che, bianchi o neri, ritroviamo anche nei geroglifici; 5) l'uso della pasta madre (*chamir*) per la lievitazione. Il pane era la base dell'alimentazione degli antichi egizi e faceva parte delle offerte per i defunti assieme alle materie prime necessarie alla panificazione e ciò potrebbe giustificare

la presenza del canestro citato prima. Naturalmente non era il nobile defunto che si metteva ad impastare nell'aldilà, per questo e altri scopi venivano posti nelle tombe anche i modelli di vari artigiani, gli Ushabti, perché servissero il defunto nelle incombenze domestiche.

La coltivazione dei cereali era una delle attività più importanti, favorita e scandita dalle annuali inondazioni del fiume Nilo che, lasciando sul terreno grandi quantità di fertile limo, permettevano di effettuare anche due raccolti all'anno. Proprio il livello raggiunto dalla piena del fiume, misurato con i famosi nilometri, indicava le potenzialità di raccolto e le imposte che i contadini dovevano al faraone. I cereali coltivati erano essenzialmente tre: il farro, un tipo di frumento (forse *Triticum aestivum*) e l'orzo. Purtroppo, non esiste nessuna prova che testimoni l'impiego dei licheni nella panificazione dato che anche le analisi chimiche effettuate su antichi frammenti di pane egizio non hanno mostrato la presenza delle rivelatrici sostanze licheniche.

Un'ultima precisazione sulla ricorrente artemisia: diverse specie del genere sono ancora disponibili nei mercati locali egiziani per impieghi raccomandati dalla medicina popolare. Secondo diversi contributi recenti, artemisia oggi è molto studiata per le proprietà antimalariche e antitumorali. I beduini raccolgono le piante di *A. judaica*, *A. monosperma*, *A. erba-alba*, *A. arborescens* e le loro miscele, chiamate oggi "shih", sono usate come antielmintiche, toniche, stimolanti, antisettiche e antireumatiche. *A. arborescens* chiamata "sheba" o "sheeba" è usata per fumigazioni o come infuso assieme alla menta.

Nel 2000 l'Orto e Museo Botanico di Berlino ha organizzato la mostra *Flechten-Kunstwerke der Natur* (Licheni meraviglie della natura). Tra le diverse immagini proposte colpiva quella di un teschio umano, privo di mandibola, colonizzato da alcune specie di licheni, tra cui *Pseudevernia furfuracea*, *Letharia vulpina* e una o due parmelie. La foto, sebbene un po' macabra, è suggestiva per i suoi bei talli lichenici sparsi sulla calotta cranica, sulle arcate orbitali, graziosamente affollati nella cavità nasale. La didascalia, in tedesco è telegrafica, dice: "I licheni che crescono su teschi umani erano noti al tempo della teoria delle signature come muschio del cranio umano, erano ricercati come rimedio contro gli attacchi epilettici e pagati per il loro peso in oro". Il soggetto è chiaramente un artefatto (sono tutti licheni epifiti), ma questo non toglie nulla alla testimonianza e alla suggestione del soggetto.

Purtroppo il sito non offre altre informazioni, ma cercando ancora e giocando con le parole chiave, soprattutto nel motore Google ricerca libri, ho trovato una miniera di altre informazioni e la testimonianza di un coinvolgimento dei licheni in una curiosa pratica terapeutica nata in un periodo tardo medioevale, ma protrattasi, anzi rivalutata, nel cosiddetto periodo dei lumi, dal mesmerismo e nota e praticata popolarmente ancora nell'Ottocento perché riconosciuta salutare ed efficace. Un buon percorso narrativo per la descrizione di questi fatti può iniziare dal chiarimento dei termini presenti nella legenda della fotografia del teschio colonizzato, che ho riportato sopra. Possiamo iniziare dalla teoria delle signature (*signa naturae*). Si tratta di una antica e diffusa dottrina medica medioevale secondo la quale Dio, creando le malattie, ha creato anche i rimedi specifici contenuti nelle piante, segnalando queste proprietà con un tratto caratteristico. Questa teoria propone il criterio di usare le caratteristiche morfologiche come indicatori di proprietà terapeutiche. La credenza deriva dal concetto dell'analogia tra l'aspetto della pianta, in senso ampio, e l'organo da curare. Nel caso dei licheni sul cranio, il tratto caratteristico è ovviamente l'insolito substrato colonizzato.

La teoria viene adottata dal medico-mistico-alchimista Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim (1493-1541), detto Paracelso (simile ad Aulo Celso, medico e naturalista romano), come lui stesso amava definirsi, semplificando i nomi che portava, ma non rinunciando alla grandezza. Nelle sue opere si trovano sia intuizioni mediche e farmacologiche moderne sia sorprendenti concezioni magiche e astrologiche. Paracelso ovviamente era figlio del suo tempo, ma vorrei citare tre fatti che lo pongono tra i fondatori della scienza moderna: sostiene la superiorità del metodo empirico (esperienza) su quello speculativo, riconosce le capacità anestetiche dell'etere etilico trecento anni prima del suo impiego medico diffuso, è considerato il primo tossicologo della storia e a lui è riconducibile l'aforisma tuttora valido: *sola dosis facit venenum*.

Paracelso amplia il numero dei rimedi che potevano derivare dall'osservazione dell'aspetto di piante e minerali in base all'assioma *similia similibus curantur*: la somiglianza con gli alveoli polmonari, i lobi del fegato, la coda di uno scorpione, le radici antropomorfe, il colore del sangue, il colore dell'itterizia e così via. Paracelso afferma che nei vegetali erano contenute *omnia membra hominis* e che tutto ciò che appare all'esterno

deve essere materia d'indagine per conoscere l'intima struttura degli organi umani, nonché le virtù e le predisposizioni alla salute piuttosto che alla malattia. Secondo Paracelso la conoscenza del microcosmo in cui è inserito l'uomo aiuta a comprendere il macrocosmo e i principi di funzionamento dell'universo intero. Inoltre, teorizza che occorre imparare a leggere i messaggi e il linguaggio della natura, anche attraverso il proprio elemento interno che per una azione detta magnetica o simpatetica si congiunge a quello della natura delle piante e dei minerali. Successivamente Giovanni B. Della Porta (1536-1615) in *Phytognomica* approfondisce e amplia (esaspera) il numero delle piante "segnate" basandosi sulle indicazioni di Paracelso. Tale teoria non nasce improvvisamente, ma ha radici profonde, antiche, e ramificazioni che arrivano fino al tempo presente. Si fonda su una credenza metafisica fiduciosa nel potere dell'imitazione e della corrispondenza, la cosiddetta magia imitativa, simpatica o rossa. Tale credenza avrebbe seguito l'uomo nella sua storia fin dall'inizio e sarebbe alla base delle pitture rupestri di Lascaux, di Altamira e di altri luoghi, associate alla magia della caccia, sul cui successo si confidava di influire rappresentando animali e uccisioni e stabilendo quindi un rapporto imitativo e magnetico. Secondo Pseudo Apollodoro il centauro Chirone nutriva Achille esclusivamente di midollo di leone e di cinghiale per trasmettergli forza e coraggio, di midollo di cerbiatto per renderlo agile e veloce, e di miele per la dolcezza e la capacità di persuasione. Questa credenza spinge Ippocrate ad affermare che dal simile nasce la malattia e dall'impiego del simile la malattia guarisce. Non è difficile fare un salto temporale e ritrovare la stessa fiducia nell'omeopatia e nell'idea della pratica della vaccinazione, che però non ha nulla di magico.

L'altro termine, sicuramente più intrigante, è il muschio del cranio umano che può avere anche altre denominazioni, tra cui *Usnea Cranii humani*, *Musculus ex cranio humano*, *M. ex c.h. innatus*, *U. officinarum nostratium*, ovvero nelle lingue nazionali: *Moss of a dead man's skull*, *Usnée humaine*, *Muschio del cranio*. È chiaro che le orecchie del lichenologo si rizzano a sentire il caro nome *Usnea*, ma serpeggia tuttavia un certo nervosismo ritrovando l'odiata confusione tassonomica tra muschi e licheni. Il nervosismo, tuttavia, si placa pensando che il termine *Usnea* deriva in realtà dall'arabo *uṣṣna*, muschio, e che per la prima volta viene impiegato per un lichene da Dillenius in *Historia Muscorum* nel 1742. A questo proposito occorre ricordare che la lingua

scientifica medioevale era l'arabo; per esempio, è Avicenna, il principe dei medici a Isfahan, che recupera la scienza medica greca di Teofrasto e Dioscoride e di altri autori.

I secoli del medioevo sono bui (oscurati) solo per noi europei. Johannes Baptista van Helmont (1579-1644), medico e scienziato fiammingo, afferma nel suo *De magnetica vulnerum curatione* (Griffero 2000, Waddel 2003, Cooper 2004):

Il seme di questo muschio cranico cade dal cielo sulla superficie del cranio [...] la già immanente virtù viene ulteriormente potenziata dall'unione con il midollo mumiale del cranio umano. Altrove questa resina o fiore del cielo si trasforma in pietra, piovendo in ogni caso dal cielo in modo non meno naturale della rugiada mattutina e della manna.

Una buona fonte di informazioni è il *Dizionario medico* del filosofo naturalista inglese Robert James (1703-1776) che sarà tradotto (1746-1748) in francese da Diderot e sarà fonte di ispirazione per l'*Encyclopédie*. Sotto *Usnea Cranii humani* si legge:

Frequente in Irlanda da cui si importa, si usa tutta la pianta e diversi autori la ritengono efficace per arrestare le emorragie, è impiegata nella famosa composizione nota come *Unguentum Armarium*. Esistono due tipi di *Usnea humana*, la prima, quella irlandese che si può trovare nelle farmacie non è altro che un piccolo *Muscus vulgaris terrestris adianthi aurei capitulis* simile a quello che cresce sui sassi e sugli alberi. Secondo M. Doody, farmacista e botanico londinese, questo tipo cresce anche sulle ossa dei cavalli e dei buoi gettati nelle discariche. Il secondo tipo cresce in forma di crosta sui crani umani come il *Lichen petreus*, diversi autori preferiscono quest'ultimo tipo ritenendolo più ricco di virtù. Tutti gli autori raccomandano il muschio che cresce sui cadaveri esposti lungamente all'aria, per curare, sia per via interna sia per via esterna, l'epilessia, le malattie mentali, le emorragie, la dissenteria e persino come amuleto.

Robert Boyle, il famoso fisico, ne conferma l'efficacia, verificata attraverso l'uso personale, come antiemorragico nasale e il testo prosegue:

Qualche autore sostiene che abbia più virtù quando raccolta quando la luna piena entra nella Vergine, o per altri in Toro, Gemelli o Pesci. Altri

assicurano che la migliore sia quella cresciuta sul cranio degli impiccati, ma Paracelso dice che va bene anche quella di persone qualunque esposte sulla strada. Grube, in arcana Medicina, ci spiega che quelli che credono nell'utilità dell'usnea pensano che gli spiriti vitali ed animali del morto passino in essa e da qui derivino le virtù terapeutiche. Ma tutti sanno che niente di vitale è presente in un cadavere e sembrano nel giusto quelli che pensano che le presunte virtù si fondino sulla credulità e sulla suggestione; sembra probabile che queste forze collaborino per la guarigione. Boyle ed altri autori sostengono tuttavia che l'unico merito di *Usnea humana* sia la rarità, pur riconoscendone l'efficacia come antiemorragico, astringente e cicatrizzante. Alcuni propongono la sostituzione dell'usnea con il muschio dei tetti che è anche efficace, mischiato all'aceto, per fermare le emorragie nasali. Ludovici nel capitolo *Vulnerari* e astringenti della sua opera *Pharmacopeia* dice che l'usnea si trova dappertutto e quella su quercia o acacia non è per niente inferiore a quella che la superstizione vuole che si colga sui crani umani. Altri autori in considerazione della rarità dell'usnea naturale propongono l'impiego di un tipo artificiale così ottenuto: si prende del muschio da una grossa pietra in aprile, si secca e si polverizza in un mortaio di vetro bagnando con vino dolce, si stendono, sul cranio di un cadavere trovato lungo la strada, più mani della pasta ottenuta via via che la precedente si secca e si espone al sole e alla pioggia fino a che la pianta germoglia. L'usnea così ottenuta è analoga a quella che cresce naturalmente sui crani.

Il testo di James pone diverse questioni: perché l'usnea si importava dall'Irlanda? Se la ragione dipendeva da un fattore climatico anche l'Inghilterra era adatta! Secondo Cooper (2004) si trattava dell'abitudine irlandese di abbandonare all'aperto i corpi dei condannati a morte, da qui la relativa abbondanza del raccolto. In seguito van Helmont sosterrà che non necessariamente dovesse essere il cranio di un criminale, ma che anche il cranio di un gesuita fosse adatto allo scopo, quindi anche un martire, la condizione essenziale consistendo nella morte violenta che conserverebbe una forza vitale che, invece, sarebbe ormai quasi spenta in un cranio di una persona morta di morte naturale che, tra l'altro, in genere non viene abbandonata sulla strada. Infatti, Theodor Zwinger (1658-1724) nel *Compendium Medicinae Universae* ricorda: "Sic notum est, quod Usnea, ex Cranio Hominis violenter occisi procrecens, stupendas habeat virtutes contra Haemorrhagias, quod alius Muscus, qui in coemeteriis provenit, non praestat".

L'altra questione è quella che pone a questo punto il lichenologo sul baratro del disinteresse: ma di che cosa stanno parlando di un muschio o di un lichene? Nel suo dizionario James così definisce il termine *Muscus* e i suoi sinonimi (*M. usnea*, *M. arboreus*, *Usnea officinarum*, *M. arboreus villosus*): "Questa specie di muschio è composta da un gran numero di fibre lunghe, sottili e biancastre un po' rigide e ruvide che pendono per una certa lunghezza dai rami degli alberi...": anche uno studioso di muschi fondamentalista dovrebbe riconoscere che si tratta di un lichene, forse del genere *Usnea*. Ma, proseguendo la descrizione, la certezza si sfilaccia e James sembra ampliare il termine a diverse specie di licheni: *Bryoria*, *Pseudevernia*, forse *Teloschistes* e infine parla di un tipo profumato, raro in Inghilterra, ma abbondante nella zona di Montpellier con cui si prepara la *pulvis cyprius*, un chiaro riferimento a *Evernia prunastri*, ricordata prima. Nel dizionario di James si trova riportato anche il termine *Bryon* che viene definito come un muschio che cresce sulla scorza degli alberi, ma poi la precisazione che il *Bryon* bianco è odoroso e più stimato di quello nero, almeno a me suggerisce un'altra volta un riferimento a *Evernia* e *Pseudevernia*. Una ulteriore precisazione ricorda il *Bryon thalassium* di cui parlano i greci e la descrizione che ne segue sembra suggerire qualche tipo di alga.

La conclusione ovvia di quanto sopra, stante l'antica drammatica impossibilità di distinguere muschi e licheni, è che i farmacisti, dal Cinquecento all'Ottocento, usassero qualunque cosa nascesse sul cranio umano per la sua evidente "segnatura" per preparare medicinali e che questo qualcosa poteva essere sia un lichene sia un muschio, entrambi macro-organismi pionieri capaci di colonizzare un nudo e scabro substrato calcico, che rappresenta solo una variante un po' particolare di un substrato roccioso esposto.

Dal percorso descrittivo proposto emerge con evidenza che la leggenda dell'immagine citata all'inizio tace (pudore scientifico?) un uso dell'*usnea* del cranio: essa era l'ingrediente principale dell'*Unguentum armarium*. La terapia dell'unguento dell'arma era fondata sull'*hoplo-chrisma*, l'azione di ungere con un linimento salutare (*chrisma*) un'arma (*hoplo*) e mostra radici molto antiche che affondano nel mito del Graal, nei cicli epici indiani e nordici. Consisteva nel curare una lesione ungendo (quindi curando) non tanto la ferita, quanto l'arma che l'aveva causata e che poteva trovarsi anche a grande distanza dal ferito, oppure

non l'arma stessa che aveva causato il danno, ma un suo sostituto che imitava la forma dell'arma, un sasso, un bastoncello, un pugnale immerso preventivamente nella ferita per riacutizzarla e bagnandosi così del suo sangue. L'arma o il suo sostituto erano unti e bendati fino a che la ferita non si fosse rimarginata perfettamente.

La cura dell'arma era un tipo di terapia famosa, persistente, diffusa anche negli ambienti colti, praticata dai medici perché ritenuta davvero salutare. La preparazione aveva anche altri nomi: *Unguentum magneticum* o *U. sympatheticum*, ovvero, non in forma di unguento: polvere di simpatia o polvere di vetriolo, ma questa è un'altra storia e i licheni non c'entrano. I componenti dell'unguento erano singolari, la ricetta base, pseudoparacelsiana per molti storici, prevedeva alcuni ingredienti considerati fondamentali: usnea del cranio e *mumia*; alcuni utili come mezzo di sospensione: grasso (maiale, orso, manzo) e miele, altri di fantasia: lombrichi cotti, sangue umano, olio di lino, trementina, bolo armeno (una vernice di ossido di ferro), letame. Mi fermo qui perché esistono oltre cinquanta diverse ricette.

Assieme all'usnea, la cui natura è ormai chiarita, appare la *mumia*: cos'è? La *mumia* indica, nella medicina antica, un farmaco famoso, variamente composto, di consistenza bituminosa, diffuso ancora nelle farmacie europee agli inizi del Novecento. Fino a quest'epoca, infatti, lo si poteva ordinare alla farmacia Merck di Darmstadt come: *Mumia vera*, fino ad esaurimento, per 17,50 marchi al kg. La Merck, ora una multinazionale chimico-farmaceutica, conserva ancora una testa di giovane dal sesso indefinito nel suo archivio storico.

Una precisa ed entusiastica descrizione della *mumia* la si può trovare nella *Histoire générale des drogues* di Pierre Pomet (1691) in cui vengono citati Erodoto e Avicenna per le notizie sulla sua preparazione. In sintesi, si tratterebbe dell'essudato, composto da grasso e sostanze aromatiche, che fuoriesce dalle mummie il cui corpo era stato riempito di aloe, mirra e altre spezie ovvero delle carni stesse mummificate. In sostanza la *mumia* rappresenta il *Liquor* o *Calor innatus* diffuso in tutto il corpo, la quintessenza dell'uomo che presiede alla conservazione della sua vita e a ogni processo di cicatrizzazione e guarigione autonoma delle varie parti del corpo. Ovviamente erano frequenti i falsi.

Ma torniamo all'unguento, che ormai siamo in grado di preparare, e cerchiamo di rispondere ad alcune domande rimaste senza risposta:

1) quando era prescritto? 2) com'era la procedura terapeutica? 3) perché era considerato efficace? e... volendo, 4) perché van Helmont aveva il dente avvelenato con i gesuiti?

1) Era prescritto quando l'arma non era entrata troppo in profondità nel corpo del ferito, quando quindi non erano stati lesi nervi, tendini, arterie o qualche organo essenziale, quando, insomma, non c'era evidente pericolo di vita.

2) Per la terapia non riporto le avvertenze e le precauzioni inadempibili, per esempio quelle relative alle fasi astrologiche, le modalità di conservazione e di posizionamento dell'arma durante la terapia a seconda che la ferita fosse di punta o di taglio. Riporto invece quelle relative al trattamento collaterale. Occorreva lavare la ferita con urina del paziente o vino o acqua salata, arrestare l'emorragia cospargendo con polvere di ematite e legno di sandalo o con la stessa usnea polverizzata (una sorprendente anticipazione degli antibiotici, usnea [quando era lei] contiene l'1% in peso di ac. usnico [Ingolfsdottir 2002], un antibiotico) e coprire con una benda pulita. Occorreva inoltre ungere l'arma e bendarla. La pulizia della ferita e il bendaggio dell'arma dovevano essere ripetuti anche quotidianamente. Esistono anche altre prescrizioni terapeutiche, più o meno rigide, valide per il paziente e per il medico, come una dieta moderata e l'astensione da ogni attività sessuale [anche per il medico!].

3) L'efficacia salutare dell'unguento consisteva nel suo ingrediente occulto: l'igiene. Le ferite pulite, lavate e trattate con polveri battericide avevano la possibilità di non infettarsi. Per convincersi di ciò basta pensare che a volte il letame o lo sterco di capra erano considerati un buon rimedio per sanare le ferite e che il flagello della cosiddetta febbre puerperale che uccideva il 12% delle puerpere cessa solo nella seconda metà dell'Ottocento, quando il medico ungherese Semmelweis dimostra che era sufficiente che i medici si lavassero le mani, dopo aver manipolato un paziente dopo l'altro, per evitare infezioni contagiose iatrogene. Era abitudine dei medici passare dalle autopsie ai parti senza precauzioni di sorta. Va inoltre ricordato che l'unguento armario è uno dei pochi farmaci (l'unico dell'epoca) che non avesse effetti collaterali dannosi e che la sua supposta capacità di curare a distanza colpisse fortemente l'immaginazione e la suggestione, determinando un potente effetto placebo.

4) Nel 1621 van Helmont fu pubblicamente censurato dalla Chiesa cattolica per il suo pensiero esposto nel trattato *De magnetica vulnerum curatione*, pubblicato senza il suo consenso dai gesuiti (Waddel 2003). Successivamente sarà processato dall'Inquisizione e condannato agli arresti domiciliari fin quasi alla sua morte nel 1644. Nel trattato van Helmont commenta i diversi aspetti delle cure cosiddette magnetiche o simpatetiche, tra cui la cura basata sull'unguento armario, discute gli errori e le superstizioni e attacca la concezione aristotelica di una natura della materia basata sui quattro elementi fondamentali (fuoco, aria, acqua e terra) su cui si basava la concezione medica dell'equilibrio degli umori del corpo: sangue, bile nera e gialla, flegma. Nel Seicento i gesuiti erano i principali interpreti di una nuova visione della teologia scolastica, a cui tutto doveva essere ricondotto. Tale visione coniugava gli insegnamenti di Aristotele e di san Tommaso d'Aquino. "Vana ginnastica mentale" la definì John Locke, padre del liberalismo classico, dell'empirismo moderno e uno dei più influenti anticipatori dell'illuminismo. La censura per van Helmont era dovuta all'accusa di pratiche contronatura (accusa ancora oggi impiegata) e diaboliche (accusa ora meno frequente). L'accusa nasce dall'osservazione che la cura dell'arma opera senza un contatto fisico tra l'arma curata e la ferita, in aperta violazione, quindi, della fisica aristotelica di descrizione della natura che esclude l'azione a distanza: *nullum agens agit in distans*. La terapia agisce, quindi, contro e al di fuori delle leggi naturali, pervertendole e il coinvolgimento del demonio è implicito. A nulla vale, naturalmente, l'osservazione di van Helmont che anche la calamita agisce a distanza sulla polvere di ferro, così come altri fenomeni naturali; se si ignorano ancora le leggi naturali coinvolte non per questo le azioni sono contronatura e diaboliche, andrebbero semplicemente studiate. Ma è inutile, ad alienargli definitivamente le simpatie dei teologi sono due sue considerazioni (avrebbe avuto un disperato bisogno di un buon avvocato): la prima è che i teologi dovrebbero occuparsi di teologia e lasciare spiegare la natura agli scienziati, la seconda, imperdonabile, è che anche le virtù terapeutiche delle reliquie dei santi agiscono senza contatto, a distanza. Proprio un demonio dal comprensibile dente avvelenato.

Bibliografia

- Baumann B.B. *The botanical aspects of ancient Egyptian embalming and burial*. Economic Botany 1960;14:84-104.
- Cooper P. *Medicinal properties of body parts*. Pharmaceutical Journal 2004;273:900-903.
- Dawson W.R. *Studies in the Egyptian Medical Texts III*. Journal of Egyptian Archaeology 1934;20:46.
- Germer R. *Katalog der altägyptischen Pflanzenreste der Berliner Museen*. Ägyptologischeabhandlungen. Wiesbaden, Otto Harrassowitz. 1988, vol. 47, 1-72.
- Germer R. *Ancient Egyptian Pharmaceutical Plants*. In: Jacob I., Jacob W. (eds.). *The Healing Past*. Leiden, E.J. Brill. 1993, 1-126.
- Griffero T. *Immagini contagiose. Malattia e cure magnetiche nella Philosophia per Ignem di Johann Baptist van Helmont*. Rivista di Estetica 2000;15:19-45.
- Huneck S. *The significance of lichens and their metabolites*. Naturwissenschaften 1999;86:559-570.
- Ingolfisdottir K. *Usnic acid*. Phytochemistry 2002;61:729-736.
- Modenesi P. *Il sapore e il colore dei licheni. Una guida agli usi*. Genova, University Press. 2015;1-158.
- Nimis P.L. *La crisi della lichenologia in Italia dalla fine dell'800 ad oggi*. In: Pedrotti F. (a cura di). *100 anni di ricerche botaniche in Italia (1888-1988)*. Firenze, Soc. Bot. Ital. 1988;397-405.
- Nimis P.L. *The Lichens of Italy*. Torino, Museo Regionale di Scienze Naturali. 1993;897 pp.
- Perez-Llano G.A. *Lichens. Their biological and economic significance*. Botanical Review 1944;10:1-65.
- Richardson D.H.S. *The Vanishing Lichens*. New York, Hafner Press. 1974;1-439.
- Schmull M., Dal Forno M., Lucking R. *Dictyonema huaorani, a new lichenized basidiomycete from Amazonian Ecuador with presumed hallucinogenic properties*. Bryologist 2014;117:386-394.
- Seaward M.R.D., Sipman J.M. *An updated checklist of lichenized and lichenicolous fungi for Egypt*. Willdenowia, BGBM. 2006;36:537-555.
- Waddell M.A., *Perversion of Nature: Johannes Baptista van Helmont, the Society of Jesus, and the Magnetic Cure of Wounds*. Canadian Journal of History 2003;38:179-184.

Licheni: dal passato al presente

Nel saggio viene chiarita la natura dei licheni, la loro antichità e il loro unico metabolismo secondario. Le sostanze prodotte ne giustificano gli usi medicinali, cosmetici, tintori e gastronomici che hanno accompagnato la storia dell'uomo: dagli antichi egizi, ai fenici, alla medicina medievale fino alle soglie dell'età moderna. Attualmente il loro impiego è indispensabile per la stima della qualità ambientale e del riscaldamento globale.

Parole chiave: licheni, unguento armario; terapia magnetica; usnea; fitoterapia.

Lichens: From Past to Present

The essay clarifies the nature of lichens, their antiquity and their unique secondary metabolism. The lichen substances produced justify the medicinal, cosmetic, dyeing and gastronomic uses that have accompanied the history of man: from the ancient Egyptians, to the Phoenicians, to medieval medicine up to the threshold of the modern age. Currently their use is essential for estimating environmental quality and global warming.

Keywords: lichens; weapon salve; magnetic cure; usnea; phytotherapy.

GIOVANNI PETRILLO

Chimici artisti. Artisti chimici

1. *Introduzione*

Scienza e arte sono due campi dell'attività umana indissolubilmente connessi. Questo aspetto "simbiotico" è particolarmente appropriato per la chimica, se è vero che l'arte fa propri e utilizza materiali e metodi che appartengono alla chimica, facendo tesoro del progresso scientifico e tecnologico nell'ambito di questa scienza.

È peraltro incontestabile che l'ingegnosità del chimico nella progettazione e realizzazione di una sintesi complessa può essere considerata di per sé una forma di arte, intesa come qualsiasi forma di attività dell'uomo che ne testimoni il talento inventivo e la capacità espressiva nella realizzazione di un'opera il cui valore (estetico o di contenuto) non è necessariamente dipendente dal suo possibile utilizzo. Pertanto, l'accostamento della chimica alle altre espressioni più comunemente ritenute forme di arte [*architettura, pittura, scultura, grafica, danza, musica, recitazione* (cinema e teatro), *poesia* (letteratura)] è assolutamente legittimo!

2. *L'arte nella chimica*

In figura 1 sono schematizzate alcune molecole, costituite da carbonio, idrogeno (non indicati espressamente dal rispettivo simbolo) e ossigeno (identificato dalla lettera "O"), ideate e realizzate, con una serie di reazioni chimiche appositamente progettate, grazie all'inventiva di due

ricercatori [1], per avere sembianze umane; più specificamente, le molecole A e B rappresentano una coppia di ballerini, C è un uomo col cappello, che può essere di fogge diverse, D è un calciatore che si diverte con una sfera che altro non è che la molecola della forma allotropica del carbonio di più recente scoperta: il fullerene C_{60} . A queste molecole antropomorfe è stato dato il nome di *nanopuziani*, come sintesi tra *nanometro* (unità di misura della lunghezza dell'ordine di grandezza delle macromolecole (10^{-9} metri, un milionesimo di millimetro) e *lillipuziani*, razza immaginaria di umani nel romanzo *I viaggi di Gulliver* di Jonathan Swift.

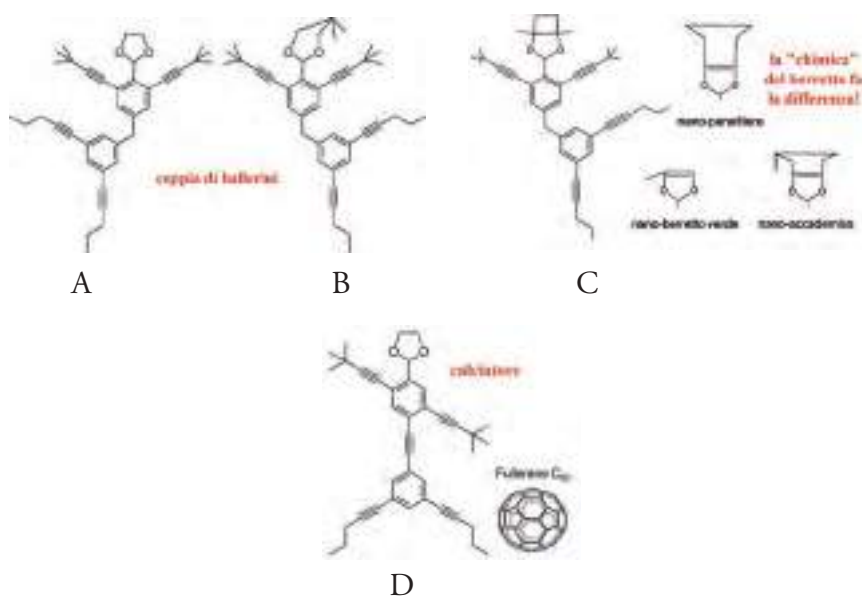


Figura 1. Molecole antropomorfe ("nanopuziani") sintetizzate in laboratorio nell'ambito di un progetto di divulgazione della chimica ai ragazzi.

Se, come corollario di quanto detto nell'introduzione, l'arte è anche e soprattutto divertimento, o puro piacere di realizzare qualcosa di originale, anche se di nessun significato pratico, la sintesi in laboratorio dei *nanopuziani* è sicuramente un risultato "divertente" e "originale", che, nella fattispecie, ha comunque un fine pratico, in quanto si tratta di un gioco (per quanto scientificamente impegnativo nella realizzazione) messo a punto nell'ambito di un progetto di divulgazione della chimica ai ragazzi.

Ma il chimico sa costruire ben altro con la sua “arte”! Il chimico può:

a) isolare composti o molecole da organismi naturali (animali o, più spesso, vegetali);

b) valutarne l'efficacia in campo biologico/farmacologico;

c) identificarne la struttura;

d) sintetizzare in laboratorio lo stesso principio partendo da molecole più semplici commercialmente disponibili (*sintesi totale*) o da precursori naturali isolabili più facilmente e/o in quantità più rilevanti del prodotto finale (quindi molecole già relativamente complesse) (*semi-sintesi*), ovviando in tal modo alla generale scarsa disponibilità del principio naturale;

e) valutare l'eventuale maggiore efficacia di molecole simili a quella naturale e sintetizzarle in laboratorio.

La figura 2 raccoglie in una linea del tempo alcuni tra i più importanti risultati raggiunti dalla chimica nella sintesi totale di molecole naturali anche estremamente complesse [2].

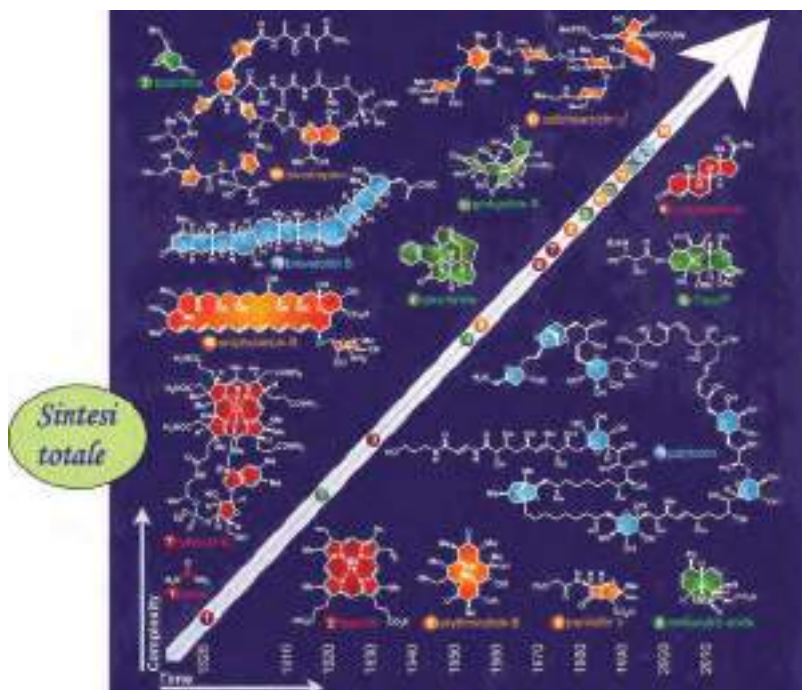


Figura 2. *Sintesi totale di molecole naturali biologicamente/farmacologicamente attive.*

Considerando quanto sopra, forse più che “artista” il chimico può essere definito un “artigiano”, in grado di produrre, con le conoscenze odierne, un numero praticamente infinito di composti o molecole, di diversa forma, grandezza, composizione in atomi, di utilità nei più diversi campi dell’attività umana, dalla medicina, alla tecnologia, all’ambiente, all’alimentazione, all’agricoltura: un artigianato al servizio dell’uomo e dei suoi bisogni a 360 gradi!

3. *La chimica nell’arte*

La chimica è da sempre il serbatoio di materiali e metodi al quale gli artisti attingono per portare a termine i loro progetti. Se è vero che “chimica è tutto ciò che ci circonda, modula e scandisce il nostro vivere quotidiano” è altresì ragionevole, per la discussione che segue, restringere il campo alle arti figurative, e in particolare a pittura e scultura che, fin dalle loro primordiali espressioni, utilizzano una varietà di materiali che, per diversi motivi, hanno dovuto aggiornarsi nel tempo facendo ricorso a ciò che la chimica ha messo a disposizione dell’uomo grazie al progredire delle conoscenze e della tecnologia.

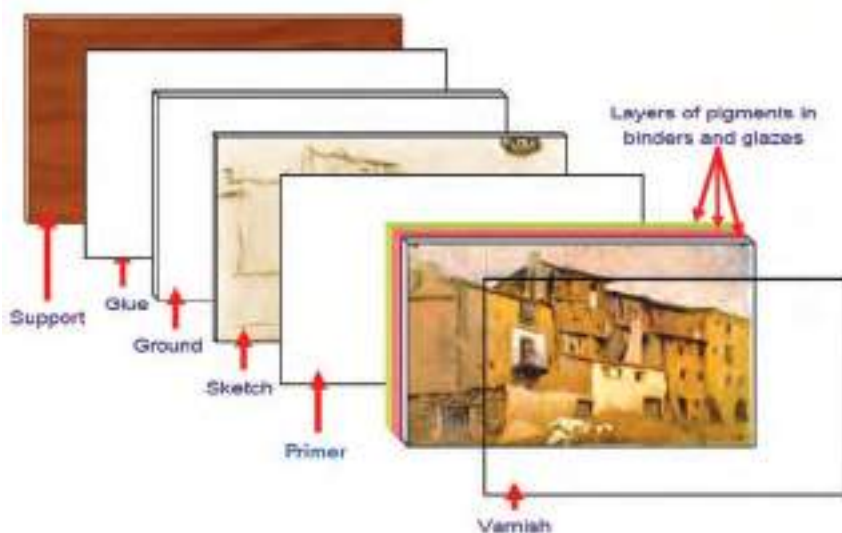


Figura 3. *Stratigrafia di base in un’opera pittorica.*

Più nello specifico, la struttura di un'opera pittorica è in genere particolarmente complessa, caratterizzata da una successione di strati sovrapposti, e il risultato finale complessivo non dipende soltanto dai componenti più appariscenti, cioè "pigmenti" e/o "lacche", responsabili principali dell'effetto ottico del manufatto, ma anche dalla interazione di questi con numerose altre sostanze.

In genere è possibile individuare (figura 3): un supporto (tavola in legno, parete, metallo, carta, tela...), uno strato di preparazione (ad esempio, colla + gesso, biacca + olio di lino), un disegno preparatorio, un'eventuale imprimitura e uno o più strati di colore, costituiti dai pigmenti dispersi (sospensione) in un mezzo trasparente (legante). Sul dipinto può inoltre essere presente un ulteriore strato trasparente (vernice) con funzioni protettive e ottico-estetiche.

Accanto alla *pittura* anche la *tintura*, per la produzione ad esempio di arazzi o, più "prosaicamente", di capi di abbigliamento, richiede la partecipazione di più materiali: supporto (lana, seta, cotone, fibra artificiale...) e *coloranti*.

Va precisato che, nel parlato comune, i termini *pigmento* e *colorante* sono spesso utilizzati come sinonimi. Così non è nel campo dell'arte: senza scendere troppo nei dettagli delle differenze tecniche, i *pigmenti* sono il risultato della polverizzazione di minerali, utilizzati soprattutto per la *pittura*, previa dispersione in un mezzo opportuno (legante) secondo le due principali tecniche di applicazione: tempera e olio; i *coloranti* sono invece sostanze di natura organica, utilizzati soprattutto per la *tintura*: in realtà possono essere utilizzati anche nella pittura, previa trasformazione in *lacche* mediante assorbimento su polvere inerte e successiva dispersione in un legante.

Sia *pigmenti* che *coloranti* hanno una "storia" che ne ha visto modificazioni e aggiornamenti nel tempo, sia nella composizione/produzione che nella modalità d'uso.

3.1. *Coloranti*

Anticamente i coloranti utilizzati erano esclusivamente di estrazione vegetale o animale (figura 4), e il loro uso prosegue almeno sino alla prima metà dell'Ottocento: ciò comportava, dal punto di vista sociale, una netta differenziazione tra classi più o meno abbienti, in quanto solo le prime potevano indossare vesti tinte con principi naturali partico-

larmente costosi, viste la difficoltà di estrazione e, nella maggior parte dei casi, le ridotte quantità estraibili: è il caso, ad esempio, del porpora di Tiro, estratto dal *Murex brandaris* (figura 4) in minime quantità e utilizzato, a Roma, solo per la tintura delle toghe di generali, magistrati o abbienti.

Colorante	Origine vegetale	Colore
INDACO	<i>Indigofera tinctoria</i>	blu
GUADO	<i>Isatis tinctoria</i>	blu
TORNASOLE	<i>Chrozophora tinctoria</i> ("monella")	blu, rosso, porpora
ROBBIA (garanza)	<i>Rubia tinctorum</i>	rosso
ROSSO BRASILE (vermino, brasa)	diverse <i>Crocebrassaceae</i>	rosso
ORICELLO	<i>Oreocella tinctoria</i> (liciviera)	rosso
CARTAMO	<i>Carthamus tinctoria</i>	rosso
HENNEA	<i>Lawsonia alba</i>	arancio-rosso
AMMAYTO	<i>Bixa Orellana</i>	giallo-rosso
CURCUMA	<i>Curcuma longa</i> (<i>Zingiberaceae</i>)	giallo
ZAFFERANO (crocettina)	<i>Crocus sativus</i>	giallo
VERDE LINFIA	Bacche di ramno	verde
VERDE IRIS	<i>Iris germanica</i> , <i>Iris florentina</i>	verde, verde-grigio



Colorante	Origine animale	Colore
PORPORA (porpora di Tiro)	<i>Murex brandaris</i>	rosso
KERMES	<i>Coccus ilicis</i> (parassita della quercia)	rosso
COCCINIGLIA	<i>Dactylopiis coccinea</i> (parassita dei cactus e dei fichi d'india)	rosso
GIALLO INDIANO	dall'urina di mucche alimentate con foglie ricche di mango	giallo

Figura 4. Coloranti naturali di origine vegetale o animale: di più, sino al 1856, non si poteva avere!

$$\begin{array}{ccc} 2\text{C}_{10}\text{H}_{13}\text{N} + 3/2\text{O}_2 & \longrightarrow & \text{C}_{20}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \\ \text{N-allylanilina} & & \text{chinina} \end{array}$$

1856: Perkin ottiene casualmente il primo colorante di sintesi



Figura 5. Cercare un antimalarico salvavita e... proiettare la chimica nell'industria dei coloranti e dei farmaci!

moglie di Napoleone III (figura 6), la donna in assoluto più influente nel mondo della moda (oggi parleremmo appunto di *influencer*!), decide che il malva ben si adatta al colore dei suoi occhi, e trasmette anche alla regina Vittoria la passione del *mauve*: per il matrimonio della figlia la regina indossa, scrivono i giornali dell'epoca, un ricco velluto malva. Nel 1859 la rivista “Punch”, afferma che Londra è affetta dal “morbo del malva”.

Ma il conseguente vantaggio economico per l'imprenditore Perkin fu senz'altro dovuto anche a un altro fattore, rappresentato dall'uso, in vigore in quell'epoca, delle "crinoline", cioè di intelaiature rigide di fili di acciaio che gonfiavano le gonne (figura 6), incrementando la superficie di stoffa da... tingere!

La mauveina fu soltanto il primo di una serie numerosissima di coloranti di sintesi che vennero sviluppati negli anni seguenti, sempre a par-



Figura 7. Sviluppo temporale della sintesi di coloranti a partire dalla scoperta del violetto di Perkin.

tire dal catrame di carbon fossile e dai derivati dell'anilina ivi contenuti. Un'idea di questa proliferazione di prodotti commerciali a basso costo che incide in modo rivoluzionario sulle abitudini e le dialettiche tra classi sociali è ben evidenziata dall'*Albero dei coloranti di sintesi* di figura 7.

Per concludere questo aspetto dell'interazione chimica/arte, è interessante osservare come i coloranti di sintesi siano stati successivamente impiegati in medicina per evidenziare la presenza di aree tissutali malate, caratterizzandole con una colorazione diversa da quella delle aree circostanti.

Paul Ehrlich (1854-1915), in particolare, premio Nobel per la Fisiologia e la Medicina nel 1908 per i suoi contributi all'immunologia, si interessò alla selettività dei coloranti per specifici organi, tessuti e cellule. Dopo aver dimostrato che i coloranti reagiscono in modo specifico con vari componenti delle cellule del sangue e con cellule di diversi tessuti, iniziò a testare le proprietà terapeutiche dei coloranti per determinare se potessero uccidere i microbi patogeni, ottenendo risultati promettenti con l'utilizzo del blu di metilene (figura 8; cerchiato in rosso in figura 7) contro il parassita della malaria.



Figura 8. *Struttura atomica del Blu di metilene, colorante fisiologico e antimalarico.*

Quindi, ricapitolando, cercando di preparare un antimalarico Perkin dà casualmente l'avvio alla produzione dei coloranti di sintesi, uno dei quali si rivelerà successivamente efficace proprio contro la malaria! Il cerchio si chiude!

Per quanto detto sopra, il 1856 e gli anni a seguire segnano l'ingresso della chimica di sintesi non solo nell'industria dei coloranti, ma anche nella farmacologia.

3.2. Pigmenti

L'uso di pigmenti per fissare su un supporto immagini, scene, ricordi, risale all'uomo primitivo, che ci ha lasciato come prime vere e proprie espressioni artistiche le pitture rupestri, create nelle stesse grotte che, con ogni probabilità, costituivano il suo rifugio. Esse appartengono a un periodo temporale che si estende da 30.000 a 10.000 anni fa.

Di queste opere d'arte *ante litteram* esistono testimonianze anche in Europa e in particolare nelle regioni attorno al golfo di Biscaglia: nelle grotte di Altamira, in Spagna, o in quelle di Lascaux, in Francia (figura 9). Di rilievo sono anche le pitture di Chauvet, sempre in Francia.



Figura 9. Pitture rupestri di Altamira (Spagna), a sinistra, e di Lascaux (Francia), a destra.

Ma qual era la “tavolozza” dell’artista primitivo? Essenzialmente si trattava di ocre (o “terre”), a base di ossidi di ferro, per le tonalità dal giallo al rosso, fino al marrone:

- il rosso, ottenuto dalle ocre; miscelando l’ocra rossa e un nero si otteneva anche il marrone;
- il nero, ottenuto da minerali trovati nelle grotte come ossido di manganese (MnO_2), dalla fuliggine (nerofumo) o da legna combusta;
- il giallo, ottenuto anch’esso da ocre;
- il bianco, ottenuto dal gesso, dalle crete e dalle argille.

Ben più ricca diventa, come è possibile immaginare, la tavolozza nel corso dei secoli. La figura 10 e la figura 11 riportano, rispettivamente, la lista dei principali pigmenti disponibili prima e dopo il 1400. Questa ragguardevole varietà di pigmenti è dovuta ovviamente alla chimica, inizialmente grazie a processi di estrazione e purificazione di minerali naturali, a parte il caso del *blu egizio*, che è considerato il primo pigmento sintetico della storia e che meriterebbe indubbiamente una trattazione a parte; in un secondo tempo, grosso modo a partire dal tardo Settecento, la chimica interviene anche con la sintesi di nuovi minerali, talvolta a base organica (più esattamente, organometalli) che nel tempo sostituiscono per diversi motivi quelli utilizzati precedentemente (cf. a questo proposito il successivo § 4).

Indice utilizzo	Pigmento	Fine utilizzo	Indice utilizzo	Pigmento	Fine utilizzo
< 1400	Azzurrite, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	1825	< 1400	Terre Saponi, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	
"	Emersonite = $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)_2$ o $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	"	"	Giulio Piondo, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	1710
"	Azzurrite = $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)_2$	"	"	Bianco Piondo, $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$	
"	Bianco, idrossido		"	L'argento, PbO	
"	Bianco verde, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$		"	Aubrey, 1,2-dibromoisobutirato: Al(OH)_3	
"	Bianco rosso, $\text{Cu}_2(\text{PO}_4)_2$		"	Africa, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	1825
"	Nero verde, $\text{Cu}_2(\text{PO}_4)_2$		"	Mancini, PbO	
"	Nerofumo, carbone		"	Africa (Bianco Piondo), Pb_2O_3	
"	Calcite, CaCO_3 (abi terreno)		"	Oro Monaco, SnS_2	
"	Carbone di legno, carbone		"	Oggetti, As_2S_3	
"	Giulio (Fornigetto), HgS		"	Argento, As_2S_3	
"	Bianco rosso, sali di Cu in soluzione		"	Bianco Piondo, Pb_2O_3	
"	Blu Egizio, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10} \cdot [\text{CaO} \cdot \text{CuO} \cdot 4\text{SiO}_2]$		"	Terra Verde, sali di Fe, Mg, Al e K	
"	Giallo, creta gessosa		"	Chimica (naturale), sali di Na, S e Al [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]	1900
"	Bianco Verde, sali di Fe, Mg, Al e K		"	Fornigetto, $\text{Cu}_2\text{H}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	
"	Giallo, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		"	Fornigetto (Giulio), HgS	

Figura 10. *Pigmenti disponibili prima del 1400.*

Inizio utilizzo	Pigmento	Fine utilizzo	Inizio utilizzo	Pigmento	Fine utilizzo
< 1400	Azzurro: $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	1825	< 1400	Verde Fossile: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	
"	Azzurro = Giallo Piombo o Giallo Stagno	"	"	Giallo Piombo-Stagno	1710
"	Azzurro = Giallo Ocre	"	"	Azzurro Piombo , $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$	
"	Bianco, idrocarburi		"	L'azzurro, PbO	
"	Alc. verdini, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$		"	Azzurro, 1,2-dibromosuccinimide: Al(OH)_3	
"	Bianco nero, $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$		"	Verde Azz. $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	1825
"	Nero ossi, $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$		"	Marrone, PbO	
"	Nerylene, carbone		"	Azz. (Rosso Piombo), Pb_2O_3	
"	Calcina, CaCO_3 (dal termico)		"	Oro Moscovio, SnS ₂	
"	Carbone di legno, carbone		"	Opiopuntia, As_2S_3	
"	Cinabro (Fornigley), HgS		"	Azzurro, As_2S_3	
"	Rosso moscovio, sali di Cu in soluzione		"	Rosso Piombo, Pb_2O_3	
"	Bla Epitha, $\text{CaCu}_2(\text{O}_2)_2 \cdot [\text{CaO} \cdot \text{CuO} \cdot 4\text{SiO}_2]$		"	Terra Verde, miscela di Fe, Mg, Al e K	
"	Giallo, roccia gommata		"	Chromastone (naturale), miscela di Na, S e Al [$2\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{S}$]	1900
"	Terra Verde, miscela di Fe, Mg, Al e K		"	Fornigley, $\text{Cu}_2\text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	
"	Gomma, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		"	Fornigley (Cinabro), HgS	

Figura 11. *Pigmenti disponibili dopo il 1400.*

A titolo di esempio, nella figura 12 sono raffigurate le linee del tempo relative alla disponibilità dei principali pigmenti rossi e blu, mentre la figura 13 fotografa la varietà di blu resi disponibili dalla chimica che, anche grazie alla sintesi di organometalli, ha consentito nel tempo varianti di tonalità praticamente illimitate.



Figura 12. *Linea del tempo relativa alla disponibilità/uso dei principali pigmenti rossi o blu.*



Figura 13. Tonalità di blu rese disponibili nel tempo dalla chimica.

L'ultima generazione di pigmenti è rappresentata dai colori acrilici, ossia preparazioni, vendute in tubetto, che utilizzano polimeri sintetici prevalentemente come emulsione in acqua, con una ulteriore “moltiplicazione” di tonalità: per un approfondimento cf. ref. [4].

Per un *excursus* storico/scientifico sull'impatto della chimica nell'evoluzione della pittura si consiglia la lettura del piacevolissimo, conciso ma esauriente saggio di Adriano Zecchina [5], da cui è stato tratto il testo che segue.

Con il progresso della chimica, tra la seconda metà del Settecento e l'inizio del Novecento si osserva una vera e propria “rivoluzione del colore”: molti tra i nuovi composti sintetizzati sono colori e hanno prezzi alla portata di molti più pittori che in passato. È una situazione senza precedenti che rivoluzionerà l'arte pittorica.

Fino a quel momento gli artisti avevano a disposizione 16, 17 pigmenti che si ottenevano macinando minerali o vegetali. Per ottenere un certo tipo di verde c'erano le terre verdi, rocce contenenti ferro; per il blu egizio invece si ricorreva alla malachite, minerale di rame, che veniva mischiato con la sabbia e poi cotto nei forni. In epoca preistorica i pigmenti erano ancora meno e si utilizzavano principalmente l'ocra, il rosso dell'ematite e il nerofumo.

Nel corso dell'Ottocento, invece, la tavolozza dell'artista cambia faccia e si arricchisce di nuovi colori. In questo secolo arrivano a circa 60: i pigmenti di colore giallo, verde brillante, azzurro ceruleo e viola sono novità coloristiche che non avevano precedenti, in termini di intensità e luminosità. E senza questi colori i quadri di van Gogh non avrebbero mai potuto essere dipinti. Soltanto verso la fine dell'Ottocento i nuovi pigmenti diventano disponibili in quantità tale da poter essere utilizzati in modo esteso e abbondante sulle tele, permettendo ai pittori di ottenere un risultato pittorico più

luminoso e materico rispetto al passato. Sono colori che consentono di esprimere anche lo stato d'animo dell'artista, possibilità di cui era ben consapevole van Gogh.

Oltre ad aumentare quanto a numero, i colori diventano anche meno costosi. Nel 1840 vengono introdotti i tubetti di stagno con i colori pronti all'uso, cioè con i pigmenti già mescolati con l'olio di lino. Fino a qualche tempo prima il pittore doveva preparare da sé gli impasti, quando ne aveva bisogno. Ora invece gli artisti possono uscire dalle botteghe con la scatola di colori e dipingere dove capita, come del resto faceva anche van Gogh. È così che nasce il pittore *en plein air*.

4. *Chimica e arte: un rapporto a volte malsano*

4.1. *Dal mondo minerale: pigmenti "a rischio"*

Nel paragrafo precedente è stata delineata, senza la pretesa di essere esaustivi, una linea del tempo dei pigmenti disponibili al pittore. Il progresso scientifico-tecnologico riveste un notevole significato anche riguardo uno specifico aspetto dell'uso dei pigmenti, facilmente rilevabile dall'esame della figura 14 che, utilizzando come base la Tavola Periodica di Mendeleev, fornisce un colpo d'occhio cromatico sui principali elementi chimici i cui minerali venivano o vengono tuttora utilizzati come pigmenti.

Tra le diverse caselle della Tavola coperte da macchie di colore, evidenziare elementi come cromo (Cr), cobalto (Co), arsenico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg), piombo (Pb) non può che far riflettere su quelle che potevano essere le conseguenze sulla salute di quei "poveri" artisti che ne utilizzavano i minerali come pigmenti sulla loro tavolozza!

Ma questi "poveri" artisti, che a volte umettavano le dita sporche di pigmento con la lingua, o che a volte posavano il loro cibo frugale sulla tavolozza per non perdere l'ispirazione e interrompere il loro lavoro, erano consapevoli dei pericoli che correvano? La testimonianza scritta più attendibile che abbiamo risale all'epoca medievale e si deve al pittore italiano Cennino Cennini (1370-1440) il quale ne *Il Libro dell'Arte* (il più importante trattato sulla pittura nell'arte italiana e uno tra i principali per l'arte europea) scrisse, a proposito dell'orpimento

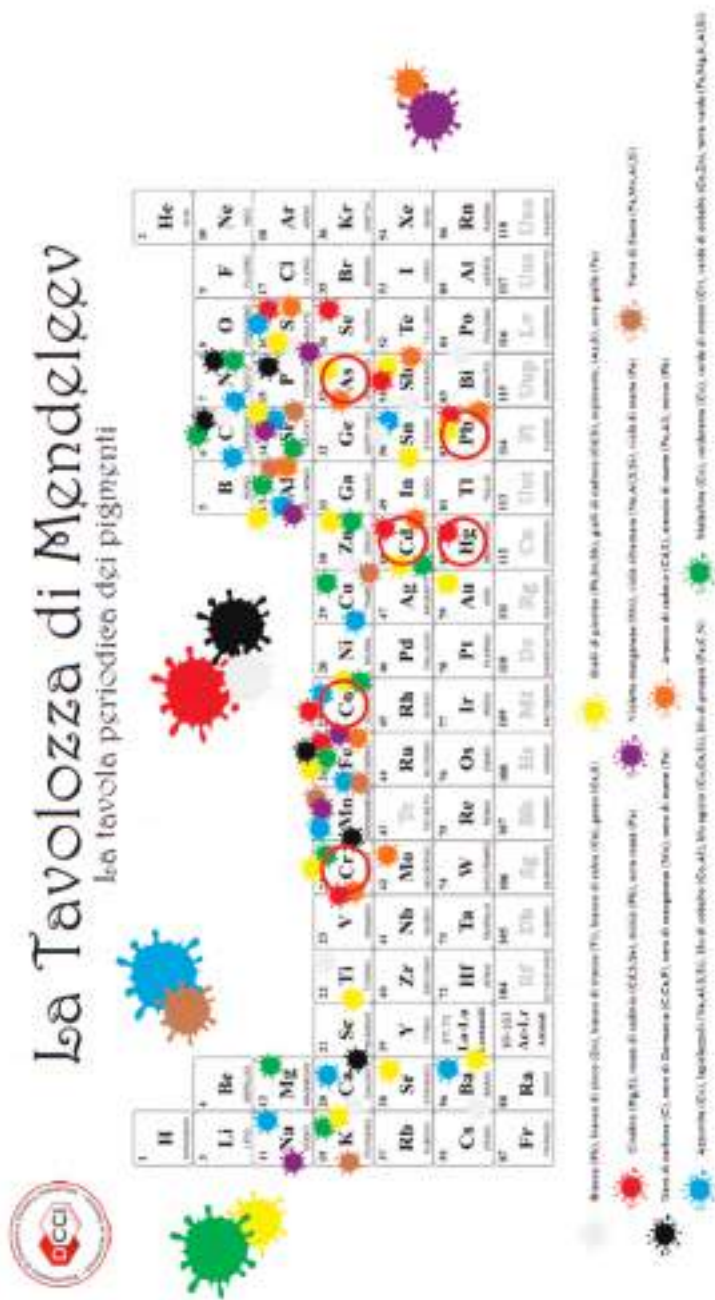


Figura 14. Colpo d'occhio cromatico sull'uso dei principali minerali come pigmenti (da un'idea della prof.ssa Silvia Vicini, DCCI-UniGE).

(As_2S_3 , solfuro di arsenico di origine artificiale; orpimento è la sintesi di oro+pi(g)mento, per la tonalità che questo pigmento, ovviamente molto ambito, forniva al manufatto):

Questo tal colore è artificiato e fatto d'archimia, ed è proprio toscò [tossico] [...] guardati da imbrattartene la bocca, che non ne riceva danno la persona.

Solo a fine Ottocento-inizio Novecento si comincia a ridurre l'uso e la produzione di pigmenti tossici, ma, consapevoli o meno che fossero gli artisti, l'arte pittorica utilizza pigmenti nocivi alla salute almeno fino ai primi decenni del Novecento! Nella figura 15 sono riportati alcuni minerali del cadmio (metallo isolato nel 1817) e di alcuni composti artificiali del quale sono state successivamente studiate le proprietà, con le relative diverse tonalità, utilizzati come pigmenti da artisti come Monet (*Bordighera*, 1884), Matisse (*La stanza rossa*, 1908), Munch (*L'urlo*, 1910)!



Figura 15. *Uso di minerali artificiali del cadmio potenzialmente tossici da parte di artisti fine Ottocento-inizio Novecento.*

Alcuni altri aspetti legati alla nocività di pigmenti “a rischio” sono ricordati qui di seguito.

- (i) Cromato di Pb (pigmento giallo) – Si pensa, ad esempio, possa aver messo a repentaglio la già debole salute di van Gogh, che lo ha utilizzato per i suoi famosi *Girasoli*, e che possa essere stato all'origine della cecità di Monet.

Non va dimenticato che l'intossicazione cronica da piombo (saturismo) comporta come principale sintomatologia anemia, coliche addominali, dolori articolari e, nelle forme più gravi, anche disturbi neurologici.

Viene attribuita al saturnismo la morte di molti celebri artisti: da Goya, che inumidiva i pennelli con la saliva, a Caravaggio, che posava il cibo sui quadri mangiando senza saperlo bocconi avvelenati. Per inciso, i ricchi romani avevano l'abitudine di addolcire il vino con ossidi di piombo, spesso conservandolo in botti del medesimo materiale: questa pratica provocava un graduale accumulo di piombo nell'organismo, che sul lungo periodo si rifletteva in comportamenti anomali e schizofrenici, portando infine alla pazzia. È stato ipotizzato che i disturbi caratteriali e mentali di alcuni imperatori romani, come Caligola, Nerone e Domiziano, fossero dovuti proprio al saturnismo.

- (ii) Acetoarseniato di Cu (pigmento verde smeraldo) – Potrebbe aver aggravato i problemi neurologici di van Gogh, così come aver causato il diabete in Cézanne.
- (iii) Si suppone che l'artrite reumatoide di Renoir e una malattia della pelle di Klee derivassero dall'impiego di colori contenenti metalli pesanti, come mercurio, arsenico, piombo, cadmio o cromo.

Per quanto riguarda, in particolare, il piombo, questo elemento è (o era) presente in un elevato numero di pigmenti di diverse tonalità, quali ad esempio minio (Pb_3O_4), giallo di piombo (cromato di Pb: PbCrO_4), giallo Napoli [$\text{Pb}_3(\text{SbO}_4)_2$], rosso cromo [$\text{PbCrO}_4 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$], ma ciò che è peggio è che è presente anche nella biacca o bianco di piombo [carbonato basico di Pb: $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$], ossia, per secoli, il più comune costituente dello strato di preparazione (cf. figura 3). Fondamentale è stato, a questo proposito, il progresso delle conoscenze e delle pratiche in chimica, che viene in soccorso dell'artista mettendo a disposizione due pigmenti bianchi per sostituire la biacca, e cioè:

- Bianco di Zinco (ZnO) – Utilizzato fin dall'antichità per la fabbricazione di leghe (ottone), lo zinco viene riconosciuto come elemento già nel 1747, ma solo alla fine del secolo l'ossido viene introdotto come pigmento. Tuttavia, ci mise un po' a entrare nell'uso comune a causa del costo elevato e del potere coprente inferiore a quello della biacca. Solo con metodi di produzione economici (produzione industriale) se ne avrà la diffusione dopo la metà del XIX secolo;
- Bianco di Titanio (TiO_2) – Il titanio viene scoperto come elemento alla fine del Settecento e isolato nel 1910; solo un decennio dopo si ha la massima produzione dell'ossido.

4.2. *Dal mondo vegetale: la Fata Verde*

Dalla chimica gli “attentati” alla salute dell’uomo non vengono solo dagli elementi o da composti inorganici: le sostanze di natura organica non sono senz’altro da meno e tra di esse, senza parlare di composti sintetizzati dall’uomo in laboratorio, potremmo citare svariate sostanze di origine naturale tossiche, velenose, psicotrope provenienti dal regno animale ma soprattutto da quello vegetale, prodotte nell’ambito del metabolismo secondario degli organismi con finalità diverse, ad esempio a scopo di difesa, non ancora tutte definitivamente accertate dalla ricerca.

In un panorama estremamente vasto e variegato, che non è certo argomento da trattare in questa sede, vale la pena citare, a puro titolo di curiosità, come nota folkloristica e di costume, il connubio chimica/arte rappresentato dall’uso dell’assenzio da parte di artisti di fine Ottocento-inizio Novecento.

L’assenzio è un distillato ad alta gradazione alcolica all’aroma di anice, derivato da fiori e foglie dell’assenzio maggiore (*Artemisia absinthium*). Essendo generalmente di colore verde smeraldo (colorazione dovuta al processo di infusione), l’assenzio è anche noto con l’epiteto *Fata Verde* (*Fée Verte* in francese, o *Green Fairy* nella lingua anglosassone) che ne richiama tra l’altro l’effetto euforico e stimolante. È decisamente uno dei distillati che più hanno attirato la fantasia di scrittori, poeti e pittori della seconda metà dell’Ottocento e, se si deve credere ai resoconti degli artisti dell’epoca, molti dei loro capolavori furono creati mentre si trovavano nello stato di ebbrezza causato dall’assenzio.

Oscar Wilde (1854-1900), autore, tra altre opere, del romanzo *Il ritratto di Dorian Gray*, in questi termini parla dell’assenzio:

Un bicchiere d’assenzio, non c’è niente di più poetico al mondo... Che differenza c’è tra un bicchiere di assenzio e un tramonto?

ma altrove così ne descrive gli effetti:

Dopo il primo bicchiere, vedi le cose come vorresti che fossero,
dopo il secondo vedi le cose come non sono,
alla fine vedi le cose come sono realmente, e questa è la cosa più orribile
al mondo.

Principale responsabile dell'effetto dell'assenzio sulla psiche umana è una molecola relativamente semplice, il tujone (figura 16); in dosi elevate, comunque difficilmente raggiungibili bevendo il distillato, questo olio essenziale (un monoterpene) può portare a crisi epilettiche e persino alla morte.

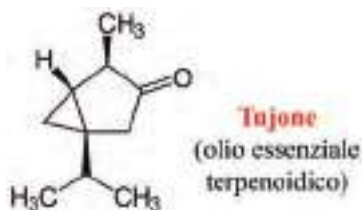


Figura 16. Il tujone, olio essenziale di natura terpenoidica, responsabile di alterazioni sensoriali e percettive in seguito all'assunzione di assenzio.

5. Chimici o artisti? Artisti anche chimici

A seguire, due esempi di artisti famosi in diversi campi dell'arte per i quali la chimica è stata di vitale importanza.

5.1. Aleksandr Porfir'evich Borodin: compositore e chimico

Alexander Borodin (San Pietroburgo, 1833-1877) è stato un compositore russo "romantico", noto soprattutto per le sue sinfonie, i quartetti d'archi, le *Danze Polovesiane*, il poema sinfonico *Nelle steppe dell'Asia Centrale* e per l'opera *Il Principe Igor*, dalla gestazione lunga e laboriosa a tal punto da rimanere incompiuta.

Purtroppo, l'attività di compositore non riusciva a garantire a Borodin una esistenza priva di preoccupazioni economiche, cosa che lo costrinse, se così possiamo dire, a mettere a frutto i suoi studi esercitando la professione del chimico. In effetti Borodin seppe farsi valere anche in questo ambito e collaborò con illustri chimici del tempo, tra i quali il tedesco Robert Bunsen, gli italiani Stanislao Cannizzaro, Raffaele Piria, Stefano Bertagnini, il francese Charles-Adolphe Wurtz, con il quale scoprì una storica reazione tuttora di fondamentale importanza nella sintesi organica: la reazione aldolica, o reazione, appunto, di Wurtz-Borodin. Del Borodin chimico si ricordano anche la pubbli-

cazione di un articolo sul benzene e la costituzione a Heidelberg della Società di Chimica.

Strinse amicizia con Dmitrij Mendeleev (1844-1907), colui che propose al mondo della scienza, nel 1869, la famosissima Tavola Periodica degli elementi, pietra miliare nell'evoluzione della conoscenza della chimica; con Mendeleev, Borodin partecipò nel 1860 al primo grande convegno internazionale dei chimici a Karlsruhe, in Germania: ulteriore testimonianza della sua valenza in questa disciplina!

5.2. *Primo Levi: scrittore e chimico*

Se la professione di chimico è servita a Borodin per sbarcare dignitosamente il lunario, a Primo Levi (Torino, 1919-1987) la laurea conseguita presso l'Università di Torino nel 1941 ha letteralmente salvato la vita: catturato il 13 dicembre 1943, Levi fu internato ad Auschwitz da febbraio 1944 a gennaio 1945, esperienza alla quale è sopravvissuto in quanto assegnato al laboratorio chimico del campo, potendo usufruire di privilegi non concessi ai comuni mortali.

Dopo la fine del conflitto mondiale, divenuto lo scrittore che conosciamo e ammiriamo per una vasta produzione letteraria, in gran parte autobiografica, ha potuto a buon titolo affermare "Scrivo perché sono un chimico!", riconoscendo il ruolo della chimica nel mantenerlo in vita, consentendogli di dedicarsi a quella che sarebbe diventata la sua principale occupazione!

Di Levi non si può non citare, in questa sede, *Il sistema periodico*. Edita nel 1975, l'opera è divisa in 21 capitoli, ognuno dei quali ha il nome di un elemento chimico e racconta un episodio preciso della sua vita che riguarda in qualche modo l'elemento che dà il nome al capitolo: qui la chimica, mai rinnegata da Levi, riaffiora tra le righe in tutta la sua forza! Nel capitolo *Il viaggio di un atomo di carbonio* Levi segue le peripezie di un atomo di carbonio, quasi personificato, che, inizialmente parte di un minerale (il carbonato di calcio, CaCO_3), viene "liberato" nell'aria come anidride carbonica (CO_2) e, dopo varie peripezie, viene fissato, assieme ad altri 5 "fratelli", in una molecola di glucosio ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). La figura 17 riprende una delle tavole grafiche che corredano una edizione del testo di Levi curata a scopo divulgativo dal Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Ateneo genovese e dalla Sezione Ligure della Società Chimica Italiana, arricchita da una

prefazione di Piero Angela: rappresenta appunto il fissaggio del carbonio nella molecola del glucosio ad opera della fotosintesi clorofilliana compiuta dalle piante verdi, a mio parere una delle espressioni di arte chimica “naturale” più suggestive!



Figura 17. *Rappresentazione grafica della fotosintesi clorofilliana, straordinaria espressione artistica della chimica della natura.*

6. Chimici o artisti? Artisti che si “improvvisano” chimici

6.1. Il “blu” di Yves Klein

Yves Klein (Nizza, 1928 – Parigi, 1962) ha avuto una vita artisticamente intensa e feconda ma molto breve, interrotta prematuramente da un infarto all’età di 34 anni. Pioniere del movimento del Nouveau Réalisme e anticipatore della Body Art (figura 18), verrà ricordato per aver creato un nuovo colore.

Per Klein il blu oltremare (il prezioso *lapislazzuli*) era “il colore assoluto”, e per questo ne volle brevettare, attraverso un complesso procedimento chimico, una variante tutta sua, dall’aspetto vellutato e super resistente soprattutto a variazioni ottiche/cromatiche nel tempo.



Figura 18. Yves Klein: a sinistra, *Antropometrie*, a destra, *Espressione della Body Art* (opera custodita al Musée d'Art Moderne et d'Art Contemporain di Nizza - Francia).

La sua idea cominciò a concretizzarsi quando, nel 1955, grazie all'aiuto di Édouard Adam, chimico francese, proprietario di un colorificio a Montparnasse, Parigi, entrò in contatto con il “Rhodopas M60A”, una resina sintetica impiegata come fissativo. Klein intuì che questa resina, se diluita con etanolo al 95% e acetato d'etile (solvente di natura organica), poteva essere utilizzata come legante creando, con la polvere di blu oltremare sintetico 1311, un colore opaco e privo di riflessi: un effetto che leganti tradizionali come colla di pesce, caseina o olio di lino non erano in grado di consentire.

Nel 1956, sempre con l'aiuto di Édouard Adam, con il quale collaborò e fece esperimenti per un intero anno, trovò il colore che venne chiamato “Blu Klein”, un blu oltremare intenso che l'artista definì “l'espressione più perfetta del blu”.

La figura 18(a) rappresenta una delle *antropometrie* [6] di Klein, per realizzare le quali le modelle si coloravano di *International Klein Blue* e stampavano la loro impronta sulla tela.

6.2. Il “nero” di Anish Kapoor

Nel 2014 la Surrey Nanosystems brevettò, per scopi aerospaziali, un materiale a base di nanotubi di carbonio, noto per essere uno dei pigmenti più scuri mai creati, capace di assorbire il 99,965% della luce visibile: il Vantablack (Vertically Aligned NanoTube Arrays). L'artista Anish Kapoor (Bombay, 1954) ha acquisito i diritti esclusivi per l'uso artistico di questo materiale, scatenando un dibattito sull'etica della proprietà e dell'esclusività nell'arte.

Vantablack ha la capacità di rendere gli oggetti tridimensionali completamente piatti, creando un effetto di spazio infinito, come mostrano le immagini (a), (b), (c) di figura 19.

Per la cronaca, Vantablack è stato il materiale più scuro conosciuto fino al 2019, anno in cui al MIT è stato scoperto un materiale dieci volte più scuro, il “Blackest black”, che trattiene il 99,995% della luce.

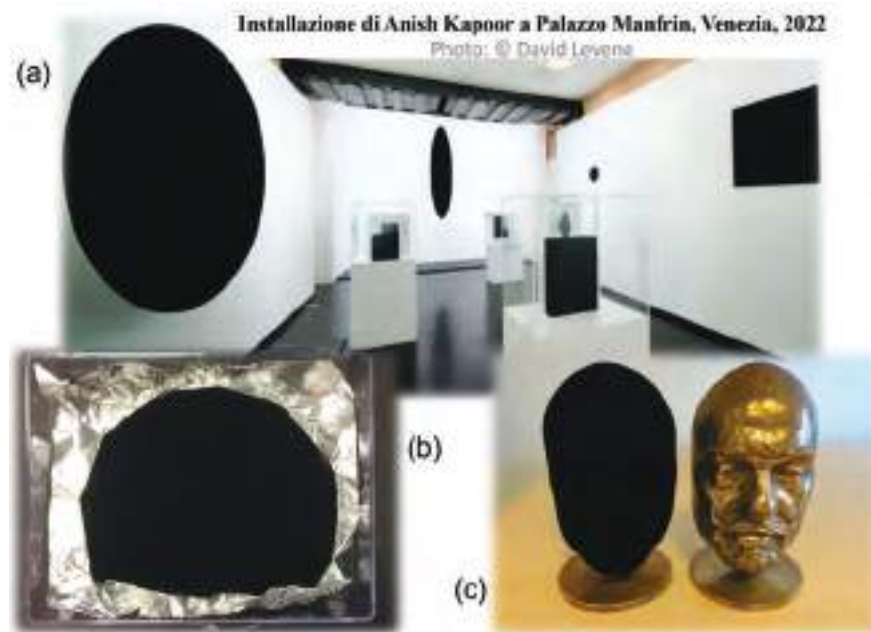


Figura 19. Effetti dell'uso di Vantablack. (a) “Buchi” immaginari (“spazio infinito”) creati dalla stesura su superfici come pareti o pavimenti. (b) e (c) Riduzione della tridimensionalità a bidimensionalità per stesura su un foglio di alluminio stropicciato o su una scultura.

6.3. Filippo Marinetti: Le aspettative del Futurismo dalla chimica

Filippo Tommaso Marinetti (1876-1944) è stato poeta, scrittore, drammaturgo e militare. È conosciuto soprattutto come il fondatore, nel 1909, del movimento futurista, movimento letterario, artistico e politico.

Non contento della sua poliedrica attività di artista, Marinetti volle esprimersi anche su aspetti salutistici dell'alimentazione:

Crediamo anzitutto necessaria l'abolizione della pastasciutta, assurda religione gastronomica italiana [...] Nel mangiarla sviluppano il tipico scetticismo ironico e sentimentale che tronca spesso il loro entusiasmo [...] Questo alimento amidaceo è un alimento che viene in gran parte digerito in bocca e il lavoro di trasformazione è disimpegnato dal pancreas e dal fegato. [...] Ciò porta ad uno squilibrio di questi organi. Ne derivano fiacchezza, pessimismo, inattività nostalgica e neutralismo

anche chiamando in ballo espressamente la chimica:

Invitiamo la chimica al dovere di dare presto al corpo le calorie necessarie mediante equivalenti nutritivi gratuiti di Stato, in polvere o pillole, composti albuminoidi, grassi sintetici e vitamine...

in un certo senso anticipando, ahimè, ciò che oggi stiamo sperimentando mediante la produzione, ad esempio, di carne coltivata o stampata!

7. *Chimici o artisti? Chimici anche artisti*

7.1. *Karl Djerassi (1923-2015)*

Il Chimico – Nell'ambito delle sue ricerche, Karl Djerassi ha ottimizzato, insieme a Luis E. Miramontes e Jorge Rosenkranz, la sintesi del noretisterone (o noretindrone, o progesterone sintetico) (figura 20), un farmaco che riproduce con maggiore efficacia gli effetti degli ormoni femminili e che (al contrario del progesterone) rimane attivo se consumato oralmente: in pratica, ha inventato la pillola anticoncezionale.

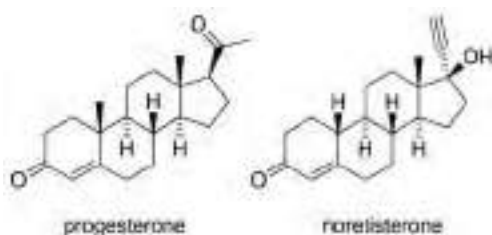


Figura 20. *Ormoni femminili: naturale (progesterone) e di sintesi (noretisterone).*

L'Artista – La produzione letteraria di Karl Djerassi è piuttosto nutrita, ricca di testi che hanno stretta attinenza con la scienza:

Saggi

La pillola, gli scimpanzé pigmei e i cavalli di Degas. La scoperta degli anti-concezionali (Garzanti, 1994); *Il Futurista e altre storie* (Sellerio, 1993).

Romanzi

Il dilemma di Cantor (Di Renzo Editore, 2003); *Operazione Bourbaki* (Di Renzo Editore, 2005); *NO* (Di Renzo Editore, 2006); *Marx è morto* (Di Renzo Editore, 2011).

Drammi

Ossigeno (CLUEB, 2003); *ICSI. Il sesso nell'epoca della riproduzione meccanica* (Di Renzo Editore, 2004); *Calcolo* (Di Renzo Editore, 2006).

Nel contesto del presente articolo merita particolare attenzione *Ossigeno*, pièce teatrale scritta a quattro mani con Roald Hoffmann (cf. § 7.2) e messa in scena in diversi teatri del mondo, nella quale sono dibattute le tematiche principali che si riscontrano nei testi di Djerassi, vale a dire:

- la costante competizione fra gli scienziati;
- la necessità della priorità nelle scoperte scientifiche perfino quando si corre il rischio di usare mezzi immorali;
- le conseguenze problematiche delle nuove scoperte;
- il ruolo delle donne nella ricerca e nella scienza.

In sintesi, la natura ambigua di una scoperta scientifica, l'importanza di arrivarci per primi, i conflitti morali che ne derivano ruotano, in *Ossigeno*, attorno alla scoperta/identificazione di questo elemento vitale: scoperta che varrebbe, nella finzione teatrale, il primo "retro-Nobel" (cioè un Nobel assegnato a una scoperta precedente alla istituzione del premio stesso nel 1901) per la Chimica al suo scopritore. Sempre nella finzione teatrale, i due chimici che si vantano della scoperta, ossia l'inglese Joseph Priestley, pastore della Chiesa unitaria, e il farmacista svedese Wilhelm Scheele, vengono convocati a Stoccolma da re Gustavo III nel 1777 insieme a colui, Antoine Lavoisier, che avrebbe in seguito razionalizzato il comportamento dell'ossigeno in diverse tra-

sformazioni chimiche, confutando la errata teoria del “flogisto” su cui si basano le conclusioni dei suoi illustri colleghi. Chi è il reale scopritore dell’ossigeno?

7.2. *Roald Hoffmann (1937)*

Il Chimico – Premio Nobel per la Chimica nel 1981, congiuntamente a Kenichi Fukui “per le loro teorie, sviluppate indipendentemente, riguardanti il corso delle reazioni chimiche”.

L’Artista – La produzione letteraria di Roald Hoffmann si concentra decisamente sull’argomento scienza, chimica in particolare, con le opere:

La chimica allo specchio, Longanesi, 2005;

Se si può, si deve?, Di Renzo Editore, 2007;

Come pensa un chimico?, Di Renzo Editore, 2009.

Nel § 7.1 è già stata ricordata la collaborazione con Djerassi alla stesura di *Ossigeno*. In questa sede l’attenzione viene focalizzata su *Se si può, si deve?* (*Should’ve*, ossia *Avrei dovuto...*), la cui trama, riportata molto in sintesi qui di seguito, è particolarmente significativa dal punto di vista etico.

Friedrich Wertheim, chimico che nasce in Europa da una famiglia ebrea all’epoca del nazismo ed emigra negli Usa, si toglie la vita dopo aver scoperto che un gruppo di terroristi ha utilizzato una neurotossina di sua invenzione per commettere un genocidio.

Le circostanze e le ragioni della sua morte sconvolgono profondamente la vita di tre persone a lui vicine:

- sua figlia Katie, anche lei una scienziata (biologa molecolare), ma con idee molto diverse sulle responsabilità proprie di uno scienziato;
- il suo partner, Stefan, un artista concettuale;
- la seconda (ed ex) moglie Julia.

In 29 scene i tre personaggi si interrogano sulle ragioni del suicidio, scoprendo scenari inaspettati nella riflessione sulle responsabilità sociali di scienziati e artisti.

Molto significativa è la scena che viene qui di seguito riprodotta nella versione in lingua anglosassone con la traduzione in italiano.

Nel dialogo risulta chiara la contrapposizione frontale tra Katie, molto pragmatica, conscia e convinta dei vantaggi che la ricerca scientifica può portare all’uomo se si fa un uso corretto delle scoperte (“E la morfina,

per il dolore”) ma assolutamente deresponsabilizzata riguardo all’abuso o all’uso scorretto delle stesse (“Non possiamo essere incolpati per ciò che i pazzi fanno con ciò che inventiamo”) e Julia, decisamente idealista, la cui concezione etica della scienza rifiuta totalmente che lo scienziato possa, moderno Ponzio Pilato, lavarsene le mani di fronte all’evidenza che una sua conquista venga abusata o usata a danno dell’uomo (“Ma quando qualcosa va storto [...]. Dici: ‘Non sono affari miei’”).

Katie: I’m still angry, Julia.

Julia: At me?

Katie: At all of you. As if we scientists were responsible for what’s wrong with the world. As if we created suicide bombers and... the concentration camps.

Julia: You didn’t, I know that. But you gave them plastic explosives and that Zyklon gas for the death camps.

Katie: And steel, as in a knife or a plow. And morphine, for pain and to get addicted to. To be used, to be misused. We can’t be blamed for what crazy people do with what we invent.

Julia: You can’t. I tell you, what bothers me about scientists is that when something is good, you take the credit for it. “We gave you the transistor! Now you can listen to that Beethoven quartet anywhere!” But when something goes amiss, when it’s used to kill, you just wash your hands of it. “That a misuse”. You say, “None of my business”.

Katie: Sono ancora arrabbiata.

Julia: Con me?

Katie: Con tutti voi. *Come se noi scienziati fossimo responsabili di ciò che non va nel mondo.* Come se avessimo creato gli attentatori suicidi e... i campi di concentramento.

Julia: Non l’hai fatto, lo so. Ma voi avete dato loro gli esplosivi al plastico e il gas Zyklon per i campi di sterminio.

Katie: E l’acciaio, come un coltello o un aratro. E la morfina, per il dolore e da cui diventare dipendenti. Essere usato, essere abusato. *Non possiamo essere incolpati per ciò che i pazzi fanno con ciò che inventiamo.*

Julia: Non puoi. Te lo dico, quello che mi dà fastidio degli scienziati è che quando qualcosa è buono, te ne prendi il merito. “Ti abbiamo dato il transistor! Ora puoi ascoltare quel quartetto di Beethoven ovunque!” *Ma quando qualcosa va storto, quando viene usato per uccidere, te ne lavi semplicemente le mani. “È un abuso”. Dici: “Non sono affari miei”.*

Consiglio la lettura dell’intervista all’autore condotta da Liberato Cardellini, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università Politecnica delle Marche [7].

8. Conclusioni

A conclusione di questa analisi, necessariamente incompleta, sull’interazione costante e proficua tra chimica e arte, vale la pena puntualizzare che l’arte è stata generalmente considerata come un settore

di nicchia, di per sé non sufficientemente remunerativo per giustificare una ricerca dedicata. In realtà molti degli avanzamenti raggiunti dalla chimica o dalla fisica, quanto a strumentazione, metodologie, materiali, sono stati letteralmente presi in prestito da artisti e operatori nell'ambito dei Beni Culturali (diagnosti, restauratori...) ed eventualmente adattati, migliorati, integrati ai fini dell'applicazione nella propria sfera professionale! Questo non sminuisce affatto, ovviamente, la natura virtuosa dello scambio continuo tra settori diversi dell'attività umana, quali arte e scienze, e chimica in particolare!

È fondamentale anche ribadire che il vissuto e l'opera di personaggi moderni o contemporanei come Levi, Djerassi, Hoffmann (*Artisti e Chimici* o *Chimici e Artisti* che siano, o siano stati) dimostrano come la scienza in generale e la chimica in particolare sia una disciplina dalle notevoli potenzialità come ponte culturale, per la divulgazione di un approccio alla scienza corretto ed etico, sempre rispettoso e soprattutto consapevole del fatto incontestabile che è l'uomo, non la scienza, ad essere eventualmente responsabile dei danni che il progresso scientifico può causare: "Fatti non foste a viver come bruti, ma per seguir virtute e conoscenza!", dice Ulisse al suo equipaggio (Dante Alighieri, *La Divina Commedia*, Inferno, Canto XXVI).

Bibliografia

- [1] Chanteau S.H., Tour J.M. *Synthesis of anthropomorphic molecules: the NanoPutians*. J. Org. Chem. 2003;68(23):8750-8766.
- [2] Nicolaou K.C. *Inspirations, discoveries, and future perspectives in total synthesis*. J. Org. Chem. 2009;74(3):951-972.
- [3] Per approfondimenti sull'argomento: (a) in rete: <https://wonderwhy.it/scoperte-serendipiche-luomo-che-invento-il-viola/>; (b) Garfield S. *Il malva di Perkin. Storia del colore che ha cambiato il mondo*. Milano, Garzanti, 2002.
- [4] <https://www.momarte.com/blog/tipi-di-pitture/storia-pittura-acrilica>.
- [5] Zecchina A. *Alchimie nell'arte: La chimica e l'evoluzione della pittura*. Milano, Zanichelli, 2012.
- [6] L'antropometria è un ramo della scienza che si occupa di misurare il corpo umano nella sua integrità o nelle sue componenti. Un video sulle performance antropometriche di Klein è visionabile all'indirizzo: <https://>

artslife.com/2017/02/09/le-antropometrie-di-yves-klein-donne-nu-de-come-pennello/.

- [7] https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2007_5_104_ca.pdf

Chimici artisti. Artisti chimici

Verranno illustrati alcuni esempi più rappresentativi della continua, dinamica interazione, non priva tuttavia di aspetti problematici, tra chimica e arte, mettendo anche in luce come il chimico possa servirsi proprio dell'arte come mezzo di comunicazione, anche critica, della scienza.

Parole chiave: chimica; arte; scienza ed etica.

Artist Chemists. Chemist Artists

Some more representative examples of the continuous, dynamic interaction, not without problematic aspects, between chemistry and art will be illustrated, also highlighting how the chemist can use art as a means of communication, also critical communication, of science.

Keywords: chemistry; art; science and ethics.

ENZO PRANZINI

*La strategia di Noè.
Come adattarsi al mare che avanza*

1. *Le prime orme sulla sabbia*

Le più antiche tracce dirette della frequentazione delle coste da parte di un *Homo sapiens* sono state lasciate da un individuo che, circa 117.000 anni fa, camminava sul bordo di uno stagno costiero in Sudafrica (Roberts e Berger 1977). Si sono conservate perché sono state subito coperte dalla sabbia portata dal vento, ma più che altro perché il livello del mare si stava abbassando, e nei millenni successivi non avrebbe mai più raggiunto quella quota.

In realtà, la nostra presenza lungo le coste è quasi contemporanea alla nostra origine (circa 300.000 anni fa), come lo fu quella degli altri ominidi che ci hanno preceduto, tanto che *Homo erectus* è stato anche definito *Homo litoralis*: i suoi reperti sono stati trovati all'interno di molte grotte costiere e sono ricchi di gusci di conchiglie. Da allora, la nostra espansione sulla Terra è avvenuta principalmente seguendo il bordo del mare, dove, per una specie di cacciatori-raccoglitori quali eravamo, le risorse erano decisamente più varie e abbondanti che non nell'entroterra. E le coste, nonostante siano soggette ad alluvioni da terra e da mare, a tsunami e all'attacco di nemici e pirati, hanno da sempre attratto l'uomo per le favorevoli condizioni climatiche, la morfologia pianeggiante e i suoli fertili, nonché per la facilità delle comunicazioni.

Negli ultimi due secoli è stata la ricerca del benessere fisico e dello svago a portare sempre più persone sulle coste, sia che vi si trasferissero in modo stabile, sia che vi si recassero per brevi periodi di vacanza.

Ma se è vero che fin dall'inizio le coste hanno attratto l'uomo, questi, nel passato, si è sempre tenuto a rispettosa distanza dall'acqua, e mai ha costruito le proprie abitazioni sulle spiagge, consapevole del rischio a cui sarebbero state esposte.

2. *Variazioni del livello del mare dalla comparsa dell'Homo sapiens a oggi*

Negli ultimi 300.000 anni la linea di riva si è spostata in continuazione a causa delle variazioni del livello del mare, indotte dallo sviluppo e dal ritiro dei ghiacciai continentali e dall'espansione e dalla contrazione termica dell'acqua marina. In molti tratti costieri a questo fenomeno si sono aggiunte le variazioni nell'apporto dei sedimenti erosi nei bacini idrografici e portati al mare dai fiumi, e i movimenti verticali del suolo dovuti alla subsidenza o prodotti dall'attività tettonica.

Quando il nostro antenato camminava su quelle spiagge, si era da poco superato il culmine dell'interglaciale Riss-Würm, che 125.000 anni fa aveva portato il livello del mare a una quota di circa 8 m superiore a quella attuale.

Quella ingressione marina lasciò tracce profonde su tutte le coste, anche se non interferì minimamente sulla vita di quei pochi umani che si aggiravano lungo le spiagge dell'Africa e, via via, di tutta la Terra. Indipendentemente dal fatto che il livello del mare si alzasse o si abbassasse, e che la linea di riva arretrasse o si spingesse verso il mare, c'era sempre una spiaggia dove andare a raccogliere conchiglie e pescare. Allora, quando non si avevano case in muratura e campi coltivati, era facile adattarsi ai continui spostamenti della linea di riva. E comunque, sebbene un allargamento della fascia costiera non costituisse un grosso problema, questo abbassamento del livello del mare era premonitore, o meglio il primo effetto, di importanti trasformazioni climatiche, e i discendenti del nostro camminatore si sarebbero trovati ben presto nel pieno di una fase glaciale, quella Würmiana, il cui culmine, circa 20.000 anni fa, portò il livello del mare quasi 130 m al di sotto della sua quota attuale, producendo una espansione delle terre emerse quale l'uomo non avrebbe mai più visto.

Fu la sua successiva risalita che sconvolse la vita di quei gruppi umani che si erano insediati sul bordo del mare, che stavano costruendo quegli insediamenti stabili che erano necessari per sfruttare la più grande rivoluzione mai fatta dall'uomo: l'invenzione dell'agricoltura. Questo avvenne nelle pianure costiere e in particolare sui delta fluviali, che sono le aree più favorevoli per l'agricoltura e dove infatti si svilupparono le grandi civiltà del passato (Tigri, Eufrate, Nilo, Gange, Indo, Fiume Giallo e Fiume Azzurro). Ma in queste zone la pendenza del terreno è minima e un piccolo innalzamento del livello del mare può determinare la sommersione di ampie fasce di territorio.

Non sorprende quindi che la notte, nella penombra delle capanne riscaldate dal fuoco, si raccontasse di un antenato che aveva preso il bestiame e si era spostato verso l'interno per sfuggire al mare che avanzava.

Un rapido innalzamento del livello del mare avvenne circa 8.200 anni fa, quando collassò un argine di ghiaccio che racchiudeva un enorme lago prodotto dalla fusione di una porzione della calotta glaciale Laurenziana: si stima che circa 100.000 miliardi di metri cubi d'acqua dolce si siano riversati in mare, alzandone il livello di 1,4 metri (Barber et al. 1999). Un diluvio universale lo ritroviamo, oltre che nel mito greco di Deucalione e Pirra, nel Libro dei Morti egiziano, fra i Maya, gli indiani Hopi, i Maori della Nuova Zelanda, i Mapuche cileni, i Muisca colombiani, fino gli aborigeni australiani. Forse è il ricordo di quell'evento, mentre quello mesopotamico di Gilgamesh potrebbe riferirsi al rapido innalzamento del livello del Mar Nero quando, circa 9.500 anni fa, quello del Mediterraneo superò la soglia del Bosforo.

Non sempre sappiamo che nome avesse chi evitò l'estinzione del genere umano, né quale offesa avessero fatto i suoi simili agli dèi per meritare tale castigo, ma nella Bibbia viene chiamato Noè.

Qualcuno certamente cercò di opporsi all'avanzata del mare, ma è difficile trovare le tracce dei suoi sforzi, essendo state spazzate via dalle onde e, comunque, sommerse dall'acqua. L'opera di difesa più antica che è stata fino ad oggi identificata è costituita da una scogliera in massi, parallela alla costa, che doveva proteggere il villaggio neolitico di Tel Hreiz, posto sul litorale dell'attuale Israele: dopo l'innalzamento del livello del mare di 7 m, ora giace su di un fondale di 3 m (Galili et al. 2019).

Il livello del mare ha continuato a salire, seppur lentamente, anche negli ultimi millenni, ma è dalla metà dell'Ottocento che ha avuto

un'accelerazione, che all'inizio era passata inosservata, se non agli addetti ai lavori, ma che ora preoccupa milioni di persone che vivono sul bordo del mare. Quella fascia costiera, che ci ha accolto così benevolmente, sembra essersi rivolta contro di noi, e chi vive sulle coste del mondo deve prendere in considerazione l'ipotesi di seguire l'esempio di Noè.

3. *Quale futuro per le nostre coste?*

Se gli effetti del “Diluvio universale” furono così traumatici quando sulla Terra vi erano pochi milioni di abitanti in insediamenti sparsi o piccoli villaggi, in genere posti a una certa distanza dall'acqua, della quale l'uomo aveva spesso un sacro terrore, cosa potrebbe accadere oggi, con 15 città con oltre 10 milioni di abitanti che si trovano sul bordo del mare?

Circa 230 milioni di persone vivono a una quota inferiore a un metro, e un miliardo sotto a quella dei 10 metri. Vi sono 630 milioni persone nella fascia che alcuni modelli d'innalzamento del livello del mare indicano come potenzialmente inondabile entro il 2100; e anche limitando la risalita eustatica a soli 50 cm, questa interesserebbe 570 città costiere, colpendo in modo diretto o indiretto i loro 800 milioni di abitanti (Kirezci et al. 2020).

3.1. *Le variazioni verticali del suolo*

Abbiamo visto come l'innalzamento del livello del mare, quale si è registrato dalla metà dell'Ottocento in avanti, abbia costituito una causa minore dell'erosione dei litorali, se non in aree interessate anche da abbassamenti del suolo dovuti alla subsidenza o all'attività tettonica.

Il caso più eclatante riguarda la costa olandese, che si sta abbassando per un riassetto della crosta terrestre dopo che, durante l'ultima era glaciale, si era innalzata in risposta allo sprofondamento della Scandinavia, sulla quale gravava il peso di una massa di ghiaccio che raggiungeva anche i 3 km di spessore. Il fatto che alcune parti di Rotterdam si trovino a una quota di oltre 6 m sotto al livello del mare è in parte frutto di questo fenomeno, che si somma all'innalzamento del livello del mare e alla subsidenza (figura 1).

Quest'ultimo processo è caratteristico delle aree di recente deposizione, dove i sedimenti si stanno compattando, determinando un ab-



Figura 1. Zuidplaspolder, periferia di Rotterdam: il monumento eretto nel punto più basso dell'Olanda (-6,74 m).

bassamento del suolo che è in genere di qualche millimetro all'anno, ma che può venire accelerato dall'estrazione di acqua o di idrocarburi dal sottosuolo, come avviene lungo le coste del Texas, dove la subsidenza può superare i 10 mm/anno e la superficie delle aree umide che si trasformano in mare aperto è direttamente correlata con i volumi di acqua, petrolio e gas che vengono estratti (Morton 2026). Ben più grave è la situazione di Jakarta, dove, a seguito del forte emungimento dalle

falde acquifere, necessario per soddisfare le richieste di una popolazione in forte aumento (negli ultimi 60 anni è passata da 1,6 a 11,1 milioni di abitanti), il suolo si abbassa di 25 cm all'anno, e il 95% della città sarà sommerso entro il 2050 (Wade 2019). Per impedirlo si pensa a una diga alta 24 m, lunga 34 km e radicata su 17 isole artificiali, che dovrebbe chiudere una laguna in cui il livello dell'acqua dovrebbe essere tenuto basso in modo da consentire ai fiumi che attraversano la città di defluire durante le piene. Alcuni studi, però, dimostrano che i 40 miliardi di dollari necessari per costruirla non farebbero altro che prolungare di una trentina di anni l'agonia della città.

Anche lo sviluppo urbano, e in particolare quello verticale, induce la subsidenza se la città è posta su sedimenti recenti non consolidati; e le due cause spesso agiscono in contemporanea. A Shanghai, sulla parte interna del delta del Fiume Giallo, la subsidenza raggiunse il valore di 83 mm/anno fra il 1956 e il 1965, e, come a Jakarta, era dovuta principalmente all'emungimento di acqua dal sottosuolo. La limitazione di questa attività e la re-immissione di acqua nelle falde aveva limitato il fenomeno, ma poi, la costruzione dei grattacieli, dei viadotti e di altre infrastrutture ha riportato il tasso di subsidenza a valori superiori ai 12 mm/anno e il centro della città si è abbassato di 2 o 3 metri, con i valori più alti proprio in prossimità delle costruzioni più pesanti (Liu e Hang 2013).

Non molto diversa è la situazione del ravennate, dove a una subsidenza naturale di un paio di millimetri all'anno se ne è aggiunta una indotta dall'estrazione dell'acqua e del gas dal sottosuolo, e sugli antistanti fondali fino a 5-6 km da riva, che aveva raggiunto, all'inizio degli anni Settanta, i 60 mm/anno, con abbassamenti localizzati fino a 110 mm/anno. La riduzione degli emungimenti sta riportando la subsidenza verso i valori naturali, anche se sulla costa rimane di circa 10 mm/anno (Teatini et al. 2005).

3.2. *L'innalzamento eustatico*

Ma è l'innalzamento del livello del mare il fattore che ora preoccupa maggiormente. In primo luogo, perché interessa tutti coloro che vivono lungo le coste e, più che altro, perché avrà valori ben superiori a quelli che ha avuto la subsidenza, fatta eccezione per casi estremamente particolari, come quello del centro di Shanghai.

Che il livello del mare si sia innalzato di 20-25 cm dal 1880 a oggi è un fatto accertato sulla base dei dati prodotti dai mareografi distribuiti, seppure in modo disomogeneo, lungo le coste del mondo. A questi dati puntuali si sono aggiunti quelli prodotti dai satelliti che, dalla messa in orbita del TOPEX-Poseidon nel 1992, misurano la quota della superficie di tutti gli oceani grazie agli altimetri radar: negli ultimi trent'anni il livello del mare si è innalzato mediamente di 10,1 cm (TOPEX-Poseidon 1992-2022), ossia quasi la metà dell'innalzamento avvenuto in 140 anni.

L'effetto sulla costa non è solo quello di una semplice sommersione, come un arretramento della linea di riva su di un piano inclinato, ma sembra che si verifichi anche un flusso di sabbia verso i fondali antistanti (Regola di Bruun, 1962) per mantenere le profondità fino a dove le onde muovono i sedimenti (profondità di chiusura).

Mentre la sommersione è istantanea, ed è relativamente poco preoccupante per innalzamenti modesti, il secondo, che è ben più impattante, avviene con molto ritardo. Gli effetti del *Sea Level Rise* (SLR) dei decenni passati potrebbero non essersi fatti ancora sentire nella loro totalità; e, anche se la risalita eustatica dovesse interrompersi oggi, continuerebbero a colpirci negli anni futuri.

Ma l'innalzamento del livello del mare non si sta fermando, bensì accelerando, come mostrano i dati più aggiornati e, secondo le previsioni di più lungo termine, potrebbe raggiungere valori tali da obbligare chi vive lungo le coste a seguire l'esempio di Noè.

Quando si parla di previsioni sull'innalzamento del livello del mare, si fa spesso riferimento agli scenari elaborati dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (2021) (figura 9a), il forum costituito da due organismi delle Nazioni Unite per lo studio delle variazioni climatiche, e a quelli prodotti dalla statunitense *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (figura 9b), entrambi sviluppati e periodicamente aggiornati da centinaia di specialisti di varie discipline. Gli scenari dell'ultimo Rapporto IPCC si basano su cinque diverse traiettorie di sviluppo più o meno sostenibile (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP) che porteranno le società umane a immettere nell'atmosfera differenti quantità di gas serra. La loro concentrazione seguirà altrettante traiettorie (*Representative Concentration Pathway*, RCP) con conseguente incremento della temperatura media dell'atmo-

sfera terrestre paragonabile a quello dovuto a un maggiore arrivo di energia solare pari a 1.9, 2.6, 4.5, 7.0 o 8.5 W/m².

Questi valori di RCP indicano l'incremento di energia (W/m²) trattenuta nell'atmosfera dal 1750 (preindustriale) a causa dell'aumento della concentrazione di gas serra secondo diversi SSP. La loro importanza si può capire dal confronto con l'energia solare che arriva in media sul nostro pianeta all'esterno dell'atmosfera (340 W/m²): 8,5 W/m² costituiscono un incremento del 2,5%, che, in un sistema naturale in quasi-equilibrio, non è poco!

È così che si ottengono le cinque curve che rappresentano l'innalzamento del livello del mare "più probabile" in ciascuno scenario IPCC (figura 2a). Ovviamente, nei dati vengono considerati i diversi gradi di incertezza delle previsioni, ma, fino al penultimo Rapporto, erano ritenuti da alcuni ricercatori assai conservativi, in quanto non tenevano conto di alcuni processi che al momento non erano ancora ben conosciuti o i cui effetti correttamente quantificabili.

Al contrario, gli scenari NOAA (figura 2b), pur partendo dagli stessi RCP, hanno sempre considerato anche questi processi, come ad esempio una maggiore velocità di scorrimento del ghiaccio in Antartide, o l'immissione di metano nell'atmosfera conseguente alla fusione del permafrost nell'Artico. L'obiettivo era quello di fornire stime di innalzamento del livello del mare finalizzate alla gestione del rischio e, quindi, prendendo in considerazione anche processi scarsamente probabili, ma

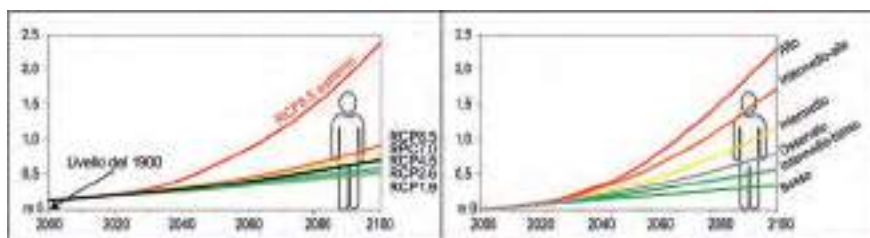


Figura 2a (sinistra). *Innalzamento del livello del mare, rispetto al livello del 1900, dovuto al riscaldamento globale secondo il WG1 dell'International Panel for Climate Change.* Figura 2b (destra). *Innalzamento del livello del mare, rispetto a quello del 2000, secondo le previsioni del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) nei cinque scenari di RPC e nell'estrapolazione dei dati fino ad oggi osservati. Modificato da NOAA Climate.gov graph.*

che non è possibile escludere completamente; ciò per preparare cittadini e pianificatori ad eventi che, pur avendo una bassissima probabilità di accadimento, potrebbero produrre danni estremamente gravi.

E questi possono interessare tutte quelle infrastrutture che sono essenziali per un Paese, come gli impianti di produzione di energia, le vie di comunicazione, i porti, gli ospedali, e anche le abitazioni di noi tutti.

Anche per questo motivo, l'ultimo Rapporto del Gruppo che nell'ambito dell'IPCC si occupa dell'innalzamento del livello del mare (WG1: *The Physical Science Basis*) abbandona la tradizionale cautela e inserisce nelle proiezioni anche traiettorie assai più pessimistiche, fino alla curva di risalita del livello del mare RCP8.5 estrema, che compare nella figura 2a. Ovviamente, il livello eustatico previsto deve essere corretto tenendo conto di numerosi fattori locali, che possono incrementarne o ridurne il valore anche di diversi decimetri, per giungere alla variazione di livello relativa, ossia quella che effettivamente si potrebbe osservare lungo i diversi tratti costieri.

4. *La strategia di Noè*

Come evidenziano tutte le curve di SLR, il fenomeno avrà un'accelerazione con il passare degli anni e quando i suoi effetti saranno ancor più evidenti, il tempo per le decisioni sarà ormai scaduto.

Nel 2019 la Banca Mondiale ha presentato i risultati di uno studio che ha calcolato il costo che avranno gli adattamenti all'innalzamento del livello del mare da qui al 2100 (Nicholls et al. 2019). L'analisi si è basata su un modello digitale della costa con quota del terreno e considerando un centinaio di parametri, dalla densità di popolazione all'uso del suolo, dal valore delle strutture antropiche al costo della costruzione delle difese, nonché di quello della loro manutenzione e adeguamento al progressivo innalzamento del mare. Sulla base dello scenario IPCC pessimistico disponibile in quel momento, con un livello del mare di solo 1,03 m superiore a quello medio del periodo 1985-2005, è emerso che per la difesa di tutte le coste della Terra dovranno essere spesi 18.300 miliardi di dollari.

E ciò dovrebbe consentire la difesa di solo un terzo delle coste del mondo, per le quali l'analisi costi/benefici indica la convenienza.

Ovviamente, la scelta ricadrà sulle megalopoli costiere, sui poli industriali e sui grandi delta fluviali, dove vive una quota significativa della popolazione mondiale e dove anche un piccolo innalzamento del livello del mare comporterebbe la perdita di estese superfici agricole.

In tutte le altre zone sarà più conveniente procedere con un arretramento strategico che, sul lungo periodo, costerà meno rispetto alla difesa, ma che certamente avrà costi economici, sociali e di conseguenza politici, importanti e darà luogo a spostamenti delle popolazioni non facilmente gestibili. Questa parte dei rifugiati climatici costituisce una bomba appena innescata a cui si presta poca attenzione. Fino a oggi il problema ha interessato pochi abitanti di piccole isole coralline dell'Oceano Pacifico, che stanno per essere sommerse dal mare, e che comprano altre isole o cercano ospitalità in paesi vicini; ma cosa accadrà quando a dover arretrare saranno i milioni di individui dediti all'agricoltura in territori spesso già ora più bassi del livello del mare e che vivono in paesi che non avranno mai le risorse per fare fronte al mare che avanza? E a questi si uniranno tutti quelli che non dall'acqua verranno scacciati, ma dalla sua mancanza, anche questa determinata dalle variazioni climatiche in atto. Purtroppo, fra gli aggiornamenti dei dati che il mondo scientifico produce e i nuovi fattori che via via emergono, sono più numerosi quelli che spostano gli scenari dalle valutazioni ottimistiche verso quelle pessimistiche, che non quelli con effetto contrario. Il Rapporto 2022 dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) mostra che il tasso di innalzamento medio del livello degli oceani è passato da 2,1 mm/anno del periodo 1993-2002 a 2,9 mm/anno del 2003-2012, per arrivare a 4,5 mm/anno nell'ultimo periodo gennaio 2013-gennaio 2022 (figura 3).

Un livello del mare più alto determina anche una maggiore risalita delle onde durante le mareggiate, cosa particolarmente pericolosa nelle zone investite dagli uragani, la cui frequenza e intensità sta aumentando in modo significativo, tanto che negli Stati Uniti 9 dei 10 uragani economicamente più impattanti si sono abbattuti nel XXI secolo, anche se bisogna considerare che il valore di quanto vi è sulle coste è in continua crescita. Nel Mediterraneo le variazioni climatiche in atto non sembrano per il momento aver determinato un aumento della intensità degli eventi estremi, mentre è certo che essi ci colpiscono con una maggiore frequenza che non nel passato. E sarà difficile definirli "estremi"!

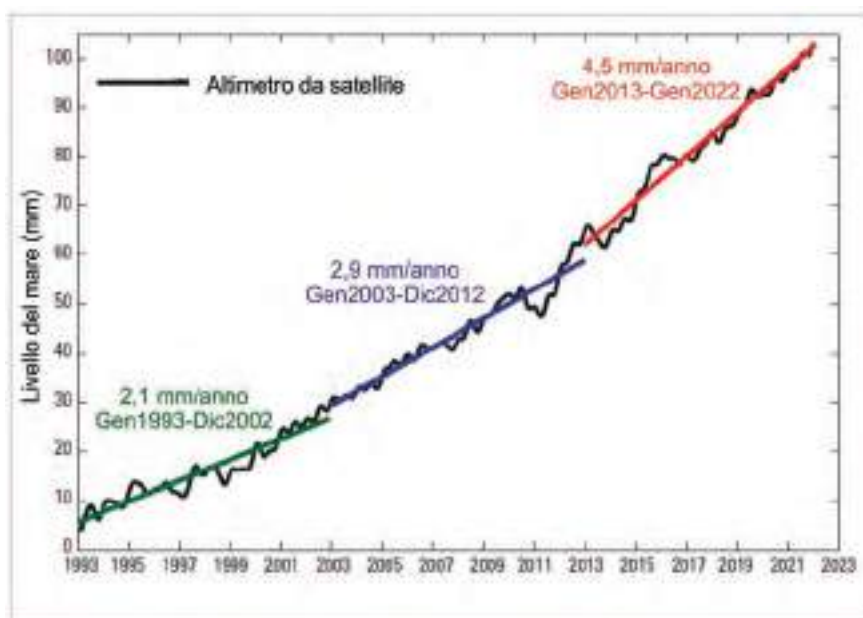


Figura 3. *L'innalzamento del livello del mare misurato dai satelliti negli ultimi trent'anni (dati da AVISO+ in WMO).*

Non solo, ma con l'innalzamento del livello del mare previsto già per la metà di questo secolo, eventi di "acqua alta" ora associati a un tempo di ritorno di 100 anni si ripeteranno ogni anno, mettendo in crisi molte città costiere. Shanghai è già ora difesa da 520 km di dighe, ma mezza città è ancora destinata ad andare sott'acqua con il livello del mare previsto nel 2100. L'Olanda ha oltre 22.000 km di dighe che orlano non solo la costa ma anche i corsi d'acqua naturali e artificiali e dovrebbe poter sopportare un innalzamento del livello del mare di 40 cm. La protezione, di cui dighe e argini sono solo una componente, consente oggi a 9 milioni di persone di vivere sotto al livello del mare e ha portato le probabilità di inondazione di Rotterdam e di Amsterdam a 1 su 100.000 all'anno. In parallelo, si sta attuando un programma di abbandono di numerose aree agricole che si lasceranno inondare per evitare che sott'acqua finiscano le città. Come si vede, la lezione ricevuta dagli olandesi nel 1953, quando il collasso delle dighe portò alla morte di circa 2.000 persone, è stata appresa dalla popolazione per la quale la difesa delle alluvioni da mare è diventata un obiettivo strategico.

Anche gli abitanti di New Orleans hanno imparato la lezione impartita dall'uragano Katrina, che nel 2005 ha determinato la sommersione dell'80% della città e la morte di circa 1.400 persone. Il sistema di difesa che è stato attuato negli anni successivi, basato su dighe, argini, barriere mobili e la stazione di pompaggio più grande del mondo, ha portato il tempo di ritorno di una simile inondazione a 100 anni.

Lo stesso problema affligge gli 8 milioni di abitanti di Ho Chi Minh City, città posta sul delta del Saigon, che si trovano esposti ad alluvioni provenienti da terra e da mare, cosa che coinvolge in modo drammatico i 2 milioni di lavoratori migranti che vivono sulle barche, che certamente non sono state costruite per resistere a eventi catastrofici (Al 2018). Le case galleggianti possono essere una risposta all'innalzamento del mare e alla necessità di espandere l'abitato dove la terra è ormai satura di infrastrutture, ma la loro ubicazione e progettazione è tutt'altra cosa rispetto all'arrivo dei migranti interni su esili barchette che vengono ormeggiate l'una accanto all'altra.

Molte città si stanno attrezzando per superare brevi momenti di acqua alta, dovuta sia a precipitazioni intense innescate dal riscaldamento globale, sia da mareggiate estreme su un livello del mare più alto: sono le "città spugna" (Shao 2016).

La paternità di questo nome va riconosciuta ai cinesi, che nel 2015, dopo l'alluvione che colpì Pechino nel 2012 causando 79 vittime, decisero di rendere meno esposte alle precipitazioni intense sedici città del Paese, trasformandole in vere e proprie spugne in grado di raccogliere e assorbire l'acqua, con superfici permeabili e alberi in grado di drenare il terreno e restituire l'acqua all'atmosfera. Componente importante ne sono le *piazze inondabili*: spazi pubblici urbani progettati per essere visuti per tutto l'anno, eccetto in alcuni giorni in cui le si lasciano allagare per ridurre l'impatto degli eventi estremi sulle aree edificate circostanti.

La prima piazza inondabile venne costruita a Rotterdam nel 2012, con la piccola Bellamyplein Water Plaza (300 m²), affiancata nell'anno successivo dalla più estesa Benthemplein Water Square (1700 m²). Qui la gente passeggia, pratica sport, e assiste a eventi musicali e teatrali, salvo poi lasciarla occasionalmente alle sue funzioni idrauliche, che non consistono solo nella raccolta di acqua ma anche nella ricarica delle falde idriche sotterranee attraverso griglie e superfici permeabili. In molte realizzazioni l'acqua va prima in serbatoi sotterranei e solo in



Figura 4. Stoccolma, *Sergels Torg*: piazza progettata per essere allagata durante gli eventi estremi.

casi eccezionali allaga le piazze. Oltre che in Olanda e in Cina, ne troviamo esempi in Danimarca, Francia, Svezia (figura 4), Stati Uniti, con progetti che prevedono anche la trasformazione delle strade in canali di raccolta dell'acqua.

Tutto l'opposto di quanto si fa in Italia, dove ogni anno si impermeabilizzano più di 20 km² di territorio (Munafò 2023), che certamente non sono bilanciati dalla realizzazione dei rari parchi periurbani, come quello di Milano Nord o quello di San Donnino, alla periferia di Bologna.

L'unico intervento significativo in area urbana è stato realizzato dal Comune di Rimini che, con il Parco del Mare (figura 5), ha creato dei bacini, anche sotterranei, di contenimento per l'acqua piovana e quella proveniente dalla rete fluviale, l'elevazione di un metro della passeggiata, portandola a 2,85 m sul livello del mare, per conferirle la funzione aggiuntiva di diga arretrata, e la creazione di un'ampia area pedonale con verde attrezzato (Bagli et al. 2022). Sulla cisterna, da cui l'acqua viene spinta in mare, vi è una piazza sopraelevata; una vera terrazza sul mare.



Figura 5. Rimini, Parco del Mare. Estensione delle aree inondate nel 2050, senza (in alto) e con (in basso) il Parco del Mare (Bagli et al. 2022).

Per le città costiere, queste però sono soluzioni in grado solo di assorbire l'acqua in momenti di crisi e restituirla successivamente al mare, ma non saranno sufficienti a tenerle all'asciutto quando il livello eustatico sarà significativamente più alto.

Le società che decideranno di proteggere a oltranza i propri territori costieri (figura 6) si dovranno assumere un impegno di lunghissimo (forse eterno!) termine e dovranno poter disporre di risorse adeguate. Intraprendere questa strada, senza la garanzia che queste risorse saranno disponibili anche in futuro, darà agli abitanti un falso senso di sicurezza, che potrebbe portare a maggiori disastri costieri. Basti pensare che per tutti gli scenari analizzati, la spesa maggiore da qui al 2100 non sarà per la costruzione di nuove difese, bensì per la manutenzione di quelle già realizzate o che si costruiranno nei prossimi decenni. Se si valuta che questo impegno non potrà essere mantenuto, sarebbe meglio decidere subito per l'arretramento strategico, seguendo l'esempio di Noè, che, divinamente consigliato, non fece resistenza al mare che avanzava.

Più saggia è l'operazione in corso in Francia, dove, dopo l'uragano Xynthia, che si abbatté fra la Gironda e l'estuario della Loira il 28 febbraio 2010, e che causò 47 morti e l'allagamento di 50.000 ettari di terreno, lo Stato si è fatto carico dei costi di demolizione e di ricostruzione in un'area più sicura di circa 800 abitazioni. A Fairbourne, nel Galles, si sta valutando l'ipotesi di spostare l'intero paese di 850 abitanti prima che venga raggiunto dal mare.



La **Difesa** è la strategia adottata fino ad oggi, e consiste nell'opporsi al mare che avanza costruendo scogliere, dighe, argini che impediscano l'erosione del litorale e la sommersione delle aree costiere. È prevedibile che continueremo a realizzare simili opere dove vi sono importanti insediamenti urbani e i principali poli industriali, anche se ciò comporterà costi enormi sul lungo periodo.

L'**Adattamento** consiste nella modifica delle opere antropiche, in modo che la loro funzionalità non venga persa a seguito dell'arretramento della linea di riva indotto o meno dalla risalita eustatica. Gli edifici presenti in prossimità del mare andranno rialzati, e i locali posti più in basso impermeabilizzati. L'innalzamento dovrà riguardare anche le vie di comunicazione e tutte le infrastrutture connesse ai nostri insediamenti (sistema fognario, reti di distribuzione, ecc.).

L'**Arretramento gestito** prevede lo spostamento di tutte le opere antropiche in aree che, secondo gli scenari futuri, si prevede non verranno raggiunte dall'acqua. L'uomo, nella propria storia, ha già dovuto fare scelte simili, ma lo ha fatto sempre a seguito di eventi catastrofici e senza poterlo pianificare nei tempi e nei modi più opportuni.

Figura 6. *Le diverse strategie di risposta al mare che avanza.*

Per le aree rurali o con insediamento diffuso, gli studi dimostrano che sul lungo periodo l'arretramento è la strategia più sostenibile, dal punto di vista ambientale, sociale ed economico, in particolare se l'analisi costi/benefici considera anche le generazioni future (figura 6). In molti Paesi si stanno delimitando le fasce di rispetto in cui non solo è vietato costruire, ma anche ricostruire edifici e strutture danneggiate, arrivando fino alla loro delocalizzazione preventiva. Su tali zone di *set back* si basano, ad esempio, i piani di adattamento all'innalzamento del livello del mare di Australia, Nuova Zelanda, Paesi Bassi e Cuba. Questi piani sono il frutto di analisi dettagliate che prendono in considerazione moltissimi parametri ambientali, economici e sociali, e, una volta sviluppati, è possibile anche interrogarli sui risultati che produrrebbero le varie strategie nel caso di variazione dei dati di input. In Croazia, con

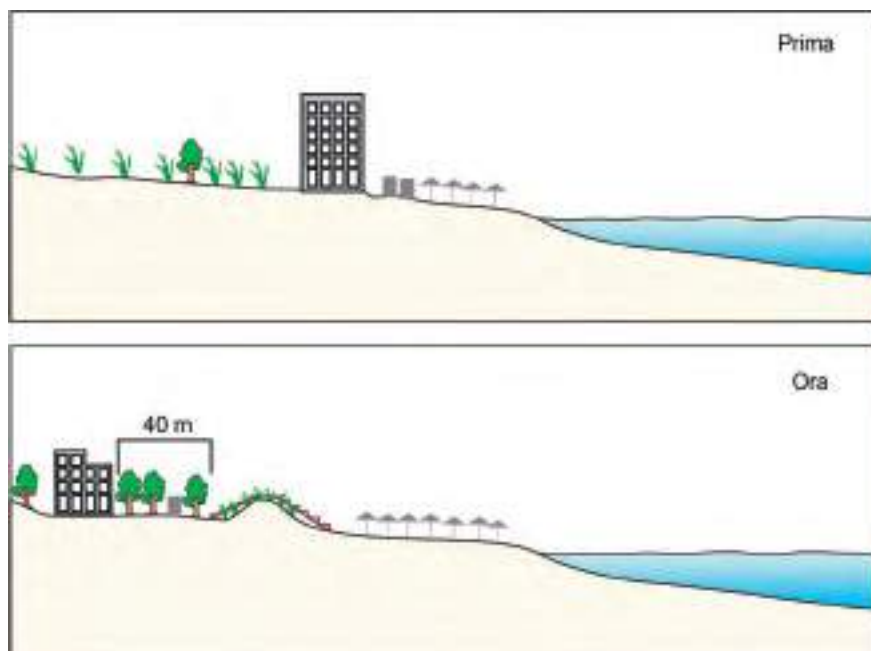


Figura 7. *Arretramento strategico delle strutture turistiche a Varadero (Cuba).*

la restrizione edilizia nelle zone non ancora urbanizzate, si calcola che i danni economici delle inondazioni costiere potrebbero essere ridotti fino al 39% e, se si includerà l'arretramento gestito delle costruzioni in aree a bassa densità insediativa, la riduzione potrebbe raggiungere il 93% (Lincke et al. 2020).

Sia gli Organismi internazionali (es. UNESCO 2021) sia alcuni governi centrali hanno formulato linee guida per aiutare le comunità locali a produrre piani di gestione basati su solidi dati scientifici, come ad esempio hanno fatto il Ministero dell'Ambiente della Nuova Zelanda (2017) e la Commissione Costiera della California (2018), ma in Italia solo nel dicembre 2023 è stato approvato un Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (MASE 2023) che prende in considerazione anche le coste, con l'innalzamento del livello del mare e gli eventi meteomarinari estremi. È certamente un atto essenziale per dare avvio a una politica di gestione degli impatti del cambiamento climatico, ma rimane pur sempre un documento programmatico nel

quale si individuano delle linee generali: siamo ben lontani dal poter definire cosa debba essere fatto nei singoli tratti costieri esposti al rischio di erosione o di sommersione da mareggiate estreme.

Alcuni Paesi sono decisamente più avanti, come ad esempio la Western Australia, dove chi costruisce su di un livello del mare inferiore ai 5 metri deve presentare una valutazione di vulnerabilità, e chi costruisce le difese costiere si impegna a pagare in eterno il ripascimento delle spiagge di cui avesse causato l'erosione, vincolando in questo anche eredi ed eventuali compratori (City of Rockingham 2019; Robb et al. 2018).

A Varadero (Cuba) lo spostamento degli hotel dietro le dune ha mostrato i suoi benefici quando, nel 2017, l'uragano Irma ha colpito la costa: un gruppo multidisciplinare di esperti istituito dal Ministero della Scienza, della Tecnologia e dell'Ambiente (CITMA) ha certificato che nei settori di litorale in cui era già stato completato il riallineamento non si sono prodotte erosioni permanenti della spiaggia e danni alle strutture, mentre l'impatto è stato molto intenso nei settori non ancora modificati (figura 7).

5. *Adattamento flessibile*

Qualsiasi misura di adattamento all'ingressione marina venisse adottata non potrebbe garantire risultati certi, sia perché l'esperienza dell'*Homo sapiens* a un tale fenomeno è ferma ai tempi di Noè, sia perché gli scenari futuri non sono prevedibili con assoluta certezza.

Alcune strategie potrebbero risultare inizialmente efficaci, ma poi non rispondere adeguatamente alle condizioni che si venissero a creare in tempi successivi. Per questo si fa ricorso alla gestione adattiva, un processo che consente di agire in condizioni di incertezza sulla base delle migliori conoscenze in quel momento disponibili, monitorare e valutare i risultati dei nostri interventi, per poi aggiornare le strategie sulla base delle informazioni acquisite.

Forse è necessario andare oltre. Pur nell'impossibilità di prevedere oggi le modifiche che si potrebbero rivelare necessarie in futuro, sarebbe opportuno che queste fossero attuabili senza dover abbandonare completamente quanto realizzato fino a quel momento. Si tratterebbe di

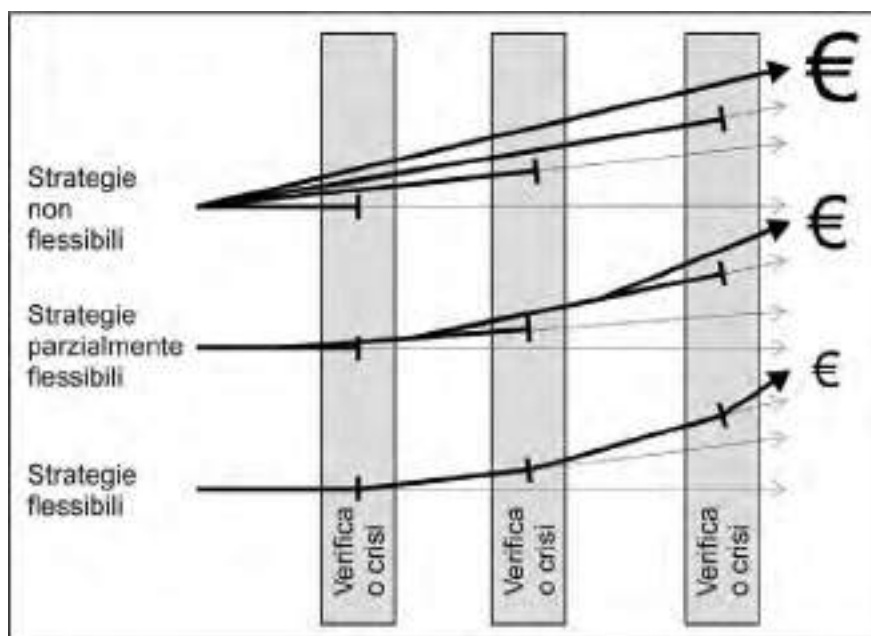


Figura 8. *Una strategia di adattamento flessibile, se non dà i risultati sperati o se cambiano gli scenari previsti, consente di essere modificata capitalizzando comunque gli investimenti fatti in precedenza.*

intraprendere strade che, nel caso si dimostrassero senza sfondo, avessero delle deviazioni non troppo lontane dal punto in cui ci saremo trovati (figura 8).

Questo consentirebbe di capitalizzare parte degli sforzi fatti fino a quel momento e rendere le nuove soluzioni meno costose, dal punto di vista non solo economico ma anche sociale. Nel tracciare un percorso di adattamento all'innalzamento del livello del mare ci si dovrà porre la domanda "se questa soluzione si dimostrasse sbagliata, o non più sufficiente, sarà possibile modificarla, o dovrò ripartire da zero?".

In definitiva, fra due strategie, potrebbe essere scelta quella che ha una probabilità di successo leggermente inferiore, ma che, all'occorrenza, fosse modificabile senza farci perdere, o perdere solo in parte, l'investimento effettuato.

6. *Siamo pronti a salire a bordo dell'arca?*

Studi fatti attraverso interviste, o anche solo valutando le reazioni degli abitanti alle ipotesi di delocalizzazione delle proprie abitazioni, sembrano indicare che le opinioni delle parti interessate (normali cittadini e investitori) siano più negative sui risultati dell'arretramento strategico, come metodo di gestione del rischio di alluvione, rispetto a quelle di ricercatori, consulenti e professionisti. Ciò crea un divario tra quello che i responsabili della gestione del territorio dovrebbero decidere e quanto le parti interessate sono disposte ad accettare. Ne sono un esempio i conflitti innescati dall'istituzione di una linea di *set back* nella città di Cape Town (Sudafrica) (Cartwright e Taylor 2015) o l'accesa discussione in atto a Fairbourne (Galles) fra chi vuole arretrare e chi preferisce morire, magari annegato, in casa propria.

Ed è questo il problema principale per chi deve assumere oggi decisioni che potrebbero dimostrarsi vincenti solo fra alcune decine di anni: non trova il consenso della gran parte dei cittadini. I tempi di pianificazione sono dettati dai ritmi elettorali, non da una visione del futuro: ecco che una bella scogliera porta più voti della demolizione di un edificio sulla spiaggia (magari abusivo) o dello spostamento all'interno di un lungomare attaccato dalle onde.

Buona parte di coloro che vivono lungo le coste non accetteranno di buon grado di arretrare, e alcuni pensano che sarà necessario operare in quello che già viene definito "stato di guerra", arrivando ad affermare che quanto è stato fatto contro il Covid-19 costituisca il migliore allenamento possibile per la prossima competizione planetaria. Questo contrasta con i risultati di una comparazione fra il livello di democraticità dei vari Paesi e il successo da questi raggiunto nelle strategie di risposta alle variazioni climatiche, che mettono in evidenza come le migliori performance siano dei sistemi democratici rispetto a quelle ottenute dai regimi totalitari, e come, fra i primi, siano ancor più efficienti le democrazie partecipative (Fiorino 2018). Ciò significa che, oltre alla condivisione dei dati e dei possibili scenari futuri, è fondamentale un coinvolgimento diretto dei cittadini nelle valutazioni e nelle proposte di soluzione.

Un esempio ci viene da Rhode Island (USA), che da anni sviluppa piani e misure per rispondere all'innalzamento del livello del mare, fra cui ve ne è una, certamente non efficace dal punto di vista fisico,

ma che ha cambiato completamente il modo con il quale dei cittadini guardano al SLR: ogni concessione edilizia o trasferimento di proprietà deve essere accompagnato da una dichiarazione nella quale l'interessato dichiara di essere a conoscenza del fatto che il suo immobile "potrebbe" dover fronteggiare un innalzamento del livello del mare di 2,5 metri da qui al 2100. Per aiutare le persone a comprendere il rischio a cui le loro proprietà sono esposte, e per renderle più partecipi delle decisioni che sarà necessario prendere in futuro, è stata sviluppata anche una App, nella quale ognuno può vedere se un determinato edificio sarà raggiunto o meno dal livello del mare di un qualsiasi anno futuro (Spaulding et al. 2020).

A fianco del 68% delle coste del mondo dove si stima che l'arretramento abbia il miglior rapporto costi/benefici (Nichols et al. 2019) vi sono le località nelle quali le strategie di difesa o di adeguamento saranno inevitabili. È, come abbiamo visto, il caso delle grandi città costiere, dove lo spostamento degli edifici è pressoché impossibile, tanto che sono stati realizzati o sono in corso progettazione diversi interventi di mitigazione delle inondazioni (es. Venezia, Londra, Amburgo, Boston, Hong Kong), generalmente basati su barriere mobili, dune artificiali, elevazione del terreno, mentre le aree edificate vengono racchiuse da argini che separano nettamente il mare dalla terraferma. A New York, un primo progetto di una unica barriera mobile, dal costo previsto di 119 miliardi di dollari, è stato ridimensionato in uno da 52 miliardi basato su 12 elementi che chiuderebbero l'entrata del porto e le baie che caratterizzano la costa di questa città. La modifica del progetto è dovuta non solo a valutazioni economiche, ma anche per ridurre l'impatto ambientale.

L'efficacia di queste soluzioni viene valutata con modelli numerici, come a Boston, dove il National Institute of Building Sciences (2019) stima che ogni dollaro di contributi federali speso per la mitigazione ne farà risparmiare sei nei costi di ripristino dopo un evento estremo.

Ovviamente sono i *waterfront* quelli che per primi dovranno rispondere all'innalzamento del livello del mare e all'incremento degli eventi estremi, e ciò potrebbe costituire l'occasione di una loro riqualificazione, che può portare al rilancio della città e anche del territorio esteso, come già avvenuto in molti casi, dei quali quello di Boston è forse il più significativo.

7. *L'ultima spiaggia*

Questa soluzione non è però adatta alle località costiere che non possono rinunciare alla spiaggia, su cui si basa gran parte della propria economia. È il caso di Rimini, emblema dell'urbanizzazione costiera lineare basata sull'offerta 3S (*Sea, Sun, Sand* = mare, sole, sabbia), tanto che "riminizzazione" è un termine entrato nella letteratura internazionale per descrivere un tale sviluppo. Questo territorio è esposto a inondazioni da terra e da mare, anche a causa di una subsidenza che, pur ridottasi dopo gli interventi effettuati negli ultimi anni, non si è completamente annullata. Ecco che si è progettato il già citato Parco del Mare, che dovrebbe completarsi con il difficile spostamento delle strutture turistiche (stabilimenti balneari, bar e ristoranti) dietro al nuovo lungomare, ampliando in tal modo la spiaggia che potrebbe così dissipare meglio l'energia del moto ondoso durante gli eventi estremi.

Il mantenimento della spiaggia come risorsa ricreativa ed economica, sempre che si possa garantire ai residenti un livello di rischio da inondazione accettabile, è ritenuto indispensabile anche da studi su aree assai lontane da Rimini, ma per certi aspetti comparabili, come ad esempio la Gold Coast dell'Australia (Cooper e Lemckert 2012). Significativo è anche il caso di Manhattan Beach (Los Angeles): senza un adeguamento al SLR capace di preservare la spiaggia verrebbero persi, da qui al 2100, 107 milioni di dollari solo per il mancato incasso della tassa di soggiorno (Sheehan et al. 2022).

Laddove la spiaggia viene considerata come un elemento indispensabile in un approccio pianificato nella risposta alle variazioni climatiche, si rende necessario un suo ripascimento periodico, su una determinata scala temporale, per mantenerne il profilo in equilibrio con il futuro livello del mare. È per questo che si dovrebbero valutare le sorgenti di sabbia disponibili e il costo di ripascimento dovrebbe essere considerato nel bilancio futuro dell'amministrazione responsabile della gestione della costa, e non affidato a stanziamenti straordinari preelettorali. Ciò si colloca però in un contesto internazionale fortemente competitivo, in particolare se la quota globale di costa erodibile che si prevede di alimentare artificialmente aumenterà da circa il 3% del 2000 al 18-33% nel 2100, come indicato nel Report della Banca Mondiale.

Il mercato degli aggregati (sabbia e ghiaia) è caotico e in continua evoluzione, tanto che la valutazione delle quantità estratte è estremamente difficile, ma si stima che ogni anno ne vengano utilizzati quasi 30 miliardi di m³: circa quattro volte la quantità portata in mare da tutti i fiumi della Terra.

Ovviamente, solo una parte di questo volume viene dragata dai fondali marini, ma questa quota (circa 4 miliardi di m³) è in costante aumento, sia per la carenza di risorse da cave terrestri, sia per le crescenti capacità operative delle draghe e i minori costi di trasporto per grandi volumi. Ma è la richiesta di sabbia per il ripascimento delle spiagge e l'espansione a mare dei piccoli stati che spinge di più in questa direzione.

In questo contesto, anche se la sabbia presente sui nostri fondali rimanesse di proprietà pubblica, e quindi non venissero date concessioni estrattive a privati (cosa che purtroppo sta cambiando), i soli costi di dragaggio e refluimento aumenteranno per la concorrenza che vi sarà nell'accaparrarsi le draghe in grado di effettuare questi lavori. Già ora la gran parte di quelle operative lavora a grandi progetti, come a Dubai (circa 186 milioni di metri cubi per Palm Jumeirah, 200 milioni per Palm Island e 320 milioni per il World Island, la cui costruzione è in corso con molti problemi tecnici ed economici) e Rotterdam (300 milioni), dove si mobilitano centinaia di milioni di metri cubi di sabbia consentendo di assorbire i costi di mob-demob (trasferimento della draga, impianto e smontaggio del cantiere). Per non parlare di Singapore, che ha espanso il proprio territorio da 582.5 km² a 712.4 km² con la sabbia prelevata dai fondali e dalle spiagge dei paesi vicini e si sta ulteriormente allargamento di altri 70 km²; mentre Hong Kong, che dal 1996 si era espansa di 60 km², ne sta aggiungendo altri 719 (Rainforest rescue).

Dopo che Malesia, Indonesia, Vietnam e Cambogia hanno proibito l'esportazione di sabbia verso Singapore, sono ora Myanmar e le Filippine a rifornire questa città-stato, ma il divieto di esportazione ha fatto nascere un mercato illegale contro il quale si battono i cittadini dei Paesi depredati. Nel caso della Cambogia, il bando dell'esportazione di sabbia è stato ottenuto anche grazie a uno studio estremamente approfondito fatto da Global Witness, una Organizzazione Non Governativa (NGO), in cui si mettevano in evidenza i danni ambientali e sociali di questa attività e le complicità a livello amministrativo e politico che la favorivano (Global Witness 2010).

Il mercato illegale della sabbia ha un valore di circa 200 miliardi di euro all'anno, il terzo per importanza dopo quello della contraffazione e quello della droga. Nella sola India vale oltre due miliardi di euro, ma è niente in confronto agli otto miliardi del Brasile (Ramadon 2018). Se il grosso delle estrazioni illegali avviene nei laghi e nei fiumi, le spiagge non ne sono esenti, come in Marocco, dove ogni anno vengono rubati circa 10 milioni di metri cubi di sabbia dai litorali, tanto da trasformare le ampie spiagge un tempo presenti fra Safi ed Essouria in una costa rocciosa; mentre sulla costa mediterranea gli alberghi sono minacciati dall'erosione indotta proprio dalla estrazione della sabbia usata per la loro costruzione (UNEP 2019).

Nell'ultimo secolo le coste degli Stati Uniti hanno ricevuto 1,2 miliardi di metri cubi di sabbia, distribuiti su 465 spiagge con 3200 interventi (Elko et al. 2021), mentre dal 2000, i 432 chilometri della costa olandese vengono alimentati con 12 milioni di metri cubi di sabbia prelevata in mare ogni anno, ovvero con 28 m³ di sabbia per metro lineare di costa.



Figura 9. Coney Island, NY (1923): il primo mega-ripascimento fatto sulle coste del mondo con 1.300.000 m³ di sabbia dragata in quattro siti distanti da 500 a 1200 m dalla costa (NYC Municipal Archives Digital Collections).

In Italia sono circa 22 i milioni di metri cubi di sabbia estratta dai fondali marini dal 1994 ad oggi, a cui si deve sommare quanto proveniente dalle cave presenti nelle pianure alluvionali o prodotto per frantumazione di rocce. E, solo considerando i tratti in erosione, noi dobbiamo coprire 1.700 km di spiagge.

Sui fondali che orlano la nostra penisola le aree nelle quali si trova sabbia idonea al ripascimento dei litorali sono molto limitate, e la tutela a cui deve essere soggetto il Mediterraneo è assai superiore a quella richiesta nel Mare del Nord. Se volessimo mantenere il profilo naturale delle spiagge con un innalzamento del livello del mare di un metro sui quasi 4.000 km di coste basse italiane, avremmo bisogno di oltre tre miliardi di metri cubi di sedimenti, e al costo attuale del dragaggio e del refluento (circa 15 euro a metro cubo) si arriva a 45 miliardi di euro. Accompagnare i ripascimenti artificiali con la costruzione di difese costiere, oltre che stravolgere il paesaggio e incidere sulla qualità dell'offerta turistica, avrebbe costi non molto diversi. Ma questa sarebbe solo una minima parte dell'impegno economico richiesto dalla strategia di difesa ad oltranza, perché il mare aggirebbe le dighe, risalirebbe lungo le aste fluviali e i canali di bonifica, dovremmo rialzare ponti e tutto quanto si raccorda con essi, tutti gli scarichi a mare andrebbero portati a una quota più alta, il livello delle falde si innalzerebbe sopra al piano campagna, e sarebbe una falda di acqua salata. E l'elenco non finisce qui!

Ovviamente ci sarebbe da redigere una lista altrettanto lunga di quanto ci sarebbe da fare per arretrare e di quanto costerebbe tale strategia, come è stato fatto in altri Paesi. Fino a quando non potremo confrontare i due elenchi non sarà possibile decidere quale strategia adottare. Ma forse anche solo la lista spaventa chi poi dovrebbe decidere!

Bibliografia

- Al S. *Adapting Cities to Sea Level Rise. Green and Gray Strategies*. Washington, Island Press, 2018.
- Amadio M., Essenfelder A.H., Bagli S., Marzi S., Mazzoli P., Mysiak J., Roberts S. *Cost-benefit analysis of coastal flood defence measures in the North Adriatic Sea*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2022;22:265-286.

- Bagli S., De Cecco E., Dellavalle A., Montanari R., Montini A., Pranzini E. *Waterfront requalification and adaptation to Sea Level Rise in the main Italian seaside tourist destination (Rimini)*. Seascope 2022;1:16-25.
- Barber D., Dyke A., Hillaire-Marcel C. et al. *Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes*. Nature 1999;400:344-348.
- Bruun P. *Sea level rise as a cause of shore erosion*. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Watervays Harbors Div. 1962;88:117-130.
- California Coastal Commission 2018 updating. *California Coastal Commission and Sea Level Rise Policy Guidelines*. 307 p., inspected 05/01/2021.
- Cartwright A., Taylor A. *Drawing a line in the sand: managing coastal risks in the City of Cape Town*. South African Geographical Journal 2015;97:1-17.
- City of Rockingham. *A Coastal Hazard Risk Management and Adaptation Plan (CHRMAP)*. 2019. https://www.wa.gov.au/system/files/2021-07/GD_CST_coastal_hazard_risk_management-guidelines-July2019.pdf
- Cooper J.A.G., Lemckert C. *Extreme sea-level rise and adaptation options for coastal resort cities: A qualitative assessment from the Gold Coast, Australia*. Ocean Coastal Management 2012;64:1-14.
- Elko N., Briggs T.R., Benedet L., Robertson W., Thomson G., Webb B.M., Garvey K. *A century of U.S. beach nourishment*. Ocean & Coastal Management 2021;199:105406.
- Fiorino D.J. *Can Democracy Handle Climate Change?* Cambridge, UK, Polity Press, 2018.
- Galili E., Benjamin J., Eshed V., Rosen B., McCarthy J., Horwitz L.K. *A submerged 7000-year-old village and seawall demonstrate earliest known coastal defence against sea-level rise*. PLoS ONE 2019;14(12): e0222560.
- Global Witness. *Shifting sand. How Singapore's demand for Cambodian sand threatens ecosystems and undermines good governance*. London, Global Witness Ltd., 2010.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 2021.
- Kirezci E., Young I.R., Ranasinghe R., Muis S., Nicholls R.J., Lincke D., Hinkel J. *Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century*. Scientific report 2020;10:11629.
- Lincke D., Wolff C., Hinkel J., Vafeidis A., Blickensdörfer L., Povh Skugor D. *The effectiveness of setback zones for adapting to sea-level rise in Croatia*. Regional Environmental Change 2020;20:46.

- Liu Y., Huang H.-J. *Characterization and mechanism of regional land subsidence in the Yellow River Delta, China*. Nat. Hazards 2013;68:687-709.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, Versione 2018*. Il Piano è attualmente sottoposto a procedimento di VAS. La documentazione è disponibile al seguente link: <https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/7726/11206>
- Morton R.A., Bernier J.C., Barras, J.A. *Evidence of regional subsidence and associated interior wetland loss induced by hydrocarbon production, Gulf Coast region, USA*. Environ Geol 2006;50:261-274.
- Munafò M. (a cura di). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*. Edizione 2023. Report SNPA 37/23.
- National Institute of Building Sciences (NIBS), *Natural Hazard Mitigation Saves*. 2019. https://www.nibs.org/files/pdfs/NIBS_MMC_MitigationSaves_2019.pdf
- New Zealand Ministry for the Environment, 2017. *Preparing for coastal change. A summary of coastal hazards and climate change guidance for local government*. 36 p. <https://environment.govt.nz/publications/preparing-for-coastal-change-a-summary-of-coastal-hazards-and-climate-change-guidance-for-local-government/>
- Nicholls R.J., Hinkel J., Lincke D., van der Po T. *Global Investment Costs for Coastal Defense through the 21st Century*. Washington DC, World Bank Group, Policy Research Working Paper 8745, 2019.
- Rainforest rescue. *Singapore is dredging our home away: hands off our sand!*. <https://www.rainforest-rescue.org/petitions/1010/singapore-is-dredging-our-home-away-hands-off-our-sand#more> (consultato il 19 settembre 2022).
- Ramadon L.F. *A Extração Ilegal de Areia no Brasil e no Mundo*. 2024. <https://api.fenapef.org.br/arquivos/noticia/arquivo/51a3348e4d322853a444864790c3ecb0.pdf>
- Robb A., Payne M., Stocker L., Middle G., Trosic A. *Development control and vulnerable coastal lands: Examples of Australian practice*. Urban Policy and Research 2018;37(2):199-214. doi: 10.1080/08111146.2018.1489791
- Roberts D., Berger L.R. *Last Interglacial (c. 117 kyr) human footprints from South Africa*. South African Journal of Science 1977;93:349-350.
- Shao W., Zhang H., Liu J., Yang G., Chen X., Yang Z., Huang H. *Data integration and its application in the sponge city construction of CHINA*. Procedia Engineering 2016;154:779-786.
- Sheehan L., Kunkel K., King P., Murray D., Garrity N. *We'll take Manhattan: Preserving an urban (Southern California) beach in the 21st century*. Shore & Beach 2022;90(3):3-16.

- Spaulding M.L., Grilli A., Damon C., McKenna B., Christensen M., Vinhateiro N., Boyd J., Fugate G. *STORMTOOLS, Coastal Environmental Risk Index (CERI) Risk and Damage Assessment*. App. Mar. Sci. Eng. 2020;8(2):129.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W., Gonella M. *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ Geol 2005;57:831-846.
- TOPEX/Poseidon 1992-2022. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise>
- Turney C.S.M, Brown H. *Catastrophic early Holocene Sea level rise, human migration and the Neolithic transition in Europe*. Quaternary Science Reviews 2007;26:2036-2041.
- UNEP. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. Geneva, Switzerland, GRID-Geneva, United National Environment Program, 2019.
- UNESCO. *Community Guide for community members interested in risk reduction efforts. How to reduce coastal hazard risk in your community: A step-by-step approach*. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), Manuals and Guides, No. 85, Vol. 2 (English). Paris, UNESCO, 2021.
- Wade M. *Hyper-planning Jakarta: The Great Garuda and planning the global spectacle*. Singapore Journal of Tropical Geography 2019;40:158-172.

La strategia di Noè. Come adattarsi al mare che avanza

Viene fatto un cenno alla storia dell'occupazione delle coste da parte dell'uomo e analizzati i vantaggi e gli svantaggi di questa ubicazione. I primi hanno consentito un florido sviluppo delle società, ma determinando un'eccessiva occupazione di aree caratterizzate da grande instabilità geomorfologica, i secondi si sono incentrati sia a causa della stessa antropizzazione sia per gli effetti dell'innalzamento del livello del mare.

Difendersi in modo rigido dall'ingressione marina, adattare i centri abitati e le infrastrutture ai nuovi scenari, o delocalizzare gli insediamenti costieri? È una scelta difficile, che si sarebbe dovuta fare ormai da tempo, e possibilmente nell'interesse delle generazioni future.

Parole chiave: riscaldamento globale; innalzamento del livello del mare; città costiere; erosione costiera; difesa-adattamento-arretramento; ripascimento artificiale.

Noah's Strategy: How to Adapt to the Rising Sea

The history of human occupation of coastal areas is briefly reconstructed, and the advantages and disadvantages of this location are analysed. The former enabled the flourishing development of societies, but also led to the excessive occupation of areas

characterized by great geomorphological instability. The latter have been exacerbated both by the process of anthropization itself and by the effects of rising sea levels. Should we strongly defend against marine ingression, adapt settlements and infrastructure to the new scenarios, or relocate coastal settlements? It is a difficult decision, one that should have been made long ago, and preferably in the interest of future generations.

Keywords: global warming; sea level rise; coastal cities; coastal erosion; defence-adaptation-retreat; beach nourishment.

LORENZO ROBBIANO

*Meraviglie della matematica,
espressioni della creatività*

1. *Introduzione*

DOMANDE: Come è possibile associare la parola *meraviglie* alla parola *matematica*? E che legame ha la matematica con la *creatività*?

Rispondere a questi quesiti mi ha sempre affascinato e dunque non perdiamo tempo e vediamo di orientarci a capirne il senso.

La parola meraviglia può assumere significati con sfumature diverse.

Mi meraviglio! Si dice a un ritardatario abituale che è arrivato in orario.

Che meraviglia il tramonto, questa sera! Si dice guardando gli intrecci di sfumature colorate del cielo prima e dopo l'uscita di scena del sole.

Nel primo caso l'accento è posto sulla *sorpresa*, nel secondo sulla *bellezza*.

Per quanto riguarda la *creatività*, ho una opinione che non collima con alcuni studi di psicologia, i quali dichiarano quanto segue: *un tempo la creatività era considerata una dote innata, in seguito se ne è scoperta una possibile acquisizione*. Non credo che la creatività si possa acquisire e baso questa affermazione sull'esperienza personale di professore universitario, che mi ha messo in relazione con centinaia di studenti e docenti. In sintesi, penso che la quantità di creatività sia una dote naturale di ogni individuo, la differenza sta nel come la si coltiva. In ogni caso, vedremo la creatività all'opera in varia misura e in diverse forme.

La terza parola chiave è *matematica*. A questo riguardo, non mi sento di essere imparziale. Ho convissuto con la matematica, ne ho

respirato i forti profumi, ho affrontato le sue sfide, ho capito perché debba stare alla base di tutte le scienze e l'ho ammirata come una delle più significative manifestazioni della creatività umana. Purtroppo molti ne hanno paura, come avviene spesso di fronte all'ignoto.

*Gli antichi romani
non avevano paura delle equazioni
perché sapevano che X vale 10.*

Lungo i sentieri tracciati in questo articolo, che corrisponde quasi interamente alla mia conferenza del 4 novembre 2024 presso l'Accademia Ligure, faremo un viaggio per scoprire alcune meraviglie della matematica, avendo come linea guida la creatività. Faremo strani incontri, per esempio esponenziali, quadrati magici e tassellazioni, per concludere con alcune considerazioni sulla *geometria del colore*.

2. *Esponenziali: percezione errata?*

*Anyone who believes that exponential growth
can go on forever in a finite world
is either a madman or an economist.*

Kenneth Boulding

Quante volte abbiamo sentito o letto che qualcosa ha avuto una *crescita (o decrescita) esponenziale*?

“La curiosità per questo nuovo prodotto sta crescendo in modo esponenziale”.

“Il numero delle persone colpite da influenza aumentò in modo esponenziale”.

“La fiducia nei politici decrescerà in modo esponenziale”.

Nel linguaggio comune la parola esponenziale è sinonimo di grandissimo, ma siamo sicuri che sia proprio così?

Vediamo due esempi che possono procurare meraviglia, intesa nel senso di *sorpresa*.

Piegature di un foglio

*Que el papel hable
y la lengua calle.*

Miguel de Cervantes Saavedra,
Don Quijote de la Mancha

Avete presente un normale foglio di carta, per esempio un foglio di formato A4? Il suo spessore è circa un decimillimetro (dmm). Se lo piegate in due parti uguali, lo spessore raddoppia e raggiunge due decimillimetri. Se piegate ancora in due parti uguali, lo spessore quadruplica e così via.

La curiosa domanda è: quanto sarà lo spessore se continuate questo esperimento *piegando 42 volte*? Quando ho proposto questo quesito a un pubblico generale, escludendo matematici e persone che già conoscevano il risultato, ho quasi sempre ottenuto risposte di questo tipo: “due centimetri”, “cinque centimetri”. Qualcuno più audace arrivava a dire “mezzo metro”.

Ma ora è giunto il momento di fare i conti e... scoprire la verità!

foglio	spessore	1 dmm	
piegatura 1	$1 \times 2 =$	2 dmm	2^1
piegatura 2	$2 \times 2 =$	4 dmm	2^2
piegatura 3	$4 \times 2 =$	8 dmm	2^3
piegatura 4	$8 \times 2 =$	16 dmm	2^4
piegatura 5	$16 \times 2 =$	32 dmm	2^5
piegatura 6	$32 \times 2 =$	64 dmm	2^6
piegatura 7	$64 \times 2 =$	128 dmm	2^7
piegatura 8	$128 \times 2 =$	256 dmm	2^8
piegatura 9	$256 \times 2 =$	512 dmm	2^9
piegatura 10	$512 \times 2 =$	1.024 dmm	2^{10}

Osserviamo che con 10 piegature si passa da 1 dmm a 1.024 dmm, ossia 102,4 mm, ossia poco più di 10 cm. E quindi con dieci piegature lo spessore iniziale si moltiplica circa per 1.000. Inoltre, a ogni passo si dimezza l'area e siccome l'area del foglio A4 è circa 0,6 m², dopo dieci piegature si avrebbe un'area di circa 6 cm². Per farla breve, si avrebbe un pacchetto di carta con base avente area di circa 6 cm² e di spessore circa 10 cm. Incominciamo quindi a concludere che fare dieci piegature è fisicamente impraticabile.

Ma se non si può procedere in pratica, possiamo andare avanti in teoria.

*In theory there is no difference
between theory and practice,
in practice there is.*

Yogi Berra

Seguiamo il ragionamento fatto in precedenza.

- Alla piegatura 20 avremo uno spessore di circa 100 m.
- Alla piegatura 30 avremo uno spessore di circa 100 km.
- Alla piegatura 40 avremo uno spessore di circa 100.000 km.
- Alla piegatura 42 avremo uno spessore di circa 400.000 km.

Alla piegatura 42 si otterrà quindi uno *spessore superiore alla distanza tra la terra e la luna*, che è circa 384.400 chilometri. Il fatto è che

$$2^{42} = \underbrace{2 \times 2 \times 2 \cdots \times 2}_{42 \text{ volte}} = 4.398.046.511.104 \quad \text{circa 4.400 miliardi!}$$

Chicchi di riso

Gli scacchi sono il gioco più brutale.
Gary Kasparov

Qui si racconta la versione indiana di una famosa leggenda, quella del re e del bramino Sissa Nassir (ne esistono varie versioni con diversi finali).

Il bramino Sissa Nassir chiese di essere ricevuto dal re. Ottenuto questo privilegio, Sissa illustrò un gioco da lui inventato, che consisteva in una scacchiera quadrata con 64 caselle, pezzi bianchi e pezzi neri... insomma il *gioco degli scacchi*. Il re ne fu entusiasta e gli propose di chiedere una ricompensa. Sissa rispose che voleva del riso e specificò nel seguente modo la quantità di riso desiderata:

Sire, gradirei che poneste un chicco di riso sulla prima casella della scacchiera, due chicchi di riso sulla seconda, quattro chicchi di riso sulla terza e così via, raddoppiando su ogni casella la quantità di riso posta su quella precedente fino a esaurire le 64 caselle. Io mi accontenterò di portarmi via tutto il riso sulla scacchiera.

256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
65536	131072	262144	524288	1048576	2097152	4194304	8388608
16777216	33554432	67108864	134217728	268435456	536870912	1073741824	2147483648
4300927296	8601854592	17203709184	34407418368	68814836736	137629673472	275259346944	550518693888

Il re, sbalordito dalla *modesta* richiesta di Sissa, ordinò di esaudire il suo desiderio, ma... la quantità Q di chicchi da elargire a Sissa si può calcolare così.

$$Q = 1 + 2 + 4 + \dots + 2^i + \dots + 2^{63}$$

e si può dimostrare che vale l'uguaglianza $Q = 2^{64} - 1$.

Quindi, solo per l'ultima casella ci vorrebbero $2^{63} = 9\,223\,372\,036\,854\,775\,808$ chicchi e in totale, per tutta la scacchiera, $2^{64} - 1 = 18\,446\,744\,073\,709\,551\,615$ chicchi.

Secondo la stima che un chicco di riso pesi 30 milligrammi, si tratta di più di 553 miliardi di tonnellate di riso!

FINALE 1: Il re, indignato dall'astuzia di Sissa, lo fece uccidere.

FINALE 2: Il re, ammirato dall'astuzia di Sissa, gli diede in sposa sua figlia.

FINALE 3 (non verificato): Il re, ammirato dall'astuzia di Sissa, lo dichiarò suo personale istruttore. Inoltre promulgò una legge, chiamata *Potenza delle Potenze*, con cui impose a tutti i sudditi lo studio della matematica.

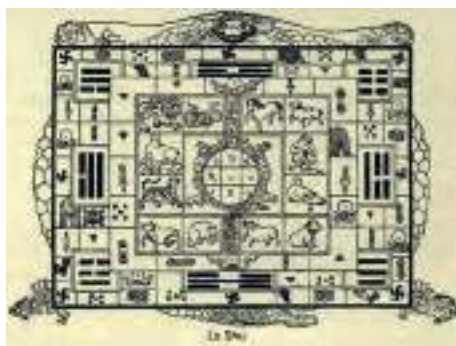
3. *Quadrati magici*

*In the magic square
there are no cars, no shops, no people,
only beautiful natural numbers.*

autore anonimo

Una antica leggenda cinese narra che, intorno all'anno 2800 a.C., una disastrosa piena del fiume Lo causò molte morti ed enormi devastazioni. Quando le acque limacciose iniziarono a ritirarsi, di fronte ai pochi increduli astanti si palesò una *tartaruga divina*, che sul dorso aveva incisa una misteriosa figura. Al centro c'era una circonferenza che racchiudeva una griglia con nove caselle, in ognuna delle quali era inciso un numero.

Qui di seguito si vede la suddetta griglia con i numeri scritti nel modo a noi familiare. Tale configurazione, chiamata *Lo Shu*, venne subito considerata come un buon auspicio, in quanto simbolo dell'*armonia universale*. Il quadrato contiene nove numeri naturali e dalla loro disposizione si evince che le somme degli elementi di ogni riga, colonna e diagonali *sono uguali*.



4	9	2
3	5	7
8	1	6

La proprietà che riguarda l'uguaglianza di tali somme fece meritare al quadrato il nome di *quadrato magico* e la somma, che vale 15, venne detta *somma magica*. Inoltre avvenne che i superstiti dell'alluvione e i loro discendenti individuarono altre proprietà.

- I numeri da 1 (l'inizio di tutte le cose) a 9 (il completamento) furono considerati bene-auguranti, soprattutto il 5 centrale.
- La somma magica 15 venne interpretata come la durata di ciascuno dei 24 cicli dell'anno solare cinese.
- L'alternarsi dei numeri pari e dispari sulle caselle periferiche fu interpretato come alternarsi armonioso di *yin* e *yang*.
- Nell'antica Cina i costruttori si ispirarono a questo quadrato per progettare templi e città suddivise in 3×3 settori.

La storia dei quadrati magici prosegue con i cinesi che furono fautori di molte invenzioni scientifiche poi riscoperte in Occidente.

Quadrati magici si trovano in diversi manoscritti del XIII e XIV secolo in lingua spagnola e italiana. Quelli di tipo da 3 fino a 9 si trovano a partire dal XV secolo, vennero descritti come strumenti di magia e quindi furono utilizzati per costruire talismani.

Ora siamo arrivati al punto nodale della nostra narrazione.

Nel 1514 il pittore tedesco Albrecht Dürer incise con uno scalpello (bulino) *Melencolia*, contenente il famoso *quadrato magico di Giove* con somma magica 34. Nella prima figura si vede l'intera incisione, nella seconda viene messo in evidenza il quadrato magico che si trova in alto a destra.



Eccolo visto in modalità matematica.

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1

Si tratta di un quadrato di tipo 4, che è magico nello stesso senso del quadrato di Lo Shu, infatti in esso tutte le somme degli elementi sulle righe, colonne e diagonali sono uguali a 34. Prima ho scritto “punto nodale della narrazione” perché non andremo avanti con la storia, ma ci fermeremo a trarre ispirazione dal quadrato di Giove. È tipico dei matematici porsi domande e una in particolare mi ha affascinato.

Quanti sono i quadrati magici di tipo 4?

Rispondere a questa domanda non è affatto semplice. I metodi da me usati si avvalgono di tecniche molto avanzate di algebra computazionale e di un fondamentale utilizzo del sistema di calcolo CoCoA, di cui io sono stato il coordinatore. Si tratta di un software che è stato costruito a Genova presso il Dipartimento di Matematica della nostra Università¹ e che viene molto utilizzato a livello internazionale. Osserviamo che nel quadrato di Giove, oltre a essere presenti le proprietà prima elencate, anche tutti i quadrati 2×2 centrati su una delle due diagonali sono tali che la somma dei loro elementi è 34. Inoltre la somma di ogni coppia di elementi simmetrici rispetto al centro del quadrato è 17, come si vede facilmente osservando la figura.

Per calcolare il numero dei quadrati magici che hanno tutte le proprietà precedentemente descritte, facciamo uso dell’implementazione in CoCoA di basi di Gröbner, ideal torici, funzioni di Hilbert e altre

¹ Abbott J., Bigatti A.M., Robbiano L., *CoCoA: a system for doing Computations in Commutative Algebra*, available at <https://sites.google.com/view/cocoa-cocoalib>

diavolerie matematiche. Il risultato è 35.208, quindi non sono rari. Ma se al nostro programma forniamo l'ulteriore informazione che nel quadrato sono presenti tutti i numeri da 1 a 16, il risultato del calcolo è 384, rari ma non rarissimi. Però c'è un colpo di scena!

Dürer fu così bravo da costruire l'ultima riga del quadrato con due straordinarie pensate. Infatti i due numeri centrali sono 15 e 14 che, letti di seguito, formano il numero 1514, anno in cui *Melencolia* fu composta. Inoltre nell'ultima riga il primo numero è 4 e l'ultimo 1 e, se si contano le lettere dell'alfabeto, 4 corrisponde a D e 1 corrisponde ad A. Certamente non è un caso che D, A siano le iniziali di Dürer Albrecht.

Aggiungendo queste proprietà alle precedenti, si ottengono solo i seguenti due quadrati.

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1

16	3	2	13
9	6	7	12
5	10	11	8
4	15	14	1

Il primo è quello di Dürer. Osservando il secondo, che chiameremo *SuperMagico*, si scopre che... Dürer avrebbe potuto fare meglio. Infatti *SuperMagico* ha l'ulteriore proprietà che le sue colonne hanno i numeri in ordine crescente o decrescente.

Nel Medioevo molti alchimisti pensavano che i quadrati magici contenessero la chiave per convertire i metalli in oro. Ho provato anche con *SuperMagico*, ma non funziona.

Pare che alcuni astrologi del Rinascimento credessero che il fascino del quadrato magico di Dürer potesse curare la malinconia. Io, se necessario, proverei con il *SuperMagico*, il quale ha già avuto il merito di avere soddisfatto la mia sete di conoscenza. Ed è bello scoprire che tale sete non deve mai sparire, anzi deve salire... magari *palindromicamente*.

e la sete sale

4. Tassellazioni

Che cosa è una tassellazione o tassellatura (in inglese *tiling*)? È una disposizione di forme, dette tasselli, che coprono completamente una porzione di piano senza sovrapposizioni. Quella che vedete è la tassellazione di una porzione di pavimento fatta con tasselli rettangolari.



La fantasia e la creatività hanno generato innumerevoli forme di tassellazione. Per esempio hanno trovato un posto di rilievo nell'arte, come si vede nei magnifici mosaici dell'Alhambra a Granada.



*If I had to pick one artist to tile my bathroom
I would go with Escher.*

Demetrios Evans Martin

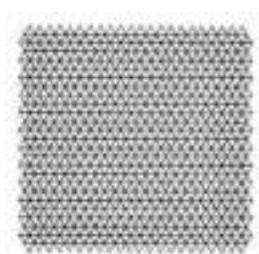
Una menzione particolare merita l'opera di Maurits Cornelis Escher (1898-1972), pittore e incisore olandese profondamente amante dell'Italia, dove trovò ispirazione per alcune sue litografie. In quelle più famose usò le tassellazioni in modo molto creativo.



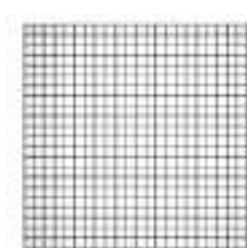
A questo punto sorge spontanea una domanda.

Con quali poligoni regolari si può fare una tassellazione?

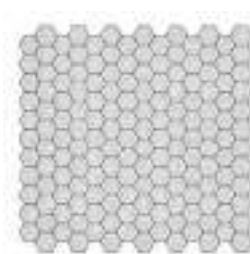
Se la domanda non è sorta spontaneamente, non c'è da preoccuparsi perché tra poco vedremo la risposta. Intanto ricordiamo che i poligoni regolari sono quelli che hanno lati e angoli uguali. Dato un numero naturale n , si ottengono suddividendo una circonferenza in n parti uguali e congiungendo punti adiacenti con segmenti. Per $n = 3$ si trovano i triangoli equilateri, per $n = 4$ i quadrati, per $n = 5$ i pentagoni regolari e così via. Vediamo alcune tassellazioni fatte con poligoni regolari.



triangoli equilateri



quadrati



esagoni regolari

Non è difficile dimostrare che gli unici poligoni regolari con cui si può fare una tassellazione sono precisamente i triangoli equilateri, i quadrati e gli esagoni regolari.

E finalmente siamo arrivati al punto cruciale della nostra storia. La più famosa tassellazione in natura è quella che le api usano da sempre per costruire i favi nei loro alveari.



Perché le api fanno le cellette esagonali?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo fare un viaggio indietro nel tempo attraversando millenni!

1. Nel 36 a.C. il letterato e agronomo romano Marcus Terentius Varro sostenne che la tassellazione regolare formata da esagoni era quella che faceva *risparmiare* alle api il materiale di costruzione, ossia la cera.
2. Circa nel 300 d.C. il matematico Pappo Alessandrino espresse e quindi confermò la stessa idea nel suo lavoro noto come *Collezione Matematica*.

Detto in modo più preciso, Varro e Pappo sostennero che il perimetro di ogni partizione di una porzione limitata del piano, in regioni di area uguale, è maggiore o uguale di quello della tassellazione regolare in esagoni. Questo fatto è vero per le tre tassellazioni regolari, infatti si calcola che a parità di area, diciamo 1, si ha

- il perimetro vale circa 4,56 nel caso dei triangoli equilateri
- il perimetro vale 4 nel caso dei quadrati
- il perimetro vale circa 3,72 nel caso degli esagoni regolari

Ma, come abbiamo visto, esistono tassellazioni fatte con poligoni non regolari e addirittura fatte con figure non poligonali e quindi le affermazioni di Varro e Pappo erano solo *congetture*.

E qui si arriva al *colpo di scena*, dove meraviglia significa stupore e ammirazione.

Dopo circa due millenni, precisamente nel 2001, il matematico americano Thomas Hales dimostrò il seguente enunciato:

Il perimetro di ogni partizione di una regione limitata del piano in regioni di area uguale, è maggiore o uguale a quello della tassellazione in esagoni regolari.

La congettura divenne *teorema!* e come dice il mio collega spagnolo Eduardo Sáenz de Cabezón Irigaray: «Un teorema es para siempre».

Quello che Eduardo Sáenz intende dire è che, quando c'è una dimostrazione corretta e quindi un enunciato diventa teorema, l'enunciato sarà vero per sempre. Un teorema è dunque una straordinaria meraviglia della matematica, unica scienza che produce *oggetti immortali*.

“A theorem is forever”, “Ein Satz ist für immer”, “Un théorème est pour toujours”, “Un teorema es para siempre”...

Resta però una domanda alla quale non sappiamo e molto probabilmente non sapremo mai rispondere:

Come fanno le api a sapere da sempre che, costruendo cellette esagonali, risparmiano cera, ossia il materiale di costruzione dei favi?

(Anonimo, *Le api genovesi*)

5. *Geometria del colore*

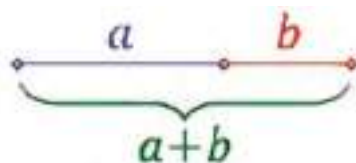
*Potente è la GEOMETRIA,
unita all'ARTE diventa irresistibile.*

Euripide (480-406 a.C.)

Con questa frase essenziale, scritta più di due millenni or sono, Euripide prese atto di una verità inconfutabile, ossia che la creatività raggiunge una delle più alte vette quando geometria e arte si uniscono. Come avviene questo incontro?

GEOMETRIA. La geometria è basata su misure e anche l'arte se ne avvale per costruire proporzioni nelle immagini e ritmiche nella poesia e nella musica. Una notevole misura importante nell'arte figurativa è il *numero aureo*.

Osserviamo l'immagine sottostante



dove a e b sono lunghezze rispetto a una prefissata unità di misura. Se si ha l'uguaglianza $\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b}$, si deduce da una semplice equazione di secondo grado che

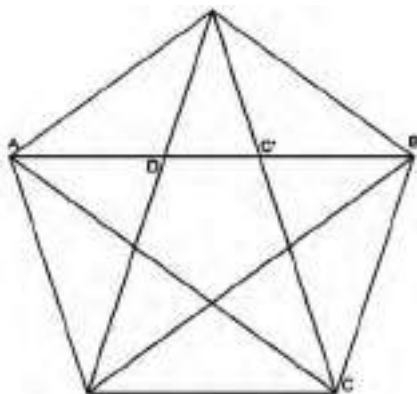
$$\frac{a}{b} = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,618 \text{ ossia poco più di sedici decimi}$$

Il numero $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ è il famoso *numero aureo* che viene spesso indicato con la lettera greca ϕ . È detto anche *sezione aurea*, *proporzione divina* e in altre lingue *golden ratio*, *goldenen Schnitt*, *gulden snede*, *nombre d'or*, *razón áurea*, *proporção dourada*... La lettera greca ϕ è stata introdotta in onore di Fidia, il quale visse nel V secolo a.C., fu uno dei più grandi scultori della sua epoca e utilizzò il numero aureo (forse inconsapevolmente) in alcune statue e decorazioni del Partenone.

Da dove viene questa riconosciuta importanza del numero aureo, al punto da indurre il matematico rinascimentale Luca Pacioli nel suo libro *De Divina Proportione* pubblicato nel 1509 a definirlo proprio *proporzione divina*?

Intanto può essere utile ricordare che tracce di numeri aurei si trovano già in alcune tavolette babilonesi, ma il loro ingresso trionfale nel mondo occidentale avvenne con la Scuola Pitagorica quando, intorno al VI secolo a.C., Pitagora e i suoi discepoli videro molte manifestazioni del numero aureo nel pentagono regolare.

Ricordiamo che il pentagono regolare non è utile per le tassellazioni regolari, ma si prende la rivincita con i numeri aurei. Infatti sono in rapporto aureo le lunghezze di AB e BC, AC' e AD, AD e DC'. Non solo, ma nel numero dei suoi lati i pitagorici scorsero l'unione del principio maschile e femminile, in quanto somma di 2 e 3 (lascio al lettore decidere chi è 2 e chi è 3).



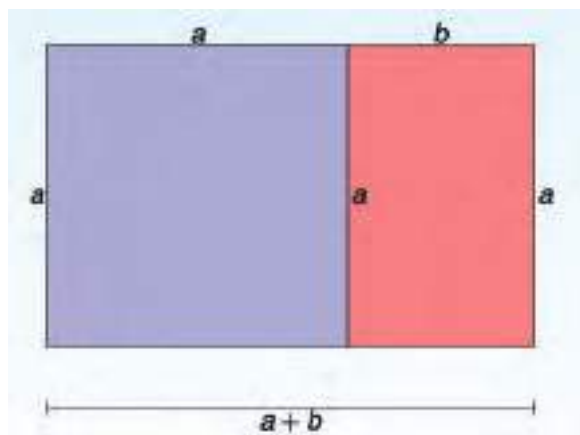
Il numero 5 si rivela come elemento cardine in varie forme.

- Cinque sono dita della mano.
- Cinque sono i sensi.
- Cinque sono le righe del pentagramma.
- Cinque sono le ferite del Cristo in croce, dette le “Cinque Piaghe di Cristo”.
- Cinque sono i tempi della preghiera quotidiana dei musulmani.

Un esempio di utilizzo del pentagono in arte si ha nel famoso quadro di Salvador Dalí intitolato *Il sacramento dell'ultima cena* (1955).



Ora osserviamo la figura seguente.



È costruita così: a un quadrato, il cui lato ha lunghezza a , si giustappone un rettangolo i cui lati hanno lunghezza a e b , in modo tale che $\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b}$, ossia tale che nel rettangolo grande, cioè quello formato dall'intera figura, e in quello piccolo le lunghezze dei lati abbiano lo stesso rapporto. Siccome già sappiamo che tale rapporto φ è il numero aureo, il rettangolo viene chiamato *rettangolo aureo*.

E finalmente è giunto il momento di costruire il promesso legame tra geometria e colore e lo facciamo descrivendo come esso si manifesti in *fotografia*. Avverto il lettore che questa parte riguarda mie idee e molte cose che sto per scrivere non sono condivise da tutti. Sarà mia cura distinguerle con la sigla LR.

He who has the gold makes the rules
Wizard of Id (1967)

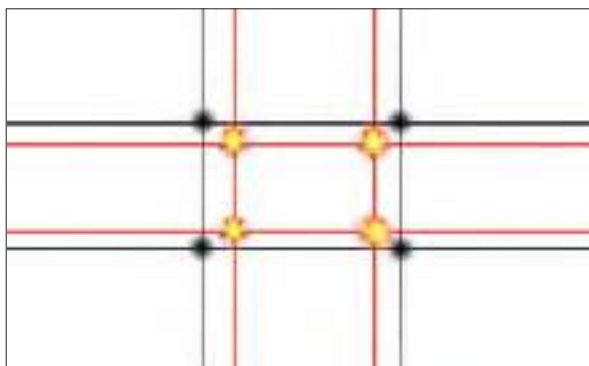
La prima affermazione personale che espongo è la seguente:

LR: *il formato ideale di una fotografia è quello del rettangolo aureo*

In realtà, i formati standard delle macchine fotografiche e di molti cellulari sono $3/2$, $4/4$, $16/9$. Un semplice calcolo mostra che, tra questi, il rapporto che più si avvicina a φ è $3/2$, ma sarebbe auspicabile

introdurre il formato 16/10 che, come abbiamo visto, è una ottima approssimazione di φ .

Una regola suggerita dai libri di fotografia è la regola dei terzi, che consiste nella ripartizione del rettangolo fotografico in nove parti uguali mediante la tracciatura di quattro segmenti neri come si vede in figura.



Detto in modo semplice, il soggetto principale della foto dovrebbe essere messo in corrispondenza con uno dei punti neri. I punti dorati sono invece quelli che si ottengono facendo una ripartizione che usa rapporti aurei.

Si deduce che la ripartizione secondo la regola dei terzi è una buona approssimazione della ripartizione aurea, come nel caso già descritto per cui $3/2$, e meglio ancora $16/10$, sono una buona approssimazione del numero aureo φ .

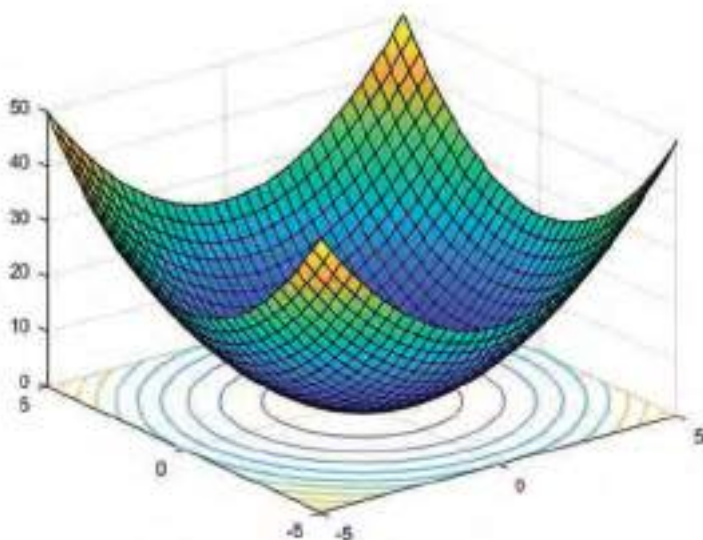
Avviene lo stesso fenomeno quando si scrive che la lunghezza della circonferenza di raggio 1 vale $2 \times 3,14$, mentre la verità è che vale $2 \times \pi$. Infatti $3,14$ è una approssimazione di π sufficiente per molte applicazioni pratiche.

Colore. Veniamo dunque alla seconda componente.

LR: *il colore è la modalità con cui la luce ci mette in relazione col mondo*

I colori influenzano il nostro modo di essere, accompagnano le nostre sensazioni e sono veicoli dei nostri stati d'animo. Tutta la storia della pittura è anche storia del colore, come viene percepito e come viene usato.

Matematicamente il colore può essere visto come *quarta dimensione*. Ogni punto della figura qui sotto viene descritto da (x, y, z, c) dove x, y, z sono le classiche coordinate cartesiane e il colore è espresso numericamente.

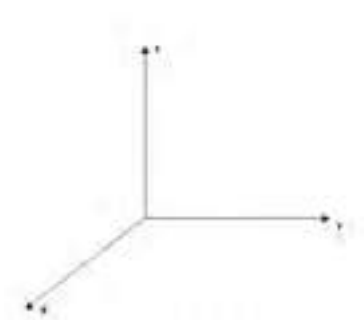


E ora veniamo alla fotografia di cui fornisco la mia personale definizione.

LR: *la fotografia è espressione del fotografo ispirato dalla realtà*

Intendo dire che, come la pittura, la fotografia non è solo immagine del *fuori*, ma è principalmente espressione intima della creatività dell'autore. Il colore ne è una componente essenziale e quindi il problema geometrico è quello di proiettare una figura *quattro-dimensionale* su una superficie *due-dimensionale*, ossia piana. Non mi soffermo sul trattamento della coordinata-colore perché esula da questo scritto, ma illustro un modo matematico di gestire le tre coordinate spaziali.

Nelle figure si vede un modo grafico di rappresentare *sul piano* i tre assi di quello che i matematici chiamano *sistema ortogonale di assi cartesiani nello spazio*.



Ed ecco un metodo che utilizzo in fotografia per conferire all'immagine il senso di tridimensionalità.



6. Conclusione

In questo articolo divulgativo ho trattato alcuni aspetti della creatività legati alla matematica che, contrariamente a quanto crede la maggior parte delle persone, è una scienza in tumultuoso sviluppo. Non dovrebbe quindi stupire il fatto che, secondo i due più importanti database di riviste

matematiche, il “Mathematical Reviews” e lo “Zentralblatt Math” ogni anno si pubblicano circa 100.000 nuovi articoli di contenuto matematico. E che fine fanno? Molti vengono ignorati, in attesa che qualcuno per caso ne riscopra, se ci sono, gemme nascoste da utilizzare eventualmente, se possibile, in nuovi modelli matematici o in applicazioni pratiche.

Questa considerazione mi ha ispirato la poesia *modelli*, scritta in versi novenari. Si tratta di versi ternari costruiti con terne di sillabe di cui la seconda ha un accento forte ed è seguita da due con accenti deboli... esattamente come nel valzer.

modelli

perpendicolare sublime
trafigge volute di nebbia,
rivela teoremi sepolti,
arcane equazioni perdute,
ignoti, perfetti modelli

ottobre 2023

Poesie, sogni, palindromi, teoremi si rincorrono, si intrecciano e talvolta avviene il miracolo. Durante una sua conferenza, il grande matematico italiano Gian Carlo Rota (1932-1999) raccontò di un oscuro ricercatore, del quale non ricordo il nome, che si divertiva a scrivere articoli sulla tassellazione del piano in rettangoli, articoli che spesso non venivano pubblicati perché ritenuti non interessanti. A distanza di anni, quando si trattò di ottimizzare la disposizione dei chip nei computer, qualcuno riesumò quegli articoli che si rivelarono fondamentali. Fu un trionfo della creatività e una autentica meraviglia della matematica.

Matematici e poeti, usando la loro creatività, svelano meraviglie e non ho dubbi che continueranno a farlo. Spero che questo articolo abbia contribuito a darne una piacevole, seppur limitata, testimonianza.

*ci sono due tipi di articoli divulgativi,
quelli che non si sopportano oltre la prima frase
e quelli che non si sopportano oltre cinque minuti di lettura*

Però, se tu hai resistito fino a questo punto...

Bibliografia

- Bigatti A., Robbiano L. *Matematica di base*. CEA-Zanichelli; 2021².
Robbiano L. *Teoremi di geometria euclidea: proviamo a dimostrarli automaticamente*, Lettera Matematica Pristem. 2001:39-40,52-58.
Robbiano L. *Tre Amici e la Computer Algebra*. Bollettino U.M.I.-sez. A, La Matematica nella Società e nella Cultura. 2006;Serie VIII; vol. IX-A:1-23.
Robbiano L. *Algebra lineare per tutti*. Springer; 2007.
Robbiano L. *Giacimenti petroliferi e modelli polinomiali*, Lettera Matematica Pristem. 2009:70-71,82-87.

Meraviglie della matematica, espressioni della creatività

Idealmente lo scopo di questo articolo è quello di guidare i lettori lungo un viaggio per scoprire meraviglie matematiche figlie della creatività. Incontreremo strani caratteri, per esempio esponenziali, quadrati magici e tassellazioni. Alla fine esploreremo alcuni aspetti della geometria del colore.

Parole chiave: meraviglie matematiche; esponenziali; quadrati magici; tassellazioni; geometria del colore.

Mathematical Marvels; Expressions of Creativity

Ideally, the purpose of this talk is to guide readers on a journey to uncover marvels born of creativity. We will meet strange characters, for instance exponentials, polynomials with short square, magic squares and tilings. Finally, we will look at some observations on the geometry of colors.

Keywords: mathematical marvels; exponentials; magic squares; tilings; geometry of colors.

ENRICA ROCCOTIELLO

*L'uomo, il verde urbano
e le soluzioni basate sulla natura (NbS).
Un connubio possibile?*

Le città, oggi. Quali sfide per migliorare la qualità di vita?

Gli agglomerati urbani rappresentano aree fortemente influenzate dall'attività antropica, caratterizzate da una combinazione eterogenea di habitat. Essi possono includere ecosistemi acquatici e terrestri, sottoposti a diverso grado di disturbo antropico (EC 2020), condizionati da fattori fisici, socio-economici, abiotici e biotici (Pickett et al. 2017). Pur occupando circa il 3% della superficie terrestre, queste aree ospitano oltre il 50% della popolazione mondiale (IPCC, 2022; Schneider et al. 2009). Le città densamente costruite affrontano pertanto una serie di criticità, in relazione alla scarsa qualità dell'aria, all'effetto isola di calore, alla consistente presenza di superfici impermeabili e riflettenti e al degrado complessivo delle risorse idriche e degli ecosistemi (ISPRA 2019; EEA 2018).

Numerosi studi dimostrano che l'integrazione di aree verdi ad elevata biodiversità può migliorare la resilienza urbana, favorendo la creazione e il mantenimento di reti ecologiche vitali per gli ecosistemi urbani. Queste aree, infatti, ottimizzano la fornitura di servizi ecosistemici (EC 2020), contribuendo a rendere le città più resilienti e adattive. Negli ultimi anni, la Comunità Europea, le amministrazioni pubbliche e il settore privato hanno iniziato a promuovere tali soluzioni (EC 2021, 2022, 2023) anche se l'implementazione di politiche di riqualificazione ambientale mostra talvolta un recepimento lento nel renderle operative.

Per migliorare la qualità di vita dei cittadini e di tutti i viventi, anche nel contesto urbano, è cruciale sviluppare un sistema del verde che connetta il verde naturale preesistente all'edificazione e le aree verdi progettate, tenendo conto della biodiversità locale e in grado di offrire servizi ecosistemici essenziali. Le soluzioni basate sulla natura – NbS (IUCN 2020) rappresentano, in tal senso, una strategia efficace per affrontare queste sfide, grazie alla capacità di mitigare il fenomeno delle isole di calore urbano, ridurre l'inquinamento atmosferico e il deflusso superficiale delle acque piovane, oltre a promuovere il benessere psico-fisico dei cittadini (MAES 2005). Sebbene vi sia una crescente attenzione verso l'ambiente urbano e un interesse per soluzioni biofile, come le *Nature-based Solution* (NbS), rappresentate da progetti simbolici come il Bosco Verticale di Milano o il Condominio 24 Verde a Torino (figura 1), molto resta da fare per tradurre queste idee in azioni concrete. Per dare una svolta alla pianificazione e alla gestione urbana, è necessario sviluppare un'infrastruttura verde coerente, in grado di integrare gli habitat naturali urbani e contesti artificializzati.

L'inserimento di spazi verdi nelle città non garantisce automaticamente un miglioramento ambientale; è cruciale selezionare con cura le specie vegetali, evitando quelle invasive o incompatibili con la flora locale. L'uso di specie esotiche o allergeniche può ridurre l'efficacia delle soluzioni verdi e danneggiare gli ecosistemi esistenti. L'introduzione di



Figura 1. Due esempi di verde integrato nell'edificato: Condominio 24 verde a Torino e Bosco Verticale a Milano (CC BY-SA 4.0 foto di Thomas Ledl).

specie alloctone può infatti minacciare la biodiversità locale, alterando equilibri ecologici e compromettendo i servizi ecosistemici, come la purificazione dell'aria e dell'acqua, la regolazione climatica e il supporto alla biodiversità (Pianta et al. 2023). Questi servizi sono essenziali per la qualità della vita urbana e la loro perdita comporterebbe costi economici significativi. Per evitare tali rischi, le soluzioni basate sulla natura devono essere progettate in base al contesto ecologico specifico, con una gestione attenta che riduca la frammentazione degli habitat e promuova la coerenza ecologica.

La ricerca applicata nel campo botanico è dunque cruciale per la riqualificazione degli ecosistemi fortemente alterati dall'attività umana, con l'obiettivo di migliorare la biodiversità urbana attraverso strategie "smart" e "green". Diversi settori richiedono tali interventi in tema di pianificazione, sviluppo del verde su diversi tipi di superficie anche non al suolo, rispetto del dinamismo della vegetazione, gestione delle NbS a scala locale, ottimizzazione dei servizi ecosistemici e formazione di nuove figure professionali in merito a varie iniziative intraprese dal gruppo di ricerca per il miglioramento della biodiversità urbana.

Nature-based Solution *per migliorare il microclima urbano*

Nella progettazione degli spazi verdi urbani, si nota spesso una limitata diversificazione delle specie utilizzate, che tendono ad essere poche, esotiche e principalmente arboree, caratteristiche che non sempre rispondono adeguatamente alle esigenze delle aree urbane. I software climatici utilizzati per modellare il verde urbano si basano su database di specie vegetali spesso non aggiornati o inadeguati a causa della scarsa corrispondenza tra le dimensioni reali delle piante e le condizioni ambientali a cui sono esposte, come quelle caratteristiche del microclima urbano. Inoltre, non viene considerata l'eventuale presenza di specie esotiche invasive. In risposta a queste criticità, per affrontare il fenomeno dell'isola di calore attraverso l'uso di piante autoctone, è stata elaborata, nell'ambito del progetto CCM Climactions, una checklist per identificare le specie più appropriate da inserire nella modellazione del verde urbano (Perini et al. 2022). A Genova, un progetto di rigenerazione urbana è stato implementato in un quartiere con gra-

vi problemi di salute pubblica, utilizzando strumenti avanzati come il software ENVI-met per simulare il microclima e confrontare diversi scenari progettuali in un punto caldo della città (Mosca et al. 2021; Perini et al. 2022). La modellizzazione impiegata ha consentito di valutare possibili scenari di inverdimento nonché i relativi benefici. L'impiego di tali strumenti di modellizzazione che sta trovando via via sempre maggiore applicazione dovrebbe essere utilizzato in modo più strutturale e integrato a una progettazione di tipo tradizionale per il miglioramento del comfort urbano e della sostenibilità ambientale.

Involucri edilizi verdi economici ed ecosostenibili

In contesti urbani densamente edificati, dove lo spazio disponibile a livello del suolo è molto ridotto, l'installazione di NbS quali facciate e coperture verdi rappresenta una soluzione particolarmente vantaggiosa (Dover 2018). Questi involucri non solo permettono di risparmiare spazio al suolo, ma forniscono anche isolamento termico e acustico, contribuendo al risparmio energetico (Wong et al. 2010) e alla sostenibilità degli edifici (Coma et al. 2017; Ottel   et al. 2020). Tuttavia, i costi legati all'installazione e alla manutenzione possono essere elevati e non sempre giustificati dai benefici economici immediati. Oltre agli involucri verdi realizzati con piante vascolari sono ora in fase di sperimentazione involucri pi  leggeri e multifunzionali a base di muschio, che sembra essere una soluzione promettente. I muschi offrono vantaggi come una gestione efficiente delle acque meteoriche, una riduzione delle temperature superficiali e una maggiore durata nel tempo (Park e Murase 2008; Anderson et al. 2010; Khalid et al. 2017) rispetto alle piante vascolari (Burszta-Adamiak 2019). Inoltre, i muschi richiedono una manutenzione minima, sono leggeri e resistenti, qualit  che li rendono ideali per applicazioni a tetti verdi e facciate. Sulla base di questi studi   stato brevettato un involucro muscinale chiamato MosSkin, che combina leggerezza, versilit  e capacit  di catturare particelle inquinanti dall'aria. Questo pannello rappresenta un passo importante verso lo sviluppo di nuovi materiali per l'edilizia, pensati non solo per edifici residenziali e industriali, ma anche per interventi temporanei come l'inverdimento di pannelli nelle aree di cantiere (Perini et al. 2020; Roccotiello et al.

2020). Le applicazioni tecnologiche rivolte ai materiali per involucri edilizi rappresentano oggi un'altra frontiera per l'integrazione di un verde a bassa richiesta idrica e basso manutentivo nel tessuto urbano.

Dinamismo della vegetazione nei contesti urbani

Le innovazioni della botanica ambientale applicata nel contesto urbano hanno l'obiettivo di integrare sempre più la componente naturale con quella artificiale, contribuendo a rendere le città più vivibili e sostenibili. Tuttavia, molti approcci attuali continuano a separare nettamente l'uomo dalla natura (Canepa et al. 2022). Nel contesto urbano le aree a verde tendono a essere mantenute in una perpetua condizione che non ne consente l'evoluzione con elevata manutenzione e relativi impatti e costi derivanti, questo diventa tanto più evidente in presenza di tetti verdi che, se lasciati colonizzare spontaneamente potrebbero diventare vere e proprie isole di biodiversità (Pianta et al. 2024). La sfida maggiore è quella di sviluppare una progettazione urbana che, dalla scala locale (edificio/quartiere) a quella di paesaggio sappia integrare conoscenze e competenze con approccio il più possibile interdisciplinare. Esistono ad oggi sia modelli ecologici in grado di prevedere l'evoluzione della vegetazione nel tempo secondo differenti scenari ambientali, sia il design computazionale per la progettazione di edifici e facciate sulla base di valori parametrici. L'integrazione di questi due approcci risulta sfidante e funzionale a una progettazione di nuova generazione in grado di comprendere come l'edificio e il verde (e la componente biotica in rete con esso) possano evolvere nel tempo e possano fornire ulteriori elementi conoscitivi utili allo sviluppo di NbS di nuova generazione. Un cambio radicale di prospettiva è stato ad esempio proposto dal progetto ECOLOPES nell'ambito del programma H2020, che propone involucri verdi multispecie, progettati per co-evolvere con il contesto urbano e per interagire con la biodiversità esistente. Questo approccio considera le città non solo come ambienti artificiali, ma come ecosistemi complessi dove esseri umani, animali, piante e microbiota convivono e interagiscono (Weisser et al. 2023; Calbi et al. 2024). All'interno di ECOLOPES, è stato sviluppato un modello ecologico che permette di prevedere come la vegetazione degli involucri edilizi possa evolvere nel tempo, prendendo in considerazione le interazioni fra

le diverse componenti biotiche e abiotiche. Questo modello si basa su un database globale di oltre 19.000 specie vegetali e raggruppa le piante in gruppi funzionali, definiti in base a tratti come area fogliare specifica, altezza della pianta e contenuto di nutrienti nelle foglie (Calbi et al. 2024). Tali gruppi sono stati studiati per fornire scenari di inverdimento più realistici e ottimizzati nel tempo, adattabili a diverse esigenze progettuali.

Mitigazione dell'inquinamento urbano tramite Nature-based Solution

Le NbS possono essere utilizzate sia per migliorare la qualità della vita urbana, sia per risolvere problemi specifici come l'inquinamento atmosferico (figura 2), idrico e del suolo (Perini et al. 2017). In particolare, un approccio promettente è il fitorisanamento, che sfrutta le piante per assorbire, accumulare o immobilizzare inquinanti presenti nel suolo, nell'acqua o nell'aria (Berti e Cunningham 2000). Progetti recenti, come il PNC SALPIAM, che si propone di migliorare la sostenibilità e la qualità di vita delle città portuali, hanno sviluppato mappe del verde urbano per valutare le aree adatte all'inverdimento focalizzate sulla mitigazione dell'inquinamento da traffico navale, caratterizzando



Figura 2. *Campionamento di foglie per quantificare la deposizione di particolato atmosferico da parte di una facciata verde con sistema living wall. Progetto Clever Cities (H2020, Comune di Milano).*

la specifica attività di captazione di polveri sottili e l'assorbimento di NO_2 da parte delle piante indici come l'Air Pollution Tolerance Index (APTI) (Singh and Rao 1983; Correa-Ochoa et al. 2022) per guidare la selezione delle specie vegetali.

Diversi progetti impiegano tecniche di bonifica ambientale con soluzioni innovative, come l'inoculo di microorganismi in piante e suolo per migliorare la capacità delle piante di assorbire metalli pesanti dai suoli contaminati e aumentarne complessivamente la resistenza a stress e disturbo. L'interazione tra piante e microbiota ambientale rappresenta un'area di ricerca chiave per il potenziamento dell'efficacia delle NbS nel risanamento urbano. In tale contesto, l'impiego di un pool di microorganismi batterici e fungini può giocare un ruolo chiave sia nell'alleviare lo stress da metallo sia nell'aumentare la captazione dello stesso da parte della pianta, con una partita che si gioca a più livelli e con diversi organismi riconducibili a regni diversi, dal suolo alla foglia (Priarone et al. 2023a; Rosatto et al. 2021). In tali interazioni pianta-suolo, il microbiota rizosferico rappresenta un elemento chiave su diversi livelli e compare in tutti temi dei progetti strategici per l'agricoltura, l'uso del suolo, la riduzione dei pesticidi e dei fertilizzanti e il miglioramento delle colture (Rosatto et al. 2021).

È necessario iniziare a considerare una risorsa come il suolo, che dovrebbe essere sempre più deimpermeabilizzato e organicato, e inserirlo attivamente in quella che si potrebbe definire una “progettazione capovolta” che tenga in considerazione la salute di questo prezioso comparto ambientale renderlo in grado di ospitare non solo piante, ma tutta la componente dei viventi che da esso dipende.

Valutazione dei servizi ecosistemici delle Nature-based Solution a scala locale

Le NbS sono sempre più diffuse nelle città, dove forniscono benefici ecosistemici di regolazione rilevanti, come il miglioramento della qualità dell'aria e dell'acqua, e la riduzione dell'inquinamento. Se sistemi e tecnologie risultano disponibili su vasta scala (es. monitoraggio con dati satellitari), tuttavia, per garantirne l'efficacia a lungo termine, è necessario implementare anche sistemi di monitoraggio che valutino le loro prestazioni su scala locale.



Figura 3. *Parco urbano ex Caserma Gavoglio, quartiere Lagaccio, Genova, riquadrificato con 12 NbS per fornire diversi servizi ecosistemici (principalmente gestione delle acque di prima pioggia).*

Ad esempio, nel progetto Urban Nature Lab (UnaLab), sviluppato presso il parco urbano dell'ex Caserma Gavoglio (Genova) (figura 3), sono stati applicati indicatori chiave di prestazione (KPI) per monitorare la biodiversità, l'evapotraspirazione e la capacità di assorbimento di CO₂ delle NbS implementate. Nonostante la bassa biodiversità riscontrata inizialmente in termini di abbondanza e ricchezza specifica di insetti, in particolare impollinatori, avifauna e piante, questi risultati sono stati attribuiti al breve periodo di tempo trascorso dall'intervento, che richiede anni per consentire una piena stabilizzazione delle comunità vegetali e animali (Priarone et al. 2023b). Approcci come questo possono fornire indicazioni per la gestione futura delle NbS, in particolare relativo alle attività manutentive volte a ottimizzarne lo sviluppo e l'efficacia, in un'ottica di un territorio sempre più adattivo e resiliente.

Consapevolezza e coinvolgimento della società civile

La promozione di città verdi e sostenibili non può prescindere dalla formazione di nuove figure professionali capaci di gestire e pianificare la biodiversità urbana in modo efficace. In quest'ottica, il progetto Green

Skills for Cities nell'ambito del programma Erasmus+ KA è stato lanciato per sviluppare competenze specifiche tra gli studenti universitari e i giovani professionisti nel settore della gestione del verde urbano. Su altra scala, a Genova, l'Academy azioni di adattamento al cambiamento climatico si propone di formare gli operatori delle PA e degli ordini professionali per cambiare l'ottica e le strategie di pianificazione territoriale per rendere le città più adattive rispetto al cambiamento climatico. Parallelamente, è stato avviato un processo di sensibilizzazione e formazione anche a livello delle scuole, con iniziative mirate a coinvolgere i bambini delle scuole dell'infanzia e i loro insegnanti. Progetti come Ortobimbi, in collaborazione con il Comune di Genova, mirano a introdurre la consapevolezza ambientale fin dalla tenera età, mentre altri programmi, come il PNRR RAISE, con il progetto interdisciplinare Botanica e Big Data, si concentrano sulla formazione in ambiti tecnologici come l'intelligenza artificiale e la robotica nelle scuole secondarie, integrando aspetti legati alla sostenibilità.

Conclusioni

Il Green Deal europeo e gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite evidenziano la necessità di adottare un approccio transdisciplinare per promuovere le NbS a supporto della biodiversità urbana e affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici e dalle pressioni antropiche. Questo approccio, che integra diverse competenze e discipline, consente di sviluppare soluzioni innovative e condivise, indispensabili per ripristinare le funzioni ecologiche delle città e migliorare la qualità ambientale.

Per raggiungere tali obiettivi, è cruciale formare nuove figure professionali nel campo della green economy e coinvolgere attivamente la società civile. La partecipazione di tutti gli attori sociali è fondamentale per sostenere la transizione verso città più sostenibili e resilienti, capaci di affrontare le sfide ecologiche e migliorare la qualità della vita.

L'inverdimento urbano ad alta biodiversità tramite NbS rappresenta una delle strategie più promettenti per rispondere alle problematiche ambientali delle aree urbane. Tuttavia, per ottenere risultati concreti e duraturi, è necessario andare oltre l'aspetto estetico o simbolico del

verde urbano, considerando le sue funzioni ecologiche e la sua interazione con l'ambiente circostante. Solo attraverso un approccio integrato che tenga conto del contesto ecologico specifico e della coerenza del sistema verde, sarà possibile evitare la frammentazione degli habitat urbani e garantire un futuro sostenibile per le città.

In conclusione, per costruire città più resilienti e sostenibili, è indispensabile adottare un modello di gestione del verde urbano che bilanci l'esigenza di aumentare gli spazi verdi con la protezione della biodiversità locale. Solo così si potranno garantire benefici ambientali duraturi, migliorare la qualità della vita dei cittadini e preservare l'equilibrio ecologico nelle aree urbane.

Bibliografia

- Anderson M., Lambrinos J., Schroll E. *The potential value of mosses for stormwater management in urban environments*. Urban Ecosyst. 2010;13(3):319-332.
- Berti W.R., Cunningham S.D. *Phytostabilization of metals*. In: Raskin I., Ensley B.D. (eds.). *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-up the Environment*. John Wiley & Sons, Inc.; 2000:71-88.
- Burszta-Adamiak E., Fudali E., Kolasińska K. *A pilot study on improving the functioning of extensive green roofs in city centers using mosses*. Sci Rev Eng Environ Sci. 2019;28(1):118-130.
- Calbi M., Boenisch G., Boulangeat I., et al. *A novel framework to generate plant functional groups for ecological modelling*. Ecol Indic. 2024;166:112370. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112370
- Canepa M., Mosca F., Barath S. et al. *Ecolopes beyond greening: A multi-species approach for urban design*. AGATHÓN|Int J Archit Art Des. 2022;11(Online):238-245.
- Coma J., Perez G., de Gracia A., Burés S., Urrestarazu M., Cabeza L.F. *Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades*. Build Environ. 2017;111:228-237.
- Correa-Ochoa M., Mejia-Sepulveda J., Saldarriaga-Molina J., Castro-Jiménez C., Aguiar-Gil D. *Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of six plant species, in an urban tropical valley: Medellín, Colombia*. Environ Sci Pollut Res Int. 2022;29(5):7952-7971. doi:10.1007/s11356-021-16037-0

- Dover J.W. *Introduction to urban sustainability issues: Urban ecosystem*. In: *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier; 2018:3-15.
- European Commission: Joint Research Centre, Maes J., Teller A., Erhard M. et al. *Mapping and Assessment of Ecosystems and Their Services: An EU Ecosystem Assessment* (JRC120383). European Commission; 2020. doi:10.2760/757183
- European Commission, Directorate-General for Environment. *Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030 – Riportare la natura nelle nostre vite*. Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione Europea; 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/677548>
- European Commission, Directorate-General for Environment. *Nature Restoration Law – For People, Climate, and Planet*. Publications Office of the European Union; 2022. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/86148>
- European Commission, Directorate-General for Communication. *Green Deal Europeo – Conseguire gli obiettivi climatici dell'UE per il 2030*. Publications Office of the European Union; 2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/914932>
- EEA - European Environment Agency. *Air Quality in Europe*. 2018.
- IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2022. doi:10.1017/9781009157926
- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. *XV Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano*. 2019.
- IUCN. *Global Standard for Nature-based Solutions: A User-Friendly Framework for the Verification, Design and Scaling up of NbS: First Edition*. IUCN; 2020. doi:10.2305/IUCN.CH.2020.08.en
- Khalid A.A., Katoh Y., Katsurayama H., Murase H., Park J.E. *Thermal relaxation by sunagoke moss green roof in mitigating urban heat island*. Int J Civ Environ Eng. 2017;17(6).
- MAES - Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press; 2005. <https://www.millenniumassessment.org>
- Mosca F., Dotti Sani G.M., Giachetta A., Perini K. *Nature-based solutions: Thermal comfort improvement and psychological wellbeing, a case study in Genoa, Italy*. Sustainability. 2021;13:11638.
- Ottel  M., Perini K., Fraaij A.L.A., Haas E.M., Raiteri R. *Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems*. Energy Build. 2011;43(12):3419-3429. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.010
- Park J.E., Murase H. *Evapotranspiration efficiency of sunagoke moss mat for the*

- wall greening on the building*. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2008; 2008:3612-3621.
- Perini K., Calise C., Castellari P., Roccotiello E. *Microclimatic and environmental improvement in a Mediterranean city through the regeneration of an area with nature-based solutions: A case study*. Sustainability 2022;14(10)5847. doi:10.3390/su14105847
- Perini K., Castellari P., Giachetta A., Turcato C., Roccotiello E. *Experiencing innovative biomaterials for buildings: Potentialities of mosses*. Build Environ. 2020;172:106708.
- Perini K., Ottelé M., Giulini S., Magliocco A., Roccotiello E. *Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system*. Ecol Eng. 2017;268-276. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.12.032
- Pianta M., Mariotti M., Zotti M. et al. *Spontaneous plant communities within a Mediterranean green roof* [conference presentation]. CYBO 2023 – Conference for Young Botanists; February 9-10, 2023; Bolzano, Italy.
- Pickett S.T.A., Cadenasso M., Rosi E. et al. *Dynamic heterogeneity: A framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems*. Urban Ecosyst. 2017;20(1):1-14. doi:10.1007/s11252-016-0574-9
- Priarone S., Romeo S., Di Piazza S. et al. *Effects of bacterial and fungal inocula on biomass, ecophysiology, and uptake of metals of *Alyssoides utriculata* (L.) Medik.* Plants. 2023a;12(3):554. doi:10.3390/plants12030554
- Priarone S., Di Domenico M., Campailla S., Turcato C., Roccotiello E. *Quantifying ecosystem services within urban nature-based solutions in the city of Genoa* [conference presentation]. CYBO 2023 – Conference for Young Botanists; February 9-10, 2023b; Bolzano, Italy.
- Roccotiello E., Perini K., Castellari P., Giachetta A., Turcato C. *Sistema per l'inverdimento di aree urbane costituito da composizione muscinale e pannello di substrato/supporto* [Patent No. 102020000018562]. Brevetto nazionale; 2020.
- Rosatto S., Mariotti M., Romeo S., Roccotiello E. *Root and shoot response to nickel in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator species*. Plants. 2021;10(3):508. doi:10.3390/plants10030508
- Schneider A., Friedl M., Potere D. *A new map of global urban extent from MODIS satellite data*. Environ Res Lett. 2009;4. <http://sage.wisc.edu/people/schneider/research/data.html>
- Singh S.K., Rao D.N. *Evaluation of plants for their tolerance to air pollution*. In: *Proceedings of the Symposium on Air Pollution Control*, Indian Association for Air Pollution Control; 1983:218-224.
- Weisser W.W., Hensel M., Barath S. et al. *Creating ecologically sound buildings*

by integrating ecology, architecture and computational design. People Nat. 2023;5(1):4-20. doi:10.1002/pan3.10411

Wong N.H., Tan A.Y.K., Tan P.Y., Chiang K., Wong N.C. *Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls.* Build Environ. 2010;45:411-420.

L'uomo, il verde urbano e le soluzioni basate sulla natura (NbS). Un connubio possibile?

Le città coprono circa il 3% della superficie terrestre e ospitano oltre il 50% della popolazione mondiale. Il verde urbano è al centro dell'attenzione, legato al cambiamento climatico e alla qualità della vita. Le soluzioni basate sulla natura (NbS) potrebbero migliorare l'ambiente urbano, ma sono ancora poco sfruttate. Si discutono i criteri per integrare il verde nel contesto costruito, la biodiversità e i servizi ecosistemici, bilanciando estetica e funzionalità. Pianificare e gestire il verde urbano è una sfida necessaria per uno sviluppo sostenibile e ad alta biodiversità.

Parole chiave: biodiversità urbana; ecologia urbana; *Nature-based Solution*; monitoraggio.

Humans, Urban Green and Nature-based Solutions (NbS). A Possible Alliance?

Cities cover about 3% of the Earth's surface and are home to over 50% of the global population. Urban green spaces are a key focus, linked to climate change and quality of life. Nature-based solutions (NbS) could enhance the quality urban environment, but they remain underutilized. Discussions focus on the criteria for integrating greenery into built environments, biodiversity, and ecosystem services, balancing aesthetics and functionality. Planning and managing urban green spaces is a mandatory challenge for sustainable development with high biodiversity.

Keywords: urban biodiversity; urban ecology; *Nature-based Solution*; monitoring.

SAVERIO RUSSO

*Perché le costruzioni degli antichi romani
sono durate così a lungo?
Il mistero svelato*

1. *Introduzione*

L'eccezionale durabilità delle opere di ingegneria civile realizzate dagli antichi romani, capaci di conservarsi per millenni anche in condizioni climatiche molto differenti, in zone sismiche o persino a contatto diretto con acqua di mare, ha sempre costituito un mistero. A confronto con le moderne strutture in calcestruzzo che spesso iniziano a sgretolarsi dopo pochi decenni, le più famose architetture degli antichi romani sono sorprendentemente ancora in piedi, almeno in gran parte, e sono destinate a durare ancora molto tempo. Se hanno subito danni, sovente questi ultimi sono stati causati piuttosto dal saccheggio delle pietre anziché da cedimenti strutturali.

A titolo d'esempio la volta in calcestruzzo del Pantheon adrianeo – la più grande al mondo, con un diametro di 43,44 m e un peso di oltre 5.000 tonnellate – fu presumibilmente costruita tra il 112 e il 128 d.C.

La realizzazione del Colosseo, il più grande anfiteatro romano del mondo, va collocata tra il 70 e l'80 d.C. sotto Vespasiano e Tito. Il bellissimo Mausoleo di Cecilia Metella sulla via Appia Antica è più antico di almeno un secolo: la sua costruzione va infatti fatta risalire tra il 30 e il 10 a.C. in età augustea. Gli acquedotti sono un'ulteriore testimonianza di questa eccezionale longevità. Il Pont du Gard, nel sud della Francia, faceva parte di un acquedotto di quasi 50 km di lunghezza ed è stato realizzato intorno al 17 a.C. da Agrippa sotto l'imperatore Augusto. Nella figura 1 sono raffigurate le quattro costruzioni succitate.

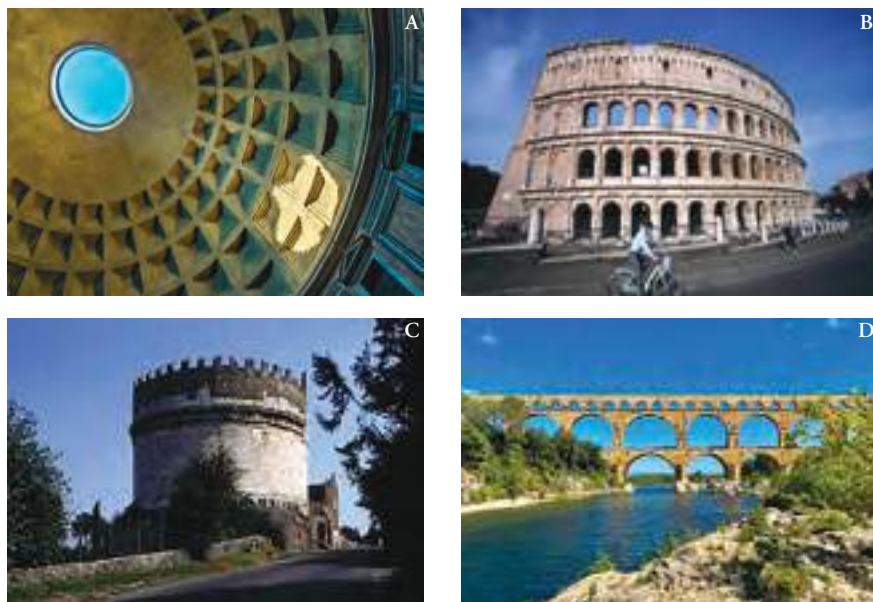


Figura 1. A. *Il Pantheon*; B. *il Colosseo*; C. *il Mausoleo di Cecilia Metella*; D. *il Pont du Gard*.

A partire dal III secolo a.C. fino ai giorni nostri si è sempre creduto che l'eccezionale resistenza del materiale da costruzione usato dai romani fosse dovuta alla presenza nell'impasto di un particolare materiale pozzolanico, costituito dalla cenere vulcanica della zona di Pozzuoli tra Cuma e il promontorio di Minerva nel golfo di Napoli. Questa cenere veniva infatti spedita in tutto l'impero per essere utilizzata come ingrediente chiave nella realizzazione del calcestruzzo. In particolare, ma non solo, veniva impiegata nella costruzione di fondamenta immerse nell'acqua per porti e ponti sui fiumi secondo dettagliate formulazioni ampiamente descritte nel *De Architectura* da Marco Vitruvio Pollione,¹ ingegnere e architetto del I secolo a.C., e da Plinio il Vecchio nella *Naturalis historia*.²

Recentissime sperimentazioni hanno però suggerito una spiegazione alternativa, molto più plausibile, dello straordinario comportamento degli antichi calcestruzzi romani.³ Il gruppo internazionale di ricerca autore della pubblicazione citata ha avanzato un'ipotesi, suffragata da solidissime evidenze sperimentali, che parte dalla costante

presenza in tutti i calcestruzzi antichi romani di piccole inclusioni minerali biancastre e aghiformi di dimensioni millimetriche, identificate come carbonato di calcio. La sua formazione è stata ipotizzata come possibile solo a causa di reazioni condotte ad alta temperatura a partire da calce viva (ossido di calcio), a differenza delle attuali formulazioni di calcestruzzo prodotto invece a partire da calce spenta (idrossido di calcio).

2. *Prelievi e caratterizzazioni del calcestruzzo degli antichi romani*

Il calcestruzzo è un materiale composito formato mediante prolungata miscelazione tra cemento, sabbia, ghiaia ed eventuali additivi. Il cemento è prodotto per calcinazione, cioè per riscaldamento prolungato ad alta temperatura ($T \geq 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) di un'intima miscela di calcare, a base di carbonato di calcio, e argilla, cioè di alluminosilicati idrati con dimensioni inferiori a $2\text{ }\mu\text{m}$. La calcinazione produce il cosiddetto *klinker* che, finemente macinato con l'aggiunta di piccole quantità di gesso (ca. $2\div4\%$) ed eventuali additivi, forma il cemento. Il termine deriva dal latino *caementum*, legante, cioè materiale in grado di legare altri materiali quali sabbia e pietrisco altrimenti disaggregati. L'industria delle costruzioni in cemento ha un enorme impatto ambientale, producendo l'8% circa sul totale dei gas serra. Se fosse una nazione, sarebbe in terza posizione dopo Cina e Stati Uniti nella produzione di CO_2 .⁴ Produrre una tonnellata di cemento comporta grosso modo l'emissione di una tonnellata di CO_2 in atmosfera. Per un metro cubo di calcestruzzo ($2.2\div2.4$ tonnellate) servono ca. 300 chilogrammi di cemento, 600 chilogrammi di sabbia, 1.300 chilogrammi di ghiaia e 120 litri d'acqua.⁵ La produzione globale di cemento (dati del 2022) è stata di circa 4.37 miliardi di tonnellate,⁶ da cui è derivata la produzione di 14 miliardi di metri cubi di calcestruzzo.

Gli autori dello studio succitato³ hanno potuto prelevare un frammento di ca. 2 cm di calcestruzzo antico romano dal muro di cinta del sito archeologico di Priverno (II secolo a.C.) a sud di Roma, sottoponendolo a completa caratterizzazione con diverse tecniche analitiche, di cui la principale è stata la spettroscopia EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*, anche abbreviata EDX or XEDS). Quest'ultima è

una tecnica analitica che permette la caratterizzazione chimica mediante l'analisi elementare dei materiali. Lo spettro dei raggi X rilasciati è caratteristico dell'atomo colpito (eccitato) da una fonte di energia, quale ad esempio il fascio di elettroni di un microscopio elettronico. La posizione dei picchi nello spettro identifica l'elemento e l'intensità del segnale corrisponde alla sua concentrazione.

Sulla base dell'insieme dei loro risultati analitici, utilizzando tecniche di imaging multiscala e mappatura chimica, Masic et al.³ hanno proposto che la produzione di calcestruzzo da parte degli antichi romani avvenisse per miscelazione a caldo (ad es. cottura in forno ad alte temperature) con indubbi vantaggi quali la produzione di sostanze chimiche associate solo ad alte temperature e che non potrebbero formarsi a basse temperature, oltre che a un rimarchevole aumento della velocità di reazione con il risultato finale di una realizzazione delle costruzioni in tempi minori. L'effetto preponderante della miscelazione a caldo si è tradotto nella formazione di clasti, cioè di piccoli grumi di calce viva caratterizzati da un'architettura nano- e micro-particellare molto fragile e altamente reattiva. Paradossalmente, da sempre fino alla pubblicazione del lavoro di Masic et al.³ questi clasti molto porosi sono stati considerati quali prove evidenti dell'impiego di materie prime di scarsa qualità e/o di carenze di efficaci miscelazioni. I clasti, al contrario, si sono rivelati componenti essenziali per garantire l'eccezionale resistenza al deterioramento da parte delle costruzioni degli antichi romani, in quanto hanno costituito una fonte perenne di ioni calcio all'origine della formazione *in situ* di carbonato di calcio. Infatti i clasti di calce viva in presenza di microfessurazioni hanno potuto reagire con l'acqua penetrata per pioggia, umidità o risalita dal terreno, creando una soluzione satura di ioni calcio in grado di carbonatarsi e cristallizzare come carbonato di calcio, riempiendo rapidamente le microfessure. In aggiunta, gli ioni calcio hanno potuto reagire anche con gli aggregati di materiale pozzolanico, detti tefra, presenti nel calcestruzzo rinforzando ulteriormente mediante la formazione di alluminosilicati idrati di calcio, identificati dall'acronimo C-A-S-H (*calcium alumino-silicates hydrates*), suffragando così almeno in parte quanto attribuito da Vitruvio¹ e Plinio il Vecchio² al ruolo fondamentale della cenere pozzolanica. Nella figura 2 viene schematizzato il meccanismo di autoriparazione proposto da Masic et al.³

Per supportare l'ipotesi su riportata è stato condotto dagli stessi autori³ un esperimento pilota con la realizzazione di un campione di calcestruzzo impastato a caldo secondo le formulazioni degli antichi romani, cioè utilizzando calce viva, messo a confronto con un campione

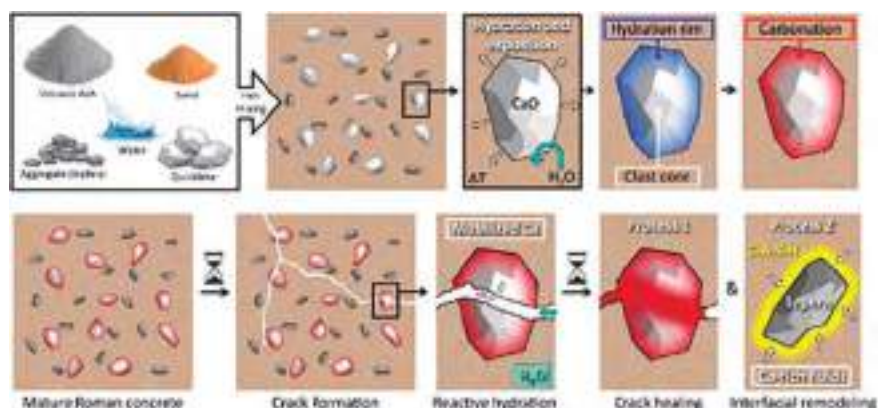


Figura 2. Schema del meccanismo di autoriparazione tratto dall'articolo di Masic et al. 2023.

preparato secondo le formulazioni moderne a base di calce spenta. Su entrambi i campioni è stata creata una microfessurazione che ha permesso l'introduzione di acqua nelle crepe. Nel calcestruzzo "simil-romano antico" dopo alcune settimane le fessure sono risultate completamente rimarginate, mentre in quello "moderno" l'acqua ha continuato a scorrere nelle crepe, ribadendo così la piena validità del meccanismo di autoriparazione proposto.

Nella figura 3 sono riportate le caratterizzazioni di un campione di calcestruzzo antico e di un campione moderno ispirato al romano antico che evidenziano le forti analogie microstrutturali tra i due campioni. Sul campione "simil-romano antico" sono anche presenti alcune microfessurazioni autoriparate all'interno del clasto (figura 3-L).

Era questo il segreto che ha garantito agli antichi romani il raggiungimento dei massimi risultati nel settore dell'ingegneria civile, realizzando strade, ponti, acquedotti e imponenti edifici durati per millenni.

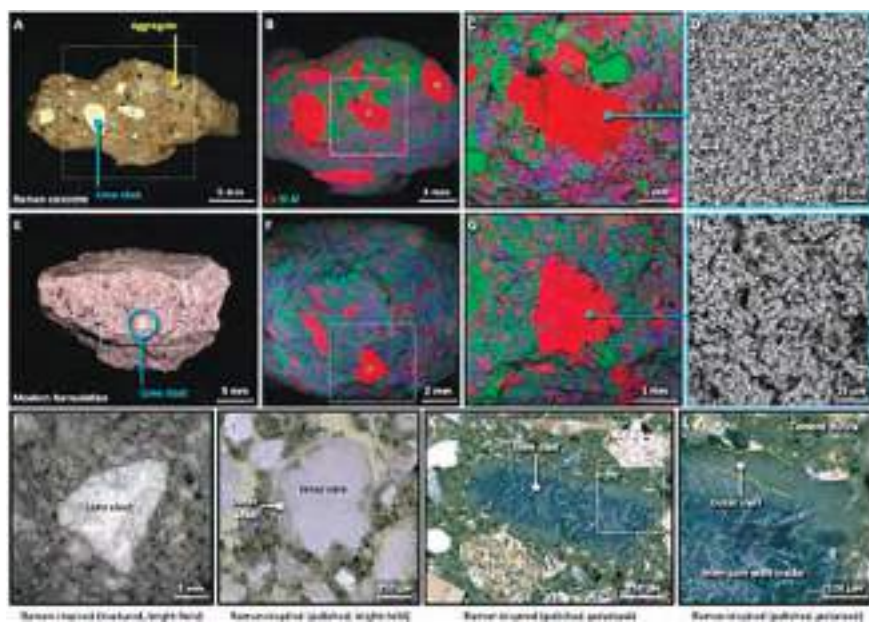


Figura 3. A: calcestruzzo antico; B, C: clasti di calce viva; D: struttura micro- e nano-particellare; E: calcestruzzo moderno “simil-romano antico”; F, G: clasti di calce viva; H: struttura micro- e nano-particellare; I: singolo clasto fratturato; J, K: strato superficiale; L: microfessurazioni autoriparate all’interno del clasto. (Riproduzione da rif. 3).

3. Un moderno cemento autoriparante

I materiali autoriparanti sono una classe di materiali intelligenti in grado di recuperare, parzialmente o totalmente, un danno meccanico in maniera autonoma oppure in risposta a uno stimolo esterno. L’idea di base consiste nell’integrare nei materiali dei meccanismi di riparazione che controbilancino quelli degradativi derivanti dal loro normale utilizzo.^{7, 8}

Sulla base degli interessantissimi risultati conseguiti e del relativo brevetto (WO 2019/204776 di proprietà MIT),⁹ dopo anni di test condotti in Svizzera presso l’Istituto di Meccanica dei Materiali a Grancia diretto da Michel De Tommaso (uno degli autori del lavoro in oggetto), sono state ottenute tutte le certificazioni industriali necessarie per entrare sul mercato ed è stato possibile concretizzare alcune ipotesi di commercializzazione da utilizzare nell’edilizia moderna con nuove formulazioni di calcestruzzo più leggere e resistenti, capaci di durare più a lungo e di

ridurre l'impatto ambientale. È stata creata una start-up italiana denominata DMAT,¹⁰ fondata da Admir Masic* e Paolo Sabatini (un altro degli autori della pubblicazione succitata), che ha iniziato a vendere ai vari clienti (produttori di calcestruzzo, aziende da costruzione, sviluppatori immobiliari) le formulazioni per realizzare il calcestruzzo autoriparante chiamato D-Lime che, tra l'altro, in fase di produzione emette una quantità di anidride carbonica inferiore del 20% con costi ridotti del 50% rispetto a prodotti simili. La DMAT è sbarcata da poco negli Stati Uniti dando vita a una *Newco* che si sta occupando dello sviluppo e della commercializzazione di calcestruzzi con le nuove caratteristiche. Il prossimo passo sarà costituito da formulazioni per stampanti 3D, realizzando così un calcestruzzo ecologico, autoriparante e prodotto senza sprechi.

Bibliografia

- [1] M. Vitruvio Pollione, *De Architectura*, traduzione di L. Migotto, Edizioni Studio Tesi, 1999.
- [2] G. Plinio Secondo, *Storia Naturale*, Volume V, libri 33-37, traduzione di A. Corso, R. Mugellesi, G. Rosati, Einaudi, 1988.
- [3] Seymour L.M., Maragh J., Sabatini P., Di Tommaso M., Weaver J.C., Masic A., *Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete*. Sci. Adv. 9, add1602 (2023). doi: 10.1126/sciadv.add1602
- [4] <https://www.quotedbusiness.com>thm-1-innovazione>
- [5] <https://www.it.weber>
- [6] <https://www.globalcement.com>

* Durante la guerra dei Balcani, scoppiata nel 1992, Admir Masic quale profugo bosniaco rifugiato in Croazia ha collaborato con l'organizzazione di volontari torinesi Collettivo Azione Pace che, a guerra finita, lo ha invitato in Italia, aiutandolo a iscriversi all'Università di Torino. Laureato in Chimica nel 2001 ha successivamente conseguito il Dottorato in Chimica Fisica e ha lavorato al restauro della Reggia di Venaria. Senza permesso di soggiorno, è stato costretto a partire per la Germania dove ha iniziato a lavorare al Max Planck Institute of Colloids and Interfaces. In quel contesto ha cominciato a frequentare importanti ambienti scientifici internazionali. Attualmente è professore al Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston e ha lanciato Mit ReACT (*Refugee Action Hub*) un programma gratuito per far studiare Computer Science e Management ai profughi di talento di tutto il mondo, selezionando ogni anno 150 studenti da più di 20 paesi. Il termine *Action* presente nel programma è un ringraziamento al Collettivo Azione Pace di Torino.

- [7] https://it.wikipedia.org/wiki/Materiale_autoriparante
- [8] Russo S. *I materiali autoriparanti*. Accademia Ligure di Scienze e Lettere, 2018.
- [9] WO 2019/204776, proprietà MIT.
- [10] <https://dmat.co>

Perché le costruzioni degli antichi romani sono durate così a lungo? Il mistero svelato

La longevità delle opere di ingegneria civile degli antichi romani, capaci di essere conservate per millenni, è sempre stata un mistero. Per anni si è creduto che la loro eccezionale resistenza nel tempo fosse dovuta alla presenza di una cenere vulcanica proveniente dalla zona di Pozzuoli vicino Napoli. Questa cenere veniva infatti considerata un ingrediente chiave nella produzione del calcestruzzo, secondo dettagliate formulazioni ampiamente descritte da Vitruvio e Plinio il Vecchio. Esperimenti molto recenti, tuttavia, hanno suggerito una spiegazione alternativa, molto più plausibile, dello straordinario comportamento degli antichi calcestruzzi romani. Questi ultimi non erano prodotti da calce spenta, ma da calce viva cotta ad alte temperature. Durante il processo di miscelazione a caldo, si formano clasti (grumi) di calce viva con un'architettura micro-particellare, che si frantuma facilmente ed è molto reattiva. A contatto con l'acqua piovana avviene una reazione fortemente esotermica con formazione finale di carbonato di calcio, che cristallizza e salda *in situ* le microfessure agendo come un ottimo agente autoriparante.

Parole chiave: antichi romani; durabilità; costruzioni; ceneri pozzolaniche; calce viva; alte temperature; agente autoriparante; prospettive future.

Why Did the Constructions of Ancient Romans Last So Long? The Mystery Revealed

The longevity of the civil engineering works of ancient Romans, capable of being preserved for millennia, has always been a mystery. For years it was believed that the exceptional resistance of the building material used by the Romans was due to the presence of a volcanic ash from the Pozzuoli area near Naples. This ash was in fact considered a key ingredient in the production of concrete, according to detailed formulations widely described by Vitruvius and Pliny the Elder. Very recent experiments, however, have suggested an alternative, much more plausible explanation for the extraordinary behaviour of ancient Roman concretes. The latter were not produced from slaked lime, but from quicklime cooked at high temperatures. During the hot mixing process, quicklime clasts (lumps) are formed with a microparticle architecture, which is easily fractured and very reactive. By contact with rainwater, a highly exothermic reaction occurs with the final formation of calcium carbonate, which crystallizes and welds the microcracks *in situ* acting as an excellent self-healing agent.

Keywords: ancient Romans; longevity; constructions; pozzolanic ash; quicklime, high temperatures; self-healing agent; future perspectives.

STEFANO SCHIAPARELLI

L'archeozoologia nell'era dell'intelligenza artificiale

L'archeozoologia è la disciplina che studia i resti di animali rinvenuti in siti archeologici e mira a ricostruire le strategie di sussistenza, le attività economiche, rituali e sociali dei gruppi umani che li hanno prodotti [1].

Fin dalla preistoria gli animali hanno avuto un ruolo importante e sempre crescente nella vita delle popolazioni delle varie specie di Hominini (*i.e.* nella gerarchia tassonomica questo è il rango di tribù che include gli esseri umani *sensu stricto*; gli Hominini, insieme a gorilla e scimpanzé, fanno parte della sottofamiglia Homininae, a sua volta inclusa nella famiglia Hominidae, che comprende oltre a umani, scimpanzé e gorilla, anche gli oranghi).

Le specie animali che occupavano gli stessi ambienti in cui gravitavano gli Hominini, infatti, sono state sfruttate *in primis* come fonte di cibo, ricavandone carne, grasso, midollo, sangue, latte ecc., ma anche come fonte di materiali, quali ossa, palchi, pelli, pellicce, tendini, lana. Questi materiali grezzi, ognuno con le proprie caratteristiche meccaniche e strutturali, opportunamente trattati, preparati e lavorati, hanno permesso la produzione di una vastissima gamma di attrezzi di uso quotidiano, armi, vesti e protezioni per il corpo, consentendo all'uomo di migliorare costantemente le proprie condizioni di vita e rendere sempre più efficace lo sfruttamento delle risorse disponibili. Oltre agli aspetti legati alla sussistenza e ai possibili materiali da sfruttare, gli animali hanno anche fornito, con il passaggio all'agricoltura, la forza necessaria

a trascinare aratri e a traghettare l'uomo fino all'età moderna, quando questa forza lavoro è stata poi definitivamente affidata alle macchine in tutte le aree geografiche interessate dalla rivoluzione industriale.

Sono quindi ovvie la centralità e l'importanza che le specie animali hanno da sempre avuto nella vita degli Hominini. Questo aspetto è ampiamente testimoniato dall'incredibile quantità di incisioni e pitture rupestri a soggetto animale, nonché dalla frequenza con cui oggetti di uso rituale e simbolico sono stati foggianti con tratti zoomorfi. Importanti esempi europei sono le famose Grotte de Lascaux, nella Francia sud-occidentale, o le grotte di Altamira, nella Spagna settentrionale (risalenti rispettivamente a 17.500 e 18.000-10.000 anni fa), che ospitano alcune tra le pitture rupestri più belle e dettagliate mai rinvenute, ma vi sono esempi altrettanto importanti in tutti i continenti toccati dall'uomo. Tra i moltissimi oggetti che sono stati rinvenuti in scavi archeologici, alcuni tra i più belli e raffinati hanno come soggetto proprio degli animali. È il caso, ad esempio, dei propulsori (*i.e.* strumenti che, allungando la leva del braccio, permettono di scagliare aste di legno



Figura 1. Frammento di propulsore, ottenuto da un palco di renna, rinvenuto nella Grotte d'Enlène nel 1929 e risalente al Magdaleniano Medio (tra 14.000 e 12.500 anni fa). Musée de l'Homme, Parigi (altezza 9 cm, disegno dell'autore).

con punta in osso o pietra, a distanze fino a quattro volte superiori rispetto a quanto possibile con il solo braccio) del Magdaleniano Medio francese. Questi raffigurano, intagliati nell'osso di palchi di renna con una incredibile dovizia di particolari, stambecchi (figura 1) e mammoth (figura 2), vale a dire gli animali presenti in Europa in una fase di cambiamenti climatici caratterizzati da un aumento di temperature, ritiro dei ghiacciai e biomi a tundra e steppa.

In ogni contesto archeologico è quindi normale rinvenire reperti animali la cui classificazione e interpretazione sono affidate all'archeozoologo, che cerca di ottenere informazioni quanto più possibile precise sulle specie presenti, sulle cause della morte e del loro ritrovamento nel contesto archeologico.

Tutte le informazioni desumibili sono strettamente connesse alla corretta identificazione tassonomica, che è il primo passo, e quello più importante, di ogni analisi archeozoologica una volta terminate le operazioni di scavo e pulizia dei reperti.



Figura 2. Altro frammento di propulsore, sempre in palco di renna, rinvenuto nella Grotte de Canecaude nel 1972. Anche questo oggetto risale al Magdaleniano Medio. Deposito archeologico di Canec (altezza 8,7 cm, disegno dell'autore).

Tuttavia, per quanto l'archeozoologia abbia uno scopo ben delineato, questa disciplina ha attraversato profonde modificazioni e cambiamenti di paradigma [2], passando da un approccio meramente descrittivo, in cui la lista di specie animali rinvenute nello scavo non aveva finalità diversa dall'integrare altri dati relativi allo scavo ritenuti più importanti, a una declinazione moderna, più olistica e strutturata, in cui i resti archeozoologici sono usati per verificare precise ipotesi di lavoro inerenti la comprensione dell'economia e dell'ecologia delle popolazioni umane del passato.

Questa nuova "presa di coscienza" è dovuta alla generale evoluzione culturale e conseguente "maturazione" che caratterizza ogni disciplina scientifica, ma è indubbiamente legata, soprattutto negli ultimi anni, anche all'enorme progressione tecnologica che ha consentito, grazie all'acquisizione di nuove metodologie di indagine, di affrontare problematiche sempre più raffinate.

In ogni caso, tutti gli archeozoologi, sia quelli del passato, sia quelli attuali che, a differenza dei primi, hanno a disposizione una molteplicità di strumenti tecnologici d'indagine raffinatissimi, devono basare le proprie analisi sui resti faunistici che, talvolta, risultando frammentari e incompleti, possono non essere facili da studiare.

Molti fattori possono infatti influenzare la completezza del campione finale di resti faunistici rinvenuti in uno scavo archeologico. Tra i più importanti vi sono quelli che hanno portato alla morte dell'animale e ne hanno determinato l'accumulo in un contesto archeologico. In questa fase è l'uomo stesso che spesso attua una "selezione" drastica dei resti, ad esempio macellando gli animali in un luogo diverso da quello di accumulo finale delle ossa, che corrisponderanno quindi solo alle parti del corpo che sono state selezionate per il consumo alimentare. Nel corso dello scavo, quindi, gli scheletri potrebbero essere rinvenuti solo parzialmente integri e magari senza alcun cranio, con una evidente complicazione delle procedure di identificazione delle specie presenti. In questo caso la diagnosi si deve basare su differenze morfologiche, a volte quasi impercettibili, tra ossa che variano poco tra specie e specie. Questo è ad esempio il caso delle capre e delle pecore, *i.e.* le specie domestiche *Capra hircus* Linnaeus 1758 e *Ovis aries* Linnaeus 1758, entrambe appartenenti alla sottofamiglia Caprinae Gray, 1821, ma che, nella letteratura archeozoologica, sono raggruppate in una unica categoria di resti, i "caprovini", a sottolineare le difficoltà

oggettive che si incontrano nella precisa attribuzione specifica di ossa quali quelle metacarpali, metatarsali o degli astragali, tutte estremamente simili dal punto di vista morfologico. Talvolta in letteratura il gruppo viene citato come appartenente a una vera e propria sottofamiglia, *i.e.* i Caprovinae, che tuttavia non ha valore tassonomico riconosciuto [*e.g.* 3].

Molti lavori chiave della letteratura archeozoologica, infatti, sono dedicati alla ricerca di caratteri diagnostici utili, per ogni tipologia di elemento osseo, a discriminare le possibili specie coinvolte [*e.g.* 4].

Molti altri fattori possono ulteriormente influenzare la qualità del campione, quali i processi che determinano la distruzione, il danneggiamento o lo spostamento delle ossa prima del loro seppellimento. Anche qui l'uomo può ovviamente intervenire pesantemente alterando le ossa durante il processo di macellazione o cottura. Durante la fase di seppellimento i resti ossei possono poi essere alterati dalla natura del sedimento in cui sono contenuti, andando incontro a mineralizzazione o decalcificazione a seconda delle condizioni locali. Ulteriori danneggiamenti e alterazioni possono infine avvenire nel caso i resti siano nuovamente esposti agli agenti atmosferici o subiscano ulteriori spostamenti dovuti al trascinarsi ad opera dell'acqua. Sono quindi moltissimi i fattori che possono condizionare il set finale di resti rinvenuti, spesso limitando enormemente le possibilità interpretative.

Tuttavia, in anni recenti, alcune nuove metodologie d'indagine hanno consentito di interpretare correttamente la specie animale da cui sono stati ricavati oggetti e strumenti, anche nel caso in cui le ossa siano state pesantemente modificate dall'uomo attraverso la frammentazione e la levigatura delle stesse.

Questo è il caso, ad esempio, degli strumenti in osso definiti *liscia-toi* ("lissoirs", "smoothers"), *i.e.* specifici utensili in osso, allungati e caratterizzati da una estremità arrotondata che spesso si presenta lucida a causa dello sfregamento, che si pensa possano essere stati utilizzati nella rifinitura delle pelli, ad esempio per lisciarla e renderla in questo modo impermeabile. Questi strumenti, data la necessità di una forma particolare, erano modellati a partire da ossa piatte, quali le costole, spesso quelle di grossi ungulati. Tuttavia, data la trasformazione della materia prima nella forma voluta, le ossa utilizzate risultano così modificate da essere prive di caratteri diagnostici utili, rendendo impossibile determinare, su base esclusivamente morfologica, la specie di appartenenza.

Grazie alla moderna tecnologia è però ora possibile ovviare anche a questo ostacolo, ad esempio utilizzando il *fingerprinting* del collagene, uno dei metodi attualmente tra i più promettenti [5].

Il collagene è una tra le proteine più abbondanti nei vertebrati e ha la caratteristica di essere presente e persistere nelle ossa antiche per migliaia e, in alcuni casi, anche milioni di anni. Nonostante la struttura della molecola sia molto conservata, *i.e.* formata da una tripla elica, la sequenza di amminoacidi che la formano varia da specie a specie, permettendo quindi di determinare l'appartenenza specifica di ossa spesso indistinguibili, quali quelle dei sopracitati "caprovini" [6], di ossa profondamente modificate come quelle dei lisciatoi [7] o, più in generale, semplicemente molto frammentate [8].

Infatti, attraverso la spettrometria di massa a ionizzazione morbida, il collagene, che abbonda nelle ossa, viene convertito in ioni gassosi che sono poi analizzati da uno spettrometro di massa. La specifica composizione amminoacidica viene quindi determinata, risalendo così al genere o alla specie. Il metodo è estremamente affidabile ed è in grado di discriminare differenze anche minime nella tipologia di amminoacidi presenti, come ad esempio nel caso di capra e pecora, specie talmente simili da differire solo per la posizione di due singoli amminoacidi lungo tutta la catena [9].

Anche se le analisi sono di tipo distruttivo, la quantità di campione richiesta da questo metodo, noto come ZooMS (*Zooarcheology by Mass Spectrometry*), è minima, *i.e.* solo 1 mg di osso. Rispetto alla analisi sul DNA, questo metodo è anche meno costoso, aggirandosi intorno ai 5 € per l'esame di un campione [9].

Un altro uso del collagene delle ossa risiede nella possibilità di datare i resti faunistici utilizzando il carbonio dell'amminoacido idrossiprolina (figura 3), che rappresenta in termini di biomassa il 10-14% dello stesso, ottenendo date al radiocarbonio accurate e affidabili.

Questo metodo risulta ottimale nei casi in cui i resti ossei siano contaminati da ^{14}C non coevo agli stessi (informazione spesso non nota a priori) o quando questi siano comunque difficilmente processabili, tanto da essere considerati non databili [11].

Anche se il collagene viene degradato a un tasso molto più lento rispetto a quello del DNA, quest'ultimo rimane uno strumento indispensabile e formidabile per comprendere la filogeografia (*i.e.* la biogeografia che si basa su informazioni genetiche) delle specie, in particolare, in ambito

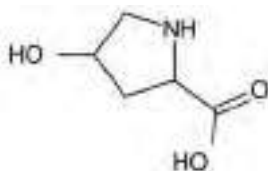


Figura 3. *L'amminoacido idrossiprolina* [da 10].

archeozoologico, di quelle domestiche, permettendo di riconoscere le specie selvatiche da cui queste hanno avuto origine, il luogo iniziale in cui è avvenuto il processo di domesticazione e i successivi pattern di distribuzione a livello globale in seguito alle migrazioni delle popolazioni umane.

Sono infatti moltissimi gli studi che, in questi ultimi anni, si sono concentrati sull'analisi del DNA antico e, in particolare, sul sequenziamento di tutto il genoma (paleogenoma) di specie domestiche e dei loro parenti selvatici (figura 4).

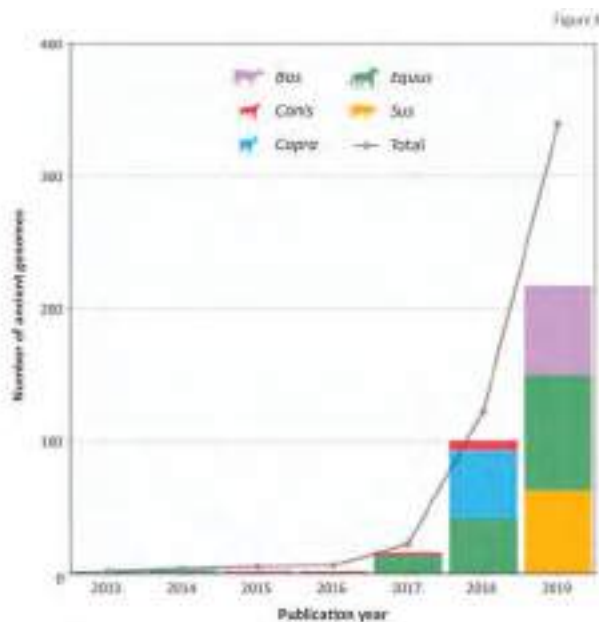


Figura 4. Numero di genomi antichi pubblicati in lavori scientifici; ogni genere è rappresentato da un colore diverso e la linea indica il numero totale di paleogenomi generati (dati aggiornati al 2019, tratti da [12]). Immagine riprodotta con licenza Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Grazie a questi nuovi strumenti è possibile, ad esempio, comprendere la tempistica della domesticazione dell'uro selvatico [13], il *Bos primigenius* Bojanus, 1827, estinto nel 1627, che ha dato origine al toro, *Bos taurus* Linnaeus, 1758, una tra le specie domestiche allevate con più successo sul nostro pianeta, a un livello tale da rappresentare una fonte di preoccupazione per il problema delle emissioni di metano da fermentazione enterica, di cui, da sola, è responsabile per il 75% della produzione globale [14].

A partire dal sequenziamento del genoma intero di un uro britannico di circa 6.750 anni fa, a cui si sono aggiunti per le analisi i genomi di decine di bovini moderni, i ricercatori sono stati in grado di censire migliaia di SNPs (single nucleotide polymorphisms, *i.e.* sostituzioni di singoli nucleotidi in posizioni specifiche del genoma) e ricostruire su scala temporale la sequenza dei complessi eventi di ibridazione che han-

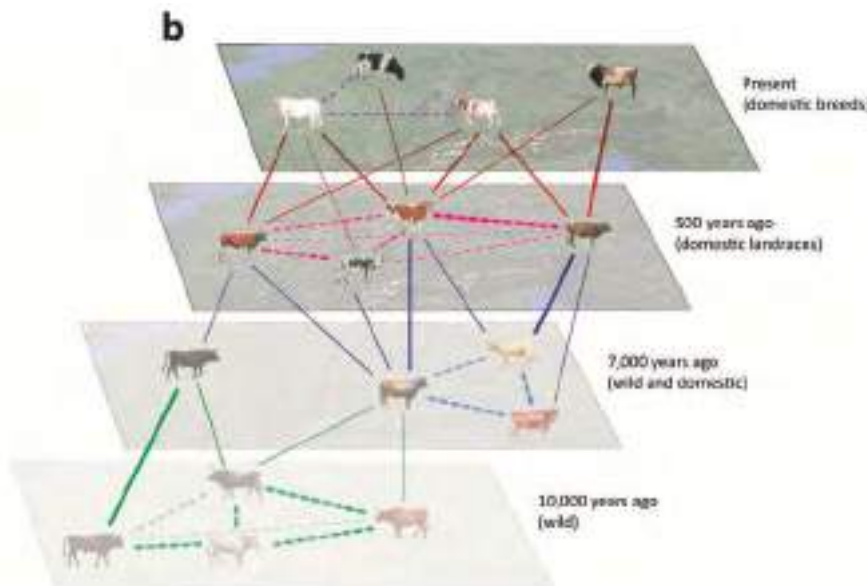


Figura 5. Traiettorie di mescolanza dei geni tra le popolazioni selvatiche di *Bos primigenius* che è stato progressivamente sostituito dalla specie domestica *Bos taurus*. Figura 6b da [12], modificata e riprodotta con licenza Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

no portato alla formazione della specie domestica, passando attraverso le varietà autoctone fino alle razze attuali [13] (figura 5).

Anche se ormai possiamo raggiungere i dettagli analitici di cui sopra, una costante fonte di stupore per l'archeozoologo risiede nella quantità pressoché infinita di usi per i quali sono state impiegate le ossa. La componente minerale delle stesse, formata principalmente da fosfato di calcio in forma di cristalli di idrossiapatite, unitamente ad altri composti, conferisce loro ottime caratteristiche meccaniche di resistenza all'uso. Le ossa possono pertanto definirsi un materiale senza tempo, a buon mercato e disponibile in quantità, a cui gli uomini hanno attinto a piene mani in tutte le epoche.

Si passa dalla trasformazione più semplice di ossa lunghe in punte e punteruoli di ogni forma e dimensione, uno dei reperti tra i più comuni in ambito neolitico (figura 6), a usi molti più raffinati quale quello di

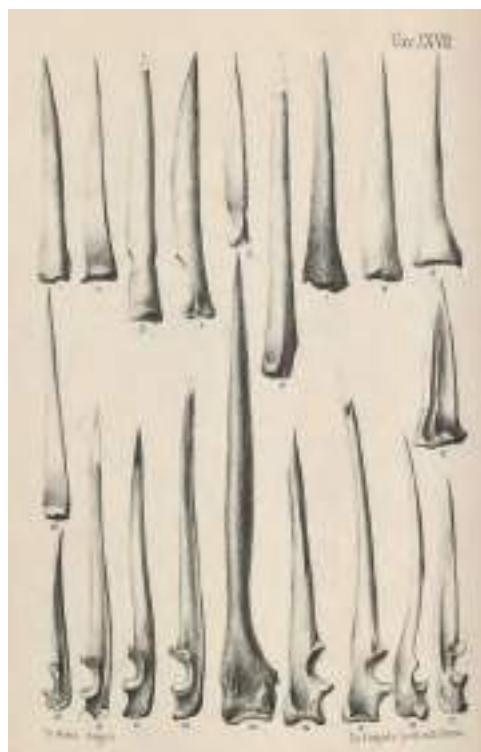


Figura 6. *Punte e punteruoli in osso rinvenuti nella grotta delle Arene Candide e raffigurati in una delle molte tavole di Morelli, 1901 [15].*



Figura 7. Strumento in avorio di mammoth di 35.000 anni fa usato per creare cordame vegetale. Tre fori sono integri, mentre il quarto è incompleto, nella parte destra dell'oggetto (lunghezza 20,4 cm, larghezza 3,6, spessore 1,5 cm; disegno dell'autore).

un bastone in osso di mammoth, risalente a 35.000 anni fa, con 4 fori peculiari, recanti lungo il bordo un netto disegno a spirale (figura 7).

Questo oggetto, appartenente a una tipologia a cui spesso veniva attribuito un semplice significato simbolico, era invece uno strumento vero e proprio che veniva utilizzato per creare cordame vegetale molto robusto, a quattro trefoli [17]. I fori servono a mantenere uno spessore regolare durante la torsione delle fibre dei trefoli, facilitando l'aggiunta di nuovo materiale necessario per la realizzazione degli stessi e, in generale, permette di applicare una regolare e progressiva torsione delle fibre, sia nei trefoli sia nella corda composta dai trefoli. Il processo, ricostruito dagli archeologi, risulta molto efficace e doveva essere svolto da cinque persone in contemporanea (il tutto è visibile in un video [18]). In altri casi la trasformazione delle ossa in oggetti rappresentava una vera e propria attività commerciale, svolta in botteghe specializzate, come quella rinvenuta a Cremona e attiva tra la seconda metà del II secolo a.C. e la prima metà del I secolo a.C, che produceva cerniere in osso a partire da metatarsi di bovino [19].

Un'altra recentissima scoperta ha riguardato lo scavo di un edificio storico di Alkmaar (Olanda), edificato a inizio Seicento su strutture del XV secolo, in cui sono stati portati alla luce pavimenti dove alcune mattonelle sono state sostituite da ossa metacarpali e metatarsali di *Bos taurus*, tagliate con precisione e tutte della stessa lunghezza [20]. Le epifisi delle ossa erano tutte iso-orientate e accuratamente giustapposte a formare una superficie piana allo stesso livello del pavimento (figura 8). Anche se vi sono ancora ipotesi da vagliare, sembrerebbe che in quei punti l'edificio avesse problemi di drenaggio dell'acqua e che le ossa lì posizionate fungessero da vespaio per il drenaggio e lo smaltimento



Figura 8. *Il pavimento di inizio Seicento recentemente rivenuto in un edificio storico olandese, ove epifisi di metacarpi e metatarsi bovini sono stati utilizzati per creare un vespaio drenante per evitare ristagni di acqua (disegno dell'autore da [20]).*

dei liquidi. Un uso molto pratico e fantasioso, ma sicuramente efficace, degli scarti di macellazione!

Nell'era dell'intelligenza artificiale (AI) anche l'archeozoologia, come del resto sta accadendo in tutte le discipline scientifiche, andrà incontro a una nuova trasformazione o nuovo *shift* di paradigma. Uno degli usi più comuni sarà sicuramente quello della classificazione in automatico, dopo sessioni di training, delle immagini relative a forme specifiche, siano esse quelle di ossa o di tracce.

Un esempio recentissimo di applicazione di questo tipo è stata l'interpretazione delle tracce di macellazione che tipicamente si trovano su ossa su cui sono stati utilizzati strumenti taglienti per staccare la carne, tagliare i tendini e disarticolare il corpo dell'animale. Questi studi sono spesso complessi ed erano finora privi di procedure analitiche oggettive in grado, ad esempio, di fornire una stima della probabilità di corretta identificazione di questa tipologia di tracce. Tuttavia, grazie a tecniche di *computer vision* basate sull'uso di reti neurali convoluzionali (CNN), è stato possibile

classificare in automatico, con una accuratezza del 92%, l'origine dei segni rinvenuti sulle ossa, siano essi segni di taglio, tracce lasciate dai denti dei predatori o abrasioni dovute al calpestio delle ossa [21].

Se a questa nuova e potentissima risorsa si aggiunge il mondo digitale si può ben immaginare a quale livello interpretativo e diagnostico si potrà arrivare in un prossimo futuro. È già stata infatti proposta la definizione di "archeozoologia digitale" come branca dell'archeozoologia che utilizza tecnologie digitali [19] quali, ad esempio, il microtomografo (μ CT) e i microscopi in 3D a raggi X, per realizzare copie digitali (*digital twins*) di reperti faunistici. Questi modelli digitali possono facilmente essere condivisi e studiati, semplificando la documentazione di strutture tridimensionali quali le ossa e aprendo le porte alla morfometria geometrica nel 3D.

La vera sfida dell'archeozoologia, nel prossimo futuro, sarà costruire database di modelli 3D di reperti ossei e faunistici, recenti e preistorici, sempre più completi e di libero accesso secondo i principi FAIR (*i.e.* i dati dovrebbero essere "Findable", "Accessible", "Interoperable", "Reusable", [22]), seguendo metodologie di lavoro standardizzate, validate e condivise tra ricercatori.

L'intelligenza artificiale potrà quindi essere utilizzata e addestrata sui materiali di queste collezioni digitali di riferimento, offrendo in questo modo la possibilità di effettuare comparazioni, classificazioni e interpretazioni sempre più precise, abbracciando anche, di pari passo con la progressione nella disponibilità di nuove risorse digitali, analisi riguardanti tutte le epoche e aree geografiche sempre più ampie.

Bibliografia

- [1] De Grossi Mazzorin J. *Archeozoologia. Lo studio dei reati animali in archeozoologia*. Roma-Bari: Laterza; 2008.
- [2] Clarke D.L. *Models and paradigms in contemporary archaeology*. Models in archaeology, 1972;1:60.
- [3] <https://www.mammaldiversity.org/>
- [4] Prummel W., Frisch, H. *A guide for the distinction of species, sex and body side in bones of sheep and goat*. Journal of Archaeological Science 1986;13(6):567-577.

- [5] Buckley M. *Zooarchaeology by Mass Spectrometry (ZooMS) Collagen Fingerprinting for the Species Identification of Archaeological Bone Fragments*. In: Giovas C., LeFebvre M. (eds.). *Zooarchaeology in Practice*. Cham: Springer; 2018. pp. 227-247.
- [6] Birch S.E.P., Scheu A., Buckley M., Çakırlar C. *Combined osteomorphological, isotopic, aDNA, and ZooMS analyses of sheep and goat remains from Neolithic Ulucak, Turkey*. *Archaeological and Anthropological Sciences* 2019;11:1669-1681.
- [7] Martisius N.L., Welker F., Dogandžić T., Grote M.N., Rendu W., Sinet-Mathiot V., Wilcke A., McPherron S.J.P., Soressi M., Steele T.E. *Non-destructive ZooMS identification reveals strategic bone tool raw material selection by Neandertals*. *Scientific reports* 2020;10(1):746.
- [8] Morin E., Oldfield E.M., Baković M., Bordes J.G., Castel J.C., Crevecoeur I., Rougier H., Monnier G., Tostevin G., Buckley M. (2023). *A double-blind comparison of morphological and collagen fingerprinting (ZooMS) methods of skeletal identifications from Paleolithic contexts*. *Scientific reports* 2023;13(1):18825.
- [9] Buckley M., Kansa S.W., Howard S., Campbell S., Thomas-Oates J., Collins M. *Distinguishing between archaeological sheep and goat bones using a single collagen peptide*. *Journal of Archaeological Science* 2010;37:13-20.
- [10] <https://it.wikipedia.org/wiki/Idrossiprolina>
- [11] Marom A., McCullagh J.S., Higham T.F., Hedges R.E. *Hydroxyproline dating: experiments on the ¹⁴C analysis of contaminated and low-collagen bones*. *Radiocarbon* 2013;55(2):698-708.
- [12] McHugo G.P., Dover M.J., MacHugh D.E. *Unlocking the origins and biology of domestic animals using ancient DNA and paleogenomics*. *BMC biology* 2019;17:1-20.
- [13] Park S.D., Magee D.A., McGettigan P.A., Teasdale M.D., Edwards C.J., Lohan A.J., Murphy A., Braud M., Donoghue M.T., Liu Y., Chamberlain A.T., Rue-Albrecht K., Schroeder S., Spillane C., Tai S., Bradley D.G., Sonstegard T.S., Loftus B.J., MacHugh D.E. *Genome sequencing of the extinct Eurasian wild aurochs, *Bos primigenius*, illuminates the phylogeography and evolution of cattle*. *Genome biology* 2015;16:1-15.
- [14] Della Rosa M.M., Waghorn G.C., Vibart R.E., Jonker A. *An assessment of global ruminant methane-emission measurements shows bias relative to contributions of farmed species, populations and among continents*. *Animal Production Science* 2022;63(3):201-212.
- [15] Morelli N. *Iconografia della preistoria ligustica*. Atti, Università di Genova. Tipografia R. Istituto Sordomuti; 1901.

- [16] Andreatta P., Bianchi C., Di Martino S. *Cremona, Piazza Marconi: una bottega specializzata nella produzione di oggetti in osso e palco*. Atti 8° Convegno Nazionale di Archeozoologia 2015:165-170.
- [17] Conard N.J., Rots V. *Rope making in the Aurignacian of Central Europe more than 35,000 years ago*. Science Advances 2024;10(5):eadh5217.
- [18] https://www.science.org/doi/suppl/10.1126/sciadv.adh5217/suppl_file/sciadv.adh5217_movie_s1.zip
- [19] <https://archaeologymag.com/2024/12/floor-made-from-bones-found-in-the-netherlands/>
- [20] Domínguez-Rodrigo M., Cifuentes-Alcobendas G., Jiménez-García B., Abellán N., Pizarro-Monzo M., Baquedano E. *Artificial intelligence provides greater accuracy in the classification of modern and ancient bone surface modifications*. Sci Rep 2020;10:18862.
- [21] Spyrou A., Nobles G., Hadjikoumis A., Evin A., Hulme-Beaman A., Çakırlar C., Ameen C., Loucas N., Nikita E., Hanot P., de Boer N.M., Avgousti A., Zohar I., May H., Rehren T. *Digital Zooarchaeology: State of the art, challenges, prospects and synergies*. Journal of Archaeological Science: Reports 2022;45:103588.
- [22] Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J., Appleton G., Axton M., Baak A., Blomberg N., Boiten J.-W., da Silva Santos L.B., Bourne P.E., Bouwman J., Brookes A.J., Clark T., Crosas M., Dillo I., Dumon O., Edmunds S., Evelo C.T., Finkers R., Gonzalez-Beltran A., Gray A.J.G., Groth P., Goble C., Grethe J.S., Heringa J., 't Hoen P.A.C., Hooft R., Kuhn T., Kok R., Kok J., Lusher S.J., Martone M.E., Mons A., Packer A.L., Persson B., Rocca-Serra P., Roos M., van Schaik R., Sansone S.-A., Schultes E., Sengstag T., Slater T., Strawn G., Swertz M.A., Thompson M., van der Lei J., van Mulligen E., Velterop J., Waagmeester A., Wittenburg P., Wolstencroft K., Zhao, J., Mons B. *The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*. Scientific data 2016;3(1):1-9.

L'archeozoologia nell'era dell'intelligenza artificiale

L'archeozoologia è la disciplina che studia i resti animali rinvenuti nei siti archeologici e si propone di ricostruire le strategie di sussistenza e le attività economiche, rituali e sociali dei gruppi umani che li hanno prodotti. Questa disciplina è andata incontro a un cambio di paradigma, passando da un approccio iniziale tipicamente descrittivo a una scienza matura, in grado di rispondere a precise ipotesi di lavoro. Grazie alle moderne tecniche analitiche, come il *fingerprinting* del collagene o le analisi del DNA, i ricercatori dispongono ora di formidabili strumenti di indagine. Il progresso delle tecniche di digi-

talizzazione consente inoltre la documentazione 3D di strutture complesse quali le ossa. Questo insieme di informazioni uniche, se opportunamente standardizzato secondo metodologie condivise, può essere analizzato da programmi di intelligenza artificiale per l'attribuzione automatica delle ossa rinvenute a una determinata specie o l'interpretazione delle tracce presenti sulle stesse, eliminando così la soggettività nelle interpretazioni.

Parole chiave: archeozoologia; cambio di paradigma; tecniche analitiche; intelligenza artificiale.

Archaeozoology in the Age of Artificial Intelligence

Archaeozoology is the discipline that studies the remains of animals found in archaeological sites and aims at reconstructing the subsistence strategies and the economic, ritual and social activities of the human groups that produced them. This discipline has undergone profound modifications and paradigm shifts, moving from a typically descriptive approach to a mature, hypothesis-driven science. Thanks to modern investigation techniques, such as collagen fingerprinting or DNA analyses, researchers have now formidable investigation tools at their disposal. The progress of digitalization techniques also enables the 3D documentation of complex structures as bones. This body of unique information, if appropriately standardized according to shared methodologies, can be analyzed by artificial intelligence programs for automatic species determination and the detection of specific morphological patterns, eliminating subjectivity in interpretations.

Keywords: archaeozoology; paradigm shift; analytical techniques; artificial intelligence.

STEFANO SOLARINO

*Dalla penna al pennino.
I terremoti prima del sismografo*

La distribuzione spaziale e temporale dei terremoti riveste un'importanza cruciale nella valutazione della pericolosità sismica, cioè della stima dello scuotimento sismico su una determinata area. Le faglie, strutture geologiche responsabili dei terremoti, sono spesso situate in profondità nel terreno e in alcuni casi individuate solo a seguito del verificarsi di un evento sismico. Esse possono rimanere inattive per lunghi periodi, talvolta anche secoli. Inoltre, quelle di dimensioni maggiori possono attivarsi solo in alcune parti o lungo tutta la loro lunghezza, provocando una grande varietà di scenari ed eventi di magnitudo anche molto diversa a seconda della porzione di faglia interessata. Un'analisi della sismicità limitata a pochi anni può fornire un quadro della "vita" delle faglie, in termini di intervallo tra gli eventi sismici ed energia rilasciata, incompleto. Estendere quanto più possibile nel tempo l'analisi dei terremoti assicura di definire con maggiore affidabilità e completezza la "pericolosità" sismica di una certa area.

Tuttavia, la sismometria moderna inizia solo negli anni Sessanta del secolo scorso. Infatti, nonostante i numerosi tentativi, lungo quasi duemila anni, di costruire strumenti in grado di registrare terremoti e conservare i relativi sismogrammi, molti apparati costruiti prima di quel periodo non hanno ottenuto i risultati prefissati. E comunque nei numerosi casi, soprattutto a partire dalla fine dell'Ottocento, in cui gli strumenti hanno funzionato, solo una piccola parte delle loro registrazioni è stata rintracciata e archiviata.

Se basassimo le nostre analisi di sismicità solo sui dati a partire dalla seconda metà del Novecento avremmo un quadro della sismicità della penisola italiana molto diverso da quello reale. Nella figura 1 sono riportati i terremoti di magnitudo superiore a 5 [1-2] avvenuti a partire dal 1960. In base a quella carta, la Liguria non risulta mai essere stata interessata da terremoti “forti” mentre per altri settori della penisola, come la costa adriatica settentrionale, la Toscana e il Lazio, il quadro della sismicità è profondamente diverso rispetto alle conoscenze attuali. Perfino la Sicilia e la Calabria risultano poco sismiche.

Si pone dunque il problema di ricostruire la sismicità per periodi nei quali non esistevano, o comunque non erano sufficientemente affidabili, strumenti sismici o per i quali le registrazioni sono andate



Figura 1. *Terremoti con magnitudo superiore a 5.0 in Italia dal 1960 al 2022. Fonte: CPTI15 [1-2]. I colori viola e nero indicano magnitudo superiori a 6.0.*

perdute. In questo articolo, dopo una veloce ricostruzione della storia degli apparati sismici, vengono descritte le tecniche con le quali è possibile riconoscere e catalogare terremoti anche per periodi nei quali non esisteva strumentazione sismica.

La storia degli strumenti sismici inizia nel 132 d.C. quando Zhang Heng, un eclettico scienziato, poeta e astronomo cinese perfezionò il primo sismoscopio. Come suggerisce il nome dello strumento, il suo scopo era confermare il verificarsi di un terremoto, senza avere la possibilità di registrarlo. Si presentava come un vaso di metallo con otto draghi posizionati nelle direzioni principali della rosa dei venti (figura 2). Ogni drago aveva in bocca una pallina di metallo. Alla base dello strumento vi erano otto rane posizionate in corrispondenza dei draghi. Le rane potevano raccogliere, attraverso la bocca aperta, le palline che cadevano dal drago soprastante. All'interno del vaso era sistemato un pendolo. L'eventuale scuotimento del terreno faceva cadere le palline sistemate lungo la direzione di passaggio delle onde sismiche, confermando il verificarsi di un terremoto e fornendo rudimentali informazioni sulla possibile direzione di provenienza delle onde sismiche e, quindi, del quadrante dell'evento sismico.



Figura 2. *Replica del sismoscopio di Zhang Heng. Fotografia di Kowloonese.*
https://it.wikipedia.org/wiki/Sismoscopio_di_Zhang_Heng#/media/File:East-HanSeismograph.JPG

Secondo alcuni studi, lo strumento avrebbe registrato almeno un terremoto. Nel 138 d.C., un anno prima della morte dello scienziato, una pallina cadde senza che si percepisse alcuna attività sismica. Convinto della capacità del proprio strumento, Zhang Heng dichiarò che si era verificato un terremoto che, in base alla direzione di caduta della pallina, doveva essere avvenuto a ovest della capitale Luoyang, dove lo strumento operava. A causa della mancanza di evidenze, la dichiarazione dello scienziato cinese fu trascurata fino a quando, qualche giorno dopo, un messo proveniente da Gansu confermò che quell'area, situata a circa 600 chilometri di distanza, era stata in effetti colpita da un terremoto.

La storia degli strumenti sismici continua con lunghi intervalli di pressoché totale inattività alternati a periodi di grande fermento in cui vengono costruiti strumenti dalle caratteristiche tecniche talvolta mirabili. La collaborazione tra scienziati, confermata da documenti in cui vengono scambiate idee, opinioni e soluzioni, attesta la volontà di costruire sismometri e sismografi sempre più efficienti. Purtroppo non è facile, in un breve articolo, ricostruire una storia complessa e articolata come quella della sismometria a meno di non risultare incompleta e infedele. Il rischio è quello di non tenere in debito conto le geniali intuizioni dei sismologi che nel corso dei secoli si sono cimentati nella costruzione di strumenti. Un resoconto esaustivo sull'evoluzione degli apparati può essere trovato nei volumi dedicati agli strumenti storici [3-5], da cui risulta evidente il grande impulso che gli scienziati italiani hanno dato alla strumentazione sismica, soprattutto nell'Ottocento e nei primi anni del Novecento. Volendo riassumere, nel periodo tra la seconda metà dell'Ottocento e oggi gli strumenti sono stati trasformati da pesanti apparati meccanici, con pesi fino a 1.000 chilogrammi, a strumenti di peso inferiore a 1 kg, completamente elettronici e in grado di registrare in un campo di frequenze molto ampio terremoti da molto deboli a molto forti con la stessa accuratezza. Le registrazioni, prima effettuate su fogli di carta affumicata e fissata con apposite lacche, si sono evolute in archivi digitali facilmente riproducibili e condivisi. In poco più di un secolo gli strumenti sono passati da completamente meccanici ad elettrici, poi elettronici e infine digitali.

Al progredire della capacità degli strumenti di rilevare terremoti via via più deboli corrisponde un'evoluzione del concetto di rete sismica. A partire dalla seconda metà dell'Ottocento gli strumenti sismici

trovavano collocazione all'interno degli osservatori meteorologici, dove contribuivano ad allargare lo spettro dello studio dei fenomeni naturali. La figura 3 mostra il numero di strumenti operanti in Italia nel periodo 1890-1950 [6]. In pratica, anche a causa delle dimensioni importanti delle apparecchiature e della necessità di costante manutenzione, risultava più semplice trovare spazio in un locale in grado di ospitarli che non nei luoghi dove i terremoti avevano origine. Inoltre, questo consentiva di controllare il funzionamento dello strumento e analizzarne le registrazioni, attività che non si sarebbero potute svolgere da remoto.

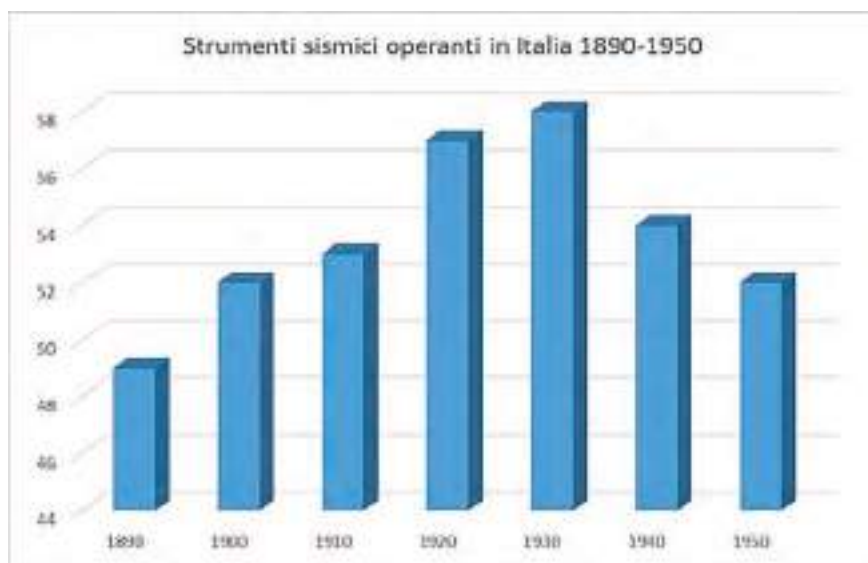


Figura 3. *Numero di strumenti sismici operanti negli osservatori italiani dal 1890 al 1950.*

A partire dagli anni Sessanta nasce così il concetto di rete sismica, in cui gli strumenti sono posizionati strategicamente sul territorio, ma il controllo è centralizzato. Si rende necessario trasferire le informazioni da questi luoghi decentralizzati a un centro di elaborazione dati. Anche in questo caso si osserva una rapida evoluzione dalla raccolta e trasporto di registrazioni su carta, al trasferimento del segnale tramite linea telefonica, alla digitalizzazione e trasferimento tramite modem fino alla

trasmissione satellitare. Un grande impulso all'installazione di stazioni sismiche viene dal controllo dei test sugli ordigni nucleari. Un'esplosione causa onde sismiche, che vengono rilevate anche a grande distanza. Nonostante quella del controllo nucleare sia una motivazione poco nobile, ha influito sullo sviluppo tecnologico degli apparati, alla ricerca di una maggiore "sensibilità". Possiamo datare "l'anno" zero della sismometria moderna alla seconda metà del Novecento, quindi possiamo ragionevolmente contare su un periodo di osservazioni strumentali dei terremoti lungo circa 70 anni.

Come già accennato, solo un'analisi della distribuzione di eventi sismici estesa nel tempo assicura di non aver "perso" terremoti importanti per una certa area e 70 anni sono certamente pochi. È quindi necessario usare metodi alternativi alla sismologia strumentale che compensino il limitato intervallo temporale, e questi sono basati sull'osservazione ragionata degli effetti del terremoto. I danni dipendono dalla distanza delle località rispetto all'epicentro. Ricostruendo la loro severità per ogni comune, è possibile ottenere mappe con le quali restringere l'area (idealmente un punto) di maggiore entità e quindi, in prima approssimazione, definire l'epicentro del sisma. Vengono utilizzate informazioni indirette basate sulla percezione, sui danni ai costruiti e sulle conseguenze sull'ambiente contenute in fonti documentali non necessariamente legate all'evento sismico. La sismologia storica ha infatti sviluppato tecniche in grado di valutare l'intensità della scossa in un certo luogo utilizzando stampe, fotografie, atti notarili, articoli di giornale, descrizioni scientifiche o ogni altro tipo di documenti in cui siano contenuti, talvolta in maniera insospettabile, informazioni sul sisma. Si tratta di tecniche complesse che richiedono conoscenze nei campi della letteratura, della geografia, della storia. Le ricerche storiche hanno mostrato che alcuni aspetti che apparentemente nulla hanno a che fare con la sismologia, si rivelano invece utili nella valutazione di un sisma. Per esempio, una stampa di F. Maggiol, realizzata nel 1564 a seguito del terremoto che colpì il nizzardo, mostra una ricognizione precisa e utilissima dello stato dei danni in tutta l'area a cavallo dell'attuale confine italo-francese. La presenza di pesci sulla superficie del mare è determinante per ipotizzare che al terremoto fosse associato un maremoto. In alcune descrizioni di eventi sismici ad opera di sacerdoti, essi ricordano di avere recitato un'*Ave Maria* o un *Credo* durante l'evento sismico. Un

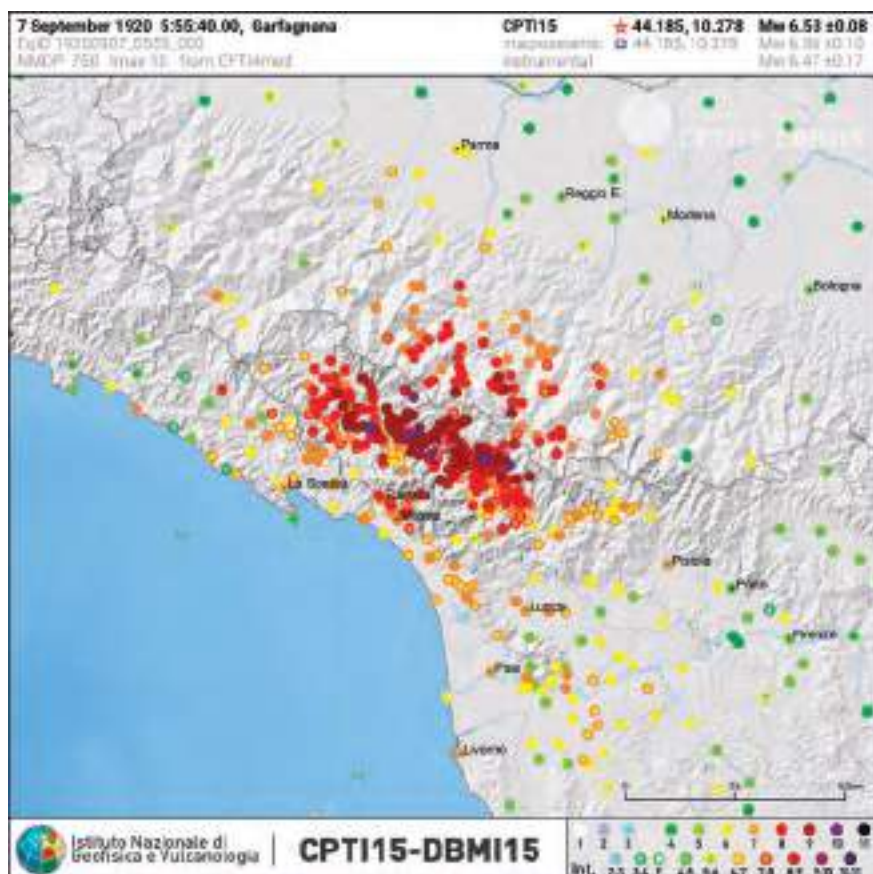


Figura 4. Esempio di localizzazione basata su fonti storiche. A ogni comune per il quale è disponibile una descrizione degli effetti del sisma viene attribuito un valore di intensità. I valori più elevati indicano una maggiore vicinanza all'epicentro (a meno di effetti di amplificazione di sito). La stella mostra la posizione assegnata al terremoto.

particolare tipo di magnitudo, detta di durata, è basata sulla lunghezza temporale dello scuotimento. Più un terremoto dura, più è forte. Valutando il tempo necessario a recitare queste preghiere è stato possibile quantificare la durata dello scuotimento e quindi, in maniera indiretta, la magnitudo dell'evento.

Una volta estratte le informazioni, per ogni località a cui esse si riferiscono viene valutato l'effetto del terremoto attribuendo un valore basato su una scala di intensità. Tra le scale più utilizzate ci sono la MCS,

Mercalli-Cancani-Sieberg, e la EMS, European Macroseismic Scale, un'evoluzione della scala di intensità tradizionale nella quale i danni sono attribuiti in funzione del tipo di struttura e dei materiali usati per la costruzione. La valutazione ottenuta è corretta al netto di eventuali effetti di sito, ovvero fattori geologici e geografici (come la composizione e la struttura dei terreni e la quota altimetrica), che possono amplificare le onde sismiche e causare danni maggiori. In tali casi, le informazioni devono essere rivalutate alla luce dei fenomeni di amplificazione. Le intensità così ottenute disegnano una mappa su cui isolare con una



Figura 5. *Terremoti con magnitudo superiore a 5.0 in Italia dal 1000 al 2022.*
Fonte: CPTI15[1-2].

costruzione grafica la zona di massimo danneggiamento e quindi, in prima approssimazione, l'epicentro oppure utilizzare un algoritmo in grado di calcolare le coordinate della probabile origine del sisma.

Il ricco patrimonio culturale della nostra nazione ha permesso di ricostruire la storia sismica a partire dall'anno 1000. Il quadro della sismicità risultante restituisce un'immagine più completa che non quella ottenuta con la sola sismicità strumentale. Il confronto tra le figure 5 e 1 mostra infatti importanti differenze in molti settori geografici della penisola.

I cataloghi vengono utilizzati per disegnare le carte di pericolosità sismica. Si tratta di mappe in cui è indicato lo scuotimento a cui potrebbe essere soggetta una data area considerando un certo valore di probabilità che gli eventi contenuti nel catalogo si verifichino nuovamente in un dato intervallo di tempo. Le mappe sono costruite in funzione di parametri che rispondono alle diverse esigenze costruttive degli ingegneri civili (legate a fattori tipo per quanti anni sarà utilizzato il fabbricato; a quale ruolo è destinato, per esempio ospedale, caserma, aeroporto, casa di civile abitazione; qual è lo scopo per cui viene costruito, per esempio rimanere integro, subire danni senza compromettere la vita di chi lo abita e così via). In particolare, la normativa sismica indica come mappa di riferimento quella calcolata con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Questa mappa è quella a cui ci si riferisce spesso come "la" mappa di pericolosità ed è riportata nella figura 6.

Siccome tutti i punti della mappa sono stati calcolati nelle stesse condizioni e utilizzando gli stessi cataloghi, questa rappresentazione ha il vantaggio di permettere il confronto tra diversi settori della penisola in termini di scuotimento atteso. Edifici costruiti in alcune parti della Sicilia o lungo l'Appennino dovranno essere soggetti a regole più restringenti che non quelli costruiti in Sardegna, dove il basso numero di terremoti (almeno allo stato attuale delle conoscenze) suggerisce una scarsa o nulla pericolosità sismica. Occorre ricordare che le conseguenze di un terremoto (il Rischio) sono rappresentate dal prodotto di tre fattori, ovvero la Pericolosità, la Vulnerabilità e l'Esposto vulnerabile ($R=P \times V \times E$). Non è naturalmente possibile intervenire sul primo parametro, che dipende dalla natura geologica del luogo, ma si possono diminuire gli altri valori (vulnerabilità ed esposto) con adeguate scelte ingegneristiche e urbanistiche. Lo sanno bene i giapponesi, che pur vivendo in un territorio ad altissima pericolosità, spesso

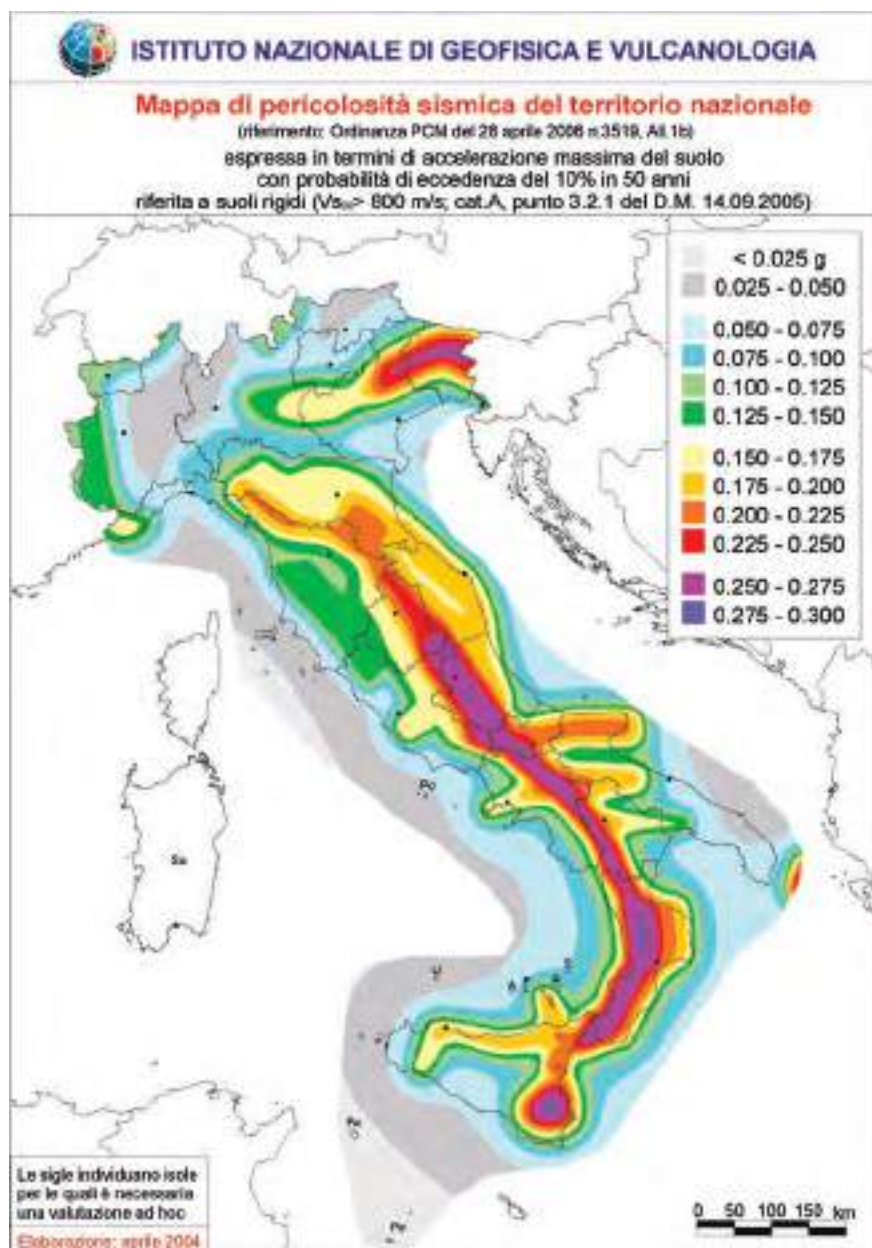


Figura 6. *Mapa di pericolosità sismica per la penisola italiana con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suoli rigidi. I diversi colori indicano valori di scuotimento crescenti da grigio a viola.*

subiscono danni molto contenuti anche in caso di terremoti di elevate magnitudo. Le carte di pericolosità aiutano a identificare le aree di maggior cautela.

I cataloghi di sismicità italiani sono tra i più completi, se non i più completi, al mondo. Tuttavia, per quanto la loro compilazione abbia seguito regole scrupolose, queste non hanno potuto colmare le lacune insite nel metodo con cui i parametri dei terremoti sono stati ottenuti. La più evidente è mostrata nel grafico (figura 7) della distribuzione degli eventi per il catalogo CPTI15 [1-2] in funzione dell'anno in cui sono avvenuti e della magnitudo. La figura mostra una certa completezza per i tre secoli precedenti e si “sgrana” quanto più si va indietro nel tempo.

Ciò è una conseguenza della difficoltà di reperire documenti antichi, perduti a causa di fenomeni naturali, dello spostamento di archivi o a seguito di guerre e incendi. La difficoltà nel rintracciare informazioni si riflette anche sulla qualità delle localizzazioni. Per alcuni terremoti esistono solo poche fonti, e ciò aumenta l'indeterminazione nella loro posizione; in altri casi le fonti non sono omogeneamente distribuite,

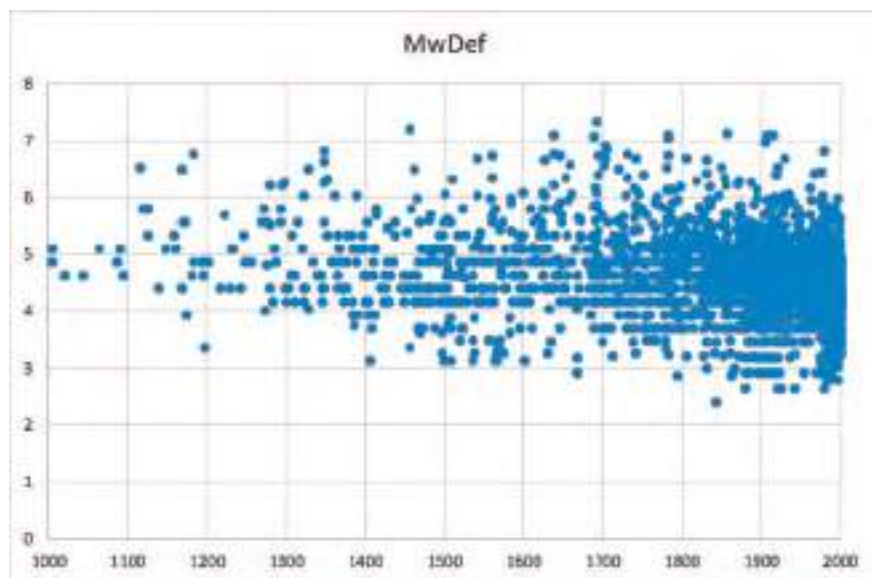


Figura 7. *Distribuzione dei terremoti del catalogo CPTI15[1-2] in funzione dell'anno di occorrenza e della magnitudo. Si nota una “completezza” delle informazioni solo per gli ultimi 300 anni.*

“forzando” la posizione del terremoto. In altri casi ancora gli effetti di sito o una disomogeneità delle fonti raggruppa intensità molto diverse nella stessa area, creando difficoltà e soggettività nell’interpretazione del dato. La figura 8 mostra alcuni di questi casi.

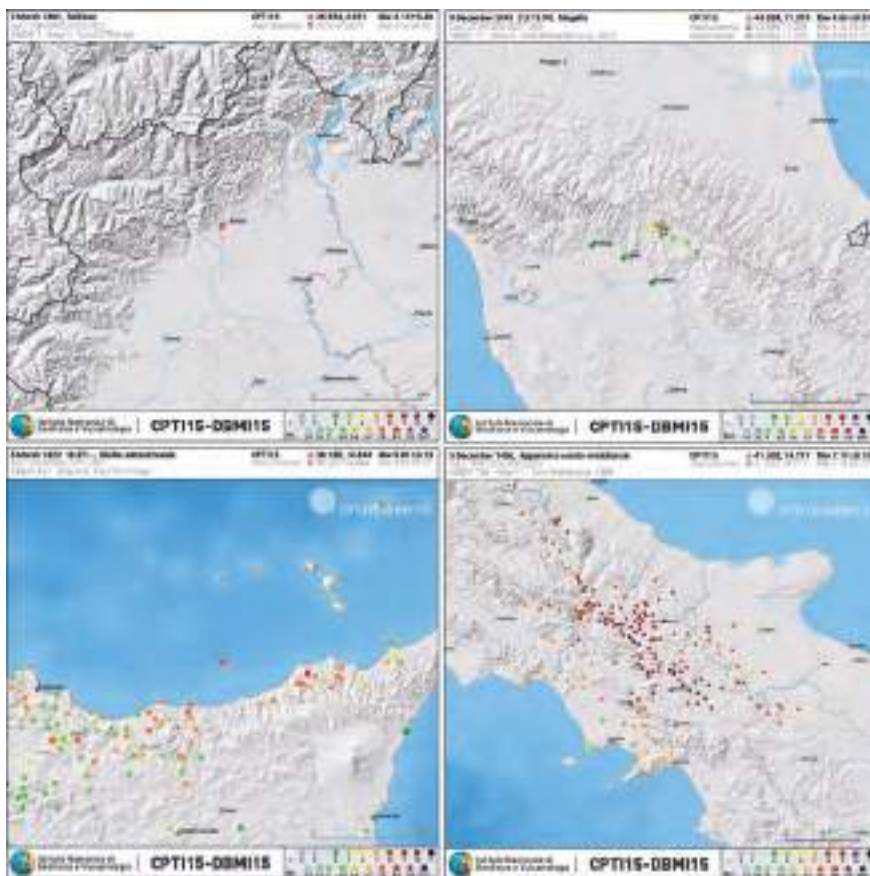


Figura 8. Quattro casi di attribuzione incerta dell’epicentro. In alto a sinistra, la localizzazione coincide con l’unico dato; in alto a destra, i pochi punti disponibili sono nei soli quadranti sud e ovest: l’assenza di informazioni negli altri quadranti può essere dovuta sia a un’effettiva assenza di effetti sui comuni a nord ed est sia all’impossibilità di reperire informazioni; in basso a sinistra, la posizione del terremoto è in mare mentre, come atteso, i dati disponibili sono a terra; in basso a destra, nello stesso settore sono presenti punti con intensità molto diverse e l’intensità massima è presente più volte. Queste distribuzioni di dati inficiano la affidabilità delle localizzazioni, con errore di entità variabile.

Una localizzazione strumentale è gravata da un'incertezza di qualche centinaio di metri nei casi più favorevoli, mentre l'errore associato alla localizzazione con dati storici è dell'ordine della decina di chilometri. Di questo naturalmente si dovrebbe tenere conto, per esempio pesando i parametri dei terremoti nel catalogo in funzione del modo e del numero di informazioni con cui sono stati ottenuti.

In conclusione, è evidente che l'utilizzo di informazioni storiche ha colmato il vuoto del periodo non coperto dai dati strumentali, permettendo di conoscere la sismicità della penisola con maggiore dettaglio. I cataloghi ottenuti trovano applicazione in molti studi sismologici di cui la stesura delle mappe di pericolosità rappresenta l'eccellenza, se non altro per le importanti conseguenze che il suo utilizzo ha sulla società. Gli stessi cataloghi sono però anche utili a conoscere, o meglio ipotizzare, l'estensione areale delle faglie e in taluni casi addirittura la loro presenza [7], le informazioni relative alla ripetitività di eventi sismici in alcune zone, la potenzialità in termini di magnitudo di aree che sono magari quiescenti da molti decenni. Un aspetto talvolta trascurato è il fatto che con le localizzazioni storiche non è possibile valutare la profondità a cui è avvenuto il sisma. Ciò vuol dire che le magnitudo potrebbero essere calcolate in difetto, corrispondendo, in qualunque modo siano ottenute, a uno scenario di danno in cui le distanze rispetto a un dato luogo sono quelle relative all'epicentro e non all'ipocentro. Infatti, a parità di danno, una maggiore distanza implica una maggiore energia.

Riprendendo ancora il titolo di questo articolo, la penna ha preceduto e sostituito il pennino, ma a scapito dell'accuratezza della posizione e della magnitudo dei terremoti, non comparabili con quella delle moderne valutazioni strumentali. Sarebbe utile utilizzare le registrazioni sismiche dell'ultimo secolo attraverso opportuni accorgimenti in grado di valorizzare tali dati. Un progetto a carattere europeo (https://storing.ingv.it/es_web/index.htm) ha condotto una raccolta ragionata di sismogrammi storici conservati negli archivi degli osservatori. Alcuni risultati ottenuti [6, 8-9] con questi dati mostrano la potenzialità degli stessi, e suggeriscono un maggior ricorso a queste informazioni, se non altro a supporto, correzione o eventuale conferma delle localizzazioni ottenute con informazioni documentali storiche.

Bibliografia

- [1] Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. *The Italian earthquake catalogue CPTI15*. Bulletin of Earthquake Engineering 2022;18(7):2953-2984.
- [2] Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)*, versione 4.0 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) 2022.
- [3] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. *Two hundred years of seismic instruments in Italy 1731-1940*. A cura di Graziano Ferrari. Bologna, SGA. 1992:156.
- [4] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. *Gli strumenti sismici storici. Italia e contesto europeo*. A cura di Graziano Ferrari. Bologna, SGA. 1990:198.
- [5] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. *Tromometri avvisatori sismografi. Osservazioni e teorie dal 1850 al 1880*. A cura di Graziano Ferrari. Bologna, SGA. 1991:140.
- [6] Solarino S. *The role of instrumental versus macroseismic locations for earthquakes of the last century: a discussion based on the seismicity of the North-Western Apennines (Italy)*. Annals of Geophysics 2005;48(6):923-936.
- [7] Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M., Boschi E. *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. Tectonophysics 2008;453(1-4):20-43.
- [8] Eva E., Pettenati F., Solarino S., Sirovich L. *The focal mechanism of the 7 September 1920, Mw 6.5 earthquake: insights into the seismotectonics of the Lunigiana-Garfagnana area, Tuscany, Italy*. Geophysical Journal International 2022;228(3):1465-1477.
- [9] Solarino S., Eva E. *Il terremoto del settembre 1924 in Mar Ligure e la sua relazione con il recente evento sismico a Bargagli (Genova, settembre 2022) / The earthquake of September 1924 in the Ligurian Sea and its relationship with the recent seismic event in Bargagli (Genoa, Italy, September 2022)*. Quaderni di Geofisica 2023;184:7-19.

Dalla penna al pennino. I terremoti prima del sismografo

La distribuzione degli eventi sismici sul territorio rappresenta un elemento cruciale per la creazione delle carte di pericolosità, che mostrano le aree a rischio di terremoti futuri e la loro potenziale intensità. L'affidabilità di queste mappe è strettamente legata alla precisione e completezza dell'analisi sismica, in cui il tempo, inteso come l'intervallo

temporale di riferimento, gioca un ruolo essenziale. Infatti, i terremoti tendono a ripetersi anche dopo lunghi intervalli, che possono variare da decenni a secoli. Pertanto, uno studio limitato a un breve arco temporale potrebbe risultare insufficiente, fornendo un quadro parziale della sismicità. Per ovviare a questo problema, le ricerche sismologiche utilizzano metodologie che, sebbene presentino alcune limitazioni, consentono di ricostruire eventi passati anche in assenza di strumenti sismici, avvalendosi di fonti indirette come documenti storici, opere d'arte, fotografie e atti notarili. Questo articolo analizza criticamente i vantaggi della sismologia storica.

Parole chiave: sismografo; terremoti; studi sismologici; pericolosità sismica.

From the Quill to the Nib. Earthquakes Before the Seismograph

The spatial distribution of seismic events is essential for creating hazard maps, which indicate areas susceptible to future earthquakes and their potential magnitudes. The reliability of these maps is closely tied to the accuracy and comprehensiveness of seismic analysis, where the temporal aspect – defined as the reference time interval for the analysis – plays a crucial role. Earthquakes often recur after extended periods, which can range from decades to centuries. Consequently, a study confined to a short time frame may prove inadequate, offering only a partial view of seismic activity. To address this issue, seismological research employs methodologies that, despite certain limitations, enable the reconstruction of past events even in the absence of seismic instruments, utilizing indirect sources such as historical documents, artworks, photographs, and notarial records. This article critically examines the principles of historical seismology.

Keywords: seismograph; earthquake; seismological studies; seismic hazard.

MAURO TAIUTI

*Dalle profondità dello spazio agli abissi del mare:
il lungo viaggio dei neutrini*

La moderna astronomia si è arricchita negli ultimi decenni di nuovi strumenti di osservazione in grado di rilevare varie forme di radiazioni: luce, onde radio, infrarosso, raggi gamma, onde gravitazionali. Gli anni recenti hanno visto un eccezionale progresso nella conoscenza del nostro universo. In particolare, la misura del transito di onde gravitazionali generate dalla coalescenza di buchi neri o di stelle a neutroni ha permesso, mediante la distribuzione tempestiva dell'allerta a tutti i sistemi di osservazione astronomica, l'osservazione in diretta degli effetti sulla materia di questi fenomeni considerati come gli eventi più catastrofici. L'osservazione congiunta dell'emissione di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica (radiazione gamma, X, ultravioletta, visibile, infrarossa, microonde e radio) permette di verificare le nostre conoscenze della fisica in condizioni estreme non riproducibili in laboratorio. Tutto ciò è possibile perché gli interferometri utilizzati nella rilevazione delle onde gravitazionali sono omnidirezionali, mentre la maggior parte degli altri osservatori astronomici sono costruiti per osservare ridotte sezioni del nostro universo. L'uso congiunto di tre interferometri permette di localizzare in tempo reale sulla volta celeste la posizione della sorgente e ciò permette quindi di puntare rapidamente i vari telescopi nella direzione di arrivo dell'onda gravitazionale e osservare l'evoluzione del processo che l'ha generata.

A questo insieme di osservabili si sta aggiungendo la rivelazione della più elusiva particella finora nota: il neutrino. Dotato di massa pic-

colissima e privo di carica elettrica, il neutrino interagisce debolmente con la materia e può attraversare, indisturbato, enormi spessori di materia. La sua produzione è associata a moltissimi processi nucleari ed è praticamente l'unico strumento per poter studiare direttamente i processi che avvengono all'interno del nostro sole e in generale per poter studiare oggetti celesti vicini al centro della nostra galassia dal momento che la polvere interstellare assorbe la maggior parte della radiazione elettromagnetica proveniente da esso.

Il neutrino è stato postulato nel 1930 dal fisico teorico Wolfgang Pauli per spiegare il comportamento degli elettroni emessi nei decadimenti beta e nel 1932 Enrico Fermi ne definì il nome. Essendo privo di carica elettrica non risente del campo magnetico galattico e pertanto muovendosi in modo rettilineo a una velocità prossima a quella della luce la sua osservazione può essere utilizzata come le onde gravitazionali per localizzare tempestivamente fenomeni astrofisici caratterizzati dall'emissione di enormi quantità di energia.

L'osservazione del neutrino avviene in due passaggi, anzitutto il neutrino, interagendo con la materia nei pressi del rivelatore o all'interno dello stesso, mediante un processo fisico noto come Interazione Debole, si trasforma in un elettrone o in tipi di elettrone "pesante" meglio noti come leptone mu o leptone tau. Successivamente queste particelle cariche, rilasciando la propria energia cinetica nel rivelatore, permettono di determinare le proprietà cinematiche del neutrino originario.

In acqua le particelle cariche generano impulsi elettromagnetici che, grazie alla trasparenza del mezzo, possono propagarsi per diverse decine di metri. Questi impulsi, meglio noti come Effetto Cherenkov, vengono prodotti in quanto le particelle cariche in questione (elettroni e leptoni mu) hanno in acqua una velocità superiore a quella della luce e inoltre, in analogia al bang supersonico in acustica, si dispongono sulla superficie di un cono al cui vertice è posta la particella e il cui asse è la traiettoria della medesima.

Lo studio del neutrino ha coinvolto da diversi decenni una vasta comunità di fisici. Generalmente i rivelatori per neutrini devono essere molto grandi e devono essere realizzati in luoghi schermati ai raggi cosmici in modo da ridurre il più possibile la presenza di segnali spuri nel rivelatore. Diversi laboratori sotterranei sono stati realizzati sfruttando miniere come la Mizumi in Giappone che ospita SuperKamiokande, e

la Creighton in Canada che ha ospitato SNO (Sudbury Neutrino Observatory), importante per lo studio dei neutrini solari, oppure gallerie autostradali come quella che in Italia ospita il laboratorio del Gran Sasso dove sono in funzione diversi rivelatori dedicati allo studio del neutrino. A questi si stanno aggiungendo i telescopi per neutrini localizzati in laboratori posizionati sotto la calotta polare e negli abissi marini.

I neutrini grazie alla loro natura fisica sono in grado di portare informazioni non ottenibili con le altre radiazioni, diventando così uno strumento fondamentale per la comprensione dei meccanismi che regolano il funzionamento delle stelle e di altri corpi celesti. A causa della natura elusiva dei neutrini, i telescopi progettati per osservarli sono vere sfide tecnologiche.

Per poter osservare i neutrini di altissima energia provenienti dal nostro universo sono necessari rivelatori troppo grandi per poter essere ospitati in un laboratorio sotterraneo; pertanto, l'unica possibilità è di utilizzare grandi volumi di acqua sia in forma solida (i ghiacci dell'Antartide dove si trova il rivelatore IceCube) che in forma liquida (il Mediterraneo dove si trova il rivelatore KM3NeT o il lago Baikal dove si trova il rivelatore Baikal-GVD). Per poter schermare il rivelatore dai raggi cosmici, come nel caso dei laboratori sotterranei, vengono scelte località dove la colonna di ghiaccio o di acqua soprastante il rivelatore raggiunge spessori di almeno 1000 m. La schermatura è necessaria perché il rivelatore è attraversato da leptoni μ prodotti in abbondanza dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e l'effetto di uno spessore di acqua di 1000 m è di ridurre di quasi un fattore 10 il flusso di leptoni μ che lo attraversa.

KM3NeT è un'infrastruttura di ricerca che ospita i telescopi per neutrini di prossima generazione ARCA ed ORCA. KM3NeT nasce da una collaborazione internazionale costituita da oltre 300 scienziate e scienziati, ingegneri, tecnici e studentesse e studenti di 68 istituzioni da 21 paesi di tutto il mondo. L'Italia contribuisce in modo determinante tramite l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e le Università; in particolare i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN gestiscono l'infrastruttura di KM3NeT/ARCA.

Il rivelatore KM3NeT/ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) è dedicato principalmente allo studio dei neutrini di più alta energia e delle loro sorgenti nell'universo. Si trova a

3450 m di profondità, a circa 80 km al largo della costa di Portopalo di Capo Passero, in Sicilia. Le sue unità di rivelazione (Detection Unit, DU) alte 700 m sono ancorate al fondale marino e posizionate a circa 100 m di distanza l'una dall'altra. Ogni DU è dotata di 18 moduli ottici digitali (Digital Optical Module, DOM), ciascuno contenente 31 fotomoltiplicatori (*photomultiplier*). Nella sua configurazione finale, ARCA comprenderà 230 DU. I dati raccolti vengono trasmessi tramite un cavo sottomarino alla stazione di terra dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN.

Il rivelatore KM3NeT/ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) è ottimizzato per studiare le proprietà fondamentali dei neutrini. Si trova a una profondità di 2450 m, a circa 40 km dalla costa di Tolone, Francia. Sarà composto da 115 DU, ciascuna alta 200 m, e distanziate fra loro di 20 m. I dati raccolti da ORCA vengono inviati alla stazione di terra di La Seyne-sur-Mer.

Una volta completato, i telescopi di KM3NeT avranno un volume sensibile pari a un chilometro cubico di acqua cristallina. KM3NeT sarà inoltre in grado di misurare l'energia e la direzione di arrivo del neutrino, quest'ultima con una risoluzione angolare pari a 0.1° più che sufficiente per associare i neutrini osservati con le sorgenti note di raggi gamma. Per avere un'idea della risoluzione si consideri che la Luna piena occupa un campo di vista pari a 0.5° .

KM3NeT è stato progettato in modo da permetterne il funzionamento anche con un numero ridotto di DU, pertanto al momento, sebbene sia stata installata solamente circa il 20% della strumentazione finale, il telescopio è perfettamente operativo e in grado di rilevare i neutrini.

Grazie a questa caratteristica, il 13 febbraio 2023 è stato possibile osservare con il rivelatore ARCA uno straordinario evento, compatibile con un neutrino dell'energia stimata di circa 220 PeV (220×10^{15} elettronvolt o 220 milioni di miliardi di elettronvolt). Questo evento, denominato KM3-230213A, è il neutrino più energetico mai osservato e fornisce la prima prova che nell'universo vengono prodotti neutrini di energie così elevate.

Situato sui fondali più profondi del Mediterraneo, KM3NeT non solo aprirà una nuova finestra sul nostro universo, ma contribuirà anche allo studio delle proprietà delle particelle più elusive meglio note come neutrini. Con il telescopio ARCA si cercheranno i neutrini emessi da

lontane fonti astrofisiche come supernove, sorgenti di raggi gamma o collisioni di stelle. Il telescopio ORCA studierà le proprietà dei neutrini sfruttando i neutrini generati nell'atmosfera terrestre. Una matrice tridimensionale di migliaia di sensori ottici rileverà la debole luce nelle profondità marine prodotta dalle particelle cariche provenienti da collisioni dei neutrini con la materia. La struttura ospiterà inoltre la strumentazione per le scienze della Terra e del mare per il monitoraggio a lungo termine e on-line degli ambienti di acque profonde e del fondale marino a profondità di diversi chilometri.

Dalle profondità dello spazio agli abissi del mare: il lungo viaggio dei neutrini

L'osservazione dei neutrini è uno strumento potente per poter studiare il nostro universo. Per fare questo è necessario costruire specifici telescopi che sfruttano le proprietà di grandi masse di acqua di segnalare il passaggio di questa radiazione. Il telescopio KM3NeT in costruzione nel Mediterraneo assieme al telescopio ICeCube già operativo in Antartide premetterà di aggiungere un nuovo capitolo alla conoscenza del nostro universo.

Parole chiave: neutrino; raggi cosmici; fisica astroparticellare.

From the Depths of Space to the Depths of the Sea: The Long Journey of Neutrinos

The detection of high-energy neutrinos is a powerful tool for studying our universe. To do this, it is necessary to build specific telescopes made of large masses of water to track the passage of this radiation. The KM3NeT telescope under construction in the Mediterranean together with the ICeCube telescope already operating in Antarctica will allow us to add a new chapter to the knowledge of our universe.

Keywords: neutrino; cosmic rays; astroparticle physics.

FORUM SUL CAMBIAMENTO CLIMATICO

10 ottobre 2024

24 ottobre 2024

14 novembre 2024

10 ottobre 2024
Sala Conferenze dell'Accademia
Mario Pestarino – Presidente dell'Accademia
Presentazione del programma

Cambiamento climatico e biodiversità – 10 ottobre 2024

Moderatore: **Mario Pestarino** – Accademico
Antonello Pasini – Fisico del clima – CNR, Roma
La crisi climatica recente: una sfida per tutti noi
Ferdinando Boero – Presidente Fondazione Anton Dohrn, Napoli
Come funziona il Mondo
Alessandro Chiarucci – BiGeA – Università di Bologna
Sfide per la conservazione della biodiversità nell'Antropocene

Fra centro e periferia: politiche del territorio – 24 ottobre 2024

Moderatrice: **Barbara Cavalletti** – Accademica, Università di Genova
Alfonso Bellini – Geologo – Studio Associato Bellini, Genova
Il debito ambientale
Dario Fornara – Direttore di Ricerca del Gruppo Davines – EROC, Parma
Come accelerare la transizione ecologica: sinergie tra agricoltura biologica rigenerativa e cosmetica
Daniela Minetti – Regione Liguria, Settore politiche della natura e delle aree interne, protette e marine, parchi e biodiversità
La dimensione territoriale locale fra qualità ambientale e competitività: progetti e casi di studio

Gestione delle acque – 14 novembre 2024

Moderatore: **Mario Pestarino** – Accademico
Giorgio Roth – Preside della Scuola Politecnica, DICCA, Università di Genova
Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse
Benedetto Rocchi – DISEI, Università di Firenze
Interdipendenze tra sistema economico e risorse idriche
Elisabetta Trovatore – Direttore scientifico e Commissario straordinario ARPAL
Monitoraggio e modellistica dell'Agenzia regionale per la Protezione dell'Ambiente a servizio della Gestione integrata delle acque in un contesto di Cambiamento climatico

Con il patrocinio di



Genova
Palazzo
Ducale



Con il contributo di



MARIO PESTARINO

Prefazione

L'Accademia Ligure di Scienze e Lettere in questi ultimi anni ha organizzato numerose conferenze e seminari su temi drammaticamente attuali quali la transizione ecologica ed energetica che si sono svolti nel 2023 e 2024. In questo anno si è ritenuto particolarmente importante rivolgere la nostra attenzione sul cambiamento climatico e sulle rilevanti ricadute sociali, economiche e biologiche che questo determina su tutti gli organismi viventi del nostro pianeta.

Dal XIX secolo, con la rivoluzione industriale, sono state immesse nell'atmosfera milioni di tonnellate di anidride carbonica e altri gas che hanno determinato un effetto serra antropico con il conseguente riscaldamento climatico. L'ONU, con l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), ha dimostrato che tale riscaldamento è stato innescato dalle attività dell'uomo. La temperatura media della terra è aumentata di 0,98 °C e la tendenza osservata dal 2000 a oggi porta a ritenere che possa salire sino a +1,5 °C tra il 2030 e il 2050. Gli effetti del riscaldamento globale hanno determinato una diminuzione del ghiaccio marino artico in media del 12,85% ogni dieci anni, inoltre le maree costiere hanno aumentato in media di 3,3 mm il livello del mare all'anno a partire dal 1870. Lo sviluppo di vasti incendi ha visto una consistente intensificazione, come in Australia nel 2019. Negli ultimi trent'anni gli eventi meteorologici estremi, come i cicloni e le alluvioni, sono aumentati notevolmente sia nel numero che nella loro devastante forza. Anche se il clima ha sempre subito mutazioni nel

corso della storia del nostro pianeta, non si può non parlare di crisi climatica perché sia a livello degli insediamenti urbani che del sistema produttivo la frequenza e l'intensità di questi cambiamenti hanno subito un'accelerazione rilevante.

Una singola specie vivente, *Homo sapiens*, con l'uso sempre maggiore di combustibili fossili per produrre energia, con la deforestazione e l'agricoltura intensiva, ha determinato un aumento significativo dei gas serra nell'atmosfera, intensificando l'effetto serra e causando un incremento della temperatura globale. Di conseguenza si assiste a spostamenti di numerose specie di animali e vegetali con rilevanti e negative ricadute sugli ecosistemi, determinando l'interruzione di intere catene alimentari e relazioni ecologiche che si traducono in seri rischi di sopravvivenza di molte specie, costrette a migrare verso climi più favorevoli. Ad esempio, l'assorbimento di CO₂ da parte degli oceani determina un'acidificazione delle acque, con conseguenti danni irreparabili sugli organismi come molluschi, coralli e plancton, fondamentali per gli ecosistemi marini. Questi impatti si ripercuotono anche sull'uomo, influenzando risorse vitali come acqua, cibo e la sicurezza di molte comunità e di conseguenza la salute pubblica, aumentando i rischi di patologie legate al calore e di problemi respiratori a causa dell'inquinamento atmosferico.

È quindi improrogabile attuare azioni che permettano di mitigare la crisi climatica quali la riduzione delle emissioni di gas serra attraverso l'uso di energie rinnovabili, il miglioramento dell'efficienza energetica, la riforestazione e politiche economiche sostenibili.

Per questo motivo l'Accademia Ligure di Scienze e Lettere ha ritenuto importante organizzare un *Forum sul Cambiamento Climatico* articolato in tre sessioni dedicate rispettivamente al "Cambiamento climatico e biodiversità", ai rapporti "Fra centro e periferia: politiche del territorio" e alla "Gestione delle acque". A queste hanno partecipato scienziati e ricercatori che, nell'ambito delle loro specifiche competenze scientifiche, economiche, gestionali e sociali, hanno presentato dati e proposte che possono essere utili non soltanto agli addetti ai lavori ma a tutte le istituzioni scientifiche, politiche e amministrative.

Da queste relazioni risulta più che mai urgente individuare interventi che possano mitigare gli effetti negativi della crisi climatica che colpisce l'intero nostro pianeta.

Voglio ricordare che tutte le conferenze sono state registrate e inserite nel canale YouTube dell'Accademia, accessibile liberamente (<https://www.youtube.com/@ALSL1798/videos>).

Infine, desidero ringraziare tutto il Consiglio Direttivo e lo staff tecnico dell'Accademia per il notevole supporto fornito. Un particolare ringraziamento va al Presidente Emerito dell'Accademia prof. Vincenzo Lorenzelli che non mi ha mai fatto mancare il suo incoraggiamento e i suoi preziosi consigli.

Devo altresì ringraziare il Ministero della Cultura e la Fondazione Carige per il loro significativo contributo, e la Regione Liguria, il Comune di Genova, l'Università di Genova e la Fondazione Palazzo Ducale per il loro gradito patrocinio.

ALFONSO BELLINI

Il debito ambientale

1. *Introduzione*

Nel corso della mia attività professionale (sono un geologo) mi sono dovuto occupare di svariati “accidenti” che avevano come protagonista la Natura e in particolare di alluvioni e frane che hanno colpito il nostro territorio, provocando notevoli danni e parecchie vittime. Nello studio dei singoli casi ho potuto appurare che in quei fenomeni dannosi aveva sempre avuto un ruolo importante, se non esclusivo, l’azione dell’uomo, oppure la sua inazione davanti a situazioni che stavano evolvendo in eventi nocivi. Tale ruolo negativo si è manifestato soprattutto (ma non solo) nella seconda metà del Novecento, quando le esigenze del cosiddetto sviluppo erano prevalenti rispetto alla salvaguardia dell’ambiente. Il territorio è stato devastato solo per un tornaconto economico, in un sistema generalizzato che spesso comprendeva anche le diverse amministrazioni in veste di complici di quei delitti ambientali. In tale modo le attività disordinate sono state le cause di parecchi disastri, verificatisi quando la Natura ha cercato di recuperare i propri equilibri.

Nel quadro complessivo della pessima gestione territoriale perseguita per svariati decenni abbiamo accumulato, di fatto, un “debito ambientale” che oggi, periodicamente, siamo chiamati a pagare.

Nell’area genovese, visto che non siamo in una zona sismica né ospitiamo vulcani, le tematiche vulnerate sono essenzialmente due: quella idraulica (poiché i nostri corsi d’acqua – maltrattati – non sono in grado di far defluire le piene) e quella geologica, per il problema

delle frane, verso le quali non abbiamo ancora imparato ad applicare un'azione preventiva.

2. *Le causali*

Richiamando gli eventi alluvionali più recenti avvenuti in Liguria, è possibile individuare le causali – che possono avere incidenza diversa da bacino a bacino – che concorrono a concretizzare e a configurare un fenomeno alluvionale (figura 1).

Vediamo con ordine:

- a) *Stato di abbandono del territorio* – Soprattutto nelle parti medio-alte dei bacini, un tempo “usate e vissute”, si è registrato un diffuso stato di abbandono. Versanti prima terrazzati e coltivati, ad esempio, ora si ritrovano dissestati con muri e muretti sconnessi e/o crollati; estese aree boschive, non più curate, si sono inselvatichite; non rimane attiva la rete di gestione delle acque superficiali che ora scaricano lungo il versante con effetti di ruscellamento e di erosione. Tutto ciò porta alla mobilitazione di materiali (terre e pietrame) che scendono sino all'alveo del corso d'acqua ingombrandolo e arricchendo le sue piene di trasporto solido.

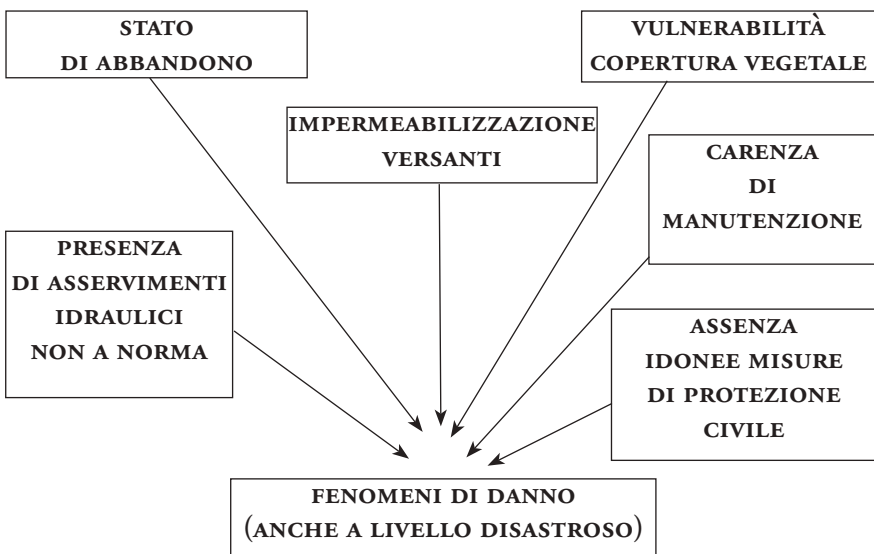


Figura 1. *Le causali che portano all'alluvione.*

- b) *Vulnerabilità della copertura vegetale* – Tale causale è connessa con la precedente. Infatti, per il loro abbandono le aree boschive sono soggette a fitopatologie che ne minano la consistenza. Sotto l'azione delle piogge, ramaglie e tronchi, anche in notevole quantità, sono trascinati sino all'alveo di fondo valle, per essere poi trasportati verso mare come materiale flottante in "copertura" della piena, andando a esaltare le criticità delle opere idrauliche del tratto terminale.
- c) *Impermeabilizzazione dei versanti* – A Genova, ma non solo, l'espansione urbanistica ha sovente risalito i versanti, trasformando aree estese da permeabili a impermeabili; terrazze agricole e bosco sono stati sostituiti da strade ed edifici. Tanto per comprendere l'entità del fenomeno si può citare, come esempio, il bacino del rio Fereggiano la cui superficie di area urbanizzata è passata dal 4% di fine Ottocento al 20% nel 2000: quindi la meccanica di discesa delle acque di pioggia lungo i versanti sino al rivo di fondo valle è decisamente mutata. Prima le acque permeavano il terreno e arrivavano al corso d'acqua in modo graduale e rallentato, adesso una buona porzione di tali acque scende direttamente e velocemente, incidendo sulla dinamica della piena. Spesso si osserva un reticolo stradale usato dalle acque di pioggia, del tutto artificiale, che si sovrappone al reticolo idrografico naturale, calpestato e soffocato dall'urbanizzazione.
- d) *Carenza di manutenzione* – Il tratto terminale dei corsi d'acqua liguri, e particolarmente di quelli genovesi, induce, per il brusco abbassamento della pendenza rispetto alle zone più a monte, il deposito di materiali trascinati dalle piene. È la vita stessa del corso d'acqua, al di là delle piene di elevata intensità, che porta a tale fenomeno. Come pure è naturale – e inevitabile – che su tali materiali si sviluppi in modo spontaneo una vegetazione erbacea, arbustiva e anche arborea. Ne deriva che in assenza di una programmata azione di periodica manutenzione – prescritta in tutti i Piani di Bacino – che preveda l'asporto "stagionale" di detti ingombri d'alveo, l'officiosità delle opere idrauliche, già in carenza strutturale, tenda ulteriormente a ridursi, incrementando il loro grado di rischio. Purtroppo tale manutenzione periodica non è stata applicata nella misura dovuta e ci si è limitati a interventi sporadici e localizzati senza criteri programmati.

- e) *Presenza di asservimenti idraulici non a norma* – Le opere idrauliche realizzate dall'uomo, vuoi per difetto d'origine, vuoi per le crescenti esigenze del corso d'acqua che vede incrementate l'entità e la natura delle sue piene per effetto delle causali sopra descritte, presentano spesso, come ci dicono i Piani di Bacino, carenze di capacità per il deflusso verso mare. Tali carenze divengono quanto mai pericolose per quei rivi (la quasi totalità di quelli liguri) che nel loro tratto terminale si trovano ad attraversare settori urbanizzati, con edifici che fanno da argini al corso d'acqua e con attraversamenti palesemente insufficienti.

Sono tantissime le opere non a norma, che costituiscono altrettanti punti di rischio, suscettibili di provocare esondazioni.

Le opere a maggior rischio sono le tombinature, spesso realizzate senza specifiche e indispensabili analisi idrauliche e frequentemente usate per accompagnare lo sviluppo urbanistico dei centri abitati. Sovente tali tombinature manifestano la loro insufficienza idraulica, rivelando la presenza di quei corsi d'acqua che erano come scomparsi: è il caso di una dozzina di rivi "nascosti" al di sotto del Centro Storico genovese, nonché di molti altri, sia nel ponente che nel levante cittadino, che sono stati messi sottoterra per gran parte del loro percorso.

Il reticolo idrografico che caratterizza il territorio del comune di Genova è costituito da circa cento bacini idrografici di dimensione generalmente ridotta: solo sette hanno superficie superiore a 10 kmq, Polcevera e Bisagno in testa. Tutti gli altri, seppure con bacino esiguo, conservano per altro il diritto di convogliare le acque di competenza e di scaricarle a mare. L'uomo spesso ha reso difficile tale semplice compito. Ne deriva che anche quei rivi con piccoli bacini sono stati e sono in grado di procurare fenomeni di danno: basti considerare che nei 44 anni successivi all'alluvione-madre del 1970 nel territorio comunale genovese vi sono stati 11 eventi alluvionali e il Bisagno ha partecipato solo a tre di questi, tutti gli altri sono stati causati dai rivi minori.

Occorre anche considerare che le esigenze dei corsi d'acqua sono mutate nel tempo per le variazioni intervenute nei rispettivi bacini. Ecco che allora le tombinature, specie quelle storiche o comunque secolari, manifestano la loro sopraggiunta insufficienza con eventi

di danno spesso inediti e inaspettati. Se ne sono avuti vari esempi nel corso dei fenomeni alluvionali del 4 novembre 2011, quando diversi rivi minori “nascosti” del levante genovese si sono “rivelati” con importanti fenomeni dannosi: rio Rovare, rio Noce, rio del Parroco, rio Puggia, rio Chiappeto. Tutti rivi coperti per il 90% del loro sviluppo.

Per dare una dimensione al problema dei rivi “nascosti”, basta ricordare che nel territorio comunale genovese i tratti di corsi d’acqua tombinati raggiungono la lunghezza complessiva di 150 km. Ed è appena il caso di osservare che la manutenzione ordinaria, che abbiamo visto carente nei rivi all’aperto, è totalmente assente nei tratti coperti.

- f) *Assenza di idonee misure di Protezione Civile* – In ragione della constatata presenza attiva delle causali sopra richiamate, configuranti una condizione di pericolosità e di vulnerabilità con inevitabile rischio per la pubblica incolumità, è indispensabile adottare idonee misure – da applicarsi nella previsione di un evento – tese a conseguire lo scopo principale della Protezione Civile, ossia la salvaguardia delle vite umane. Avere e applicare un adeguato Piano di Protezione Civile non impedisce certo il fenomeno alluvionale, ma ne riduce l’entità dei danni e può escludere le vittime. Anche questo, facendo riferimento alle alluvioni subite dalla città di Genova negli ultimi trent’anni (prima la Protezione Civile non “esisteva” in Italia), purtroppo non è avvenuto. Solo di recente qualcosa è migliorato, ma sino all’alluvione del 2011 il Piano Comunale di Protezione Civile non era in grado di proteggere adeguatamente i cittadini genovesi. Per non parlare degli altri comuni della Liguria, la maggior parte dei quali non lo aveva neppure adottato, malgrado le sollecitazioni ricevute dalla Regione.

Il Piano di Protezione Civile, in ottica idrogeologica, deve necessariamente contenere la definizione e la delimitazione geografica degli scenari di rischio, anche attraverso una descrizione sintetica, accompagnata da cartografia esplicativa, dei possibili effetti sulla popolazione e/o sulle infrastrutture presenti in un territorio a seguito di eventi meteorologici straordinari (piene, inondazioni). In sostanza deve evidenziare e descrivere aree caratterizzate da importanti livelli di pericolosità (legata

ai fenomeni attesi) e, allo stesso tempo, dalla presenza di elementi vulnerabili e/o strategici.

Solo in questo modo risulta possibile pianificare le azioni da intraprendere nelle situazioni di evento critico, secondo il livello di dettaglio dallo stesso richiesto. Tali azioni, che in linea generale possono essere le stesse per aree diverse, devono essere necessariamente specifiche per ogni area a rischio affinché siano efficaci. Ad esempio, il Piano deve indicare esattamente dove devono essere chiuse le strade potenzialmente allagabili, come saranno chiuse, chi se ne occuperà, il personale responsabile, la messa in funzione di itinerari alternativi predefiniti.

È importante sottolineare che il Piano deve essere definito sulla base di quanto il territorio comunale esige in tema di tipi e aree di rischio. Il Piano deve costituire una sorta di “abito su misura”, che va bene per quel comune ma non per un altro, in quanto ogni territorio ha le proprie peculiarità e le proprie fragilità, quindi, sono o possono essere differenti le cautele operative che devono essere adottate.

È opportuno richiamare che la normativa in tema di Protezione Civile per eventi alluvionali prevede, sin dalla sua istituzione, che vengano attuate tre fasi consequenziali e distinte: la previsione dell'evento, le azioni preventive da mettere in campo con la finalità precipua di salvaguardare la vita umana e di ridurre i possibili danni e, infine, le operazioni di soccorso ad evento in corso e/o avvenuto, con lo scopo di ripristinare la normalità.

La prima fase non compete al Comune, ma alla Regione e in Liguria, dal 2015, all'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPAL), che emette le allerte, distinte per livello di gravità, con un congruo anticipo, in base alle quali viene attivato il Piano Comunale di Emergenza.

Invece, per la seconda fase, quella degli interventi preventivi, spesso ci siamo comportati in modo incerto e carente. Occorre ricordare che detti interventi, da realizzarsi in tempi brevi se non brevissimi, non sono certo di tipo strutturale, ma operazioni cautelari da mettere subito in opera in funzione delle prevedibili reazioni del territorio comunale rispetto ai fenomeni annunciati e attesi. Se correttamente applicati, tali attività hanno un'importante funzione di salvaguardia; tra l'altro hanno il pregio di essere praticamente a costo zero. In particolare, in caso di un'allerta di tipo idrogeologico, oltre a quelli di routine quali la chiu-

sura dei parchi e dei cimiteri, possono (o devono) essere considerate le seguenti azioni:

- preannunciare una possibile emergenza, per altro già avviata, tramite auto con altoparlanti o con altre modalità, con diffusione delle norme di autotutela; tale allertamento deve essere esteso a tutta la popolazione della città;
- predisporre la chiusura delle strade che normalmente si allagano, per poi chiuderle a tutti gli effetti quando il problema si sta concretizzando, individuando percorsi alternativi;
- organizzare l'avviso porta a porta e, nel caso, la dislocazione di persone anziane e di poca salute, già individuate tramite i Servizi di Assistenza, residenti in edifici a piano terra o nei seminterrati situati nei pressi di organismi del reticolo idrografico a rischio;
- provvedere nei confronti dei cittadini più fragili per eccellenza, ossia i minori, deliberando la chiusura delle scuole di ogni ordine e grado presenti in città.
- invitare espressamente i cittadini a togliere le loro auto dalle zone che, per esperienze precedenti, possono venire allagate, indicando pure se possibile i luoghi ove parcheggiarle. Per comprendere quanto quest'ultima disposizione possa risultare utile è sufficiente ricordare che, nelle recenti alluvioni genovesi, sono state danneggiate più di mille auto.

L'opportunità e la necessità di tali azioni preventive derivano anche dal fatto che in tutti noi non è molto diffusa quella che possiamo chiamare la cultura ambientale di comunità.

Siamo in prevalenza individualisti e se abbiamo predisposto un certo programma di nostro comodo o interesse, ben difficilmente siamo disposti a rinunciarvi nell'ottica della previsione di un evento dannoso che potrebbe anche non succedere, almeno nella gravità temuta.

Per la terza fase, quella del soccorso, possiamo insegnare a chiunque come ci si debba comportare. Sono ormai molti i casi in cui, a fronte di un evento disastroso di qualsiasi genere, siamo stati operativi e concreti, spesso addirittura con comportamenti eroici.

È appena il caso di rilevare che per le ultime alluvioni genovesi (2010-2011-2014) tutte le causali sopra descritte hanno concorso alla configurazione degli eventi disastrosi che si sono verificati.

A questo punto, valutate le causali, è opportuno precisare che le stesse concorrono a provocare i fenomeni esondativi, ma sono (o possono essere) comprensive anche delle frane.

Infatti, con il termine “alluvione” si indicano tutti i danni prodotti da un evento di piena di un corso d’acqua, sia quelli legati all’inondazione del territorio, sia quelli connessi con la criticità delle sue sponde, l’erosione accelerata e l’instabilità dei versanti.

In funzione dell’attivazione di alcune delle causali sopra esposte (soprattutto stato di abbandono e vulnerabilità della copertura vegetale) e di altre connesse con imprudenti condotte da parte dell’uomo (per esempio scavi e sbancamenti eseguiti con modalità disinvolute) si manifestano eventi franosi. Difficilmente, peraltro, ciò avviene in aree imprevedibili, bensì quasi sempre in aree indicate “a rischio” dagli strumenti territoriali (Piani di Bacino *in primis*). Si deve poi tener conto del fatto che alcune frane (soprattutto i crolli di roccia) possono avvenire indipendentemente dal fattore acqua e quindi al di fuori di intensi eventi piovosi. È il caso della corposa frana di Arenzano del 19 marzo 2016, caduta sulla via Aurelia da una scarpata rocciosa in una bella giornata soleggiata, come pure la frana che ha interessato la via dell’Amore nelle Cinque Terre nel 2012.

Le piogge restano comunque l’agente primario più frequente per le frane, soprattutto in presenza di terreni in tutto o in parte a componente argillosa; piogge prolungate sono in grado di mobilitare importanti porzioni dei versanti, portando a fenomeni che talora possono raggiungere entità e dimensioni di grande rilievo: il 24 novembre 2000 in località Bestagno, a Ceriana (Imperia), una colata fangosa è discesa con violenza lungo il versante, tranciando una strada provinciale, sbriciolando diverse villette (due le vittime), ingombrando e spostando l’alveo del torrente Armea che passava al piede. Il flusso fangoso è scosceso per una fascia larga 80-100 metri, per assumere a valle della strada provinciale una disposizione a ventaglio molto allargato, con estensione di circa 230 metri.

Il problema delle frane è decisamente sottostimato. Noi individuiamo i settori ove si possono manifestare, per quanto possibile li teniamo pure sotto controllo, ma ci fermiamo lì. Come già detto, non vi sono esempi di interventi atti a scongiurare che un settore che già mostra evidenti sintomi d’instabilità possa concretizzarsi come un evento franoso. Noi, lo ripeto, interveniamo sempre dopo.

Alcuni dati per comprendere la dimensione del problema: in Liguria le possibili frane o quelle già in fase avanzata di evoluzione negativa sono ben 15.000. La sola città di Genova è minacciata da 1.000 frane.

A fronte della constatata vulnerabilità del nostro territorio, dimostrata anche dalla ripetitività di eventi alluvionali e dalla frequenza di fenomeni franosi, viene spontaneo porsi alcune domande. Parliamo di Genova: il rischio idrogeologico che affligge una buona parte del territorio comunale può essere rimediato, o almeno attenuato su livelli non drammatici? E come?

Occorre partire dalla presa di coscienza dell'entità della gravità della "malattia" di cui soffre la città; il Comune ha censito gli abitanti genovesi suscettibili di subire danni alluvionali, raggiungendo la considerevole cifra di 100.000 persone. Tale dato bene si inquadra con la sequenza di problematiche che i Piani di Bacino, e pure specifici studi territoriali, hanno impietosamente denunciato.

Quindi conosciamo la malattia, ma sappiamo altresì quali sono le "medicine" da applicare per cercare se non di guarire almeno di alleviare il precario stato di salute del nostro territorio. Perché, è bene richiamarlo, il rischio idrogeologico non è un fattore naturale ineluttabile; lo abbiamo creato noi con le nostre prolungate trascuratezze: basta ricordare le "causali" dei fenomeni alluvionali sopra richiamate per constatare che nessuna è naturale e tutte sono collegate all'azione (o alla inerzia) dell'uomo. E allora, come abbiamo creato il rischio, lo possiamo anche smontare, agendo in modo diverso nei confronti della "gestione" dei nostri corsi d'acqua e dei loro bacini rispetto a quanto fatto finora, anzi intervenendo in modo addirittura opposto, facendo crescere in noi un nuovo rispetto verso i nostri rivi d'acqua che saranno pure di modesta entità territoriale, ma sono in grado di provocare danni e vittime.

Somministriamo quindi le medicine ai nostri "malati"; facciamo pure gradualmente – com'è inevitabile, secondo un processo che data la diffusione della malattia si prospetta lungo – ma con continuità, seguendo una seria programmazione. Non come si è fatto finora sia in tema di alluvioni che di frane.

È uno stato di fatto la vulnerabilità del territorio ligure, e genovese in particolare, nonché la sua pericolosità nei confronti del rischio idrogeologico nel suo complesso, aggravato dalla quasi totale assenza di prevenzione. Per uscire da tale situazione sono necessari molti interventi,

peraltro già individuati da almeno vent'anni e ai quali si è dato avvio solo in modo molto parziale.

Occorreranno peraltro ancora parecchi anni perché il processo di recupero appena iniziato possa avere un effetto efficace, sempre che si possa registrare, come si diceva sopra, una certa continuità operativa. Per dare un'idea basti considerare che a tutt'oggi, malgrado i cantieri già aperti, la capacità di smaltimento del torrente Bisagno è quasi la stessa del 2014, quando si verificò l'ultima alluvione. Se non si sono registrati eventi di danno è unicamente dovuto al fatto che non si sono avuti episodi piovosi di rilievo e con meccanica tale da provocare piene importanti.

Chiariamoci bene. Non si vuole qui sostenere che i fenomeni alluvionali non si fossero verificati prima che l'uomo martirizzasse i corsi d'acqua. Riguardo al torrente Bisagno, sono noti eventi alluvionali in epoca storica; ne sono stati segnalati alcuni già nel Quattrocento, uno nel 1780 e ben sei nel periodo tra il 1842 e il 1914. Ancora prima il più intenso, nel 1822, fece molti danni spazzando via anche alcuni ponti cittadini. Si vuole invece sottolineare che con la sconsiderata azione dell'uomo il grado di rischio si è notevolmente alzato, tanto che gli eventi alluvionali sono diventati più frequenti e maggiormente nocivi. Basta osservare che proprio il Bisagno tra il 1400 e il 1930 ha causato 17 eventi (uno ogni 31 anni), mentre da quando è stato coperto, appunto tra il 1930 e il 1934, gli eventi esondativi sono stati 9, ossia uno ogni 9,6 anni.

Se si prende coscienza di tutto ciò (gravità dello stato di rischio e tempo necessario per ridurlo) si deve necessariamente imparare, nostro malgrado, a convivere con il rischio; il che vuol dire imporre e imporsi delle regole (tramite i citati Piani di Protezione Civile) con lo scopo di ridurre i danni e salvaguardare la pubblica incolumità.

Questi concetti, qui riferiti nello specifico al territorio ligure, possono essere ritenuti validi per tutto il Paese, che presenta già di per sé un elevato grado di fragilità per la sua natura e per la sua "storia" geologica e geomorfologica. Basti ricordare che delle 750.000 frane registrate in tutta Europa, 600.000 sono in territorio italiano. Se a tale congenita condizione si aggiungono le "malefatte" dell'uomo, si comprende perché la trattazione di eventi "naturali" di danno occupi così frequentemente le pagine dei giornali.

3. *Gli esempi*

Dopo aver trattato delle nostre problematiche in senso generale, per comprendere con quali situazioni ci dobbiamo rapportare e come e cosa l'uomo abbia fatto o non fatto quanto doveva, voglio riferire qualche esempio significativo, scegliendo tra i casi che ho avuto l'occasione di conoscere nelle mie esperienze professionali. Tra i molti che hanno interessato l'intero territorio regionale ne ho scelto alcuni che mi sembrano rappresentativi e dei quali mi sono personalmente occupato: ne posso quindi parlare con cognizione.

3.1. *Frana sulla via dell'Amore alle Cinque Terre*

La via dell'Amore, stradella a picco sul mare nota in tutto il mondo, è sovrastata da una pendice in roccia fratturata che spesso rilascia massi e pietrami. Malgrado ripetuti episodi di tale riconosciuto stato di pericolo, dal 1995 la strada è stata mantenuta aperta, per di più a pagamento, al transito di milioni di persone. Fino a che, nel 2012, un improvviso crollo di massi ha colpito quattro turiste australiane. Solo allora, con l'intervento della Magistratura, si è provveduto alla messa in sicurezza, con una spesa che, in ragione della gravità e della estensione del pericolo, è stata di 23 milioni di euro.

3.2. *Alluvione di Sestri Ponente*

Un intenso evento meteorologico ha messo in crisi nell'ottobre del 2010 sei corsi d'acqua che attraversano l'abitato di Sestri Ponente. Si sono avute generali esondazioni che hanno causato ingenti danni. I sei corsi d'acqua erano affetti da un notevole numero, circa quaranta, di opere idrauliche non a norma, da tempo riconosciute e tollerate. Ai confini dell'area alluvionata, sia a ponente che a levante, sono presenti due torrenti che, dopo aver provocato eventi di danno, erano stati oggetto di interventi di sistemazione; con tale situazione non hanno provocato alcun danno, pur avendo subito la stessa meteora dei rivi esondati; ciò dimostra che il rischio idrogeologico può essere risolto.

3.3. *La frana di Capolungo (Genova)*

La costa a Capolungo è definita da una falesia rocciosa che, come è normale, subisce alla sua base un'azione disgregativa e dissolutiva da

parte del mare. Si creano degli sgrottamenti che minano progressivamente la stabilità della falesia. Il fenomeno era chiaramente osservabile e lo stato di crisi che ne derivava era confermato da crolli locali, segnalati alle Autorità competenti. Ciò malgrado nessuno ha colto il “grido di aiuto” della falesia, un settore della quale si distaccò il 18 gennaio 2014. Il giorno dopo il versante sovrastante scoscese quasi per intero, danneggiando sei edifici residenziali situati a margine della via Aurelia.

3.4. Il rio Rubino a Sanremo

Si tratta di un rivo con un piccolo bacino, a monte del centro di Sanremo, che nella prima metà del Novecento ha ricevuto una esemplare sistemazione con argini in pietra sull’asta principale e sui colatori laterali, con fondo rivestito. Quando le esigenze della città richiesero, a partire dal dopoguerra, una espansione verso monte, il rio Rubino, in tre fasi successive venne coperto: ogni fase comprese la costruzione di un edificio a cavallo dell’alveo. Nel 1998 tale situazione di rischio, dovuta a una tombinatura a più riprese riconosciuta come insufficiente, si è ulteriormente complicata. Nel corso della costruzione di una strada di cornice interessante la parte alta del bacino sono stati riversati i materiali di sbancamento direttamente nell’alveo del rivo, di fatto cancellandolo. Un successivo evento piovoso durato dodici ore ha mobilitato tali materiali così incautamente collocati, formando una lava torrentizia, costituita tanto da acqua quanto da trasporto solido. Tale violento flusso ha danneggiato pesantemente l’edificio collocato sull’imbocco della tombinatura e si è poi diretto verso e lungo una strada asfaltata, uccidendo una donna che stava transitando in auto.

3.5. La frana di Arenzano

Il 19 marzo 2016 una corposa frana di crollo è caduta sulla via Aurelia nel comune di Arenzano. Per soli quattro secondi non ha travolto due auto e quattro ciclisti che stavano transitando. Lo sperone roccioso franato era stato riconosciuto come pericoloso fin dal 1999 da una apposita delibera regionale e definita “frana attiva” dal Piano di Bacino e da tre strumenti urbanistici del Comune di Arenzano. In quei diciassette anni prima del crollo nessuno, neppure l’Anas “padrona” della strada, ritenne opportuno intervenire per prevenire il crollo. Mancanza

di fondi, si diceva. Una settimana dopo l'evento, i fondi, addirittura eccedenti rispetto al fabbisogno, furono a disposizione.

3.6. *Alluvione di Genova 2011*

La copertura del torrente Bisagno, realizzata negli anni Trenta del Novecento con officiosità di gran lunga insufficiente rispetto alla massima piana, è stata causale specifica di ben nove alluvioni. Quella del 2011, coinvolgente oltre al Bisagno alcuni suoi tributari (Fereggiano in particolare) e una decina di corsi d'acqua tombinati del levante cittadino, fu particolarmente dannosa, come pure una sua replica del 2014. In merito al Fereggiano, pure esso tombinato nel suo tratto terminale, con capacità da decenni riconosciuta insufficiente, va ricordato che nei primi anni Novanta si avviò la costruzione di un scolmatore, a salvaguardia del settore intensamente abitato. Purtroppo tale lavoro venne sospeso dopo un anno per presunte corruzioni e da allora dimenticato. Il tributo pagato fu pesante: sei vittime dovute alla esondazione verificatesi all'inizio del tratto tombinato, delle quali cinque dovute al cosiddetto traffico scolastico. Quel giorno purtroppo le scuole non erano state chiuse.

3.7. *Le frane di Crocefieschi*

A monte dell'abitato di Crocefieschi si osserva un'alta scarpata subverticale costituita da un complesso conglomeratico. Per sua natura tale scarpata è destinata, sotto l'azione degli atmosferici, a rilasciare elementi detritici che si arrestano lungo il piede. Il complesso è affetto da sistemi di fratturazione che tendono a isolare, rendendoli instabili, rilevanti porzioni rocciose che, in quanto tali, non si arrestano al piede ma scorrono verso valle. Un primo grande fenomeno del genere si è avuto nel 1970 e poi ancora nel 1976, nel 1996 e nel 2003. In tutti tali casi vennero colpite e danneggiate case, per fortuna disabitate. Nella persistente inerzia, davanti a tali ripetuti eventi, da parte di qualsiasi Ente territoriale, arriviamo al 1° marzo 2024, quando un enorme masso di 70 tonnellate è scosceso. È passato tra due case abitate sfiorandole e si è abbattuto su una scuola: erano le ore 20 e la scuola era deserta. Il masso è entrato in un'aula, fino a poche ore prima piena di bambini.

3.8. *Il crollo del ponte di Carasco*

Posizionato sul torrente Sturla, tale ponte era stato costruito nel 1920, con due pile in alveo approfondite sino a cinque metri nel deposito alluvionale del torrente. Il ponte, demolito durante la guerra, fu ricostruito nel 1950, ancora con due pile in alveo ma approfondite di soli due metri. Una ventina di anni più tardi tale errore progettuale mostrò i suoi effetti: una delle due pile presentò preoccupanti segnali di erosione e si provvide al suo rinforzo con uno specifico intervento. Non si ritenne di fare altrettanto sull'altra pila, che così mantenne la sua fragilità nei confronti dell'erosione fluviale; negli anni successivi la stessa non fu mai monitorata. Il 22 ottobre 2013 questa sommatoria di trascuratezze presentò il conto: la pila non rinforzata vide erodere il suo terreno di appoggio e si inclinò, facendo crollare nel torrente la parte centrale del ponte. Era di notte, con traffico diradato; restarono tuttavia coinvolte tre vetture e due furono le vittime.

3.9. *Il torrente Verbone*

Tale torrente si trova nel Ponente ligure; sfocia in mare a Vallecrosia. Può essere preso a prototipo di come l'uomo sia capace di martirizzare un corso d'acqua: ponti e passerelle con luce insufficiente, arginature discontinue e spesso irregolari, case che ingombrano l'alveo e strade che ne occupano una porzione, ripetute coperture, nessuna delle quali a norma nei confronti delle piene prevedibili. Il tutto con la generale tolleranza da parte degli Enti di controllo territoriale e di gestione del bene demaniale rappresentato dal corso d'acqua. Ecco un esempio significativo per come il povero Verbone sia stato trattato: il proprietario di due passerelle prive di concessione idraulica in quanto non a norma, le ha collegate tra di loro coprendo il torrente; inoltre ha collocato sulla passerella di monte una locomotiva e due vagoni ferroviari nei quali attrezzare un Museo della Canzone. Tale treno, nell'evento alluvionale del 6 novembre 2000 ha funzionato da deviatore della piena, allagando una estesa zona a lato del Verbone. Oggi quel treno è ancora lì.

3.10. *La strada della Ripa*

La strada provinciale della ripa nel comune di Vezzano Ligure costeggia il fiume Magra, al piede di un ripido versante che, per sua natura, mostra una elevata propensione al dissesto. Tra il 2005 e il

2010 furono ben nove gli accidenti pervenuti sulla sede stradale: colate fangose, pietrami, alberi. Nel novembre 2010 si verificarono contemporaneamente tre eventi franosi, sui quali si intervenne per un ripristino. A lavori non completati, la strada venne riaperta alle ore 20 del successivo 7 dicembre, malgrado fosse stata emessa da parte della Regione un'allerta meteo che prevedeva piogge persistenti. In quella stessa notte si ribaltarono sulla strada due alberi, contro i quali finì un automobilista che, rimasto fortunatamente incolume, diede l'allarme. Arrivò una pattuglia della Polizia Stradale e mentre si svolgevano i dovuti accertamenti un terzo albero si abbatté sulla strada, uccidendo la Sovrintendente della pattuglia. A questo punto, finalmente, la strada della Ripa attirò l'attenzione che meritava: spuntarono subito copiosi finanziamenti e furono eseguiti gli interventi di messa in sicurezza della strada, che durarono alcuni anni.

3.11. *La frana di via Digione a Genova*

A monte di Dinegro fu aperta una cava che, negli ultimi decenni dell'Ottocento, fornì i materiali lapidei calcarei per l'estensione del porto. Nel 1903 tale cava venne abbandonata per la difficile gestione dell'esteso fronte che, lungo 200 metri e alto 90, mostrava motivi di instabilità. Nonostante ciò, nel 1931 fu concessa la costruzione di un caseggiato proprio alla base del fronte. Nei decenni successivi si ebbero diversi episodi franosi, definiti da spezzoni rocciosi rilasciati dal fronte instabile. Vi furono proteste, discussioni e pure procedimenti giudiziari, ma nulla cambiò, finché nel 1968 un corposo strato roccioso è scosceso colpendo il caseggiato, tranciandone alcuni pilastri con conseguente parziale crollo dell'edificio. I morti furono 19.

In tutti gli esempi riportati il ruolo dell'uomo, con le sue trascuratezze, con le sue azioni sconsiderate e con la sua inerzia è stato determinante per configurare l'evento di danno.

4. *Per una conclusione*

Il rischio idrogeologico è certo e conosciuto; è altresì noto che cosa occorra fare per tentare di almeno ridurlo; basterebbe realizzare quegli

interventi che i Piani di Bacino hanno indicato come necessari più di venti anni or sono e che poi sono stati confermati da studi di settore.

Per quei corsi d'acqua ove ciò è avvenuto, il rischio si è notevolmente abbassato, limitando i fenomeni di danno, se manifestati, a livello puntuale e non più a scala di bacino.

Peraltro, la situazione complessivamente riscontrata dai Piani di Bacino, con una notevole sommatoria di criticità, rivela una condizione di “pesante debito ambientale” che non può essere risolta a breve termine.

Dovendo convivere con il rischio è necessario:

- dotarsi di un Piano di Protezione Civile adeguato; perché abbia efficacia, deve essere conosciuto dai cittadini. Tutti devono sapere che cosa fare in caso di allerta e soprattutto che cosa non si deve fare. La normativa prevede, ad esempio, che siano svolte esercitazioni, proprio per far conoscere il meccanismo del Piano e la sua operatività; purtroppo, tali esercitazioni sono una merce rara, anzi rarissima;
- pubblicizzare in ogni modo lo stato di rischio, uscendo da quell'incomprensibile riserbo finora esercitato, salvo poi esibirlo, a giustificazione, in occasione degli eventi di danno;
- accentuare il grado di conoscenza del territorio per individuare le situazioni di maggiore criticità nell'ambito delle instabilità naturali e artificiali;
- eseguire un rigido schema di manutenzione ordinaria, sia per i corsi d'acqua, sia per i versanti;
- dare significato concreto alla prevenzione, cercando cioè di prevenire i danni e non solo ripararli; abbiamo migliorato nella previsione degli eventi, ma siamo ancora molto indietro nella prevenzione degli effetti.

Qualcosa di più, insomma, rispetto a quanto fatto fino ad ora: limitarsi a guardare il cielo con la speranza che non piovga in modo troppo intenso, augurandosi che, ancora una volta, la buona sorte ci preservi da danni e lutti maggiori di quelli che sinora la Natura, con la nostra complicità, ci ha riservato. E non si tratta di un problema da poco, visto che negli ultimi cinquant'anni, in Liguria, sono state più di ottanta le vittime da alluvione.

Bibliografia

Bellini A., *Il debito ambientale*, Genova, Arti grafiche francescane, 2024.

Il debito ambientale

Alluvioni e frane, che sempre più frequentemente colpiscono il nostro territorio, non sono del tutto dovute ai capricci della Natura. Anche l'uomo ha le proprie responsabilità in particolare per come ha maltrattato i corsi d'acqua, rendendo difficile il loro scorrere verso il mare, e per come ha trascurato il problema delle frane, sulle quali è intervenuto solo a posteriori, quando le stesse erano già cadute. Questo modo di agire, e di non agire, ha accumulato un pesante debito nei confronti dell'ambiente, che siamo chiamati a dovere pagare. L'Autore, a conferma di tale situazione, riferisce su eventi dannosi in tema idrogeologico dei quali si è occupato nel corso della sua attività professionale.

The Environmental Debt

Floods and landslides, which increasingly affect our territory, are not entirely due to the whims of Nature. Man has his responsibilities for how he mistreated waterways, making it difficult for them to flow towards the sea, and for how he neglected the problem of landslides, on which he intervened only after the fact, when they had already fallen. This way of acting, and not acting, has accumulated a heavy debt to the environment, which we are called upon to pay. The Author, in confirmation of this situation, reports on harmful events in the hydrogeological field that he has dealt with during his professional activity.

FERDINANDO BOERO

Come funziona il mondo

Il pianeta Terra è coperto per il 71% dall'Oceano globale e infatti, visto dallo spazio, il pianeta è blu. La superficie, però, non rende giustizia alla vastità oceanica: l'oceano è un volume con una profondità media di 3.500 metri e rappresenta più del 90% dello spazio abitato dalla vita. Il pianeta è vivo grazie all'oceano perché il 97% dell'acqua, elemento indispensabile alla vita, è nell'oceano, ed è salata. L'acqua dolce è solo il 3% dell'acqua totale, ripartita per il 68,7% nelle calotte polari e nei ghiacciai, per il 30,1% nel sottosuolo e solo l'1% dell'acqua dolce comprende laghi, fiumi, umidità nel suolo e vapore acqueo.

Il ciclo dell'acqua prevede l'evaporazione di acqua dolce dall'oceano, la formazione di vapore acqueo che sale in atmosfera e poi, condensando, ricade a terra (o nell'oceano) alimentando i fiumi, i laghi, le falde sotterranee. L'acqua dolce che sostiene gli ecosistemi terrestri, quindi, origina dall'oceano.

Queste conoscenze dovrebbero far parte del bagaglio culturale medio, visto che a scuola si studia il ciclo dell'acqua, ma in pochi risponderebbero correttamente alla domanda: da dove viene l'acqua che esce dai tuoi rubinetti di casa? La risposta è l'Atlantico, visto che le piogge sul nostro paese provengono da sistemi nuvolosi che di solito hanno origine in Atlantico, le perturbazioni atlantiche, e che si spostano da ovest verso est, producendo le piogge che bagnano l'Italia. L'acqua dolce che scorre nei fiumi torna al mare e il ciclo si chiude.

Anche la terraferma, quindi, è viva grazie all'acqua oceanica. La Commissione Europea sente la necessità di promuovere l'alfabetizzazione marina (*ocean literacy*) perché siamo "analfabeti" per quanto riguarda l'oceano.

Due climi

Sia la climatologia sia la meteorologia prendono in considerazione l'atmosfera, identificando tendenze a lungo termine (il clima) e previsioni a breve termine (la meteorologia): le previsioni del tempo considerano i sistemi nuvolosi, le perturbazioni, le temperature al suolo, e ci dicono anche se i mari sono calmi o mossi, ma nulla di più.

La componente atmosferica è solo una parte di quel che determina sia il clima sia il tempo meteorologico. Oltre alle correnti atmosferiche, infatti, occorre considerare anche le correnti oceaniche; solo recentemente, ad esempio, abbiamo compreso che esiste un solo grande sistema di circolazione oceanica che connette tutti gli oceani: il grande nastro trasportatore oceanico (figura 1). Gli oceanografi fisici parlano di correnti termoaline, generate da cambiamenti di temperatura e salinità. Ai poli l'acqua marina gela e diventa ghiaccio. L'acqua marina perde i propri sali

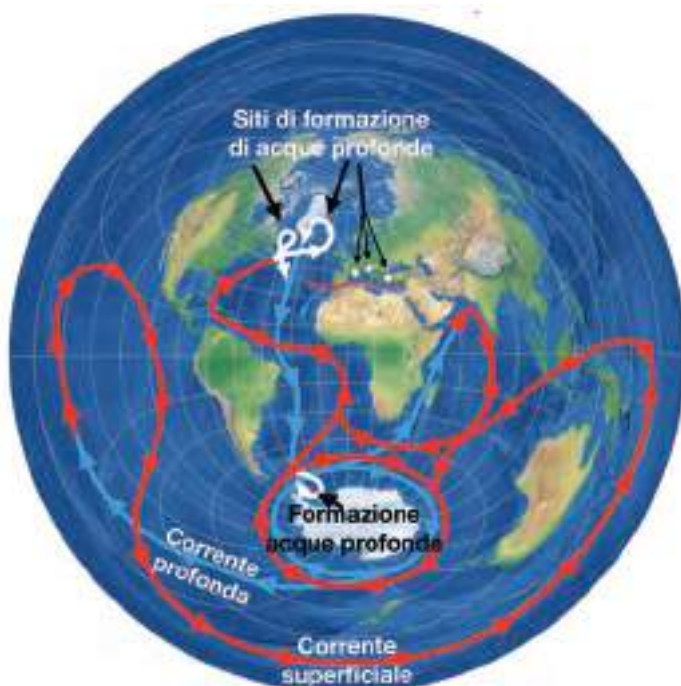


Figura 1. Il grande nastro trasportatore oceanico, la corrente termoalina innescata dalla formazione di acque profonde in corrispondenza dei poli, che connette tutti gli oceani.

con l'evaporazione e il congelamento. Le saline sfruttano l'evaporazione per ottenere il sale, una volta che l'acqua marina evapora, lasciandolo sul fondo. Lo stesso avviene quando si forma il ghiaccio marino che, in effetti, è fatto di acqua dolce. Il ghiaccio galleggia sull'acqua liquida e l'acqua sotto al ghiaccio contiene i sali liberati con il congelamento e quindi è molto più salata del normale e molto fredda. Bassa temperatura e alta salinità significano alta densità: l'acqua sotto al ghiaccio polare tende ad affondare, innescando una corrente termoalina. I poli, quindi, sono siti superficiali di formazione di acque profonde, visto che l'acqua superficiale molto densa, scendendo in profondità, diventa profonda.

Questi processi sono importantissimi per la vita. La maggior parte dello spazio abitato dalla vita, il volume oceanico, infatti, è al buio. La luce non penetra molto in profondità e, a seconda della torbidità dell'acqua, la sua intensità non è più sufficiente per permettere la fotosintesi, un processo essenziale per la vita, visto che gli organismi fotosintetici (assieme ai chemiosintetici) sono in grado di ridare vita alla materia, consumando anidride carbonica e producendo ossigeno. Non a caso si chiamano produttori primari. Sono all'inizio delle reti trofiche: i primi. Senza luce non ci sono produttori primari e, in teoria, non ci dovrebbe essere ossigeno, visto che sono loro a produrlo, mentre gli animali lo consumano. Le prime spedizioni oceanografiche trovarono animali anche alle massime profondità, falsificando l'ipotesi che la vita fosse assente in ambienti privi di organismi fotosintetici. L'acqua superficiale è ricca di ossigeno e la sua discesa in profondità, grazie alle correnti termoaline, porta ossigeno dove nessuno lo produce, a beneficio di chi lo consuma. Il grande nastro trasportatore oceanico parte idealmente dal polo nord, porta le acque superficiali in profondità, attraversando l'intero bacino verso sud, per arrivare in Antartide, dove altra acqua superficiale affonda. Si forma la corrente circumantartica profonda che gira attorno all'Antartide.

Se c'è acqua che scende, ci deve essere altra acqua che sale e, infatti, le acque profonde antartiche salgono e si dividono in due branche che salgono verso nord: una verso l'oceano Indiano e l'altra verso l'oceano Pacifico. Le acque profonde risalite in superficie si scaldano per tornare verso l'Antartide, dove formano la corrente circumantartica superficiale che, poi, risale verso nord, attraversando l'Atlantico per arrivare fino al polo Nord, dove il grande nastro trasportatore finalmente si chiude.

Un tempo le varie correnti oceaniche erano considerate separatamente e si pensava che fossero generate principalmente dai venti. Poi si è compresa l'importanza della circolazione termoalina nel connettere tutte le acque oceaniche, pur restando importante anche l'influenza dei venti, soprattutto a livello locale. La conformazione del fondale oceanico, soprattutto in prossimità della costa, è anche importante nel generare le correnti: è fondamentale il ruolo dei canyon sottomarini nel convogliare verso la costa le acque profonde, con correnti di risalita, o nel convogliare verso il fondo le acque costiere, con correnti discendenti. La grande circolazione oceanica, il nastro trasportatore, quindi, si può comunque suddividere in sistemi correntizi caratterizzati da circolazioni locali di grande importanza per il funzionamento degli ecosistemi.

Gli scambi tra l'oceano e l'atmosfera sono di importanza cruciale. Il riscaldamento dell'atmosfera, causato prima di tutto dalle emissioni di gas climalteranti prodotti dalle nostre attività, indebolisce i processi di congelamento delle acque polari: invece di formarsi, il ghiaccio si scioglie e questo altera la corrente termoalina che innesca il grande nastro trasportatore. L'acqua dolce e fredda che si libera dallo scioglimento dei ghiacci "galleggia" sopra all'acqua oceanica più calda che arriva al polo Nord come Corrente del Golfo e che viene così rallentata (Pontes e Menivel 2024). A partire dal 2008 la rotta Siberiana è diventata praticabile per un periodo considerevole dell'anno, anche senza l'ausilio di rompighiaccio (Gunnarsson e Moe 2021). Il rallentamento della Corrente del Golfo, a causa di eventi che hanno luogo nell'atmosfera, ha effetti sull'atmosfera stessa: il clima atmosferico altera il clima oceanico che, a sua volta, altera il clima atmosferico, con una serie di azioni e retroazioni che connettono indissolubilmente due sistemi che, in effetti, sono un unico sistema.

Solo recentemente questi collegamenti sono diventati talmente evidenti dall'essere esplicitati. Nell'estate del 2024 l'Adriatico ha raggiunto temperature superiori a 30 °C, con intensissima evaporazione, seguita da precipitazioni altrettanto intense. Il collegamento è stato fatto persino nei bollettini meteorologici televisivi.

La fisica del clima definisce il teatro in cui opera la vita, e ne condiziona l'espressione. La fisica, pur importantissima, non basta per capire come funziona il mondo vivente. Quando si considera la vita i livelli di complessità aumentano esponenzialmente.

Come funziona il mondo vivente

Dato che l'oceano costituisce più del 90% dello spazio abitato dalla vita, e dato che l'oceano condiziona la vita anche negli spazi emersi, per comprendere come funziona il mondo vivente è necessario comprendere il funzionamento degli ecosistemi oceanici.

Le correnti termoline e le correnti discendenti e ascendenti causate dai venti e dalla conformazione del fondo marino ci spiegano come sia possibile che l'elemento essenziale per la vita, l'ossigeno, sia disponibile nella massa oceanica dove la luce non arriva, dove ci sono solo organismi che lo consumano (gli animali e gli altri eterotrofi) e sono assenti organismi che lo producono (gli autotrofi, fotosintetici). L'ossigeno è necessario per la vita animale, ma non è sufficiente. Vedremo in seguito come le reti trofiche possano funzionare anche in assenza di produttori primari.

Se consideriamo la colonna d'acqua oceanica, l'ambiente più diffuso del pianeta (ogni tanto è bene ricordarlo), in apparenza essa è popolata da pesci, rettili, uccelli e mammiferi marini, assieme a qualche grande mollusco (come i calamari) e le meduse: questi sono gli unici esseri visibili a noi, quelli di cui si cura la documentaristica. E sono tutti carnivori. Ovviamente non possono esistere ecosistemi dominati dai carnivori che, necessariamente, si devono nutrire di altri organismi. Le reti trofiche marine sono molto lunghe, rispetto a quelle terrestri. Nella figura 2 sono raffigurati uno squalo che mangia un tonno che mangia uno sgombero che mangia una sardina. Sono tutti carnivori. Dove sono gli erbivori? Dove è l'erba? Le alghe e le piante marine crescono solo nelle zone costiere e non è pensabile che possano sostenere la vita nell'immensità oceanica. E poi: dove sono gli erbivori di queste piante e alghe? Le poche specie che se ne nutrono non possono certo sostenere l'intero ecosistema oceanico.

Per comprendere questa errata "percezione" del mondo marino, della cui impossibilità sono in pochi ad accorgersi, occorre considerare le varie specie non come adulte ma come cicli biologici. Tutti i pesci ossei iniziano la loro vita come piccole uova che poi diventano embrioni, larve e stadi giovanili. E tutte queste forme iniziali sono di piccole dimensioni. Le larve dei tonni non mangiano le larve degli sgombri! Tutte le forme larvali e giovanili fanno parte del plancton, l'ittioplancton, e si nutrono di piccoli crostacei e di altri organismi dello zooplancton,

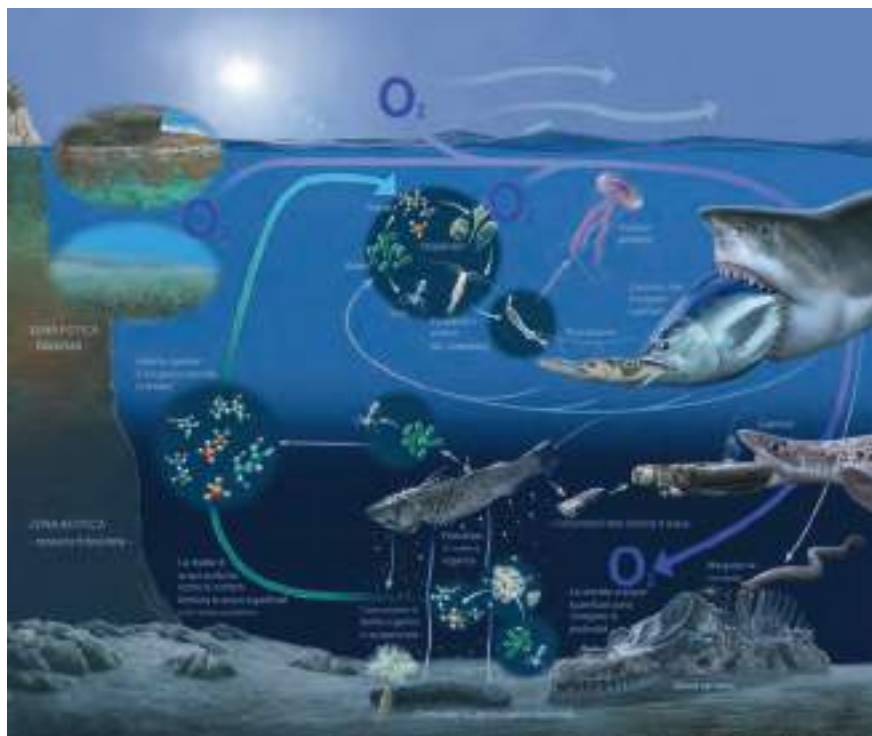


Figura 2. Il funzionamento degli ecosistemi oceanici, il 90% dello spazio abitato dalla vita. (Concetti: F. Boero; illustrazione: Alberto Gennari).

prima di tutto di copepodi, crostacei abbondantissimi nell'ambiente marino. Dato che sono piccoli noi non li vediamo, ma la loro massa complessiva è enorme. I copepodi sono gli erbivori, assieme a molte altre forme di piccole dimensioni. E l'“erba”? I copepodi e gli altri erbivori si nutrono di piccole alghe unicellulari che costituiscono il fitoplancton, principalmente diatomee e dinoflagellati. Le “piante” sono loro, e hanno biomasse enormi, in determinati periodi dell'anno.

A differenza degli ecosistemi terrestri, dove le piante sono di grandi dimensioni e formano la colonna portante degli habitat e degli ecosistemi, in mare i produttori primari più importanti hanno presenze alterne. In determinati periodi il fitoplancton prolifera in modo prodigioso, ma viene rapidamente mangiato dagli erbivori dello zooplancton. Si parla, in questo caso, di “pulsazioni”. La prima pulsazione di produzione primaria, il fitoplancton, sostiene la prima pulsazione di produzione

secondaria, quella degli erbivori dello zooplancton. Questi sono mangiati dalle forme iniziali dei cicli biologici dei pesci che, in seguito, crescono: i pesci grandi mangiano i pesci piccoli, e gran parte dei predatori non pesci si nutre di pesci. Le due pulsazioni iniziali “reggono” le reti trofiche fino alle pulsazioni successive.

La figura 2 mostra anche il tragitto dell’ossigeno, che scende in profondità con le correnti termoaline descritte nel paragrafo precedente.

Tutto quello che viene prodotto nella zona illuminata produce rifiuti e tutti gli individui, prima o poi, muoiono. I rifiuti e i cadaveri sono decomposti dai batteri (i decompositori) che semplificano la materia vivente, una volta morta, e la riducono in sostanze elementari (i nutrienti), essenziali per permettere la crescita dei produttori primari, prima di tutto il fitoplancton.

Non tutta la materia viene riciclata in superficie. Buona parte dei rifiuti e dei cadaveri affonda e scende nella colonna d’acqua mentre viene decomposta dai batteri. Il particolato che deriva dalla decomposizione della materia vivente (la neve marina) è una fonte di cibo essenziale per organismi come altri crostacei che si nutrono di detrito. Questi prendono il posto dei copepodi e dello zooplancton erbivoro nel sostenere reti trofiche di carnivori. La neve marina viene anche intercettata dagli organismi che vivono sul fondo. Anch’essi preda di carnivori. I cadaveri dei grandi cetacei arrivano sul fondo marino e sono nutrimento per i mangiatori di carcasse.

Le correnti discendenti che portano l’ossigeno in profondità generano correnti ascendenti che portano in superficie i nutrienti derivanti dai processi di decomposizione, mettendoli a disposizione dei produttori primari, e il ciclo si chiude.

Il fallimento dell’istruzione e della comunicazione scientifica

La spiegazione di come funziona il mondo, attraverso la figura 1 e la figura 2, non fa parte del bagaglio culturale dei cittadini medi (Boero 2024): non viene insegnata a scuola e non è trattata dalla documentaristica.

La comunicazione scientifica, quasi invariabilmente, tende a sollecitare stupore e meraviglia negli spettatori: la reazione Ohhh!. Vengono quindi mostrati organismi carismatici di grandi dimensioni: balene,

delfini, squali, tartarughe. Se si mostrano gli habitat, di solito sono di alto valore estetico, come le formazioni coralline. I batteri sono gli organismi più importanti del pianeta visto che, senza di loro, la materia vivente, una volta morta, non potrebbe essere “semplificata” ed essere messa a disposizione dei produttori primari che le ridanno vita. Le microalghe del fitoplancton (prima di tutto le diatomee) sono i produttori primari (le “piante”) più importanti del pianeta, visto che sostengono, con le loro pulsazioni di produzione, le reti trofiche oceaniche. E i crostacei dello zooplancton, gli “erbivori” (come i copepodi), sono gli animali più importanti del pianeta, visto che fanno da tramite tra il fitoplancton e le parti superiori delle reti trofiche. Le meduse, inoltre, sono i predatori più letali in quanto si cibano delle uova e larve dei pesci e del loro cibo (i crostacei dello zooplancton): uccide più tonni una medusa di uno squalo bianco, essendo responsabile di moltissima mortalità larvale sia per predazione diretta che per competizione per il nutrimento.

La consapevolezza di quali siano gli organismi più importanti nel determinare il funzionamento degli ecosistemi planetari, e la stessa definizione di cosa siano tali ecosistemi, non fa parte del bagaglio di conoscenza dispensato a scuola, e dalla divulgazione. Risultato: analfabetismo scientifico.

La conversione e la transizione ecologica

Papa Francesco con *Laudato si'* (2015) chiede la conversione ecologica. Per la prima volta un'autorità religiosa di questo calibro chiede la conversione a una scienza (l'ecologia) e non a una religione. Chi si prefigge una conversione si rivolge a chi non è convertito, e Francesco si propone di entrare in dialogo con tutti, non solo con chi ha una fede religiosa. Tutti si devono convertire all'ecologia.

La transizione ecologica prevede il passaggio da uno stato in cui i sistemi di produzione e consumo si basano su profonda ignoranza dell'ecologia (Boero 2012) a uno stato di consapevolezza che mette l'ecologia al centro delle nostre attenzioni (European Commission 2021). Attualmente, l'efficienza della società si misura con valutazioni (il PIL) che attribuiscono la massima importanza alla sfera economica. Le leggi dell'economia regolano il funzionamento sia dell'economia sia

della società che la esprime. La sfera sociale ha le sue leggi, ma queste sono diverse da paese a paese, mentre le leggi economiche, con la globalizzazione dei mercati, sono di valenza globale. All'interno della sfera sociale, alcune parti della società (i cosiddetti ecologisti) attribuiscono molta importanza alla sfera ambientale. Senza ricevere molta attenzione, vista la prevalenza dell'economia sull'ecologia.

La transizione ecologica prevede il ribaltamento dell'ordine di importanza delle tre sfere (European Commission 2021). La sfera ecologica contiene le altre due sfere e le leggi dell'ecologia hanno valore universale, agendo anche sulle società e sull'economia. La sfera sociale, con leggi diverse da stato a stato, è contenuta nella sfera ecologica e contiene la sfera economica, espressione delle varie società, con le sue leggi. La conversione ecologica, assieme alla transizione ecologica, tendono verso una visione del mondo coerente con la realtà: le società e l'economia che esprimono sono contenute nella sfera ambientale, senza la quale non possono esistere.

La grande truffa dell'economia, come suggerito da Boero (2012) consiste nelle cosiddette "esternalizzazioni": i costi ambientali e sociali derivanti da iniziative economiche, etichettati come "esternalità negative", non sono computati nelle analisi costi benefici che valutano la sostenibilità economica delle imprese. Se non si computano i costi sociali ed ecologici, si pratica "cattiva economia", visto che la distruzione dell'ambiente e l'alterazione negativa della società hanno ricadute negative anche sull'economia. I costi sociali e ambientali, però, di solito sono a carico degli stati, che sono quindi mandati in bancarotta (il debito pubblico) a causa di un errato disegno dei sistemi economici, ritenuti prevalenti sui sistemi sociali e ambientali.

La conversione ecologica richiede piena consapevolezza di questa distorta scala di valori nel pesare l'importanza delle tre sfere (ambientale, sociale ed economica), e la transizione ecologica richiede il "transito" da sistemi che vedono la prevalenza dell'economia su società e ambiente, a sistemi aderenti alla realtà dei fatti, che vedono l'ambiente come teatro primario delle nostre azioni sociali ed economiche. Non aver tenuto conto di questo ha portato i nostri sistemi di produzione e consumo verso l'insostenibilità economica, sociale ed ecologica.

Per correre ai ripari, e porre rimedio ai disastri causati dalla nostra ignoranza, però, occorre sapere "come funziona il mondo". Nella mia

esperienza sono veramente in pochi a saperlo, e questo vanifica possibili tentativi di percorsi verso la sostenibilità: stiamo intraprendendo la transizione ecologica senza conoscere l'ecologia!

Due tipi di ignoranza

Tutti conoscono il ciclo dell'acqua, fa parte dei programmi della scuola dell'obbligo. Eppure quasi nessuno sa rispondere correttamente alla domanda: da dove viene l'acqua che esce dal tuo rubinetto? Quando si dice che viene dall'Atlantico (se siamo in Italia) e lo si spiega con il ciclo dell'acqua, tutti dicono di saperlo, ma solo dopo la spiegazione. In effetti lo sapevano, ma non sapevano di saperlo: il che equivale a non saperlo. A che serve sapere qualcosa se non si sa di saperla?

Se invece si chiede quali sono gli organismi, le piante e gli animali più importanti nel permettere il funzionamento degli ecosistemi planetari, nessuno, a parte gli ecologi, ma forse non tutti, risponde: batteri, diatomee, copepodi. Moltissimi non sanno neppure cosa siano i copepodi. In questo caso si tratta di non sapere non sapendo di non saperlo.

I due tipi di "ignoranza" (non sapere significa ignorare), diffusissimi nella popolazione italiana e, credo, nella gran parte della popolazione mondiale sono alla base del nostro modo maldestro di gestire i nostri comportamenti rispetto al resto della natura.

Per innescare un efficace processo di conversione e di transizione ecologica è essenziale sapere come funziona il mondo. E sono in pochi a sapere che per saperlo bisogna conoscere l'oceano.

Istruzione e divulgazione da riformare

La mancanza di conoscenze fondamentali (come funziona il mondo) richiede una radicale riforma sia dei sistemi di istruzione sia dei programmi di divulgazione. L'istruzione viene di solito impartita attraverso la somministrazione di principi astratti, con la finalità di dotare i discenti di una conoscenza che permetta loro di affrontare i problemi che incontreranno nella loro vita. Si tratta di un approccio eminentemente deduttivo: si imparano le regole che, dopo, si metteranno in atto al mo-

mento di affrontare situazioni reali. Questa modalità è “contro natura”. I giovani umani imparano in modo induttivo: iniziano a parlare senza conoscere la grammatica e la sintassi e applicano le regole a seconda della loro esperienza. Solo in seguito impareranno formalmente le regole. La innata biofilia dei giovani umani (una naturale propensione verso le cose viventi) dovrebbe essere assecondata con approcci concreti, per passare solo in seguito alle astrazioni. L’astrattezza dei programmi scolastici, al contrario, di solito non copre “cose di natura”. La divulgazione scientifica viene prodotta principalmente a scopo di intrattenimento, e non genera consapevolezza (il passaggio da Ohhh! ad Ahhh!).

Senza un rinnovato progetto culturale che dia alla natura il ruolo centrale che merita, e che ora non ha, il nostro rapporto con l’ambiente continuerà a essere insostenibile, con gravi danni economici, sociali ed ecologici. Abbiamo sviluppato una cultura senza natura e ne stiamo pagando le conseguenze: solo una nuova cultura ci permetterà di riparare i danni che, oramai, sono sempre più evidenti. Per farlo dobbiamo comprendere come funziona il mondo naturale da cui dipendiamo.

Bibliografia

- Boero F. *Economia senza natura. La grande truffa*. Torino, Codice Edizioni, 2021.
- Boero F. *Shortcomings in science communication and education: possible remedies at the Darwin-Dohrn Museum*. SCIRES-IT-SCientific RESearch and Information Technology 2024;14:17-24.
- European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. Könnölä T., Lacroix D., Boero F., Ligtoet A., Papathanasiou E. et al. *Mission area, healthy oceans, seas, and coastal and inland waters – Foresight on demand brief in support of the Horizon Europe mission board*. Publications Office of the European Union, 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/054595>
- Gunnarsson B., Moe A. *Ten years of international shipping on the Northern Sea Route: trends and challenges*. Arctic Review on Law and Politics 2021;12:4-30.
- Laudato si'*, Lettera enciclica del santo padre Francesco sulla cura della casa comune, 24 maggio 2015. <https://www.vatican.va/content/francesco/it/encyclicals.index.html#encyclicals>

Pontes G.M., Menivel L. *Weakening of the Atlantic meridional overturning circulation driven by subarctic freshening since the mid-twentieth century*. Nature Geoscience 2024;17:1291-1298.

Come funziona il mondo

La superficie del pianeta è coperta per il 71% dall'oceano. L'oceano, però, non è una superficie, è un volume e rappresenta più del 90% dello spazio abitato dalla vita. Il grande nastro trasportatore oceanico, innescato dai motori freddi polari, collega tutti gli oceani. Gli ecosistemi planetari, in grandissima parte oceanici, sono apparentemente dominati da pesci, mammiferi, rettili e uccelli marini. I produttori primari sono microscopici (il fitoplancton) come anche gli erbivori (piccoli crostacei: i copepodi). Gli organismi morti sono decomposti dai batteri e scendono verso il fondo, dove la luce non arriva e la fotosintesi non è possibile, alimentando reti trofiche a base di detrito. La conversione e la transizione ecologica non saranno possibili senza queste elementari conoscenze su "come funziona il mondo". Non si può rispettare quel che non si conosce.

Parole chiave: oceano; ciclo dell'acqua; funzionamento degli ecosistemi; ecologia; economia; transizione ecologica.

How the World Works

The ocean covers the 71% of the planet's surface. However, the ocean is not a surface: it is a volume and it represents more than 90% of the life-inhabited space. The great ocean conveyor, triggered by polar cold engines, connects all the oceans. Planetary ecosystems, largely oceanic, are apparently dominated by fish, mammals, reptiles, and seabirds. Primary producers are microscopic (the phytoplankton), and herbivores are also microscopic (primarily small crustaceans: copepods). Dead organisms are decomposed by bacteria and sink where photosynthesis is not possible, forming marine snow that deep-sea detritivores feed on. The ecological conversion and transition is not possible without the basic knowledge of "how the world works": we cannot respect what we do not know.

Keywords: ocean; water cycle; ecosystem functioning; ecology; economy; ecological transition.

BENEDETTO ROCCHI

Interdipendenze tra sistema economico e risorse idriche

Global water footprint e flussi virtuali di acqua

Una rinnovata enfasi sullo stato delle risorse idriche è emersa negli ultimi anni nel dibattito internazionale sullo sviluppo sostenibile. A marzo 2023 si è tenuta a New York la Conferenza delle Nazioni Unite sulla revisione di medio termine del Decennio per l'azione "Acqua per lo sviluppo sostenibile" (2018-2028). Durante il dibattito generale, tra i vari temi, è stata sottolineata l'importanza strategica di dati affidabili per l'analisi dei sistemi idrici, a sostegno di un approccio scientifico alla gestione delle risorse idriche (United Nations, 2023:12). I delegati hanno ricordato anche la necessità di adottare una prospettiva di "sistema" nel monitoraggio e nella modellazione dei sistemi idrici a fini di gestione. Le interconnessioni tra uso dell'acqua, fornitura di energia e attività di produzione devono essere prese in considerazione per una gestione idrica efficace, sia a livello regionale che globale (UNESCO e UN Water, 2020). Un approccio "nexus" nella gestione idrica, tuttavia, può essere adottato solo in presenza di informazioni appropriate e strumenti di modellazione adeguati. Secondo l'Organizzazione meteorologica delle Nazioni Unite per l'acqua (WMO, 2022), insieme alle osservazioni satellitari indirette, i modelli idrologici sono ancora fondamentali per monitorare lo stato delle risorse idriche, a causa della mancanza di dati idrologici tempestivi, verificati e accessibili.

I soli modelli idrologici, tuttavia, non sono sufficienti per rappresentare tutte le complessità che deve affrontare un sistema integrato di gestione delle risorse idriche. Le interazioni tra sistema delle risorse ed economia, infatti, non sono solo *dirette*, sotto forma di prelievi e restituzioni di acqua da e verso l'ambiente. Le interdipendenze interne al sistema economico, attraverso i flussi di commercio, costituiscono infatti la rete causale in grado di trasformare la gestione di risorse tipicamente *locali*, come sono quelle idriche, in un problema che ha anche implicazioni *globali*.

Il *water footprint* (impronta idrica) di un bene corrisponde al volume di acqua utilizzata per produrlo misurata lungo l'intera filiera di produzione (Hoekstra et al., 2011). Non solo quindi l'acqua prelevata direttamente dal processo produttivo ma anche l'acqua *incorporata* in tutti gli input utilizzati. Detto in altri termini: le pressioni su una determinata risorsa idrica sono generate da attività di produzione che a tale risorsa accedono direttamente per soddisfare i loro bisogni, ma che rispondono a una domanda non necessariamente localizzata e potenzialmente globale. Il consumo di un bene, sia per produrre direttamente utilità che per produrre altri beni, in qualche modo *esporta* pressioni su risorse idriche localizzate altrove attraverso le complesse interdipendenze, spesso globali, che strutturano le filiere di produzione.

L'integrazione di modelli economici con informazioni sull'uso dell'acqua consente una prima interessante analisi della *struttura* del *water footprint* globale sia per quanto riguarda la sua composizione settoriale sia per quanto riguarda la sua composizione geografica. La costruzione di un modello dell'economia e degli scambi globali permette di riclassificare l'acqua dai settori/paesi che la prelevano dall'ambiente ai settori/paesi che la utilizzano direttamente o indirettamente per sostenere i loro consumi, ricostruendo i flussi di acqua "virtuale" incorporata nei beni scambiati attraverso il commercio e le catene del valore globali.

Nell'ambito di una ricerca svolta dal Dipartimento di Scienze per l'Economia e l'Impresa finanziata dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dei Progetti di Rilevante Interesse Nazionale¹ è

¹ National Recovery and Resilience Plan (NRRP), Missione 4, Componente 2, Investimento 1.1, Bando No. 104 pubblicato il 2.2.2022 dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU – A envi-

stata quantificata l'impronta idrica globale utilizzando il World Input Output Database (WIOD),² un modello multiregionale dell'economia mondiale integrato con informazioni dettagliate sull'uso dell'acqua a scopi produttivi.³ I prelievi globali di acqua dall'ambiente, disaggregati per settore produttivo e risorsa idrica utilizzata, sono riassunti nella tabella 1.

Tabella 1. *Prelievi di acqua dall'ambiente per tipologia di acqua e settore produttivo (Mm³, 2014)*

	Verde	Blu	Grigia	Totale	Quota verde
Agricoltura	10.670.478	1.292.854	1.094.782	13.058.115	81.7%
Altri settori	0	1.929.655	1.130.631	3.060.286	0.0%
Totale	10.670.478	3.222.509	2.225.413	16.118.400	66.2%
Quota agricoltura	100%	40.1%	49.2%	81.0%	

Elaborazioni su dati WIOD

Considerando questi dati l'agricoltura risulta essere la principale responsabile dei prelievi di acqua dall'ambiente (circa per l'81%), come con una certa superficialità viene ripetuto nei report delle organizzazioni internazionali che affrontano il problema delle risorse idriche (Nazioni Unite, 2024). Quello che in genere si dimentica di sottolineare è che l'acqua prelevata per scopi produttivi dall'agricoltura è per la maggior parte (81,7%) acqua *verde*, cioè l'umidità naturale dei suoli che viene utilizzata dalle coltivazioni. Si tratta di una risorsa idrica che, in assenza di agricoltura, non potrebbe essere utilizzata: l'agricoltura mette in circolazione nel sistema produttivo mondiale ben il 66,2% dell'acqua destinata a soddisfare i bisogni umani.

Le altre due componenti delle risorse idriche globali vengono contrassegnate rispettivamente dai colori *blu* e *grigio*. Entrambi questi

ronmentally extended Rural-Urban model to study the Ecosystems-Economy-Society nexus (RUEESnexus) – n. 2022Z879W3 - Grant Assignment Decree No. 967.

² <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data-providers-and-partners/world-input-output-database-wiod>.

³ Dettagli sulla metodologia utilizzata possono essere trovati in Sturla et al. (2023).

prelievi riguardano acque superficiali (fiumi, laghi) e sotterranee disponibili per le attività umane. Mentre la componente blu riguarda i prelievi netti di acqua dolce, l'acqua grigia è una componente calcolata, corrispondente alla quantità di acqua dolce necessaria per diluire fino a un livello qualitativo compatibile con nuove utilizzazioni le acque reflue restituite dalle attività produttive ai corpi idrici.

Fin qui abbiamo considerato i settori produttivi nel loro ruolo di "estrattori". Ma integrando i dati idrologici in un modello multiregionale dell'economia globale e tenendo conto degli scambi di merci tra settori e tra paesi, è possibile riclassificare l'acqua prelevata globalmente riassegnandola ai settori "utilizzatori" diretti e indiretti. È quanto viene fatto nella tabella 2.

Tabella 2. *Utilizzazioni di acqua per tipologia e settore produttivo (Mm³, 2014)*

	Agricoltura	Altri settori	Totale	Quota agricoltura
Verde	4.883.423	5.787.056	10.670.478	45.8%
Blu	760.946	2.461.563	3.222.509	23.6%
Grigia	529.953	1.695.460	2.225.413	23.8%
Totale	6.174.321	9.944.079	16.118.400	38.3%
Quota verde	79.1%	58.2%	66.2%	

Elaborazioni su dati WIOD

Oltre il 50% di acqua verde è adesso assegnata a settori produttivi non agricoli (in primo luogo l'industria alimentare) che la acquistano incorporata nei beni prodotti dall'agricoltura. La principale fonte di acqua per l'agricoltura rimane l'acqua verde (quasi per l'80%), mentre il settore agricolo rappresenta poco meno di un quarto delle utilizzazioni di acqua blu e grigia. Guardando al totale delle risorse idriche l'agricoltura *utilizza* effettivamente solo circa il 38% delle risorse prelevate dall'ambiente.

Il *water footprint* è una misura fisica di quanta acqua viene prelevata dall'ambiente ma nulla dice relativamente alle condizioni in cui viene prelevata, in particolare riguardo alle pressioni che l'attività umana esercita sulle risorse disponibili. Tralasciando l'acqua verde, che non è

oggetto diretto delle azioni di gestione, è evidente che le fonti di acqua dolce *blu* costituiscono una risorsa sicuramente *rinnovabile* ma evidentemente *limitata*. L'impatto dei prelievi per usi produttivi, di conseguenza, può essere diverso a seconda se essi avvengano in condizioni di abbondanza o di scarsità, sia essa di origine fisica, per le caratteristiche della risorsa, sia sociale, per assenza di infrastrutture e meccanismi istituzionali che la rendono disponibile.

Nella tabella 3 la misura *fisica* del *water footprint* globale viene confrontata con due misure ponderate che includono solamente l'acqua prelevata in condizioni di scarsità rispettivamente fisica (SWF) oppure sia fisica che sociale (SoSWF), secondo la metodologia proposta da Ohlsson (2000).

Tabella 3. *Water footprint e scarsità (Mm³)*

	Agricoltura	Altri settori	Totale	Quota agricoltura
WF	6.174.321	9.944.079	16.118.400	38.3%
SWF	844.277	2.877.868	3.722.146	22.7%
SoSWF	997.864	3.458.861	4.456.726	22.4%

Elaborazioni su dati WIOD

Se consideriamo solo l'acqua estratta in condizioni di scarsità l'impronta idrica diminuisce. Come si può notare i *driver* sociali possono aggravare la scarsità al di là delle limitazioni fisiche, a causa di una gestione assente o carente di una risorsa che ha le caratteristiche di un *common*, il cui uso non può essere regolato solo attraverso decisioni decentrate, ma richiede un coordinamento tra gli attori per una gestione ottimale. Passando dal WF volumetrico a quello che tiene conto di scarsità sia fisica che sociale la quota dell'agricoltura diminuisce ulteriormente: questo perché l'agricoltura in genere preleva l'acqua blu, come è naturale, dove questa è abbondante, per coprire i periodi di stress idrico delle colture.

La sovrapposizione della variabilità geografica nella disponibilità delle risorse idriche alla struttura del sistema economico globale, con i suoi flussi di commercio, restituisce quella che potremmo chiamare la mappa delle *pressioni* sulle risorse idriche. Nella figura 1, sempre sulla

base dei dati WIOD, viene proposta una rappresentazione globale (sia pure incompleta) di quanto le attività umane, nei diversi paesi, interferiscano con i cicli idrologici naturali delle risorse di acqua blu, la cui scarsità è oggetto delle politiche di gestione.

Nelle due mappe della figura 1 vengono rappresentate, rispettivamente, l'intensità idrica delle produzioni realizzate dai paesi, espressa in m³ di acqua (diretta e indiretta) per dollaro di produzione (pannello superiore) e un indice di scarsità calcolato in base alla misura di WF estesa alle scarsità fisica e sociale (pannello inferiore).

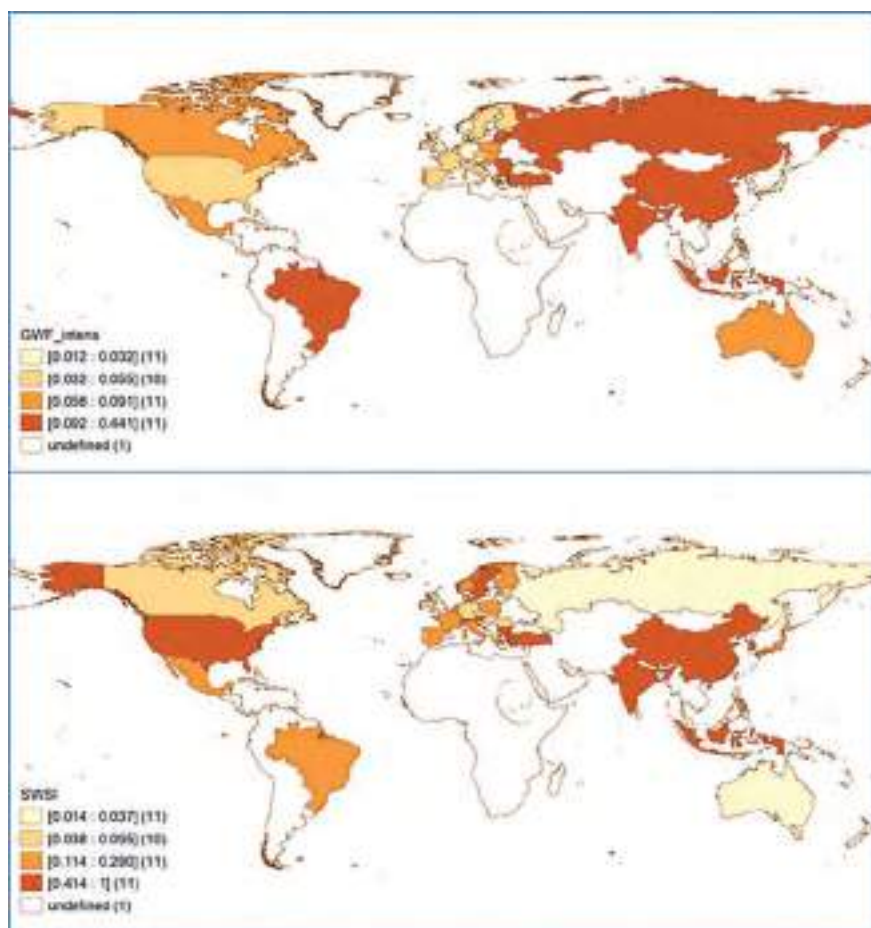


Figura 1. *Intensità idrica della produzione e pressioni sulle risorse idriche (Sturla et al., 2023).*

La retinatura esprime l'intensità dei due indicatori nei paesi per i quali sono disponibili dati disaggregati. Come si vede ci sono alcuni paesi che producono con alta intensità di acqua in un contesto di elevata scarsità: ad esempio Cina, India, Indonesia, Turchia. Si tratta di paesi che sono "importatori netti" di pressioni sulle risorse idriche che vengono realizzate per sostenere consumi collocati altrove. L'Italia, viceversa, è un "esportatore" di pressioni sulle risorse idriche: è stato calcolato che l'84% del WF globale dei consumi italiani eserciti le sue pressioni su risorse idriche scarse di altri paesi (Sturla et al., 2023).

Nel caso dell'Africa, un continente per cui manca il dato disaggregato per paese nella banca dati WIOD, ci possiamo aspettare due situazioni: paesi con elevata scarsità che però producono beni a basso contenuto idrico e paesi ad elevata disponibilità che con ogni probabilità importano pressioni sulle loro risorse idriche verdi e blu.

Come misurare correttamente la pressione sulle risorse idriche

Questa panoramica sull'impronta idrica globale ha dato un'idea preliminare delle complessità delle interazioni tra uomo e sistema delle risorse idriche che possono essere esplorate integrando modelli economici con informazioni idrologiche. La scala globale di analisi, tuttavia, sconta inevitabilmente non solo un problema di insufficienza ma anche di aggregazione delle informazioni a una scala geografica (ad esempio l'intero paese) che non è adeguata a cogliere tutta la complessità del problema della scarsità idrica. Nella letteratura sul tema la stessa di ponderazione del WF per tenere conto della scarsità, si basa in genere su metodi indiretti che non sempre riescono a rappresentare adeguatamente il fenomeno.⁴ I dati presentati fino ad ora, inoltre, sono sempre medie annuali. Ma il sistema idrologico presenta una considerevole variabilità sia inter-annuale che intra-annuale delle disponibilità di risorsa.

Alcuni risultati di un modello idroeconomico costruito per la Toscana possono illustrare quanto questi aspetti siano rilevanti (Rocchi

⁴ Ad esempio, il *water scarcity index* (WSI) proposto da Pfister e colleghi è una trasformazione logaritmica del rapporto tra prelievi e disponibilità in un determinato paese (Pfister et al., 2009).

et al., 2024; Sturla e Rocchi, 2024). In questa analisi la pressione sulle risorse idriche è stata misurata attraverso un nuovo indicatore, che corregge alcune delle limitazioni degli indicatori standard proposti in letteratura. L'*Extended Water Exploitation Index* (EWEI) è costituito dal rapporto medio annuo tra la domanda *estesa* di acqua, cioè inclusiva dei prelievi (al netto delle restituzioni) di acqua blu e della corrispondente domanda di acqua grigia, e una *offerta fattibile* di acqua che corregge la disponibilità naturale (ruscellamento delle acque superficiali, ricarica delle acque sotterranee) tenendo conto di una serie di vincoli di natura ambientale (ruscellamento minimo nei corpi idrici superficiali, livello non decrescente delle acque sotterranee), tecnica (come ad esempio invasi artificiali) e istituzionale (sistema delle concessioni).

Una stima annuale aggregata indica che il sistema produttivo della Toscana utilizza il 23,6% delle risorse disponibili. Facendo un'ipotesi estremamente prudente (soglia al 20%) potremmo considerare la Toscana in una condizione di scarsità *moderata*. In realtà, se questo dato venisse utilizzato secondo le metodologie standard internazionali, rileveremmo che la Toscana non ha problemi di scarsità idrica. Ma è davvero così?

Il grafico proposto nella figura 2 permette alcune considerazioni.

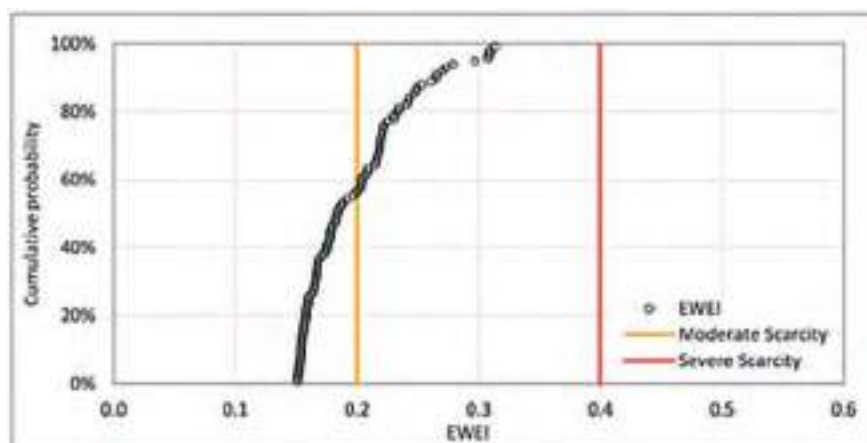


Figura 2. Variabilità interannuale dell'indice EWEI in Toscana (Sturla e Rocchi, 2024).

Il modello economico della Toscana è stato integrato con un vero e proprio modello idrologico che riproduce la variabilità naturale delle risorse idriche regionali. Inoltre viene anche considerato che anche il fabbisogno di acqua delle attività produttive cambia nel tempo: in anni più siccitosi l'agricoltura preleva più acqua per l'irrigazione, mentre i fabbisogni di acqua grigia crescono per la diminuzione naturale del ruscellamento nei corpi idrici.

Nel grafico la funzione cumulata di probabilità è stata ottenuta con la simulazione di cento anni di variabilità idrologica e mostra che in circa la metà degli anni l'EWEI aggregato toscano rimane sotto la soglia di scarsità. Inoltre, anche negli anni maggiormente critici, l'EWEI rimane sempre ampiamente al di sotto della soglia di scarsità classificata come "severa".

Il modello toscano è inoltre *multi-scala*, permettendo di generare risultati non solo a livello regionale ma anche a livello subregionale, per tutti i sistemi locali del lavoro (SLL) della Toscana.⁵ Questo permette di verificare cosa si nasconde sotto l'indice aggregato a livello regionale e di valutarne l'efficacia nel misurare la scarsità idrica.

La figura 3 mostra la variabilità geografica della domanda e dell'offerta annuale di acqua in Toscana. Come si vede in alcuni SLL esiste un

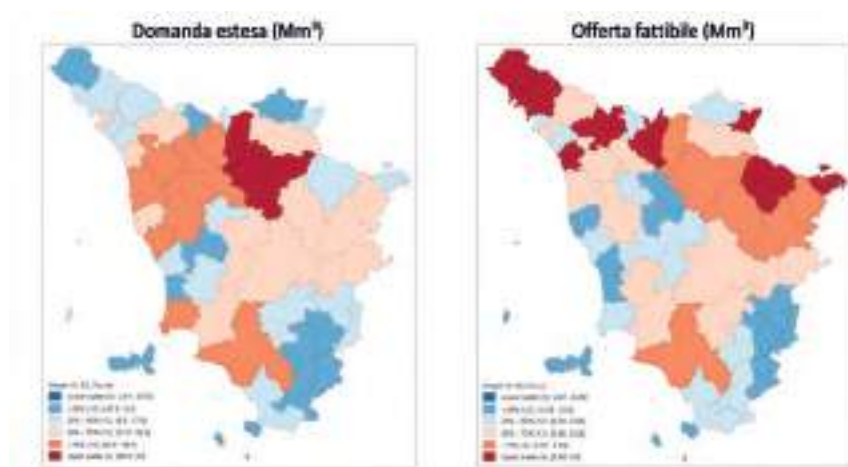


Figura 3. *Variabilità geografica di domanda e offerta di acqua in Toscana (Sturla e Rocchi, 2022).*

⁵ Un SLL è un gruppo di comuni costruito in modo da autocontenere per quanto possibile la domanda e l'offerta di lavoro (movimento dei pendolari).

mismatch strutturale tra fabbisogni e disponibilità già quando si guarda al dato medio annuo. Ma un ulteriore aspetto che deve essere considerato per ottenere una rappresentazione completa del problema della scarsità idrica è la variabilità che la domanda e l'offerta di acqua mostrano *all'interno di ogni singolo anno*. È evidente, infatti, come i mesi estivi, durante i quali si realizzano i più importanti picchi di domanda, sono anche quelli nei quali viceversa l'offerta di acqua si riduce, soprattutto nel caso dei corpi idrici superficiali, generando le ben note situazioni di criticità. Tenendo conto della variabilità intra-annuale dell'offerta, che è stata modellata separatamente per ciascun SLL, e della diversa composizione della loro economia, che influenza la variabilità intra-annuale della domanda, è stato possibile utilizzare il modello per calcolare delle soglie di scarsità *endogene* alla struttura del sistema idroeconomico toscano. In altre parole, è stato possibile calcolare per ogni SLL il valore dell'EWEI *annuale* che, data la variabilità idrologica naturale, garantisce che in nessun momento dell'anno la domanda estesa di acqua sia superiore all'offerta fattibile.

La figura 4 mostra i risultati di questa elaborazione, mettendo a confronto due misure della soglia di scarsità endogena (con o senza gestione ottimale delle risorse idriche sotterranee) con l'EWEI medio calcolato per ciascun SLL. Il grafico evidenzia una forte eterogeneità a livello territoriale,

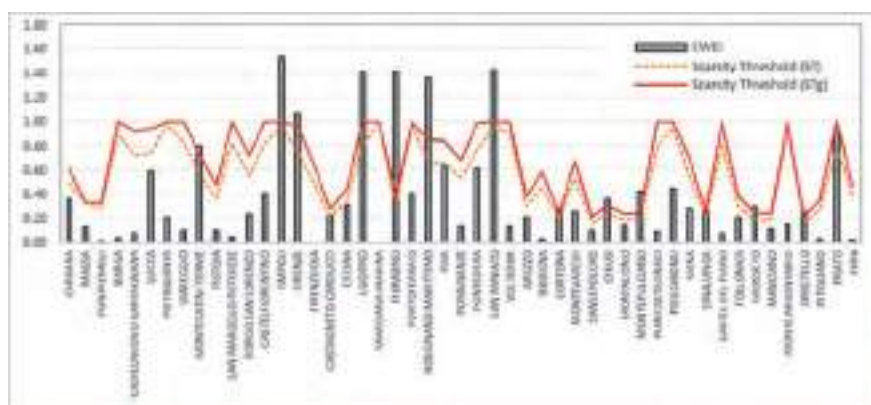


Figura 4. Soglie endogene di scarsità e pressioni nei SLL toscani (Sturla e Rocchi, 2022).

con SLL il cui EWEI medio è abbondantemente sotto la soglia di scarsità ed altri, viceversa, che mostrano un evidente sbilanciamento delle pressioni rispetto all'entità delle risorse idriche. Non stupisce che tra questi ci siano sistemi locali urbani (Firenze, Livorno) o con una significativa presenza di attività produttive manifatturiere (San Miniato, Piombino, Empoli).

La figura 5 conferma questo risultato mostrando che il dato medio rassicurante per tutta la Toscana, nasconde come di fatto in alcuni SLL

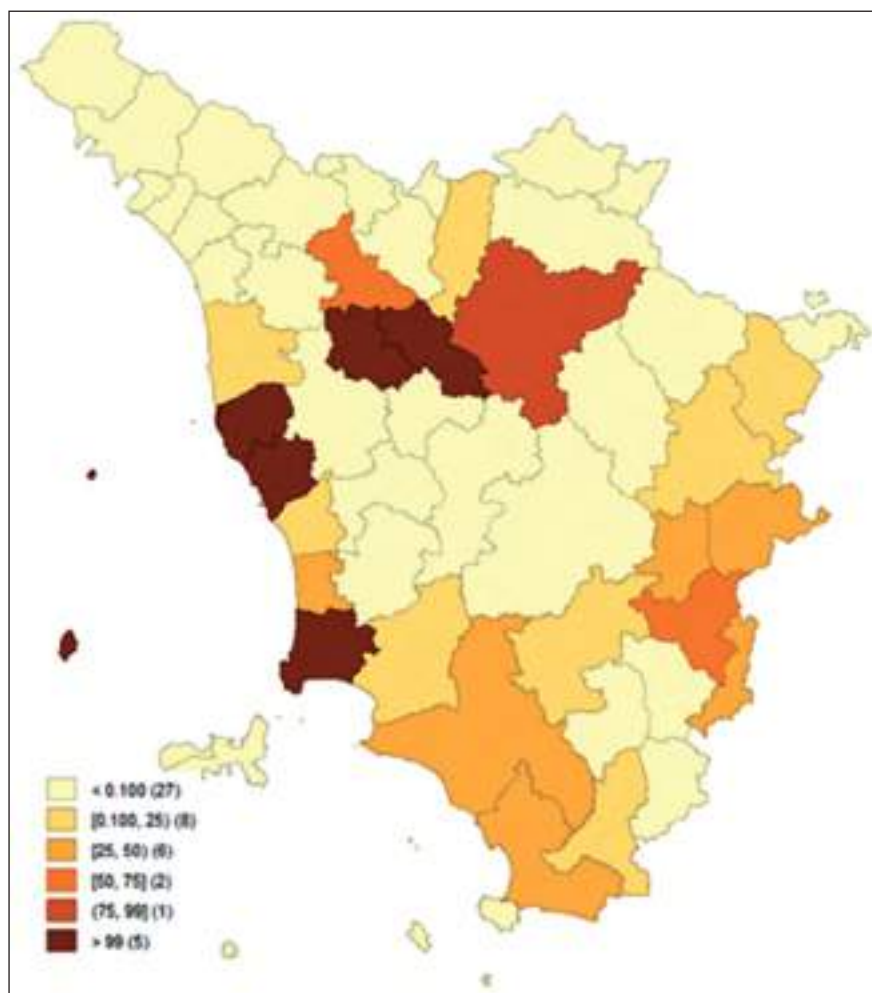


Figura 5. *Frequenza di anni critici nei SLL della Toscana (Sturla e Rocchi, 2022).*

la soglia critica di scarsità venga superata spesso, in alcuni casi tutti gli anni, nonostante la variabilità inter-annuale.

L'utilità di modelli come quello sviluppato dal Dipartimento di Scienze per l'Economia e l'Impresa dell'Università di Firenze è infine confermata da un'ultima elaborazione, i cui risultati sono presentati nella figura 6. L'integrazione di un modello della variabilità idrologica permette infatti di simulare non solo l'impatto di mutati scenari

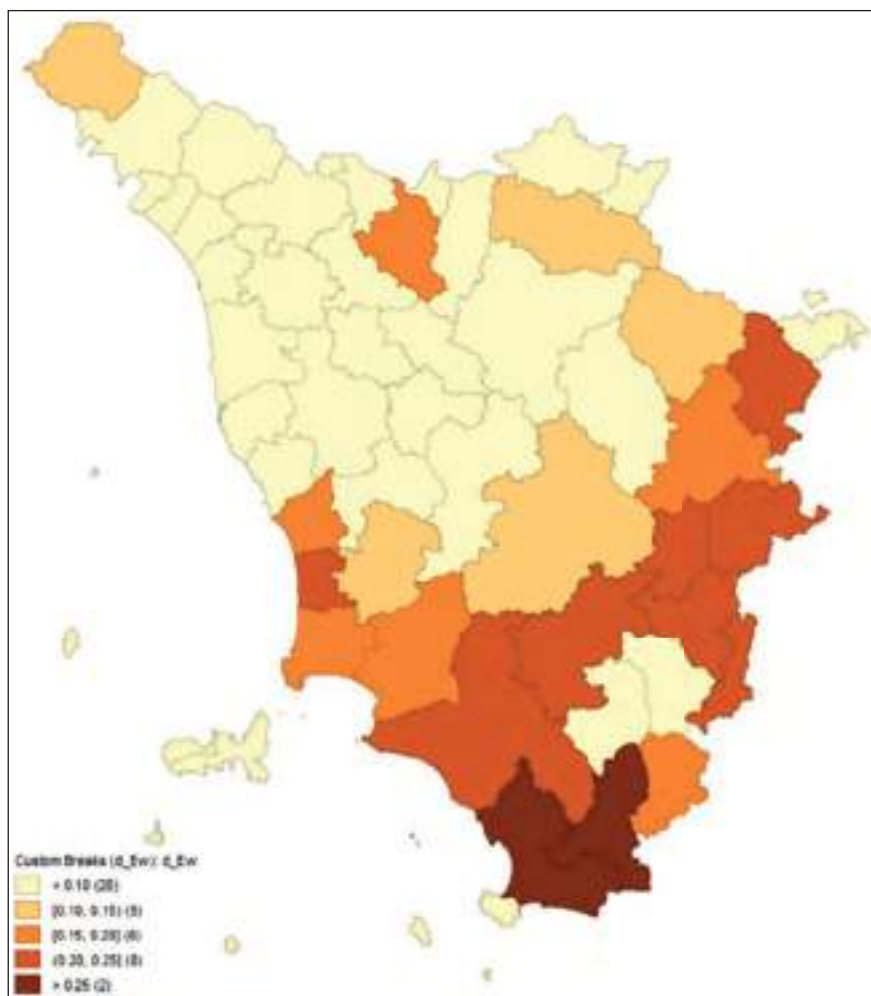


Figura 6. *Variazione dell'indice EWEI con cambiamento climatico (Sturla e Rocchi, 2022).*

macroeconomici sulle pressioni che le attività produttive esercitano sulle risorse, ad esempio per l'aumento delle esportazioni, o per la crescita del settore turistico, che in alcune zone della Toscana costituisce uno dei settori trainanti dell'economia. È possibile anche valutare il potenziale effetto di scenari di mutamento del regime idrologico, ad esempio, in conseguenza del cambiamento climatico.

Nella figura 6 viene rappresentata la variazione percentuale dell'EWEI medio annuo dei SLL in uno scenario di cambiamento climatico che riflette le più recenti proiezioni a medio termine sulla entità e variabilità delle precipitazioni effettuate con riferimento alla Toscana. Come si vede il possibile impatto è differenziato secondo un evidente gradiente nord-sud.

Due sono i principali effetti di questo ipotetico scenario sulla gestione delle risorse idriche in Toscana. Un aumento della pressione media e un aumento della variabilità inter-annuale del bilancio idrologico.

Azioni per l'adattamento

La scarsità idrica è un fenomeno essenzialmente *locale* nella sua manifestazione concreta ma si sviluppa guidato da *driver* che operano a diverse scale, non esclusa quella globale, attraverso lo scambio di merci tra settori, territori e stati. Solo una visione di sistema, capace di integrare le conoscenze sul sistema idrologico nella sua natura fisica con quelle relative ai suoi rapporti con le attività umane, permette di apprezzare la complessità del problema e offrire informazioni utili per definire adeguate azioni di gestione.

Al di là delle interdipendenze globali, l'esempio della Toscana mostra che anche in una economia regionale le interdipendenze tra attività produttive e territori rende estremamente complesso e diversificato l'impatto delle attività umane sulle risorse idriche. Le soluzioni adottate per l'adattamento alle situazioni di scarsità trasmettono infatti i loro effetti a tutto il resto dell'economia.

In una regione come la Toscana, dove l'offerta naturale annuale sarebbe in teoria più che sufficiente a coprire il fabbisogno complessivo di acqua, la prima azione nella gestione della scarsità sta negli interventi di regolazione delle acque superficiali. Le risorse idriche sotterranee,

infatti, offrono di per sé uno strumento naturale di regolazione dell'offerta di acqua, costituendo una sorta di *buffer stock* che negli anni più piovosi accumula risorse che possono supplire alle carenze degli anni più siccitosi. Una adeguata regolamentazione permette di sfruttare questa capacità mantenendo la stabilità di questa risorsa nel lungo periodo. Più difficile viceversa è sfruttare efficacemente l'offerta di acqua rappresentata dai corpi idrici superficiali: questo richiede investimenti (invasi, interconnessioni tra territori) per trattenere le risorse nei mesi di eccesso di offerta e redistribuirle nei mesi di deficit idrico, indirizzandole verso i territori che, per offerta naturale e per natura del sistema produttivo, sono maggiormente soggette a situazioni critiche. Regolare l'offerta intra-annuale di acque superficiali innalza la soglia critica dei territori (aumentando l'offerta nei mesi critici), oltre ad avere un impatto positivo in termini di diminuzione dei danni negli anni con eccesso di piovosità. Modelli idro-economici integrati come quelli presentati qui permettono una valutazione dei benefici *economici* degli investimenti in opere di regolazione effettuate in specifici territori che tenga conto dell'impatto sull'intera economia regionale.

In un contesto economico avanzato come quello italiano, l'agricoltura non rappresenta il principale utilizzatore di acqua a scopi produttivi. Tuttavia, per le sue modalità di impiego dell'acqua, concentrato nei mesi critici e con maggiore intensità proprio negli anni più secchi, può costituire un elemento di criticità in specifici territori.

In agricoltura un importante ruolo lo possono giocare sicuramente le innovazioni agronomiche capaci di migliorare l'utilizzazione della naturale umidità del suolo (acqua verde), aumentando la capacità del terreno di trattenere l'umidità creata dalle precipitazioni, con un effetto positivo anche sul servizio ecosistemico di regolazione idrogeologica. La ricerca agronomica mostra inoltre che anche l'efficienza nell'uso dell'acqua a scopi irrigui ha ancora molti margini di miglioramento. Innovazione tecnologica e assistenza tecnica costituiscono opportune azioni di gestione della risorsa, portando a una diminuzione della domanda estesa di acqua per unità di prodotto. Questo in linea di principio potrebbe alzare la soglia critica, riducendo le situazioni di rischio di eccesso di sfruttamento della risorsa. Non bisogna tuttavia dimenticare che nell'uso decentrato delle risorse ambientali, innovazioni che aumentano l'efficienza hanno sempre un effetto *rebound*: l'acqua "li-

berata” dall’efficientamento viene ben presto destinata ad altri scopi per una normale dinamica economica, mantenendo di fatto immutata l’utilizzazione totale. È come se il costo dell’acqua diminuisse rispetto a quello di altri input. Per questo è necessario introdurre un ben calibrato sistema di prezzi dell’acqua, da applicare ai prelievi per scopi produttivi, che ne possa rappresentare in modo adeguato la scarsità.

Bibliografia

- Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. *The Water Footprint assessment manual*. London-Washington: Earthscan. 2011. https://waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessment-Manual_English.pdf
- Nazioni Unite. *L’acqua per la prosperità e la pace Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2024*. 2024. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952_ita
- Ohlsson L. *Water Conflicts and Social Resource Scarcity*. Physics and Chemistry of the Earth (B) 2000;25(3):213-220. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00006-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00006-X).
- Pfister S., Koehler A., Hellweg S. *Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA*. Environmental Science and Technology 2009;43(11):4098-4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Rocchi B., Viccaro M., Sturla G. *An input-output hydro-economic model to assess the economic pressure on water resources*. Bio-Based and Applied Economics 2024;13(2):203-217. <https://doi.org/10.36253/bae-14957>
- Sturla G., Ciulla L., Rocchi B. *Natural and social scarcity in water Footprint: A multiregional input-output analysis for Italy*. Ecological Indicators 2023;147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109981>.
- Sturla G., Rocchi B. *An interregional Input-Output model with spatiotemporal hydrological variability. The case of Tuscany*. Working Paper DISEI – Economics. 2022;26. https://www.disei.unifi.it/upload/sub/pubblicazioni/repec/pdf/wp26_2022.pdf.
- Sturla G., Rocchi B. *Effects of hydrological variability on the sustainable use of water in a regional economy. An application to Tuscany*. Environmental and Sustainability Indicators 2024;24. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100488>.
- UNESCO, UN-Water. *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris: UNESCO. 2020.

doc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en (consultato il 22 settembre 2023).

United Nations. *Conference on the midterm comprehensive review of the implementation of the objectives of the international decade for action “water for sustainable development”, 2018-2028. Summary of proceedings by the President of the General Assembly*. New York: United Nations. 2023. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-05/FINAL%20EDITED%20-%20PGA77%20Summary%20for%20Water%20Conference%202023.pdf> (consultato il 22 settembre 2023).

WMO. *State of global water resources 2021*. Geneva: World Meteorological Organization publication board. 2022. <https://library.wmo.int/records/item/58262-state-of-global-water-resources-2021#.Y4XDeuzMJ0J> (consultato il 22 settembre 2023).

Interdipendenze tra sistema economico e risorse idriche

L'utilizzazione dell'acqua genera un quadro di interdipendenze complesse tra attività umane e sistema idrologico. Mentre i fabbisogni riflettono una domanda sempre più globale di beni e servizi, i prelievi si esercitano su un sistema di risorse variabile nel tempo ed essenzialmente localizzato. Modelli del sistema economico estesi alle risorse ambientali possono fornire valutazioni utili alla progettazione di politiche efficienti nella gestione dell'acqua, anche in un quadro di cambiamento climatico.

Parole chiave: impronta idrica; scarsità idrica; flussi idrici virtuali; analisi input-output.

The Interdependencies Between Water Resources and the Economy

Water use generates a system of complex interdependence between human activities and the hydrological system. While water uses reflect an increasingly global demand for goods and services, withdrawals are exercised on a system of resources providing a localized and variable supply. Models of the economic system extended to environmental resources can provide useful insights for designing efficient policies in water management, even in a climate change context.

Keywords: water footprint; water scarcity; virtual water flows; input-output analysis.

GIORGIO ROTH

*Cambiamento climatico, idrologia
e gestione delle risorse idriche*

*A migliaia sono vissuti senza amore,
non uno senz'acqua.*
W.H. Auden

Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse idriche sono tre aspetti dello stesso tema, diversi ma fra loro intimamente collegati. Il primo aspetto non viene approfondito in questa sede. Qui si intende piuttosto indagare gli impatti del cambiamento climatico *in atto* sulla distribuzione dell'acqua sul pianeta Terra e sul suo utilizzo come risorsa, giungendo in questo modo a influenzare la vita quotidiana di ognuno di noi e a suscitare apprensione sui potenziali effetti futuri.

La trattazione potrebbe trovare utile avvio da numerosi differenti punti di partenza. Ho scelto di partire da una immagine pittorica del ciclo dell'acqua (figura 1), che descrive il movimento continuo dell'acqua sulla superficie della Terra e al di sopra e al di sotto di essa e che, forse, ci riconnette alle lezioni della scuola primaria. L'immagine consente l'agevole individuazione sia dei principali serbatoi nei quali l'acqua è accumulata in forma liquida (laghi, mari e oceani), solida (ghiacciai, calotte polari) e vapore (atmosfera), sia dei principali processi (flussi) che determinano il suo spostamento da un accumulo all'altro: evaporazione, traspirazione, condensazione, sublimazione, precipitazione, deflusso superficiale, infiltrazione e flusso sotterraneo.

nostri boschi per favorire, ad esempio, lo sviluppo dell'ulivo e del castagno; modificando la superficie del terreno attraverso terrazzamenti atti a sostenere lo sviluppo agricolo e l'infiltrazione delle acque di pioggia; ma anche promuovendo lo sviluppo urbano nelle poche zone pianeggianti, sottraendo via via spazio vitale al libero deflusso delle acque di piena, con le conseguenze a volte catastrofiche che oggi troppo frequentemente registriamo.

L'attività dell'uomo ha complessivamente raggiunto un impatto tale da essere in grado di influenzare le componenti del ciclo dell'acqua, siano esse accumuli o flussi che connettono diversi accumuli. Il cambiamento climatico, anch'esso effetto dell'uomo, interviene a modificare ulteriormente il quadro, determinando variazioni nella quantità e qualità della risorsa idrica disponibile e nella sua distribuzione nello spazio e nel tempo, con conseguenze negative potenzialmente rilevanti ai fini di un uso della risorsa conforme a quello attuale, che cioè prosegua con le infrastrutture disponibili senza chiedere cambiamenti radicali.

La connessione clima – idrologia – gestione delle risorse idriche e degli eventi estremi è riassunta nella figura 2. Le caratteristiche climatiche definiscono comportamenti medi su periodi temporali sufficientemente lunghi che successivamente, a scale spaziali e temporali minori, si traducono in componenti che danno origine ai diversi elementi costitutivi il ciclo idrologico descritto in precedenza: acqua in atmosfera, sulla superficie del suolo, nel sottosuolo, nei mari e negli oceani.



Figura 2. *La connessione clima – idrologia – gestione delle risorse idriche.*

Il motore principale del ciclo dell'acqua è il flusso di precipitazione che, nella sua componente liquida, dà immediatamente origine al deflusso superficiale e, attraverso il processo di infiltrazione, allo scorrimento sub-superficiale. La componente superficiale è anch'essa distinta in liquida e solida, ovvero le acque che sono catturate e trattenute in forma solida sulla superficie del terreno, a formare ghiacciai e calotte polari, che tanta importanza rivestono ai fini del cambiamento climatico e del suo impatto sulle risorse idriche. Abbiamo poi le acque sotterranee, che potremmo dividere fra vicine alla superficie del terreno, quindi potenzialmente utilizzabili, e profonde. Infine, le acque salate che costituiscono i mari e gli oceani.

I flussi e gli accumuli di acqua, essendo limitati in quantità e qualità, diventano poi risorsa quando sono utilizzati dall'uomo per molteplici scopi, fra loro frequentemente in competizione: approvvigionamento a scopi civili, industriali e agricoli, produzione di energia, controllo delle piene e delle siccità, allontanamento dei reflui, navigazione e usi ricreativi.

Nello schema semplificato di questa nota, cambiamento climatico significa sostanzialmente aumento della temperatura media. Nella figura 3 è presentato l'ormai famoso *hockey stick*, ovvero la storia temporale dell'andamento della temperatura media della superficie terrestre, che assume appunto un aspetto assai simile a quello delle mazze da hockey.

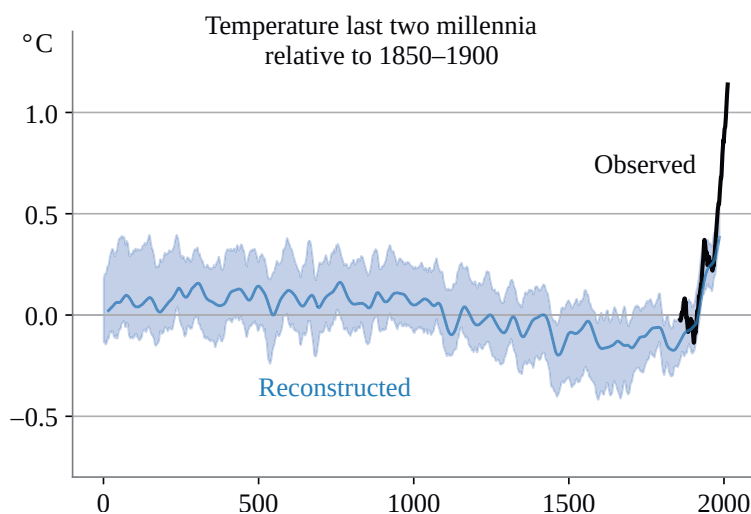


Figura 3. *Temperatura media sul pianeta Terra negli ultimi 2.000 anni (Wikimedia Commons).*

Come mostra il grafico, negli ultimi millenni, nell'Olocene, la temperatura si è mantenuta pressoché costante per poi assumere, a partire dal 1950 circa, una tendenza alla crescita che non si è ancora arrestata. La rapidità del cambiamento in un periodo temporale così ridotto, accelerazione mai verificatasi nella storia del nostro pianeta, è tale da suggerire l'ingresso in una nuova era: l'Antropocene, a ricordare come il cambiamento derivi dall'opera dell'uomo¹.

Storie temporali di molte altre caratteristiche della vita sulla Terra potrebbero essere presentate per confermare l'azione dell'uomo: produzione di energia, emissione di CO₂, metano e altri gas clima-alteranti in atmosfera ma anche crescita del prodotto interno lordo. Tutte le storie temporali e gli indicatori presentano un andamento temporale concorde a rinforzare l'idea che sia effettivamente l'attività umana a provocare l'aumento della temperatura media sul nostro pianeta.

Si modifica quindi il primo dei blocchi rappresentati nella figura 2, quello relativo al clima. A cascata, si modificano conseguentemente le diverse componenti del ciclo dell'acqua. A titolo di esempio, nella figura 4 è riportata la previsione al 2050², ottenuta tramite modello di cambiamento climatico, di come potrebbe cambiare il deflusso superficiale medio annuo, ovvero la portata idrica che defluisce nelle reti fluviali. Si deve sottolineare come il cambiamento sia ben lontano dall'essere uniforme nello spazio: in rosso sono rappresentate le zone che subiranno una diminuzione dei deflussi, in blu quelle che al contrario vedranno un loro aumento.

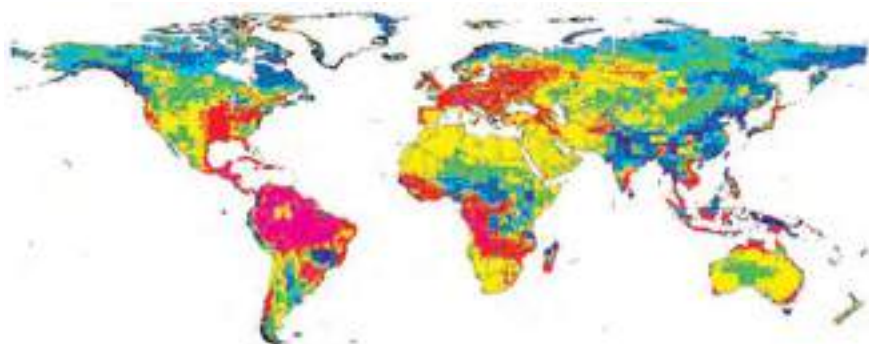


Figura 4. *Cambiamento del deflusso medio superficiale annuo al 2050 (Arnell, 1999).*

I modelli di cambiamento climatico, essendo appunto climatici, descrivono un comportamento medio futuro atteso. Non sono in grado di descrivere la dinamica del sistema, ovvero il reale andamento temporale a scala fine delle variabili che complessivamente definiscono il tempo atmosferico e le grandezze di rilievo nell'idrologia. Esiste invece una grande differenza fra un comportamento medio e quello che invece si realizza nei diversi mesi, giorni e ore. Se, per esempio, fossimo interessati agli eventi estremi di piena, avrebbe rilievo quello che accade alla scala oraria o, al più, per sistemi di rilevante dimensione areale, alla scala giornaliera mentre nessuna informazione potrebbe essere dedotta dalla conoscenza della precipitazione media annua.

Anche se un modello di cambiamento climatico non è in grado di scendere al livello di dettaglio spazio-temporale necessario per descrivere i processi idrologici, alcune importanti informazioni medie possono essere ottenute: principalmente temperatura e umidità in atmosfera e nel suolo, mentre la precipitazione, ovvero l'informazione regina per gli studi idrologici, è ottenuta in forma parametrica a partire dalle variabili modellate.

Se cambia il clima – se cambia la temperatura media – cambiano le componenti del ciclo idrologico sia per quanto riguarda gli accumuli sia per quanto riguarda i flussi che li connettono spostando acqua da un accumulo all'altro: evaporazione, traspirazione, condensazione, sublimazione, precipitazione, deflusso superficiale, infiltrazione e flusso sotterraneo. Cambia quindi la disponibilità di acqua nello spazio e nel tempo, ovvero cambia l'acqua come risorsa che deve essere gestita a garanzia del nostro benessere e della crescita economica³.

La questione diventa quindi: che impatto ha il cambiamento climatico sui processi idrologici e quindi sulla distribuzione spazio-temporale della risorsa idrica e infine sulla gestione delle risorse a garanzia del benessere della società? Può tutto proseguire nello schema *business as usual*?

L'incertezza nella previsione futura del cambiamento climatico è molto elevata. Non solo per quanto riguarda i limiti nella conoscenza dei processi fisici coinvolti e nella loro modellazione matematica e numerica ma anche perché il cambiamento dipenderà dalle strategie di mitigazione che verranno messe in atto. L'incertezza nelle scelte politiche future si aggiunge all'incertezza modellistica e non può che aumentare quando pretendo, come sto facendo, di prevedere cambiamenti e conseguenze alle scale spazio-temporali proprie dei processi

idrologici e della gestione dei sistemi idrici: non più medie annue su scale delle decine di km² ma giornaliere o orarie su dimensioni spaziali dell'ordine di un km².

Il tema qui trattato è quindi permeato da grande incertezza. Ciononostante, non possiamo permetterci di attendere per poi agire quando le conseguenze si manifestassero nella loro completezza: sarebbe certamente troppo tardi. Già oggi molti segnali osservati confermano le previsioni modellistiche: basti ricordare come anno dopo anno venga puntualmente superato il record di temperatura media annua sulla superficie terrestre. Il 2024 ha superato il record del 2023 che a sua volta ha superato quello del 2022!

L'immagine del ciclo dell'acqua di figura 1 consente di entrare un poco più in dettaglio a descrivere i possibili cambiamenti nelle componenti idrologiche⁴. Per fare questo partiamo dai flussi e specificatamente dall'evaporazione, che rappresenta il ritorno in atmosfera dell'acqua disponibile nei mari, negli oceani, sulla superficie delle terre emerse e nello strato più superficiale del suolo.

Un aumento nella temperatura determina immediatamente sia un aumento dei flussi evaporativi verso l'atmosfera – in presenza di elevata disponibilità idrica, e.g., da mari e oceani – sia una maggiore capacità di quest'ultima a trattenere in forma vapore maggiori quantità di acqua. Questa capacità è descritta dall'equazione di Clausius-Clapeyron (Émile Clapeyron, 1834, e Rudolf Clausius, 1850), forse una delle più citate nelle conferenze sul cambiamento climatico e i suoi impatti: per ogni incremento di temperatura di 1 °C l'atmosfera è in grado di trattenere il 7% in più di acqua in forma vapore.

Una quantità certamente rilevante se immaginiamo le conseguenze, in termini di volumi idrici accumulati in atmosfera, per esempio alla fine di un'estate particolarmente calda. L'arrivo di fronti freddi autunnali forzerà il successivo ritorno sulla superficie della Terra, sotto forma di precipitazione, dei volumi idrici accumulati in atmosfera. Complessivamente, si determina un maggior numero di eventi intensi di precipitazione che provocano un aumento di frequenza e intensità delle piene fluviali e torrentizie con gli associati fenomeni di inondazione, che colpiscono territori fragili, sempre più esposti al rischio.

Non altrettanto può essere detto per i volumi medi annui di precipitazione o per quelle aree per le quali il contenuto di umidità in atmo-

sfera dipenda dalle condizioni di umidità del suolo. Un incremento nella temperatura facilita i meccanismi di evaporazione e traspirazione da parte della vegetazione ma trova un limite nella disponibilità di acqua nel suolo le cui condizioni si spostano maggiormente verso situazioni siccitose, non più in grado di sostenere la vegetazione.

Emerge quindi un quadro in cui la precipitazione media annua tende a diminuire in alcune porzioni del pianeta e ad aumentare in altre, con una diversa ripartizione spaziale e temporale. La componente solida della precipitazione è quella che desta maggiore apprensione per una potenziale riduzione dell'immagazzinamento di acqua in forma solida nel periodo invernale. Quella che successivamente, in primavera e in estate, è in grado di contribuire significativamente al deflusso superficiale. Il mancato apporto della fusione di nevi e ghiacci corrisponde così, anche a parità di apporto medio annuo, a un trasferimento della risorsa dalle stagioni irrigue, primavera ed estate, alla stagione invernale, con conseguenze rilevanti per i deflussi nei corsi d'acqua pedemontani, sull'uso della risorsa e sull'instaurarsi di condizioni di siccità nei mesi estivi.

La progressiva riduzione della superficie coperta da neve e ghiaccio, conseguenza diretta di un aumento della temperatura, diminuisce inoltre la capacità della superficie terrestre a riflettere nello spazio una parte dell'energia solare incidente. Una diminuzione dell'albedo che implica il maggior assorbimento di energia incidente, sia in corrispondenza delle terre emerse sia dei mari, con ulteriore aumento della temperatura. Una retroazione positiva che si temeva potesse essere verificata anche per il vapore in atmosfera: l'incremento di temperatura provoca il maggiore assorbimento di acqua in forma vapore e la maggiore probabilità di formazione di sistemi nuvolosi che, a loro volta, aumentano l'effetto serra impedendo alla radiazione emessa dalla superficie terrestre di uscire dall'atmosfera. Almeno in questo caso si è invece verificato che è prevalente l'effetto schermo dovuto alle nuvole, che riduce anche la quota di energia entrante dallo spazio.

Per quanto invece è relativo alle acque sotterranee, gli acquiferi più profondi risentono in misura minore di quello che avviene sulla superficie terrestre e nel suolo mentre gli strati più superficiali risentono maggiormente di una maggiore precipitazione così come di un minore apporto.

Fra i molti altri aspetti che potrebbero essere sottolineati corre forse l'obbligo di ricordare l'incremento di livello del medio mare, destinato a salire per effetto congiunto della fusione di nevi perenni, ghiacciai e calotte polari e per l'aumento di volume conseguente a un aumento delle temperature delle acque di mari e oceani. Le conseguenze sono potenzialmente disastrose per le comunità costiere.

Una domanda che, a questo punto, dovrebbe sorgere spontanea è: ma dove si trova l'acqua presente sul pianeta Terra? E quanta di questa può essere impiegata per gli usi fin qui delineati? Dopo aver ricordato che la quantità complessiva è invariante e pari a $1,4 \times 10^{12}$ m³, l'acqua si trova per il 96% nei mari e negli oceani ed è quindi salata, non direttamente utilizzabile per la maggior parte degli usi. Trascurati anche i laghi salati e le acque sotterranee salate, le acque dolci costituiscono il 2,5% dell'acqua disponibile sulla terra: 1,7% sotto forma solida, 0,7% acque sotterranee dolci, 0,01% in laghi dolci, 0,001% in atmosfera e solo lo 0,0002% del totale scorre nei fiumi.

I cambiamenti climatici, siano essi naturali o antropici, non possono modificare l'acqua totale disponibile sulla Terra ma possono cambiare la ripartizione fra i diversi accumuli appena quantificati. Servirebbero trasferimenti quantitativamente difficilmente ipotizzabili per modificare significativamente la percentuale di acque salate, ma trasferimenti forse ipotizzabili potrebbero giungere a modificare le percentuali di acqua in atmosfera – con conseguente potenziale modifica della circolazione atmosferica e dei trasferimenti di energia ad essa associati – e le percentuali di acqua che defluisce sulla superficie terrestre e nei corsi d'acqua, frequentemente la risorsa primaria per la captazione di acque destinate al consumo umano, all'approvvigionamento industriale e irriguo. Nella nostra regione quasi il 100% delle acque captate dagli acquedotti ha origine superficiale.

Il ragionamento appena svolto ha carattere globale. Un unico numero rappresenta la risorsa globalmente disponibile sul pianeta. Questa però non è uniformemente distribuita e certe aree sono nettamente privilegiate rispetto ad altre. Scendendo dalla scala globale a quella dei continenti si nota come la precipitazione non sia uniformemente ripartita, così come varia fra un continente l'altro la porzione di precipitazione che ritorna all'atmosfera per evapotraspirazione. La differenza fra queste due quantità, precipitazione meno evapotraspirazione, potreb-

be essere assunta a rappresentare lo scorrimento superficiale, ovvero la quota parte che è disponibile per essere utilizzata. La stima ulteriore, anche se di larga massima, della quantità disponibile per ogni persona deve ora tenere conto della popolazione presente nei diversi continenti.

Scopriremmo così che la precipitazione passa da 1.650 mm/anno nel Sud America a 730 mm/anno in Europa a 670 mm/anno in Nord America; l'evapotraspirazione è di 1.070 mm/anno in Sud America, 410 mm/anno in Europa e 380 mm/anno in Nord America. La disponibilità idrica pro-capite è assai variabile: un sudamericano ha a disposizione 20.745 m³/anno, un europeo 2.100 m³/anno, un nordamericano 7.125 m³/anno, un africano 5.500 m³/anno e un asiatico 1.960 m³/anno. Un'ulteriore diminuzione di scala mostrerebbe le rilevanti differenze presenti all'interno dei continenti, dove troviamo zone desertiche e zone nelle quali la precipitazione media annua presenta valori di rilievo.

La disponibilità di acqua per i diversi fini dipende da come la risorsa si rende disponibile. Per valutare meglio questo aspetto possiamo fare riferimento alla seguente classificazione^{5, 6, 7}:

- *acqua verde*: la precipitazione sulla terraferma che non scorre né ricarica le falde acquifere, ma viene immagazzinata nel suolo o rimane temporaneamente sulla superficie del suolo o sulla vegetazione;
- *acqua blu*: acqua dolce superficiale e sotterranea; l'acqua contenuta in laghi, fiumi e falde acquifere;
- *acqua grigia*: un indicatore dell'inquinamento delle acque dolci, associato alla produzione di un prodotto lungo tutta la sua filiera.

Non potendo essere prelevata e convogliata tramite un acquedotto, l'acqua verde è disponibile unicamente per fini agricoli. Un'agricoltura non irrigua fa riferimento esclusivo a questa componente e, conseguentemente, non entra in competizione con gli altri usi della risorsa. La competizione è invece rilevante per l'acqua blu, che può essere captata, accumulata e trasportata anche a grandi distanze, il che la rende adatta a molteplici fini: agricoli, civili e industriali.

L'intensità nell'uso della risorsa può essere ottenuta sommando, per ogni fine, le tre componenti: verde, blu e grigia. Nel fare questo si deve ricordare che i concetti di acqua verde e acqua blu fanno riferimento ad aspetti quantitativi mentre l'acqua grigia si riferisce ad aspetti qualitativi e che la componente verde è, per le sue caratteristiche, utilizzabile uni-

camente in agricoltura. Globalmente, il 70% circa della risorsa idrica è destinato a fini agricoli, il 20% a fini industriali e il 10% a fini civili. Scendendo maggiormente in dettaglio, potremmo giungere a misurare l'impronta idrica [in $\text{m}^3/\text{anno}/\text{pro-capite}$] di ogni categoria di prodotto scoprendo così che la produzione industriale assorbe 65 m^3 all'anno per ogni persona, la produzione di cereali richiede $372 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$ mentre la quota di consumo domestico è pari a $53 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$.

Sommando le impronte idriche associate ai consumi che avvengono all'interno delle nazioni otteniamo l'impronta idrica media dei loro cittadini. I valori possono essere anche molto differenti fra loro: a fronte di una media globale pari a $1.240 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$, i cittadini statunitensi hanno un'impronta pari a 2.842, i cinesi 1.071 e gli italiani $2.330 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$. L'impronta idrica italiana è elevata: a fronte di un contributo alla popolazione mondiale inferiore all'1%, l'Italia ha una impronta idrica che si avvicina al 2%. Questo valore è influenzato dall'elevato tenore di vita, misurabile anche attraverso il prodotto interno lordo, e dalla collocazione geografica, che favorisce un tasso di evapotraspirazione elevato dell'acqua usata in agricoltura.

Non tutta l'impronta idrica associata a una nazione impatta sulle risorse idriche di quella nazione. In parte, attraverso la globalizzazione dei commerci, l'acqua "viaggia" da una nazione all'altra, virtualmente associata ai prodotti, agricoli o industriali, che ha contribuito a crescere o realizzare. L'acqua necessaria a produrre una mela (70 litri) o un hamburger di manzo (2.500 litri) viaggia così virtualmente insieme al prodotto. Varcando le frontiere separa il paese produttore, quello che ha fornito la risorsa idrica, da quello consumatore, nel quale si registra l'impronta idrica.

Solo una parte dell'impronta idrica di una nazione ha quindi impatto su risorse che si trovano all'interno dei suoi confini (e.g., beni prodotti e consumati all'interno dei confini nazionali). Altre componenti, associate a beni importati, impattano su risorse estere, così come i beni esportati impattano sulle risorse idriche della nazione che li produce ma contribuiscono all'impronta idrica della nazione che li consuma. Ne segue una sostanziale dipendenza idrica internazionale: si stima che il 20% dell'uso globale di acqua non sia destinato alla produzione di prodotti per il consumo interno, bensì a prodotti destinati all'esportazione.

La globalizzazione dei commerci è complessivamente in grado di generare risparmio nell'uso delle risorse; ciò avviene quando la produ-

zione tende a essere localizzata nelle aree più opportune sotto il profilo della disponibilità delle risorse. I dati confermano che questo, almeno in parte, avviene: il risparmio globale di acqua derivante dal commercio di prodotti agricoli è stimato in 369×10^9 m³/anno, equivalente al 4% dell'impronta idrica globale.

Diversi Paesi riducono l'uso delle proprie risorse idriche nazionali tramite l'importazione di prodotti agricoli e industriali. L'Italia importa circa 101×10^9 m³/anno di acqua virtuale, una quantità pari a circa il 30% dell'impronta totale. Con riferimento alla sola componente agricola, l'Italia risparmia 54×10^9 m³/anno, ponendosi al terzo posto dopo Giappone e Messico.

Gli aspetti appena introdotti mostrano come i nostri consumi abbiano impatto su risorse idriche che solo parzialmente si trovano geograficamente vicine, consentendo un risparmio in termini globali e soprattutto in termini locali, ma suggerendo anche la nostra dipendenza da quanto avviene a risorse idriche che si trovano al di fuori dei nostri confini. In quest'ottica, il commercio globale diventa il legame lungo il quale cambiamenti climatici in aree da noi remote sono in grado di produrre effetti rilevanti sulla nostra vita quotidiana.

Le conseguenze del cambiamento climatico sono contrastate da azioni comunemente classificate in due categorie: mitigazione e adattamento. La prima, che assume una denominazione finalizzata a ricordare come siano a questo punto possibili solo azioni di contenimento dell'aumento delle temperature e non una completa invarianza climatica, contiene le azioni che tendono a contrastare il fenomeno alla radice attraverso una diminuzione della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Si tratta di azioni che riguardano effetti planetari e che, conseguentemente, non possono essere assunte a scala locale ma devono necessariamente interessare almeno la scala continentale. Il contrasto agli effetti del cambiamento climatico alla scala locale è demandato alle azioni di adattamento: non cercano di contenere l'aumento delle temperature ma ne limitano gli effetti negativi attraverso modifiche nell'uso della risorsa idrica, la creazione di riserve ulteriori e la riprogettazione dei sistemi idrici.

È di seguito presentato un elenco⁸, non esaustivo né particolarmente rigoroso, delle soluzioni di adattamento disponibili e più opportune a contrastare gli effetti del cambiamento climatico in corrispondenza dei principali usi della risorsa idrica: approvvigionamento idrico alla

scala comunale, irrigazione, approvvigionamento industriale e raffreddamento delle centrali elettriche, generazione di energia idroelettrica, controllo dell'inquinamento e gestione degli eventi intensi e delle inondazioni. Per alcune azioni sono presentati commenti sintetici. Le soluzioni non sono elencate in ordine di priorità o efficacia, l'ordinamento è possibile solo con riferimento a casi specifici.

Approvvigionamento idrico a scala comunale

- Aumentare il numero e la capacità degli invasi (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali e sociali);
- Prelevare di più dai fiumi e dalle falde acquifere (presenta potenziali impatti ambientali);
- Favorire il trasferimento inter-bacino (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Installare impianti di desalinizzazione (è costoso per l'elevato consumo di energia);
- Modificare le regole operative del sistema (probabilmente è un'opportunità limitata);
- Usare previsioni stagionali (sono sempre più affidabili);
- Introdurre disincentivi al consumo, ad esempio attraverso la tariffazione (è un'opportunità probabilmente limitata e necessita di un quadro istituzionale);
- Introdurre nuovi standard di utilizzo dell'acqua legalmente applicabili, ad esempio per gli elettrodomestici (presenta potenziali impatti politici ed è solitamente inefficiente in termini di costi);
- Aumentare l'uso di acqua grigia (è potenzialmente costoso);
- Ridurre le perdite delle reti (è potenzialmente costoso se sono chiesti livelli molto bassi, specialmente nei sistemi più datati);
- Sviluppare sistemi igienico-sanitari non basati sull'acqua (è forse troppo avanzato tecnicamente).

Irrigazione

- Aumentare la capacità della fonte (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Aumentare l'efficienza nell'uso (con la tecnologia o attraverso l'aumento dei prezzi);

- Aumentare la tolleranza della coltura alla siccità (l'ingegneria genetica è controversa);
- Cambiare i modelli di coltivazione (passare a colture che necessitano di meno o nessuna irrigazione).

Approvvigionamento industriale e raffreddamento delle centrali elettriche

- Aumentare la capacità delle fonti (è costoso);
- Usare acqua di bassa qualità (è sempre più diffuso);
- Aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua e il riciclaggio dell'acqua (l'aggiornamento degli impianti è costoso).

Generazione di energia idroelettrica

- Aumentare la capacità degli invasi (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Utilizzare previsioni meteo/stagionali (sono sempre più affidabili);
- Aumentare l'efficienza delle turbine e incoraggiare l'efficienza energetica (l'aggiornamento degli impianti è costoso).

Controllo dell'inquinamento

- Migliorare i sistemi di trattamento (è potenzialmente costoso);
- Ridurre il volume degli effluenti da trattare (ad esempio, addebitando gli scarichi);
- Gestire il bacino idrografico per ridurre il deflusso inquinante (richiede la gestione delle fonti diffuse di inquinamento).

Gestione degli eventi intensi e delle inondazioni

- Aumentare la protezione dalle inondazioni con nuove opere: argini, invasi, scolmatori... (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Gestire il bacino idrografico per ridurre gli apporti di piena (può essere efficace per contrastare eventi di modesta intensità e alta frequenza);
- Migliorare l'allerta e la diffusione/efficacia delle informazioni (presenta limiti nell'applicazione a corsi d'acqua minori);
- Frenare lo sviluppo nelle pianure alluvionali e nelle aree inondabili (presenta potenziali gravi problemi politici).

Nonostante la grande incertezza alla quale ho fatto riferimento più volte in questa nota, possono forse essere tentate alcune indicazioni di larga massima in merito all'intensità attesa dell'impatto del cambiamento climatico nei settori sopra identificati.

L'impatto sui sistemi di approvvigionamento idrico sarà prevedibilmente modesto. Questi sistemi sono posti frequentemente di fronte a cambiamenti rilevanti in tempi brevi: variazione nella popolazione servita, insediamento o dismissione di distretti industriali. La città di Genova ne è esempio: la crisi idrica dei primi anni Ottanta è superata sia per l'interconnessione dei sistemi idrici sia, purtroppo, per la dismissione di industrie idrovore e per la diminuzione della popolazione residente. Fattori che per la nostra città sono stati molto più impattanti del cambiamento climatico. Diverso è il caso del ponente ligure, qui l'impatto del cambiamento climatico sulla risorsa idrica disponibile potrebbe sommarsi alla crisi idrica che da decenni affligge quei territori in termini di frequenza degli episodi siccitosi, aggravati dalla crescita della pressione turistica e dall'insufficienza degli interventi strutturali sui sistemi acquedottistici.

L'impatto sul settore dell'agricoltura è purtroppo previsto rilevante. Abbiamo visto come questo settore sia quello che assorbe la maggior parte delle risorse idriche, anche se una quota significativa è sotto forma di acqua verde, non disponibile per altri usi. Il cambiamento climatico sembra purtroppo destinato a forzare l'agricoltura verso un maggior uso di acqua blu, con problemi di competizione diretta con usi civili e industriali. Se in alcune aree rimane aperto il problema nell'efficienza dell'irrigazione, i temi maggiormente sensibili sembrano quelli di un aumento della tolleranza della coltura alla siccità, ottenuto con interventi di ingegneria genetica, ovvero con un cambiamento nei modelli di coltivazione, potenzialmente rinunciando anche a colture ritenute caratteristiche.

L'impatto sull'approvvigionamento industriale e sul raffreddamento delle centrali elettriche sembra destinato a unirsi alle molte sollecitazioni che questo settore riceve, tendendo a mischiarsi e a confondersi con queste, lasciando probabilmente la preoccupazione maggiore all'approvvigionamento energetico.

Valutazioni simili possono essere svolte per il settore della produzione di energia da fonte idroelettrica, per il quale appaiono problematiche le misure di adattamento che prevedono interventi sulle strutture

(invasi e macchinario), ma possibili miglioramenti nella gestione della risorsa in impianti a serbatoio, ottenuti attraverso l'uso delle previsioni meteorologiche stagionali, sempre più affidabili.

Il controllo dell'inquinamento, e quindi il rispetto di concentrazioni massime di sostanze indesiderate nei corpi idrici superficiali, si presenta come tema sensibile per la maggiore incidenza di periodi siccitosi che, attraverso una diminuzione nella quantità di acqua disponibile nei corpi idrici, produce un aumento delle concentrazioni a parità di scarichi immessi. Il contemporaneo aumento della temperatura favorisce il consumo di ossigeno di fenomeni di eutrofizzazione.

La gestione degli eventi intensi e delle inondazioni vede due componenti principali: la gestione del territorio e la gestione dell'evento. La prima comprende azioni di mitigazione del rischio che possono essere classificate come strutturali o non-strutturali. Gli interventi strutturali consistono in opere – arginature, serbatoi, vasche di laminazione, deviatori, scolmatori, manutenzione degli alvei e delle superfici e simili – in grado di ridurre frequenza e intensità degli eventi. Le azioni non strutturali perseguono la riduzione del danno senza modificare le caratteristiche del fenomeno fisico: redazioni di piani e procedure di Protezione Civile, assicurazione per la copertura del rischio da catastrofi naturali e sviluppo di una normativa che limiti la realizzazione di nuovi insediamenti in aree esposte al rischio.

Il cambiamento climatico interviene a modificare la frequenza attesa degli eventi estremi e la loro intensità conducendo a un aumento in entrambi gli aspetti. Le azioni di contrasto chiedono particolare attenzione allo sviluppo di una conoscenza dei fenomeni che possieda caratteristiche di uniformità e completezza territoriale, all'accorta ripartizione degli investimenti in interventi strutturali e non-strutturali, alla misura dell'efficacia degli interventi ottenuta dalla stima puntuale dei benefici attesi e del loro rapporto con i costi dell'intervento.

Conclusioni

Il cambiamento climatico in atto è potenzialmente in grado di forzare una diversa ripartizione a scala globale della risorsa acqua sia in termini di sua distribuzione spazio-temporale sia per intensità e frequenza delle

precipitazioni. Nonostante le evidenti limitazioni nella capacità di prevedere il clima futuro, insieme alle conseguenze di presenti e future politiche di mitigazione, una puntuale attenzione all'adattamento agli effetti del cambiamento climatico dovrebbe sottendere ogni decisione in tema di acqua e di gestione della risorsa idrica e del rischio di inondazione e di siccità. I principali usi della risorsa idrica – siano essi civili, industriali, agricoli, energetici, di controllo dell'inquinamento o di gestione degli eventi intensi – presentano criticità anche fortemente differenziate che andrebbero meglio conosciute e contrastate, anche al fine di limitare una dipendenza dall'estero già oggi particolarmente significativa.

Bibliografia

- [1] Provenzale A. *Cocodrilli al Polo Nord e ghiacci all'Equatore*. Milano: Rizzoli, 2021, 393 pp.
- [2] Arnell N.W. *The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: A continental perspective*. Global Environmental Change 1999;9:5-23.
- [3] Hagemann S., Chen C., Clark D.B., Folwell S., Gosling S.N., Hadeland I., Hanasaki N., Heinke J., Ludwig F., Voss F., Wiltshire A.J. *Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models*. Earth System Dynamic 2013;4:129-144.
- [4] Gleick P.H. *Climate Change, Hydrology and Water Resources*. Reviews of Geophysics 1989;27(3):329-344.
- [5] Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. *The Water Footprint Assessment Manual - Setting the Global Standard*, London-Washington: Earthscan, 2001, 228 pp.
- [6] Chapagain A.K., Hoekstra A.Y. *Water footprints of nations*. Volume 1: *Main Report*. Value of Water Research Report Series No. 16. Delft: UNESCO-IHE, 2004, 80 pp.
- [7] Chapagain A.K., Hoekstra A.Y. *Water footprints of nations*. Volume 2: *Appendices*. Value of Water Research Report Series No. 16. Delft: UNESCO-IHE, 2004, 240 pp.
- [8] Arnell N., Liu C. *Hydrology and Water Resources*. In: McCarthy J. (ed.). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Vol. 2. Cambridge University Press, 2001.

Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse idriche

L'acqua è essenziale per la vita. La costante necessità di risorse idriche ha portato l'umanità a ricercare sempre nuovi equilibri, stabilendo insediamenti civili, agricoli e industriali in relazione alla disponibilità di acqua e adattando l'ambiente alle esigenze della società. Oggi, il cambiamento climatico mette in discussione gli equilibri raggiunti e obbliga a intraprendere azioni di mitigazione e adattamento. Questa nota esamina il legame fra cambiamento climatico e idrologia cercando di evidenziare come alterazioni nella disponibilità di acqua e nella sua distribuzione nello spazio e nel tempo possano impattare sulla gestione e sull'uso delle risorse idriche.

Parole chiave: adattamento al cambiamento climatico; idrologia; gestione delle risorse idriche; impronta idrica.

Climate Change, Hydrology and Water Management

Water is essential for life. The constant need for water resources has led humanity to seek new balances, establishing civil, agricultural and industrial settlements in relation to the availability of water and adapting the environment to the needs of society. Today, climate change calls into question the balances achieved and forces us to undertake mitigation and adaptation actions. This note examines the link between climate change and hydrology, trying to highlight how alterations in the availability of water and its distribution in space and time can impact the management and use of water resources.

Keywords: climate change adaptation; hydrology; water resources management; water footprint.