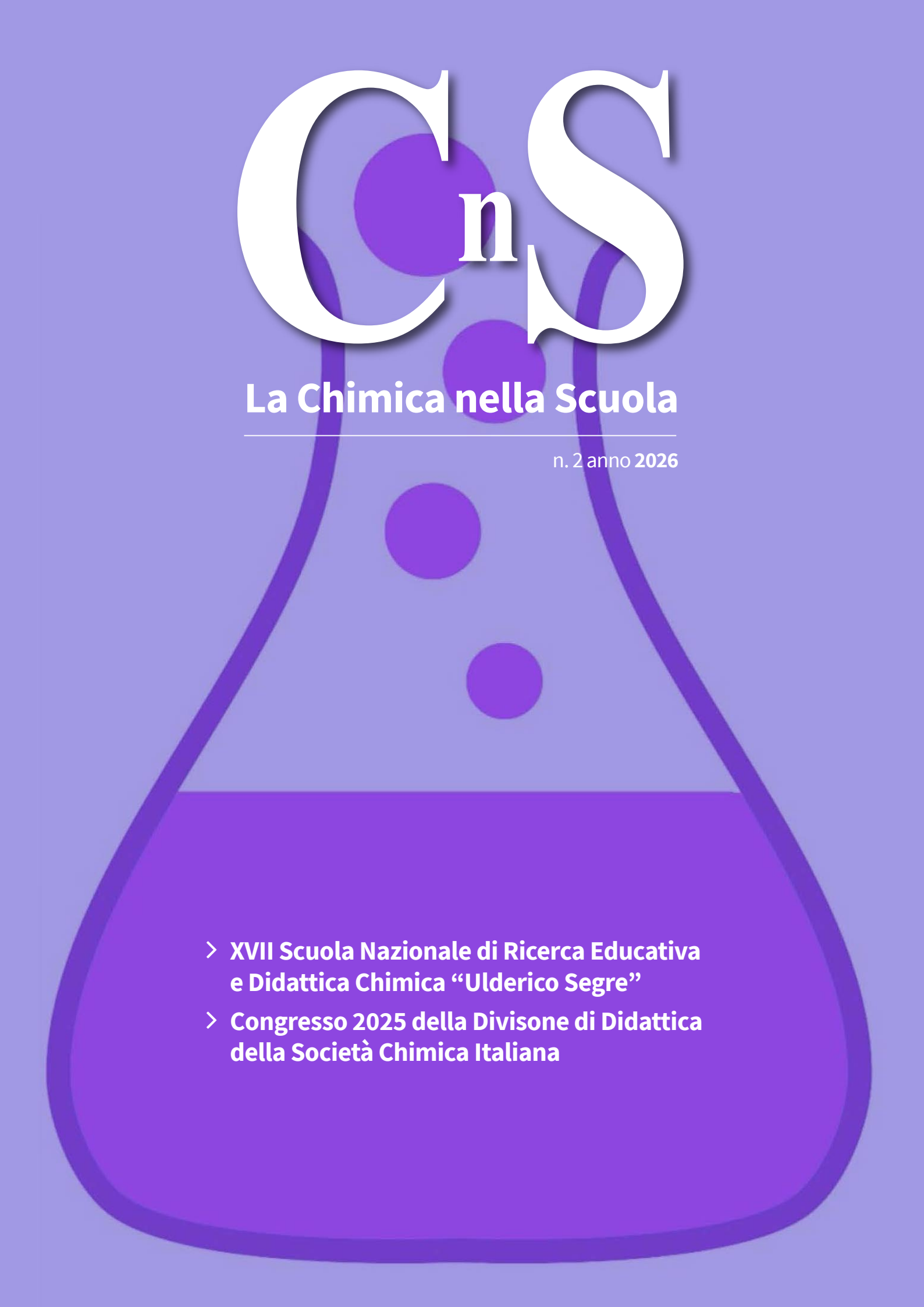


The background is a solid light purple color. A large, dark purple outline of a chemistry flask is centered on the page. Inside the flask, there are several smaller, solid purple circles of varying sizes, representing bubbles or molecules. The title 'CnS' is written in a large, white, serif font, with the 'n' being smaller and positioned between the 'C' and 'S'.

CnS

La Chimica nella Scuola

n. 2 anno 2026

- **XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica “Ulderico Segre”**
- **Congresso 2025 della Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana**



DIRETTORE ONORARIO

Luigi Mondello

COMITATO EDITORIALE

Direttore: Margherita Venturi

Vice-direttori: Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

COMITATO DI REDAZIONE

Leonardo Anatrini, Eleonora Aquilini, Luigi Campanella,
Giorgio Cevasco, Marco Ciardi, Valentina Domenici,
Maria Funicello, Silvano Fuso, Elena Ghibaudi, Carmine Iorio,
Elena Lenci, Anna Maria Madaio, Giulia Quaglia,
Raffaele Riccio, Antonella Rossi, Antonio Testoni,
Francesca Turco, Mariano Venanzi, Margherita Venturi,
Giovanni Villani, Roberto Zingales

COMITATO SCIENTIFICO

Presidente: Luigi Campanella

Vincenzo Balzani, Agostino Casapullo, Carlo Fiorentini



ISSN: 0392-8942

REGISTRAZIONE: 03/05/1996 n. 219

presso il Tribunale di Roma.

PERIODICITÀ: Bimestrale

Indice

Editoriale

- La Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana ha concluso il 2025 con due interessanti eventi 1
Margherita Venturi

XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica “Ulderico Segre”

- Didattica della Chimica Generale nei Percorsi Formativi (PF60/30/36)... 3
Rossana Galassi
- Percorsi di formazione insegnanti nelle classi A050 e A028 presso l’Università di Verona 11
Mariapina D’Onofrio
- Percorsi di formazione per insegnanti della classe A034: l’esperienza dell’Università di Pisa..... 15
Paola Selleri e Valentina Domenici
- Una riflessione sugli aspetti didattici del legame chimico come condivi-sione di elettroni e dell’elettronegatività 19
Matteo Spotti e Giovanni Di Liberto
- PF 30, 36 e 60 CFU nella formazione iniziale dei docenti di chimica: criticità emerse e prospettive di miglioramento 29
Giovanni Merola e Mariano Venanzi
- La chimica nei percorsi di formazione docenti a UniMORE per le classi A034, A050 e A028 33
Luca Rigamonti
- La chimica nei percorsi di formazione iniziale (PFI): analisi comparativa delle classi A028, A034 e A050 37
M. Carla Aragoni, Ugo Cosentino, Antonella M. Maggio e Mariano Venanzi

Congresso 2025 della Divisione di Didattica

- Relazioni a invito*
- L’alchimia delle parole: dialogo tra chimica e letteratura 45
Claudio Pettinari

Intelligenza artificiale e didattica: dalla previsione alla comprensione scientifica	63
Pierluigi Contucci	
L'uso degli assistenti virtuali per la didattica adattiva: l'esperienza IMPAR-AI in Italia e scenari futuri	67
Paolo Branchini	
C'è qualcosa di nuovo sotto il Sole, anzi d'antico.....	71
Alessandra Bonoli	
Il contributo della Divisione Didattica della Società Chimica Italiana alle Indicazioni Nazionali	79
Eleonora Aquilini	
Il valore formativo della teoria atomica secondo Cannizzaro	82
Antonio Testoni	
<i>Contributi brevi</i>	
Dalla bakelite al solfodiene di Primo Levi: tra chimica, letteratura e vita ...	91
Vincenzo Villani	
Dall'età della pietra a Excalibur: storytelling scientifico e percorso verticale sui metalli per la scuola primaria e secondaria di primo grado	103
Giovanni Merola	
Interventi didattici volti a superare le concezioni alternative in chimica: una revisione sistematica della letteratura	109
Giulia Grotto, Marco Neviani e Sergio Zappoli	
Insegnare la molecular dynamics come pratica interpretativa in un contesto di Team-Based Learning	127
Renato Lombardo	
Le forze intermolecolari e gli stati condensati attraverso l'angolo di contatto	133
Rosa di Mundo	
Analisi Green delle Microplastiche nella sabbia dei litorali italiani: una proposta di Citizen Science	141
Teresa Cecchi e Davide Poletto	
Fare chimica con il latte.....	155
Anna Maria Madaio	
Gamification e pensiero critico nella didattica delle scienze: una riflessione a partire dall'esperienza del Detective Game della Scienza	167
Carmine Iorio e Sabina Gainotti	

La Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana ha concluso il 2025 con due interessanti eventi

Margherita Venturi

Cara lettrice e caro lettore,

ho pensato di dedicare questo numero della nostra rivista a due eventi organizzati dalla Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana nei giorni 6-8 dicembre 2025: la XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica “Ulderico Segre” e il Congresso Annuale della Divisione.

I due eventi si sono svolti a Bertinoro, un paesino di origine medioevale sui colli romagnoli, nella bella sala affrescata del Centro Residenziale Universitario (<https://www.ceub.it/>).



La loro realizzazione si deve anche al supporto finanziario offerto dal Piano Nazionale Lauree Scientifiche-Chimica, dal Gruppo Senior della Società Chimica Italiana e dalla Zanichelli.

L'edizione 2025 della Scuola “U. Segre” si è concentrata sui percorsi di formazione iniziale dei docenti, analizzando in maniera comparativa i percorsi attivati per le classi A028, A034 e A050, con particolare attenzione al rapporto tra contenuti disciplinari e strumenti metodologici. L'obiettivo è stato quello di avere un quadro organico della formazione iniziale nell'area chimica e comprendere come gli Atenei stanno rispondendo alla necessità di fornire ai futuri docenti non solo “cosa insegnare”, ma soprattutto gli strumenti per una “mediazione didattica” efficace, capace di integrare fenomenologia osservabile e modellizzazione microscopica.

Per quanto riguarda il *Congresso 2025 della Divisione di Didattica*, lo scopo è stato quello di affrontare, con le relazioni a invito, temi di respiro interdisciplinare, mettendo a confronto la chimica con la letteratura, con la storia e con la formazione, e argomenti di grande attualità, come l'uso in didattica dell'Intelligenza Artificiale e la necessità di realizzare uno sviluppo sostenibile. Nell'ambito del Con-

gresso è stato dato anche ampio spazio alla voce dei soci che hanno presentato le loro attività e le metodologie utilizzate per migliorare i processi di insegnamento/apprendimento nei vari livelli della scuola.

La partecipazione ai due eventi è stata buona, con la presenza di oltre cinquanta di persone, la discussione è stata sempre vivace e produttiva e i contributi presentati sono stati di ottimo livello. Questo è il motivo per cui ho pensato di raccogliarli e riportarli in questo numero della nostra rivista; sono sicura che leggendoli troverai molti spunti per il tuo lavoro in classe e per motivare i tuoi studenti.

Buona lettura

Margherita

**XVII Scuola Nazionale
di Ricerca Educativa e Didattica Chimica
“Ulderico Segre”**

Didattica della Chimica Generale nei Percorsi Formativi (PF60/30/36)

Rossana Galassi

Scuola di Scienze e Tecnologie, Sezione Chimica, c/o ChIP, dell'Università di Camerino

e-mail: rossana.galassi@unicam.it

Abstract. This short article illustrates some aspects of the general chemistry courses in the teaching classes A028, A034, A050 and B12 activated in UNICAM in the PF60/30/36 enabling courses. These PF courses were introduced in Italy in the Prime Minister Decree of 4th August 2023 to offer an opportunity for post-graduate training qualifying for teaching in first and second levels secondary schools. In particular, this article describes teaching approaches based on four fundamental pillars of chemistry teaching: 1) disciplinary knowledge, 2) the importance of epistemological approaches, 3) the application and development of models, and 4) laboratory practices.

Keywords: percorsi formativi; didattica chimica; chimica generale; triangolo di Johnstone; laboratori didattici

1. Introduzione

I corsi di formazione post-laurea denominati PF30, PF36 e PF60 sono percorsi formativi abilitanti, strutturati in Crediti Formativi Universitari (CFU), introdotti per ottenere l'abilitazione all'insegnamento nella Scuola Secondaria di primo e secondo grado in Italia. Il PF60 è il percorso standard costituito da 60 CFU (1 CFU = 5 ore di lezione/esercitazione) per chi non è già abilitato, mentre i PF30 e PF36 sono percorsi ridotti che richiedono requisiti specifici, come anni di servizio e/o il superamento di un concorso.

Questi percorsi includono lezioni, laboratori e tirocini, e sono stati organizzati dalle università per preparare i docenti alla professione del docente e consentire l'accesso alle graduatorie e ai concorsi futuri.

L'Università di Camerino (UNICAM) ha attivato percorsi formativi per l'abilitazione all'insegnamento sin dall'anno accademico 2023/2024, coprendo diverse classi di concorso. I PF60 prevedono un numero di posti contingentato ai quali possono accedere laureati secondo quanto indicato nell'allegato 1 del D.P.C.M. 4 agosto 2023. I PF30 prevedono un corso di 30 CFU, anche esso con un numero di posti contingentato, al quale possono accedere laureati con esperienza di insegnamento come indicato nell'allegato 2 del DPCM dall'art. 2-ter, comma 4-bis, del D. Lgs. 13 aprile 2017, n. 59, e anche i laureati vincitori di concorso ai sensi dell'art. 13, comma 2, del D. Lgs. 13 aprile 2017, n. 59; per quest'ultimi non è stato previsto un numero contingentato, ma un numero illimitato di iscrizioni. Ai PF30 possono anche iscriversi docenti che sono già in possesso di abilitazione su una classe di concorso o su un altro grado di istruzione (ex art. 13 del D.P.C.M. 4 agosto 2023) [1]. Hanno accesso ai corsi PF36 i vincitori di concorso che hanno già acquisito 24CFU/CFA e gli ITP vincitori di concorso anche se sprovvisti dei 24 CFU/CFA.

Le classi di concorso qui menzionate prevedono una formazione sugli aspetti generali della didattica e sulla parte disciplinare, secondo i programmi indicati nel Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM). La didattica della chimica generale è inclusa nel corso di matematica e scienze (A028), di scienze e tecnologie chimiche (A034), di scienze naturali, chimiche e biologiche (A050) e dei laboratori di scienze e tecnologie chimiche e microbiologiche (B12). Il superamento dei corsi attivati in

queste classi di concorso abilita i docenti per l'insegnamento nella Scuola Secondaria di secondo grado, mentre la classe B12 abilita docenti tecnico pratici e la classe A028 docenti per la Scuola Secondaria di primo grado nell'insegnamento della matematica e delle scienze. I corsi PF60/30/36 accolgono studenti che si differenziano sia per la varietà delle loro conoscenze in ingresso che per il grado di esperienza. I candidati della classe A034 sono laureati in chimica, farmacia e CTF, ma anche in ingegneria chimica, mentre quelli afferenti alla classe A050 e A028 sono laureati in corsi scientifici di vario genere, per la maggior parte scienze biologiche, geologiche, agrarie o naturali.

La varietà di conoscenze e di competenze in ingresso impongono un'attenzione particolare nell'impostazione didattica dei corsi PF, visto che la conoscenza disciplinare, come anche la sensibilità verso la chimica, quale una scienza centrale nelle scienze naturali, non possono essere date per scontate. Un altro aspetto rilevante è che le diverse classi di concorso presentano obiettivi formativi disciplinari differenziati; di conseguenza, i moduli di chimica generale nei vari corsi di insegnamento risultano sostanzialmente differenti. Tuttavia, l'insegnamento della chimica generale nei corsi A050 e A034 ha degli obiettivi in comune: fornire strumenti utili per una efficace azione didattica, sollecitare le riflessioni su alcuni punti didattici chiave, come l'uso costante di modelli che vengono aggiornati dal biennio al triennio di studio, introdurre un linguaggio specifico della chimica e, soprattutto, correlare costantemente i tre livelli di apprendimento: il microscopico, il macroscopico e il simbolico, secondo le indicazioni di Alex Johnstone [2, 3], noto come triangolo di Johnstone, poi esteso a un modello didattico tetraedrico, includente il livello umano [4]. I tre livelli della chimica disciplinano le azioni didattiche e il futuro docente deve essere allenato a un esercizio di scorrimento automatico tra un livello e un altro.

La progettazione didattica dei futuri insegnanti appartenenti a queste classi di concorso si basa sull'osservazione di fenomeni macroscopici, provenienti dal mondo reale, o ricreati attraverso esperimenti appositamente progettati, dai quali avviare una discussione. Tale discussione, ispirandosi a leggi e modelli già noti, dovrebbe condurre a un eventuale aggiornamento del modello e a un'interpretazione corretta attraverso una descrizione simbolica e/o matematica rigorosa. Fondamentalmente, si tratta di progettare delle attività che permettano di applicare il metodo scientifico, osservare, fare delle ipotesi, provare con esperienze e rimodulare le ipotesi fino a verificare correttamente le relazioni analitiche e approdare a modelli aggiornati [5].

La capacità di correlare i diversi livelli nella didattica della chimica, così come in altre scienze, non è innata: si tratta di una competenza specifica che si acquisisce tramite esercizio e pratica. Nell'insegnamento della chimica della classe A028, cioè la classe dei docenti per la Scuola Secondaria di primo grado, la triangolazione di Johnstone dei livelli della chimica perde un vertice e diventa una correlazione binaria tra l'osservazione macroscopica e la ricerca mediante il metodo scientifico di modelli microscopici che possano descrivere l'osservazione. In questa fase di apprendimento i docenti devono guidare gli studenti all'osservazione di fenomeni o di esperimenti pratici, stimolare l'attenzione ai particolari e alla loro descrizione, condurre alla ricerca di correlazioni esistenti tra le evidenze osservate; l'intento è quello di costruire deduttivamente delle possibili spiegazioni e sviluppare modelli semplici e verificabili. Nel caso specifico, in UNICAM, la didattica della chimica nel corso A028 è stata erogata prendendo a riferimento i materiali erogati dal gruppo SENDS dell'Università degli Studi di Torino, relativo alla natura particellare della materia [6]. Seguendo le sequenze didattiche indicate, gli studenti vengono guidati nell'applicazione di un modello particellare semplificato basato su semplici assiomi: la materia è costituita da particelle indeformabili con dimensioni e volumi costanti, ad ogni particella si associa un tipo di sostanza e ogni particella ha una sua massa. Una volta appreso, il modello viene applicato alla comprensione degli stati di aggregazione della materia, dei passaggi di stato e di proprietà fisiche come la densità, o la miscibilità dei liquidi.

Per quello che riguarda la preparazione dei docenti afferenti alla classe B12, la didattica della chimica presenta un focus quasi esclusivo nel livello macroscopico. Questi futuri docenti, che tra tutti quelli considerati in questa breve introduzione, sono quelli con la preparazione di base più diversificata e meno approfondita, sono preposti alla pratica laboratoriale e si occupano della predisposizione del-

le attività di laboratorio e della progettazione didattica in collaborazione con i docenti disciplinari. L'azione didattica di chimica generale è particolarmente dedicata a possibili esperimenti da eseguire in laboratorio, a determinarne gli obiettivi formativi e a individuare la loro contestualizzazione nelle sequenze didattiche.

2. Didattica della Chimica Generale

La didattica della chimica generale ed inorganica nella classe A050 è stata erogata con 10 ore di didattica frontale, mentre nella A034 con 20 ore di lezione frontale. I due corsi presentano sillabi molto sovrapponibili in termini di contenuti, ma gli obiettivi formativi si differenziano con livelli di approfondimento più marcati nella classe A034 rispetto alla A050. La chimica nella A034 viene insegnata approfondendo gli aspetti teorici e di calcolo numerico, e con modelli più dettagliati.

Avendo a disposizione un numero modesto di ore, ed escludendo azioni meramente dedicate ai saperi disciplinari, entrambi i corsi di didattica della chimica generale sono stati strutturati considerando quattro pillar fondamentali, di seguito descritti.

2.1 Autovalutazione della conoscenza disciplinare

Avere consapevolezza del proprio sapere è una condizione primaria per l'insegnamento; il sapere un concetto e la capacità di insegnarlo non può essere dato per scontato solo per il fatto di aver ricevuto una laurea affine o inerente alla materia. La storia della chimica ci insegna che il tentativo di migliorare l'approccio didattico approfondendo i propri saperi ha permesso di ottenere peculiari risultati scientifici; ne sono un esempio gli studi di Cannizzaro sui pesi molecolari [8] e quelli di Mendeleev sulle leggi periodiche degli elementi [9]: le prime ore di lezione sia per la A034 che per la A050 sono state dedicate proprio a questo aspetto. L'attività è stata progettata ponendo domande sulle definizioni di alcuni concetti base della chimica, ad esempio, la definizione di: elemento chimico, molecola, ione, sostanza, e mole. A seguire, queste definizioni sono state paragonate con quelle presentate da testi accademici sia italiani, che extra-europei, con quelle riportate su Wikipedia e in app di intelligenza artificiale (ChatBot, ad esempio). Dopo questa discussione iniziale, le definizioni sono state confrontate con quelle pubblicate sul Gold Book della IUPAC [10]. Questo esercizio effettuato in modalità dialogica interattiva ha messo in luce il processo di evoluzione della scienza chimica e la sua necessità sia di rigore che di semplificazione. Un esempio è quello della definizione di elemento chimico, una definizione che si incontra nelle primissime lezioni di chimica [11, 12]. Cercando nei testi accademici italiani ed americani troviamo le seguenti definizioni: a) *un elemento è una sostanza che non può essere scissa in sostanze più semplici*, oppure b) *l'elemento è un'entità immateriale priva di proprietà fisiche e chimiche, radice di una determinata specie chimica, caratteristica comune ai suoi atomi, alle sue molecole, ai suoi ioni ai suoi isotopi. Esso è caratterizzato da due dati: un simbolo, e un numero d'ordine, il numero atomico, che indica la posizione della specie chimica nella tavola periodica, ...*, oppure c) *l'elemento è la specie chimica costituita da atomi dello stesso tipo, ovvero atomi aventi lo stesso numero di protoni nel nucleo*. Nel Gold Book appaiono le seguenti definizioni che introducono anche il concetto di sostanza elementare: 1) *A species of atoms; all atoms with the same number of protons in the atomic nucleus*; 2) *A pure chemical substance composed of atoms with the same number of protons in the atomic nucleus. Sometimes this concept is called the elementary substance as distinct from the chemical element as defined under (1), but mostly the term chemical element is used for both concepts* [13].

Le definizioni IUPAC sono molto distanti dalla definizione a); quest'ultima prevede una pratica macroscopica come il ridurre qualcosa di macroscopico a qualcosa di molto piccolo, che astrattamente pone un limite alle divisioni. Il dibattito scaturito da questa introduzione sulle conoscenze disciplinari ha permesso di mettere a confronto fonti e materiali didattici caratterizzati da gradi di rigore molto diversi, mentre l'uso di strumenti online basati sull'Intelligenza Artificiale ha permesso di osservare possibili scenari didattici con in quali il confronto sarà inevitabile, data l'estesa fruizione di questa app da parte degli studenti.

2.2 Valenza degli approcci didattici epistemologici

Entrambi i sillabi di A050 e A034 contengono l'indicazione di utilizzare approcci didattici basati sullo sviluppo storico epistemologico della chimica [14]. Questo approccio didattico, basato sullo sviluppo storico delle conoscenze, permette di spiegare leggi universali descrivendo esperimenti eseguiti con mezzi semplici, quelli disponibili all'epoca dei fatti, e seguendo osservazioni logico razionali che portano alla deduzione della legge [15]. Tale modalità permette di semplificare i concetti e facilitare l'apprendimento deduttivo. Nei corsi delle classi A050 e A034 questo aspetto è stato affrontato ripercorrendo le fasi di studio delle reazioni chimiche allo stato gassoso nel XIX secolo. In maniera particolare è stata considerata la combinazione dell'idrogeno e l'ossigeno gassoso con la formazione di H_2O , studiate da Gay Lussac nel 1808, nota come legge di combinazione dei volumi. La legge raccorda il principio di Avogadro (1811), che afferma che *"volumi uguali di gas diversi, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole"*, e aggiorna il modello introdotto da Dalton (1804), la prima teoria atomista moderna. Considerando i risultati di Cannizzaro sui pesi atomici [16], si arrivò alla conclusione che la legge della combinazione dei volumi esprime intrinsecamente che le particelle gassose di idrogeno e ossigeno, coinvolte nella formazione dell'acqua, devono essere necessariamente biatomiche (cioè, corrispondono alla rappresentazione simbolica di H_2 e O_2).

Dopo aver introdotto lo sviluppo storico passo dopo passo, basato sulle osservazioni delle reazioni di combinazione dell'idrogeno gassoso con l'ossigeno gassoso che portano alla formazione di acqua, secondo l'equazione chimica 1:



è stata proposta un'attività laboratoriale che mostra la reazione opposta. Viene quindi introdotta l'idrolisi dell'acqua corrispondente all'equazione chimica 2:



come reazione di decomposizione dell'acqua indotta somministrando energia elettrochimica (batteria). Questa esperienza, particolarmente facile da eseguire e sicura, mostra la produzione di gas idrogeno e ossigeno dall'acqua, non appena si avvicina la batteria alle puntine sul fondo del bicchiere, in un rapporto di volumi fedele al rapporto molare degli stessi nel composto acqua (Figura 1).

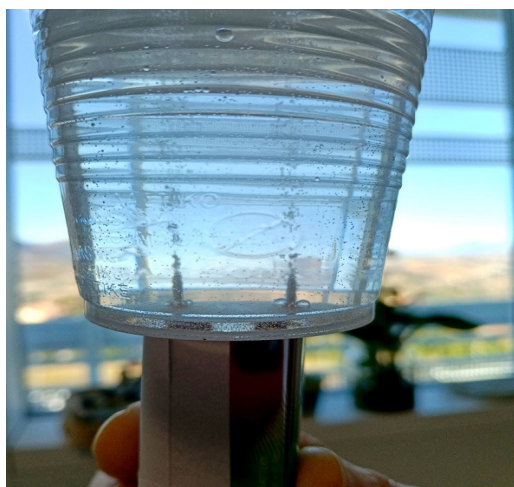


Figura 1. Immagine dello sviluppo di idrogeno ed ossigeno dall'elettrolisi di una soluzione acquosa diluita di bicarbonato di sodio

Invertendo la posizione dei poli della batteria si nota l'inversione della produzione di gas. Questo esperimento dimostra il rapporto molare di idrogeno e ossigeno nella composizione dell'acqua, ma rappresenta anche un valido approccio laboratoriale per l'introduzione allo studio dei legami chimici, alla spontaneità delle reazioni e all'elettrochimica solo per citare alcuni esempi. Alcuni di questi aspetti sono stati affrontati nel corso.

2.3 Applicazione e sviluppo di modelli

L'uso dei modelli in chimica è un aspetto didattico molto critico. Da una discussione in aula è emerso che a molti dei docenti candidati alle classi di concorso non era chiaro il significato di modello, confondendolo con rappresentazione, o addirittura con la realtà fisica. Quindi, sia per la classe A034 che per la classe A050, ma anche per la classe A028, è stata proposta un'attività iniziale sulla definizione di modello prendendo spunto dal materiale divulgato dal gruppo SENDS di UniTo [17].

In una stanza, un oggetto (un oggetto solido di ceramica a forma di tigre alta circa 25 cm) è stato sottoposto all'attenzione di cinque studenti con occhi chiusi; quest'ultimi si sono avvicinati da direzioni diverse e hanno avuto modo di toccare con le mani l'oggetto. Una volta tornati in aula, queste persone hanno poi raccontato la loro percezione tattile al resto degli studenti e seguendo le indicazioni tutti hanno rappresentato graficamente l'oggetto. Nessuna rappresentazione grafica sarà tale da descrivere effettivamente l'oggetto, ma molti disegni saranno vicini alla rappresentazione di un felino. Questo esempio mette in luce come la composizione particellare della materia è impercettibile ai nostri sensi e, quindi, lo studio della materia può essere effettuato solo mediante modelli derivanti da osservazioni scientifiche indirette. Lo sviluppo storico delle teorie e la ricerca di modelli sempre più rigorosi e semplificati spiega il motivo per il quale esistono più modelli. Ne sono un esempio i modelli per descrivere la geometria delle molecole. Il modello basato sull'ibridazione degli orbitali atomici, descritto nella teoria del legame chimico di Pauling [18], è molto utile, ma didatticamente complicato: modelli matematici come gli orbitali s, p, d che si mescolano per ottenere gli orbitali ibridi è piuttosto difficile da apprendere. Il modello basato sulla repulsione delle coppie di elettroni di legame e di non legame risulta più semplice e diretto, anche per effetto della possibilità di visualizzare l'effetto delle repulsioni steriche di palloncini gonfi legati tra loro che tendono ad acquisire delle geometrie ben specifiche [19]. Il docente può e deve applicare sinergicamente entrambi i modelli per spiegare le forme delle varie molecole, indicando di volta in volta l'equivalenza degli stessi in termini di risultati.

2.4 Pratica laboratoriale

La didattica della chimica generale con il supporto di laboratori esplorativi e dimostrativi che utilizzano materiali poveri e sicuri è una pratica da incoraggiare. Quest'aspetto è stato particolarmente affrontato nelle lezioni della classe B12 proponendo pratiche laboratoriali con materiali abbastanza sicuri ed economici. L'insegnamento della stechiometria viene solitamente affrontato discutendo un "problema" e risolvendo la questione con calcoli numerici. Uno dei primi aspetti affrontati nella stechiometria è il rapporto molare nelle reazioni chimiche. Didatticamente, l'apprendimento di questo aspetto è piuttosto deduttivo e può essere facilitato utilizzando delle semplici pratiche laboratoriali che si basano su reazioni che sviluppino gas. Nella figura 2 i palloni contengono volumi proporzionali di gas liberati da tre beute contenenti bicarbonato di sodio e aceto (l'equazione chimica di riferimento è $\text{NaHCO}_{3(s)} + \text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} \rightarrow \text{NaOOCCH}_{3(aq)} + \text{CO}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$) accuratamente pesati nel rapporto molare 1:1, ma in quantità doppia e tripla in massa nelle beute 2 e 3, rispettivamente. Queste pratiche laboratoriali permettono di integrare le conoscenze (ad esempio, i calcoli si affrontano richiamando la legge dei gas), di generalizzare i contenuti, considerando anche reazioni della vita di tutti i giorni (ad esempio, la decomposizione del sodio azoturo nell'air bag), e di interpretare i risultati ottenuti matematicamente con delle rappresentazioni che siano fedeli al modello particellare, chiudendo quel triangolo virtuoso della didattica della chimica noto come triangolo di Johnstone.

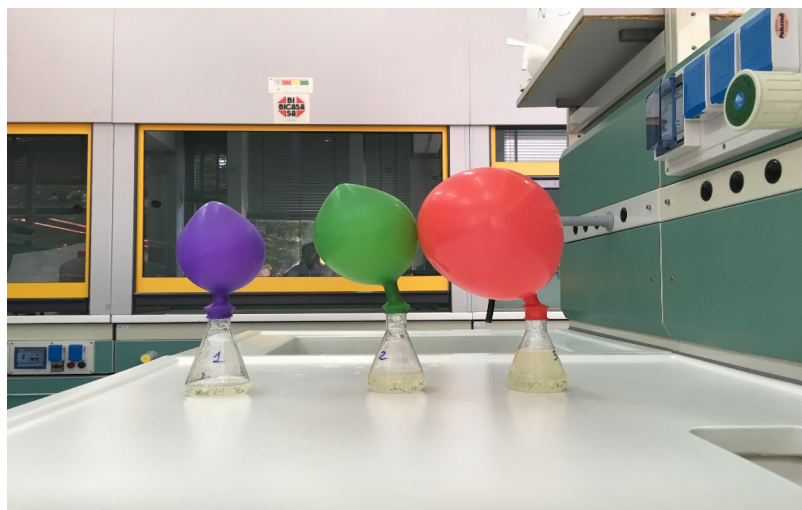
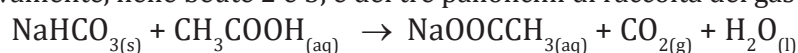


Figura 2. Immagine di tre beute con bicarbonato e aceto in rapporto molare 1:1, ma in quantità doppia e tripla in massa, rispettivamente, nelle beute 2 e 3, e dei tre palloncini di raccolta dei gas evoluti dalla reazione



3. Conclusioni

La didattica della chimica generale nei PF60/30/36 per le classi di concorso A028, A050, A034, B12 è stata erogata in UNICAM con 10-20 ore di lezione a seconda della classe di concorso. Il limitato numero di ore ha dettato la necessità di selezionare alcuni aspetti della didattica e in questo contributo sono state discusse alcune priorità didattiche a seconda della classe di concorso. L'insegnamento della didattica della chimica generale, da molti partecipanti non laureati in chimica intesa come un ripasso dei concetti principali, si è invece basata su un approccio didattico olistico, che ha preso in considerazione aspetti disciplinari, metodologici, laboratoriali e anche filosofici della scienza stessa. I corsi PF sono percorsi post-laurea che permettono a un giovane laureato di acquisire gli strumenti necessari per affacciarsi alla professione del docente e, in generale, l'istituzione di questi corsi è molto positiva in quanto colma una carenza formativa esistente in Italia, strutturando una filiera dedicata a chi vuole intraprendere la professione del docente.

Nelle prime tre edizioni dei corsi PF, soltanto una piccola percentuale dei partecipanti erano giovani laureati, mentre la maggioranza presentava situazioni di precarietà nel sistema scolastico o aspirava ad aumentare le proprie possibilità di impiego nelle scuole in cui già lavorava, ottenendo nuove abilitazioni. Le tre edizioni di PF hanno visto un afflusso di coorti di candidati estremamente eterogeneo tra loro; ad esempio, in UNICAM, nel caso dell'A034, nella prima edizione la maggior parte dei candidati erano laureati in Chimica, mentre nell'ultima quasi tutti avevano una laurea in Farmacia o CTF e alcuni provenivano da contesti extra-scolastici, come l'industria. Tra quelli già attivi nel mondo della scuola, molti erano abilitati come insegnanti di sostegno, ma, per valorizzare la propria laurea, avevano intrapreso il percorso PF per diventare insegnanti disciplinari. Questa grande diversità tra i candidati ha messo in evidenza le svariate sensibilità all'insegnamento della chimica. Durante gli esami finali, in cui venivano presentate UdA e mini-lezioni, ogni candidato, in base alle proprie caratteristiche personali e seguendo le indicazioni fornite, interpretava gli argomenti assegnati o scelti, adattandoli a obiettivi di apprendimento specifici e a competenze chiave e/o trasversali. I candidati hanno spesso evidenziato nelle attività trasversali l'impatto ambientale e climatico della "chimica", ma quelli laureati in corsi extra-Chimica hanno sottolineato come la "chimica" causa il problema ambientale, smentendo implicitamente l'idea che essa possa esserne la soluzione.

Riferimenti bibliografici

- [1] <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/09/25/23A05274/sg>
- [2] K. S. Taber, Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education, *Chem. Educ. Res. Pract.* 2013, **14**, 156-168.
- [3] A. H. Johnstone, Foreword in *Multiple Representations in Chemical Education* (Eds., J. K. Gilbert, D. F. Treagust), Springer, Dordrecht, 2009, pp. v-vi.
- [4] J. Sjöström, Towards building-oriented chemistry education, *Science & Education*, 2013, **22**, 1873-1890 (<https://doi.org/10.1007/s11191-011-9401-0>).
- [5] J. A. Young, Teaching the scientific method in college general chemistry, *J. Chem. Ed.*, 1957, **34**, 238-239.
- [6] https://www.sends.unito.it/sites/www.sends.unito.it/files/SENDS%20S1%202.1b-Micro%20Intro-Modello%20818%20Ins_0.pdf
- [7] R. Zingales, Il metodo didattico di Stanislao Cannizzaro, *CnS*, 2023, **4**, 4-24.
- [8] D. I. Mendeleev, The natural system of elements and its application to the indication of the properties of undiscovered elements, *J. Russ. Chem. Soc.*, 1871 **3**, 25-56.
- [9] <https://goldbook.iupac.org/>
- [10] E. Ghibaudi, A. Regis, E. Roletto, Il concetto di elemento: dai filosofi greci alle odierne definizioni, *CnS*, 2012, **XXXIV**(2), 92-98.
- [11] E. Scerri, E. Ghibaudi. *What is a chemical element?*, Oxford University Press, New York, 2020, pp. 257-279 (ISBN:9780190933784).
- [12] <https://goldbook.iupac.org/terms/view/C01022>
- [13] E. Ghibaudi, A. Regis, E. Roletto, Models from history to the classroom: an historic-epistemological approach to chemistry teaching, *CnS*, 2012, **XXXIV**(3), 135-140.
- [14] E. Aquilini, A. Testoni, Il senso di leggere i grandi classici della Chimica: Perché una rubrica dedicata a percorsi didattici con approccio storico-epistemologico, *CnS*, 2022, **1**, 44.
- [15] L. Cerruti, *Commento e nota storica di "Sunto di un corso di filosofia chimica" di Stanislao Cannizzaro* (introduzione di Leonello Paoloni), Biblioteca siciliana di storia e letteratura, Sellerio Editore, Palermo, 1991.
- [16] <https://www.sends.unito.it/it/content/materiale-didattico>
- [17] L. Pauling, *The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals*, first published in 1939 by Cornell University Press.
- [18] R. J. Gillespie, H. Istvan, *The VSEPR Model of Molecular Geometry*, Dover Publications, 2012, (ISBN 048648615X; 9780486486154).
- [19] R. Ricci, M. A. Ditzler, Discovery chemistry: A laboratory-centered approach to teaching general chemistry, *J. Chem. Educ.*, 1991, **68**(3), 228-231.

Percorsi di formazione insegnanti nelle classi A050 e A028 presso l'Università di Verona

Mariapina D'Onofrio

Dipartimento di Biotecnologie dell'Università di Verona

e-mail: mariapina.donofrio@univr.it

Abstract. The University of Verona, a medium-sized institution, has a strong tradition in innovative teaching and educational sciences. Recently numerous training programs for secondary school teachers were activated, following the DPCM of August 4, 2023. The training program for teachers for the A050 pathway was activated by the Department of Biotechnology. It was structured integrating both disciplinary content and teaching tools for specific scientific subjects by balancing courses in biology, chemistry, and geosciences. Regarding the teaching activities in chemistry, the program included two courses in Foundations and Teaching tools of General and inorganic Chemistry and of Organic Chemistry, with 3 and 2 CFU, respectively. Due to large and variable cohort sizes, teaching was mainly lecture-based, with limited wet-laboratory activities, complemented by virtual tools and innovative digital resources. Overall, students showed good engagement and satisfaction. However, critical issues emerged, including intensive scheduling, limited time for the implementation of the training program and variable number of the students. The experience gained during the first two editions will inform future teaching choices, particularly in chemistry education, where the introduction of a laboratory teaching unit is considered desirable.

Keywords: Università di Verona; formazione insegnanti; A050; didattica chimica

1. Introduzione

L'Università di Verona si configura come un ateneo di medie dimensioni, con una popolazione studentesca di circa 29.000 iscritti. Tra i numerosi corsi dell'offerta formativa dell'ateneo scaligero si contano 57 corsi di laurea magistrale e a ciclo unico, tra i quali sei risultano particolarmente rilevanti per l'accesso all'insegnamento delle discipline scientifiche nella scuola secondaria di primo e secondo grado, con riferimento alle classi di concorso A028 e A050.

L'ateneo veronese vanta anche una tradizione consolidata nel campo della formazione degli insegnanti e, più in generale, nella ricerca educativa e didattica; per esempio, da diversi anni è erogato il corso di laurea magistrale a ciclo unico in Scienze della Formazione Primaria. Inoltre, vi è la presenza di numerosi docenti e gruppi di ricerca impegnati nello studio dei processi di insegnamento-apprendimento, nello sviluppo di metodologie innovative e nella sperimentazione didattica.

In questa direzione si inserisce la recente istituzione del Teaching and Learning Center (TALC), che ha l'obiettivo di mettere a disposizione del personale accademico strumenti, risorse e opportunità formative per l'innovazione didattica e di promuovere l'uso consapevole delle tecnologie e l'adozione di approcci centrati sullo studente, per favorire un continuo miglioramento della qualità della didattica universitaria.

2. Progettazione percorso formazione insegnanti per la classe A050

In seguito alla pubblicazione del DPCM del 4 agosto 2023, che definisce il percorso universitario e accademico di formazione iniziale dei docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado, l'allora Rettore dell'Università di Verona ha promosso l'istituzione di un nucleo di lavoro istruttorio. Tale gruppo era composto, oltre che dai Delegati alla Didattica e alla Formazione Docenti, da un rap-

presentante per ciascun dipartimento e da referenti amministrativi del TALC, con l'obiettivo di coordinare la progettazione dei nuovi percorsi di formazione.

Considerata la natura multidisciplinare dei componenti del Dipartimento di Biotecnologie, con competenze che spaziano tra ambiti biologici, chimici, agrari e ambientali, è stato proposto che esso assumesse il ruolo di Dipartimento proponente per l'attivazione e l'organizzazione del percorso di formazione iniziale insegnanti per la scuola secondaria di secondo grado relativo alla classe di concorso A050 (Scienze naturali, chimiche e biologiche) e partecipasse, al contempo, alla progettazione del percorso per la classe A028 (Matematica e Scienze per la scuola secondaria di primo grado).

Per quanto riguarda il percorso A050, la progettazione ha tenuto conto della forte eterogeneità dei titoli di accesso dei corsisti, i quali possono provenire da un ampio ventaglio di lauree, talvolta caratterizzate da carenze in specifici ambiti disciplinari, in particolare nelle scienze della terra e nella chimica. In risposta a questa criticità, si è scelto di distribuire in modo equilibrato i 16 CFU dedicati alla didattica disciplinare, assegnando 5 CFU all'area biologica, 5 CFU all'area chimica e 6 CFU all'area geologica. L'ateneo ha inoltre stabilito una corrispondenza pari a $1 \text{ CFU} = 6 \text{ ore di lezione}$.

In fase di accreditamento era stato previsto un numero massimo di 100 studenti per il percorso A050, (suddivisi in 30 per i 30 CFU, 40 per i 60 CFU e 30 per i 36 CFU). In considerazione di tale numerosità e della necessità di contenere il carico didattico sui docenti del Dipartimento di Biotecnologie, si è optato inizialmente per una progettazione dei corsi priva di attività laboratoriali, privilegiando lezioni frontali. Nell'ambito chimico, l'offerta formativa è stata articolata in due insegnamenti: Fondamenti e didattica della chimica generale e inorganica (3 CFU) e Fondamenti e didattica della chimica organica (2 CFU), con l'obiettivo di coprire in modo adeguato i contenuti di chimica caratterizzanti la classe di concorso A050.

Il percorso A028, invece, è stato strutturato con una maggiore enfasi sulle discipline matematiche e fisiche, pur prevedendo un insegnamento in ambito biologico (Fondamenti e didattica delle scienze naturali) e uno in ambito chimico (Fondamenti e didattica della chimica organica) da 2 CFU ciascuno. Tali insegnamenti sono stati mutuati dal percorso A050, favorendo così un'ottimizzazione delle risorse didattiche.

Nella definizione dei syllabi degli insegnamenti di area chimica per la classe A050, si è tenuto conto della probabile provenienza delle studentesse e degli studenti, ipotizzando una prevalenza di laureati in ambito biologico, naturalistico o forestale. Di conseguenza, i programmi sono stati progettati includendo una parte introduttiva dedicata ai principi fondamentali della chimica, anche in riferimento agli argomenti tipicamente oggetto di valutazione nei concorsi per l'insegnamento.

Per la prima edizione del percorso A050 (A.A. 2023/24), il numero di posti autorizzati dal MUR per l'Università di Verona è stato pari a 10 unità. Questa limitata numerosità ha consentito di introdurre una semplice attività laboratoriale di chimica generale, focalizzata sui concetti di acidità e basicità. L'esperienza ha avuto una duplice valenza: da un lato il consolidamento dei contenuti teorici, dall'altro la progettazione di un'unità didattica laboratoriale trasferibile nella scuola secondaria di secondo grado. Inoltre, il numero contenuto di studenti ha permesso una maggiore flessibilità nella gestione delle lezioni, favorendo l'approfondimento di concetti teorici in seguito a specifiche richieste avanzate dagli studenti.

Nella seconda edizione (A.A. 2024-2025), i posti autorizzati sono aumentati fino a 100, con 66 studenti effettivamente iscritti. Tale incremento ha reso impraticabile l'organizzazione di attività laboratoriali in presenza; tuttavia, durante le lezioni è stata dedicata ampia attenzione alla progettazione didattica di esperimenti semplici, realizzabili sia in laboratori scolastici attrezzati, sia in contesti d'aula con risorse limitate.

Per quanto concerne l'insegnamento di Fondamenti e didattica della chimica organica, erogato congiuntamente per i percorsi A028 e A050, una delle principali criticità è rappresentata dall'elevata numerosità e dalla marcata eterogeneità degli studenti, sia in termini di formazione pregressa sia di obiettivi professionali. In questo contesto, la scelta didattica è stata quella di privilegiare l'approfondimento di contenuti teorici selezionati in funzione della loro rilevanza per i concorsi e per l'insegna-

mento scolastico. Data l'impossibilità di proporre attività laboratoriali in presenza, si è fatto ricorso a strumenti digitali per la simulazione di esperienze sperimentali. In particolare, sono state utilizzate piattaforme web per simulazioni interattive di laboratorio come PhET, utili sia per la chimica generale sia per la chimica organica. Inoltre, al fine di rendere l'esperienza didattica più interattiva, accattivante e in linea con le tecnologie utilizzate nella scuola secondaria, è stata introdotta la piattaforma Molecular Web, sviluppata dall'EPFL (<https://molecularweb.epfl.ch>), che consente la visualizzazione di piccole molecole e macromolecole biologiche in realtà aumentata, tramite dispositivi comuni come smartphone, tablet e computer. Questo strumento si è rivelato particolarmente efficace per favorire la comprensione delle strutture tridimensionali delle molecole e per stimolare l'interesse degli studenti verso approcci didattici innovativi.

Una parte significativa dei CFU previsti dal percorso formativo è dedicata alle attività di tirocinio, sia diretto che indiretto, riconosciute come elementi centrali per lo sviluppo delle competenze professionali dei futuri docenti. È previsto che le attività di tirocinio siano coordinate dalla figura del tutor, che viene selezionato tramite specifici bandi di concorso destinati a personale docente in servizio presso le scuole secondarie di primo e secondo grado. Presso l'Università di Verona, i candidati risultati idonei per questo ruolo presentavano prevalentemente una formazione di tipo umanistico, senza competenze specifiche nelle discipline scientifiche.

Al fine di garantire un supporto più adeguato e mirato alle studentesse e agli studenti iscritti al percorso A050, l'Ateneo ha quindi introdotto una figura integrativa, quella del tutor di supporto, anch'essa reclutata tramite apposito bando, ma aperto a tutti i candidati con comprovate competenze nella didattica delle discipline scientifiche. Questa scelta ha consentito di arricchire significativamente l'offerta formativa, offrendo agli studenti un ulteriore aiuto per la progettazione della didattica in ambito disciplinare.

Durante gli incontri dedicati al tirocinio indiretto, il tutor di supporto ha svolto un ruolo fondamentale nell'approfondimento delle metodologie didattiche specifiche per l'insegnamento delle materie scientifiche. In particolare, sono state presentate e discusse strategie didattiche innovative, accompagnate da esempi concreti di progettazione di lezioni su diversi argomenti, nonché da proposte operative per la realizzazione di laboratori didattici, con l'obiettivo di favorire un approccio attivo e sperimentale all'apprendimento.

È, inoltre, importante sottolineare che il tutor di supporto risultato vincitore del bando per le prime due edizioni del percorso formativo per la classe A050 è una docente di scienze, attualmente in pensione, con una lunga e consolidata esperienza sia nell'insegnamento sia nella produzione editoriale scolastica, in particolare nell'ambito della chimica. Il suo contributo ha rappresentato un valore aggiunto rilevante, offrendo agli studenti un punto di riferimento autorevole e altamente qualificato.

Come previsto dal DPCM del 4 agosto 2023 le prove finali sono state suddivise in una prova scritta, in cui è stato richiesto che i candidati facessero un'analisi sintetica e critica di casi verificatisi durante il tirocinio, e una prova orale, in cui è stato chiesto alle candidate e ai candidati di discutere lo schema generale di una lezione simulata con analisi didattiche e metodologiche su un argomento sorteggiato in precedenza, con riferimento ai contenuti disciplinari previsti per la classe di concorso A050.

In generale le candidate e i candidati hanno mostrato buona padronanza degli argomenti esposti anche in riferimento ai nuclei fondanti delle diverse discipline.

3. Conclusioni

Entrambi i percorsi di formazione iniziale per i docenti delle classi di concorso A028 e A050 si sono svolti regolarmente, tenendo conto anche delle esigenze lavorative delle studentesse e degli studenti iscritti. Nel complesso, i partecipanti hanno espresso un buon livello di soddisfazione sia per i contenuti proposti, sia per le modalità di erogazione delle attività formative.

Permangono tuttavia alcune criticità, in particolare legate alle tempistiche di programmazione e realizzazione dei percorsi. Le lezioni sono state spesso concentrate in molte ore consecutive, talvolta distribuite nell'arco di uno o due soli giorni per un singolo insegnamento. Questa organizzazione ha

reso più difficile per gli studenti assimilare in modo efficace i contenuti disciplinari e ha limitato le possibilità di sviluppare in aula un confronto critico sulle metodologie didattiche più adeguate a rendere accessibili tali contenuti agli studenti delle scuole secondarie.

Un'ulteriore criticità è rappresentata dalla variabilità del numero di posti autorizzati per ciascuna edizione del percorso, che introduce un elemento di incertezza nella programmazione didattica. Questa situazione rende particolarmente complessa l'organizzazione di attività laboratoriali o sperimentali, le quali richiedono una pianificazione stabile e ben definita. Tuttavia, nelle occasioni in cui tali attività sono state realizzate, gli studenti hanno espresso un elevato livello di apprezzamento, evidenziando l'importanza di un loro inserimento strutturato all'interno del piano di studi.

Si auspica, per il futuro, un'attivazione stabile e programmata con tempistiche chiare e adeguate al carico didattico dei percorsi universitari di formazione iniziale per i docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado, affinché possano entrare in modo strutturale e continuativo nell'offerta formativa degli atenei italiani.

Percorsi di formazione per insegnanti della classe A034: l'esperienza dell'Università di Pisa

Paola Selleri¹ e Valentina Domenici²

¹Istituto di Istruzione Superiore "Santoni-Gambacorti" di Pisa;

²Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa

e-mail: paola.selleri@gmail.com; valentina.domenici@unipi.it

Abstract. The Initial Training Programmes for teachers (PF) started in 2024, a few years after the conclusion of former initiatives (SSIS, TFA, PAS) for secondary school teaching access at national level. PF represents a serious challenge for Universities to coordinate internal resources with different contributions from schools and local administrations in a short time frame. To set up efficient and useful courses, Universities need to convert the national legal framework for PF, indicating generic training objectives and fixing the exact timing, into actual programmes fleshing out the various planned educational activities with practical details. Besides providing future teachers with the required technical and scientific competences, the training programme should prepare them to view the school as a complex system, where teachers interact within each other as well as with pupils, families, and various public and private organizations in the local area.

This paper aims to present the experience at Pisa University during the first two years of Initial Training Programmes for teachers in chemical sciences (A034). In particular, the motivations for the choice of courses' content and for work placement are discussed. This brief analysis allows us to identify strengths, weaknesses and main challenges of the chosen approach, and to highlight potential routes for improvement.

Keywords: formazione insegnanti; metodologie didattiche; Scuola Secondaria di II grado

1. L'attivazione dei percorsi di formazione iniziale degli insegnanti: dal DPCM del 4 agosto 2023 alla realtà

L'attivazione dei percorsi di formazione iniziale degli insegnanti (PF), previsti dal DPCM del 4 agosto 2023, ha rappresentato una sfida organizzativa significativa per tutti gli atenei italiani, data la difficoltà di coordinare in tempi stretti le diverse risorse di atenei, scuole, Uffici Scolastici Regionali al fine di costruire un percorso qualificante in grado di rispondere ai bisogni dei docenti. D'altronde, dopo tanti anni di vuoto nella formazione insegnanti, dopo le precedenti esperienze della SSIS (Scuole di Specializzazione all'Insegnamento Secondario istituite nel 1999 fino al 2008) e dei successivi TFA (Tirocinio Formativo Attivo) e PAS (Percorsi Abilitanti Speciali), destinati quest'ultimi solo agli insegnanti precari, la riforma era tanto attesa e auspicata.

Il lavoro svolto dagli atenei è consistito nel tradurre operativamente il DPCM e organizzare di fatto i percorsi sulla base delle risorse reali e all'interno dei tempi propri delle scuole e degli USR. Ogni ateneo ha dovuto riempire di contenuti operativi le diverse attività formative previste dal DPCM, per le quali erano stati fissati solo i numeri dei crediti formativi universitari (CFU) e gli obiettivi formativi, al fine di costruire percorsi ben definiti in grado di accompagnare i corsisti verso il raggiungimento delle innumerevoli competenze previste da DPCM per la professione docente. Tali competenze erano indicate molto dettagliatamente nell'allegato A del documento ministeriale sotto il "profilo conclusivo del docente abilitato". La costruzione dei PF sulla base delle indicazioni normative ha riguardato non solo l'organizzazione delle attività didattiche, ma anche quelle di tirocinio (diretto e indiretto) e delle prove finali.

2. Le attività di didattiche specifiche della disciplina chimica per i percorsi della classe A034 “Scienze e tecnologie chimiche”

Nel primo ciclo gli immatricolati dell'Ateneo di Pisa per le classi di concorso A028, A050 e A034 hanno rappresentato il 20% del totale; nel secondo ciclo sono scesi a circa il 15%, mentre il numero degli iscritti per la classe A034 è rimasto pressoché costante, intorno ai 20 corsisti per entrambi i cicli.

Le attività didattiche dell'area comune sono state erogate interamente in modalità online, al fine di rendere più sostenibile la gestione degli spazi dell'Ateneo e, al contempo, di agevolare la partecipazione dei corsisti impegnati nelle scuole del territorio provinciale e in sedi extra-provinciali.

Per quanto riguarda le didattiche disciplinari, che nel caso della classe di concorso A034 l'Università di Pisa ha deciso di erogare completamente in presenza, l'offerta didattica è stata articolata in moduli specifici, finalizzati a coniugare l'approfondimento dei contenuti disciplinari con le esigenze didattiche, così suddivisi:

- 3 CFU per la didattica della chimica analitica, 3 CFU per la didattica della chimica generale e inorganica e 3 CFU per la didattica della chimica organica;
- 4 CFU divisi in due sotto-moduli da 2 CFU ciascuno per la didattica della chimica industriale;
- 3 CFU specificamente dedicati alle metodologie didattiche per l'insegnamento della chimica.

Vista la varietà dei diversi titoli di accesso per la classe di concorso A034, la selezione degli argomenti, necessaria per ragioni di tempo, si è rivelata molto delicata in quanto si è scelto di selezionare argomenti più significativi dal punto di vista disciplinare, ma allo stesso tempo facilmente spendibili nella Scuola Secondaria di secondo grado in accordo con le Linee Guida dei tecnici e le Indicazioni Nazionali dei licei. Questa articolazione ha effettivamente consentito di approfondire i nuclei fondanti delle discipline chimiche in chiave didattica, cercando di proporre una trasposizione efficace nei diversi contesti della Scuola Secondaria.

Un aspetto altrettanto delicato riguarda l'eterogeneità dei corsisti in termini di esperienze pregresse nella Scuola Secondaria. Ad esempio, i corsisti che hanno intrapreso i percorsi di formazione avendo alle spalle tre o più anni di servizio, quelli che dunque devono conseguire 30 CFU, devono seguire in base al DPCM solo 4 CFU di didattiche disciplinari. Per tali corsisti il corso obbligatorio selezionato è stato quello di 4 CFU riguardanti la chimica industriale. Tale scelta è stata fatta anche alla luce delle indicazioni europee. Nel primo sotto-modulo da 2 CFU, infatti, vengono trattati i polimeri, la loro preparazione e il relativo riciclo e recupero, temi molto importanti per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, legata a uno dei tre nuclei tematici indicati dalle Linee Guida riviste nel 2024 per l'insegnamento trasversale dell'educazione civica introdotto con la legge 92 del 2019. Lo studio dei polimeri viene affrontato con una curvatura diversa in tutte le articolazioni degli istituti tecnici a indirizzo chimico, oltre che nella chimica dei materiali del terzo e quarto anno della maggior parte degli indirizzi del liceo artistico e nella chimica applicata del tecnico settore Moda, Tessile Abbigliamento. Nel secondo sotto-modulo sono trattati i principi generali degli impianti chimici e i principi della chimica industriale. Tali argomenti sono molto importanti in vista della seconda prova per l'esame di stato, ora tornato esame di Maturità degli istituti Tecnici indirizzo Chimica e Materiali, argomenti che spesso non vengono affrontati nei corsi di laurea che rappresentano il titolo di accesso per la classe di concorso A034. La maggior parte dei laureati in Chimica, CTF, Farmacia non ha mai studiato impianti industriali, a meno che non abbia frequentato un istituto tecnico a indirizzo chimico.

Molto importanti e correlati agli impianti industriali sono anche gli argomenti della sicurezza e dei processi industriali per la produzione di molti materiali di uso comune. A titolo di esempio, la produzione delle fibre artificiali, come la viscosa o le sintetiche, sono argomenti che immediatamente riportano a temi complessi, quali la sostenibilità nella moda, che suscitano interesse negli studenti perché riguardano direttamente le loro scelte di vita quotidiana.

Un'analogia e attenta ricognizione degli aspetti didattici ha portato alle scelte contenutistiche per la chimica analitica, per la chimica organica e per la chimica inorganica e generale, in modo che tutti i CFU per i corsisti PF60 fossero coerenti con le Linee Guida e con le Indicazioni Nazionali, nonché con le raccomandazioni europee in termini di didattica.

All'interno dei percorsi per i corsisti che dovevano seguire interamente i 60 CFU, ovvero quelli che non avevano svolto tre anni di supplenze nelle scuole, si sono rivelati particolarmente significativi tra i 16 CFU di didattiche disciplinari, i 3 CFU specificatamente dedicati alle metodologie didattiche della chimica, dove sono stati presentati in chiave operativa, contestualmente ai modelli didattici della chimica, varie applicazioni delle metodologie già affrontate nelle didattiche di area comune, ma declinate specificatamente sulle peculiarità disciplinari della chimica. Nell'organizzazione di questi 3 CFU di metodologie didattiche della chimica è stata posta particolare attenzione alla discussione di azioni didattiche concrete, in cui gli alunni siano realmente posti al centro del processo di apprendimento, in modo da stimolare adeguati ragionamenti per raggiungere definizioni operative e concrete attorno ai grandi nodi concettuali della chimica. È stata, inoltre, affrontata in modo sistematico una riflessione sulle principali misconcezioni legate alla chimica e ai luoghi comuni che contribuiscono alla loro diffusione, offrendo ai corsisti spunti e strumenti utili da utilizzare durante l'insegnamento della chimica.

3. Il ruolo delle attività di tirocinio diretto e indiretto nei percorsi di formazione

Sia le attività di tirocinio diretto (TD) sia quelle di tirocinio indiretto (TI) rappresentano, all'interno dei percorsi di formazione iniziale degli insegnanti, una preziosa opportunità per i corsisti di essere introdotti e prendere confidenza con il ruolo del docente nel complesso contesto scolastico.

La durata del tirocinio diretto ha rappresentato in entrambi i cicli un aspetto critico dei percorsi formativi PF. Nel primo ciclo, lo svolgimento si è concentrato nel periodo settembre-dicembre, mentre nel secondo ciclo si è svolto da maggio a ottobre, includendo la sospensione estiva delle attività didattiche. Tale contrazione del periodo di tirocinio nelle scuole non ha consentito ai corsisti di seguire in modo completo le diverse attività scolastiche, sia didattiche sia collegiali e organizzative. Nel primo ciclo in particolare l'avvio del TD ha rappresentato una fase particolarmente complessa dei percorsi di formazione, a causa della necessità di coordinare in tempi rapidi procedure organizzative articolate, quali l'accreditamento delle scuole, la definizione e pubblicazione degli elenchi aggiornati dei tutor scolastici e l'individuazione delle attività didattiche e istituzionali accessibili ai corsisti. In questa prima fase si è registrata una grande variabilità nelle attività di tirocinio svolte nelle diverse scuole, in parte dovuta alle differenti disponibilità e sensibilità dei dirigenti scolastici. In molti casi non è stato subito chiaro quali attività scolastiche fosse possibile valorizzare all'interno del tirocinio e come queste potessero poi confluire in modo proficuo nelle prove finali.

Nel secondo ciclo i tempi inizialmente previsti sono stati rimodulati a seguito della nota interministeriale del 28 maggio 2025, che ha anticipato la conclusione dei percorsi al fine di raccorderli con le procedure concorsuali per l'accesso ai ruoli del personale docente previste dal PNRR. È stato necessario, dunque, ripensare le attività di tirocinio in modo da valorizzare quelle non strettamente didattiche dell'esperienza scolastica.

In entrambi i cicli si è rivelata fondamentale la figura del tutor scolastico, ossia del docente che, nella scuola di svolgimento del tirocinio, introduce il corsista al complesso sistema scuola, nel quale l'attività didattica in classe rappresenta solo una piccola parte rispetto al lavoro di programmazione, pianificazione e coordinamento, indispensabile a monte dell'attività didattica. Come constatato con i corsisti durante entrambi i cicli, questo aspetto non viene immediatamente percepito da coloro che per la prima volta si avvicinano alla professione docente.

Il tirocinio indiretto, d'altra parte, rappresenta l'essenziale correlazione tra la realtà scolastica e quella universitaria: a questo fine è importante il confronto continuo e costruttivo del tutor coordinatore con il direttore dei percorsi e con i tutor scolastici. Nell'esperienza dell'Università di Pisa, le attività di tirocinio indiretto hanno previsto incontri sia comuni per i corsisti PF30 e PF60, sia a gruppi ristretti per i PF30 o PF60. Negli incontri comuni sono stati trattati aspetti della normativa scolastica in chiave laboratoriale, di riflessione condivisa e di confronto. Tra questi aspetti un ruolo importante è quello dei quadri di riferimento nazionali, delle prove equipollenti relativamente all'esame di stato (ora esame di maturità) e della progettazione didattica. Tale approccio è coerente con quanto espressamente indicato nell'art. 10 del DPCM in cui vengono indicati, tra i compiti dei tutor coordinatori, l'affianca-

mento e la supervisione dei materiali che i corsisti devono produrre (e-portfolio, relazione finale per i corsisti PF60 e PF60-24 e progettazione didattica per i corsisti PF30).

Per i corsisti PF60, gli incontri di TI sono stati incentrati maggiormente sulla riflessione in merito alle attività del tirocinio diretto e sull'analisi del contesto Scuola e delle diverse attività scolastiche, oltre che sull'analisi dei documenti strategici (Piano Triennale dell'Offerta Formativa PTOF, Rapporto di Autovalutazione RAV, Piano di Miglioramento PdM) delle scuole sede di tirocinio per i corsisti.

Per i corsisti PF30, sono stati previsti incontri di TI di accompagnamento nella stesura della progettazione scolastica oggetto di valutazione. In questo ambito i corsisti hanno apprezzato l'utilità delle attività laboratoriali in gruppo di trasposizione didattica di argomenti trattati nelle didattiche disciplinari alla luce delle Linee Guida, ovvero in chiave di analisi di prerequisiti, di obiettivi di apprendimento, di attività laboratoriali possibili e sostenibili in termini di sicurezza e di inclusione. Grande importanza hanno rivestito gli aspetti legati alla valutazione, ovvero le attività di costruzione di specifiche griglie di valutazione per diverse prove con l'individuazione degli strumenti compensativi e dispensativi adeguati, senza modifica degli obiettivi di apprendimento. Un altro aspetto molto apprezzato dai corsisti è stato quello relativo alla progettazione in chiave inclusiva di attività laboratoriali significative, in quanto è sempre più rilevante nella scuola il saper coniugare sicurezza e inclusione. Come è evidente nel DPR del 25/09/2025, l'impegno della scuola a garantire la sicurezza di tutti gli ambienti, a maggior ragione del laboratorio di chimica, per gli studenti anche con disabilità (modifica del recente DPR) deve essere massimo.

4. Conclusioni

L'esperienza dei primi due cicli dei Percorsi di Formazione ha evidenziato quanto la formazione per i docenti sia un processo essenziale e critico, soprattutto alla luce della complessità delle competenze *educative, disciplinari, psicopedagogiche, metodologico-didattiche, organizzativo-relazionali, di osservazione, valutazione, documentazione, innovazione e ricerca, tra loro correlate e interagenti, che tengano conto anche delle diverse fasi di crescita e di maturazione dei discenti* (vedi all. A del DPCM 04/08/2023).

Una trasposizione didattica efficace può concretizzarsi solo se, a una solida preparazione disciplinare, si accompagna la chiara consapevolezza del docente di insegnare e di esercitare la propria libertà didattica nel contesto Scuola, all'interno di una cornice normativa in cui confluiscono anche le indicazioni europee in termini di competenze da sviluppare e di didattica.

Il docente non insegna da solo in una classe, ma in un sistema complesso in cui deve saper coordinare e gestire le diverse istanze sia degli studenti e delle studentesse, che delle famiglie, dei colleghi e delle istituzioni presenti nel territorio in cui la scuola è inserita. In questo sistema ad alta complessità il docente deve essere accompagnato per poter svolgere la professione con la consapevolezza che può garantire effettivamente la libertà di insegnamento sancita dall'art. 33 della Costituzione e ribadita nella normativa scolastica di riferimento.

L'esperienza maturata presso l'Università di Pisa durante i primi due cicli dei PF ha evidenziato alcuni aspetti critici dell'organizzazione dei PF, soprattutto legati alle tempistiche molto strette e alla parziale sovrapposizione temporale tra lezioni e tirocini, che consente poco tempo ai corsisti per una adeguata rielaborazione. Tuttavia, la scelta oculata dei contenuti dei corsi disciplinari, con una particolare attenzione agli aspetti didattici, così come un elevato coordinamento e sinergia tra le didattiche disciplinari e le attività di tirocinio indiretto, hanno permesso di rendere il percorso di formazione un'esperienza significativa per i corsisti.

Bibliografia di riferimento

DPCM 4 agosto 2023

Testo Unico in materia di Istruzione D.Lgs n.297/1994

Legge 92/2019 Introduzione insegnamento scolastico dell'educazione civica

Nuove Linee Guida per l'insegnamento dell'Educazione Civica

Una riflessione sugli aspetti didattici del legame chimico come condivisione di elettroni e dell'elettronegatività

Matteo Spotti e Giovanni Di Liberto

Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano-Bicocca

e-mail: giovanni.diliberto@unimib.it

Abstract. High school chemistry courses show several challenges. It is difficult to explain highly abstract and complex topics within the limited time available, and students may struggle to grasp concepts that can appear like dogma. Topics such as atomic structure, quantum mechanics and chemical bonding require a balance of scientific accuracy and clear, accessible explanations. In this work, we focus on how some key ideas can be taught more effectively, spanning from the Bohr atomic model to the chemical bonding and the concept of electronegativity. The Bohr model represents an important step for students, as it introduces the concept of quantization in a relatively simple and intuitive way, through discrete atomic radius and energy levels. From here, the transition to the quantum model of Schrödinger helps students to understand a new way of describing objects at the atomic scale, such as electrons, no longer as particles in orbits but as entities described by wavefunctions and quantum numbers. Next, with a sufficiently straightforward understanding of the quantum nature of the atom, we will examine the reasons why chemical bonds form, referring to the works of Heitler, London and Pauling. Finally, we will discuss how chemists simplify physical complexity by defining simple descriptors such as electronegativity, focusing on the works of Pauling and Mulliken. Overall, the article emphasises the importance of effective teaching strategies in chemistry, encouraging teachers to use models as helpful tools for guiding understanding rather than presenting them as absolute and rigid truths.

Keywords: elettronegatività; legame chimico; modello atomico

1. Introduzione: l'atomo di Bohr e l'atomo quantistico

Il primo modello atomico in grado di restituire una descrizione quantitativa della natura quantistica di atomi (idrogenoidi) è il modello di Bohr [1]. Questo modello atomico è forse, dal nostro personale punto di vista, quello più importante da trasmettere ai giovani studiosi in chimica, in quanto rappresenta un nodo concettuale che sancisce il passaggio dalla natura classica di atomi e particelle subatomiche a quella quantistica.

Ricordiamo che il modello di Bohr dà una descrizione classica dell'orbita circolare di un elettrone attorno al nucleo, in cui viene postulato che *i)* l'elettrone è stabile nella sua orbita, che chiamiamo stato stazionario, *ii)* il momento angolare dell'elettrone orbitante è quantizzato. Ripercorriamo rapidamente i passaggi matematici di questo modello. Dal primo postulato si evince che lungo l'orbita circolare la forza centripeta dell'elettrone deve uguagliare la forza di attrazione Coulombiana:

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{Ze^2}{r^2} \quad (1)$$

dove m è la massa dell'elettrone, v è la velocità lineare, r è il raggio dell'orbita, k è la costante di proporzionalità Coulombiana, Z è il numero atomico o numero di protoni (per H , $= 1$) ed e è la carica elementare dell'elettrone. Da questa equazione è facilmente ricavabile il raggio dell'orbita:

$$r = \frac{Zke^2}{mv^2} \quad (2)$$

Dal secondo postulato, è possibile identificare quali sono le orbite che soddisfano questa ulteriore condizione. In particolare, il momento angolare dell'elettrone lungo l'orbita deve essere un multiplo intero positivo della cosiddetta costante di Planck ridotta ($\hbar = h/2\pi$). Il termine n viene definito numero quantico principale.

$$mvr = n\hbar \quad (3)$$

A partire dalle equazioni 2 e 3 è possibile derivare l'espressione del raggio in funzione di n . È evidente che il raggio atomico, oltre al momento angolare, è quantizzato ed è direttamente proporzionale al quadrato del numero quantico principale:

$$r = n^2 \frac{\hbar^2}{kZe^2m} = n^2 a_0 \quad (4)$$

Si definisce a_0 il raggio di Bohr, uguale a r per $n = 1$. Anche l'energia del sistema risulta quantizzata, come mostrato calcolando la somma dell'energia cinetica e potenziale sfruttando le equazioni 1 e 4:

$$E = -\frac{mk^2Z^2e^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{Z^2}{n^2} \cdot E_0 \quad (5)$$

$E_0 = mk^2e^4/2\hbar^2$ è l'energia dello stato fondamentale (*ground state*), pari a $-13,60$ eV. Una rappresentazione della quantizzazione del raggio e dell'energia è riportata in figura 1. È interessante osservare come la differenza di energia tra due livelli energetici successivi diminuisca all'aumentare del numero quantico. Quando n assume valori grandi la separazione tra i livelli energetici è quasi nulla, portando alla perdita della discretizzazione dell'energia. Questa struttura dei livelli energetici ha consentito di spiegare teoricamente le osservazioni spettroscopiche dell'atomo di idrogeno, come le serie di Balmer e di Lyman [2, 3]. Il modello di Bohr è, quindi, un modello classico con un postulato quantistico che porta a proprietà discrete, cioè quantizzate. Questo è un elemento didatticamente essenziale da trasmettere e far interiorizzare agli studenti.

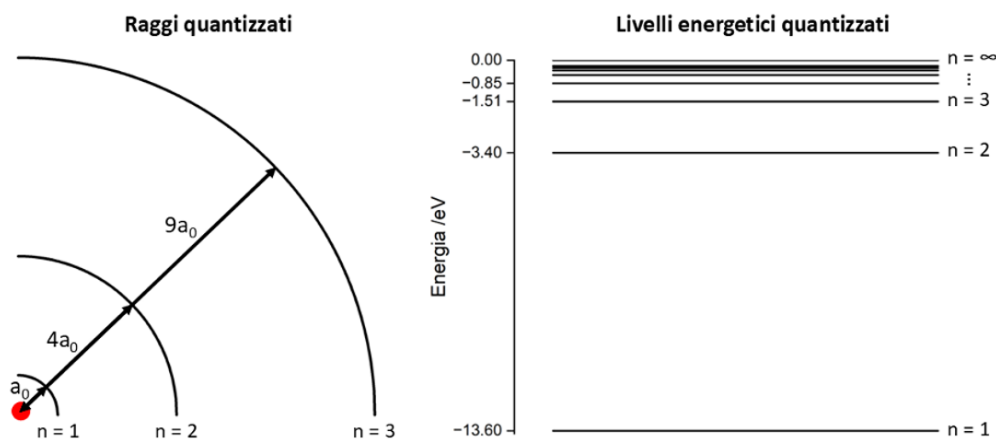


Figura 1. Rappresentazione della quantizzazione del raggio (equazione 4) e dell'energia (equazione 5) nel modello atomico di Bohr

Sappiamo che il modello quantistico di Schrödinger sancisce un cambio di pensiero, dove abbandoniamo la visione classica delle particelle, in cui possiamo assegnare delle traiettorie, e passiamo a una visione ondulatoria [4]. Riassumendo il risultato in maniera estremamente, troppo, pragmatica: nel modello di Bohr le orbite, discrete, sono descritte da un unico numero quantico n . Nel modello quantistico, invece, gli orbitali sono descritti da quattro numeri quantici, n, l, m, m_s .

Il parametro n , come già detto, è il numero quantico principale, l è il numero quantico secondario (o di momento angolare), m è il numero quantico magnetico, e m_s è il numero quantico di spin. Ognuno di questi quattro parametri descrive un differente tipo di quantizzazione. Tra tutti, m_s è quello più misterioso. Per gli elettroni può assumere solo due valori, $-1/2$ e $+1/2$. Generalmente, viene associato alla rotazione degli elettroni attorno al proprio asse; nulla di più lontano dalla realtà, infatti non c'è alcuna relazione tra m_s e la rotazione. Al contrario, m_s è un indice che possiamo assegnare a una qualunque particella subatomica e, nel caso dei fermioni (come gli elettroni), può assumere solo due valori. Altre particelle, come i bosoni, possono avere altri valori di spin ammessi. Lo spin è intimamente legato alla simmetria delle particelle e alla loro indistinguibilità, un concetto di cui diremo qualcosa in più a breve. L'esistenza di quattro numeri quantici, ognuno con il suo significato fisico, porta alla costruzione dello schema di orbitali atomici, che poi consente la costruzione delle configurazioni elettroniche degli atomi.

2. Dagli atomi alle molecole: il legame chimico

Se vogliamo descrivere la distribuzione degli elettroni in una molecola, tecnicamente, dobbiamo risolvere un problema matematico molto più complesso rispetto a quello visto per un singolo atomo. Se, invece, ragioniamo qualitativamente possiamo descrivere la configurazione elettronica di una molecola come una combinazione (lineare) delle configurazioni elettroniche associate ai singoli atomi. Questo concetto è alla base delle teorie del legame di valenza e degli orbitali molecolari [5].

Se eseguiamo la sovrapposizione delle funzioni matematiche associate agli orbitali di atomi diversi, che in gergo tecnico viene chiamata *overlap*, otterremo una nuova funzione che descriverà la distribuzione degli elettroni nella molecola. L'interpretazione fisica di questa operazione è l'interazione tra due o più elettroni associati agli orbitali che si sovrappongono. In altre parole, stiamo sovrapponendo orbitali atomici tramite la condivisione degli elettroni tra gli atomi. Definiamo, quindi, legame chimico la condivisione di elettroni tra atomi nel formare una molecola. Una condizione essenziale che definisce il legame chimico è quella di portare a uno stato più stabile. È chiaro, però, che rompere una serie di legami per formarne di nuovi, una perifrasi di reazione chimica, può portare a situazioni meno stabili; ma la formazione di un singolo legame deve stabilizzare il sistema.

Il legame come condivisione di elettroni incontra un piccolo ostacolo concettuale quando definiamo un legame chimico come covalente puro o ionico. Nel primo caso, spesso diciamo che c'è condivisione ugualitaria degli elettroni tra i due atomi coinvolti. Nel secondo caso, non c'è proprio condivisione, bensì un elettrone di un atomo viene strappato dall'altro, portando a due ioni con cariche opposte interagenti. In assenza di una vera e propria condivisione, possiamo ancora definire "legame" il legame ionico? L'idea che consente di riconciliare l'apparente discrepanza è la polarità del legame covalente, dove definiamo un concetto intermedio tra i due estremi. Se un atomo è in grado di attrarre elettroni più dell'altro, allora gli elettroni del legame saranno maggiormente localizzati su di esso. In caso di polarità nulla, ritroviamo il legame covalente puro, mentre nell'altro estremo, quello ionico, la polarità è talmente elevata che un elettrone di un atomo viene completamente strappato all'altro.

Se analizziamo più nel profondo la natura del legame chimico troviamo un dettaglio davvero affascinante, proposto per la prima volta da Heitler e London, quasi un secolo fa, nel 1927 [6]. Essi analizzarono il legame chimico nella molecola di H_2 . Per prima cosa, provarono a descrivere il legame chimico come condivisione classica di elettroni, cioè dove i nuclei di idrogeno e gli elettroni subiscono un potenziale elettrostatico definito dalla legge di Coulomb (E_{11}). La soluzione risultante è riportata in figura 2, dove è mostrato l'andamento dell'interazione H-H, cioè l'energia di legame (D_{H_2}) rispetto alla distanza H-H, d_{H-H} .

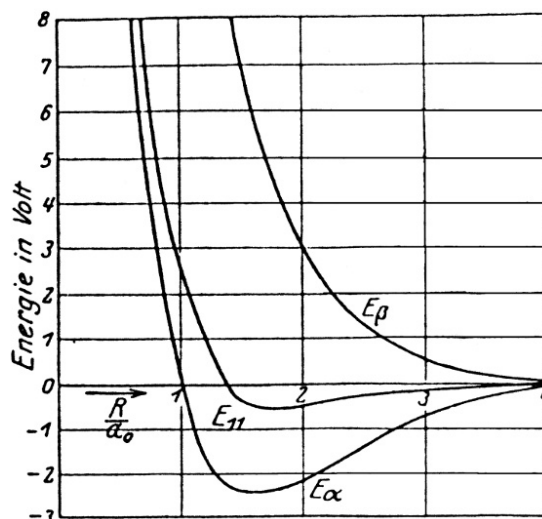


Figura 2. Profilo di energia del modello di Heitler e London di H_2 ; E_{11} rappresenta la curva calcolata considerando il legame chimico solo come interazione Coulombiana; E_α è la curva calcolata includendo anche il termine quantistico di scambio (riproduzione da ref. 6)

È curioso notare che l'interazione risultante è molto più debole (cioè, il minimo della curva ha energia poco negativa) rispetto a quella misurata sperimentalmente per il legame H-H, e non sorprende che la distanza di legame ottenuta sia più lunga. Per riprodurre le osservazioni sperimentali, Heitler e London osservarono che è necessario introdurre un concetto ulteriore. Gli elettroni devono essere necessariamente trattati come oggetti quantistici, cioè descritti da una funzione d'onda. In particolare, una proprietà degli elettroni (e in generale di tutti i fermioni) come oggetti quantistici è che sono particelle indistinguibili. Immaginiamo, ad esempio, di prendere due palline da ping-pong: entrambe arancioni, della stessa dimensione e con identico peso. Se le mescolassimo a occhi chiusi, una volta riaperti non saremmo più in grado di distinguerle tra loro: ecco, per gli elettroni vale lo stesso. Matematicamente, il sistema premescolato è definito da una certa funzione d'onda Ψ , mentre dopo il mescolamento la funzione d'onda che descriverà il sistema avrà segno opposto ($-\Psi$), se le particelle sono state scambiate. Il lettore di fronte a questa frase potrebbe essere un po' spaesato. È bene ricordare che l'interpretazione quantistica non sempre (anzi, quasi mai) ha equivalenti nella fisica classica. Non dobbiamo sorprenderci, quindi, se alcune cose risultano alquanto "misteriose" ai nostri occhi, abituati a vivere nella quotidianità della fisica classica. Possiamo riassumere facilmente questo concetto dicendo che, quantisticamente, il contributo al legame chimico è dato da un termine elettrostatico classico, più un termine puramente quantistico in cui l'interazione ha segno opposto, cioè attrattiva! Il secondo termine, viene chiamato scambio, oppure risonanza quantistica, e porta al rafforzamento dell'interazione tra gli elettroni, con conseguente diminuzione della distanza di legame, vedi figura 2, fino a descrivere un comportamento vicino a quello sperimentale (E_α).

Il lavoro di Heitler e London dimostra che il legame chimico non è condivisione classica di elettroni, o almeno, non è solo questo. Esso non ha una semplice accezione classica legata al "mettere in comune" gli elettroni, ma ha anche un contributo legato alla possibilità di scambiare gli elettroni tra i due atomi! In altre parole, il legame chimico è quantistico, quindi le molecole sono quantistiche; di conseguenza, cosa non è quantistico?

3. Il concetto di elettronegatività: dietro la natura del legame chimico

Abbiamo definito il legame chimico come l'interazione tra due atomi che condividono una coppia di elettroni. Il concetto di condivisione di elettroni del livello energetico più esterno è stato formulato

più di un secolo fa e viene attribuito a Lewis [7], di cui oggi ricordiamo il formalismo per schematizzare gli elettroni del livello energetico esterno in un atomo e i criteri per determinare la distribuzione degli elettroni in una molecola.

Linus Pauling, che iniziò la sua carriera come cristallografo, usò i principi e le prime derivazioni della meccanica quantistica per formulare la sua *teoria del legame chimico*, che è arrivata in eredità fino ai giorni nostri. Come abbiamo visto in precedenza, è fondamentale tenere a mente che il legame chimico può essere spiegato solo invocando un termine attrattivo di interazione tra due elettroni determinato dal loro scambio, un termine puramente quantistico. In altre parole, *in una molecola AB, l'elettrone dell'atomo A può appartenere a B, e quello dell'atomo B può appartenere ad A*; questo è il significato che dobbiamo attribuire alla condivisione in un legame chimico [8].

Oggi, la descrizione qualitativa, ma forse qualcosa anche in direzione quantitativa, è attribuibile in maniera semplice e immediata al concetto di elettronegatività sviluppato da Pauling in uno, il quarto, dei lavori pionieristici della formulazione della *teoria del legame chimico* [9]. Se vogliamo definire la natura del legame tra due atomi, covalente o ionico, è sufficiente calcolare la loro differenza di elettronegatività riportata nella tavola periodica.

Guardiamo un attimo il problema dal punto di vista opposto e facciamo una piccola digressione. Immaginiamo di dover descrivere teoricamente un legame chimico. Dobbiamo prendere due atomi, ognuno con il proprio numero atomico Z e il proprio numero di elettroni. Dobbiamo risolvere l'equazione di Schrödinger e determinare le soluzioni che descrivono gli orbitali nella molecola, ma non è possibile risolverla esattamente perché le interazioni tra più elettroni rendono il problema troppo complesso e non separabile matematicamente. Dovremo, allora, invocare dei metodi numerici approssimati. A seguire dobbiamo calcolare la densità elettronica, che descrive com'è distribuita nello spazio la probabilità di trovare gli elettroni. Fissando un certo valore di probabilità, è possibile rappresentare graficamente le regioni di spazio in cui è più probabile osservare gli elettroni. In questo modo riusciremo a visualizzare quanto gli elettroni più esterni preferiranno un atomo piuttosto che un altro. Se al posto di prendere la molecola AB volessimo studiare la molecola AC , dovremmo ricominciare totalmente da zero. Il problema è immensamente difficile! Come è possibile, utilizzando semplicemente due numeri riportati nella tavola periodica, aggirare questa complessità? Se vogliamo andare di male in peggio, i valori di elettronegatività degli atomi non sono oggetti misurabili, cioè, sono numeri che hanno senso solo se confrontati tra di loro. Tecnicamente, diremo che l'elettronegatività non è un'osservabile quantomeccanica. Di seguito, cercheremo di unire i frammenti del puzzle, provando a chiudere il cerchio. Va sottolineato che, quando viene introdotto un descrittore, esso può certamente risultare utile, ma rappresenta al contempo una forte semplificazione. Per questo motivo, non va considerato come una regola assoluta, bensì come un criterio razionale di massima, valido nella stragrande maggioranza dei casi, soprattutto a fini qualitativi. Rimane, in ogni caso, un criterio orientativo e non una legge rigida. Oltreoceano esiste un detto perfetto per queste situazioni, *there is no free lunch*! Questa considerazione ha valenza in tutto il mondo scientifico, ma a maggior ragione in chimica, dove spesso, anzi spessissimo, ci avvaliamo di criteri descrittivi razionali e semplici per descrivere un fenomeno mostruosamente complesso. Spesso questi criteri, che non sono regole, prendono proprio il nome di regole; regola dell'ottetto, regola di Markovnikov, regole di selezione. Difatti, puntualmente, troviamo eccezioni alla regola dell'ottetto e, quindi, invochiamo un'altra regola, il diciottetto! Oppure, abbiamo reazioni che seguono la regola di anti-Markovnikov, opposta a quella di prima; ed evidentemente, avremo eccitazioni nei sistemi molecolari, che violano le regole di selezione. Nonostante tutto questo, la ricerca di regole semplici, addirittura semplificate, per spiegare concetti estremamente complessi rimane la caratteristica più meravigliosa nelle scienze chimiche. Basta ricordare che si tratta di criteri e non di regole e soprattutto che *there is no free lunch*.

Cominciamo dall'analizzare l'origine del concetto di elettronegatività. Pauling osservò che, sperimentalmente, l'energia di legame di $A-B$ (D_{AB}) nella molecola AB è sempre maggiore della media di $A-A$ (D_{AA}) e $B-B$ (D_{BB}). Se ragioniamo in termini di legame come condivisione spaziale di elettroni tra due atomi, i conti non tornano. Gli elettroni occupano porzioni di spazio definite dagli orbitali (o meglio,

dal loro modulo al quadrato) e la loro condivisione sarà definita dalla sovrapposizione spaziale dei loro orbitali, che però sarà massima sovrapponendo oggetti della stessa forma e dimensione. Quindi, (D_{AB}) non può essere maggiore di D_{AA} e D_{BB} . Chiamiamo il termine di guadagno di energia di legame Δ :

$$\Delta = D_{AB} - \frac{D_{AA} + D_{BB}}{2} \quad (6)$$

Pauling ipotizzò che dipendesse da un oggetto (Δ_χ) che descrive la preferenza dell'elettrone a rimanere più vicino a uno dei due atomi della coppia. Più è positivo Δ_χ , più forte è il termine di stabilizzazione. In particolare, se abbiamo un dipolo, costituito da due cariche $+q$ e $-q$ a distanza r , l'energia di Coulomb varia come q^2 . Analogamente, possiamo assumere $\Delta = \Delta_{\chi^2}$. Facciamo un esempio numerico riferito alla molecola di HCl:

$$D_{HH} = 436 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$D_{ClCl} = 243 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$D_{HCl} = 431 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta = \left(431 - \frac{436 + 243}{2} \right) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} = 91,5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \approx 0,95 \text{ eV}$$

$$\Delta = \Delta_{\chi^2} = (\chi_{Cl} - \chi_H)^2$$

$$\Delta_{\chi^2} = 0,97$$

L'uso delle energie di legame sperimentali permette di determinare diversi Δ_χ , ma non è possibile ottenere valori assoluti di χ di singoli atomi. Indica la tendenza degli atomi ad attrarre elettroni di altri atomi ed è quella che definiamo elettronegatività. Impostando arbitrariamente $\chi_H = 2,1$, possiamo calcolare quella di tutti gli altri atomi. Per esempio:

$$\chi_{Cl} = 2,1 + 0,97 = 3,1$$

È incredibile che la scala di elettronegatività degli atomi determinata da Pauling quasi un secolo fa, a partire dalle energie di legame di una serie di composti noti, venga utilizzata tutt'oggi.

Rimane da comprendere l'origine del termine Δ che stabilizza un legame chimico eteronucleare. Pauling definì l'energia di un legame chimico come la somma di un termine di interazione puramente covalente α e uno ionico β ($\alpha + \beta = 1$). Ovvero, per molecole eteronucleari A-B, esiste un termine extra che stabilizza la molecola, correlato alla "ionicità" del legame, ovvero la molecola è in qualche modo simile a A^+B^- o A^-B^+ . Il termine ionico può essere ottenuto dai valori sperimentali del momento di dipolo μ_{exp} , dove il momento di dipolo teorico coincide con la carica che gli atomi assumerebbero se cedessero o acquistassero gli elettroni di legame, moltiplicata per la distanza di legame misurata sperimentalmente:

$$\beta = \frac{\mu}{\mu_{exp}} \quad (7)$$

Facciamo un esempio. Il momento di dipolo sperimentale di HF è 1,83 D (l'unità di misura del momento di dipolo usata frequentemente in chimica è il Debye, che non fa parte né del Sistema Internazionale né del sistema CGS). Se calcoliamo il momento di dipolo teorico di HF a partire dalla distanza sperimentale e dalle "cariche ideali", +1 e -1, otteniamo un valore molto più elevato, pari a 4,39 D. Naturalmente, il momento di dipolo reale è più piccolo di quello ideale, poiché le molecole non sono specie perfettamente ioniche. In alternativa, possiamo comprendere questo risultato considerando

che la carica reale degli atomi sarà compresa tra 0 (legame perfettamente covalente) e 1 (o -1) (legame perfettamente ionico). Sulla base di questi valori, $\beta = 0,42$, ovvero 42% in percentuale. Possiamo ora discutere come il concetto di elettronegatività entri nel discorso. Se grafichiamo β rispetto alla differenza di elettronegatività, il valore sarà sempre $0\% < \beta < 100\%$. Maggiore è $\Delta\chi$, maggiore sarà β . L'andamento dei punti "sperimentali" può essere razionalizzato semi quantitativamente con una funzione sigmoidale proposta da Pauling, del tipo:

$$\beta = 1 - e^{-\frac{\Delta\chi^2}{4}} \quad (8)$$

Se osserviamo più attentamente l'andamento, riconosciamo tre zone (Figura 3).

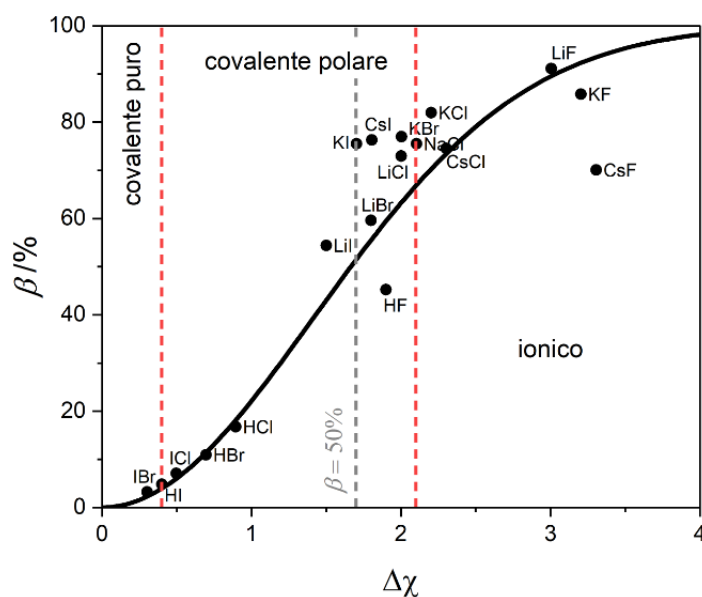


Figura 3. Curva che mette in relazione il grado di carattere ionico di un legame (β) con la differenza di elettronegatività di Pauling degli atomi ($\Delta\chi$); i punti sperimentali sono basati sui valori osservati del momento di dipolo elettrico delle molecole biatomiche [10]

Nella prima non c'è alcun contributo ionico al legame, cioè il legame è solo covalente (puro), se $0 < \Delta\chi < 0,4$. Ecco il criterio che definisce quando un legame è covalente puro.

Per valori di $0,5 < \Delta\chi < 2,0$ c'è un andamento pressoché lineare del contributo ionico al legame chimico con la differenza di elettronegatività. Ecco che appare evidente come al crescere di $\Delta\chi$ ci sia una tendenza crescente di un atomo ad attrarre gli elettroni dell'altro, aumentando la polarità del legame covalente.

Infine, per $\Delta\chi > 2,1$, il carattere ionico inizia a convergere e si avvicina al 100%: ecco che, una volta che un atomo riesce a strappare l'elettrone all'altro, il legame diventa ionico, indipendentemente da quanto sia positiva la differenza di elettronegatività.

L'analisi del grafico, riportato in figura 3, suggerisce però che non esiste un confine netto tra legame covalente e ionico, nonostante spesso ci esercitiamo e facciamo esercitare i nostri studenti a etichettare un legame come di un tipo o dell'altro. La verità è che non esiste un confine, bensì un legame avrà sempre una doppia natura, dove un tipo di descrizione sarà dominante, legame covalente puro o ionico, oppure contribuiranno entrambi, legame covalente polare. Se il legame fosse dato da due contributi, potremmo definire ionico il legame quando $\beta > 50\%$. Se sostituiamo 0,5 nell'equazione 8, troviamo $\Delta\chi = 1,7$: ecco un criterio che viene usato per definire un legame ionico. Peccato però che, se prendiamo il caso di HF, $\Delta\chi = 1,9$, la molecola mostra un comportamento polare, non ionico. È sufficiente considerare

che si presenta in condizioni standard come un gas e non in fase solida. Questo perché un legame ionico puro si può ipotizzare solo nei solidi ionici, dove le interazioni elettrostatiche tra molti ioni nel reticolo cristallino, descritte dal potenziale di Madelung, stabilizzano efficacemente le cariche. Difatti, se guardiamo la figura 3, HF è un punto un po' fuori rispetto alla curva semplificata dell'equazione 8. Siccome praticamente nessun sistema con $1,7 < \Delta_\chi < 1,9$ segue correttamente l'andamento teorico descritto dall'equazione 8, il valore 1,7 è stato sostituito da 1,9. Siamo già a due criteri per definire la stessa cosa. Infine, è possibile osservare che sistemi ionici sono caratterizzati dall'interazione di un metallo con un non metallo. Ecco un terzo criterio; difatti, in questi casi $\Delta_\chi > 2,0$. È fondamentale, quindi, ricordare l'importanza di contestualizzare i criteri, o le regole, analizzando la loro origine e il campo di applicabilità. Non c'è peggior incentivo allo studio di un argomento se l'argomento stesso non è univoco e appare in chiaroscuro. *Se non mi ispira fiducia, se è ambiguo, perché dovrei crederci?*

Ma come è possibile che un numero, Δ_χ , che è originato da due numeri non misurabili, non definibili in assoluto, possa funzionare così bene? Bisogna aspettare una decina di anni, fino alla formulazione di un ulteriore concetto di elettronegatività, questa volta assoluta, da parte di Mulliken [11]. Egli fornì una base teorica più solida al concetto di elettronegatività. Secondo Mulliken, essa corrisponde al valore medio tra la prima energia di ionizzazione (IE) e l'affinità elettronica (EA):

$$\chi = \frac{IE+EA}{2} \quad (9)$$

Questa è una misura assoluta poiché IE ed EA sono misurabili. Da un lato il concetto di elettronegatività perde la semplice interpretabilità, ma guadagna in fondamento teorico, *there is no free lunch*. Incredibilmente, le due scale (Pauling e Mulliken) sono linearmente correlate (Figura 4):

$$\chi_{Pauling} = 0,39\chi_{Mulliken} + 0,24 \quad (10)$$

Questa linearità dimostra che l'elettronegatività di Pauling, pur non essendo una quantità formalmente osservabile in modo diretto, è strettamente legata a grandezze fisiche misurabili come quelle definite da Mulliken. Oggi, nonostante l'elettronegatività di Mulliken sia meglio fondata teoricamente, quella di Pauling è ampiamente adottata per il suo uso semplice e pratico in un ampio spettro di applicazioni chimiche.

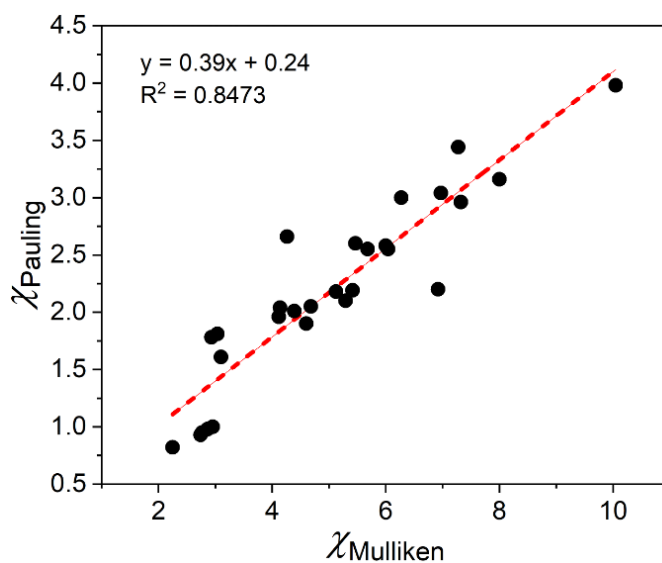


Figura 4. Relazione lineare tra l'elettronegatività definita da Pauling e da Mulliken; il grafico è stato prodotto con i dati di elettronegatività di Pauling, affinità elettronica ed energia di prima ionizzazione ricavati dalla ref. 12

4. Conclusioni

In conclusione, l'insegnamento della chimica nelle scuole superiori richiede un delicato equilibrio tra rigore teorico e semplificazione didattica. Alcuni concetti fondamentali, come la struttura atomica, il legame chimico e l'elettronegatività, sono complessi e affondano le loro radici nella meccanica quantistica, un ambito lontano dall'esperienza quotidiana e dagli strumenti concettuali, matematici e metodologici a disposizione dei discenti degli istituti superiori di secondo grado. Per questo motivo, il ruolo del docente è fondamentale per costruire un percorso che renda questi contenuti accessibili senza alterarne il significato scientifico. Il passaggio dal modello di Bohr al modello quantistico rappresenta un momento chiave, non solo dal punto di vista storico, ma soprattutto didattico, in quanto consente di guidare gli studenti da una visione più intuitiva a una più astratta e corretta della realtà atomistica. Allo stesso modo, il legame chimico e il concetto di elettronegatività mostrano come la chimica abbia reso possibile descrivere fenomeni estremamente complessi attraverso modelli e criteri semplici, a condizione che se ne conoscano i limiti.

In questa prospettiva, è fondamentale presentare le "regole" della chimica come strumenti interpretativi e non come verità assolute. Solo in tal modo è possibile favorire una comprensione più profonda e critica della disciplina, stimolando negli studenti non solo l'apprendimento, ma anche la curiosità verso la natura della chimica.

Riferimenti bibliografici

- [1] N. Bohr, I. On the constitution of atoms and molecules, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1913, **26**(151), 1-25.
- [2] J. J. Balmer, Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs, *Annalen der physik*, 1885, **261**(5), 80-87.
- [3] T. Lyman, The spectrum of hydrogen in the region of extremely short wave-lengths, *Astrophysical Journal*, 1906, **23**(3), 181-210.
- [4] E. Schrödinger, Quantisierung als eigenwertproblem, *Annalen der physik*, 1926, **385**(13), 437-490.
- [5] P. W. Atkins, J. De Paula, J. Keeler, *Atkins' physical chemistry*, Oxford University Press, 2023.
- [6] W. Heitler, F. London, Wechselwirkung neutraler atome und homöopolare bindung nach der quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik*, 1927, **44**(6), 455-472.
- [7] G. N. Lewis, The atom and the molecule, *Journal of the American Chemical Society*, 1916, **38**(4), 762-785.
- [8] L. Pauling, The shared-electron chemical bond, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1928, **14**(4), 359-362.
- [9] L. Pauling, The nature of the chemical bond. IV. The energy of single bonds and the relative electronegativity of atoms, *Journal of the American Chemical Society*, 1932, **54**(9), 3570-3582.
- [10] Dipole moments, in *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version 2005 (Ed. D. R. Lide) (https://archive.org/details/isbn_9780849305948), CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [11] R. S. Mulliken, A new electroaffinity scale; together with data on valence states and on valence ionization potentials and electron affinities, *The Journal of Chemical Physics*, 1934, **2**(11), 782-793.
- [12] M. Weller, et al., *Inorganic chemistry*, Oxford University Press, USA, 2014.

PF 30, 36 e 60 CFU nella formazione iniziale dei docenti di chimica: criticità emerse e prospettive di miglioramento

Giovanni Merola^{1,2} e Mariano Venanzi^{2,3}

¹Istituto Tecnico Industriale Statale "Stanislao Cannizzaro" di Colleferro (RM);

²TLC – Teaching and Learning Center dell'Università di Roma "Tor Vergata";

³Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma "Tor Vergata"

e-mail: giovanni.merola@itiscannizzarocolleferro.it

Abstract. The new Italian initial teacher education pathways (PF30, PF36 and PF60) have reshaped access to secondary teaching, but their first implementation also revealed structural tensions. Focusing on chemistry education (A034), this paper discusses time compression, overlap with school work, heterogeneous participant profiles, disciplinary fragilities and the strategic role of practicum. Special attention is devoted to the territorial distribution of authorized places and to the balance between public/state universities and private/online providers. While online environments may increase accessibility and flexibility for in-service participants, chemistry teacher education also requires strong disciplinary teaching, laboratory infrastructures, safety culture and specialized staff. The paper argues that the quality of initial training should therefore be assessed not only in terms of access, but also in terms of disciplinary depth, tutorial support and integration with real school contexts.

Keywords: formazione iniziale dei docenti; didattica della chimica; PF30; PF36; PF60

1. Introduzione

L'attivazione dei percorsi universitari e accademici di formazione iniziale dei docenti ha inaugurato una fase decisiva nel rinnovamento del reclutamento scolastico [1]. Nel caso della classe di concorso A034, tuttavia, la questione non è soltanto normativa o organizzativa: formare un docente di chimica significa costruire una professionalità capace di integrare saperi disciplinari, didattica laboratoriale, sicurezza, progettazione curricolare e conoscenza dei contesti nei quali la disciplina viene insegnata. L'esperienza dei primi cicli PF30, PF36 e PF60 mostra come la semplice architettura in crediti non garantisca, da sola, la qualità della formazione. Le criticità emerse nella riflessione presentata alla XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica "Ulderico Segre" [2] riguardano la compressione temporale dei percorsi, la sovrapposizione con il lavoro scolastico, l'eterogeneità dei profili in ingresso, la fragilità di alcuni saperi di base e il rischio di una relazione troppo debole tra moduli teorici, tirocinio e prova finale. In questa prospettiva, il tema dei posti autorizzati e della distribuzione dell'offerta tra università pubbliche/statali e soggetti privati o telematici non è un elemento esterno, ma parte integrante della riflessione sulla qualità dei percorsi.

2. Il quadro dei posti autorizzati e la geografia dell'offerta

I dati richiamati in questo contributo, elaborati a partire dall'Allegato A del Decreto Ministeriale n. 138 [3, 4], recante "Autorizzazione dei posti e modalità di selezione per l'attivazione dei percorsi di formazione iniziale dei docenti per l'A.A. 2025/2026", sono stati riassunti e schematizzati in un report [5]. Per le classi A028, A034 e A050 il quadro nazionale mostra una prevalenza complessiva dell'offerta pubblica/statale: 2375 posti, pari al 55,5%, contro 1902 posti, pari al 44,5%, nelle private/telematiche. Tuttavia, la situazione cambia sensibilmente se si osservano le singole classi di concorso e, soprattutto, i diversi contesti regionali.

Nel caso di A034, i posti autorizzati risultano 518 nelle università pubbliche/statali e 381 nelle private/telematiche, per un totale nazionale di 899 posti. La quota pubblica prevale dunque a livello nazionale (57,6%), ma la componente privata/telematica resta molto consistente (42,4%). Il dato regionale è ancora più eloquente: nel Lazio, per la classe A034 i posti autorizzati sono 17 nelle università pubbliche/statali e 63 nelle private/telematiche; in Piemonte 15 contro 70; in Campania 14 contro 59; nelle Marche 10 contro 29; in Sicilia 30 contro 64. Al contrario, regioni come Emilia-Romagna (80/0), Sardegna (36/0), Friuli-Venezia Giulia (15/0), Toscana (46/10) e Veneto (75/10) mostrano una prevalenza molto forte dell'offerta pubblica/statale. La geografia dell'offerta, quindi, è tutt'altro che uniforme e influenza direttamente accesso, sostenibilità e qualità potenziale dei percorsi.

3. La compressione dei tempi formativi

Uno dei problemi più evidenti emersi nei PF30, PF36 e PF60 è la compressione dei percorsi in pochi mesi. La riflessione presentata alla XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica "Ulderico Segre" descrive una vera e propria "corsa contro il tempo": moduli teorici, tirocinio, portfolio e prova finale vengono spesso concentrati in un arco temporale troppo ridotto per consentire osservazione, rielaborazione e sperimentazione autentica. Il primo ciclo, collocato tra novembre e dicembre, si è intrecciato con chiusura del trimestre, valutazioni intermedie, consigli di classe e attività di recupero. Il secondo ciclo, tra marzo e maggio, è andato a sovrapporsi con vacanze pasquali, festività, verifiche finali, scrutini ed Esami di Stato.

Per molti corsisti la difficoltà è stata aggravata dal fatto di essere già impegnati nelle scuole, spesso su più sedi, con orari frammentati, laboratori da seguire, attività funzionali all'insegnamento e spostamenti significativi. In queste condizioni il rischio è evidente: il percorso formativo viene vissuto più come adempimento necessario per l'abilitazione che come spazio autentico di crescita professionale. Per una disciplina come la chimica, dove la costruzione di competenze didattiche richiede tempo, confronto e pratica, tale compressione incide in modo particolarmente negativo.

4. Profili eterogenei e fragilità disciplinari

Un secondo nodo riguarda l'eterogeneità dei profili. Nei percorsi PF30, PF36 e PF60 convivono neo-laureati senza esperienza scolastica, docenti con uno o due anni di supplenza, insegnanti già esperti, vincitori di concorso in fase di completamento del percorso e professionisti provenienti dal settore tecnico-scientifico. È evidente che bisogni formativi così diversi non possono essere soddisfatti in modo ottimale da un impianto del tutto uniforme. Una parte della formazione può certamente essere comune, soprattutto nelle aree pedagogiche e trasversali, ma altre componenti richiederebbero maggiore differenziazione e una più netta attenzione ai nuclei fondanti della disciplina.

Nel caso della chimica, questa eterogeneità si accompagna spesso a fragilità nei saperi di base. Dai dati raccolti durante i percorsi [2] si evidenzia difficoltà su temi come nomenclatura, stereochimica, equilibrio, configurazione elettronica, termodinamica e lettura delle rappresentazioni chimiche. Tali fragilità non sono un dettaglio, perché si riflettono direttamente sulla possibilità di trasformare la conoscenza accademica in sapere insegnabile. A ciò si aggiunge, per la classe A034, il problema delle tecnologie chimiche e della chimica industriale: operazioni unitarie, impianti, bilanci, controllo di processo e sicurezza rappresentano una componente identitaria degli istituti tecnici, ma spesso risultano poco presidiate nella formazione iniziale dei futuri docenti.

5. Il ruolo del tutor e la necessità di una regia unitaria

Nella pratica dei percorsi emerge con chiarezza anche il ruolo decisivo del tutor coordinatore e dei tutor scolastici. Sono loro a tradurre le indicazioni generali in accompagnamento concreto, a leggere i bisogni dei corsisti, a mediare tra calendario universitario e calendario scolastico, a sostenere la progettazione e a dare senso al portfolio. Eppure, questa funzione, pur strategica, è spesso esposta a sovraccarico, margini di incertezza, riconoscimenti non sempre adeguati e buchi normativi.

Senza una regia realmente unitaria, il percorso rischia di apparire ai corsisti come la somma di tre

mondi separati: insegnamenti teorici, tirocinio, prova finale. Al contrario, la qualità formativa cresce quando esiste un disegno coerente, in cui i moduli dialogano tra loro, le attività si richiamano reciprocamente e il portfolio non è l'archivio finale di materiali sparsi, ma la traccia ragionata di un processo di crescita professionale.

6. Il ruolo strategico del tirocinio

In questo quadro il tirocinio diretto e indiretto assume un ruolo decisivo. Il tirocinio non dovrebbe essere una semplice appendice quantitativa del percorso, ma il luogo in cui la professionalità docente si costruisce attraverso osservazione guidata, progettazione, microteaching, analisi di casi, riflessione collegiale e confronto con i tutor. Per la classe A034, ciò significa anche imparare a leggere curricula, quadri orari e PTOF, a distinguere i diversi contesti di insegnamento della chimica, a progettare UDA realistiche, a collegare valutazione, inclusione, sicurezza e, inoltre, a saper progettare e svolgere attività di laboratorio.

La riflessione emersa insiste giustamente su un punto: il tirocinio indiretto non è “una lezione in più”. Esso è il ponte tra università e scuola, a condizione, però, che non venga schiacciato dalla compressione dei tempi o ridotto a mero completamento formale del monte ore. Quando è pensato in modo coerente e progressivo, il tirocinio diventa lo spazio in cui il futuro docente comincia davvero a costruire una propria identità professionale disciplinare e didattica.

7. Pubblico, privato e telematico: accessibilità e qualità della componente disciplinare

La distribuzione dei posti autorizzati, nelle classi di concorso A034, A028 e A050, impone una riflessione più ampia sul rapporto tra università pubbliche/statali e soggetti privati o telematici. Sarebbe riduttivo affrontare il tema in modo ideologico. Le soluzioni telematiche, infatti, offrono vantaggi reali: maggiore flessibilità organizzativa, fruibilità dei contenuti, riduzione dei tempi di spostamento e migliore accessibilità per corsisti già inseriti nel servizio scolastico. I dati suggeriscono, inoltre, che la componente privata/telematica tende a concentrarsi soprattutto nelle regioni con un bacino di utenza più ampio e con una maggiore consistenza potenziale di corsisti, come Lazio, Piemonte, Campania, Lombardia e Sicilia. Per converso, la copertura del resto del territorio continua a poggiare in misura decisiva sulle università pubbliche: ciò è evidente, ad esempio, in Molise, dove nel perimetro delle tre classi considerate l'offerta è interamente pubblica, e in Sardegna, dove per la A034 non risultano posti privati/telematici. Anche in Umbria, pur in un quadro a prevalenza non statale, la presenza dell'Università di Perugia mostra come il presidio pubblico resti essenziale per evitare una copertura integralmente telematica.

Proprio per questo, però, il tema non può essere valutato soltanto in termini di comodità o di numero di posti. Per la formazione iniziale del docente di chimica la qualità del percorso dipende anche dalla disponibilità di laboratori, dalla presenza di personale con formazione specificamente chimica, dalla capacità di organizzare attività sperimentali, dalla cultura della sicurezza e dal raccordo stabile con scuole e tutor disciplinari. Quando tali condizioni sono deboli, può accadere che la parte trasversale del percorso risulti più strutturata e fruibile della componente propriamente disciplinare e laboratoriale.

Va precisato che questa osservazione non deriva direttamente dai dati quantitativi, si tratta piuttosto di una riflessione qualitativa che emerge dall'osservazione dei percorsi e che, per la A034, appare particolarmente rilevante. In alcuni contesti la didattica della chimica e il tirocinio possono essere accorpati a insegnamenti più generali o ad aree affini; in altri, la dimensione laboratoriale rischia di essere meno strutturata di quanto la disciplina richiederebbe. Non è corretto generalizzare né attribuire automaticamente carenze a una tipologia di ente, ma è corretto affermare che, per una classe di concorso fortemente laboratoriale, l'accessibilità va accompagnata da standard molto chiari sulla profondità disciplinare, sull'infrastruttura laboratoriale e sulla qualificazione della docenza.

8. Prospettive di miglioramento

Alla luce delle criticità emerse, i PF30, PF36 e PF60 possono rappresentare una risorsa importante solo a condizione di essere ripensati in modo più coerente. Una prima esigenza riguarda la distribuzione temporale: avvisi più precoci, calendari meno compressi e maggiore raccordo con l'anno scolastico potrebbero restituire al tirocinio la sua funzione formativa. Una seconda esigenza riguarda la differenziazione dei percorsi: non tutti i corsisti hanno gli stessi bisogni e una parte della formazione dovrebbe prevedere moduli o attività di accompagnamento specifici per profili diversi.

Per la A034 è poi indispensabile rafforzare la componente disciplinare professionalizzante. Ciò significa consolidare i nuclei fondanti della chimica, investire sulla didattica di laboratorio autentica, valorizzare sicurezza e analisi strumentale e dedicare uno spazio esplicito alle tecnologie chimiche e alla chimica industriale. Infine, va rafforzata la funzione tutoriale e la rete tra università, scuole e territori: la qualità della formazione iniziale cresce quando il percorso appare come un curriculum unitario e non come la somma di moduli separati, tirocini compressi e adempimenti finali.

9. Conclusioni

La sfida aperta dai nuovi percorsi abilitanti non consiste soltanto nel rendere disponibile un numero adeguato di posti o nel completare formalmente il monte dei crediti richiesti. La vera questione è costruire un modello di formazione iniziale capace di incidere sulla qualità dell'insegnamento della chimica. I dati sui posti autorizzati mostrano che il sistema è in espansione, ma è fortemente differenziato; la riflessione sui primi cicli PF30, PF36 e PF60 mostra, invece, che l'accessibilità del percorso deve essere bilanciata con la profondità della componente disciplinare, laboratoriale e tutoriale.

Per una disciplina come la chimica, il percorso abilitante deve aiutare il futuro docente a entrare in una cultura professionale che tenga insieme sapere scientifico, laboratorio, sicurezza, didattica, inclusione e rapporto con il territorio. In questa prospettiva, il confronto tra pubblico/statale e privato/telematico non va letto come contrapposizione astratta, ma come questione di garanzie formative: accesso, sì, ma insieme a qualità disciplinare, laboratori, tutor qualificati e forte raccordo con la scuola reale.

Riferimenti bibliografici

- [1] D.P.C.M. 4 agosto 2023, *Definizione del percorso universitario e accademico di formazione iniziale dei docenti delle scuole secondarie di primo e secondo grado* (<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/09/25/23A05274/sg>).
- [2] XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica "Ulderico Segre", Bertinoro (FC), 7-8 dicembre 2025 (<https://www.societachimica.it/it/divisioni/didattica/Materiali-XVIIScuola-Didattica-Chimica-Segre>).
- [3] Ministero dell'Università e della Ricerca, Decreto Ministeriale n. 138 del 27 gennaio 2026, *Auto-rizzazione dei posti e modalità di selezione per l'attivazione dei percorsi di formazione iniziale dei docenti per l'a.a. 2025/2026* (<https://www.mur.gov.it/it/atti-e-normativa/decreto-ministeriale-n-138-del-27-01-2026>).
- [4] Ministero dell'Università e della Ricerca, Allegato A al D.M. n. 138 del 27 gennaio 2026, *Quadro dei posti autorizzati per l'attivazione dei percorsi di formazione iniziale dei docenti* (<https://www.mur.gov.it/sites/default/files/2026-01/Decreto%20Ministeriale%20n.%20138%20del%2027-01-2026%20-%20Allegato%20A.pdf>).
- [5] *Posti autorizzati – Confronto Pubbliche/Statali vs Private/Telematiche. Classi di concorso: A028-FI, A034-FI, A050-FI*, dati ricavati dall'Allegato A del ref. 4 (https://uniroma2-my.sharepoint.com/:w/g/personal/7171_merola_uniroma2_onmicrosoft_com/IQALwdQy6fa4S6iTe68cMBtCAau-i6HnVOfi9antRtzR1SrA?e=P34yz9&wdLOR=c8A670F03-9952-A542-A492-FBBCEA474EF4).

La chimica nei percorsi di formazione docenti a UniMORE per le classi A034, A050 e A028

Luca Rigamonti

Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Modena e Reggio Emilia

e-mail: luca.rigamonti@unimore.it

Abstract. This contribution presents the teacher training programs activated at the University of Modena and Reggio Emilia (UniMORE) for the A034, A050, and A028 teaching classes, with particular focus on Chemical Sciences and Technologies. For class A034, the 16 disciplinary ECTS credits in chemistry are described within the 30, 36, and 60-credit pathways, distinguishing between theoretical (5 hours per credit) and laboratory activities (10 hours per credit). Class A050 includes 5 chemistry credits shared with A034, while A028 provides a compact version in 2 chemistry credits tailored to lower secondary education.

Keywords: didattica efficace; comunicazione chimica; laboratorio formativo

1. UniMORE e il Centro Multidisciplinare per la Formazione Insegnanti

In risposta al D.P.C.M. del 4 agosto 2023, le Università italiane hanno attivato i Teaching Learning Centres (o Centri di formazione all'insegnamento) dedicati alla formazione iniziale e abilitazione dei docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado. L'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (UniMORE) il 30 ottobre 2023 ha costituito a tal scopo il *Centro Multidisciplinare per la Formazione degli Insegnanti* (<https://www.desu.unimore.it/it/didattica/formazione-insegnanti/centro-multidisciplinare-la-formazione-insegnanti>) finalizzato al coordinamento didattico e organizzativo del percorso in argomento.

L'offerta formativa di UniMORE si inserisce, quindi, nel quadro nazionale dei nuovi percorsi abilitanti e coinvolge numerose classi di concorso dell'area scientifica e tecnologica. Tra queste figurano A020 (Fisica), A026 (Matematica), A027 (Matematica e Fisica), A028 (Matematica e Scienze), A034 (Scienze e Tecnologie Chimiche), A040 (Scienze e Tecnologie Elettriche ed Eletttroniche), A041 (Scienze e Tecnologie Informatiche), A042 (Scienze e Tecnologie Meccaniche), A047 (Scienze Matematiche Applicate), A050 (Scienze Naturali, Chimiche e Biologiche), oltre alle classi di laboratorio B015 e B016. Il numero di posti disponibili varia a seconda della classe in funzione delle necessità di cattedre a livello nazionale e regionale, ma è indubbia la particolare attenzione data alle discipline STEM, a testimonianza dell'impegno dell'Ateneo nel rispondere al fabbisogno di docenti qualificati in ambito scientifico.

2. I percorsi formativi in dettaglio

I percorsi prevedono una suddivisione dei crediti formativi universitari tra ambiti non disciplinari (24 CFU), disciplinari (16 CFU) e attività di tirocinio diretto e indiretto (20 CFU). La componente non disciplinare, comune a più classi, comprende aspetti pedagogici, psicologici e metodologici generali; quella disciplinare è invece specificamente calibrata sui contenuti delle materie di insegnamento. Per la classe A028, che integra matematica e scienze nella Scuola Secondaria di primo grado, i CFU disciplinari si distribuiscono tra matematica (8 CFU), chimica (2 CFU), fisica (2 CFU), biologia (2 CFU) e scienze naturali (2 CFU). Per la classe A050, rivolta alla scuola secondaria di secondo grado, l'attenzione si concentra su chimica (5 CFU), biologia (5 CFU) e scienze naturali (6 CFU), con una diversa

ponderazione dei crediti. Questa articolazione riflette la necessità di coniugare solidità contenutistica e competenza didattica, in coerenza con i diversi livelli scolastici.

Il percorso A034, dedicato alle Scienze e Tecnologie Chimiche, presenta una struttura approfondita e strutturata sul piano disciplinare. Nei 16 CFU disciplinari trovano spazio insegnamenti di didattica della chimica e comunicazione (5 CFU mutuati con la classe A050), metodologie laboratoriali (5 CFU) e metodologie didattiche avanzate per le discipline chimiche fondanti (6 CFU). La parte dei crediti mutuata con il percorso A050 dimostra la sinergia tra le due classi di concorso. La chimica per la classe A028 risulta, invece, una versione compatta e orientata alla Scuola Secondaria di primo grado. Ovviamente il laboratorio riveste un ruolo centrale per la classe A034, con 40 ore complessive dedicate ad attività pratiche in presenza.

Dal punto di vista metodologico, infatti, il corso distingue chiaramente tra CFU teorici e CFU di laboratorio. Un CFU teorico corrisponde a 5 ore di lezione, erogate prevalentemente a distanza tramite piattaforma Teams, con l'ausilio di video ed esempi, mentre un CFU laboratoriale equivale a 10 ore di attività in presenza. Seppur riconoscendo alcune criticità relative a questa modalità di erogazione, come la ridotta partecipazione attiva e la fatica dovuta a blocchi di cinque ore consecutive online, la scelta della didattica a distanza per la parte teorica risponde a esigenze concrete: primo fra tutti facilitare la partecipazione di docenti già in servizio che necessitano dell'abilitazione, in secondo luogo ampliare il bacino di utenza nelle province di Modena e Reggio Emilia e, anche, superare le difficoltà logistiche legate alla disponibilità di aule. Complessivamente, il percorso prevede 60 ore di teoria e 40 di laboratorio.

Particolare rilievo assume l'insegnamento "Didattica chimica e metodologie di base" (3 CFU, 15 h), articolato in tre lezioni. La prima affronta temi di epistemologia e filosofia della scienza, i modelli di insegnamento della chimica e il triangolo di Johnstone, che mette in relazione i tre livelli macroscopico, microscopico e simbolico della chimica. Vengono discussi i concetti fondanti, i preconconcetti degli studenti e l'uso della storia della chimica come strumento didattico, anche attraverso esempi come Alfred Nobel e i premi Nobel.

La seconda lezione si concentra sulla progettazione didattica e sulla verifica dell'apprendimento, analizzando prove scritte, orali e laboratoriali in ambito chimico, nonché approfondendo l'ordinamento scolastico italiano e come la chimica possa essere presentata ai discenti dei vari livelli in modo appropriato. Il ruolo della Divisione di Didattica Chimica della Società Chimica Italiana (DD-SCI, <https://www.societachimica.it/it/divisioni/didattica/home>) è inoltre presentato al fine di identificare un punto di riferimento in ambito della didattica della chimica, unitamente al Piano Lauree Scientifiche (PLS) che molto ha fatto negli anni per trasmettere la passione e l'orientamento per la chimica.

La terza lezione approfondisce il linguaggio chimico, dal simbolico alle parole, evidenziando l'importanza delle formule e del loro sviluppo storico. Inoltre, durante la lezione si mette in evidenza come la complessità del linguaggio, intesa come ricchezza, è intrinseca nella complessità della realtà che ci circonda e che la chimica è in grado di interpretarla e presentarla in modo chiaro con l'uso di modelli appropriati. Ampio spazio è dedicato alla didattica laboratoriale, nelle sue diverse tipologie (dimostrativa, esplorativa, addestrativa, investigativa aperta e a progetto) e come ognuna possa essere utilizzata in modo efficace in funzione del concetto chimico da far apprendere.

Il modulo di "Comunicazione chimica finalizzata alla didattica" (2 CFU, 10 h) affronta il tema della chemofobia e dei misconcetti diffusi nella società, riflettendo sull'immagine del chimico, anche attraverso la figura di Primo Levi. La chemofobia, infidamente dilagante, può infatti rappresentare un ostacolo nell'insegnamento e trasmissione della chimica agli studenti di ogni ordine e grado, poiché rappresenta una visione "pericolosa" che blocca dal voler comprendere appieno la disciplina. Si analizzano quindi i diversi canali di comunicazione scientifica – scritta, orale, elettronica – in contesti formali e informali, e il concetto di lifelong learning. Un'intera lezione è dedicata ai musei scientifici, dalle Wunderkammer ai moderni science centres, con esempi come il MU-CH di Settimo Torinese (<https://www.mu-ch.it/>) e la valorizzazione della Tavola Periodica di Mendeleev, anche nelle sue rappresentazioni alternative. Il costante movimento tra realtà e sua interpretazione fenomenologica sono alla base di una trasmissione efficace e proficua della disciplina chimica.

La didattica laboratoriale di base (1 CFU, 10 h) prevede due esperienze concrete. Una prima attività riguarda la vetreria chimica e il “senso della misura”: i corsisti manipolano diversi pezzi di vetreria, riflettendo sulla relazione tra forma e funzione (Figura 1), essenziale da trasmettere didatticamente ai discenti in modo tangibile, andando a confrontare misure qualitative e quantitative.

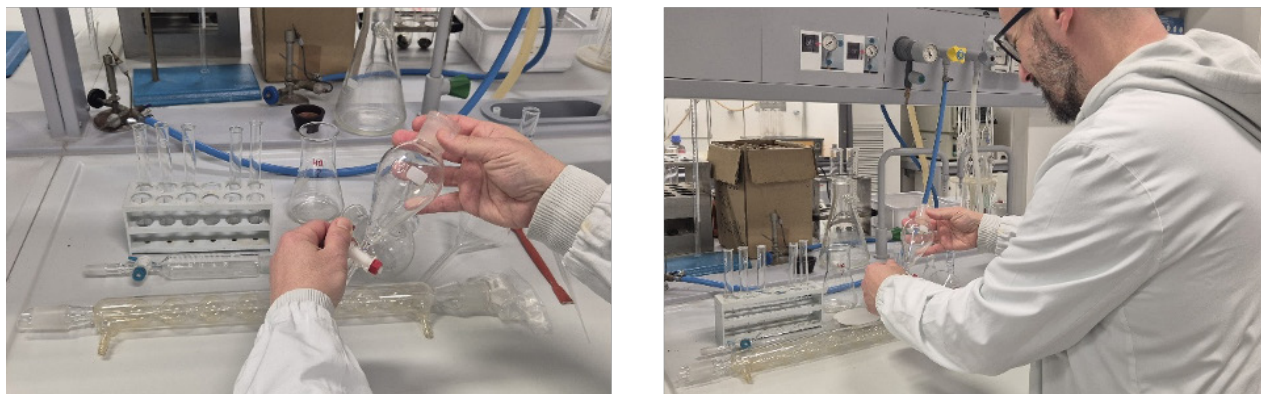


Figura 1. Vetreria di laboratorio a confronto

A tal riguardo, l'esperienza prevede la misura della densità di materiali solidi, di soluzioni saline e di miscele di solventi, utilizzando la vetreria a disposizione, come ulteriore riflessione sullo sviluppo (anche storico) di alcuni pezzi in vetro ormai di uso comune in un laboratorio chimico. Una seconda esperienza affronta i legami intra- e inter-molecolari attraverso l'osservazione macroscopica di punti di fusione e solubilità di composti ionici e molecolari, integrando in modo tangibile i tre livelli del triangolo di Johnstone. La metodologia *enquiry-based* prevede infatti l'assegnazione delle sostanze incognite e la loro identificazione in base ai risultati delle prove sperimentali effettuate (Figura 2).

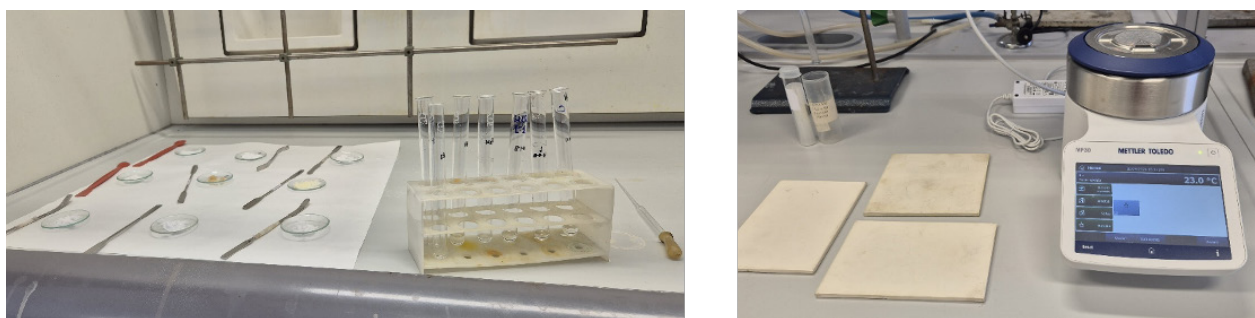


Figura 2. Sostanze incognite e loro analisi con punto di fusione e prove di solubilità

Il laboratorio si conclude con una riflessione sui legami allo stato solido, utilizzando l'accesso al Cambridge Structural Database (CSD) del Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC) <https://www.ccdc.cam.ac.uk/>, dove sono depositate le strutture ai raggi X dei composti molecolari che permettono di visualizzare attraverso software appropriati le distanze e angoli delle interazioni intermolecolari. Nei laboratori disciplinari avanzati (3 CFU, 30 h) si passa, invece, a una progettazione di attività su più turni, al fine di riprendere alcuni concetti chimici attraverso l'esperienza di laboratorio in piccoli gruppi. Ad esempio, la determinazione del contenuto di carbonato di calcio, CaCO_3 , in diverse matrici viene affrontata con una attività basata sulla gravimetria quale tecnica analitica quantitativa. Le titolazioni acido/base vengono svolte sia per via potenziometrica che attraverso l'utilizzo degli indica-

tori (e relativo calcolo del pH), al fine di far cogliere come il punto equivalente e il punto di viraggio siano due aspetti differenti, il primo intrinseco del mondo microscopico e il secondo espressione macroscopica (col cambio di colore) necessaria per noi che “non vediamo” le molecole e gli ioni.

L'attività di chimica organica sui carboidrati viene proposta con metodologia *team based learning*, mentre l'analisi spettrofotometrica dei fosfati viene mostrata quale analisi strumentale.

La valutazione e l'autovalutazione nella pratica laboratoriale (1 CFU, 5 h) sono affrontate attraverso la strutturazione e l'analisi critica della relazione di laboratorio.

Le metodologie didattiche avanzate includono, invece, moduli di chimica analitica (con attenzione al processo analitico e alla validazione del dato), chimica fisica (presentata come ponte tra livello macroscopico e molecolare attraverso la termodinamica), chimica organica (con focus sui meccanismi di reazione) e chimica inorganica (con approfondimenti su mole, legame chimico, proprietà periodiche e bilanciamento).

Il percorso è arricchito da numerosi testi consigliati, sia di didattica sia di divulgazione, tra cui il testo di Valentina Domenici *Insegnare e apprendere chimica* (Mondadori Università, 2018), il testo *I tanti volti della chimica. Percorsi alternativi per insegnarla e apprendere* (CLU EB, 2024) curato da Eleonora Aquilini, Elena Ghibaudi, Margherita Venturi e Giovanni Villani, e il testo di Ryan C. Fortenberry *Complete Science Communication. A guide to Connecting with Scientists, Journalists and the Public* (Royal Society of Chemistry, 2019).

Libri, quali *Favole periodiche. La vita avventurosa degli elementi chimici* di Hugh Aldersey-Williams (BUR Rizzoli, 2012), *Come si sbriciola un biscotto* di Joe Schwarcz (TEA, 2010), *I bottoni di Napoleone* di Penny Le Couteur e Jay Burreson (TEA, 2008), *La chimica allo specchio* di Roald Hoffmann (Longanesi, 2005), *Zio Tungsteno. Ricordi di un'infanzia chimica* di Oliver Sacks (Adelphi, 2002), suggeriti come letture di arricchimento e spunti preziosi per l'insegnamento, contribuiscono a una visione culturale ampia della chimica.

Infine, viene presentato il ruolo che i social media possono ricoprire come supporto alla scuola, con esempi di divulgazione scientifica su Instagram e YouTube. L'uso consapevole dei social può infatti diventare uno strumento per motivare, aggiornare e coinvolgere studenti e docenti, integrando la didattica tradizionale con linguaggi e canali contemporanei.

Nel complesso, il percorso delineato da UniMORE si configura come un modello integrato di formazione, in cui competenze disciplinari, metodologie didattiche, laboratorio, comunicazione e riflessione epistemologica concorrono alla costruzione di una professionalità docente solida, aggiornata e consapevole.

La chimica nei percorsi di formazione iniziale (PFI): analisi comparativa delle classi A028, A034 e A050

M. Carla Aragoni¹, Ugo Cosentino², Antonella M. Maggio³ e Mariano Venanzi⁴

¹Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Cagliari;

²Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra dell'Università di Milano Bicocca;

³Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche dell'Università di Palermo;

⁴Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma "Tor Vergata"

e-mail: aragoni@unica.it; ugo.cosentino@unimib.it; antonella.maggio@unipa.it; venanzi@uniroma2.it

Abstract. The 17th edition of the "Ulderico Segre" National School of Educational Research and Chemistry Teaching, held in Bertinoro in December 2025, focused on Initial Teacher Training Programs for classes involving chemical content: A028, A034, and A050. The contributions presented and the collaborative discussion highlighted the difficulties encountered in implementing these programs and the needs identified by the participating colleagues. In particular, the need of further opportunities for discussion and sharing of the teaching materials produced was emphasized.

Keywords: percorsi di formazione iniziale docenti; PF60; trasposizione didattica

1. Introduzione

La formazione iniziale dei docenti (FID) in Italia ha vissuto negli ultimi decenni una profonda evoluzione, transitando da un modello puramente accademico-disciplinare, eredità della Riforma Gentile, a un paradigma professionalizzante che integra il sapere scientifico con competenze pedagogiche, didattiche e riflessive [1, 2]. Questo percorso, segnato da tappe fondamentali come le SSIS, i TFA e i percorsi FIT, trova oggi una nuova configurazione nel sistema dei 60 CFU, introdotto dal Decreto-Legge 36/2022 e disciplinato dal DPCM 4 agosto 2023, come requisito strutturale per l'accesso al ruolo nella Scuola Secondaria.

In questo complesso scenario normativo si collocano le classi di concorso che coinvolgono con gradi differenti l'area chimica, ciascuna con una specifica identità pedagogica e formativa: la A028 (Matematica e Scienze), caratterizzata da una funzione fondativa e orientativa nella Scuola Secondaria di primo grado, la A050 (Scienze naturali, chimiche e biologiche), improntata a una dimensione scientifico-integrata nel secondo grado, e la A034 (Scienze e tecnologie chimiche), con una spiccata connotazione tecnico-specialistica e laboratoriale di tipo chimico negli istituti tecnici e professionali.

La sfida centrale dei nuovi percorsi FID risiede nel riuscire a operare una corretta trasposizione didattica [3], ovvero quel processo di trasformazione del "sapere sapiente" in "sapere insegnato" che renda la chimica accessibile e significativa per studenti di diversi ordini di scuola. Tale compito richiede al docente non solo solidità epistemologica, ma anche la capacità di agire come un professionista riflessivo [4], in grado di analizzare la propria pratica e di gestire l'incertezza e la complessità intrinseche all'aula.

Tuttavia, come emerso dalle recenti analisi condotte sulla prima edizione dei percorsi abilitanti per la classe A050, i formatori universitari si trovano dinanzi a un nodo critico, costituito dall'estrema eterogeneità dei corsisti. Molti futuri docenti provengono da classi di laurea magistrale non prettamente

chimiche e possiedono basi disciplinari spesso limitate a esami sostenuti anni prima. Questo dislivello deve essere colmato all'interno di un monte ore esiguo (spesso tra le 24 e le 30 ore complessive per la chimica), rendendo impossibile un approccio disciplinare tradizionale.

In preparazione alla XVII Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica "Ulderico Segre" tenutasi a Bertinoro a dicembre 2025 dedicata ai percorsi FID, è stato inviato un questionario ai Direttori dei percorsi e/o ai colleghi chimici che operano in quei percorsi. L'analisi delle risposte ha permesso di raccogliere informazioni più dettagliate sull'organizzazione di questi percorsi e sulle problematiche emerse. Il presente contributo, a partire dai dati raccolti, propone un'analisi comparativa dei percorsi attivati per le classi A028, A034 e A050, con particolare attenzione al rapporto tra contenuti disciplinari e strumenti metodologici. L'obiettivo è delineare un quadro organico della formazione iniziale nell'area chimica e comprendere come gli atenei affrontino la sfida della trasposizione didattica. Si cercherà inoltre di comprendere come stiano rispondendo alla necessità di fornire ai futuri docenti non solo "cosa insegnare", ma soprattutto gli strumenti per una "mediazione didattica" efficace, capace di integrare fenomenologia osservabile e modellizzazione microscopica.

2. La classe A034: criticità e modelli formativi

L'articolo 1 della legge 29/06/2022 (D.L. 36/2022) assegna ai corsi FID il compito di "sviluppare e accertare: i) le competenze culturali, disciplinari, pedagogiche, psicopedagogiche, didattiche e metodologiche; ii) le competenze proprie della professione e della funzione docente (pedagogiche, psicopedagogiche, relazionali, orientative, valutative, organizzative, didattiche, tecnologiche e giuridiche) integrate con i saperi disciplinari; iii) la capacità di progettare percorsi didattici (attività di gruppo e tutoraggio tra pari) al fine di favorire l'apprendimento critico e consapevole." L'articolo 2 sottolinea che il docente dovrà rivolgere "particolare attenzione al benessere psicofisico ed educativo degli allievi con disabilità e bisogni educativi speciali."

Per realizzare tutto questo, il percorso formativo della classe A034 per gli aspiranti docenti *con nessuna o limitata esperienza di insegnamento e formativa* prevede un corso di 60 CFU, di cui 15 di area pedagogica, 3 di area linguistico-digitale, 4 di ambito psico-socio-antropologico, 2 di legislazione scolastica, 20 di tirocinio diretto e indiretto, 16 di didattica disciplinare. Per ottenere l'abilitazione, oltre ad assicurare una presenza del 70% ai corsi impartiti in presenza (almeno il 50% dei 60 CFU previsti), i corsisti dovranno sostenere una verifica finale che consiste in una prova scritta, concernente un'analisi critica dell'esperienza di tirocinio scolastico, e una lezione simulata su un argomento disciplinare comunicato 48 ore prima della prova.

Per quanto riguarda i crediti disciplinari che qui ci interessano più da vicino, gli obiettivi formativi contemplano: i) l'individuazione dei nuclei fondanti, dei saperi essenziali e del linguaggio specifico disciplinare; ii) la progettazione e lo sviluppo di attività di insegnamento finalizzate alla costruzione dei curricula e delle programmazioni, disciplinari e interdisciplinari, a partire dalle Indicazioni nazionali, dalle Linee guida e dai Quadri di riferimento per gli esami di Stato; iii) la valutazione critica dei materiali didattici in uso nella pratica scolastica; iv) l'utilizzo delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione nell'apprendimento disciplinare; v) il laboratorio disciplinare; vi) le modalità di valutazione e di autovalutazione del processo di insegnamento e dei risultati di apprendimento.

Chi nelle Università ha progettato i percorsi FID ha dovuto confrontarsi, quindi, con le competenze ritenute necessarie per l'insegnamento, gli obiettivi formativi, il quadro complessivo dei crediti assegnati a ciascun ambito dal legislatore. Al di là dell'impianto formativo, al momento di erogare i corsi si sono dovute affrontare criticità non eludibili.

Una di queste riguarda, innanzitutto, l'eterogeneità dei corsisti, determinata principalmente dal largo spazio (eccessivo?) di classi di lauree magistrali con l'acquisizione delle quali è permessa l'ammissione ai percorsi FID per la classe A034 (Tabella 1).

Per esempio, nell'A.A. 2024-2025, dei 22 corsisti A034 dell'Università di Roma "Tor Vergata", 4 hanno presentato come titolo di accesso la laurea magistrale in Chimica, 2 in Chimica industriale, 1 in Scienze e tecnologia dei materiali, 3 in Ingegneria chimica, 7 in Chimica e tecnologie farmaceutiche (la clas-

se di laurea magistrale più numerosa), 2 in Farmacia, 2 in Scienze e tecnologie agrarie, 1 in Scienze e tecnologie dalla produzione animale. Di fronte a tale varietà di formazione disciplinare, il compito di chi ha dovuto e dovrà organizzare i corsi di didattica disciplinare è veramente arduo.

In particolare, è necessario sottolineare che per l'accesso a questa classe di concorso, il legislatore non ha previsto requisiti curriculari attraverso l'acquisizione di un certo numero di CFU in specifici raggruppamenti disciplinari. Si vedano per confronto i requisiti curriculari richiesti per l'accesso alle classi di concorso A028 e A050.

Tabella 1. Lauree Magistrali utili per accedere al percorso FID della classe A034

<i>Classe di Laurea</i>	<i>Denominazione</i>
LM-13	Farmacia e farmacia industriale
LM-22	Ingegneria chimica
LM-26	Ingegneria della sicurezza
LM-53	Scienza ed ingegneria dei materiali
LM-54	Scienze chimiche
LM-69	Scienze e tecnologie agrarie
LM-70	Scienze e tecnologie alimentari
LM-71	Scienze e tecnologie della chimica industriale
LM-73	Scienze e tecnologie forestali ed ambientali
LM-86	Scienze zootecniche e tecnologie animali

A questa situazione, si aggiunge la criticità legata al riconoscimento dei crediti pregressi, in particolare per i corsisti del percorso FID 60 CFU in possesso dei 24 CFU, che secondo il decreto ministeriale devono essere riconosciuti integralmente. Tornando all'esempio dei corsisti FID A034 dell'Università di Roma "Tor Vergata", 21 dei 22 corsisti avevano ottenuto l'abilitazione concorsuale prevista dai 24 CFU, maturando la totalità dei crediti in ambito psicopedagogico e antropologico. Per salvaguardare l'omogeneità di comportamento di tutte le classi concorsuali, per l'A.A. 2025-2026 la soluzione è stata quella di trasferire tutti i corsisti in possesso dei 24 CFU nel percorso 36 CFU. Al solito, i passaggi formali tecnico-burocratici determinano l'organizzazione e i contenuti dell'offerta formativa.

Di fronte a queste difficoltà e, considerando che sono previsti solo 16 CFU per l'ambito disciplinare, l'offerta formativa nei vari atenei per la classe di concorso A034 è stata strutturata in maniera eterogenea. C'è chi ha scelto di privilegiare l'*aspetto disciplinare* dei corsi, proprio per ovviare alla difficoltà legata alla eterogeneità della formazione accademica dei corsisti. In questo caso sono stati impartiti corsi legati alle Metodologie e Tecnologie per la didattica laboratoriale della Chimica Generale ed Inorganica, della Chimica Analitica, della Chimica Fisica e della Chimica Organica, con attenzione alle metodologie di didattica della Chimica per i disturbi specifici dell'apprendimento.

C'è chi, invece, ha privilegiato gli *aspetti metodologici* dell'insegnamento e dell'apprendimento della chimica, organizzando corsi in cui venivano discusse le principali linee di ricerca in didattica della chimica, le difficoltà cognitive specifiche del suo apprendimento, la relazione fra sviluppo cognitivo e comprensione dei suoi nuclei fondanti nella loro trasposizione didattica, la didattica laboratoriale, le tecnologie di comunicazione nell'insegnamento della chimica, la progettazione di strategie didattiche innovative. A questi contenuti si sono spesso aggiunti corsi in cui sono stati introdotti elementi di storia del pensiero chimico, si sono contestualizzati i nuclei fondanti della chimica nel loro sviluppo storico-epistemologico, sono stati sviluppati metodi specifici per l'elaborazione e la rappresentazione dei dati in chimica, a partire da esperienze laboratoriali in ambito scolastico, si sono progettate sequenze di apprendimento della chimica basate su metodologie didattiche centrate sull'allievo.

Tra un approccio predominantemente “disciplinare” e un approccio metodologico, alcune sedi hanno adottato un *modello ibrido*, in cui gli aspetti metodologici della disciplina sono stati introdotti in un corso di didattica della chimica “generalista”, mentre gli aspetti più interni alla disciplina sono stati affrontati in maniera laboratoriale, attivando moduli di Chimica Analitica, Chimica Fisica, Chimica Inorganica e Chimica Organica. Dai prospetti della strutturazione dei 16 CFU disciplinari adottata dalle diverse sedi, 8 atenei hanno preferito un *modello ibrido*, 7 un approccio disciplinare e 2 un approccio metodologico.

Si tratta in realtà di approcci e sensibilità diverse in un quadro generale piuttosto omogeneo. Alcuni tentativi ci sono parsi interessanti, come quei corsi che hanno introdotto elementi di tecnologia della comunicazione nell’insegnamento della Chimica, o che hanno sperimentato in laboratorio l’uso di strumenti di simulazione molecolare. Alcuni corsi hanno analizzato il contributo che un approccio storico-epistemologico può fornire all’apprendimento della chimica, mentre almeno in un caso è stata mostrata particolare attenzione alle modalità proprie del linguaggio chimico.

L’impressione è che in tutti i casi si siano privilegiati metodi di insegnamento frontali e poco spazio sia stato dato alle attività di gruppo e/o laboratoriali.

3. La classe A050: tra eterogeneità disciplinare e vincoli temporali

Se nella classe A034 il problema principale riguarda l’equilibrio tra approccio disciplinare e metodologico, nella classe A050 tali criticità si intrecciano con vincoli strutturali ancora più stringenti.

I dati riportati in queste analisi fanno riferimento alla prima (A.A. 2023/2024) e alla seconda (A.A. 2024/2025) edizione dei PF60.

I percorsi attivati per la classe A050 sono stati 38, in sedi universitarie tradizionali nella prima edizione e 41 in sedi universitarie tradizionali nella seconda edizione, ai quali vanno aggiunti i percorsi attivati in 3 Università telematiche e in una sola Università privata.

Il numero di CFU dedicati a insegnamenti riguardanti la Chimica sono distribuiti in un intervallo compreso fra 2 e 6 CFU, anche se i valori più frequentemente adottati prevedono 4 o 5 CFU. Va comunque ricordato che l’equivalenza ora-CFU nell’ambito degli insegnamenti varia, anche in modo considerevole, da ateneo ad ateneo. Spesso viene adottato il criterio 1 CFU = 6 ore. Tutto ciò comporta, quindi, che le ore dedicate agli insegnamenti chimici oscillano fra le 24 e le 30 ore.

Questi insegnamenti sono svolti in presenza o in modalità telematica sincrona (le attività telematiche non possono comunque superare il 50% delle attività formative del percorso) a seconda della sede. Su tale aspetto giocano fattori specifici di sede quali, ad esempio, la numerosità dei corsisti, la disponibilità di aule e laboratori sperimentali, la “rilevanza” in ateneo dell’area “trasversale” rispetto a quella “disciplinare”.

L’accesso alla classe di insegnamento A050 è previsto per 15 Classi di Laurea Magistrali, previo l’eventuale assolvimento di requisiti curriculari attraverso l’acquisizione di un certo numero di CFU in specifici raggruppamenti disciplinari. In questa situazione non sorprende, quindi, che il numero di corsisti che provengono dalle Lauree Magistrali in ambito chimico (LM-54 Scienze chimiche e LM-71 Scienze e tecnologie della chimica industriale) costituiscano una minoranza nella platea che frequenta questo percorso.

Nella definizione dei contenuti degli insegnamenti occorre dunque tener conto di due fattori. In primo luogo, il numero di CFU, e quindi di ore, a disposizione; in secondo luogo, il fatto che la formazione universitaria dei corsisti nei diversi ambiti disciplinari non è affatto omogenea. Questo vale per la Chimica, e forse ancor più per la Geologia, mentre è forse meno rilevante per l’area biologica, dal momento che la maggior parte dei corsisti proviene da lauree di quell’ambito. Ovviamente, queste problematiche si riscontrano ancor più accentuate, come vedremo, nella classe A028 (Matematica e Scienze per le Scuole Secondarie di Primo grado), sia per l’esiguo numero di CFU delle materie scientifiche (ovvero, non matematiche) sia per la più ampia platea di classi di Laurea Magistrali ammesse (36).

Il quadro che emerge dall’analisi dei syllabi evidenzia la presenza di insegnamenti di Chimica Generale (12 sedi), Chimica Organica (9 sedi), Chimica Fisica (4 sedi) e Chimica Analitica (1 sede). In 7 sedi sono

inoltre previste attività di Laboratorio Chimico sperimentale. Inoltre, nei sillabi si fa spesso riferimento agli approcci metodologici proposti (10 sedi): approccio storico-epistemologico (8 sedi); metodologie digitali (2 sedi); aspetti della comunicazione scientifica in ambito chimico (2 sedi).

Dalla discussione collegiale tenutasi durante la XVII Scuola “Segre” è emerso chiaramente come le aree della Chimica offerte nei percorsi, così come i contenuti trattati e le metodologie adottate all’interno degli insegnamenti, dipendessero in maniera rilevante dalla disponibilità dei singoli colleghi coinvolti nella docenza. Questo ha messo in evidenza la necessità e la richiesta che fossero previsti ulteriori momenti di confronto fra colleghi e di condivisione dei materiali didattici prodotti, al fine di poter individuare modalità di intervento comuni.

Ma forse il tema di fondo, sul quale occorre sviluppare ulteriori riflessioni, ha riguardato il rapporto fra le conoscenze disciplinari (chimiche) dei corsisti e l’indicazione che gli insegnamenti dovessero riguardare più gli aspetti dell’insegnamento/apprendimento della Chimica che non i contenuti disciplinari. In altre parole: è possibile affrontare il tema della trasposizione didattica dei nodi concettuali della Chimica a futuri docenti che hanno una formazione chimica spesso limitata a un solo esame di Chimica Generale studiato dieci (o venti) anni prima? La “tentazione” di tenere un corso di Chimica Generale e di Chimica Organica “tradizionale” risulta frenata solo dall’impossibilità di farlo in 24-30 ore! E allora, dobbiamo cercare insieme una soluzione.

Una possibile soluzione dovrà realizzarsi attraverso l’impegno professionale del docente: è il docente che dovrà completare la sua formazione disciplinare attraverso lo studio degli argomenti che dovrà poi portare in classe. I percorsi di formazione iniziale dovrebbero, invece, fornire ai futuri docenti quegli strumenti metodologici, che non si trovano di certo nei testi universitari di Chimica o delle altre discipline scientifiche, finalizzati all’apprendimento della disciplina da parte degli studenti delle Scuole Secondarie di secondo grado. In questo compito la Chimica è sicuramente agevolata in quanto gli strumenti più adatti per la “trasposizione didattica dei saperi” sono stati individuati, analizzati e continuamente affinati dalla ricerca didattica chimica in tutti questi anni.

4. La classe A028 e le classi affini: integrazione dei saperi e didattica di base

Se le classi di concorso A034 e A050 evidenziano criticità legate all’equilibrio tra dimensione disciplinare e metodologica, tali problematiche risultano ulteriormente amplificate nella classe A028 (Matematica e Scienze nella Scuola Secondaria di primo grado) e nelle classi affini, quali A031 e B012. In questi contesti, la formazione iniziale dei docenti si colloca, infatti, all’interno di un quadro caratterizzato da una marcata eterogeneità sia dei percorsi universitari di provenienza, sia dei contenuti disciplinari da insegnare.

Attualmente in Italia sono attivi 26 percorsi della classe A028.

Nel caso di questa classe, la platea dei potenziali corsisti è estremamente ampia e comprende laureati provenienti da numerosi ambiti scientifici e tecnologici (dalle Scienze naturali all’Ingegneria, dalla Matematica alle Biotecnologie). I laureati in Ingegneria che intendono frequentare i percorsi formativi della classe A028 devono comunque aver conseguito 24 CFU complessivi tra FIS, BIO, CHIM e GEO. Il docente della classe A028 è chiamato a integrare conoscenze di chimica, biologia, fisica e geologia all’interno di un curriculum unitario, rivolto a studenti in una fase cruciale dello sviluppo cognitivo. Questa varietà, se da un lato rappresenta una ricchezza in termini di competenze e prospettive, dall’altro pone rilevanti sfide sul piano della progettazione didattica.

A differenza della Scuola Secondaria di secondo grado, dove l’insegnamento della chimica può assumere una struttura più sistematica, nella A028 essa si configura come una disciplina “di servizio”, funzionale alla costruzione di competenze scientifiche di base e all’alfabetizzazione scientifica. In questo senso, la chimica contribuisce in modo decisivo allo sviluppo di concetti chiave quali trasformazione, materia, energia e sistema, ma deve essere proposta attraverso una forte mediazione didattica, che privilegi l’esperienza, l’osservazione e la modellizzazione qualitativa.

Un elemento critico riguarda, però, il numero limitato di CFU dedicati alle discipline scientifiche non matematiche nei percorsi di formazione iniziale. Come evidenziato dai dati disponibili, la quota di

crediti assegnata alla chimica all'interno dei percorsi per la A028 è estremamente ridotta e spesso distribuita in modo non uniforme tra gli atenei. Si va dai 4 CFU dell'Università di Parma a 1 CFU delle Università di Pavia, Trieste e Messina. Ciò rende difficile costruire una preparazione disciplinare solida e, al tempo stesso, sviluppare competenze didattiche specifiche per l'insegnamento della chimica. Questa situazione risulta ancora più complessa se si considera che l'insegnamento nella Scuola Secondaria di primo grado richiede una forte attenzione agli aspetti pedagogici e psicologici dell'apprendimento. Gli studenti di questa fascia d'età presentano, infatti, modalità di apprendimento fortemente ancorate all'esperienza concreta e alla dimensione fenomenologica, mentre la chimica introduce inevitabilmente livelli di astrazione legati alla modellizzazione microscopica. La sfida didattica consiste, pertanto, nel costruire un ponte efficace tra questi due livelli, evitando sia un approccio meramente descrittivo sia una formalizzazione prematura.

In tale contesto la didattica laboratoriale assume un ruolo centrale. Tuttavia, nei percorsi formativi analizzati, essa appare spesso marginale o limitata a pochi CFU specifici. È invece proprio nella classe A028 che il laboratorio – inteso non solo come spazio fisico, ma come approccio metodologico – dovrebbe costituire il fulcro dell'insegnamento scientifico, favorendo l'indagine, la formulazione di ipotesi e la costruzione condivisa del sapere.

Considerazioni analoghe possono essere estese alla classe B012 (Laboratori di scienze e tecnologie chimiche e microbiologiche), nella quale la dimensione operativa e laboratoriale è ancora più marcata. In questo caso, la formazione iniziale dovrebbe valorizzare in modo esplicito le competenze tecnico-pratiche e la capacità di gestione del laboratorio, aspetti che risultano spesso sottorappresentati nei percorsi universitari tradizionali.

Alla luce di queste osservazioni, emerge con chiarezza la necessità di ripensare l'equilibrio tra contenuti disciplinari, competenze metodologiche e dimensione laboratoriale nei percorsi di formazione iniziale. In particolare, per la classe A028 appare fondamentale:

- rafforzare l'integrazione tra le diverse discipline scientifiche, superando una frammentazione che rischia di compromettere la coerenza del curriculum;
- promuovere approcci didattici attivi e centrati sullo studente, in linea con le indicazioni della ricerca in didattica delle scienze;
- valorizzare il laboratorio come ambiente di apprendimento, anche attraverso l'uso di esperienze semplici e replicabili nel contesto scolastico;
- sviluppare competenze di trasposizione didattica specifiche per la fascia d'età della Scuola Secondaria di primo grado.

5. Conclusione

In conclusione, se nei percorsi per A034 e A050 la questione centrale riguarda il bilanciamento tra sapere disciplinare e didattico, nella A028 e nelle classi affini il nodo cruciale diventa la costruzione di una professionalità docente capace di integrare saperi diversi e di adattarli a un contesto educativo complesso e in continua evoluzione.

Nei percorsi A034 e A050, data la eterogeneità dei corsisti, sia relativa alla preparazione disciplinare, sia all'esperienza didattica sul campo (i corsisti dei 30 e dei 60 CFU), si potrebbe provare a sperimentare un approccio in cui la classe, suddivisa in gruppi eterogenei guidati dal docente e dal tutor coordinatore, autonomamente elabora, organizza e sperimenta unità di apprendimento. Potrebbe essere una metodica che risolve, almeno in parte, le criticità evidenziate nei primi cicli di questi nuovi percorsi FID. In generale è chiaro che il contributo maggiore a un decisivo miglioramento della qualità dei percorsi di formazione necessita dell'incontro tra le discipline e le pedagogie. Senza infingimenti o scorciatoie, è un lavoro di lungo corso, che mira a costruire un intreccio coerente e partecipato tra i diversi ambiti della formazione.

Si tratta di una sfida che richiede un impegno congiunto da parte delle università, della scuola e della comunità scientifica, nella prospettiva di una formazione iniziale realmente coerente con le esigenze dell'insegnamento della chimica nei diversi ordini scolastici.

Per concludere, un suggerimento e una riflessione.

Il suggerimento è che i docenti che operano nel PF60 potrebbero avvalersi di docenti di scuola esperti, coinvolgendoli in attività seminariali all'interno delle loro lezioni. In questo modo le proposte didattiche che si fanno acquisirebbero una maggiore valenza dal punto di vista della loro realizzabilità, mostrando come sia possibile superare i consueti limiti imposti dai "programmi ministeriali" (che, come noto, sono stati sostituiti da Indicazioni nazionali e Linee Guida) e dalle limitazioni nel numero di ore a disposizione nell'orario scolastico.

La riflessione è invece la seguente: i PF60 hanno permesso di allargare la platea di docenti universitari che hanno avuto la necessità di riflettere sul "cosa insegnare" e sul "come insegnare" nell'ambito della Scuola Secondaria. Questo costituisce un punto di snodo per una "innovazione della didattica" anche in ambito universitario. Tale riflessione, infatti, attiene all'insegnamento nelle Scuole Superiori, ma inevitabilmente riguarda anche l'attività che svolgiamo come docenti universitari.

Riferimenti bibliografici

- [1] G. Chiosso, *Storia della scuola in Italia*, Mondadori, Milano, 2011.
- [2] R. A. Santoni, *Storia sociale dell'educazione*, La Nuova Italia, Firenze, 1999.
- [3] Y. Chevallard, *La transposition didactique*, La Pensée Sauvage, Grenoble, 1985.
- [4] D. A. Schön, *The Reflective Practitioner*, Basic Books, New York, 1983.

**Convegno 2025
della Divisione di Didattica**

L'alchimia delle parole: dialogo tra chimica e letteratura

Claudio Pettinari

Università di Camerino, Scuola del Farmaco e dei Prodotti della Salute, IUSS Pavia, ICCOM-CNR Sesto Fiorentino

e-mail: claudio.pettinari@unicam.it

Abstract. Chemistry, often perceived as an abstract and technical discipline, has in fact permeated literature since its origins. Elements, reactions, metaphors for the properties and transformations of matter appear in sacred texts, medieval poems, Elizabethan drama, and the modern novels. This article offers a journey through some major literary works, demonstrating how chemistry – explicit or implicit – becomes a narrative, symbolic, and cognitive tool. This journey could offer chemistry education new insights, capable of connecting science, history, creativity, and imagination.

Keywords: chimica e letteratura; Bibbia; Dante; Shakespeare; Goethe; Leopardi; Poe; Shelley; Stevenson; Carroll; Verne; Levi

1. Introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito a un rinnovato interesse per le relazioni tra scienza e arte [1] e, nello specifico, tra scienza e letteratura, un campo di studio interdisciplinare che si colloca all'incrocio tra storia della scienza, studi letterari, filosofia e didattica [2, 3]. In questo quadro, la chimica occupa una posizione peculiare: pur essendo una delle scienze che più profondamente hanno trasformato la visione del mondo moderno, essa è rimasta a lungo meno esplorata rispetto alla fisica o alla biologia nel dialogo con la produzione letteraria. Solo in tempi relativamente recenti la chimica è stata riconosciuta come un potente serbatoio di metafore, concetti, immagini e strutture narrative capaci di attraversare la letteratura in modo non episodico, ma strutturale [4].

Un primo filone di studi si è sviluppato in ambito storico-culturale, concentrandosi sulla presenza della chimica nei testi del passato: dall'alchimia medievale e rinascimentale, intesa non solo come pratica proto-scientifica, ma come linguaggio simbolico e spirituale, fino alla nascita della chimica moderna tra XVIII e XIX secolo. In questa prospettiva, la letteratura viene letta come una fonte privilegiata per comprendere che le trasformazioni della materia, le teorie degli elementi, le reazioni e i processi chimici hanno contribuito a modellare l'immaginario collettivo, ben prima della loro sistematizzazione scientifica [5, 6, 7].

Un secondo approccio, più propriamente letterario, ha messo in luce che la chimica non compare nelle opere soltanto come repertorio di nozioni o come sfondo tecnico, ma come vero e proprio strumento narrativo. Reazioni, soluzioni, gas, fermentazioni, veleni, trasmutazioni diventano strumenti per parlare di identità, mutamento, ambiguità morale, contrasto tra ciò che è naturale e ciò che è artificiale. In questo senso, la chimica offre alla letteratura un "vocabolario" privilegiato per esplorare il confine instabile tra ciò che è visibile e ciò che è invisibile, tra ordine e caos [8].

Accanto a questi studi, si è sviluppato un filone più recente, fortemente legato alla didattica e alla divulgazione scientifica, che riconosce nella letteratura uno strumento efficace per migliorare la comprensione della chimica. Racconti, poesie, romanzi e testi teatrali permettono di contestualizzare concetti astratti, di umanizzare la figura dello scienziato e di mostrare come la chimica sia sempre stata intrecciata con le paure, le speranze e le aspirazioni delle società che l'hanno prodotta. In questa prospettiva, la letteratura non è più solo oggetto di analisi, ma diventa un alleato nella costruzione del sapere chimico [9].

Un tema centrale negli studi contemporanei è, inoltre, il riconoscimento che la circolazione delle idee tra chimica e letteratura non avviene necessariamente per trasmissione diretta. Spesso è il “sentire del tempo” [10, 11] – per usare un’espressione cara a molti scrittori e studiosi – a creare risonanze profonde: concetti come trasformazione, instabilità, probabilità, equilibrio, o crisi dell’oggettività emergono simultaneamente nei laboratori e nelle opere letterarie, anche in assenza di un rapporto esplicito. La chimica, in quanto scienza della materia in divenire, si presta particolarmente bene a questo tipo di contaminazioni sotterranee.

In tale contesto, il presente contributo si inserisce come un percorso attraverso alcune grandi opere della letteratura, dalle radici bibliche e medievali fino alla modernità, con lo scopo di mostrare come la chimica – esplicita o implicita – abbia accompagnato la narrazione dell’essere umano e del suo rapporto con il mondo materiale. Più che offrire un catalogo esaustivo, l’obiettivo è suggerire connessioni, aprire prospettive e mostrare come la chimica, non solo non sia estranea alla letteratura, ma ne costituisca spesso una trama nascosta ed essenziale.

2. La Bibbia

Posseggo un’edizione della “Bibbia” illustrata da Gustave Doré che è riposta, nella mia biblioteca, sullo scaffale che ospita i libri di chimica, principalmente didattici. Apro una pagina a caso e leggo:

Farò venire oro anziché bronzo,
farò venire argento anziché ferro,
bronzo anziché legno,
ferro anziché pietre.
Costituirò tuo sovrano la pace,
tuo governatore la giustizia (Isaia, 60, 17)

Rimango sorpreso e sono pervaso da altrettanto stupore quando, sfogliando il libro della Genesi, trovo: *Il Signore fece cadere dal cielo su Sodoma e Gomorra, per distruggerle, una pioggia di zolfo e di fuoco* (Figura 1).



Figura 1. Illustrazione di Gustave Doré raffigurante “La Distruzione di Sodoma”

Con la mente torno a un articolo, letto alcuni anni fa, dove alcuni archeologi affermavano che la città

biblica di Sodoma poteva essere stata distrutta da una pioggia di meteoriti, quel “fuoco dal cielo” che gli antichi interpretavano come una punizione divina [12].

Mi colpisce il fatto che nella Bibbia riesco a trovare la scienza che amo: da quasi quarantacinque anni provo per questa disciplina un amore intenso e totalizzante. Un'analisi più dettagliata rende chiaro che nella Bibbia la chimica è presente soprattutto come arte della trasformazione: la fusione dei metalli, la purificazione con il fuoco, l'uso di profumi, oli e pigmenti [13]. Ma l'oro, l'argento e il rame non sono solo materiali, sono anche simboli di purezza e valore e il fuoco, agente chimico primordiale, rappresenta insieme distruzione e rigenerazione. La distinzione tra oro, argento, bronzo e ferro non è casuale: l'oro rappresenta l'incorruttibilità e la sacralità, mentre il ferro è associato alla forza e alla guerra. Il celebre vitello d'oro (Esodo 32: 1-6) è un esempio di come un materiale chimicamente stabile e prezioso venga caricato di significati morali e teologici, fino a diventare oggetto di condanna. La Bibbia non è certo un testo scientifico, ma è intrisa di quella materialità di cui la scienza si occupa, di molte pratiche e trasformazioni della materia che riconosciamo come processi chimici: metalli, pigmenti, profumi, veleni, fermentazioni, combustioni e purificazioni. Uno dei temi più presenti è sicuramente quello della metallurgia, che compare già nei primi libri dell'Antico Testamento. Nel libro della Genesi (4:22) è scritto: *Zilla a sua volta partorì Tubalkàin, il fabbro, padre di quanti lavorano il rame e il ferro.* Non mancano nella Bibbia riferimenti a profumi ed unguenti, veri e propri prodotti di una chimica già applicata nell'antichità. L'olio sacro per l'unzione è descritto in maniera dettagliata nel libro dell'Esodo (30: 22-25):

Il SIGNORE parlò ancora a Mosè, dicendo:

Prenditi anche i migliori aromi: di mirra vergine, cinquecento sicli;

di cinnamomo aromatico, la metà, cioè duecentocinquanta sicli;

di canna aromatica, pure duecentocinquanta;

di cassia, cinquecento, secondo il siclo del santuario, e un hin di olio d'oliva.

Ne farai un olio per l'unzione sacra,

un profumo composto secondo l'arte del profumiere;

sarà l'olio per l'unzione sacra.

L'olio citato è una miscela complessa di oli vegetali e resine aromatiche (mirra, cinnamomo, cassia) ottenuta mediante estrazione e miscelazione.

Anche pratiche come la fermentazione del vino rivelano che a quel tempo c'era già una conoscenza empirica della materia, che precede di secoli la chimica come scienza. Sono spesso riportati processi di purificazione, che oggi potremmo interpretare come pratiche chimico-fisiche. Le abluzioni, l'uso dell'acqua corrente, delle ceneri, del sale, o del fuoco hanno, a quel tempo, una funzione igienica oltre che simbolica. Il sale, in particolare, è una sostanza chimica fondamentale: conserva, purifica, protegge dalla corruzione. Non a caso diventa metafora di alleanza (patto di sale) e di sapienza (voi siete il sale della terra).

Non mancano descrizioni di sostanze tossiche e terapeutiche. Il fiele e l'assenzio simboleggiano l'amarezza e il veleno morale, mentre resine e balsami sono associati alla guarigione. La Bibbia riflette così un sapere empirico sulla chimica naturale, tipico delle civiltà antiche, in cui medicina, religione e osservazione della materia sono profondamente intrecciate.

3. Dante: dalla Divina Commedia al Convivio

Proseguendo a leggere i dorsi dei testi riposti sugli scaffali, lo sguardo si sposta in alto, verso i libri di scuola e trovo i tre volumi della “Divina Commedia”: subito la mia mente torna alla spiegazione della descrizione della quadratura del cerchio [14] e d'istinto prendo in mano il volume dell'Inferno per cercare nozioni di chimica (o meglio di alchimia) al suo interno, che sicuramente ci saranno [15]. Il primo riferimento che trovo è nel canto XXIX dell'Inferno (136-139); Dante colloca gli alchimisti tra i falsari (o falsadori), colpevoli di aver tentato di contraffare la natura, imitando artificialmente i processi naturali:

Ma perché sappi chi sì ti seconda

contra i Sanesi, aguzza ver' me l'occhio,
 sì che la faccia mia ben ti risponda:
 sì vedrai ch'io son l'ombra di Capocchio,
 che falsai li metalli con l'alchìmia;
 e te dee ricordar, se ben t'adocchio,
 com' io fui di natura buona scimia.

Seppur Dante li condanni ne assorbe il loro linguaggio simbolico per parlare della decadenza del mondo. Basti pensare alla descrizione del Veglio di Creta, Canto XIV dell'*Inferno* (103-110):

Dentro dal monte sta dritto un gran veglio,
 che tien volte le spalle inver' Dammiata
 e Roma guarda come suo specchio.
 La sua testa è di fin oro formata,
 e puro argento son le braccia e 'l petto,
 poi è di rame infino a la forcata;
 da indi in giuso è tutto ferro eletto,
 salvo che 'l destro piede è terra cotta

Una statua colossale collocata all'interno del monte Ida (Figura 2), composta da metalli progressivamente meno nobili: testa d'oro, petto e braccia d'argento, ventre di rame, gambe di ferro, piede destro di ferro e sinistro di terracotta. Il Veglio è costruito dall'alto verso il basso con una progressiva degradazione materiale, che richiama direttamente l'idea alchemica di corruzione della materia. Non è un processo di trasmutazione (come nell'alchimia creativa), ma una trasmutazione rovesciata, degenerativa.



Figura 2. Il Veglio di Creta in una illustrazione di William Blake, pittore e incisore britannico

Dante non approva l'alchimia eretica, ma non disprezza l'alchimia. Infatti, Alberto Magno, uno dei più grandi naturalisti e filosofi della natura del Medioevo, la cui attività comprendeva botanica, mineralogia, zoologia, chimica "ante litteram" e fisica, viene collocato da Dante in Paradiso, tra i sapienti teologi e filosofi, senza alcuna ombra negativa poiché lui, maestro di Tommaso D'Aquino, non prometteva

di creare oro dal nulla, non attribuiva all'alchimia poteri spirituali o salvifici, l'alchimia per lui non creava la natura, ma la imitava e la accelerava.

Nella Divina Commedia la chimica non compare quindi come disciplina autonoma, ma è profondamente mescolata alla visione della natura, della materia e delle trasformazioni, secondo la cultura scientifica medievale. Dante attinge a un sapere che fonde aristotelismo, alchimia, medicina, mineralogia e cosmologia, restituendo una rappresentazione sorprendentemente concreta dei processi naturali. L'Inferno è spesso il regno delle trasformazioni violente della materia. Nel canto XXV, dedicato ai ladri, i corpi si fondono, si dissolvono e si ricompongono in un continuo mutamento che richiama immagini alchemiche di dissoluzione (*solve*) e ricomposizione (*coagula*). Serpenti che penetrano nei corpi, uomini che si liquefanno o si inceneriscono suggeriscono una concezione dinamica della materia. Numerosi sono anche i riferimenti a sostanze chimiche e fenomeni fisici: pece bollente, zolfo, vapori, fumi, metalli fusi, vetri incandescenti. La pece dei barattieri (Inferno XXI-XXII) è descritta con un realismo quasi come se il Poeta l'avesse sperimentata in laboratorio.

Nel Paradiso invece la chimica emerge nella metafora della luce e della trasparenza. Nel Paradiso la materia è purificata, capace di trasmettere la luce senza opporre resistenza. Dante sembra quasi anticipare, in forma poetica, il concetto di materia come mezzo di propagazione dell'energia, trasformando la fisica e la chimica della luce in un linguaggio simbolico.

Anche in "Convivio" sono presenti riferimenti e immagini che rimandano chiaramente al linguaggio e all'immaginario dell'alchimia, pur se non vi è mai un'adesione esplicita alla pratica alchemica. Dante sembra usare l'alchimia ancora una volta come metafora, soprattutto per parlare di trasformazione, perfezionamento della materia e del sapere, coerentemente con il progetto filosofico dell'opera. Il sapere è dunque un processo che porta la materia imperfetta verso una forma più nobile, un'idea centrale anche nell'alchimia medievale (trasmutazione dei metalli vili in oro), descritta in Convivio (I, I), dove il Poeta parla del desiderio naturale dell'uomo di conoscenza e del perfezionamento dell'anima.

4. Shakespeare: veleni, farmaci e metalli

Libri e musica, nel mio studio, occupano posti vicini. Sul secondo scaffale c'è il piatto dello stereo sul quale poggia un vinile dei Dire Straits "Making Movies": accompagno con la mano la puntina sul primo solco del disco e ascolto Romeo and Juliet. È impossibile non pensare a William Shakespeare. Mi domando se lui avesse avuto contatti con gli alchimisti. Anche in Shakespeare, come in Dante, la chimica non sembra comparire come disciplina esplicita, ma è profondamente presente come immaginario materiale, come metafora. Emerge più volte il concetto di atomo; ad esempio, nel monologo della regina Mab di Mercuzio ("Romeo e Giulietta", Atto I, Scena IV) Shakespeare non usa il termine "atom" nel senso moderno o epicureo, ma utilizza spesso immagini corpuscolari e infinitesimali che derivano dalla filosofia naturale rinascimentale. Non atomi scientifici ma minima naturae:

In shape no bigger than an agate-stone
On the fore-finger of an alderman

La parola atom compare invece in altre opere, ad esempio in "Troilus and Cressida", Atto III, dove con "atom" indica la parte indivisibile, non ancora scientifica, ma filosofica: *The smallest atom of your lives*. La chimica, negli scritti shakespeariani è pratica concreta legata alla medicina, all'alchimia, ai veleni e alle trasformazioni della materia [16]. Il teatro elisabettiano nasce infatti in un'epoca in cui alchimia, farmacia e chimica pratica non erano ancora separate e il drammaturgo attinge ampiamente a questo patrimonio culturale. Uno degli esempi più evidenti è proprio l'uso dei veleni, che per la sua penna non sono mai semplici strumenti narrativi, ma sostanze dotate di una precisa identità fisica e simbolica. In Romeo e Giulietta, il veleno acquistato da Romeo non è un'entità astratta: è descritto come una sostanza potente, rapida, quasi "chimicamente" efficace, capace di agire sul corpo in modo irreversibile. Il dialogo con l'apotecario riflette la realtà della farmacologia rinascimentale, fatta di preparazioni empiriche, estratti vegetali e sali minerali, spesso letali se mal dosati. Significativa è anche la dimensione chimica e tossicologica che emerge in "Amleto". Il veleno versa-

to nell'orecchio del re addormentato è descritto come una sostanza capace di coagulare il sangue e corrompere l'organismo dall'interno, richiamando concezioni mediche legate agli umori e alle trasformazioni dei fluidi corporei. La chimica è, purtroppo, ancora metafora della corruzione morale e si fonda principalmente su una conoscenza diffusa degli effetti reali delle sostanze tossiche.

In Shakespeare ho trovato spesso parole come fermentazione, corrosione, distillazione: tutte metafore prese dal mondo della trasformazione della materia. Termini come "distilled", "refined", "corrupted", "putrefaction" ricorrono con frequenza e riflettono un lessico condiviso con l'alchimia e la chimica proto-scientifica. Nel suo "La Tempesta", la figura di Prospero richiama in maniera esplicita l'alchimista-filosofo, un uomo che domina le forze naturali conosce i segreti della materia e trasforma il caos in ordine, proprio come l'arte alchemica mirava a trasformare la materia vile in materia nobile. In "Macbeth", invece le pozioni delle streghe sono un esempio emblematico di miscugli simbolici e materiali: ingredienti naturali, animali e minerali vengono combinati secondo una logica che ricorda le antiche ricette alchemiche. Anche se caricate di valore magico, queste preparazioni riflettono la realtà delle pratiche di laboratorio dell'epoca, dove l'atto del mescolare era già un primo passo verso la chimica sperimentale. Infine, in una delle opere che amo di più, "Il Mercante di Venezia", Shakespeare parla di metalli che si trovano negli scrigni e che chi vuole sposare Porzia deve scegliere (Figura 3).



Figura 3. Immagine raffigurante l'ebreo Shilock ne "Il Mercante di Venezia"

I metalli negli scrigni sono oro, che simboleggia l'apparenza, la ricchezza, e la vanità, l'argento, che ha un valore esclusivamente economico e mercantile, e il piombo, che rappresenta il peso, l'umiltà e il sacrificio. Per Shakespeare, che sfrutta una gerarchia dei metalli derivata sia dalla tradizione alchemica medievale che dalla filosofia aristotelico-alchemico, quello giusto è il piombo, associato alla malinconia e alla profondità. La chimica con il grande drammaturgo inglese non è più decorativa, bensì narrativa e morale, è strutturalmente intrecciata al linguaggio e alla visione del mondo. La materia cambia, reagisce, si corrompe o si purifica proprio come i personaggi. In questo senso, il teatro shakespeariano anticipa una visione moderna della chimica; non

è solo scienza delle sostanze, ma chiave interpretativa della trasformazione della realtà, naturale e umana: *All that glisters is not gold*.

5. John Wolfgang Goethe e le Affinità Elettive

Finito l'ascolto del disco, proseguo a girovagare tra i miei libri sugli scaffali e incontro Johann Wolfgang Goethe, scrittore da me molto apprezzato tanto da avere tutti i suoi principali romanzi. Il rapporto di Goethe con la chimica è complesso, profondo e sicuramente non marginale. Sebbene egli non sia stato un chimico nel senso moderno del termine, la chimica attraversa in modo costante e neanche troppo nascosto la sua opera letteraria, filosofica e scientifica, inserendosi in una visione della natura fondata su processi, trasformazioni e relazioni dinamiche. Anche in lui, come in moltissimi scrittori che lo hanno preceduto, ma soprattutto in coloro che da lui hanno preso spunto, la chimica non è mai riconducibile a pura tecnica o a mero calcolo quantitativo: è piuttosto una scienza delle metamorfosi fondamentale per interpretare il divenire naturale e umano. Goethe visse in un'epoca fondamentale per lo sviluppo della chimica: quella del passaggio dall'alchimia e dalla chimica flogistica alla chimica moderna di Lavoisier. Fu contemporaneo delle grandi riforme concettuali che portarono all'abbandono del flogisto, alla definizione degli elementi chimici e alla nascita della nomenclatura moderna. Tuttavia, egli guardò spesso con sospetto alla chimica lavoisieriana, soprattutto nella sua componente più astratta e quantitativa. Goethe rimase legato a una concezione qualitativa della natura, più vicina alla tradizione naturalistica e alla Naturphilosophie che non alla chimica matematizzata (ponderale) emergente. Questo atteggiamento è evidente anche nel celebre rifiuto della teoria newtoniana dei colori, che si riflette in modo analogo nella sua distanza critica dalla chimica ridotta a formule e bilanciamenti. L'opera in cui la chimica emerge in modo più esplicito è, senza dubbio, "Le affinità elettive" (*Die Wahlverwandtschaften*, 1809) (Figura 4).



Figura 4. Copertina di "Le Affinità elettive", edizione AcQuarelli

Il titolo stesso è preso direttamente dal lessico chimico settecentesco: le affinità elettive erano un concetto centrale nel XVIII secolo utilizzato per descrivere la tendenza selettiva di alcune sostanze a reagire preferibilmente con altre. Nel romanzo Goethe utilizza questo concetto come potente metafora delle relazioni umane. I personaggi vengono messi in relazione come fossero reagenti chimici: coppie apparentemente stabili si trasformano quando entrano in contatto con nuovi elementi, dando luogo a nuove configurazioni affettive, spesso inevitabili e talvolta distruttive. La chimica, nelle parole del Capitano, diventa un linguaggio per parlare di desiderio, attrazione e necessità naturali:

Quelle sostanze che, incontrandosi, immediatamente si compenetrano e si influenzano a vicenda, le chiamiamo affini. Questa affinità salta subito agli occhi negli alcali e negli acidi che, quantunque opposti o forse proprio perché opposti, si cercano e si stringono in un legame strettissimo, si modificano e formano nuovi corpi.

Un altro concetto chiave del pensiero goethiano, che lo avvicina profondamente alla chimica, è quello di metamorfosi che si sviluppa in ambito botanico (“La metamorfosi delle piante”, 1790), ma esso ha una portata ben più ampia. La natura, per lo scrittore, non è fatta di oggetti statici, bensì di processi continui di trasformazione, analoghi alle reazioni chimiche. Dissoluzione, combinazione, precipitazione, fermentazione sono immagini ricorrenti anche nel linguaggio poetico. Nei suoi scritti scientifici e letterari, la materia non è mai inerte, è dotata di una sorta di tensione interna verso il cambiamento.

Fondamentale per comprendere il rapporto tra Goethe e la chimica è sicuramente il “Faust” dove la disciplina compare soprattutto nella sua forma premoderna, ossia come alchimia. Il laboratorio di Faust, con alambicchi, forni e sostanze misteriose, richiama l’immaginario alchemico del sapere segreto, della trasformazione della materia e dell’uomo. L’alchimia nel Faust è simbolo del desiderio umano di conoscenza totale. La trasmutazione dei metalli diventa metafora della trasformazione interiore, mentre il fallimento dell’alchimista riflette i limiti di una conoscenza che pretende di dominare la natura anziché comprenderla.

Infine, nella “Teoria dei colori” (Zur Farbenlehre, 1810) [17] da lui tanto amata, emergono elementi riconducibili a una sensibilità chimica. Goethe interpreta il colore come risultato dell’interazione tra luce, oscurità e materia, attribuendo grande importanza al mezzo materiale (vetri, vapori, soluzioni) attraverso cui la luce si manifesta. Questa attenzione alla materia e alle sue proprietà richiama un approccio chimico qualitativo, fondato sull’esperienza diretta e sull’osservazione fenomenologica.

Pur non essendo stato un chimico di laboratorio, Goethe ha profondamente interiorizzato il linguaggio, i concetti e le metafore della chimica, trasformandoli in strumenti letterari e filosofici.

6. Giacomo Leopardi e la teoria atomico-molecolare

Ora dalla Germania torniamo in Italia, nella mia regione: da marchigiano non posso non avere in libreria almeno un testo di Giacomo Leopardi che, per me, ha sempre rappresentato il cantore della natura matrigna. Ho avuto l’opportunità, grazie alla gentilezza di un’amica, di entrare privatamente nella sua biblioteca a Recanati e lì, con sorpresa, ho avuto la possibilità di sfogliare due testi che non avrei mai pensato di trovare in quel luogo: “La Chimica per le donne” di Giuseppe Compagnoni e il “Saggio di Chimica e Storia Naturale” (Figura 5) scritto dallo stesso Leopardi nel 1812.

Incuriosito vado in rete a cercare perché il sommo poeta marchigiano si sia interessato di chimica. Scopro che il suo sapere chimico si dispiega esemplarmente nella dissertazione “Sopra l’estensione”, che tratta delle dispute ancor vive sull’esistenza del vuoto e i problemi connessi alla dimensione, alla penetrabilità, alla divisibilità della materia. A proposito della divisibilità, Leopardi introduce una visione molecolare dei corpi [18]:

Ciascun corpo è formato di particelle,
e di molecole unite insieme per mezzo
dell’affinità di aggregazione, di cui sono dotate.

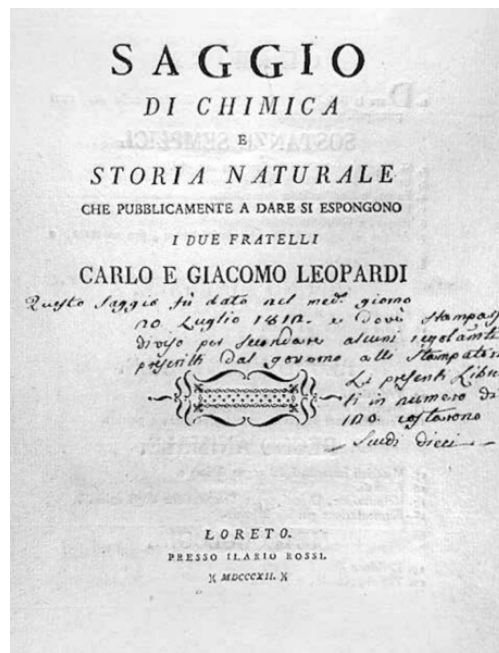


Figura 5. Frontespizio del libro *Saggio di Chimica e Storia Naturale*

Leopardi parla, con un linguaggio sorprendentemente vicino a quello chimico, di particelle o “molecole” tenute insieme da forze di aggregazione, soprattutto nello “Zibaldone” (1821-1823). Non usa ovviamente la terminologia moderna in senso tecnico, ma mostra una conoscenza aggiornata della chimica e della fisica sette-ottocentesche, in particolare delle teorie dell’affinità e dell’attrazione tra parti della materia. Nello Zibaldone Leopardi riflette più volte sulla struttura della materia e sulle forze che tengono unite le sue parti. In diversi passi parla di particelle minime, di forze attrattive, e di tendenza naturale dei corpi ad aggregarsi. Leopardi ha quindi sicuramente letto Newton (attrazione), la chimica di Geoffroy e Berthollet (affinità) ed è al corrente della teoria atomistica-molecolare ottocentesca. In alcuni appunti cita che la varietà dei corpi dipende dal modo in cui le particelle si aggregano. La visione della dissoluzione finale della materia (presente ne “La Ginestra”) è perfettamente coerente con l’idea chimico-fisica di aggregazione e disgregazione.

Giacomo Leopardi non usa nei suoi trattati il linguaggio della chimica moderna, ma conosce e rielabora il concetto di affinità di aggregazione, parla di parti minime della materia tenute insieme da forze attrattive e trasforma questi concetti scientifici in una visione filosofica e poetica della natura, lo amerò anche di più.

7. Edgar Allan Poe: Eureka

Appoggiato alla copertina dello Zibaldone, quasi una sorta di segnalibro che sfida le leggi della fisica della materia, tenendo dritto il volume, c’è un vecchio biglietto aereo di un viaggio nel Delaware, fatto molti anni fa. In quell’occasione ricordo che pernottai in un albergo di architettura ottocentesca e con mia sorpresa vidi una targa dedicata a Poe che veniva definito come l’uomo che per primo descrisse in maniera esplicita l’origine del mondo. Ma è lo stesso Poe de “Il Mistero di Marie Roget”? O de “La storia di “Arthur Gordon Pym”? La targa faceva riferimento a “Eureka”, opera che passò in secondo piano negli Stati Uniti, ma che riscosse grande successo in Europa grazie alla traduzione di Charles Baudelaire. In Eureka, Poe propose una vera e propria cosmologia (Figura 6), partendo dall’idea che l’universo avesse avuto un’origine unica, un atto iniziale di concentrazione della materia che poi si espande nello spazio.

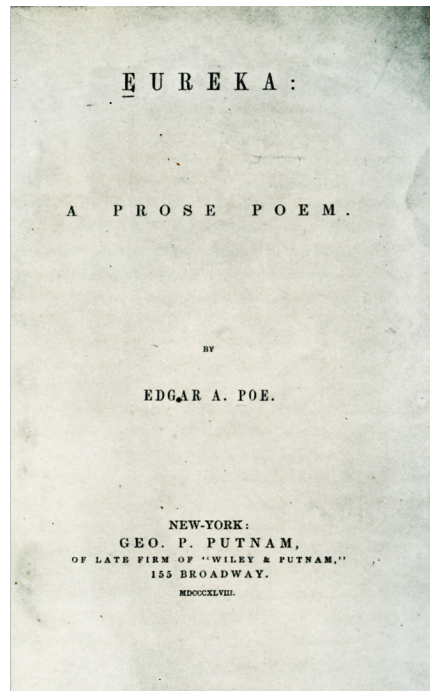


Figura 6. Primo frontespizio del poema “Eureka” pubblicato nel 1848

La sua visione anticipò in modo intuitivo concetti che oggi associamo al Big Bang, pur restando formulata in termini poetici e metafisici piuttosto che matematici. Immaginava un’unità primordiale della materia, una successiva dispersione degli atomi nello spazio e, infine, una tendenza della materia a ritornare all’unità, guidata da una forza assimilabile alla gravità. Una dinamica di espansione e ricongiunzione che potremmo definire quasi chimica: l’universo è visto come un sistema governato da attrazioni e separazioni, non dissimile dai processi di combinazione e decomposizione della materia. Per Poe, la materia non è inerte: è animata da una tensione interna che la spinge verso l’ordine o la dissoluzione. Poe è molto vicino ai chimici dell’Ottocento e alle visioni romantiche della natura come organismo vivente (Eureka, a prose poems, pag. 8):

In the beginning, let me as distinctly as possible announce - not the theorem which I hope to demonstrate - for, what ever the mathematicians may assert, there is, in this world at least, no such thing as demonstration - but the ruling idea which, throughout this volume, I shall be continually endeavoring to suggest.

My general proposition, then, is this: In the Original Unity of the First Thing lies the Secondary Cause of All Things, with the Germ of their Inevitable Annihilation.

Ma ci sono altri elementi di chimica nei racconti e romanzi di Edgar Allan Poe? Sì, la chimica è presente anche se raramente in forma esplicita o didascalica. Nelle sue pagine la chimica non è mai manualistica: è piuttosto un sapere sotterraneo, evocato attraverso immagini di laboratorio, trasformazioni della materia, decomposizione, gas, vapori, veleni e processi irreversibili. È però linguaggio simbolico della modernità scientifica, strumento narrativo per esplorare i limiti della ragione. Poe visse in un’epoca in cui la chimica moderna stava prendendo forma (Lavoisier, Berzelius, Faraday) e ne assorbì gli aspetti epistemologici. Nei racconti investigativi con Auguste Dupin (come “I delitti della Rue Morgue”), il metodo deduttivo è spesso paragonabile a un’analisi chimica: separare, isolare, identificare tracce invisibili. La chimica per lui è un modello di pensiero, non un contenuto.

In due racconti, “Ligeia” e “Morella”, lo scrittore richiama un immaginario che si avvicina all’alchimia. I riferimenti alla trasformazione della materia, alla resurrezione, alla trasmutazione del corpo evocano una chi-

mica ancora ambigua, sospesa tra scienza e metafisica. In Ligeia, la lotta contro la morte assume i tratti di un esperimento estremo, in cui la materia organica sembra sfidare le leggi naturali. Forse però la chimica compare in modo più diretto attraverso veleni, gas e processi di decomposizione nel racconto "Il barile di Amontillado": in questo racconto non viene nominata una sostanza specifica, ma l'ambientazione sotterranea, i vapori, l'umidità e la muffa rimandano a un mondo chimico di reazioni lente e inesorabili. Infine, ne "La verità sul caso di M. Valdemar", la sospensione del corpo tra vita e morte richiama esperimenti di natura fisiologica e chimica, con una forte eco delle prime ricerche sulla conservazione della materia.

8. Mary Shelley e il moderno Prometeo

Accanto al biglietto aereo c'è anche un libro che mi ha donato il prof. Luigi Busetto, un libro molto bello con le immagini degli esperimenti di Giovanni Aldini (Figura 7), immagini che subito mi richiamano il recente Frankenstein cinematografico.



Figura 7. Illustrazione degli esperimenti di Giovanni Aldini sui cadaveri

In "Frankenstein", o se vogliamo in *The Modern Prometheus* (1818) di Mary Shelley, la chimica è fondamentale e si colloca in un punto di passaggio tra alchimia tradizionale, chimica moderna sette-ottocentesca e le emergenti scienze della vita [19]. Basti rileggere quanto Mary Shelley fa dire al Dr. Waldman (Frankenstein, ch. III):

The ancient teachers of this science promised impossibilities, and performed nothing. The modern masters promise very little; they know that metals cannot be transmuted, and that the elixir of life is a chimera. But these philosophers, whose hands seem only made to dabble in dirt, and their eyes to pore over the microscope or crucible, have indeed performed miracles. They penetrate into the recesses of nature, and show how she works in her hiding-places. They ascend into the heavens; they have discovered how the blood circulates, and the nature of the air we breathe. They have acquired new and almost unlimited powers; they can command the thunders of heaven, mimic the earthquake, and even mock the invisible world with its own shadows.

Victor Frankenstein, lo scienziato che genererà la creatura, legge Agrippa, Paracelso e Alberto Magno, legge alchimisti medievali e rinascimentali, per poi abbandonarli (almeno in apparenza) a favore della chimica sperimentale moderna, studiata a Ingolstadt.

La chimica nel primo romanzo fantascientifico della storia non sarà mai descritta nei dettagli tecnici (Shelley evita formule e reazioni), ma sarà sempre associata a trasformazione della materia, decomposizione e ricomposizione dei corpi. È una chimica che opera sui cadaveri, sui tessuti, sui resti, in continuità simbolica con l'alchimia, pur utilizzando strumenti moderni. Shelley integra la chimica con studi su galvanismo [20], elettricità animale (Galvani, Aldini), chimica pneumatica (Lavoisier, Priestley), e conducibilità. In Frankenstein, la chimica è metafora del potere umano sulla materia, ma anche della sua pericolosità etica.

Mary Shelley era immersa in un ambiente scientifico di altissimo livello [21]: Percy Shelley, suo marito, era appassionato di chimica, insieme seguivano le lezioni di Humphry Davy, erano aggiornati sulle nuove teorie di Lavoisier, si interessavano di chimica pneumatica ed elettricità. Nei suoi diari e saggi, Mary Shelley riflette spesso sul rapporto tra scienza, responsabilità morale e limiti dell'esperimento [22].

C'è un altro romanzo, dimenticato, dove le conoscenze scientifiche di Shelley emergono ed è "L'ultimo uomo" (1826), dove si racconta di una pandemia globale (peste). In esso si susseguono riflessioni su medicina, chimica dei miasmi, ma soprattutto sul fallimento della scienza nel salvare l'umanità, una scienza che per Mary Shelley può analizzare, osservare, ma non salvare. Probabilmente Mary Shelley, con Frankenstein, è tra le prime scrittrici a portare la chimica dentro il romanzo, mostrandola comunque come forza ambigua e anticipando anche temi oggi centrali: bioetica, responsabilità scientifica, rischio tecnologico.

9. Robert Louis Stevenson, l'altra faccia della chimica

Dopo Frankenstein, non potevano mancare le pagine scritte da Robert Louis Stevenson con "Lo strano caso del Dr. Jekyll e Mr. Hyde" (1886) [23], nelle quali la chimica non è mai descritta come disciplina tecnica, ma viene utilizzata come dispositivo narrativo profondo, capace di rendere visibile il tema centrale della sua opera: la scissione dell'identità umana. Nel romanzo questo legame emerge con maggiore forza e diventa, a tutti gli effetti, uno dei libri più influenti nel rapporto tra scienza chimica e letteratura.

Il dottor Jekyll non è un alchimista medievale, è uno scienziato moderno [24], che lavora con sali, soluzioni, reagenti purificati e dosaggi precisi. Stevenson evita consapevolmente di fornire una formula dettagliata; la chimica è, infatti, evocata attraverso termini come tincture, salt, crystal, solution. Stevenson usa un lessico credibile, ma volutamente incompleto, senza mai accennare alle sostanze, un silenzio tecnico che non è sicuramente una mancanza, è una scelta: una chimica che esprima la possibilità, il futuro, la ricerca e che non sia esclusivamente spiegazione.

Il processo di trasformazione di Jekyll in Hyde (Figura 8) richiama concetti chimici ottocenteschi molto attuali all'epoca: la separazione delle sostanze, la purificazione, la possibilità di isolare componenti invisibili all'interno di una miscela, i processi irreversibili [25].

Hyde non è una semplice maschera morale, ma una sorta di fase diversa della materia umana, liberata tramite un reagente. In questo senso, Stevenson utilizza la chimica come metafora della chimica interiore degli uomini, anticipando riflessioni che saranno sempre più significative con la nascente psicoanalisi:

La droga infatti, di per se stessa,
non agiva in un senso piuttosto che nell'altro,
non era divina né diabolica di per sé;
scuoté le porte che incarceravano le mie inclinazioni ...



Figura 8. Illustrazione raffigurante la trasformazione di Jekyll in Hyde

Ma ciò che a mio avviso è maggiormente significativo è il fallimento finale di Jekyll, che viene legato a un problema chimico e, cioè, l'esaurimento di un sale impuro, non più riproducibile. La chimica, scienza della ripetibilità, mostra qui il suo limite: la materia umana non è completamente controllabile. Stevenson sembra suggerire che la scienza, pur potentissima, non può dominare le zone più oscure dell'essere. In questo senso, "Lo strano caso del Dr. Jekyll e Mr. Hyde" è uno dei primi romanzi a interrogarsi criticamente sulla responsabilità etica dello scienziato.

10. Lewis Carroll: la chimica allo specchio

Nello scaffale successivo sono riposti i libri dei regali delle feste: il Natale, l'Epifania, il compleanno. Un classico del Natale è, tra gli altri, "Alice nel paese delle Meraviglie" (1865). Lewis Carroll (Charles Lutwidge Dodgson) vive nel pieno del XIX secolo, un'epoca in cui la chimica moderna si sta consolidando (Lavoisier, Dalton, Berzelius); è il periodo in cui nascono i concetti di atomo, molecola, reazione, trasformazione, la scienza entra nell'immaginario comune, non solo nei laboratori ma anche nella cultura popolare. Lo scrittore, pur non essendo un chimico, è profondamente immerso nella mentalità scientifica del suo tempo, caratterizzata da fiducia nell'esperimento, curiosità per i processi invisibili e attenzione alle leggi che governano il cambiamento.

In Alice nel paese delle meraviglie la chimica è ancora presente sotto forma di sostanze che provocano trasformazioni fisiche: la celebre bottiglietta con l'etichetta Drink me, o i dolcetti che fanno crescere o rimpicciolire Alice, o infine i famosi funghi dagli effetti opposti a seconda del loro lato.

Alice agisce come una piccola ricercatrice: osserva, formula ipotesi, verifica gli effetti, corregge il comportamento in base ai risultati. Il suo comportamento è un modello sorprendentemente vicino al metodo scientifico, tradotto in forma narrativa e fantastica.

A differenza di Mary Shelley o Stevenson, Lewis Carroll non mostra una chimica oscura o colpevole, non c'è lo scienziato prometeico; non c'è la punizione morale. La chimica di Carroll è infantile ma non ingenua, ludica ma non superficiale, trasformativa ma non distruttiva. È una chimica epistemologica, che interroga il sapere più che il potere. La chimica ancora una volta non è disciplina esplicita, non è manuale né teoria, ma solo immaginario del cambiamento. Attraverso pozioni, trasformazioni, esperimenti e linguaggi parodici, Carroll intercetta uno dei nuclei più profondi della chimica moderna: la

realtà non è stabile, ma governata da processi invisibili che ne modificano forma, funzione e significato.

Alice non è solo una fiaba: è una delle più riuscite narrazioni letterarie dello spirito scientifico ottocentesco, dove la chimica diventa racconto del mutamento e della trasformazione.

E in Carroll ci sono anche le ultime scoperte: non usa mai il termine “chiralità” ma ne utilizza il concetto in maniera potente sul piano narrativo e logico. In “Attraverso lo specchio e quel che Alice vi trovò” (1871) prevale un’idea chimico-geometrica fondamentale, il mondo speculare e l’impossibilità di sovrapporre perfettamente due immagini speculari. Alice osserva che nel mondo oltre lo specchio tutto è uguale ma sbagliato, la scrittura invertita, le regole funzionano al contrario [26]:

Ti piacerebbe vivere nella Casa dello Specchio, Kitty? Chissà se te lo darebbero il latte? Magari il latte della Casa dello Specchio non è buono da bere.

E ci sono altri riferimenti alla chimica talvolta sottotraccia (Alice nel paese delle meraviglie): Mad as a hatter (Figura 9) è un’espressione idiomatica inglese molto utilizzata. Nel XIX secolo i cappellai usavano il nitrato di mercurio, $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, per trattare il feltro (processo di *carroting*). L’esposizione cronica al mercurio causava tremori, disturbi del linguaggio, allucinazioni e cambiamenti della persona. Una vera sindrome nota come eretismo mercuriale. È uno dei casi più celebri in cui un fenomeno tossicologico reale entra nella letteratura, senza essere spiegato scientificamente: il Cappellaio Matto non è solo eccentrico, ma anche incoerente e ossessivo.



Figure 9. Immagine raffigurante i principali personaggi di “Alice nel paese delle meraviglie”, con il Cappellaio Matto in primo piano

11. Jules Verne: chimica, tecnologia e fiducia nel progresso

I libri di Verne sono stati spesso il regalo portato dalla Befana e sono forse tra quelli che mi hanno spinto verso la chimica. Chi non ha sognato di fare il giro del mondo a bordo di un pallone aerostatico di

Gay-Lussac? Se Stevenson utilizza la chimica come metafora inquietante, Jules Verne la impiega come strumento di conoscenza e di costruzione del mondo. Nei suoi "Viaggi Straordinari" (una serie di 54 romanzi), la chimica è ovunque: nei laboratori, nelle miniere, nelle navi, nei sottomarini, nei vulcani, nell'atmosfera. È una chimica concreta, descrittiva, spesso sorprendentemente accurata per l'epoca. In "Ventimila leghe sotto i mari" (1870) (Figura 10), il capitano Nemo produce ossigeno dall'acqua di mare, ricava energia da reazioni chimiche, utilizza metalli e leghe innovative.

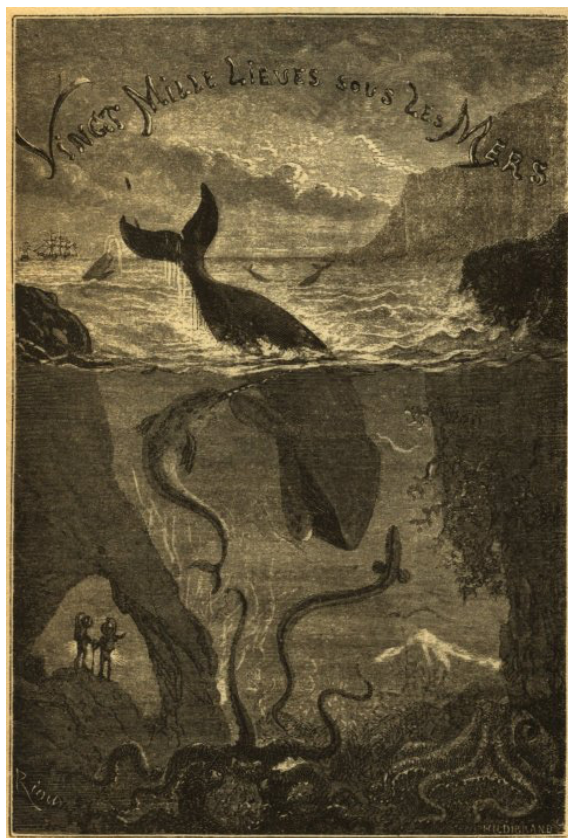


Figura 10. Frontespizio di una delle prime versioni del libro "Ventimila Leghe sotto i mari"

Il Nautilus è una vera e propria fabbrica chimica galleggiante, simbolo di un sapere che rende l'uomo autosufficiente. Qui la chimica è emancipazione, potere tecnico, ma anche ambiguità: Nemo è un genio scientifico che ha scelto l'isolamento e la chimica diventa strumento di separazione dal mondo. Ne "L'isola misteriosa" (1874), la chimica assume un ruolo didattico esplicito. Il personaggio di Cyrus Smith spiega la produzione di acido solforico, la fabbricazione di nitroglicerina, l'uso dei metalli e dei fertilizzanti. Verne trasforma la chimica in racconto pedagogico, mostrando come la conoscenza scientifica consenta di ricostruire la civiltà partendo da zero. È una chimica positiva, razionale, illuministica, profondamente ottimista:

un mucchio di rami e di legna tagliata, dei pezzi di scisti piritici, il tutto ricoperto da un sottile strato di pirite, precedentemente ridotto alle dimensioni di una noce. Il tutto alternato su più strati, in un mucchio enorme, poi rivestito di terra ed erba e con apposite aperture di sfogo per i fumi. Ciò fatto, hanno dato fuoco al legno, il calore si è comunicato allo scisto, che ha preso fuoco dato che conteneva carbonio e zolfo.

Anche in "Dalla Terra alla Luna" e "Intorno alla Luna", la chimica è fondamentale per esplosivi, propellenti, materiali resistenti. Verne riflette implicitamente sul doppio volto della scienza: la chimica

che permette il viaggio spaziale è anche quella che alimenta l'industria bellica. Tuttavia, a differenza di Stevenson, Verne mantiene una fiducia di fondo nel progresso scientifico, purché guidato dall'intelligenza e dalla cooperazione.

La chimica di Verne è una chimica della possibilità storica: non trasforma più l'anima, ma il mondo. È la scienza che rende l'immaginazione praticabile, anticipando molte tecnologie del Novecento e mostrando come la letteratura possa essere un laboratorio concettuale per il futuro.

12. Conclusione: il valore di Primo Levi

Non potevo non concludere con Primo Levi: i suoi libri sono non solo nella mia libreria, ma le sue parole e i suoi scritti spesso hanno guidato i miei pensieri e certamente influenzato la mia vita. Il suo "Il Sistema Periodico" è da sempre sul mio comodino, lo utilizzo spesso per rinfrancarmi, ma anche per indurmi a pensare che domani il Sole sorgerà ancora.

In Primo Levi la chimica non è mai un semplice repertorio di concetti tecnici, né una metafora ornamentale: è una vera e propria grammatica del raccontare. La formazione scientifica gli fornisce uno sguardo del mondo fondato sulla precisione, sull'osservazione paziente e sulla responsabilità del linguaggio, elementi che diventano cardini anche della sua scrittura letteraria [27]. Nei suoi testi la materia parla, reagisce, resiste; gli atomi, le soluzioni, le impurità non sono solo oggetti di studio, ma figure narrative che incarnano il destino umano, la fragilità e la possibilità di trasformazione.

E proprio ne Il Sistema Periodico la chimica diventa struttura del racconto e autobiografia intellettuale: ogni elemento è un capitolo, un carattere, una prova morale. La narrazione procede come un esperimento, fatta di tentativi, errori, contaminazioni, risultati parziali:

Potevo anche aver ragione: poteva essere la Materia la nostra maestra, e magari anche, in mancanza di meglio, la nostra scuola politica; ma lui aveva un'altra materia a cui condurmi, un'altra educatrice: non le polverine di Qualitativa, ma quella vera, l'autentica Urtstoff senza tempo, la pietra e il ghiaccio delle montagne vicine. Mi dimostrò senza fatica che non avevo le carte in regola per parlare di materia. Quale commercio, quale confidenza avevo io avuto, fino allora, coi quattro elementi di Empedocle? Sapevo accendere una stufa? Guadare un torrente? Conoscevo la tempesta in quota? Il germogliare dei semi?

Anche nei testi legati all'esperienza nei campi di concentramento, come "Se questo è un uomo", il suo sapere chimico non è mai ostentato, ma emerge come strumento di sopravvivenza concreta e mentale, come residuo di razionalità in un universo costruito per negarla. La chimica, in Levi, è ciò che resta quando tutto sembra crollare: una disciplina che insegna a distinguere, a non confondere, a non cedere all'indistinto.

Il suo modo di narrare mostra come scienza e letteratura non siano territori separati, ma forme complementari di conoscenza. La chiarezza, l'esattezza e l'etica della chimica diventano un modello di scrittura e di comportamento: nominare le cose correttamente è un atto di giustizia, raccontarle con rigore è una forma di responsabilità verso il lettore e verso la storia. Primo Levi dimostra che la chimica può essere narrazione e che la narrazione, quando è onesta, può essere un esercizio di chimica morale.

Il lascito più profondo di Primo Levi è in questo, nell'aver mostrato che il racconto scientifico può essere umano senza perdere precisione e che la letteratura può accogliere la complessità della materia senza rinunciare alla bellezza. La chimica non spiega soltanto il mondo: lo racconta e, quindi, lo rende comprensibile e condivisibile, almeno in parte.

Ringraziamenti

Questo articolo è stato possibile grazie al supporto della Dr.ssa Egizia Marzocco, che, negli anni mi ha sempre spinto a considerare e ad indagare i possibili legami tra scienza e letteratura. La ringrazio davvero di cuore. Eventuali errori inseriti dopo la sua rilettura sono tutti a mio carico.

Riferimenti bibliografici

- [1] E. R. Kandel, *Arte e Scienza*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2025 (ISBN 978-88-3285-808-2).
- [2] L. Dei, Chemistry and Literature: Disciplines in Dynamic Equilibrium, *Substantia*, 2025, **9**(2), 59-73.
- [3] A. Battistini, Letteratura e scienza da Carducci a Primo Levi, in *Sondaggi sul Novecento* (Ed. L. Gattamorta), Il Ponte Vecchio, Cesena, 2003, pp 43-69 (ISBN: 8883123042).
- [4] V. Schettino, Science and art. Chemistry, fine arts and literature, *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 2014, **25**, 327-3338 (DOI: 10.1007/s12210-014-0318-9).
- [5] S. Califano, *Storia della Chimica. I. Dall'alchimia alla chimica del XIX secolo*, Bollati Boringhieri, Torino, 2010.
- [6] S. Califano, *Storia della Chimica. II. Dalla chimica fisica alle molecole della vita*, Bollati Boringhieri, Torino, 2011.
- [7] C. Snow, *Le due culture* (traduzione in italiano di Adriano Cargo), Feltrinelli, Milano, 1964, pp. 3-12.
- [8] R. Holmes, *The age of wonder. How the romantic generation discovered the beauty and terror of science*, Harper Press, London, 2008.
- [9] J. H. Cartwright, The two cultures debate, in *Literature and science. Social impact and interaction* (Eds., J. H. Cartwright, B. Baker), ABC-CLIO-Inc., Santa Barbara, 2005.
- [10] A. Camilleri, *Come la penso*, Chiarelettere editore, 2013.
- [11] W. Heisenberg, *Fisica e filosofia* (traduzione in italiano di Giulio Gignoli), Feltrinelli, Milano, 2022.
- [12] A. Carbognani, *L'asteroide di Sodoma e Gomorra* (<https://www.media.inaf.it/2021/10/06/lasteroide-di-sodoma-e-gomorra/>).
- [13] M. E. Weeks, The discovery of the elements. I. Elements known to the ancient world, *J. Chem. Educ.*, 1932, **9**, 4-10.
- [14] E. Tienze, *E per cieli le scienze. La scienza di Dante Alighieri*, Clown Bianco Edizioni, Milano, 2021.
- [15] M. Taddia, C'è anche un po' di chimica tra le scienze di Dante, *La Chimica e l'Industria Newsletter*, 2021, **8**(6), 4-8.
- [16] C. Pagani, *Shakespeare e la filosofia occulta del rinascimento* (<https://www.shakespeareitalia.com/shakespeare-e-la-filosofia-occulta-del-rinascimento/>).
- [17] J. W. Goethe, *La teoria dei colori* (con prefazione di Riccardo Falcinelli), Il Saggiatore, Milano, 2025.
- [18] G. Leopardi, *Dissertazioni filosofiche* (a cura di Tatiana Crivelli), Antenore, Padova, 1995, p. 163.
- [19] P. Fara, Realtà o finzione? Mary Shelley, la scienza e Frankenstein, *DEP Deportate, esuli, profughe*, 2017, **35**, 5-25 (ISSN 1824-4483).
- [20] L. Garlaschelli, Farmacologia dei cadaveri viventi, *La Chimica e l'Industria*, 2001, **83**, 71-74.
- [21] S. Bartoli, La Scienza in una prospettiva di genere: una riflessione a partire da Frankenstein di Mary Shelley, *Clionet*, 2023, **7** (DOI: 10.30682/clionet2307h).
- [22] K. Lacefield, Mary Shelley's Frankenstein, the Guillotine, and Modern Ontological Anxiety, *Text Matter*, 2016, **6**, 35-52 (DOI: 10.1515/textmat-2016-0003).
- [23] A. Stiles, Robert Louis Stevenson's Jekyll and Hyde and the double brain, in *Popular Fiction and Brain Science in the Late Nineteenth Century. Cambridge Studies in Nineteenth-Century Literature and Culture*, Cambridge University Press, Cambridge, 2011, pp. 27-49.
- [24] M. Griep, M. Mikasen, Dr. Jekyll's Mysterious Transformative Formula, in *ReAction!: Chemistry in the Movies* (Eds., M. Griep, M. Mikasen), Oxford University Press, Oxford, 2009, pp. 9-34 (DOI: 10.1093/oso/9780195326925.003.0005).
- [25] A. MacDuffie, Irreversible Transformations: Robert Louis Stevenson's Dr. Jekyll and Mr. Hyde and Scottish Energy Science, *Representations*, 2006, **96**(1), 1-20 (DOI: 10.1525/rep.2006.96.1.1).
- [26] J. S. B. O'Leary, Where Things go to the Other Way: the Stereochemistry of Lewis Carroll's Looking-Glass World, *Victorian Network*, 2010, **2**(1), 70-87 (DOI: <https://doi.org/10.5283/vn.14>).
- [27] R. Valero, R. C. Mori, L. Massi, A química na literatura de Primo Levi: aspectos filosóficos sobre experimentação matéria e ofício químico, *Quim. Nova*, 2023, **46**(3), 298-306 (<https://quimicanova.sbq.org.br/pdf/v46n3a10>).

Intelligenza artificiale e didattica: dalla previsione alla comprensione scientifica

Pierluigi Contucci

Dipartimento di Matematica dell'Università di Bologna

e-mail: pierluigi.contucci@unibo.it

Abstract. Artificial Intelligence is often presented to schools as a teaching aid or tutoring tool. However, its most important consequence for science education is epistemological rather than technological. Machine learning systems can produce accurate predictions without relying on explicit theoretical models. This challenges a fundamental assumption of experimental sciences such as chemistry, where understanding is traditionally grounded on the chain observation–model–prediction–verification. The presence of predictive systems without explanatory mechanisms makes it necessary to clarify in teaching the difference between correlation and causation, and between performance and understanding. Rather than replacing laboratory activity, AI highlights its role as the place where scientific explanation is distinguished from statistical adaptation. The article argues that AI can be used not primarily to automate exercises but to expose misconceptions, compare empirical predictions with theoretical models, and show the physical cost of information in terms of energy and limits of computation. In this perspective, artificial intelligence becomes an opportunity to reinforce scientific thinking and to redefine the educational function of chemistry in the age of predictive machines.

Keywords: intelligenza artificiale; formazione chimica; comprensione scientifica; correlazione e causalità; epistemologia della scienza

L'intervento che ho fatto al Congresso DD-SCI 2025 conteneva alcune brevi riflessioni sull'Intelligenza Artificiale (AI), cercando di separare i miti dai fatti, inquadrandola come la nuova rivoluzione industriale attraverso esempi su potenzialità e rischi. I lettori interessati possono trovare quanto ho detto nel saggio introduttivo e non tecnico che ho scritto tempo fa [1]. Nelle poche righe che seguono invece, cercando di fare tesoro delle cose che ho sentito al Congresso e delle interessanti discussioni che ho avuto con i partecipanti, vorrei riflettere più nello specifico sulla relazione tra AI e insegnamento della scienza.

L'intelligenza artificiale viene spesso presentata alla scuola come uno strumento: un tutor, un assistente, un sistema di supporto all'apprendimento. Questa descrizione è corretta, ma certamente riduttiva. Essa corre il rischio, infatti, di far sembrare questa tecnologia rivoluzionaria un mero miglioramento metodologico, mentre la portata reale è più profonda. L'IA non sta semplicemente cambiando il modo di insegnare: sta cambiando il significato di insegnare una scienza.

Per comprenderlo bisogna partire da una constatazione elementare. La chimica, come ogni scienza sperimentale, si fonda su una catena concettuale precisa: osservazione, modello, previsione, verifica. Lo studente impara che una legge chimica non è una regolarità statistica, ma la conseguenza di un modello della materia. L'equilibrio chimico, la cinetica delle reazioni, la struttura elettronica non sono descrizioni dei dati: sono spiegazioni. Il valore formativo della disciplina non sta solo nel risultato, ma nel percorso che conduce ad esso. La scienza educa perché obbliga a distinguere ciò che accade da ciò che lo rende coerente, spiegabile e talvolta controllabile.

Forse per la prima volta nella storia della scoperta scientifica i sistemi di apprendimento automatico rompono questa catena e lo fanno in modo sistematico. Essi producono previsioni corrette

senza possedere un modello esplicito del fenomeno. Non conoscono molecole, legami o orbitali: elaborano correlazioni. Se vengono addestrati su abbastanza dati, prevedono con precisione proprietà, reazioni o comportamenti, ma non sanno perché accadano, dove quel perché è il nocciolo del metodo scientifico.

Questa situazione non è un'anomalia tecnica, ma un evento epistemologico. Ricorda da vicino la prima rivoluzione industriale. I motori a vapore funzionavano prima che esistesse la termodinamica. Si costruivano macchine sempre più potenti senza sapere quale principio ne determinasse l'efficienza. Solo con Carnot e Clausius si comprese che esistevano limiti naturali e che dietro il rendimento stava una grandezza conservata: l'energia. La scienza raggiunse la tecnologia e la trasformò. Oggi la tecnologia dell'apprendimento automatico corre più veloce della comprensione teorica: sappiamo costruire sistemi intelligenti senza conoscere le leggi dell'intelligenza artificiale.

Siamo quindi in una fase prescientifica della nuova rivoluzione industriale. Le reti neurali trasformano informazione in prestazione cognitiva, ma non possediamo ancora una teoria dei loro limiti e del loro funzionamento generale. Usiamo queste macchine come si usavano le macchine a vapore nel Settecento: empiricamente, per tentativi e miglioramenti incrementali. Ci manca una vera termodinamica dell'apprendimento, capace di stabilire che cosa sia possibile e che cosa no, quali siano i limiti naturali della previsione automatica e quale sia il costo informativo di ogni prestazione cognitiva.

Per un insegnante di chimica questo fatto è decisivo. Finora l'obiettivo implicito dell'insegnamento scientifico è stato mostrare allo studente che la conoscenza non coincide con la previsione. Si può indovinare un risultato, ma solo comprendendone il meccanismo lo si conosce. L'IA mette in crisi proprio questa distinzione: può prevedere senza comprendere. La scuola si trova a un bivio: utilizzare in modo acritico l'AI come *prêt-à-répondre*, oppure mettere al centro della didattica la discussione sulla differenza tra teoria e induzione statistica. Non vi è alcun dubbio che la strada da percorrere sia la seconda.

L'IA non sostituisce il laboratorio: lo rende necessario. Il laboratorio diventa il posto in cui si distingue tra correlazione e causalità, tra adattamento statistico e legge naturale. Se una rete neurale prevede correttamente la velocità di una reazione, lo studente deve imparare che la previsione non è ancora spiegazione e che la spiegazione è ciò che permette di trasferire la conoscenza in contesti nuovi. Una legge scientifica vale proprio perché continua a funzionare quando cambiano le condizioni; una correlazione smette di funzionare appena cambia il contesto.

Questo punto è cruciale anche per capire la natura dell'intelligenza stessa. Nei corsi superiori che, sperabilmente molti studenti seguiranno nei percorsi di formazione universitari sull'AI, l'analisi dei sistemi neurali artificiali mostra che essi apprendono solo quando le relazioni tra le loro parti restano libere di formarsi e quando la comunicazione tra esse non si interrompe mai. Connessioni cooperative e competitive coesistono in equilibrio. Se si eliminano le relazioni antagoniste, il sistema non diventa più efficiente: smette di essere intelligente e diventa un semplice amplificatore di segnali. L'intelligenza emerge quindi da una rete di interazioni, non dalla potenza di un singolo componente. Tale osservazione suggerisce una definizione operativa di intelligenza: molte parti autonome, in relazione dinamica, obbligate solo a comunicare e non ad allinearsi. Per la chimica questa idea è familiare. Le proprietà di una molecola non coincidono con quelle degli atomi isolati; emergono dalle loro interazioni. Analogamente, l'intelligenza emerge dalle relazioni tra componenti. In questo senso l'IA diventa anche un oggetto di studio scientifico, non solo uno strumento tecnologico.

L'insegnamento può utilizzare l'IA proprio per mostrare questo passaggio. Non come scorciatoia cognitiva, ma come oggetto di analisi. Gli studenti possono confrontare una previsione statistica prodotta da una macchina con una previsione derivata da un modello chimico. Possono osservare quando coincidono e quando divergono. In quel confronto si chiarisce cosa sia una teoria scientifica.

Vi sono applicazioni didattiche particolarmente promettenti in questa direzione. Un sistema generativo può produrre ragionamenti chimici plausibili, ma errati: errori realistici, simili a quelli degli studenti. Analizzarli in classe consente di esplicitare le misconcezioni. L'IA può simulare modelli intuitivi, ma scorretti degli orbitali o dell'equilibrio e permettere agli studenti di confutarli sperimentalmente. La tecnologia diventa così un laboratorio epistemologico.

Un secondo uso riguarda la trasferibilità della conoscenza. Una rete addestrata su un insieme di reazioni può fornire ottime previsioni entro quel dominio, ma fallire appena si esce da esso. Il modello teorico, invece, pur meno preciso localmente, mantiene validità in modo molto più robusto e smette di generare previsioni corrette solo quando la stessa teoria che lo include viene sostituita da una più generale che la rivoluziona. Mostrare questa differenza insegna che la scienza non è ottimizzazione di prestazioni, ma costruzione di leggi e teorie.

Vi è poi un aspetto materiale spesso trascurato: l'energia. Ogni autonomia cognitiva ha un costo energetico. Il cervello umano consuma pochi watt; i grandi sistemi di calcolo richiedono potenze enormemente superiori. L'informazione non è un'entità astratta: è un processo fisico. Collegare apprendimento automatico, termodinamica ed energia permette di integrare informazione e materia in un'unica visione scientifica. La sostenibilità energetica dell'IA diventa così anche un tema educativo, non solo tecnologico, fortemente legato ai temi profondi della cultura chimica.

Questo problema ha anche una dimensione culturale e politica. Chi controlla gli strumenti di conoscenza controlla le forme della conoscenza stessa. Le grandi piattaforme digitali producono modelli cognitivi oltre che servizi tecnologici. Per questo l'educazione scientifica assume un ruolo centrale: forma cittadini capaci di distinguere tra uso di uno strumento e comprensione dei suoi effetti. Senza questa consapevolezza, la tecnologia diventa potere e non conoscenza condivisa.

L'IA, quindi, non è semplicemente un nuovo strumento didattico. È un'occasione per riportare al centro l'idea di scienza come spiegazione della realtà. Se usata solo per automatizzare esercizi, impoverisce l'apprendimento; se utilizzata come oggetto di riflessione, lo rafforza. Costringe a distinguere sapere da saper fare e previsione da comprensione. Le conseguenze nefaste di approcci errati nella didattica sono ben note agli educatori di tutto il mondo. Un esempio dal passato è stato quello dell'uso della calcolatrice come sostituto del calcolo sin dal periodo formativo. Gli studenti che negli anni Settanta non si sono allenati con le operazioni e hanno percorso solo la scorciatoia della comoda macchinetta calcolatrice non hanno perso solo la capacità di far di conto, ma la *numerical literacy* che è la base del ragionare e trovare l'errore.

In questo senso l'insegnante assume un ruolo ancora più importante. Non è più soltanto il trasmettitore di contenuti ma il garante del metodo: colui che mostra perché una risposta corretta non è ancora conoscenza e perché la teoria è ciò che rende la conoscenza condivisibile e cumulativa. Naturalmente, in questo modo il suo ruolo è rafforzato dalla nuova tecnologia.

L'intelligenza artificiale non riduce il valore dell'insegnamento scientifico: ne rivela la funzione più profonda. In un mondo in cui una macchina può fornire soluzioni, la scuola diventa il luogo in cui si impara cosa significhi capire e la chimica è uno degli spazi privilegiati in cui questo significato può essere ancora mostrato con chiarezza.

A questo punto si chiarisce anche un'ultima conseguenza. Una tecnologia diventa scienza quando è in grado di stabilire i propri limiti naturali. La termodinamica non nacque solo per migliorare i motori a vapore, ma per capire perché non potessero funzionare arbitrariamente bene. Analogamente, una futura scienza dell'apprendimento dovrà spiegare non solo quando una macchina impara, ma quando è impossibile che impari. Questo è il passaggio decisivo: trasformare la prestazione in conoscenza dei limiti. Una scienza, tuttavia, non esiste senza condizioni pubbliche di verificabilità. I limiti naturali possono essere studiati solo dove modelli, dati ed esperimenti siano accessibili, controllabili e riproducibili. Per questo la ricerca sull'intelligenza artificiale non può restare soltanto una competizione tecnologica tra piattaforme private, orientata alla prestazione e alla scala computazionale. Occorre anche uno spazio di ricerca condiviso, nel quale i sistemi di apprendimento diventino oggetti di misura e non soltanto strumenti operativi. Come le grandi infrastrutture scientifiche del Novecento hanno permesso alla fisica di trasformarsi da insieme di competenze disperse in disciplina cumulativa, una cooperazione pubblica sulla ricerca in intelligenza artificiale consentirebbe di confrontare modelli, stabilire limiti, verificare risultati e rendere riproducibili gli esperimenti. Solo in un contesto di questo tipo l'intelligenza artificiale può acquisire pienamente lo statuto di scienza e non restare una tecnologia efficace ma opaca.

Per la didattica della chimica questo significa introdurre esplicitamente il concetto di costo informativo. Ogni misura, ogni previsione, ogni classificazione richiede energia, memoria e dati. L'apprendimento automatico rende visibile ciò che nella scienza era implicito: la conoscenza è una trasformazione fisica, non un atto puramente logico a costo nullo. Collegare informazione, entropia ed energia permette di mostrare allo studente che la distinzione tra scienze naturali e scienze dell'informazione è solo apparente. La chimica studia le trasformazioni della materia; l'intelligenza artificiale studia trasformazioni dell'informazione, ma entrambe obbediscono a vincoli fisici.

In questa prospettiva l'IA può diventare un ponte didattico tra discipline. Non perché semplifica l'apprendimento, ma perché rende evidente che capire significa individuare relazioni stabili e trasferibili. Quando gli studenti comprendono perché una legge continua a valere al variare delle condizioni, hanno imparato più di una formula: hanno appreso che cosa sia una spiegazione scientifica.

Per questo motivo la sfida educativa non è decidere se usare o meno l'intelligenza artificiale in classe. La vera sfida è usarla per insegnare il valore della teoria. Se la scuola riuscirà a far vedere che una risposta prodotta automaticamente non equivale a comprensione, allora l'IA non indebolirà l'educazione scientifica, ma la rafforzerà. In un'epoca di macchine capaci di fornire risultati, la funzione della scienza resta quella di fornire significato.

Si comprende allora che la questione educativa non è separabile da quella civile. Quando sistemi artificiali producono testi, immagini e decisioni indistinguibili da quelli umani, il problema non riguarda soltanto l'apprendimento degli studenti, ma la possibilità stessa di una conoscenza condivisa. Una società democratica si fonda sulla fiducia nella verificabilità delle affermazioni e sulla distinzione tra informazione e manipolazione. Se questa distinzione si indebolisce, non si altera solo la didattica: si altera il funzionamento dello spazio pubblico. Per questo l'educazione scientifica assume oggi un valore nuovo. Formare alla differenza tra previsione statistica e spiegazione, tra correlazione e causalità, significa anche formare cittadini capaci di riconoscere quando uno strumento amplia la libertà e quando invece concentra potere. In tale prospettiva diventa necessario che la ricerca sull'intelligenza artificiale acquisisca uno statuto pienamente scientifico e pubblico, fondato su esperimenti riproducibili, modelli condivisi e limiti conoscibili, analogamente a quanto avvenne per la termodinamica rispetto alla tecnologia del vapore. La scuola, allora, non è soltanto il luogo in cui si apprendono contenuti, ma il primo spazio in cui una società impara a governare consapevolmente le proprie tecnologie cognitive. In un'epoca in cui le macchine possono fornire risposte, l'educazione scientifica resta la condizione perché quelle risposte non diventino forme invisibili di dominio, ma strumenti di conoscenza comune.

Riferimenti bibliografici

[1] P. Contucci, *Rivoluzione Intelligenza Artificiale*, Dedalo, Bari, 2023.

L'uso degli assistenti virtuali per la didattica adattiva: l'esperienza IMPAR-AI in Italia e scenari futuri

Paolo Branchini

Dirigente di Ricerca I.N.F.N Sezione di RomaTre e Accademia delle Scienze di Bologna

e-mail: paolo.branchini@roma3.infn.it

Abstract. This contribution will first provide a general introduction to the context of technological innovation in the educational sector. It will then present the rationale behind the IMPAR-AI project, aimed at understanding how Artificial Intelligence can be used in Italian schools and at assessing its potential benefits for learning and school organization. Finally, the paper will look ahead to the future by exploring the opportunities and challenges associated with the introduction of augmented reality in the Italian school system, highlighting how these technologies may contribute to transforming the educational experience.

Keywords: didattica adattiva; intelligenza artificiale; inclusione scolastica; realtà aumentata

1. Introduzione

Già negli anni '80 del secolo scorso era emerso con chiarezza che la personalizzazione della didattica poteva portare significativi benefici agli studenti. Un esempio emblematico è il celebre *Two Sigma Problem* di Bloom (1984), che mostrava come studenti seguiti con un insegnamento individualizzato ottenevano risultati mediamente due deviazioni standard superiori rispetto a quelli di classi tradizionali. Tuttavia, i metodi allora disponibili richiedevano la presenza di un insegnante per ogni discente, una soluzione evidentemente insostenibile su larga scala.

Per superare questo limite, è stata considerata la possibilità di utilizzare *assistenti virtuali*, in grado di offrire un certo grado di personalizzazione didattica senza richiedere risorse umane equivalenti. A questo scopo è stata avviata una collaborazione pubblico-privata tra il Ministero dell'Istruzione e del Merito e Google, in cui il partner tecnologico ha fornito strumenti di Intelligenza Artificiale (AI), mentre il Ministero ha organizzato corsi di formazione per i docenti con lo scopo di mostrare un corretto utilizzo di questi strumenti in classe. Parallelamente, il Ministero ha redatto linee guida per regolamentare l'impiego dell'IA, assicurando che fosse utilizzata secondo criteri didattici, etici e normativi. Il progetto si focalizza sulla scuola secondaria di primo grado e sulle prime due classi della secondaria di secondo grado; si tratta, infatti, di una fase cruciale di transizione in cui gli studenti sviluppano ambizioni e compiono scelte fondamentali per il loro futuro accademico e professionale. L'iniziativa mira a intervenire sulle criticità emerse nei rendimenti scolastici, in particolare, per esempio, nelle prove di *matematica*, dove i dati, come mostrato in figura 1, evidenziano disparità significative legate a diversi fattori: le studentesse mostrano un punteggio inferiore di 6,3 punti rispetto ai colleghi maschi, mentre l'impatto più pesante sugli esiti è causato dalle ripetenze (-22,5 punti) e dal background migratorio, con punteggi sensibilmente più bassi per gli studenti di prima generazione (-15,0) e seconda generazione (-7,2). Anche il territorio influisce profondamente, con picchi negativi registrati nel Sud (-11,9) e nelle Isole (-18,0), a fronte di risultati positivi nel Nord-Est (+8,2) e Nord-Ovest (+7,1). Per dare un'idea concreta di questi differenziali, nel sistema di valutazione italiano un gap di circa 20 punti INVALSI, dopo otto anni di scolarizzazione, è generalmente interpretato come equivalente a un anno di apprendimento perso.

Studi classici sull'apprendimento personalizzato, come quelli di Bloom (1984), mostrano che la didattica individualizzata può produrre un effetto fino a due deviazioni standard, laddove una deviazione standard in una classe tipica corrisponde a circa 40 punti. Ciò suggerisce che metodi di inse-

gnamento personalizzati, come quelli promossi da Impar-AI, hanno il potenziale di compensare in maniera significativa i gap osservati.

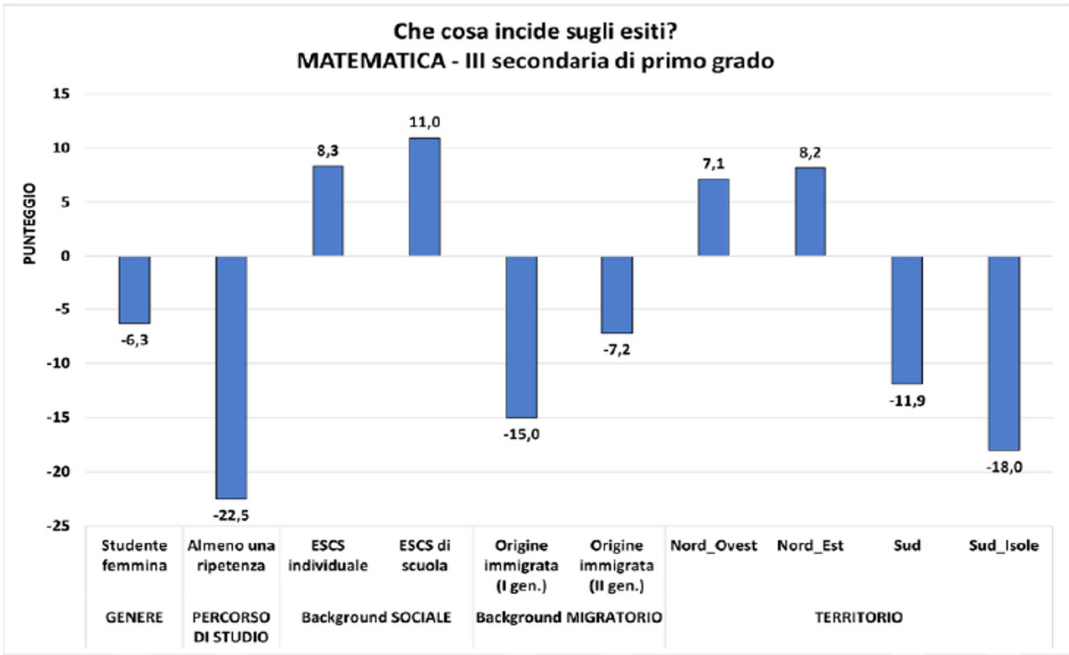


Figura 1. Peso di alcuni fattori sull’esito della prova di Matematica al termine del primo ciclo d’istruzione (fonte: INVALSI 2022)

Per investigare come contrastare queste diseguaglianze socioeconomiche e di genere, la sperimentazione Impar-AI è stata implementata in quattro regioni pilota: Calabria, Lazio, Lombardia e Toscana.

2. Obiettivi, cronoprogramma e formazione strategica nel progetto IMPARA-AI

La sperimentazione si pone l’obiettivo ambizioso di provare a contrastare la dispersione scolastica e ridurre i divari nelle materie scientifiche attraverso l’uso di assistenti virtuali che supportino i docenti nella personalizzazione della didattica. Per quantificare scientificamente i vantaggi di questo approccio, il progetto prevede l’affiancamento di una “classe placebo” a ogni classe sperimentale, con una valutazione finale affidata ai test Invalsi entro maggio 2026. Il cronoprogramma ha visto l’avvio delle attività a ottobre 2024, seguito da un checkpoint a maggio 2025, per poi proseguire nell’anno scolastico 2025-2026 fino al termine previsto per maggio 2026. Oltre alla scuola secondaria, il progetto dedica un percorso specifico agli Istituti Tecnologici Superiori (ITS), considerati strategici per l’inserimento nel mondo del lavoro; in particolare, l’ITS Cadmo in Calabria segue una formazione avanzata focalizzata sulla progettazione di applicazioni di *machine learning* e AI generativa.

3. Metodologia didattica: apprendimento interattivo e flussi di lezione personalizzati

Il metodo didattico del progetto si basa su un sistema di apprendimento interattivo che trasforma il flusso della lezione tradizionale in un percorso dinamico. Il processo inizia con un test iniziale comune predisposto dal professore, seguito da una fase di esercizi guidati che sfruttano l’IA per fornire una valutazione immediata e conoscere in tempo reale la preparazione di ogni studente.

Questo ecosistema digitale include:

- *Quiz interattivi e feedback immediato*: l'IA propone domande a risposta multipla o esercizi di complemento, fornendo spiegazioni istantanee per le risposte corrette e suggerimenti per correggere gli errori.
- *Percorsi adattivi*: il grado di difficoltà dei contenuti si regola automaticamente in base alle risposte fornite dal discente.
- *Pianificazione personalizzata*: grazie ai dati raccolti, il docente può elaborare programmi di lavoro su misura utilizzando tool di AI generativa e strumenti come Google NotebookLM per l'organizzazione dei materiali di studio.
- *Revisione continua*: il sistema garantisce un'interazione costante tra studente e docente, permettendo a quest'ultimo di monitorare i progressi e aggiustare la didattica in modo capillare.

4. Inclusione, personalizzazione e supporto: i benefici dell'IA nella scuola

I vantaggi dell'uso dell'Intelligenza Artificiale nella scuola si articolano su tre pilastri fondamentali: accessibilità, personalizzazione e supporto professionale.

Dal punto di vista dell'accessibilità, l'IA favorisce un'effettiva inclusione, rendendo disponibili materiali digitali adattabili alle esigenze di ciascuno studente, come testi semplificati, audio, traduzioni automatiche o contenuti multimediali interattivi. Questo approccio consente di raggiungere studenti con differenti bisogni linguistici, cognitivi o di apprendimento, contribuendo a ridurre le disuguaglianze tra scuole con disponibilità di risorse diverse e garantendo pari opportunità formative.

La personalizzazione rappresenta un secondo pilastro perché l'IA agisce come un tutor individuale, capace di analizzare in tempo reale le prestazioni degli studenti, modulare il ritmo e la difficoltà dei contenuti e fornire feedback immediati. Tale approccio non solo favorisce l'autonomia e la motivazione dello studente, ma consente anche di intervenire precocemente su eventuali lacune, migliorando gli esiti di apprendimento complessivi.

Infine, il supporto ai docenti rappresenta un terzo elemento centrale. Il sistema permette di ridurre il carico di lavoro attraverso strumenti pronti all'uso e dati analitici sulle performance della classe, favorendo una didattica più mirata ed efficiente. Al contempo, promuove lo sviluppo di una comunità professionale dinamica, basata sulla condivisione di buone pratiche, sull'aggiornamento continuo delle metodologie e sulla collaborazione tra insegnanti, contribuendo a una cultura scolastica più innovativa e sostenibile.

5. Sguardi sul futuro: la scuola immersiva e intelligente

La scuola del futuro potrebbe trasformarsi in un vero e proprio laboratorio immersivo e interattivo, grazie alla combinazione di realtà aumentata (AR) e Intelligenza Artificiale (IA). In questo scenario, le aule tradizionali si estendono virtualmente oltre le mura scolastiche: gli studenti esplorano ambienti tridimensionali, conducono esperimenti scientifici complessi in totale sicurezza, visualizzano fenomeni astratti e manipolano modelli digitali, sperimentando concetti che fino a oggi erano accessibili solo attraverso libri o dimostrazioni frontali.

L'AR permette di personalizzare ogni percorso di apprendimento in tempo reale, mentre l'IA analizza le prestazioni degli studenti, identifica punti di forza e aree di difficoltà e propone contenuti calibrati sul livello di ciascuno. In pratica, ogni studente può avanzare secondo il proprio ritmo, approfondire gli argomenti di maggiore interesse e ricevere un feedback immediato, trasformando l'apprendimento in un'esperienza attiva, motivante e altamente efficace. Studi come quelli di Bloom (1984) suggeriscono che la personalizzazione può produrre effetti fino a due deviazioni standard, il che significa che strumenti come questi potrebbero davvero ridurre i gap di apprendimento osservati, ad esempio quelli evidenziati dai test INVALSI.

Ma la trasformazione non riguarda solo gli studenti: i docenti diventano facilitatori di percorsi dinamici, guidati da dati e strumenti digitali avanzati. Possono condividere buone pratiche, collaborare a distanza con colleghi di altre scuole e utilizzare simulazioni pronte all'uso, alleggerendo il carico organizzativo e concentrandosi su interventi mirati. L'integrazione tra AR e IA apre quindi nuovi orizzonti: laboratori collaborativi virtuali, esperienze interdisciplinari e ambienti di apprendimento

adattivi che preparano gli studenti a un mondo interconnesso, tecnologico e in continua evoluzione. In questo contesto visionario, la scuola non è più solo un luogo in cui si trasmettono conoscenze, ma diventa un ecosistema educativo vivo e personalizzato, dove esplorare, creare, sperimentare e apprendere significano superare confini fisici e cognitivi, formando cittadini pronti ad affrontare le sfide del futuro con competenze digitali, pensiero critico e creatività applicata.

C'è qualcosa di nuovo sotto il Sole, anzi d'antico

Alessandra Bonoli

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna

e-mail: alessandra.bonoli@unibo.it

Abstract. The only solution to the ecological and climate crises of our time is now the elimination of greenhouse gas emissions and a complete transition to producing electricity solely from renewable sources. In the shortest possible time.

Wind, geothermal, hydroelectric, solar, biomass. Extraordinary solar and photovoltaic technologies guarantee excellent efficiencies in converting the sun's rays—rays that are evenly spread and distributed, low cost, and particularly abundant in the poorest countries of Africa or the Far East. And wind farms on land or offshore designed to set up large power plants on windy ridges or in marine parks.

Sun, earth, water, air, wind, fire: these are our energy sources for the future. But weren't these the archè, the principle and driving force of life according to the ancient philosophers?

The very same elements we can now harness thanks to advanced technologies that have to be guided by political, social, and environmental awareness: innovative technologies that allow decentralized and low-cost energy production and energy communities with high added social value—important tools in the fight against global and widespread energy poverty. Technologies to produce clean and renewable energy, in light of the knowledge accumulated over centuries about the functioning of the Earth system.

Keywords: crisi ecologica; antropocene; transizione energetica; energie rinnovabili

1. Introduzione

Nel suo famoso e fondamentale testo “Qualcosa di nuovo sotto il Sole: storia dell'ambiente nel XX secolo” [1], John Mc Neill si interroga su che cosa è avvenuto nel secolo scorso e, in particolare, dalla fine della II guerra mondiale, durante quel periodo che lui stesso, in un altro libro divenuto molto popolare, chiama “la grande accelerazione” [2]. Dagli anni '50 del Novecento la popolazione mondiale è quadruplicata, i consumi di energia e di acqua sono cresciuti rispettivamente di sedici e nove volte, la produzione industriale di quaranta volte e le emissioni di diossido di carbonio sono aumentate del 1.200%. E in relazione all'incremento senza precedenti di concentrazione di gas climalteranti in atmosfera, la temperatura del pianeta ha avuto un'impennata maggiore di un grado e mezzo rispetto all'era preindustriale.

I progressi umani sono stati certamente stupefacenti, anche se ne ha beneficiato una parte ristretta della popolazione mondiale. Ma anche in termini ambientali il nostro impatto sul pianeta è stato unico e assolutamente non paragonabile a nessun altro momento della storia precedente dell'umanità. Il periodo che stiamo attraversando è, appunto, definito da alcuni come la grande accelerazione, o dagli antropologi con il termine di surriscaldamento globale per indicare la crescita esponenziale e esageratamente elevata di tutti gli indicatori socio-economici o ambientali quali, ad esempio, l'incremento della popolazione globale e delle aree urbanizzate, il consumo di acqua, di materie prime e di energia, la produzione dei rifiuti, l'inquinamento atmosferico, l'emissione di gas climalteranti, lo sfruttamento del suolo e delle risorse.

Dai più, lo stesso periodo è definito come “Antropocene”, con un termine coniato nel 2000 dal premio Nobel per la chimica, Paul Crutzen, pubblicato, insieme a Eugene F. Stoermer, per la prima volta come nota nella Newsletter dell'International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) [3] e ribadito nel

2002 su Nature con l'articolo "Geology of Mankind" [4]. Da un punto di vista culturale l'espressione antropocene è stata sdoganata universalmente, ma non è ancora stata riconosciuta ufficialmente dalla società geologica internazionale. Perché? La giustificazione è relativa al fatto di come sia difficile riconoscere effettive discontinuità fra un periodo e l'altro. Fra un prima e un dopo. Eppure ...

Dei nove limiti planetari, o planetary boundaries, definiti dal modello sviluppato dallo Stockholm Resilience Center [5], sei sono stati superati, come evidenziato in figura 1, e un settimo, l'acidificazione degli oceani, si trova pericolosamente prossimo al limite del superamento.

In molti casi sono avvenuti superamenti irreversibili, dimostrando così una cesura sostanziale, rispetto al passato, di molteplici indicatori, fra cui occorre ricordare la concentrazione di diossido di carbonio equivalente in atmosfera, la temperatura del pianeta, il cambiamento climatico, la presenza di plastica nei sedimenti e nelle acque, solo per citarne alcuni. Si è superato in questi e in molti altri casi un punto di non ritorno che, a pieno titolo, giustificherebbe l'adozione di una terminologia nuova per l'epoca che viviamo [6].

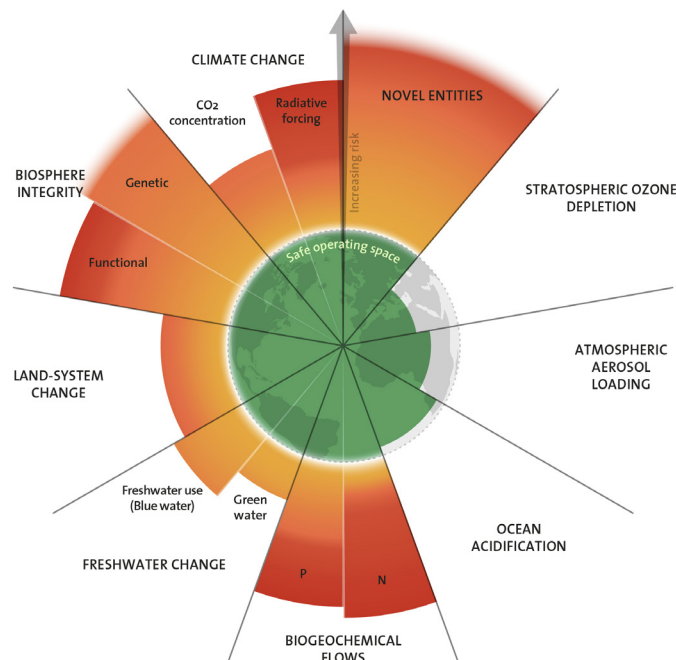


Figura 1. Aggiornamento 2025 dei Planetary boundaries [5]

Mitigazione, adattamento, sobrietà costituiscono le parole chiave determinanti nel supportare le decisioni sia collettive che individuali oggi cogenti e urgenti, da applicarsi in ogni contesto ecologico, sociale ed economico.

Mitigazione implica intervenire sulle origini di un problema specifico, limitando e resolvendo le questioni alla radice. In relazione alla crisi ambientale e climatica attuale, è essenziale azzerare le emissioni di gas a effetto serra, eliminando l'uso di fonti fossili, completamente e nel minor tempo possibile.

Adattamento si riferisce all'implementazione di azioni e piani che possano prevenire, contenere e contrastare i pericoli legati, per esempio, al cambiamento climatico, alla diminuzione della biodiversità e alla vulnerabilità degli ambienti urbani, affrontando e resolvendo i rischi connessi a qualsiasi forma di degrado.

Infine, sobrietà, o sufficienza, riguarda un cambiamento radicale rispetto ai bisogni e al ritmo di consumo, ovvero nello stile di vita che ha caratterizzato negli ultimi decenni, soprattutto, una parte del mondo, quella più ricca. Occorre un significativo cambiamento di paradigma, vivendo vite soddisfacenti, riducendo il consumo di risorse. I principi legati al concetto di sufficienza, come la moderazio-

ne, la precauzione o il “chi inquina paga”, insieme agli obiettivi “zero” (zero produzione di rifiuti, zero consumo di energia, chilometri zero, ecc.), sono interconnessi con sobrietà e parsimonia e devono essere riscoperti in ogni ambito: vita quotidiana e abitudini domestiche, gestione politica e governance, produzione e industria, agricoltura. In sostanza, sufficienza implica utilizzare meno (energia, materie prime, acqua, ecc.) e produrre meno (rifiuti, acque reflue, emissioni atmosferiche, inquinanti), per evitare effetti negativi sull'ambiente, sulla biodiversità e sugli ecosistemi naturali e per attenuare gli impatti sociali sulle comunità vulnerabili e le disuguaglianze economiche.

Nella letteratura sulla giustizia climatica, le soglie di sufficienza nell'adattamento sono state recentemente definite in termini di capacità di vivere una vita umana dignitosa, o come capacità necessaria per la resilienza climatica. Superare i limiti di adattamento rappresenta un impatto negativo da evitare. Questa affermazione sui limiti di adattamento presuppone implicitamente l'esistenza di diritti distributivi delle comunità e dei loro membri. Nel contesto dell'adattamento climatico, un approccio sufficientario può affrontare al meglio le sfide poste anche dai principi egualitari e prioritari [7].

2. Transizione energetica ed energie rinnovabili

L'unica autentica risposta alle attuali emergenze ecologiche e climatiche consiste nell'eliminazione totale delle emissioni di gas serra e in una transizione rapida e completa che veda l'abbandono dei combustibili fossili, puntando a ottenere energia elettrica solo da fonti pulite. E nel minor tempo possibile [8].

Vi sono innumerevoli tecnologie consolidate, efficaci e ad alta efficienza, che spaziano dall'energia eolica al geotermico, dall'idroelettrico al solare e alle biomasse.

Sono largamente disponibili oggi tecnologie solari e fotovoltaiche eccezionali che offrono elevate efficienze nella trasformazione della luce solare, sempre presente sul nostro pianeta, distribuita equamente, disponibile senza costi e particolarmente abbondante nei Paesi più svantaggiati dell'Africa e dell'estremo oriente.

Le innovazioni tecnologiche permettono una produzione di energia diffusa e a costo contenuto, affrontando anche altre problematiche ambientali, come il surriscaldamento estivo delle aree urbane e la desertificazione delle campagne. Tra queste vi è l'agrivoltaico, che aiuta a ridurre le emissioni e incrementa l'efficienza delle coltivazioni agricole con magnifici pannelli simili a girasoli, che seguono il movimento del sole per catturarne appieno l'energia. Inoltre, ci sono impianti on-shore, progettati per realizzare grandi centrali di produzione elettrica in parchi marini, e le comunità energetiche che apportano un grande valore sociale aggiunto e rappresentano strumenti fondamentali nella lotta contro la crescente povertà energetica.

Ma è possibile oggi anche la generazione di energia elettrica sfruttando maree e correnti marine. Le turbine, posizionate a poca profondità sotto la superficie dell'acqua, vengono attivate naturalmente dal movimento delle onde e delle masse d'acqua, utilizzando lo stesso metodo impiegato per l'energia eolica, mediante generatori ad asse verticale o orizzontale, per approfittare anche delle correnti di marea che possono cambiare direzione. Le correnti marine, infatti, sono presenti ovunque, diffuse e disponibili in ogni corso d'acqua, mare e oceano, potenzialmente sfruttabili in ogni nazione.

Quindi, Sole, Terra, acqua, aria, vento e fuoco, questi sono le nostre future sorgenti energetiche.

Ma non sono questi, proprio, l'arché, il principio e il motore della vita per i filosofi e scienziati presocratici? Talete, Anassimene, Anassimandro, Eraclito, fino a Pitagora e l'armonia matematica dell'universo [9]. Gli stessi elementi di cui possiamo oggi fruire efficacemente, senza comprometterne l'essenza o impoverirli, per generare energia pulita e rinnovabile, avvalendoci delle conoscenze tecniche che possediamo, nel pieno rispetto della natura.

3. Costo economico dell'inazione o dell'opposizione alle rinnovabili

L'elettricità in Italia è la più cara d'Europa. Lo scorso anno il prezzo medio è stato di 108,5 euro per MWh [10], a fronte dei 78 euro della Germania e dei 58 euro della Francia. In Norvegia, dove oltre il 95% dell'energia prodotta è green, il prezzo è crollato a 36 euro [11].

Nel 2024 in Italia (Figura 2) si sono consumati 312.285 GWh di elettricità, di cui 51.000 sono stati importati, mentre il resto, pari al 49%, è stato prodotto da fonti rinnovabili, prevalentemente da 1.992.117 impianti fotovoltaici e 6.148 eolici [12]. La parte residua è derivata dai fonti fossili. In coerenza con l’obiettivo europeo di neutralità climatica al 2050, il PNIEC (Piano Nazionale per l’Energia e il Clima) stabilisce che entro il 2030 le fonti rinnovabili dovranno coprire il 63,4% dei consumi elettrici nazionali, mentre la quota complessiva di rinnovabili sui consumi finali lordi di energia dovrà raggiungere il 39,4% [13].

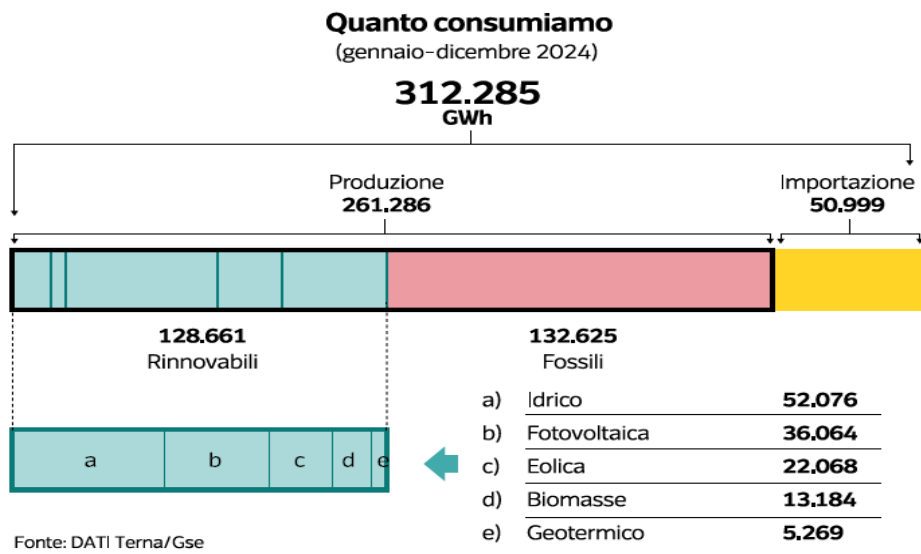


Figura 2. Consumi di elettricità in Italia nel 2024 e fonti di approvvigionamento (dati Terna/GSE [12])

Nell’ultimo decennio la produzione italiana di energie rinnovabili è aumentata del 44%, mentre in Francia è salita del 75%, in Spagna del 78%, e in Germania del 93% [14]. Come è noto, spetta alle Regioni individuare le aree di accelerazione (dove l’iter autorizzativo dovrebbe essere rapidissimo), quelle idonee, e quelle dove è meglio evitare gli impianti. A maggio di quest’anno, il TAR ha bocciato il decreto perché lascia troppa discrezionalità. Nel frattempo, le Regioni si sono mosse, in genere con un’interpretazione restrittiva, così da prevenire il malcontento degli elettori. E si è scatenata una raffica di ricorsi. La prima a fare la propria legge è stata la Sardegna, bloccando anche impianti già autorizzati. Il governo la impugna, la Regione ne approva un’altra dove quasi tutta la regione è “non idonea” e il governo impugna anche quella. A luglio la Corte costituzionale censura la Regione Calabria, ribadendo che un’area non idonea non equivale a divieto assoluto; a ottobre 2025 il Consiglio di Stato annulla due delibere del Piemonte che vietano il fotovoltaico a terra su aree agricole di elevato interesse economico. Ma insieme alla politica, ci sono i movimenti dal basso: in Italia esistono più di 120 comitati e associazioni che organizzano cortei, convegni e petizioni per dire no all’eolico e al fotovoltaico a terra. Fra questi, alcuni sono violenti tanto che negli ultimi sedici mesi si registrano sette episodi di incendi e sabotaggi. Solo per citarne un paio: nel cantiere Agsm, autorizzato alla costruzione di un parco eolico in Mugello, gli attivisti hanno asportato recinzioni e picchetti, piantato chiodi sugli alberi per renderne pericoloso il taglio, danneggiato i macchinari e aggredito ingegneri e boscaioli; in Sardegna, dove si sospetta l’infiltrazione criminale nel business dell’eolico, sono stati svitati i dadi alla base delle pale, incendiato pannelli fotovoltaici e lanciato molotov contro i teli di protezione di un deposito.

L'iter per l'approvazione degli impianti non prevede la consultazione delle popolazioni, ma le proteste influenzano i politici locali che, secondo la logica del Nimtoo («Not in my terms of office», non durante il mio mandato elettorale), per non scontentare nessuno cercano di non fare scelte, rinunciando così a promuovere adeguatamente nuove installazioni.

Ma quali sono le principali pretestuose accuse alle fonti energetiche rinnovabili? Vediamone qui solo alcune e le possibili giustificate obiezioni.

- *Rovino il paesaggio, rubano spazio all'agricoltura.*

L'Italia dispone di un ampio margine territoriale per l'espansione delle energie rinnovabili senza nuovo consumo di suolo agricolo.

Secondo stime basate su dati ISPRA-SNPA, le aree dismesse e degradate (ex cave, ex discariche, siti industriali abbandonati), potenzialmente idonee al solo fotovoltaico, ammontano a circa 210 km² a scala nazionale [15], arrivando a 490 km² per il fotovoltaico a terra ricavabile da appena il 4% delle zone agricole inutilizzate. Uno studio del 2021 di Carbon Tracker, "The Sky's the Limit" [16], stima che basti occupare lo 0,3% della superficie terrestre con pannelli solari per soddisfare l'attuale richiesta energetica globale.

Questo dato è sorprendentemente modesto se paragonato all'attuale ingombro territoriale necessario per le infrastrutture connesse alla produzione, trasporto, raffinazione delle fonti fossili. Secondo lo stesso studio, l'energia tecnicamente disponibile da solare ed eolico sarebbe oggi superiore di oltre cento volte la domanda mondiale.

In sostanza, i limiti principali non sono più tecnici, ma politici, normativi e strategici.

A livello di uso di suolo, un rapporto elaborato da Princeton (Net-Zero America) [17] mostra che l'impronta territoriale delle rinnovabili è in molti casi inferiore a quella richiesta dalle infrastrutture fossili, proprio perché queste ultime richiedono miniere, estrazioni, trasporti, raffinerie, rete alimentata e così via. Più recentemente, uno studio del 2024 [18] evidenzia come in alcuni Paesi si usi più terreno per golf club che per impianti solari o eolici, suggerendo che ci sia ampio margine per riconfigurare le priorità dell'uso del suolo in favore delle rinnovabili.

- *Le rinnovabili inquinano*

Ridurre gli inquinanti è l'unica soluzione per frenare il cambiamento climatico: "ogni frazione di grado in più significa più fame, sfollamenti e perdite" è quanto affermato da António Guterres il 6 novembre 2025, nel corso del suo intervento di apertura al World Leaders Climate Action Summit, svoltosi a Belém (Brasile) alla vigilia della COP30 delle Nazioni Unite [19].

I dati dell'Agenzia internazionale per le energie rinnovabili (Irena) dimostrano che per fabbricare un impianto da 1 MW di fotovoltaico a terra servono 200 tonnellate di materiali, poi questo si alimenterà gratuitamente per i successivi 30 anni [20]. Per produrre la stessa elettricità da una centrale termoelettrica servono 14.000 tonnellate di carbone e 5.000 di gas.

- *La transizione energetica non conviene*

Sempre secondo dati Terna [21], l'attuale sistema di trasmissione dell'energia elettrica, basato su un'infrastruttura a corrente alternata, crea dei colli di bottiglia che impediscono agli impianti di produrre alla loro capacità massima, perché non sempre si riesce a trasferire grandi quantità di potenza sulle lunghe distanze. Le soluzioni ci sono, a cominciare da quella di realizzare una rete a corrente continua ad alta tensione e implementare i sistemi di accumulo. I costi sembrano elevati, ma sganciarci dal gas e raggiungere l'obiettivo 2050 per l'Italia significa guadagnare 900.000 posti di lavoro [22] e, come ci insegna la Norvegia, ridurre fortemente le bollette.

L'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) ha confrontato i costi usando il LCOE – Levelized Cost of Electricity, cioè il costo medio di produzione lungo l'intera vita dell'impianto [23], e ha mostrato come solare ed eolico costino quattro volte meno del gas e tre volte meno del nucleare (Figura 3).

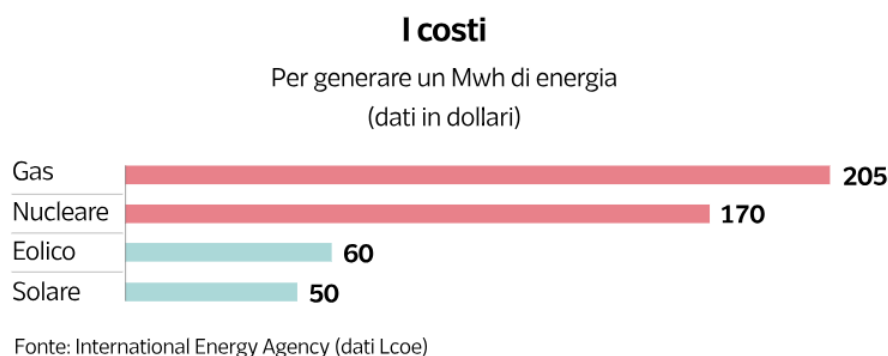


Figura 3. Confronto dei costi di energia ottenuta da varie fonti (dati di IEA [23])

Infine, è evidente il vantaggio economico della transizione energetica. Infatti, secondo recenti dati dell'International Monetary Fund (IMF) [24], il ritorno degli investimenti della decarbonizzazione mondiale entro il 2050 sarebbe ampiamente superiore ai relativi costi, come mostrato in figura 4.

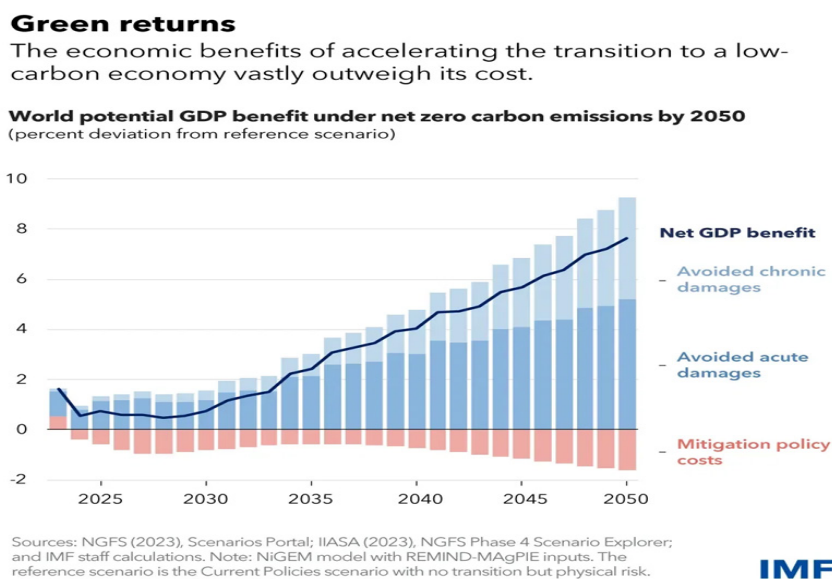


Figura 4. Ritorno degli investimenti della decarbonizzazione (dati IMF [24])

L'obiettivo, dunque, è quello di uscire dall'attuale sistema, la cui principale inefficienza risiede nel fatto che, su cento unità di combustibili fossili estratte, ne sprechiamo almeno due terzi in calore disperso nell'ambiente, con altri danni incalcolabili e irreversibili.

4. Considerazioni conclusive

Come abbiamo visto, l'unica soluzione alle crisi ecologica e climatica del nostro tempo è rappresentata oggi dall'annullamento delle emissioni di gas serra e da una transizione integrale e, nel più breve tempo possibile, verso la produzione di energia elettrica esclusivamente da fonti rinnovabili. Le attuali tecnologie solari e fotovoltaiche possono garantire eccellenti efficienze di trasformazione dei raggi del Sole, equamente diffusi e distribuiti, gratuiti e particolarmente abbondanti proprio nei paesi più poveri dell'Africa o dell'Estremo Oriente. C'è poi da aggiungere l'utilità di impianti eolici a terra o

offshore mirati all'allestimento di grandi centrali di produzione di energia elettrica sui crinali ventosi o nei parchi marini.

Sole, Terra, acqua, aria, vento, fuoco sono le nostre fonti energetiche del futuro. Ma non rappresentano queste l'archè, il principio e il motore della vita secondo la filosofia antica?

Sono gli stessi elementi di cui oggi ci possiamo servire, grazie a tecnologie avanzate, quando informate da consapevolezze politiche, sociali e ambientali: tecnologie innovative, che consentono una produzione di energia capillare e a basso costo, comunità energetiche, che hanno un grande valore sociale aggiunto, essendo importanti strumenti di lotta alla globale e diffusa povertà energetica, e tecnologie che permettono di ottenere energia pulita e rinnovabile, alla luce delle conoscenze consolidate nei secoli sul funzionamento del sistema Terra.

Riferimenti bibliografici

- [1] J. Mc Neill, *Qualcosa di nuovo sotto il Sole: Storia dell'ambiente nel XX secolo*, Einaudi, Torino, 2022.
- [2] J. R. McNeill, P. Engelke, *La grande accelerazione. Una storia ambientale dell'Antropocene dopo il 1945*, Einaudi, Torino, 2018.
- [3] P. J. Crutzen, E. F. Stoermer, W. Steffen, *The Anthropocene. The Future of Nature*, Yale University Press, 2000 (<http://www.jstor.com/stable/j.ctt5vm5bn.52>).
- [4] P. J. Crutzen, Geology of mankind, *Nature*, 2002, **415**(6867), 23-23 (doi 10.1038/415023).
- [5] <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>.
- [6] P. Govoni, G. Belcastro, A. Bonoli, G. Guerzoni, *Ripensare l'Antropocene*, Carocci editore, Roma, 2024.
- [7] I. Wallimann-Helmer, S. Kräuchi. Adaptation limits as sufficiency entitlements of justice, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2025, **73**, 101507 (<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101507>).
- [8] La Transizione Energetica in Italia, a cura di Energia per l'Italia, 2025 (<https://www.energiaperitalia.it/libro/la-transizione-energetica-in-italia/>).
- [9] A. Gargano, *Introduzione alla filosofia greca. Da Talete A Parmenide*, Istituto Italiano per gli Studi Filosofici, 1995 (https://www.iisf.it/scuola/int_fil_greca/parmenide.htm).
- [10] <https://www.mercatoelettrico.org/it-it/Home/Esiti/Elettricità/MGP/Statistiche/SintesiMGP>
- [11] <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/countries/norway/renewable-energy-sources>
- [12] GSE, Rapporto energia da FER in Italia. 2024 (<https://www.rinnovabili.it/wp-content/uploads/2025/09/Solare-Fotovoltaico-Rapporto-Statistico-2024.pdf>).
- [13] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima, versione definitiva, luglio 2024 (https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-pdf).
- [14] <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche>
- [15] Decreto "Aree Idonee", DM 21 giugno 2024 (<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/07/02/24A03360/SG>).
- [16] K. Bond, Carbon Tracker Initiative Report 2021, The Sky's the Limit: Solar and wind energy potential is 100 times as much as global energy demand.
- [17] E. Larson et al., NetZero America, Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts, Andlinger Center for Energy and the Environment, 2020 (https://netzeroamerica.princeton.edu/img/Princeton_NZA_Interim_Report_15_Dec_2020_FINAL.pdf).
- [18] J. M. Weinand, T. Pelsler, M. Kleinebrahm, D. Stolten, Countries across the world use more land for golf courses than wind or solar energy, *Environmental Research Communications*, 2025, **7**, 021012 (<https://arxiv.org/abs/2412.15376>).
- [19] <https://www.vaticannews.va/it/mondo/news/2025-11/leader-mondiali-riuniti-a-belem-per-la-cop30-pesa-assenza-usa.html>

- [20] IRENA, The geopolitical benefits of the energy transition e Future of Solar PV (<https://www.irena.org/>).
- [21] <https://lightbox.terna.it/it/insight/hvdc-tecnologia-corrente-continua>
- [22] L. M. Pastore, L. de Santoli, Socio-economic implications of implementing a carbon-neutral energy system: a green new deal for Italy, *Energy*, 2025, **322**, 135682 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135682>).
- [23] <https://www.iea.org/search/charts?q=LCOE>
- [24] <https://www.imf.org/en/blogs/articles/2023/12/05/benefits-of-accelerating-the-climate-transition-outweigh-the-costs>

Il contributo della Divisione Didattica della Società Chimica Italiana alle Indicazioni Nazionali

Eleonora Aquilini

Divisione Didattica della Società Chimica Italiana

e-mail: ele.aquilini6@gmail.com

Abstract. This paper discusses the role of the Educational Division of the Italian Chemical Society (DDSCI) in shaping and supporting the implementation of the National Curriculum Guidelines for Chemistry education in Italy. Drawing on the pedagogical perspectives of Arons and Dewey, it emphasizes the shift from a teaching model based on the transmission of established knowledge toward one focused on understanding, reasoning, and reconstruction of scientific thought. The DDSCI promotes epistemological and historical approaches to chemistry teaching, encouraging connections between scientific laws and psychological processes of learning. Specific proposals for lower and upper secondary education are presented, emphasizing active inquiry, conceptual reconstruction, and the formative value of comprehension in developing scientific literacy and critical thinking.

Keywords: didattica della chimica; Dewey; Arons; epistemologia; pensiero scientifico

1. Introduzione

Arons nel suo libro "Guida all'insegnamento della Fisica" include fra i segni che si è acquisita una mentalità scientifica [1]:

Distinguere tra: l'accettazione di risultati finali, modelli o conclusioni solo enunciate e non sottoposte a verifica, e la comprensione delle loro basi e delle loro origini. Riconoscere cioè quando domande del tipo "Come facciamo a sapere che...? Perché crediamo che...? Quali sono le prove per...?" sono state poste, quando è stata data loro risposta e sono state capite, e quando invece qualcosa è stato accettato in fiducia.

Questa riflessione sintetizza efficacemente la sfida educativa alla quale si ispira il lavoro della Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana (DD-SCI): occorre passare da un sapere nozionistico a un sapere compreso in profondità, costruendo una mentalità scientifica fondata sull'indagine e sulla verifica. Nell'insegnamento tradizionale, i manuali di chimica tendono a proporre leggi e teorie come verità già acquisite, senza esplicitare i processi che hanno portato alla loro costruzione. Questo è vero in ogni ordine di scuola, perfino all'università. Gli alunni e gli studenti quando imparano leggi e definizioni lo fanno per senso del dovere, ma nel tempo resta poco o niente. Resta, generalmente, un fastidio che alimenta atteggiamenti antiscientifici. Così facendo, la conoscenza viene subita, accettata in modo passivo, perdendo significato formativo.

Come scrive Dewey [2]:

Naturalmente l'istruzione intellettuale implica l'accumulo e il trattenimento di informazioni. Ma l'informazione è un peso indigesto se non è accompagnata dalla comprensione. Diventa conoscenza solo in quanto il suo materiale viene compreso. E l'intelligenza, la comprensione stanno a indicare che le varie parti dell'informazione appresa sono afferrate nella loro relazione reciproca - un risultato che è raggiunto solo quando l'acquisizione è accompagnata dalla riflessione costante su ciò che viene studiato.

2. Il sapere formativo e la comprensione

Dewey distingue tra il pensiero come prodotto – espresso in forme logiche e senza tempo – e il pensiero come processo, situato nel contesto e costruito nel tempo. L'educazione si occupa del pensiero come effettivamente ha luogo negli esseri umani, favorendo il passaggio da curiosità spontanea a riflessione consapevole. Il pensiero come processo che Dewey chiama psicologico, può essere orientato verso uno scopo in modo che le conclusioni del processo di pensiero assumano una forma logica, che è appunto il prodotto di una serie di ragionamenti.

Per Dewey, “logico” e “psicologico” non sono elementi contrapposti: rappresentano le due fasi di uno stesso processo conoscitivo. Infatti, così scrive [3]:

Qualunque insegnante sensibile ai modi in cui il pensiero opera nell'esperienza naturale del ragazzo “normale” eviterà senza difficoltà tanto l'identificazione del logico con una organizzazione bell'e fatta della materia di studio, quanto l'idea che per sfuggire a questo errore non occorra prestare alcuna attenzione alle considerazioni logiche. Egli vedrà senza difficoltà che il problema reale dell'educazione è la trasformazione delle capacità naturali in capacità affinate e controllate: la trasformazione della capacità più o meno casuale e delle suggestioni sporadiche in attitudini di vigile, cauta e profonda indagine. Vedrà che lo psicologico e il logico, invece di essere opposti o anche indipendenti l'uno dall'altro, sono tra loro connessi come il primo e l'ultimo, o conclusivo, stadio dello stesso processo.

Il pensiero psicologico può essere accompagnato, mediante l'insegnamento, verso uno scopo in modo che i processi di azione e riflessione conducano a definizioni scientifiche. Le definizioni scientifiche, che sono un'espressione della struttura logica del sapere, vengono così ad essere costruite attraverso un'appropriazione graduale e non attraverso una sovrapposizione a un pensiero istintivo e ingenuo. L'insegnamento della scienza deve ricostruire i processi di pensiero e le logiche epistemologiche che hanno generato le conoscenze attuali. A tal proposito riteniamo che la prima operazione da compiere sia di individuare le essenzialità conoscitive disciplinari pertinenti alle varie età. Mettere in relazione lo statuto disciplinare con ciò che è comprensibile in una certa età scolare è il primo punto da tenere in considerazione per porre al centro dell'insegnamento/apprendimento l'allievo e non la disciplina. L'altro aspetto da tenere in considerazione è quello linguistico. Un sapere è formativo quando consente di stabilire relazioni feconde tra esperienze, concetti e linguaggio. In generale, il linguaggio dovrebbe crescere insieme ai concetti e non avere vita autonoma. C'è spesso l'illusione che l'uso di un linguaggio tecnico corrisponda alla conoscenza di una disciplina, ma ovviamente non è così.

Con il linguaggio possiamo dare forma, struttura, alle conclusioni scientifiche, anche attraverso le definizioni che costituiscono il distillato dei processi che abbiamo seguito ed analizzato nel cammino di comprensione. Ma il cammino conoscitivo e il prodotto possono essere molto diversi a seconda dell'argomento che stiamo trattando. Ci sono quindi “definizioni operative” che si possono costruire con semplici esperimenti e riflessioni, utilizzando una metodologia induttiva e definizioni che contengono teorie che non possono essere riscoperte dagli allievi, perché frutto di elaborazioni geniali e al di fuori del senso comune. Queste conclusioni che si esprimono in forma di definizioni necessitano di una ricostruzione dei processi che hanno portato a quella sintesi linguistica e concettuale e hanno bisogno di una contestualizzazione storico-epistemologica.

Il compito della DD-SCI è individuare, per ciascun livello scolastico, i nuclei fondanti della chimica e proporli in modo che favoriscano la comprensione e la costruzione personale del sapere.

3. Nel primo ciclo: il linguaggio dei fenomeni

Nel primo ciclo l'insegnamento della chimica si costruisce sull'esperienza diretta e la riflessione su di essa. I concetti di “stati della materia, passaggi di stato, solubilità e trasformazione” vengono introdotti attraverso definizioni operative frutto di osservazioni e riflessioni. Parole importanti nel linguaggio chimico come fusione, evaporazione, ebollizione, precipitazione vengono così a essere parole-concetto e non avulse dall'esperienza.

Nel primo ciclo è fondamentale lavorare sul concetto di trasformazione attraverso lo studio di feno-

menologie comprensibili. Infatti, le trasformazioni, definite a scopo didattico come fisiche e chimiche, sono una componente essenziale delle conoscenze di base della chimica. A seguito delle trasformazioni fisiche possiamo riottenere le sostanze iniziali, mentre con le trasformazioni chimiche otteniamo sostanze diverse dai reagenti. Esperienze come la solubilizzazione e la cristallizzazione del sale o la reazione tra acido cloridrico e carbonato di calcio permettono di distinguere tra fenomeni fisici e trasformazioni chimiche. Particolarmente significativo a questo riguardo è il percorso didattico che riguarda “acidi, basi e sali”. Il cuore di questo itinerario didattico è il discioglimento del carbonato di calcio, insolubile in acqua, con l’acido cloridrico.

La sostanza che si ottiene per evaporazione della soluzione non è più carbonato di calcio; lo si comprende in quanto questa nuova sostanza è solubile in acqua. Il concetto di sostanza basica viene a legarsi con quello di acido in quanto sostanza aggressiva che “scioglie” attraverso una trasformazione chimica. La combinazione dei due tipi di sostanze aggressive dà luogo a una nuova classe di sostanze che è quella dei sali. Nelle Indicazioni Nazionali per il primo ciclo del 2025 sono state accolte le nostre proposte per ambito chimico.¹

4. Nel secondo ciclo: ricostruire i processi della conoscenza scientifica

Nel secondo ciclo la disciplina si fa più complessa ed è dominata da leggi e teorie: per rendere viva la conoscenza è necessario tenere conto dei processi storici ed epistemologici che hanno portato alle convinzioni scientifiche dei vari periodi di riferimento. I quadri teorici non possono essere ricostruiti con definizioni operative, ma occorre seguire il cammino scientifico fatto di ipotesi, esperienze, confutazioni che hanno condotto a modificazioni di paradigma.

Le leggi fondamentali della chimica non possono essere insegnate con le metodologie induttive proposte per la scuola del primo ciclo. In particolare, nel biennio della scuola secondaria di secondo grado è necessario realizzare il passaggio dall’approccio fenomenologico e qualitativo delle trasformazioni chimiche a quello teorico e quantitativo.

In questo livello scolastico il lavoro di insegnamento/apprendimento dovrebbe essere centrato sulle leggi classiche della chimica, iniziando dal ruolo che il concetto di gas ha avuto nel promuovere la nascita della chimica moderna e proseguendo con l’opera di Lavoisier, Proust, Dalton, Avogadro. Per l’alto grado di astrazione e di immaginazione che comporta il pensare la materia, le sue proprietà e le sue trasformazioni in termini molecolari, riteniamo che sia fondamentale procedere alla definizione ed alla costruzione del concetto di molecola (formula), in modo molto graduale e il più elementare possibile, per approssimazioni successive, seguendo quello che è stato lo sviluppo storico della chimica daltoniana [4].

Ci sembrano significative queste considerazioni di Paolo Mirone [5]:

Dai tempi di Dalton, cioè da due secoli, la chimica fa uso di due livelli di descrizione della materia: il livello macroscopico, o fenomenologico, delle proprietà e delle trasformazioni delle sostanze, e il livello microscopico (o più esattamente submicroscopico) degli atomi e delle molecole. I chimici si sono da tempo adattati a questa duplicità di livelli, sviluppando una forma mentis che consente loro di passare con naturalezza da un livello all’altro pur tenendoli ben distinti. Ma ciò non è affatto ovvio per gli studenti che si avvicinano per la prima volta alla chimica, specialmente se sono molto giovani...” *soprattutto quando* “l’insegnamento è fortemente sbilanciato a favore del livello microscopico come avviene molto spesso nelle scuole italiane ...”. *Si ravvede quindi* “la necessità che, nell’insegnamento della chimica, i due livelli, con le rispettive terminologie, siano tenuti ben distinti fin dal principio. Distinti ma non separati, perché i due livelli sono strettamente connessi: è proprio il comportamento degli atomi e delle strutture che essi formano (molecole, reticoli cristallini e altri tipi di aggregati) che ci permette di spiegare le proprietà e le trasformazioni che osserviamo su scala macroscopica. Ma i concetti e le teorie che fanno da ponte tra i due livelli sono spesso all’origine di ostacoli all’apprendimento, anche nei casi più semplici.

¹ https://www.mim.gov.it/documents/20182/10554370/curricolo_web.pdf/f91c31a0-5ed4-65f3-bfe-a-fb49adaba55f?version=1.0&t=1773224873548

Per il secondo biennio e il quinto anno dei licei, la DD-SCI propone un'interpretazione dei fenomeni chimici che si avvalga dei quadri teorici della chimica del Novecento e attuale, per interpretare il mondo degli atomi e delle molecole, sempre con la necessaria gradualità didattica.

A seguito della consultazione che il MIM ha effettuato nel 2024 con le società scientifiche per la revisione delle Indicazioni Nazionali dei Licei, la DD-SCI ha elaborato delle proposte per il primo biennio, secondo biennio e quinto anno per i vari licei;² di seguito è riportata la nostra proposta che riguarda la parte delle conoscenze relative al Liceo Scientifico.

La proposta della Divisione Didattica della SCI per il Liceo scientifico (13 ore)

Primo biennio

- Stati di aggregazione e trasformazioni fisiche/chimiche
- Miscugli e soluzioni
- Definizioni operative di sostanze semplici e composte
- Leggi ponderali
- Modello atomico di Dalton
- Formula chimica e significati

Secondo biennio

- Struttura dell'atomo e livelli energetici
- Sistema periodico e proprietà periodiche
- Legami chimici e forze intermolecolari
- Nomenclatura chimica
- Energia nelle reazioni, equilibrio, cinetica
- Fondamenti di chimica organica

Quinto anno

- Composti organici di interesse biologico
- Chimica e sostenibilità: salute, ambiente e risorse naturali

5. Conclusioni

Pur non potendo sempre ricostruire integralmente la storia del pensiero che ha portato alle teorie chimiche, come spesso succede negli ultimi tre anni del liceo scientifico dove gli intrecci con la fisica e la tecnologia sono complessi, il principio di comprensibilità deve restare come guida dell'insegnamento: insegnare chimica significa far comprendere i legami tra una logica che può sembrare teorica e astratta, senza agganci con la realtà fenomenica e dei processi di pensiero. Le teorie fanno uso di un linguaggio formale lontano da quello naturale; inoltre, proprio la loro importanza, e talvolta anche la loro bellezza, è nella capacità di "comprimere" le informazioni in un quadro coerente. Ma questo è quanto di più lontano possa esserci dal modo di pensare degli alunni. L'obiettivo non è trasmettere un sapere dogmatico, ma promuovere la riflessione sulle origini e sul significato delle conoscenze. Tenere insieme "logico" e "psicologico", forma e processo del pensiero, è la sfida più alta della didattica scientifica.

Il contributo della Divisione Didattica della Società Chimica Italiana alle Indicazioni Nazionali si colloca in questa prospettiva: una didattica che ricostruisca i percorsi del sapere scientifico, restituendo alla conoscenza il suo valore di comprensione, riflessione e formazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. B. Arons, *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna, 2003, p. 367.
- [2] J. Dewey, *Come pensiamo*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2019, pp. 77-78.
- [3] J. Dewey J., *Ibid.*, p. 82.
- [4] C. Fiorentini, E. Aquilini, D. Colombi, *Leggere il mondo oltre le apparenze*, Armando, Roma, 2007, pp. 42-45.
- [5] P. Mirone, Perché la chimica è difficile, *CnS*, 1999, 3, 67-70.

² <https://www.societachimica.it/it/divisioni/didattica/relazioni-con-ministero-istruzione>

Il valore formativo della teoria atomica secondo Cannizzaro

Antonio Testoni

Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana

e-mail: antonio.testoni55@gmail.com

Abstract. This paper examines the educational and formative value of nineteenth-century atomic theory, with particular reference to the thought of Stanislaw Cannizzaro. Through the historical-conceptual journey from Dalton to Avogadro and Cannizzaro's subsequent clarification, it is argued that a historical-critical approach represents a privileged tool for developing scientific thinking in students. Atomic theory emerges not as an absolute truth, but as an interpretive framework capable of giving meaning to experimental data.

Keywords: Cannizzaro; teoria atomica; storia della chimica; Avogadro; pesi atomici; Dalton

1. Introduzione

Il mio sguardo su Stanislaw Cannizzaro non è quello accademico dello storico, né quello speculativo del filosofo; è, molto più semplicemente, lo sguardo di un docente di scuola che ha cercato di misurarsi, giorno dopo giorno, con le sfide concrete dell'insegnamento. È da questa prospettiva, inevitabilmente parziale ma "profondamente vissuta", che nasce l'esigenza di motivare la scelta di dedicare tempo ed energie allo studio di una chimica di due secoli fa, ormai apparentemente superata, invece di orientare l'insegnamento verso contenuti più aggiornati e più vicini alla sensibilità e alle urgenze del presente. In particolare, la mia relazione è centrata sul contributo decisivo di Cannizzaro all'atomismo chimico ottocentesco e sul suo rilevante valore didattico e formativo. Come è noto, i concetti di atomo e di molecola hanno oggi un significato molto più complesso e articolato rispetto a quello che andò delineandosi, non senza difficoltà, nel corso dell'Ottocento. Penso innanzitutto all'idea di atomo formulata da Dalton all'inizio del secolo scorso, in un momento in cui i modelli fisici erano ancora del tutto inadeguati a rappresentare la realtà atomico-molecolare. Fu proprio quell'atomismo a fornire il "quadro teorico di base" da cui prese avvio l'intero sviluppo successivo della chimica moderna, quella degli atomi, delle molecole, delle formule. Infatti, la chimica è la scienza che per prima ha dato un "fondamento scientifico" all'antica idea di atomo, trasformandola da speculazione filosofica a vera teoria scientifica. Senza questa svolta concettuale, la chimica moderna non avrebbe potuto prendere forma.

È chiaro che siamo in presenza di una conoscenza ancora "imperfetta", di grande rilievo non solo dal punto di vista storico-epistemologico, ma anche, mi preme sottolinearlo, dal punto di vista didattico, per le stesse ragioni che Cannizzaro mise in luce con straordinaria lucidità [1]:

Rimontiamo all'epoca di Dalton, leggiamo nella storia della chimica di Thompson la confessione che questo chimico fa dell'effetto prodotto su di lui dall'esposizione che Dalton gli fece della sua teoria: «Io rimasi incantato della nuova luce che immediatamente colpì il mio spirito, e vidi d'un sol colpo d'occhio l'immensa importanza di tale teoria» [...] Essa è il riassunto più succinto, più preciso, più evidente e più accessibile ai differenti tipi di spirito che si incontrano in una scuola, di tutto ciò che concerne l'origine, il significato, il valore e l'uso delle formule grezze e delle equazioni.

A distanza di un secolo e mezzo, questo pensiero conserva intatta la sua freschezza e la sua *attualità*. "L'origine, il significato, il valore e l'uso delle formule grezze e delle equazioni" sono ancora oggi obiettivi didattici irrinunciabili in un corso di chimica di base. E quale altra "teoria scientifica" può

dirsi “più succinta, più precisa, più evidente e più accessibile ...” di quella daltoniana per introdurre in modo significativo e quantitativo l’infinitamente piccolo in chimica? In essa ritroviamo non solo i fondamenti della chimica e del pensiero chimico, ma anche una struttura “concettuale” alla portata di studenti che muovono i primi passi nella disciplina e capace di guidarli verso una prima *visione scientifica*, seppur parziale, dei fenomeni.

Ciò che davvero conta a livello scolastico - tanto più nella fascia dell’obbligo - è proporre teorie che siano “comprensibili e adeguate” alle conoscenze ed allo sviluppo cognitivo dei ragazzi, teorie che siano realmente in grado di incrementare la capacità di interpretare i fenomeni, senza che queste, peraltro, vengano presentate come verità assolute e immutabili, ma come strumenti provvisori e perfezionabili, utili a costruire gradualmente una mentalità scientifica.

Cannizzaro, in base a quanto si è visto, riconosce nel modello daltoniano un impianto concettuale semplice e formativo, in grado di fornire i primi strumenti teorici per interpretare i fenomeni. Ma il valore formativo/didattico della teoria atomica, per Cannizzaro, va anche oltre questo; essa rappresenta il quadro teorico entro cui i dati sperimentali diventano intelligibili [1]:

La teoria atomica non aspettò per nascere che tutte le leggi empiriche sulle proporzioni fossero conosciute in modo indipendente ed enunciate con precisione; al contrario fu essa che ne fece indovinare e scoprire la maggior parte, fu essa che fece apprezzare il valore del poco che prima si conosceva su questo soggetto, fu essa infine che prestò il linguaggio per esprimere tutte queste leggi.

Senza quel “quadro teorico” - osserva Cannizzaro - i dati disponibili rimanevano frammentari e poco intelligibili; solo alla luce della teoria atomica essi acquisivano un significato, un valore e un linguaggio con cui essere espressi.

Questa idea trova una sorprendente consonanza nella riflessione di Kuhn, allorché, riferendosi proprio alla teoria atomica daltoniana, sottolinea che [2]:

All’inizio del XIX secolo, i chimici non sapevano come effettuare analisi quantitative che ponesero in evidenza le proporzioni multiple. Nel 1850 avevano imparato, ma solo facendosi guidare dalla teoria di Dalton. Conoscendo quale risultato si dovessero attendere dalle analisi chimiche, i chimici furono in grado di escogitare tecniche che permettessero di ottenerli. Di conseguenza i manuali di chimica possono ora affermare che le analisi quantitative confermano l’atomismo di Dalton e dimenticano che, storicamente, le tecniche analitiche importanti sono basate sulla stessa teoria che, si dice, esse confermino. Prima che la teoria di Dalton fosse enunciata le misure non davano gli stessi risultati... I numeri raccolti senza una qualche conoscenza delle regolarità da attendersi non sono quasi mai significativi di per sé. Quasi certamente essi restano solo dei numeri.

Letti insieme, Cannizzaro e Kuhn mettono in luce un aspetto essenziale dell’attività scientifica: non è la misura a “precedere” la teoria, ma è la teoria a conferire “significato” alla misura. È il quadro concettuale - per Kuhn i paradigmi scientifici, per Cannizzaro la teoria atomica - che orienta le domande, che seleziona ciò che conta, che organizza le pratiche sperimentali e, in definitiva, che stabilisce “cosa” misurare e “come” interpretare ciò che si misura.

E tutto questo deve emergere con grande chiarezza anche nella trasposizione didattica, se vogliamo veramente valorizzare la dimensione culturale della chimica: quella che permette di coglierne il senso profondo oltre gli aspetti strettamente specialistici.

Cannizzaro indica chiaramente la via per condurre gli studenti a questa profondità di pensiero, che è l’obiettivo primario di ogni insegnamento. Scrive infatti [3]:

Per condurre i miei allievi al medesimo convincimento che io ho, li ho voluti porre sulla medesima strada per la quale io ci sono giunto, cioè l’esame storico delle teorie chimiche. Incominciai dunque nella prima lezione a dimostrare come dall’esame delle proprietà dei corpi aeriformi e dalla legge di Gay Lussac, sui rapporti di volume tra i componenti ed i composti, scaturì quasi spontanea l’ipotesi sopra ricordata che fu per la prima volta annunciata da Avogadro e poco dopo da Ampere.

Tuttavia, il riferimento agli allievi non è soltanto la descrizione di una pratica didattica. Nella retorica del testo esso svolge una funzione più sottile; gli studenti fungono da interlocutori formali, come osserva Cerruti,¹ attraverso cui l'autore si rivolge in realtà ai lettori adulti, specie quando l'argomentazione tocca temi teoricamente scottanti.

Tale punto è ripreso e ribadito più volte negli scritti di Cannizzaro, come, ad esempio, in questo contributo [1]:

Essendo cotali ricordi storici non l'oggetto principale di questa memoria, ma bensì un mezzo e direi quasi un utile artificio a meglio chiarire l'argomento di essa, son certamente dispensato dagli obblighi di uno storico, di proporzionare cioè lo svolgimento delle varie parti e di seguire un rigoroso ordine cronologico. Sceglierò perciò tra i fatti di maggior rilievo quelli che più direttamente giovano allo scopo che mi sono proposto e li esporrò con quella estensione e con quell'ordine che giudicherò più utile al fine postomi... di offrire ai giovani chimici avviati alla carriera dell'insegnamento occasione e materia che li inviti a meditare su questa parte fondamentale della nostra scienza... nell'interpretare e prevedere le trasformazioni delle sostanze.

In queste brevi, ma dense citazioni si coglie con chiarezza l'essenza e, al tempo stesso, l'attualità del pensiero di Cannizzaro in merito all'insegnamento della chimica. Egli concepisce la riflessione storica non come fine a sé stessa, ma come strumento per chiarire e illuminare i "fondamenti teorici" della disciplina, in particolare quella "parte fondamentale della nostra scienza" che, ancora oggi, resta concettualmente essenziale, soprattutto in contesti di primo approccio alla chimica come disciplina autonoma.

Va, però, ricordato che la teoria atomica daltoniana non ebbe vita facile e lasciò un'eredità complessa: basti pensare alle difficoltà legate alla determinazione delle formule e dei pesi atomici.

Ed è proprio da questa "complessità" che emerge, in chiave didattica, tutta la forza del contributo di Cannizzaro. Il modo in cui egli affronta tali questioni diventa infatti un esempio concreto di come una teoria possa orientare non solo la ricerca, ma anche la costruzione di una mentalità scientifica capace di leggere i fenomeni attraverso "modelli, ipotesi e argomentazioni" coerenti.

In questa prospettiva presentiamo un estratto di una sequenza didattica pensata per il primo biennio della scuola secondaria di secondo grado, centrata sull'atomismo ottocentesco.

2. Sequenza didattica

Si tratta di un percorso che, a grandi linee, prende avvio dalla teoria atomica di Dalton, attraversa l'ipotesi di Avogadro e approda al chiarimento concettuale di Cannizzaro.

Nello specifico, ci soffermeremo sul passaggio cruciale che collega l'intuizione di Avogadro alla chiarificazione concettuale di Cannizzaro, utilizzando come filo conduttore la "progressiva definizione della formula molecolare dell'acqua".

Il cuore del ragionamento di Cannizzaro risiede nella riabilitazione dell'ipotesi di Amedeo Avogadro del 1811 [4]:

Gay-Lussac ha mostrato in una Memoria interessante che le combinazioni dei gas fra loro si fanno sempre secondo rapporti molto semplici in volume, e che quando il risultato della combinazione è gassoso, il suo volume è pure in rapporto molto semplice con quello dei suoi componenti; ma i rapporti delle quantità di sostanze nelle combinazioni pare non possano che dipendere dal numero relativo delle molecole che si combinano e da quello delle molecole composte che ne risultano. Bisogna dunque ammettere che vi siano anche dei rapporti molto semplici fra i volumi delle sostanze gassose e il numero delle molecole semplici o composte che le formano. La prima ipotesi, che ci si presenta a questo riguardo e che sembrerebbe essere la sola ammissibile, è di supporre che in qualunque gas il numero delle molecole integranti è sempre lo stesso a volume uguale, o è sempre proporzionale ai volumi.

¹ Nella retorica di questo testo, «gli allievi» di Cannizzaro hanno una funzione importante. Essi sono chiamati in causa quando l'argomentazione affronta temi scottanti e l'Autore vuole rivolgersi ai lettori adulti attraverso i suoi interlocutori formali, i giovani che seguivano le sue lezioni a Genova. Il richiamo al metodo storico-critico, prezioso dal punto di vista didattico, va inteso anche nel senso letterale, di una «strada» per la comprensione.

Avogadro fa ricorso a una molteplice aggettivazione (*molecole integranti, molecole semplici, molecole composte, molecole elementari, molecole parziali, molecole costituenti ...*), che riflette il clima di profonda incertezza teorica e concettuale dell'epoca: una complessità che in un contesto didattico di base non è opportuno affrontare. Risulta, invece, più efficace semplificare il lessico dell'epoca, rendendolo più comprensibile e attuale, sull'esempio proprio di Cannizzaro che, in apertura del "Sunto", riformula l'ipotesi di Avogadro distinguendo con chiarezza - questa è la mossa concettualmente decisiva - tra molecole e atomi [3]:

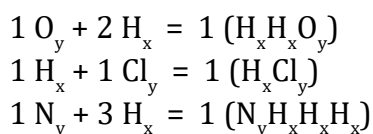
Io credo che i progressi della scienza, fatti in questi ultimi anni, abbiano confermato l'ipotesi di Avogadro, di Ampere e di Dumas sulla simile costituzione dei corpi allo stato aeriforme, cioè che volumi uguali di essi, sieno semplici, sieno composti, contengono l'egual numero di molecole; non però l'egual numero di atomi, potendo le molecole dei vari corpi o quelle dello stesso corpo nei vari suoi stati, contenere un vario numero di atomi, sia della medesima natura, sia di natura diversa.

Chiarita questa distinzione, possiamo seguire il ragionamento originale di Avogadro il quale, partendo dall'ipotesi enunciata, ne trae una conseguenza di grande portata pratica: i pesi relativi delle molecole sono direttamente proporzionali alle densità dei gas [4]:

Partendo da questa ipotesi, si ha il mezzo di determinare assai facilmente le masse relative delle molecole dei corpi che si possono avere allo stato gassoso e il numero relativo di queste molecole nelle combinazioni; i rapporti delle masse delle molecole sono allora gli stessi di quelli delle densità dei diversi gas, a pressione e a temperature uguali, e il numero relativo delle molecole in una combinazione è dato immediatamente dal rapporto dei volumi dei gas che la formano... Così la massa della molecola dell'ossigeno sarà circa 15 volte quella della molecola di idrogeno, o, più esattamente, essa starà a questa come 15,074 sta a 1... D'altra parte, essendo noto che il rapporto dei volumi dell'idrogeno e dell'ossigeno nella formazione dell'acqua è di 2 a 1, ne segue che l'acqua risulta dall'unione di 1 molecola di ossigeno con 2 molecole d'idrogeno.

Vale la pena soffermarsi su questo risultato. Avogadro non sta ancora scrivendo formule chimiche nel senso moderno: sta ragionando su rapporti volumetrici osservabili sperimentalmente e da essi risale alla composizione molecolare.

Il passaggio al simbolismo attuale è però immediato. Se indichiamo con H_x e O_y le molecole (di natura ancora ignota ad Avogadro) rispettivamente dell'idrogeno e dell'ossigeno, le stesse combinazioni si possono riscrivere così:

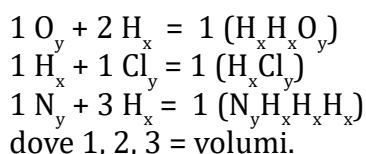


dove O, H, ... = atomi; $O_y, H_x, H_x H_x O_y, \dots$ = molecole; 1, 2, 3 = numero molecole

I pedici x e y non sono ancora determinati: Avogadro sa quante molecole reagiscono tra loro, ma non sa ancora quanti atomi compongono ciascuna molecola. È precisamente questo il limite che Cannizzaro, cinquant'anni dopo, contribuirà a superare, fissando i pesi atomici e trasformando queste formule provvisorie nelle equazioni bilanciate della chimica moderna.

Fin qui il ragionamento procede con elegante linearità. Avogadro si trova, però, ad affrontare un'obiezione che, a prima vista, sembra minacciare l'intera costruzione [4]:

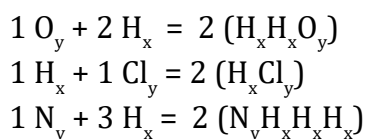
Una riflessione pare opporsi, a prima vista, all'ammissione della nostra ipotesi sui corpi composti [...] Se in una combinazione, a 1 molecola di un corpo si aggiungono 2 o più molecole di un altro corpo, il numero delle molecole composte dovrebbe restare uguale al numero delle molecole del primo corpo. Quindi, nella nostra ipotesi, allorquando un gas si combina con due o più volte il suo volume con un altro gas, il composto che ne risulta, se è gassoso, non potrà che avere un volume uguale al primo di questi gas.



Ma i volumi misurati risultano essere il doppio di quelli attesi [4]:

Nei fatti, però, in generale ciò non avviene. Per esempio, il volume dell'acqua supposta gassosa è, come ha fatto vedere Gay-Lussac, doppio di quello del gas ossigeno che vi entra o, il che è poi la stessa cosa, uguale a quello dell'idrogeno, invece di essere uguale a quello dell'ossigeno.

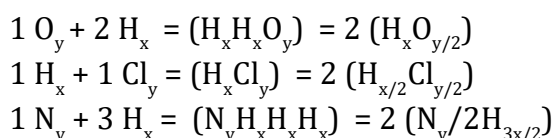
In termini simbolici, le reazioni non rispettano il numero di molecole come ci si aspetterebbe, ma lo raddoppiano:



Come spiegare questo raddoppio senza abbandonare l'ipotesi? Avogadro propone una soluzione audace: le molecole dei gas semplici non sono indivisibili, ma sono già esse stesse aggregati di molecole elementari. Nel momento in cui si forma il composto, quella molecola si scinde, raddoppiando il numero delle particelle risultanti [4]:

Tuttavia esiste un mezzo assai naturale per spiegare i fatti di questo genere in conformità alla nostra ipotesi: ed è di supporre che le molecole costituenti d'un qualsiasi gas semplice... non siano formate da una sola molecola elementare, ma risultino da un certo numero di queste molecole riunite in una sola per mezzo dell'attrazione $[x, y \neq 1]$. Quando le molecole di un'altra sostanza devono essere aggiunte alla prima per formare delle molecole composte, la molecola integrante che ne dovrebbe risultare si divide in due o più parti di modo che il numero delle molecole integranti del composto diventi il doppio, quadruplo, ecc. di ciò che dovrebbe essere senza questa divisione e tale che basti a soddisfare il volume del gas che ne risulta.

Traducendo anche questo passaggio in termini simbolici attuali:



L'ipotesi è ardita - ammettere che una molecola elementare si spezzi era tutt'altro che ovvio per la chimica del 1811 - ma trova una conferma quantitativa immediata nel calcolo delle masse. Avogadro lo mostra con l'esempio dell'acqua [4]:

Quanto alla molecola dell'acqua, essa dovrebbe avere una massa pari a $15 + 2 = 17$ circa, prendendo come unità quella dell'idrogeno, se non vi fosse divisione in due della molecola; ma a causa di questa divisione essa si riduce della metà $8\frac{1}{2}$ o più esattamente 8,357, come si ricava dividendo la densità del vapore 0,625, secondo Gay Lussac, per la densità dell'idrogeno 0,0732.

È questa convergenza tra ipotesi teorica e dato sperimentale a dare alla proposta di Avogadro la sua forza e, al tempo stesso, la sua fragilità - perché x e y restano ancora indeterminati e la natura profonda di quelle molecole elementari rimane, per ora, una questione aperta.

Sarà Cannizzaro che, più che proporre nuovi dati, ebbe l'intuizione geniale di fornire la chiave di lettura per interpretare quelli già esistenti. Il punto di partenza è lo stesso di Avogadro - le densità dei gas come misura delle masse molecolari - ma Cannizzaro lo enuncia con una precisione terminologica nuova e sceglie con cura l'unità di misura [3]:

Stando alla ipotesi sopra citata, i pesi delle molecole sono proporzionali alle densità dei corpi nello stato aeriforme... Essendo l'idrogeno il gas più leggero, potrebbe prendersi come unità a cui

riferire le densità degli altri corpi aeriformi, le quali in tal caso esprimono i pesi delle molecole, comparati al peso della molecola dell'idrogeno fatto = 1. Siccome io preferisco prendere per unità comune ai pesi delle molecole e delle loro frazioni il peso non di una intera ma di mezza molecola d'idrogeno, così riferisco le densità dei vari corpi aeriformi a quella dell'idrogeno fatta = 2.

Stabilita l'unità, il passo successivo è sistematico: per ciascun corpo, semplice o composto, si determina il peso relativo della molecola a partire dalla densità e, poi, lo si scompone nelle quote spettanti a ciascun elemento attraverso l'analisi chimica [3] (Figura 1):

Se il corpo è indecomponibile siamo costretti ad ammettere che la sua molecola è tutta fatta dal peso di una medesima quantità di materia. Se il corpo è composto, se ne fa l'analisi elementare, ossia si scoprono i rapporti costanti fra i pesi dei componenti; quindi si divide il peso della molecola in parti proporzionali ai numeri esprimenti i pesi relativi dei componenti e così si hanno le quantità di loro contenute nella molecola del composto, riferite alla medesima unità alla quale sono riferiti i pesi di tutte le molecole. Con questo metodo fo il quadro seguente.

NOME DEL CORPO	PESO	PESI			
	di un volume, ossia peso della molecola riferito al peso della mezza molecola di idrogeno = 1.	componenti un volume, ossia pesi componenti la molecola, tutti riferiti al peso della mezza molecola d'idrogeno = 1			
Idrogeno	2	2	d'idrogeno.		
Ossigeno ordinario	32	32	d'ossigeno.		
Ossigeno elettrizzato	128	128	d'ossigeno.		
Solfo sotto 1000°	192	192	di solfo.		
Solfo sopra 1000° (?)	64	64	di solfo.		
Fosforo	124	124	di fosforo.		
Cloro	71	71	di cloro.		
Bromo	160	160	di bromo.		
Jodo	254	254	d'iodo.		
Azoto	28	28	d'azoto.		
Arsenico	300	300	d'arsenico.		
Mercurio	200	200	di mercurio.		
Acido cloridrico	36,5	35,5	di cloro	1	d'idrogeno
Acido bromidrico	81	80	bromo	1	»
Acido iodidrico	128	127	d'iodio	2	»
Acqua	18	16	d'ossigeno	2	»
Ammoniaca	17	14	d'azoto	3	»
Idrogeno arsenicato	78	75	d'arsenico	3	»
Idrogeno fosforato	35	32	di fosforo	3	»
Calomelano	235,5	35,5	di cloro	200	di mercurio
Sublimato	271	71	»	200	»
Cloruro d'arsenico	181,5	106,5	»	75	d'arsenico
Protocloruro di fosforo	138,5	106,5	»	32	di fosforo
Percloruro di ferro	325	213	»	112	di ferro
Protossido d'azoto	44	16	d'ossigeno	28	d'azoto
Biossido d'azoto	50	16	»	14	» ⁽⁴⁾
Ossido di carbonio	28	16	»	12	di carbonio
Acido carbonico	44	32	»	12	»
Eterene	28	4	d'idrogeno	24	»
Propilene	42	6	»	36	»
Acido acetico idrato	60	4	»	32	d'ossig. 24 di carb.
Acido acetico anidro	102	6	»	48	» 48 »
Alcool	46	6	»	16	» 24 »
Etere	74	10	»	»	24 » ⁽⁵⁾

Figura 1. Peso relativo di alcune molecole e pesi spettanti ai loro componenti [3]

Il quadro così costruito non è un semplice elenco di dati: è uno strumento didattico. Cannizzaro lo sa, e descrive esplicitamente come usarlo per condurre lo studente a scoprire da solo la legge che vi è nascosta [3]:

Una volta che si è reso familiare ai giovani il valore dei numeri come sono disposti nel quadro precedente, è facile condurli a scoprire la legge che risulta dalla loro comparazione. Comparete, dico loro, le varie quantità dello stesso elemento, contenute sia nella molecola del corpo libero, sia in quelle di tutti i diversi suoi composti, e non vi potrà sfuggire la seguente legge: le varie quantità dello stesso elemento contenute in diverse molecole sono tutte multiple intere di una medesima quantità, la quale, entrando sempre intera, deve a ragione chiamarsi atomo.

Il passo teorico di Cannizzaro trova nella tabella (Figura 2) una verifica concreta: qui, infatti, le diverse quantità di idrogeno presenti nelle molecole sono espresse numericamente e risultano tutte multipli interi di una stessa unità: *L'atomo d'idrogeno è contenuto due volte nella molecola di idrogeno libero.*

Una molecola	di idrogeno libero	contiene	2	di idrogeno	= 2 × 1
»	di acido cloridrico	»	1	»	= 1 × 1
»	di acido bromidrico	»	1	»	= 1 × 1
»	di acido iodidrico	»	1	»	= 1 × 1
»	di acido cianidrico	»	1	»	= 1 × 1
»	di acqua	»	2	»	= 2 × 1
»	di idrogeno solforato	»	2	»	= 2 × 1
»	di acido formico	»	2	»	= 2 × 1
»	di ammoniaca	»	3	»	= 3 × 1
»	di gas idrogeno fosforato	»	3	»	= 3 × 1
»	di acido acetico	»	4	»	= 4 × 1
»	di eterene	»	4	»	= 4 × 1
»	di alcool	»	6	»	= 6 × 1
»	di etere	»	10	»	= 10 × 1

Dunque tutti i vari pesi d'idrogeno contenuti nelle diverse molecole son tutti multipli interi di quello contenuto nella molecola di acido cloridrico; ciò giustifica averlo preso per unità comune dei pesi degli atomi e delle molecole. L'atomo d'idrogeno è contenuto due volte nella molecola di idrogeno libero.

Figura 2. Diverse quantità di idrogeno contenute in varie molecole [3]

Questa conclusione risolve uno dei più grandi enigmi della chimica dell'Ottocento. Attraverso la tabella, Cannizzaro dimostra che se l'unità minima (atomo) è 1, allora la molecola di gas idrogeno (che nella prima riga di figura 2 pesa 2) deve essere necessariamente *biatomica*.

L'atomo non è dunque un postulato: è una conclusione che emerge dalla comparazione sistematica dei dati. E la verifica è immediata, perché la legge vale per ogni elemento senza eccezioni. Cannizzaro la illustra con il cloro e con l'ossigeno (Figura 3), mostrando come in entrambi i casi le quantità presenti nelle varie molecole siano sempre multipli interi di una stessa unità [3]:

Collo stesso modo si dimostra che le varie quantità di cloro esistenti in diverse molecole son tutte multiple intere di quella contenuta nella molecola di acido cloridrico cioè di 35,5, e che le quantità di ossigeno esistenti nelle varie molecole son tutte multiple intere di quella contenuta nella molecola dell'acqua, cioè di 16, la qual quantità è metà di quella contenuta nella molecola di ossigeno libero.

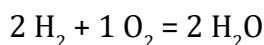
Una molecola di	ossigeno libero	contiene	32	di ossigeno	= 2×16
»	ozono	»	128	»	= 8×16
»	acqua	»	16	»	= 1×16
»	etere	»	16	»	= 1×16
»	acido acetico	»	32	»	= 2×16
»	ec. ec. ec.	»		»	
[330]					
Una molecola di	cloro libero	»	71	di cloro	= $2 \times 35,5$
»	acido cloridrico	»	35,5	»	= $1 \times 35,5$
»	sublimato corrosivo	»	71	»	= $2 \times 35,5$
»	cloruro d'arsenico	»	106,5	»	= $3 \times 35,5$
»	cloruro di stagno	»	142	»	= $4 \times 35,5$
»	ec. ec. ec.	»			

Figura 3. Le quantità di cloro e ossigeno nelle varie molecole sono sempre multipli interi della stessa unità [3]

Una volta fissati i pesi atomici, il simbolismo diventa naturale. Ogni atomo riceve un simbolo, e le formule scrivono da sole la composizione delle molecole [3]:

Dopo ciò mi riesce facilissimo spiegare come, esprimendo con simboli i vari pesi atomici dei vari elementi, si possa esprimere con formule la composizione sia delle loro molecole, sia di quelle dei loro composti.

A questo punto si può scrivere, finalmente senza ambiguità:



Una tale impostazione operativa - chiara, rigorosa e metodologicamente limpida - costituisce uno strumento prezioso anche per la didattica di base, dove la costruzione dei concetti richiede tempi di stesi, passaggi solidamente argomentati e un approccio che accompagni gradualmente la formazione delle idee.

Riferimenti bibliografici

- [1] (a) S. Cannizzaro, *Scritti intorno alla teoria molecolare ed atomica ed alla notazione chimica*, Tipografia "Lo Statuto", Palermo, 1896 (copia anastatica); (b) S. Cannizzaro, *La teoria atomica e molecolare* (a cura di A. Di Meo), Teknos Edizioni, Roma, 1994.
- [2] T. S. Khun, *La tensione essenziale*, Einaudi, Torino, 1985.
- [3] S. Cannizzaro, *Sunto di un corso di filosofia chimica* (a cura di L. Cerruti), Sellerio Editore, Palermo, 1991.
- [4] (a) A. Avogadro, *Saggi e memorie sulla teoria atomica*, Giunti, Firenze, 1995; (b) M. Ciardi, *L'atomo fantasma*, Olschki, Firenze, 1995.

Dalla bakelite al solfodiene di Primo Levi: tra chimica, letteratura e vita

Vincenzo Villani

Dipartimento di Scienze di Base e Applicate dell'Università della Basilicata

e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract. In 1907, Leo Baekeland obtained bakelite (phenol-formaldehyde resin), the first synthetic polymer, destined to replace shellac (a natural biopolymer) in the components of the nascent electrical industry. The synthesis took place in a specially designed reactor, the bakelizer, where controlled temperature and reduced pressure allow the removal of condensation water: by exploiting Le Châtelier's principle, the reaction equilibrium is shifted toward polymer formation, making the process irreversible and kinetically controlled. The preparation of phenol-formaldehyde resin represented a milestone in chemistry and chemical engineering, laying the foundations for the subsequent development of synthetic polymers. From this perspective, it constitutes a classic example of polymerization logic, valuable both from a historical and didactic standpoint. A significant echo of this discovery can be found in Primo Levi's *The Periodic Table*, in the story Sulfur.

Starting in 1936, Italy adopted an autarkic economy in response to the sanctions imposed by the League of Nations. In that context, polysulfide rubber, with its modest properties, was produced. Levi recounts the misadventure of a worker named Lanza, dealing with a bakelizer to obtain the prepolymer for the elastomer. With his extraordinary ability to merge science and literature, Levi transforms chemistry into poetic prose and a metaphor for the values of life.

Keywords: bakelite; resina fenolo-formaldeide; gommalacca; gomma polisolforata; Primo Levi

1. Prima della bakelite: la gommalacca

La gommalacca è il biopolimero prodotto dalla *Kerria lacca*, una cocciniglia parassita degli alberi delle foreste indo-tailandesi [1]. L'insetto utilizza questa secrezione per aderire alla corteccia e costruire un nido rigido e impermeabile all'acqua. Si tratta di un polimero termoplastico dalla composizione complessa e non completamente caratterizzata, a base di poliesteri, acidi grassi e sesquiterpeni (questi ultimi costituiti da tre unità isopreniche, lineari o cicliche). La gommalacca può essere modellata per estrusione in manufatti dalle forme più varie. Grazie alle sue proprietà dielettriche, fu largamente impiegata per le prime componenti elettrotecniche. Tuttavia, con il tumultuoso sviluppo dell'industria elettrica agli inizi del Novecento, il suo fabbisogno divenne insufficiente, stimolando la ricerca di un materiale alternativo come la bakelite. Oggi è ancora ampiamente utilizzata come vernice per il legno e nel restauro, sotto forma di soluzioni in acetone o etanolo (Figura 1).

Primo Levi, in *Lilit* e altri racconti (1981) [2], descrive la gommalacca in questo modo:

La gommalacca è una resina nobile; è trasparente, resiste agli urti e alla luce solare, ha odore gradevole, è lucida, e presenta inoltre un'altra virtù curiosa e unica, certo utile al suo inventore-insetto: se esposta all'umidità, la sua permeabilità all'acqua diminuisce invece di aumentare come fa quella di quasi tutti gli altri materiali organici; si comporta insomma, in scala molecolare, come un ombrello che si apra spontaneamente all'inizio di un acquazzone.



Figura 1. La gommialacca fissata su un ramo dalla cocciniglia *Kerria lacca* (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kerria-lacca.jpg>).

Questo comportamento idrorepellente è dovuto al carattere anfifilico delle catene di poliestere in presenza di acqua, analogo a quello di un tensioattivo: si forma un'emulsione acqua-in-olio in cui l'acqua resta intrappolata in gocce, mentre la parte idrofoba delle catene rimane all'esterno, creando un'interfaccia con la matrice terpenica apolare. Il risultato è una superficie idrofoba, che riduce l'affinità con l'acqua, caratteristica sfruttata proprio nell'impiego della gommialacca come vernice per il legno.

Levi descrive anche l'originale metodo di lavorazione tradizionale in India:

Per lo più erano giovanissime stenditrici: dall'alba al tramonto esse si accovacciavano a terra, afferravano il blocco in cinque punti, con le mani, i denti e le dita dei piedi, e si raddrizzavano rapide allargando le braccia; il blocco così veniva disteso in un foglio di contorno pentagonale, alto come la stenditrice, trasparente e fragile come il vetro.

La gommialacca è una miscela polimerica amorfa con una temperatura di transizione vetrosa (T_g) di circa 35°C. Accovacciandosi sul blocco, le stenditrici lo riscaldano al di sopra della T_g , rendendolo malleabile e permettendo di stenderlo in un sottile foglio. Questo foglio, ridotto in scaglie, si scioglie facilmente in soluzioni alcoliche, o in solventi che hanno affinità sia per la componente polare che per quella apolare, come etanolo, acetone o cloroformio. Il più comune e innocuo tra questi è l'etanolo. Levi sottolinea sia la straordinaria abilità delle stenditrici che la loro umile condizione di lavoro.

2. Il primo polimero di sintesi: la bakelite

Nel 1907 Leo Baekeland (1863–1944) preparò il primo polimero di sintesi, la bakelite, a partire dai suoi monomeri [3]. Trasferitosi dal Belgio negli Stati Uniti, investì nella ricerca di un materiale che potesse sostituire la gommialacca, la lacca indiana, allora utilizzata nella nascente industria elettrica. La bakelite non solo sostituì la gommialacca, ma si rivelò un eccellente materiale rigido e dielettrico, ideale nelle applicazioni elettrotecniche come telefoni, radio e interruttori; inoltre, era facile da modellare e colorare, trovando impiego in oggetti di uso comune, quali penne stilografiche, bottoni e manici di pentole (Figura 2).



Figura 2. Antichi bottoni in resina fenolo-formaldeide (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bakelite_Buttons_2007.068_%2866948%29.jpg)

Per condurre con successo la reazione di policondensazione tra fenolo e formaldeide, Baekeland ideò uno specifico reattore d'acciaio dalla forma ovoidale, dotato di tutte le componenti necessarie come l'agitazione meccanica, il controllo della temperatura e della pressione, valvole di sicurezza e boccaporti, detto *bakelizer* (Figura 3).

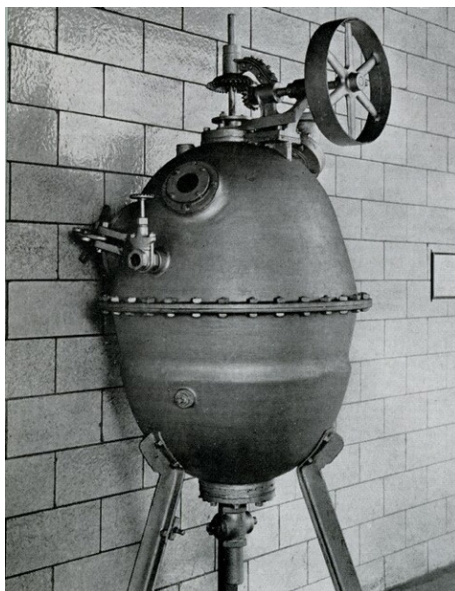


Figura 3. Il *bakelizer* per la produzione industriale della bakelite (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite>)

A differenza della gommalacca, che è un termoplastico in cui le macromolecole lineari solidificano in una morfologia amorfa e reversibile nel trattamento termico, la resina fenolo-formaldeide è un termoindurente: le sue catene formano una rete macromolecolare covalente, amorfa e irreversibile. Questa resina fenolica reticolata si ottiene appunto dalla polimerizzazione per condensazione di fenolo e formaldeide (Figura 4).

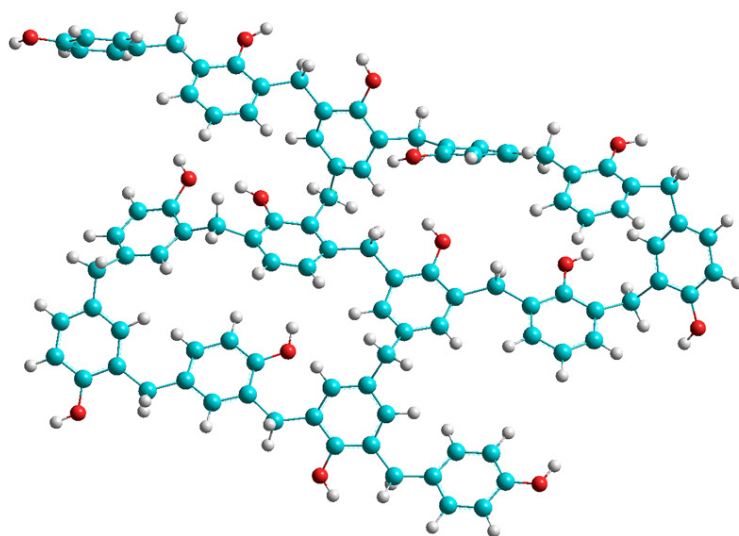


Figura 4. Una possibile struttura molecolare della bakelite, resina fenolo-formaldeide (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite>)

La reazione di policondensazione può essere schematizzata in due stadi.

Nel primo stadio, il gruppo *metilolico* $-\text{CH}_2\text{OH}$ entra in posizione *orto* o *para* sull'anello fenolico mediante una sostituzione elettrofila aromatica, mentre il secondo stadio, esotermico, porta alla formazione dei ponti *metilenici* $-\text{CH}_2-$.

Il fenolo è, quindi, un monomero trifunzionale (con posizioni reattive in *orto* e *para*), al contrario della formaldeide che, invece, è bifunzionale; di conseguenza, il polimero risultante può essere un termoindurente reticolato; infatti, per ottenere la reticolazione è necessario che almeno uno dei monomeri sia trifunzionale (Figura 5).

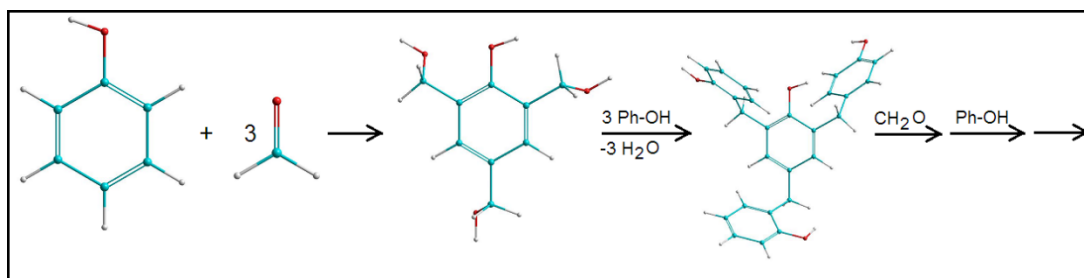


Figura 5. La reazione di policondensazione di fenolo e formaldeide in resina fenolo-formaldeide

L'andamento della polimerizzazione è regolato dal rapporto molare tra fenolo e formaldeide. Dal punto di vista tecnologico, si prepara inizialmente un polimero a basso peso molecolare e bassa viscosità, detto *prepolimero*, che viene successivamente reticolato direttamente nello stampo. I prepolimeri si dividono in due categorie: novolacche e resoli.

2.1 Novolacche

Le novolacche si ottengono utilizzando un rapporto molare fenolo/formaldeide > 1 (eccesso di fenolo), in ambiente acquoso a pH acido e a 100°C . La miscela di reazione viene portata a secco e la novolacca è recuperata. A causa dell'eccesso di fenolo, non vi sono gruppi metilolici liberi; pertanto, le novolacche non reticolano per semplice riscaldamento: il prepolimero solido viene macinato

e mescolato con un agente reticolante (*curing agent*), che forma i legami covalenti (*cross-link*) tra le posizioni attive *orto* e *para* degli anelli aromatici (Figura 6).

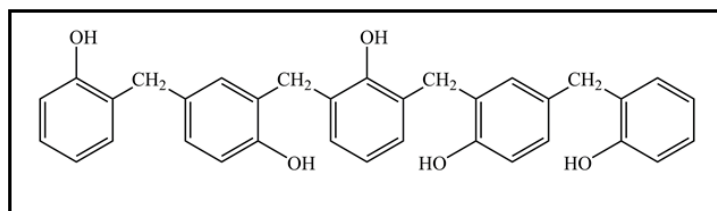


Figura 6. Una possibile formula di struttura molecolare della novolacca, prepolimero della resina fenolo-formaldeide ottenuto in eccesso di fenolo

2.2 Resoli

I resoli, invece, si ottengono con un rapporto molare fenolo/formaldeide < 1 (eccesso di formaldeide). In questo caso si forma un prepolimero a basso peso molecolare con molti gruppi reattivi metilolici per catena. La soluzione acquosa contenente il resolo viene concentrata ed è pronta all'uso. Viene impiegata come impregnante per tessuti o carta (dando origine ai *pre-preg*), utilizzati per preparare compositi laminati multistrato, costituiti da molti strati sovrapposti con vari orientamenti. Il successivo trattamento termico favorisce l'avanzamento della reticolazione attraverso i gruppi metilolici liberi sugli anelli fenolici. Il resolo può anche essere sciolto in solvente (generalmente alcol etilico) per ottenere vernici (Figura 7).

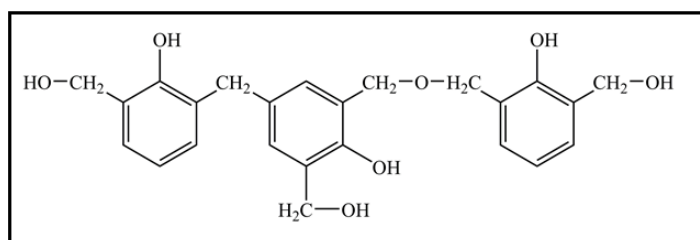


Figura 7. Una possibile formula di struttura molecolare del resolo, prepolimero della resina fenolo-formaldeide ottenuto in eccesso di formaldeide

3. La polimerizzazione nel bakelizer

A livello industriale, il *bakelizer* opera a temperatura controllata (70 °C) e pressione ridotta (0,1 atm). In queste condizioni viene eliminata l'acqua di condensazione, spostando l'equilibrio reagenti-prodotto verso la formazione del polimero, in accordo con il principio di Le Châtelier.

La sintesi della resina fenolo-formaldeide avviene secondo la seguente reazione d'equilibrio:



per la quale, in base alla legge d'azione di massa, si ottiene:

$$K = \frac{[\text{Polimero}] \times [\text{Acqua}]}{[\text{Fenolo}] \times [\text{Formaldeide}]}$$

Quindi, eliminando l'acqua, poiché il rapporto d'equilibrio è costante, le concentrazioni al denominatore debbono diminuire e l'equilibrio risulta spostato verso l'aumento di concentrazione del polimero, come atteso.

In generale, la formazione di un polimero ad alto peso molecolare è un processo entropicamente sfavorito, poiché si passa da un elevato numero di monomeri indipendenti a poche macromolecole indipendenti, in cui i monomeri sono legati. Affinché la reazione sia possibile, è necessario realizzare condizioni sperimentali in cui l'energia libera di Gibbs ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) risulti negativa.

Nel caso specifico, la reazione di policondensazione è esotermica ($\Delta H < 0$) e il controllo dell'apparecchiatura permette di condurre un blando riscaldamento prolungato a pressione ridotta. Inoltre, la rimozione dell'acqua di condensazione comporta un aumento dell'entropia del processo ($\Delta S > 0$), poiché l'acqua passa dalla fase liquida a quella di vapore (entropia di vaporizzazione) e questo contribuisce a rendere negativo il ΔG complessivo, favorendo termodinamicamente la formazione del polimero ad alto peso molecolare. Quindi, grazie all'uso del *bakelizer*, che rimuove l'acqua di condensazione operando alla temperatura più bassa possibile (comunque, sufficiente a garantire l'attivazione cinetica a una velocità di reazione accettabile), la reazione diventa termodinamicamente favorita ($\Delta G < 0$). Infatti, alla variazione di energia libera del sistema reagenti-prodotti va aggiunto il contributo dell'energia libera di vaporizzazione dell'acqua e la sua rimozione dal sistema. La vaporizzazione dell'acqua comporta una variazione entalpica (ΔH) trascurabile, poiché non coinvolge la rottura di legami chimici e l'energia necessaria è fornita dal riscaldamento, e da una variazione entropica (ΔS) positiva, dato che l'acqua passa dallo stato liquido a quello gassoso, con un conseguente aumento del disordine molecolare. In questo modo, il ΔG totale della reazione con eliminazione dell'acqua (a pressione ridotta nel *bakelizer*) diventa negativo, consentendo alla polimerizzazione di procedere efficientemente dai monomeri fino ad alti pesi molecolari (Box 1).

Reazione 1: polimerizzazione
Fenolo + Formaldeide $\rightarrow$ Polimero + Acqua (liquida)
 $\Delta G_1 > 0$

Reazione 2: rimozione dell'acqua
Acqua (liquida) $\rightarrow$ Acqua (vapore)
 $\Delta G_2 < 0$

Reazione totale
Fenolo + Formaldeide $\rightarrow$ Polimero + Acqua (vapore)
 $\Delta G_{\text{totale}} = \Delta G_1 + \Delta G_2 = \Delta G_1 (> 0) + \Delta G_2 (< 0) < 0$

Box 1. Schema della termodinamica complessiva della policondensazione fenolo-formaldeide: tenendo conto della vaporizzazione dell'acqua rimossa dal reattore a pressione ridotta, la polimerizzazione diventa termodinamicamente favorita

Dunque, nelle condizioni di reazione del *bakelizer*, la polimerizzazione diventa un processo irreversibile e cineticamente controllato.

Per quanto riguarda la cinetica della polimerizzazione si può assumere che essa avvenga nei due seguenti step:



Considerando che la concentrazione dell'acqua tende a zero, essendo rimossa a pressione ridotta, e indicando $[Fenolo] = Ph$, $[Formaldeide] = F$, $[Oligomeri] = Oli$, $[Polimero] = Pol$, si possono scrivere le equazioni cinetiche per la policondensazione fenolo-formaldeide sotto riportate:

$$\begin{aligned}\frac{dPh}{dt} &= -k_1 Ph \times F \\ \frac{dF}{dt} &= -k_1 Ph \times F - k_2 F \times Oli \\ \frac{dOli}{dt} &= k_1 Ph \times F - k_2 F \times Oli \\ \frac{dPol}{dt} &= k_2 F \times Oli\end{aligned}$$

Il sistema di equazioni accoppiate è non-lineare e non ammette una soluzione analitica, però, assumendo costante la concentrazione della formaldeide (che è in largo eccesso) al suo valore iniziale pari a F_0 , il sistema si linearizza e ammette una soluzione analitica:

$$\begin{aligned}\frac{dPh}{dt} &= -k_1 Ph \times F_0 \\ \frac{dOli}{dt} &= k_1 Ph \times F_0 - k_2 F_0 \times Oli \\ \frac{dPol}{dt} &= k_2 Ph \times F_0 \times Oli\end{aligned}$$

Per $k_1 \neq k_2$, si ottiene:

$$Ph(t) = Ph_0 \exp(-k_1 F_0 \times t)$$

Il modello semplificato è didatticamente utile e mostra in modo chiaro gli andamenti delle concentrazioni di reagenti e prodotti durante la reazione.

Assumendo $k_1 = 0,15 \text{ M}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $k_2 = 0,08 \text{ M}^{-1} \text{ h}^{-1}$, e $Ph_0 = 1 \text{ M}$, si ottengono gli andamenti delle concentrazioni durante la polimerizzazione riportati in figura 8.

La concentrazione del fenolo decresce in modo esponenziale a partire dalla concentrazione iniziale Ph_0 , infatti, la velocità di consumo è proporzionale ai reagenti; la concentrazione degli oligomeri, inizialmente zero, aumenta con il consumo del fenolo, raggiunge un massimo, poi decade a seguito della conversione in polimero; la posizione e l'ampiezza del picco dipendono dal rapporto k_2/k_1 . La concentrazione del polimero cresce in modo sigmoidale: all'inizio la crescita è lenta (fase di accumulo degli oligomeri), poi accelera e, infine, rallenta avvicinandosi asintoticamente alla concentrazione finale.

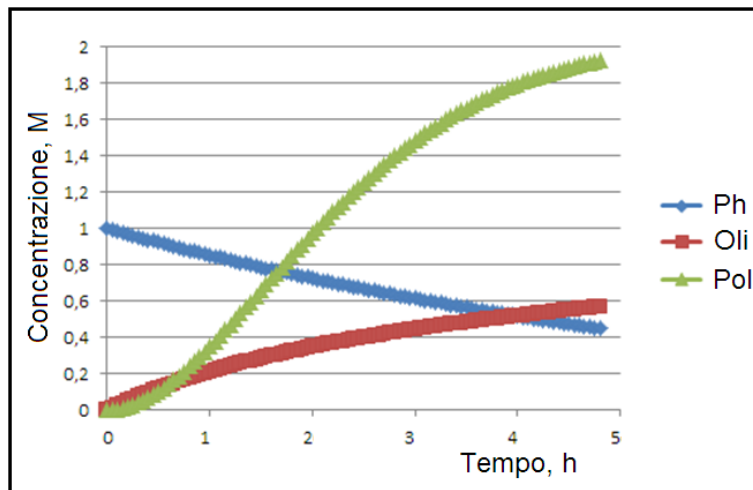


Figura 8. Andamento nel tempo delle concentrazioni dei reagenti (fenolo e oligomeri) e del polimero prodotto secondo la cinetica assumendo costante la concentrazione della formaldeide al suo valore iniziale pari a F_0

La formaldeide viene consumata in entrambi gli stadi, ma essendo in largo eccesso rimane costante; la rimozione efficiente dell'acqua, sposta l'equilibrio verso i prodotti, impedisce l'idrolisi inversa dei legami estere o altri intermedi, permette di modellare la cinetica come irreversibile, ottimizzando il processo. Baekeland usava tipicamente rapporti stechiometrici bilanciati o un eccesso di formaldeide, cosa che garantiva una polimerizzazione efficiente.

4. Il sistema periodico di Primo Levi: il racconto Zolfo

Come è noto, Primo Levi (1919 - 1987) in *Il sistema periodico* (1975) [4] scrive ventuno capitoli ognuno dedicato a un elemento chimico. Naturalmente, si tratta di capitoli dal forte significato simbolico in cui le caratteristiche chimiche degli elementi vengono messi a confronto con i valori umani, in un gioco di specchi tra chimica e vita [5]. Levi era un chimico macromolecolare, grande conoscitore della sintesi e delle proprietà dei materiali polimerici, in particolare delle vernici. Quindi, nei suoi scritti molti sono i riferimenti al mondo delle macromolecole.

Sulle pagine di CnS mi sono già occupato di chimica delle macromolecole e letteratura in Primo Levi, analizzando alcuni brani di *La chiave a stella* (1978) [6, 7]. Anche in *Il sistema periodico* parecchi capitoli si occupano di problematiche polimeriche, come in *Cromo*, dove con grande maestria letteraria si racconta dell'indesiderata gelificazione delle vernici, in *Vanadio*, dove si parla con disappunto dell'incapacità della vernice a formare la pellicola solida e resistente, e poi le storie della preparazione dell'olio di lino cotto, della solubilizzazione delle resine fossili, della preparazione delle vernici alchidiche e, infine, della gomma polisolforata nel capitolo *Zolfo*.

4.1 La gomma polisolforata

Il racconto *Zolfo* è ambientato nel secondo dopoguerra, in un paese disastroso dagli eventi bellici e a dircelo è lo stesso Lanza, l'operaio protagonista della storia:

È una gran buffonata dover continuare a chiamarlo B41 quando tutta la fabbrica sa che è zolfo, e in tempo di guerra, quando tutto mancava, parecchi se lo portavano a casa e lo vendevano in borsa nera ai contadini che lo spargevano sulle viti.

Quindi, la guerra è finita da poco e perdurano ancora le lavorazioni del periodo autarchico (1936 - 1943). Levi racconta la sintesi di un polimero solforato, attraverso un intermedio di reazione a cui dà il nome di *solfodiene*, si tratta di una sintesi a due stadi a 100 °C e 200 °C, in un reattore (tipo *bakelizer*) a pressione ridotta, utilizzando nel secondo stadio lo zolfo: questo processo è quello della gomma polisolforata prodotta come sostituto della gomma naturale, usando materie prime disponibili come lo zolfo di Sicilia, cloruro di etilene e carbonato di sodio.

La gomma polisolforata corrisponde alla *Thiokol* americana, il primo elastomero sintetico a base di polisolfuri scoperto nel 1926 [8]. Probabilmente, in analogia con la *gomma butadiene*, Levi nel racconto introduce il neologismo *solfodiene*, come espediente letterario, o come un'ipotesi personale di un intermedio di reazione dienico; Levi, infatti, amava mescolare nei romanzi scienza e immaginazione in modo originale (Figura 9).

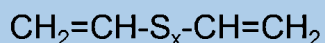


Figura 9. Il divinilpolisolfuro, l'ipotetico intermedio di reazione della polimerizzazione della gomma polisolforata, a cui fa riferimento Levi con il neologismo *solfodiene*

Gli operai del racconto simboleggiano il paese sconvolto, uomini stanchi ma risoluti, forti, coraggiosi e intelligenti proprio di chi conosce la realtà concreta delle piccole cose del mondo rurale, colto sul

punto, ahimè, di essere spazzato via dal progresso. Ma proprio questo mondo di operai e borghesia laboriosa è il fulcro della rinascita, i protagonisti della ricostruzione sono i lavoratori, come Lanza e i dirigenti, come Levi che con grande intelligenza e coraggio riavviarono il progresso del paese.

Dunque, Lanza è preposto alla preparazione di un polimero solforato mediante un reattore che somiglia al *bakelizer* di Baekeland; infatti, lo scopo è analogo, svolgere la polimerizzazione in condizioni termodinamiche favorevoli e irreversibili, controllando la temperatura e la pressione ridotta.

Quello di Lanza è il turno di notte:

Lanza agganciò la bicicletta al telaio, bollò la cartolina, andò alla caldaia, mise in marcia l'agitatore e diede il fuoco. Era ancora pieno di sonno, e del freddo dei risvegli improvvisi; rimase accovacciato di fronte al focolare, la cui vampa rossa, in un succedersi di rapidi bagliori, faceva ballare la sua ombra enorme e stravolta sulla parete di dietro, come in un cinematografo primitivo.

In un'atmosfera, oserei dire, rustica, l'operaio avvia la lavorazione con lo stesso spirito con il quale accudisce le mucche nella stalla, con amorevole responsabilità, consapevole che quel lavoro è la fonte di sostentamento della sua famiglia:

Dopo una mezz'ora il termometro cominciò a muoversi, come doveva: la lancetta d'acciaio andò a fermarsi sui 95 °C. Lanza sorvegliava il termometro: con un solfodiene non si sa mai, ma per il momento tutto andava regolarmente.

L'Italia nel 1935 aveva invaso l'Etiopia, unico regno indipendente nel mezzo del vasto Impero britannico, ed era stata pesantemente sanzionata dalla Società delle Nazioni (diventata ONU), sull'importazione delle materie prime. Allora il Regime aveva avviato la tanto decantata economia autarchica di autonomia nazionale e la gomma naturale d'importazione fu sostituita da ingegnosi prodotti di mediocre qualità, come la gomma polisolforata, ottenuta a partire da reagenti nostrani, ma dalla scarsa resistenza meccanica, dall'elevata permeabilità ai gas e dalla ridotta resistenza all'abrasione (Figura 10).

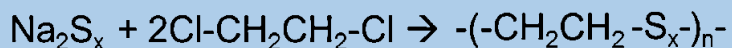


Figura 10. Il primo stadio a 100 °C della policondensazione del polisolfuro di zolfo con il dicloroetilene per dare il polisolfuro di etilene

Il lavoro di Lanza continua:

Arrivati a 180 °C bisogna sbullonare il boccaporto e buttare dentro lo zolfo: spense il fuoco, rallentò l'agitatore, sbullonò il boccaporto, mise la maschera di protezione. Lo zolfo era già pesato, in tre scatole di cartone: lo introdusse cautamente.

Completato il primo stadio della reazione con la preparazione del polisolfuro di etilene, a temperatura più alta viene aggiunto lo zolfo per introdurre in catena i gruppi tioli e disolfuri necessari per la reticolazione finale. Tutto va come al solito e la polimerizzazione procede a pressione ridotta (Figura 11):

Quando ebbe finito, affrancò di nuovo il boccaporto e rimise tutto in moto. Alle tre di notte, il termometro era a 200 °C: bisognava dare il vuoto. Alzò la manetta nera, e lo strepito alto ed aspro della pompa centrifuga si sovrappose al tuono profondo del bruciatore. L'ago del vuotometro, che stava verticale sullo zero, cominciò a declinare strisciando verso sinistra.

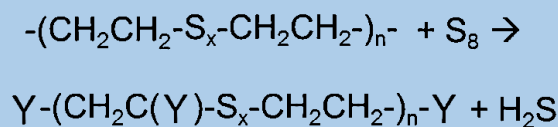


Figura 11. Il secondo stadio a 200 °C della polimerizzazione: il polisolfuro di etilene reagisce con zolfo per dare il prepolimero, contenente ai terminali e in catena i gruppi reattivi $\text{Y} = -\text{SH}/-\text{SSH}$, necessario per ottenere in stampo la gomma polisolforata reticolata

A un tratto, però, si verifica il temutissimo incidente:

Il fracasso della pompa si era fatto di colpo più lento e più impastato, come sforzato: e infatti, l'ago del vuotometro risaliva sullo zero, ed ecco, grado dopo grado, cominciava a pendere sulla destra. Poco da fare, la caldaia stava andando in pressione. Lanza andava farneticando di scoperchiare il boccaporto per lasciare sfogare la pressione; cominciò ad allentare i bulloni, ed ecco schizzare friggendo dalla fenditura una bava giallastra con soffi di fumo impestato: la caldaia doveva essere piena di schiuma. Richiuse precipitosamente.

La reazione è fuori controllo (*runaway*) senza una causa apparente: la temperatura e la pressione salgono rapidamente e la catastrofe è imminente. Il *runaway* che si è innescato è un ciclo autocatalitico termico basato sulla reazione di Claus [9]: l'acqua funziona da iniziatore e la temperatura aumenta in modo esponenziale provocando l'innalzamento della pressione e la degradazione dei reattivi nel *bakelizer* (Figura 12).

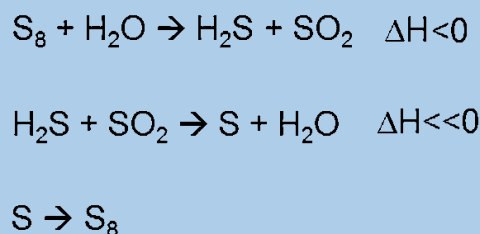


Figura 12. Il ciclo del *runaway* della reazione: l'idrolisi dello zolfo reattivo è una reazione esotermica che genera idrogeno solforato e anidride solforata; la reazione di Claus tra idrogeno solforato e anidride solforata è fortemente esotermica e genera zolfo elementare e acqua; lo zolfo elementare ad alta temperatura si converte immediatamente in zolfo reattivo e il ciclo riprende

Nella mente di Lanza erano ancora vive le bombe della guerra, le esplosioni devastanti e quel reattore dalla forma a uovo sembrava proprio una bomba sul punto di esplodere. Tuttavia, dopo il panico iniziale riprende il controllo di sé: l'Uomo meglio delle macchine può riprendere il controllo delle variabili impazzite:

Aprì la valvola della ventola d'aspirazione, mise questa in moto, chiuse il rompivuoto e fermò la pompa. Con sollievo e con fierezza, vide l'ago risalire fino a zero. Lanza spense il fuoco, fermò l'agitazione e la ventola, ed aprì il rompivuoto: si sentì un lungo fischio rabbioso. In mezzo a fumi bianchi e all'aspro odore consueto, il getto denso della resina andò a placarsi nella bacinella di raccolta in un nero specchio lucente.

La reazione era andata fuori controllo “senza una causa apparente”, ma c’è sempre una causa dietro un effetto, dietro ciò che accade, una causa semplice, o un groviglio di concause che mettono in moto “l’effetto valanga”. Talvolta, la causa di tutto risulta banale, ma bisogna scoprirla e soprattutto, saperla evitare.

Levi nei suoi racconti ricorre spesso al sogno premonitore, in cui allentate le remore razionali, l’immaginazione fa capolino. In questo caso, il sogno è un espediente letterario e come in *La chiave a stella* suggerisce che a inquinare la vernice erano state le fibrille degli stracci logori usati in laboratorio per le pulizie (maniacali), qui rivela che è stata l’acqua infiltrata dai tetti logori a inquinare i reattivi e lo zolfo umido è il responsabile del disastro sfiorato:

Lanza gustava il soave riposo, e si abbandonava alla danza di pensieri e d’immagini che prelude al sonno, pur evitando di lasciarsene sopraffare. Faceva caldo, e Lanza vedeva il suo paese: la moglie, il figlio, il suo campo, l’osteria. Il fiato caldo dell’osteria, il fiato pesante della stalla. Nella stalla filtrava acqua ad ogni temporale, acqua che veniva dal di sopra, dal fienile: forse da una crepa del muro...

Nel sogno Lanza confonde la cascina, l’osteria e la fabbrica, con gli stessi problemi, dove l’acqua si infila dalle crepe, sono le crepe lasciate dalla guerra nelle cose e negli animi umani che ancora faticano a rimarginarsi, ma con la forza di volontà, con il lavoro si rimargineranno:

Lanza si avviò al cancello, ed incontrò Carmine che stava entrando. Gli disse che tutto andava bene, gli lasciò le consegne e si mise a gonfiare le gomme della bicicletta.

È un messaggio ottimistico quello che Levi ci trasmette, e alla fine questa storia, per tanti versi drammatica, ci fa sorridere, con Lanza che al mattino tranquillo gonfia gli pneumatici sgonfi della bici, fatti di mediocre gomma nazionale.

Riferimenti bibliografici

- [1] V. Villani, *Lezioni di Scienza dei Materiali Polimerici*, Aracne Editrice, Roma, 2020.
- [2] P. Levi, *Lilit e altri racconti*, Einaudi, Torino, 1981.
- [3] V. Villani, *Lezioni di Chimica e Tecnologia dei Polimeri*, Aracne Editrice, Roma, 2021.
- [4] P. Levi, *Il sistema periodico*, Einaudi, Torino, 1975.
- [5] A. Di Meo, *Primo Levi e la scienza come metafora*, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, 2010.
- [6] P. Levi, *La chiave a stella*, Einaudi, Torino, 1987.
- [7] V. Villani, La Chimica delle macromolecole e la complessità nei racconti di Primo Levi: La chiave a stella, *CnS*, 2025, **2**, 47–56.
- [8] J. C. Patrick, Composition of matter and process of producing it, *U.S. Patent* 2,206,642, Jul. 2, 1940.
- [9] W. D. Monnery, W. Y. Svrcek, Simulation of the Claus reaction furnace, *Chemical Engineering Science*, 1990, **45**(8), 2251–2258.

Dall'età della pietra a Excalibur: storytelling scientifico e percorso verticale sui metalli per la scuola primaria e secondaria di primo grado

Giovanni Merola^{1,2}

¹*Istituto Tecnico Industriale Statale "Stanislao Cannizzaro" di Colleferro (RM);*

²*TLC - Teaching and Learning Center dell'Università di Roma "Tor Vergata"*

e-mail: 7171.merola@uniroma2.onmicrosoft.com

Abstract. This paper discusses how a conference contribution on storytelling in chemistry education can be transformed into a vertical didactic pathway for primary school and lower secondary school. The proposed narrative thread is the long history of metals, from the Stone Age to bronze, iron, Excalibur, Volta's pile, modern batteries and recycling. The article argues that scientific storytelling should not be seen as a simple decorative narrative, but as a cognitive tool able to connect observation, manipulation, imagination and conceptual understanding. The chapter on the Stone Age and the "Prova del Fabbro" introduces the recognition of materials through simple properties such as hardness, malleability and response to heat. The Bronze Age develops the idea of alloy, while ironworking and the Excalibur episode allow students to reason on process, treatment and mechanical properties. The pathway is modular, interdisciplinary and adaptable to laboratories, escape rooms and game-based learning activities. Its educational value lies in making chemistry accessible, meaningful and motivating for younger learners.

Keywords: storytelling scientifico; didattica della chimica; scuola primaria; scuola secondaria di primo grado; metalli

1. Introduzione

Negli ultimi anni lo storytelling ha trovato spazio crescente nella didattica delle scienze non solo come tecnica comunicativa, ma come dispositivo capace di dare coerenza all'esperienza di apprendimento. Una storia ben costruita permette di collegare osservazioni, problemi, oggetti, personaggi e concetti, offrendo agli alunni una cornice di senso entro cui collocare ciò che vedono e fanno.

Nel presente contributo la storia dei metalli è stata assunta come filo narrativo per attraversare materiali, leghe, ferro, elettricità, batterie e sostenibilità. Il percorso è stato presentato come struttura aperta, flessibile e ancora in costruzione, trasformabile in lezioni, laboratori, attività digitali ed escape room. L'idea centrale è che la narrazione agisca come organizzatore semantico e ponte cognitivo tra esperienza concreta e concetto scientifico.

In questo articolo la proposta viene rielaborata in funzione di un uso più mirato nella scuola di base, con particolare attenzione alla scuola primaria e alla scuola secondaria di primo grado. L'obiettivo non è raccontare semplicemente la storia dei metalli, ma mostrare come essa possa diventare un curriculum verticale di educazione scientifica, nel quale la trama narrativa accompagna la progressiva costruzione di idee su materiali, trasformazioni, proprietà, energia e sostenibilità.

2. Storytelling scientifico e cornice teorica

È utile distinguere tra storytelling storico e storytelling scientifico. Il primo mira a ricostruire con accuratezza eventi, tecniche e contesti del passato; il secondo usa la forma narrativa per rendere comprensibili concetti, fenomeni e modelli. Nel percorso qui discusso non si fa storia della metallurgia in senso specialistico: si usa piuttosto un'immaginazione storica controllata per far emergere doman-

de chimiche e tecnologiche. In questa prospettiva la narrazione non sostituisce la spiegazione, ma la prepara. Prima viene il problema, poi l'osservazione, quindi il confronto e la costruzione del concetto. Tale impostazione è coerente con diversi contributi recenti sulla didattica della chimica, che hanno evidenziato come la narrazione possa funzionare da tecnologia cognitiva e da mediazione verso la modellizzazione scientifica. Nel caso della scuola primaria e della secondaria di primo grado, lo storytelling appare particolarmente efficace perché consente di partire da oggetti concreti e da immagini forti: pietre lucenti, fuoco, crogioli, forge, lame, pile, batterie, rifiuti elettronici. La chimica non si presenta, quindi, come elenco di definizioni, ma come racconto di trasformazioni della materia.

3. La trama narrativa: dalla pietra al bronzo, fino a Excalibur

La forza del percorso risiede nella trama. L'alunno viene posto nel ruolo di giovane apprendista che attraversa le grandi età dei metalli. Tutto comincia nell'Età della Pietra, mondo di rocce, ossa e legno, dove però compaiono materiali anomali: una pepita gialla, un frammento rosso-ramato, oggetti che non si scheggiano come la pietra, non bruciano come il legno e sotto l'azione del fuoco o del martello si comportano in modo inatteso. Qui si colloca il nostro percorso, davanti a diversi materiali, il protagonista deve riconoscere i veri metalli usando strumenti elementary, ma concettualmente molto ricchi, come fuoco, martello, leva e persino il "dente". In forma semplice e adatta ai più piccoli, entrano in gioco idee come durezza, malleabilità, duttilità e comportamento al calore.

Superata questa soglia, la narrazione entra nell'Età del Bronzo. Attorno al fuoco del villaggio l'uomo scopre che alcune pietre, scaldate con il carbone, liberano metallo. Il rame è il primo grande protagonista, ma il passaggio decisivo avviene quando, sperimentando, si comprende che unendo rame e stagno nasce un materiale nuovo, più resistente del rame e ancora lavorabile: il bronzo. La "lega segreta del fuoco" rende narrativamente memorabile un concetto importante, cioè che mescolare materiali può produrre proprietà nuove. L'uso di lingottini, cera colorata, simboli digitali o attività simulate consente di tradurre il racconto in esperienza didattica accessibile.

La tappa successiva è l'Età del Ferro. Il ferro non si lascia domare facilmente: è nascosto nelle rocce scure, richiede forni più caldi, aria soffiata dai mantici e tempi più lunghi. I primi risultati sono materiali duri ma fragili, vicini a ciò che oggi chiameremmo ghisa. Solo attraverso battitura, fucinazione e raffreddamenti controllati il ferro migliora e si avvicina all'acciaio. In termini didattici, il nodo concettuale è decisivo: la qualità di un materiale non dipende solo dalla sostanza di partenza, ma anche dal processo con cui viene ottenuto e trattato.

Su questa linea si innesta il capitolo medievale di Excalibur. La celebre spada non è presentata come oggetto magico, ma come simbolo di un perfetto controllo metallurgico. La prova finale confronta ferro troppo morbido, ghisa fragile e acciaio capace di unire durezza, elasticità e resistenza. Le lame stratificate, le lunghe ore di ribattitura, i raffreddamenti e persino i rituali di tempra richiamano il fatto che dietro il mito ci sono abilità tecniche e conoscenze empiriche sui materiali. Excalibur diventa così una potente figura narrativa per far capire che un buon materiale nasce da equilibrio, non dalla magia.

4. Trasformazione del percorso in curricolo verticale

La modularità del progetto consente una chiara trasformazione in curricolo verticale. Nella scuola primaria la priorità è costruire familiarità con i materiali attraverso osservazione, manipolazione e racconto. La narrazione può essere guidata da un personaggio mediatore - apprendista, fabbro, custode dei metalli - che accompagna la classe in episodi brevi e fortemente contestualizzati. Il lavoro didattico privilegia domande come: quale materiale si piega? quale si spezza? quale brilla? cosa succede vicino al fuoco? perché alcuni oggetti durano di più? In questa fascia d'età il racconto rende significativa l'esperienza e favorisce lessico, confronto e prime inferenze causa-effetto.

Nella scuola secondaria di primo grado, gli stessi episodi possono essere resi più espliciti sul piano scientifico. Il bronzo diventa occasione per introdurre l'idea di lega; il ferro per ragionare su trasfor-

mazione, trattamento e proprietà meccaniche; Excalibur per discutere il rapporto tra struttura, processo e prestazione. Anche il capitolo sull'elettricità si presta bene a una trasposizione accessibile: la pila di Volta mostra che i metalli non servono solo a costruire utensili e armi, ma anche a generare e accumulare energia.

La tabella seguente sintetizza alcuni adattamenti possibili.

Nucleo narrativo	Scuola primaria	Scuola Secondaria di I grado
Età della Pietra	Osservare e confrontare materiali; distinguere pietra, legno, osso, rame, oro; lessico descrittivo.	Proprietà macroscopiche dei materiali; prime classificazioni; relazione tra proprietà e uso.
Età del Bronzo	Il fuoco trasforma la materia; miscela che crea un "metallo nuovo"; attività manipolative e simulate.	Idea di lega metallica; composizione e proprietà; rapporto tra bisogni umani e innovazione tecnica.
Età del Ferro Excalibur (medioevo)	Racconto del fabbro e della spada che non si spezza; confronto intuitivo tra materiali più o meno forti.	Processo di lavorazione, fucinazione, durezza, fragilità, elasticità; acciaio come equilibrio di proprietà.
Età moderna e contemporanea Volta, batterie e riciclo	Oggetti che funzionano grazie ai metalli; importanza di non sprecare e di riciclare.	Pila di Volta, metalli ed energia; batterie moderne; riciclo dei metalli e sostenibilità.

5. Articolazione didattica per primaria e secondaria di primo grado

Per la scuola primaria si può immaginare un percorso in tre o quattro episodi. Il primo, "21 tesori della Terra", ruota attorno all'osservazione di campioni, immagini o oggetti quotidiani e all'uso di parole come duro, liscio, ruvido, lucente, pieghevole, pesante. Il secondo, "Il fuoco che cambia le cose", introduce l'idea che il calore non serve soltanto a scaldare, ma può modificare i materiali. Il terzo, "Il segreto del bronzo", mette in scena la nascita di un metallo nuovo e più forte, anche attraverso simulazioni con materiali non pericolosi. Un eventuale quarto episodio, "La spada che non si spezza", consente di chiudere il racconto con una figura simbolica molto forte, senza entrare in dettagli tecnici eccessivi ma facendo emergere l'idea che non tutti i metalli sono uguali.

In questa fascia d'età la dimensione narrativa è fondamentale anche per la gestione della classe. Il racconto organizza il tempo didattico, crea attesa, consente di formulare ipotesi e di raccogliere osservazioni. L'apprendimento passa attraverso la domanda: quale materiale sceglieresti per costruire un coltello, un bracciale, un chiodo, una moneta? Perché il rame è diverso dalla pietra? Perché il bronzo ha cambiato la vita delle comunità? La risposta non è mai affidata a una definizione iniziale, ma emerge dalla comparazione guidata.

Per la scuola secondaria di primo grado, invece, il percorso può articolarsi in moduli più riconoscibili sul piano disciplinare. Il primo modulo riguarda proprietà fisiche e meccaniche; il secondo la trasformazione della materia e il ruolo del fuoco; il terzo le leghe e la relazione tra composizione e prestazioni; il quarto il ferro, la fucinazione e le tecnologie storiche; il quinto la pila di Volta e il legame tra metalli ed energia; il sesto il riciclo dei metalli e l'economia circolare. In questo modo la narrazione resta il filo conduttore, ma ogni capitolo corrisponde a un preciso nucleo concettuale del curriculum di scienze e tecnologia.

6. Dal racconto all'attività: laboratorio, gioco, escape room

Uno dei punti più interessanti del contributo è la possibilità di convertire la storia in formati diversi. Ogni capitolo può diventare lezione dialogata, laboratorio semplificato, esperienza digitale, gioco a prove o mini escape room. La "Prova del Fabbro" è già, di fatto, una struttura ludica: scegliere materiali, osservare risposte, eliminare ipotesi, giustificare una decisione. Allo stesso modo, la "lega segreta del fuoco" permette di trasformare un concetto astratto come quello di lega in un problema da risolvere. L'Età del Ferro può essere considerata come sfida a trovare il giusto equilibrio tra calore, aria, martello e tempi di raffreddamento; Excalibur è il test finale su resistenza, elasticità e corrosione.

Per la scuola primaria e quella secondaria di primo grado non è necessario ricorrere sempre a tecnologie sofisticate. Molte attività possono essere realizzate con materiali poveri, immagini, schede, oggetti quotidiani, cera colorata, calamite, semplici circuiti o simulazioni digitali leggere. L'escape room, quando presente, non deve essere un mero contenitore spettacolare, ma una forma di organizzazione del sapere: ogni prova corrisponde a un nodo concettuale. Questa impostazione favorisce motivazione, collaborazione e verbalizzazione delle scelte. Inoltre apre a una forte interdisciplinarietà con storia, italiano, arte, tecnologia ed educazione civica.

7. Esempi operativi e progressione del lessico

Dal punto di vista operativo, il racconto funziona bene quando ogni episodio si chiude con un compito autentico. Alla fine della Prova del Fabbro, per esempio, gli alunni possono compilare una scheda di identificazione dei materiali o costruire una piccola "carta d'identità" dell'oro e del rame. Dopo l'Età del Bronzo, possono immaginare quali utensili o ornamenti una tribù sceglierebbe di produrre e motivarne la scelta in base alle proprietà del materiale. Nel capitolo del ferro, il compito può diventare una sfida progettuale: quale materiale useresti per un aratro, una punta, una lama, una catena? Nel finale dedicato a Excalibur, la domanda può essere: quali prove deve superare davvero una buona spada e quali proprietà richiede?

Anche il lessico scientifico può essere introdotto in modo progressivo. Nella primaria è sufficiente lavorare su parole-ponte come duro, tenero, piegabile, resistente, lucente. Nella secondaria di primo grado si possono aggiungere termini più specifici come malleabilità, duttilità, lega, fusione, fucinazione, corrosione, elettrolita. La progressione lessicale segue, dunque, la progressione narrativa e rende meno brusco il passaggio verso il linguaggio disciplinare.

È inoltre importante sottolineare che il valore del percorso non dipende da una ricostruzione storica perfetta in ogni dettaglio. La finalità è educativa: usare episodi, immagini e miti come mediatori per pensare scientificamente. Proprio per questo il progetto si presta a collaborazioni con docenti di italiano, arte, storia e tecnologia. La leggenda di Excalibur, ad esempio, può essere letta insieme a fonti letterarie o iconografiche, mentre la pila di Volta può diventare ponte verso la fisica e verso le tecnologie energetiche contemporanee.

8. Inclusione, valutazione e documentazione

Un ulteriore punto di forza del percorso riguarda inclusione e valutazione. Lo storytelling consente, infatti, di mantenere alta la comprensibilità anche quando i livelli della classe sono eterogenei. Le immagini, gli oggetti, le sequenze temporali, le prove pratiche e i ruoli narrativi permettono di ridurre la distanza tra chi possiede già strumenti linguistici robusti e chi ha invece bisogno di ancoraggiamenti più concreti. Per studenti con BES o DSA, la possibilità di lavorare su mappe, carte dei materiali, brevi dialoghi, icone e consegne scandite per passaggi può favorire partecipazione e successo.

Anche la valutazione dovrebbe essere coerente con questa impostazione. Oltre alle conoscenze, è utile osservare la capacità degli alunni di descrivere materiali, motivare scelte, usare un lessico sempre più preciso, confrontare processi e collegare gli oggetti quotidiani ai materiali da cui provengono. Prodotti finali efficaci possono essere un diario di bordo del viaggio dei metalli, una linea del tempo

illustrata, una mini mostra di oggetti, una scheda-prototipo per Excalibur, oppure una breve storia digitale sul ciclo di vita di una batteria.

Infine, il progetto possiede una forte valenza interdisciplinare e civica. Attraverso i metalli si possono mettere in dialogo preistoria e modernità, artigianato e scienza, mito e sostenibilità. La stessa continuità tra rame, bronzo, ferro, pila di Volta, batterie al litio e riciclo mostra agli studenti che la chimica non è un sapere isolato, ma una chiave per leggere la storia umana e le sfide del presente.

9. Dai metalli antichi alle batterie: sostenibilità e conclusioni

La parte finale del percorso, dedicata a Volta, alle batterie moderne e al riciclo, aggiorna la narrazione e la collega ai problemi del presente. I metalli non appartengono solo al passato delle civiltà antiche: sono il cuore di telefoni, automobili, sistemi di accumulo, pannelli solari, dispositivi elettronici. Per questo la conclusione naturale della storia non è il trionfo della tecnica, ma la domanda sulla sostenibilità. I metalli non si distruggono; cambiano forma, si disperdono, si recuperano, oppure si perdono nei rifiuti elettronici. Far comprendere agli studenti che il progresso non consiste soltanto nell'estrarre e costruire, ma anche nel riusare e riciclare, significa dare alla chimica una dimensione civica e ambientale.

Un possibile sviluppo finale del percorso consiste nell'affiancare alla pila di Volta un'attività laboratoriale con Arduino, nella quale gli studenti costruiscono una semplice pila didattica e ne monitorano il comportamento nel tempo. Attraverso sensori elementari e la lettura della tensione, la batteria non è più solo raccontata, ma anche osservata, misurata e interpretata. In una versione più avanzata, i dati possono essere visualizzati su display o inviati a distanza, introducendo in forma semplificata il concetto di controllo remoto e di *Battery Management System*. In questo modo la storia dei metalli si collega alle tecnologie contemporanee, mostrando continuità tra la pila di Volta, le batterie moderne e i sistemi intelligenti di gestione dell'energia. L'attività rende più concreta anche la riflessione sulla sostenibilità, perché aiuta a comprendere che ogni batteria ha materiali, prestazioni, limiti e un destino finale legato al recupero e al riciclo.

In conclusione, il percorso "Dall'età della pietra a Excalibur" mostra come lo storytelling possa diventare una vera infrastruttura didattica per la scuola di base. Il racconto non abbellisce semplicemente il contenuto, ma ne organizza la comprensione: prima la meraviglia per i materiali, poi il fuoco come agente di trasformazione, quindi le leghe, il ferro, l'acciaio, l'elettricità e, infine, il riciclo. In questo modo la chimica appare come storia di problemi, invenzioni e responsabilità. Per bambini e preadolescenti, una simile struttura può rappresentare una porta d'ingresso efficace verso una scienza più concreta, motivante e culturalmente ricca.

10. Prospettive di sviluppo

Il percorso presentato non va considerato un prodotto chiuso, ma un cantiere didattico aperto. Alcuni capitoli, in particolare quelli dedicati alle batterie moderne e al riciclo, possono essere ulteriormente sviluppati con attività digitali, simulazioni e collaborazioni interdisciplinari. Allo stesso modo, i capitoli antichi potrebbero essere rafforzati con il contributo di archeologia sperimentale, storia della tecnologia e storia dell'arte, così da rendere più saldo il rapporto tra immaginazione narrativa e rigore culturale.

Dal punto di vista della ricerca educativa, il percorso si presta anche a future sperimentazioni in classe. Sarebbe interessante osservare in che modo la struttura narrativa influenzi motivazione, partecipazione, qualità delle domande e tenuta dei concetti nel tempo. Un secondo ambito di indagine potrebbe riguardare il passaggio dalla narrazione al gioco: non ogni attività ludica produce automaticamente apprendimento, ma quando il gioco è costruito attorno a decisioni, prove e giustificazioni, esso può diventare un ambiente potente per l'argomentazione scientifica.

In questa prospettiva, la storia dei metalli offre un terreno particolarmente favorevole perché tiene insieme lunga durata storica, forte concretezza materiale, immaginario simbolico e rilevanza con-

temporanea. È proprio questa continuità, dalla pietra al litio, che rende il percorso adatto non solo a spiegare concetti di chimica, ma anche a formare sguardi più consapevoli sul rapporto tra tecnica, ambiente e società.

Bibliografia di riferimento

- R. Rollini, S. Tortorella, Chi ha paura della chimica?, *CnS*, 2024, 3(3), 25-35 (<https://chimicanellascuola.it/index.php/cns/article/view/192>).
- B. Bruschi, M. Repetto, M. Talarico, Game – based learning in didattica: progettare escape room con gli studenti universitari, in *Atti Convegno Nazionale DIDAMATICA*, 2022, pp. 228- 233 (<https://iris.unito.it/retrieve/8045b601-29db-41f8-b4a6-b37f8cad4d7f/ATTI%20Didamatica%202022-228-233.pdf>).
- M. Talarico, Storytelling e linguaggi visuali per le escape room, in *Tecnologie emergenti per orientare gli studenti in contesti internazionali di formazione universitaria*, Pensa multimedia, 2024, pp. 123-143 (<https://iris.unito.it/retrieve/3a24a9e8-4cf3-40c1-8aa6-50a56687d95b/talarico%20-%20121-141.pdf>).
- E. Aquilini, Apprendere la chimica attraverso l'approccio storico-epistemologico, XVI Scuola Nazionale di Ricerca Educativa e Didattica Chimica "Ulderico Segre", 2024 (https://www.societachimica.it/sites/default/files/users/sci_didattica/Aquilini%20Abano%2010-13%20nov.pdf).
- C. Petrucco, M. Mattioli, O. Loi, Una esperienza di digital storytelling sulla didattica della matematica, in *Didamatica* (Eds. A. Andronico, A. Labella, F. Patini), 2010, (https://www.academia.edu/45562676/Una_esperienza_di_Digital_Storytelling_sulla_didattica_della_matematica).
- M. L. Testa, M. Russo, C. Aliotta, A. Zanelli, A. Torreggiani, F. Deganello, Verso la sostenibilità e... oltre! Utilizzo del game-based learning per la promozione della chimica sostenibile nelle scuole secondarie, *CnS*, 2025, 2, 95-104 (<https://chimicanellascuola.it/index.php/cns/article/view/244>).

Interventi didattici volti a superare le concezioni alternative in chimica: una revisione sistematica della letteratura

Giulia Grotto¹, Marco Neviani² e Sergio Zappoli²

¹Laurea Magistrale in Didattica e Comunicazione delle Scienze Naturali dell'Università di Bologna; ²Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari" dell'Università di Bologna

e-mail: marco.neviani4@unibo.it

Abstract. Alternative conceptions are widespread, resistant to change, and hinder effective learning. The objective of this research project is to analyze, through a systematic review of the literature, the characteristics, theoretical framework, and effectiveness of instructional interventions aimed at overcoming alternative conceptions in chemistry among secondary school and university students. In November 2024, a systematic review was conducted across 24 databases on the ProQuest portal. The search returned a total of 1,618 articles, which were assessed to determine their compliance with the eligibility criteria. A total of 84 intervention studies were included in the systematic review. The analyzed studies are diverse in terms of duration, included populations, covered topics, theoretical backgrounds, teaching methodologies, and assessment methods. All the interventions demonstrated that the use of an active teaching methodology is more effective than traditional lectures in promoting conceptual change. The adoption of active teaching methods can enhance the learning of chemistry. Future studies could investigate which type of active learning is most effective for specific topics or student groups.

Keywords: concezioni alternative; cambiamento concettuale; apprendimento attivo; socio-costruttivismo

1. Introduzione

1.1 *Concezioni alternative e cambiamento concettuale nella ricerca educativa*

Le concezioni alternative in chimica sono oggetto di studio fin dagli anni Settanta del secolo scorso [1, 2] e ancora oggi sono uno dei temi più trattati nella ricerca educativa in chimica [3]. Il termine concezioni alternative indica le differenze qualitative tra i concetti di chi apprende e quelli utilizzati dalla comunità scientifica di riferimento [4], ma sono anche chiamate misconcezioni, concezioni naif, concezioni intuitive, framework alternativi, costrutti personali [5, 6]. Le concezioni alternative sono rappresentazioni della conoscenza che inducono risposte, soluzioni o spiegazioni che differiscono da quelle considerate scientificamente corrette [7, 8]: esse sono persistenti e tendono a resistere al cambiamento concettuale [9], spesso ostacolando la comprensione e lo sviluppo della conoscenza [10-12].

Le concezioni alternative si creano nell'interazione dell'individuo con l'ambiente fisico e culturale e nel caso specifico della chimica la maggior parte delle concezioni alternative proviene dall'istruzione scolastica [1, 13] (school-made misconceptions [6] o didaskalogenic misconceptions [3, 11]). Il noto triangolo proposto da Alex H. Johnstone [14] mostra come diversi livelli di realtà e pensiero entrino in gioco nella chimica (macroscopico, submicroscopico e simbolico): la comprensione delle relazioni tra questi livelli è una delle difficoltà di apprendimento della chimica [15]. In particolare, risulta difficile spiegare i fenomeni macroscopici attraverso il modello particellare [16, 17], generando numerose concezioni alternative [18, 19]. Inoltre, il laboratorio didattico è un ambiente di apprendimento ricco di potenziale, ma presenta rischi per lo sviluppo di concezioni alternative [14, 20]: gli studenti hanno difficoltà nel richiamare la conoscenza necessaria per osservare e descrivere i fenomeni e le

variabili in gioco durante le attività laboratoriali, che invece appaiono evidenti o scontate a chi è più esperto [21].

Diversi modelli sono stati sviluppati per descrivere le concezioni alternative e il cambiamento concettuale. Nel modello proposto da Posner [22], considerato il modello “classico” del cambiamento concettuale, le concezioni sono modellizzate come stabili e uniche, ma altri modelli si basano su postulati differenti. Ad esempio, diSessa ha proposto di interpretare le concezioni come il coordinamento estemporaneo di unità di significato più piccole (phenomenological primitives) [23]. Un altro esempio è il modello del profilo concettuale di Mortimer [24], che postula la coesistenza di diversi livelli di concettualizzazione, sia per chi apprende che per le persone esperte; la coesistenza di concezioni differenti è stata più recentemente riaffermata nel lavoro di Potvin e colleghi [1].

Tra le potenziali cause di concezioni alternative imputabili alla didattica annoveriamo: (a) l’uso di analogie, (b) il sovraccarico della memoria di lavoro, (c) il non considerare lo sviluppo intellettuale, (d) non prestare la dovuta attenzione al lessico utilizzato, (e) non considerare le preconoscenze. Si possono però progettare interventi educativi atti a modificarle [4], appoggiandosi sul paradigma socio-costruttivista, per il quale l’apprendimento è un processo situato e le strutture di conoscenza sono validate in funzione del contesto specifico in cui ci si trova [25].

1.2 Scopo della revisione sistematica

Il fenomeno delle concezioni alternative in educazione è ancora osservabile a scuola [13, 26, 27], e sia gli insegnanti in formazione iniziale che quelli in carriera necessitano di formazione per poterle riconoscere e prevenire [28], anche considerando che i risultati della ricerca educativa hanno un impatto limitato sulla scuola [29]. Recentemente è stata sottolineata la necessità di investigare ulteriormente quali approcci didattici facilitino il cambiamento concettuale, rilevando sia il cambiamento delle rappresentazioni che la sua stabilità [30, 31]. Per tali ragioni, questa revisione sistematica della letteratura ha come obiettivo quello di valutare interventi educativi indirizzati verso le concezioni alternative in chimica, identificando le loro caratteristiche principali, il loro quadro teorico di riferimento e i metodi didattici utilizzati.

2. Metodi

2.1 Strategia di ricerca

Questa revisione sistematica è stata condotta seguendo un protocollo predefinito, in accordo con le linee guida Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA) [32].

La ricerca è stata effettuata in 24 database scientifici, utilizzando il portale ProQuest nel novembre 2024, ed è stata ristretta ad articoli, scritti in lingua inglese, pubblicati in riviste peer reviewed tra il 2014 e il 2024. La stringa di ricerca combina con operatori booleani le parole-chiave dei tre assi della ricerca (“misconceptions”, “chemistry”, e “students”) e i loro sinonimi. La lista completa dei database e la stringa di ricerca sono riportate nell’Appendice A. Due autori (MN e GG) hanno revisionato indipendentemente gli studi ottenuti in un processo a due fasi, escludendo inizialmente le pubblicazioni non pertinenti sulla base di titolo e abstract e, successivamente, leggendo l’intero testo dell’articolo. I disaccordi sono stati risolti tramite discussione e consultando un terzo autore (SZ).

2.2 Criteri di inclusione ed esclusione

La domanda alla base della revisione è stata definita in anticipo utilizzando il protocollo PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome) [33]. Sono stati inclusi nella revisione sistematica gli studi che rispondevano ai seguenti criteri di inclusione:

- valutavano l’efficacia di interventi didattici per affrontare concezioni alternative in chimica;
- erano condotti a livello di istruzione secondaria o terziaria;
- avevano impiegato un disegno di studio controllato o pre-post test;
- erano stati pubblicati tra il 2014 e il 2024;
- erano stati pubblicati in riviste peer-reviewed;
- erano scritti in lingua inglese.

2.3 Estrazione e analisi dei dati

Le caratteristiche e i risultati degli studi inclusi sono stati estratti attraverso un'analisi tematica e riportati in una presentazione tabellare (Materiale Supplementare). È stata eseguita una categorizzazione di alcune delle variabili qualitative (argomento, fondamenti teorici, metodologia didattica) al fine di permetterne l'analisi (Tabella 1).

Tabella 1. Categorizzazione delle variabili qualitative

<i>Variabile</i>	<i>Categoria</i>	<i>Esempi presenti negli studi inclusi</i>
Argomento	Struttura atomica	Struttura atomica, orbitali, numeri quantici, configurazione elettronica
	Struttura molecolare e legami	Struttura di Lewis, simmetria, struttura molecolare, teoria VSEPR, legami, polarità
	Termochimica	Entalpia, entropia, spontaneità
	Elettrochimica e reazioni redox	
	Equilibrio chimico	Principio di Le Châtelier
	Cinetica	Velocità di reazione
	Reazioni chimiche	Reazioni, trasformazioni chimiche e fisiche, stechiometria, rapporto molare
	Soluzioni e miscugli	Solubilità, solvatazione, concentrazioni
	Acidi e basi	Neutralizzazione, titolazione, forza di acidi e basi, idrolisi di sali, pH
	Stati della materia	Proprietà degli stati, gas ideali
	Chimica organica e biochimica	Alcheni, metaboliti secondari, macromolecole
	Chimica analitica	Cromatografia su strato sottile
	Risoluzione di problemi	
	Modello particellare della materia	
	Elementi e composti, nomenclatura, tavola periodica	
	Legami intermolecolari	Legami deboli, legami a idrogeno
Fondamenti teorici	Costruttivismo	
	Cambiamento concettuale	
	Aspetti sociali	
	Cognitivismo	
	Apprendimento significativo	
	Motivazione	
	Metacognizione	
	Tre livelli della chimica (Johnstone)	
Metodologie didattiche	Conoscenza dei contenuti e conoscenza pedagogica dei contenuti	
	Apprendimento cooperativo	Apprendimento cooperativo, collaborativo, educazione tra pari
	Apprendimento basato sull'indagine	Modello 5E, Prevedere-Osservare-Spiegare (POE)
	Apprendimento basato sul contesto	Apprendimento basato sul contesto e su problemi
	<i>Flipped classroom</i>	
	Analogie	
	Mappe concettuali	
	Argomentazione	
	<i>Gamification</i>	
	<i>Conceptual Change Text</i>	
	<i>Visual learning</i>	

3. Risultati e discussione

3.1 Selezione degli studi

La ricerca iniziale ha prodotto un totale di 1618 citazioni, 84 dei quali hanno soddisfatto i criteri di inclusione. Il processo di selezione degli studi è descritto in dettaglio nella figura A1 dell'Appendice A, mentre un elenco completo degli studi inclusi è fornito nell'Appendice B.

3.2 Caratteristiche generali degli studi

Per quanto riguarda l'anno di pubblicazione, la distribuzione è irregolare, con un massimo nell'anno 2018 (13 articoli) e un minimo nel 2022 (3 articoli). Gli studi sono stati condotti in 21 diverse nazioni, con una più alta rappresentanza della Turchia ($n = 26$, 31%), e degli Stati Uniti ($n = 17$, 20%), anche se la maggior parte degli studi è stata condotta in Asia ($n = 48$, 57%).

La Tabella 2 riporta in dettaglio l'origine degli studi.

Tabella 2. Numero di pubblicazioni per stato e continente

<i>Continente</i>	<i>Nazione</i>	<i>Numero totale per nazione</i>	<i>Numero totale per continente</i>
Asia	India	2	48
	Malesia	3	
	Indonesia	8	
	Cina	2	
	Brunei	1	
	Tailandia	4	
	Taiwan	1	
	Giappone	1	
	Turchia	26	
	(transcontinentale)		
Africa	Ghana	5	7
	Etiopia	1	
	Zimbabwe	1	
Europa	Spagna	2	8
	Grecia	2	
	Regno Unito	3	
	Finlandia	1	
Nord America	Stati Uniti	17	17
Oceania	Nuova Zelanda	1	2
	Australia	1	
Sud America	Brasile	1	2
	Messico	1	

Più di un terzo degli studi è stato pubblicato su due principali riviste scientifiche: Journal of Chemical Education ($n = 17$), e Chemistry Education Research and Practice ($n = 12$). Gli altri 55 studi (65%) sono stati pubblicati in 41 differenti riviste, come viene presentato nella Tabella A1 dell'Appendice A.

3.3 Caratteristiche dei campioni degli studi inclusi

Le dimensioni dei campioni variavano da un minimo di 8 a un massimo di 574 partecipanti. La distribuzione è fortemente asimmetrica (primo quartile pari a 36, mediana pari a 62, il terzo quartile pari a 107), con pochi studi che hanno campioni di dimensioni eccezionalmente grandi rispetto alla maggioranza.

La metà degli interventi è stata condotta in scuole secondarie ($n = 44$, 52%), mentre 38 studi (45%) hanno coinvolto studenti universitari. Tra gli studi condotti nelle università, 13 includono insegnanti in formazione iniziale, mentre due studi riguardano livello post secondario, ma non universitario. Questa distribuzione tra i livelli scolari permette di occuparsi di contesti, argomenti e livelli di concettualizzazione diversi. È significativa l'assenza di studi su docenti in servizio, alla luce delle evidenze che essi possiedono le stesse concezioni alternative degli studenti [34, 35].

3.4 Caratteristiche degli interventi didattici

Tra gli 84 interventi, 45 (54%) prevedevano un gruppo di controllo, mentre 39 (46%) utilizzavano un disegno dello studio del tipo prima-dopo. I ricercatori prediligono approcci diversi (disegno sperimentale, dimensione del campione, valutazioni quantitative o qualitative) sulla base dei paradigmi di riferimento e degli obiettivi di ricerca [36]: è importante che diversi approcci coesistano, in modo che la comunità scientifica possa integrare le diverse informazioni ottenute sul processo di insegnamento-apprendimento. La maggior parte degli studi ha una durata compresa tra una e quattro settimane ($n = 29$, 35%) o tra uno e tre mesi ($n = 21$, 25%). Quindici interventi (18%) erano stati erogati in una singola lezione o giornata, tre (4%) duravano da uno a sette giorni e sei (7%) si estendevano oltre i tre mesi. Dieci studi (12%) non hanno riportato chiaramente la durata dell'intervento.

L'analisi degli argomenti di chimica affrontati negli interventi didattici ha permesso l'identificazione di 16 categorie tematiche, riportate in Tabella 3: l'argomento più frequentemente trattato è "struttura molecolare e legami", presente nel 20% delle pubblicazioni ($n = 17$).

Tabella 3. Numero di interventi per argomento didattico; il numero totale di argomenti supera il numero di studi inclusi, indicando che alcuni interventi hanno affrontato più argomenti

<i>Argomenti di chimica affrontati</i>	<i>Numero interventi</i>
Struttura molecolare e legami	17
Chimica organica e biochimica	11
Termochimica	9
Elettrochimica e reazioni redox	8
Equilibrio chimico	8
Soluzioni e miscugli	8
Acidi e basi	7
Stati della materia	7
Reazioni chimiche	6
Cinetica	5
Struttura atomica	4
Elementi e composti	4
Chimica analitica	2
Modello particellare della materia	2
Risoluzione di problemi	1
Legami intermolecolari	1
Argomenti multipli	1
Dato non disponibile	1

3.5 Fondamenti teorici

Più della metà degli studi (Tabella 4) ha citato il costruttivismo come quadro concettuale, seguito da cambiamento concettuale, gli aspetti motivazionali, i tre livelli della chimica di Johnstone e gli

aspetti sociali dell'apprendimento. Gli sviluppi recenti della psicologia dell'apprendimento sottolineano l'importanza dei sistemi di regolazione nell'espressione delle conoscenze, così come il ruolo dei domini affettivi nell'apprendimento concettuale ("cambiamento concettuale caldo") [37]. Perciò, è importante che vengano sviluppati metodi di ricerca che permettano di mostrare la natura complessa dell'apprendimento concettuale. Gli autori dovrebbero riportare il proprio quadro teorico di riferimento [38], ma il 17% degli studi inclusi non dichiara le proprie teorie di riferimento.

Tabella 4. Distribuzione dei fondamenti teorici degli studi; il numero totale supera il numero degli studi inclusi, indicando che alcuni interventi hanno riportato più fondamenti teorici

<i>Fondamenti teorici</i>	<i>Numero interventi</i>
Costruttivismo	44
Cambiamento concettuale	30
Aspetti motivazionali	24
Tre livelli della chimica (triangolo di Johnstone)	17
Apprendimento sociale	11
Apprendimento significativo	9
Metacognizione	9
Cognitivismo	6
Conoscenza pedagogica dei contenuti	2
Dato non disponibile	14

3.6 Metodi e strumenti didattici

Tutti gli studi inclusi hanno utilizzato metodologie didattiche attive. Come mostrato nella Tabella 5, l'apprendimento cooperativo è stato il metodo più comunemente utilizzato (40%), seguito dall'apprendimento basato sull'indagine (21, 25%). Il 37,44% ha utilizzato una combinazione di più metodologie didattiche, mentre 16 studi (19%) non hanno specificato il tipo di metodologia didattica utilizzata. Inoltre, 29 studi (35%) hanno utilizzato la tecnologia digitale a supporto dell'apprendimento e 23 studi hanno impiegato modelli tridimensionali, grafici o fisici (di cui 10 hanno utilizzato modelli digitali). Infine, 17 studi (20%) comprendono attività pratiche svolte in laboratorio.

Tabella 5. Distribuzione di metodi e strumenti didattici

<i>Metodologia didattica</i>	<i>Numero studi</i>
Apprendimento cooperativo	34
Apprendimento basato sull'indagine	21
Apprendimento basato sul contesto	11
Apprendimento visivo	11
Testi sul cambiamento concettuale	5
Analogie	5
Argomentazione	4
<i>Flipped classroom</i>	3
Mappe concettuali	3
<i>Gamification</i>	2
Valutazione formativa	1
Combinazione di più categorie	37
Dato non fornito	16

3.7 Metodi di valutazione

Tradizionalmente la ricerca sulle concezioni si avvale di test concettuali (spesso progettati come test multi-livello), mappe concettuali, disegni, associazioni di parole, V-diagram [4, 39, 40]. I risultati di questa revisione confermano tale andamento: l'efficacia degli interventi è stata valutata attraverso test strutturati nella maggior parte degli studi ($n = 77$, 92%). Altri metodi di valutazione includevano l'analisi di disegni e rappresentazioni ($n = 8$, 10%), elaborati ($n = 5$, 6%) e il rendimento negli esami ($n = 5$, 6%). Tredici studi (15%) hanno valutato l'efficacia dell'intervento attraverso una combinazione di questi metodi.

Inoltre, a causa della natura sfaccettata dell'apprendimento concettuale, il 44% degli studi impiega anche approcci qualitativi (interviste, focus group o osservazioni in classe). Uno studio ha valutato l'efficacia dell'intervento esclusivamente attraverso metodi qualitativi (interviste semi-strutturate). In 12 studi (14%) è stato somministrato un post-test ritardato, per valutare la stabilità nel tempo del cambiamento concettuale. Il 42% ($n = 32$) degli studi che hanno impiegato test strutturati come strumento di valutazione ha utilizzato test a più livelli (2, 3 o 4 livelli). Infine, in 57 studi (68%) sono stati utilizzati strumenti di valutazione validati.

3.8 Risultati di efficacia

Tutti gli studi inclusi nella revisione sistematica hanno riportato un certo grado di efficacia degli interventi nel ridurre le concezioni alternative. Una caratteristica comune a tutti gli 84 interventi è l'uso di metodologie didattiche attive, che hanno costantemente prodotto risultati migliori rispetto agli approcci tradizionali.

A causa della notevole eterogeneità nella progettazione degli interventi, nelle popolazioni incluse e nei metodi di valutazione utilizzati, non è stato possibile condurre un'analisi quantitativa per determinare quali tipi di interventi o metodologie didattiche fossero più efficaci. Inoltre, alcuni studi hanno riportato risultati qualitativi, mentre altri hanno presentato solo risultati quantitativi, limitando ulteriormente la possibilità di confronti diretti. Ulteriori fonti di eterogeneità includevano differenze nella durata dell'intervento, negli argomenti didattici e nelle modalità di attuazione degli interventi, che hanno anch'esse ostacolato l'identificazione di modelli coerenti tra gli studi.

Questo risultato conferma che l'insegnamento trasmissivo è inefficace nel promuovere il cambiamento concettuale [41-43]. Si può, quindi, mettere in discussione l'utilità della lezione tradizionale come metodo di controllo per gli studi: sarebbe più utile verificare quali metodi attivi siano maggiormente efficaci per diversi argomenti o popolazioni.

4. Limiti dello studio

Questa revisione sistematica ha alcuni limiti. In primo luogo, non è stata effettuata una valutazione della qualità degli studi: nonostante esistano numerosi strumenti, sviluppati in ambito biomedicale, per valutare il rischio di bias e la qualità di un intervento [44-47], essi non sono adatti al contesto educativo. Alcuni autori, inoltre, rifiutano l'idea che sia necessario valutare la qualità degli studi inclusi, sottolineando la maggior importanza della pertinenza degli studi allo scopo della revisione [48]. In secondo luogo, l'inclusione solo di studi pubblicati in riviste peer-reviewed porta all'esclusione della così detta letteratura grigia. Infine, l'assenza di studi che riportino risultati negativi potrebbe riflettere un bias di pubblicazione.

5. Conclusioni

Gli 84 studi inclusi e analizzati in questa revisione sistematica mostrano che i metodi di insegnamento attivo sono più efficaci della lezione tradizionale nel promuovere il superamento delle concezioni alternative per gli studenti di scuola secondaria e universitari. Questo risultato conferma la necessità di proseguire nella transizione da un insegnamento tradizionale, incentrato sull'insegnante, a un insegnamento attivo, incentrato sullo studente. In questa prospettiva gli studi futuri dovrebbero concentrarsi sul confronto tra diverse metodologie attive, così da identificare quali sono più efficaci per diverse popolazioni e argomenti, valutando il loro effetto sull'apprendimento dei concetti anche a lungo termine.

I set di dati utilizzati e/o analizzati nel corso del presente studio sono disponibili presso l'autore corrispondente, previa richiesta motivata.

Riferimenti bibliografici

- [1] P. Potvin, G. Malenfant-Robichaud, C. Cormier, S. Masson, Coexistence of misconceptions and scientific conceptions in chemistry professors: a mental chronometry and fMRI study, *Front. Educ.*, 2020, vol. 5 (<https://doi.org/10.3389/feduc.2020.542458>).
- [2] M. R. Matthews, Thomas Kuhn and science education, *Sci. Educ.*, 2022, Dec. 13, 1-70 (10.1007/s11191-022-00408-1).
- [3] M. M. Cooper, R. L. Stowe, Chemistry education research - From personal empiricism to evidence, theory, and informed practice, *Chem. Rev.*, 2018, **118**(12), 6053-6087 (10.1021/acs.chemrev.8b00020).
- [4] H.-J. Schmidt, Students' misconceptions? Looking for a pattern, *Sci. Educ.*, 1997, **81**(2), 123-135 (10.1002/(SICI)1098-237X(199704)81:2%3C123::AID-SCE1%3E3.0.CO;2-H).
- [5] B.-S. Eylon, M. C. Linn, Learning and instruction: an examination of four research perspectives in science education, *Rev. Educ. Res.*, 1988, **58**(3), 251-301 (10.3102/00346543058003251).
- [6] H.-D. Barke, A. Hazari, S. Yitbarek, *Misconceptions in Chemistry*, Springer, Berlin Heidelberg, 2009 (10.1007/978-3-540-70989-3).
- [7] B. C. Mondal, A. Chakraborty, *Misconceptions in Chemistry*, LAMBERT Academic Publishing, London, 2013.
- [8] S. Sunyono, L. Tania, A. Saputra, A. Saputra, A learning exercise using simple and real-time visualization tool to counter misconceptions about orbitals and quantum numbers, *J. Balt. Sci. Educ.*, 2016, **15**(4), 452-463 (<https://doi.org/10.33225/jbse/16.15.452>).
- [9] M. T. H. Chi, J. D. Slotta, N. De Leeuw, From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts, *Learn. Instr.*, 1994, vol. **4**(1), 27-43 (doi: 10.1016/0959-4752(94)90017-5).
- [10] Y. Boz, Turkish prospective chemistry teachers' alternative conceptions about acids and bases, *Sch. Sci. Math.*, 2009, **109**(4), 212-222 (doi: 10.1111/j.1949-8594.2009.tb18259.x).
- [11] M. I. Stojanovska, B. T. Soptrajanov, V. M. Petrusevski, Addressing misconceptions about the particulate nature of matter among secondary-school and high-school students in the Republic of Macedonia, *Creat. Educ.*, 2012, **3**(5), 619-631 (doi: 10.4236/ce.2012.35091).
- [12] R. Karplus, Chemical phenomena in elementary school science, *J. Chem. Educ.*, 1996, **43**(5), 267 (doi: 10.1021/ed043p267).
- [13] K. S. Taber, Building the structural concepts of chemistry: some considerations from educational research, *Chem. Educ. Res. Pr.*, 2001, **2**(2), 123-158 (doi: 10.1039/B1RP90014E).
- [14] A. H. Johnstone, Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem, *J. Comput. Assist. Learn.*, 1991, **7**(2), 75-83 (doi: 10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x).
- [15] W. B. Jensen, Logic, history, and the chemistry textbook I. Does chemistry have a logical structure?, *J. Chem. Educ.*, 1998, **75**(6), 679.
- [16] M. Çalýk, A. Ayas, J. V. Ebenezer, A review of solution chemistry studies: insights into students' conceptions, *J. Sci. Educ. Technol.*, 2005, **14**(1), 29-50 (doi: 10.1007/s10956-005-2732-3).
- [17] A. L. Chandrasegaran, D. F. Treagust, M. Mocerino, An evaluation of a teaching intervention to promote students' ability to use multiple levels of representation when describing and explaining chemical reactions, *Res. Sci. Educ.*, 2008, **38**(2), 237-248 (doi: 10.1007/s11165-007-9046-9).
- [18] D. F. Treagust, A. L. Chandrasegaran, J. Crowley, B. H. W. Yung, I. P.-A. Cheong, J. Othman, Evaluating students' understanding of kinetic particle theory concepts relating to the states of matter, changes of state and diffusion: a cross-national study, *Int. J. Sci. Math. Educ.*, 2010, **8**(1), 141-164 (doi: 10.1007/s10763-009-9166-y).
- [19] R. Ben-Zvi, B.-S. Eylon, J. Silberstein, Is an atom of copper malleable?, *J. Chem. Educ.*, 1986, **63**(1), 64 (doi: 10.1021/ed063p64).
- [20] A. H. Johnstone, Chemistry teaching - Science or alchemy? 1996 Brasted lecture, *J. Chem. Educ.*, 1997, **74**(3), 262 (doi: 10.1021/ed074p262).

- [21] J. D. Novak, Application of advances in learning theory and philosophy of science to the improvement of chemistry teaching, *J. Chem. Educ.*, 1984, **61**(7), 607 (doi: 10.1021/ed061p607).
- [22] G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog, Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change, *Sci. Educ.*, 1982, **66**(2), 211-227 (doi: 10.1002/sce.3730660207).
- [23] A. A. diSessa, Knowledge in pieces, in *Constructivism in the computer age* (Eds., G. Forman, P. B. Pufall), Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1988, pp. 49-70.
- [24] E. F. Mortimer, Conceptual change or conceptual profile change?, *Sci. Educ.*, 1995, **4**(3), 267-285 (doi: 10.1007/BF00486624).
- [25] L. S. Vygotsky, *Mind in society: development of higher psychological processes*, Harvard University Press, 1978 (doi: 10.2307/j.ctvjf9vz4).
- [26] M. Sozbilir, Turkish chemistry undergraduate students' misunderstandings of Gibbs free energy, *U. Chem. Ed.*, 2002, **6**, 73-82.
- [27] A. R. Suparman, E. Rohaeti, S. Wening, Student misconception in chemistry: a systematic literature review, *Pegem J. Educ. Instr.*, 2024, **14**(2), 238-252 (doi: 10.47750/pegegog.14.02.28).
- [28] M. Stojanovska, V. Petrusevski, H.-G. Köller, S. Karlsen, Students' alternative conceptions and ways to overcome them, in *A guidebook of good practice for the pre-service training of chemistry teachers*, Faculty of Chemistry, Jagiellonian University in Krakow, 2015, pp. 177-202.
- [29] A. E. J. Bowen, R. A. Ferreira, A. Tolmie, M. S. C. Thomas, G. Borst, J. Van Herwegen, International perspectives on gaps and solutions for integrating research evidence into classroom practices, *NPJ Sci. Learn.*, 2025, **10**, 79 (doi: 10.1038/s41539-025-00370-x).
- [30] T. W. Teo, M. T. Goh, L. W. Yeo, Chemistry education research trends: 2004-2013, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2014, **15**(4), 470-487 (doi: 10.1039/C4RP00104D).
- [31] M. H. Towns, A. Kraft, Review and synthesis of research in chemical education from 2000-2010, in *Second Committee Meeting on the Status, Contributions, and Future Directions of Discipline-Based Education Research*, Washington, October, 2011.
- [32] M. J. Page et al., The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, *BMJ*, 2021, **372**, n71 (doi: 10.1136/bmj.n71).
- [33] C. Stern, Z. Jordan, A. McArthur, Developing the review question and inclusion criteria, *AJN, Am. J. Nurs.*, 2014, **114**(4), 53-56 (doi: 10.1097/01.NAJ.0000445689.67800.86).
- [34] R. Vladusic, R. B. Bucat, M. Ozic, Understanding covalent bonding – a scan across the Croatian education system, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2023, **24**(1), 108-131 (doi: 10.1039/D2RP00039C).
- [35] S. Magnusson, J. Krajcik, Borko, Nature, sources, and development of pedagogical content knowledge for science teaching, in *Examining pedagogical content knowledge* (Eds., J. Gess-Newsome, N. G. Lederman) Science & Technology Education Library, Springer, Dordrecht, 1999, vol. 6, pp. 95-132 (doi: 10.1007/0-306-47217-1_4).
- [36] G. Benvenuto, *Stili e metodi della ricerca educativa*, Collana Studi Superiori, Carocci Editore, Roma, 2015.
- [37] L. Mason, *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*, terza edizione, Collana Manuali, Il Mulino, Bologna, 2019.
- [38] American Educational Research Association, Standards for reporting on empirical social science research in AERA publications, *Educational researcher*, 2006, **35**(6), 33-40.
- [39] E. Taş, S. Gülen, Z. Öner, C. Özyürek, The effects of classic and web-designed conceptual change texts on the subject of water chemistry, *International Electronic Journal of Elementary Education*, 2015, **7**(2), 263-280.
- [40] H. G. Seyhan, G. E. Türk, The effect of argumentation-supported problem-based learning method in teaching chemical equilibrium and Le-Chatelier's principle, *Mimbar Sekolah Dasar*, 2022, **9**(3), 413-430 (doi: 10.53400/mimbar-sd.v9i3.45585).
- [41] G. M. Bodner, I have found you an argument: the conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students, *J. Chem. Educ.*, 1991, **68**(5), 385 (doi: 10.1021/ed068p385).

- [42] S. L. Westbrook, E. A. Marek, A cross-age study of student understanding of the concept of diffusion, *J. Res. Sci. Teach.*, 1991, **28**(8), 649-660 (doi: 10.1002/tea.3660280803).
- [43] J. J. Hesse, C. W. Anderson, Students' conceptions of chemical change, *J. Res. Sci. Teach.*, 1992, **29**(3), 277-299.
- [44] J. A. C. Sterne et al., RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials, *BMJ*, 2019, **366**, l4898 (doi: 10.1136/bmj.l4898).
- [45] J. A. Sterne et al., ROBINS-I: a tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions, *BMJ*, 2016, **355**, i4919 (doi: 10.1136/bmj.i4919).
- [46] H.-J. Seo, S. Y. Kim, Y. J. Lee, J.-E. Park, RoBANS 2: a revised risk of bias assessment tool for non-randomized studies of interventions, *Korean J. Fam. Med.*, 2023, **44**(5), 249-260 (doi: 10.4082/kjfm.23.0034).
- [47] A. Stang, Critical evaluation of the Newcastle-Ottawa scale for the assessment of the quality of nonrandomized studies in meta-analyses, *Eur. J. Epidemiol.*, 2010, **25**(9), 603-605 (doi: 10.1007/s10654-010-9491-z).
- [48] D. Gough, J. Thomas, S. Oliver, Clarifying differences between review designs and methods, *Syst. Rev.*, 2012, **1**(1), 28 (doi: 10.1186/2046-4053-1-28).

Appendice A

Stringa di ricerca

(ABSTRACT((misconception* OR misunderstand* OR "alternat* concept*" OR "frame* concept*" OR "concept* chang*" OR "pre?concept*") AND (chemi*) AND (under?graduate* OR "high school*" OR "secondary" OR student* OR teacher* OR "teaching strat*" OR "universit*" OR "college*" OR "preservice teacher*" OR "prospective teacher*" OR "post?secondary" OR "tertiary")) OR IF((misconception* OR misunderstand* OR "alternat* concept*" OR "frame* concept*" OR "concept* chang*" OR "pre?concept*") AND (chemi*) AND (under?graduate* OR "high school*" OR "secondary" OR student* OR teacher* OR "teaching strat*" OR "universit*" OR "college*" OR "preservice teacher*" OR "prospective teacher*" OR "post?secondary" OR "tertiary")) OR SUBJECT((misconception* OR misunderstand* OR "alternat* concept*" OR "frame* concept*" OR "concept* chang*" OR "pre?concept*") AND (chemi*) AND (under?graduate* OR "high school*" OR "secondary" OR student* OR teacher* OR "teaching strat*" OR "universit*" OR "college*" OR "preservice teacher*" OR "prospective teacher*" OR "post?secondary" OR "tertiary")) OR TITLE((misconception* OR misunderstand* OR "alternat* concept*" OR "frame* concept*" OR "concept* chang*" OR "pre?concept*") AND (chemi*) AND (under?graduate* OR "high school*" OR "secondary" OR student* OR teacher* OR "teaching strat*" OR "universit*" OR "college*" OR "preservice teacher*" OR "prospective teacher*" OR "post?secondary" OR "tertiary")) AND stype.exact("Scholarly Journals" OR "Dissertations & Theses" OR "Reports") AND at.exact("Article" OR "Report" OR "Dissertation/Thesis" OR "Review" OR "Editorial" OR "Undefined" OR "Literature Review" OR "Case Study" OR "Statistics/Data Report") AND la.exact("ENG"))

Lista dei databases utilizzati

Australia & New Zealand Database	Middle East & Africa Database
Career & Technical Education Database	Natural Science Collection
Continental Europe Database	ProQuest Dissertations & Theses Global
East & South Asia Database	Psychology Database
East Europe, Central Europe Database	Publicly Available Content Database
Ebook Central	Research Library
Education Collection	Science Database
India Database	Social Science Database
International Bibliography of the Social Sciences (IBSS)	Sociology Collection
Latin America & Iberia Database	Telecommunications Database
Library & Information Science Collection	Turkey Database
Materials Science Collection	UK & Ireland Database

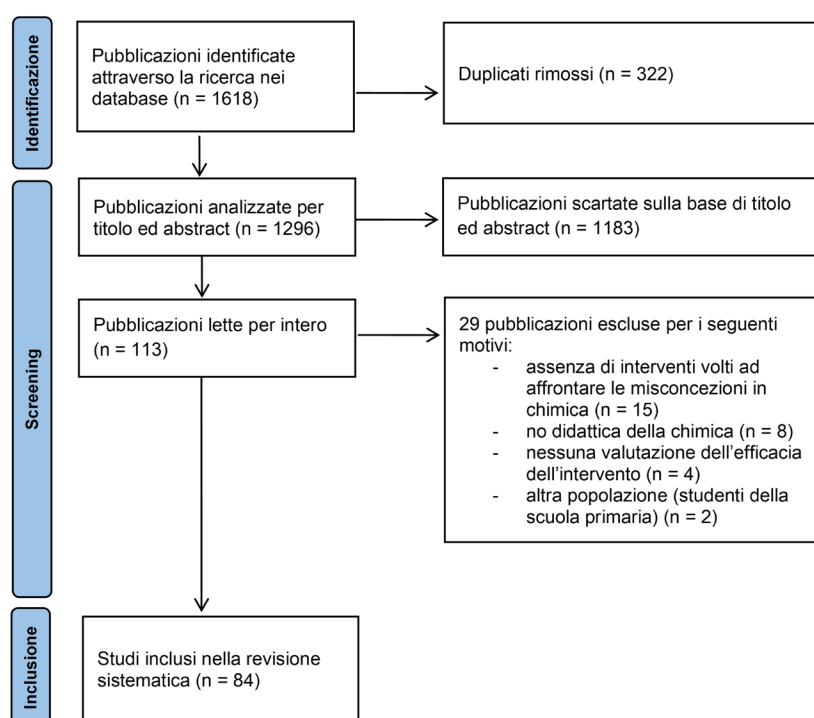


Figura A1. Diagramma preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA)

Tabella A1. Numero di pubblicazioni per giornale

<i>Nome della rivista</i>	<i>Numero pubblicazioni</i>
Journal of Chemical Education	17
Chemistry Education Research and Practice	12
Research in Science & Technological Education	4
Chemistry Education Research and Practice in Europe	3
Journal of Baltic Science Education	3
Science Education International	2
International Journal of Science and Mathematics Education	2
Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching	2
Journal of Turkish Science Education	2
Journal of Physics: Conference Series	2
International Journal of Science and Research	2
International Journal of Science Education	2
EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education	2
Education and Information Technologies	1
International Journal of Education and Practice	1
Educational Process: International Journal	1
South African Journal of Education	1
School Science and Mathematics	1
Journal of College Science Teaching	1
The International Journal of Science, Mathematics and Technology Learning	1
Journal of Education and Learning (EduLearn)	1
Malaysian Journal of Learning and Instruction	1
CBE life sciences education	1
International Journal of Instruction	1
Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education	1
Education Sciences	1
European Journal of Science and Mathematics Education	1
Journal of Science Learning	1
Cypriot Journal of Educational Sciences	1
International Journal on ELearning	1
Educational Policy Analysis and Strategic Research	1
Science Insights Education Frontiers	1
Journal of the Serbian Chemical Society	1
Scholar: Human Sciences	1
Elementary School Forum (Mimbar Sekolah Dasar)	1
Journal of Science Education and Technology	1
International Electronic Journal of Elementary Education	1
Journal of Technology and Science Education	1
Educational Research and Reviews	1
Research in Science Education	1
Eğitim ve Bilim	1
New Zealand Journal of Educational Studies	1

Appendice B

Studi inclusi nella revisione sistematica

- M. Abualia, L. Schroeder, M. Garcia, PL. Daubenmire, DJ. Wink, GA. Clark, Connecting Protein Structure to Intermolecular Interactions: A Computer Modeling Laboratory, *J. Chem. Educ.*, 2016, Aug. 9, **93**(8), 1353-63.
- K. Achuthan, VK. Kolil, S. Diwakar, Using virtual laboratories in chemistry classrooms as interactive tools towards modifying alternate conceptions in molecular symmetry, *Educ. Inf. Technol.*, 2018, Nov., **23**(6), 2499-515.
- F. Adjei, R. Hanson, A. Sam, S. Sedegah, The use of Collaborative Approaches on Students' Performances in Redox Reactions, *SEI*, 2022, Jun. 1, **33**(2), 163-70.
- K. Adu-Gyamfi, J. Ghartey Ampiah, D. Darko Agyei, Participatory Teaching and Learning Approach: A Framework for Teaching Redox Reactions at High School Level, *International Journal of Education and Practice*, 2020, **8**(1), 106-20.
- JG. Aguiar, PRM. Correia, Using concept maps as instructional materials to foster the understanding of the atomic model and matter-energy interaction, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2016, **17**(4), 756-65.
- S. Akaygun, Is the oxygen atom static or dynamic? The effect of generating animations on students' mental models of atomic structure, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2016, **17**(4), 788-807.
- L. Atarés, MJ. Canet, A. Pérez-Pascual, M. Trujillo, Undergraduate Student Thinking on the Threshold Concept of Entropy, *J. Chem. Educ.*, 2024, May 14, **101**(5), 1798-809.
- F. Avci, FG. Kırbaşlar, B. Acar Şeşen, Instructional curriculum based on cooperative learning related to the structure of matter and its properties: Learning achievement, motivation and attitude, *SAJE*, 2019, Aug. 31, 39, 1-14.
- Y. Ayyıldız, L. Tarhan, A. Gil, Comparing the effectiveness of the learning material and the learning method in students' achievement in chemistry lesson on chemical changes, *Research in Science & Technological Education*, 2023, Oct. 2, **41**(4), 1372-93.
- Y. Ayyıldız, L. Tarhan, Problem-based learning in teaching chemistry: enthalpy changes in systems, *Research in Science & Technological Education*, 2018, Jan. 2, **36**(1), 35-54.
- N. Balasundram, M. Karpudewan, Exploring the use of a writing-to-learn activity embedded with multiple modes using 'Popplet' on pre-university students' alternative conceptions on transition metals, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2021, **22**(2), 263-81.
- MJ. Barthlow, SB. Watson, The Effectiveness of Process-Oriented Guided Inquiry Learning to Reduce Alternative Conceptions in Secondary Chemistry, *School Sci. & Mathematics*, 2014, May, **114**(5), 246-55.
- W. Belachew, Optimizing Pre-service Chemistry Teachers Understanding in Reaction Related Concepts of Aliphatic Hydrocarbons, *EURASIA J. Math. Sci. Tech. Ed.*, 2020, Jun. 22, **16**(9), em1875.
- H. Belge Can, Y. Boz, Structuring Cooperative Learning for Motivation and Conceptual Change in the Concepts of Mixtures, *Int. J. of Sci. and Math. Educ.*, 2016, May, **14**(4), 635-57.
- P. Boda, G. Weiser, Using POGILs and Blended Learning to Challenge Preconceptions of Student Ability in Introductory Chemistry, *Journal of College Science Teaching*, 2018, Sep., **48**(1), 60-7.
- MPH. Bravo, AEO. Valdivia, CM. Osornio, YM. Vargas-Rodríguez, Didactic Strategy: Interactive Digital Board in Teaching Learning Heat Capacity for High School, 2018, **9**(10).
- V. Christidou, M. Theodosiou, V. Hatzinikita, Teaching Chemistry Concepts through Multiple Analogies, *The International Journal of Science, Mathematics and Technology Learning*, 2018, **25**(2), 37-51.
- C. Smith, S. Villarreal, Using animations in identifying general chemistry students' misconceptions and evaluating their knowledge transfer relating to particle position in physical changes, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, **16**(2), 273-82.
- C. Cigdemoglu, O. Geban, Context-based lessons with 5e model to promote conceptual understanding of chemical reactions and energy concepts, *JBSE*, 2015, Aug. 30, **14**(4), 435-47.
- M. Cukurova, J. Bennett, I. Abrahams, Students' knowledge acquisition and ability to apply knowledge into different science contexts in two different independent learning settings, *Research in Science & Technological Education*, 2018, Jan. 2, **36**(1), 17-34.

- PD. Dayal, Z. Ali-Chand, Effective Teaching and Learning Strategies in a Chemistry Classroom, *NZ J. Educ. Stud.*, 2022, Dec., **57**(2), 425-43.
- H. Demircioğlu, A. Ayas, G. Demircioğlu, H. Özmen, Effects of storylines embedded within the context-based approach on pre-service primary school teachers' conceptions of matter and its states, 2015, **16**(2).
- D. Elford, GA. Jones, SJ. Lancaster, Augmented reality meets Peer instruction, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2024, **25**(3), 833-42.
- Erlina, C. Cane, DP. Williams, Prediction! The VSEPR Game: Using Cards and Molecular Model Building To Actively Enhance Students' Understanding of Molecular Geometry, *J. Chem. Educ.*, 2018, Jun. 12, **95**(6), 991-5.
- M. Erna, L. Anwar, M. Mazidah, Interactive e-module using Zoom Cloud Meeting platform to reduce misconceptions on salt hydrolysis material, *EduLearn*, 2021, May 1, **15**(2), 283-90.
- G. Eymur, Ö. Geban, The Collaboration of Cooperative Learning and Conceptual Change: Enhancing the Students' Understanding of Chemical Bonding Concepts, *Int. J. of Sci. and Math. Educ.*, 2017, Jun., **15**(5), 853-71.
- JM. Fautch, The flipped classroom for teaching organic chemistry in small classes: is it effective?, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, **16**(1), 179-86.
- RG. Gullion, T. Gullion, M. Richards-Babb, M. Schraf, Addressing Misconceptions Related to Mass-Matter Conservation and Bond Energetics with a Modified Gauss Accelerator, *J. Chem. Educ.*, 2019, Apr. 9, **96**(4), 734-8.
- T. Günter, SK. Alpat, The effects of problem-based learning (PBL) on the academic achievement of students studying 'Electrochemistry', *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2017, **18**(1), 78-98.
- A. Hakim, Liliyasi, A. Kadarohman, YM. Syah, Effects of the natural product mini project laboratory on the students conceptual understanding, *Journal of Turkish Science Education*, 2016, Jun. 15, **13**(2), 27-36.
- R. Hanson, N. Sakyi-Hagan, Understanding Teacher Trainees' Reasoning Patterns about the Formation and Description of Chemical Compounds, *SEI*, 2019, Jun. 1, **30**(2), 105-15.
- R. Hanson, N. Seheri-Jele, Assessing Conceptual Change Instruction Accompanied with Concept Maps and Analogies: A Case of Acid-Base Strengths.
- R. Hanson, Using Activity Worksheets to Remediate Pre-Service Teachers' Alternative Conceptions about Word Equations, *CJAR*, 2019, Apr. 30, **20**(2), 48-67.
- LL. Heng, J. Surif, CH. Seng, NH. Ibrahim, Mastery of scientific argumentation on the concept of neutralization in chemistry: a malaysian perspective, 2015, 12.
- CF. Herrmann-Abell, M. Koppal, JE. Roseman, Toward High School Biology: Helping Middle School Students Understand Chemical Reactions and Conservation of Mass in Nonliving and Living Systems, *LSE*, 2016, Dec., **15**(4), ar74.
- J. Jusniar, E. Effendy, E. Budiasih, S. Sutrisno, Eliminating Misconceptions on Reaction Rate to Enhance Conceptual Understanding of Chemical Equilibrium Using EMBE-R Strategy, *Int. J. Instruction*, 2021, Jan. 1, **14**(1), 85-104.
- S. Kahraman, The Use of Dynamic Computer Visualizations Integrated with the POE Sequence: Its Effect on Learners' Understanding, Retention, and Motivation, *Can. J. Sci. Math. Techn. Educ.*, 2023, Jun., **23**(2), 179-209.
- MS. Kareti, WJ. Howitz, A Thin Layer Chromatography Prelaboratory Activity Using a 3D-Printed Model to Address Student Misconceptions about Polarity and Intermolecular Forces, *J. Chem. Educ.*, 2023, Mar. 14, **100**(3), 1392-7.
- M. Karonen, M. Murtonen, I. Södervik, M. Manninen, M. Salomäki, Heuristics Hindering the Development of Understanding of Molecular Structures in University Level Chemistry Education: The Lewis Structure as an Example, *Education Sciences*, 2021, May 26, **11**(6), 258.
- F. Karsli, M. Yigit, Effectiveness of the REACT Strategy on 12th Grade Students' Understanding of the Alkenes Concept, *Research in Science & Technological Education*, 2017, Jul. 3, **35**(3), 274-91.

- ON. Kaya, Z. Kaya, The impact of co-design-based formative assessment practices on preservice science teachers' understanding of chemical concepts in a general chemistry laboratory course, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2024, **25**(4), 996-1017.
- S. Kimberlin, E. Yezierski, Effectiveness of Inquiry-Based Lessons Using Particulate Level Models To Develop High School Students' Understanding of Conceptual Stoichiometry, *J. Chem. Educ.*, 2016, Jun. 14, **93**(6), 1002-9.
- PE. Kotsalidis, SN. Kranc, M. Berryman, ML. Radhakrishnan, DE. Elmore, EMMAs: Implementation and Assessment of a Suite of Cross-Disciplinary, Case-Based High School Activities to Explore Three-Dimensional Molecular Structure, Noncovalent Interactions, and Molecular Dynamics, *J. Chem. Educ.*, 2024, Jun. 11, **101**(6), 2436-47.
- VK. Kuit, K. Osman, CHEMBOND3D e-Module Effectiveness in Enhancing Students' Knowledge of Chemical Bonding Concept and Visual-spatial Skills, *EUR. J. SCI. MATH. ED.*, 2021, Oct. 14, **9**(4), 252-64.
- MA. Kurniawan, S. Rahayu, F. Fajaroh, S. Almunasher, Effectiveness of Dual Situated Learning Model in Improving High School Students' Conceptions of Chemistry Equilibrium and Preventing Their misconceptions, *J. Sci. Learn.*, 2020, Mar. 11, **3**(2), 99-105.
- S. Lu, H. Bi, X. Liu, The effects of explanation-driven inquiry on students' conceptual understanding of redox, *International Journal of Science Education*, 2018, Oct. 13, **40**(15), 1857-73.
- KQ. Magnone, EJ. Yezierski, Applying the VisChem Approach in High School Classrooms: Chemical Learning Outcomes and Limitations, *J. Chem. Educ.*, 2024, Mar. 12, **101**(3), 727-40.
- S. Mandina, E. Dube, Implementing a Target-Task Problem-Solving Approach in teaching electrochemistry to advanced level chemistry learners, *Cypriot Journal of Educational Sciences*, 2018, **13**(4), 451-60.
- H. Matovu, M. Won, DF. Treagust, DAK. Ungu, M. Mocerino, CC. Tsai, et al., Change in students' explanation of the shape of snowflakes after collaborative immersive virtual reality, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2023, **24**(2), 509-25.
- A. Mutlu, B. Acar-Şeşen, Pre-service Science Teachers' Understanding of Chemistry: A Factorial Design Study, *EURASIA J. MATH. SCI. T.*, 2018, **14**(7).
- N. Nadiah, The Impact of Video-Based Predict-Observe-Explain (POE) on Secondary School Students' Scientific Literacy, *International Journal on E-Learning*, **20**(3), 295-321.
- AR. Sekerci, N. Canpolat, Impact of Argumentation in the Chemistry Laboratory on Conceptual Comprehension of Turkish Students, *Edupej*, 2014, Nov. 30, **3**(1-2), 19-34.
- S. Okumuş, Z. Özdilek, A. Arslan, The Effect of Cooperative Learning Methods and Individual Learning Method on Pre-Service Science Teachers' Sub-Micro Level Conceptual Understanding at Equilibrium Chemistry, *EPASR*, 2020, Sep. 24, **15**(3), 394-425.
- O. Ozcan, S. Bayrakceken, O. Oktay, N. Canpolat, Implementation of Peer Instruction Method on Teaching of Acids and Bases to 12th Grade Students: An Action Research, *Science Insights Education Frontiers*, 2024, Jul. 24, **23**(1), 3637-73.
- H. Özmen, A. Naseriazar, Effect of simulations enhanced with conceptual change texts on university students' understanding of chemical equilibrium, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2018, **83**(1), 121-37.
- P. Phromsena, PL. Promratana, J. Panchompoo, Effects of Teaching Model for Hot Conceptual Change on Students' Chemistry Conceptions, *Scholar*, 2019, **11**(1), 162.
- S. Ryan, DG. Herrington, Sticky Ions: A Student-Centered Activity Using Magnetic Models to Explore the Dissolving of Ionic Compounds, *J. Chem. Educ.*, 2014, Jun. 10, **91**(6), 860-3.
- R. Salyani, C. Nurmaliyah, M. Mahidin, Application of the 5E learning cycle model to overcome misconception and increase student learning activities in learning chemical bonding, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, Feb., **1460**(1), 012102.
- AVB. Santos, AJ. Rupprecht, K. Ogawa, PW. Schneider, AM. Brown, HC. Santos, et al., Exploring Student Misconceptions in Bonding and Resonance: A Computational Chemistry Exercise for General Chemistry Laboratory, *J. Chem. Educ.*, 2024, Oct. 8, **101**(10), 4381-9.

- AAA. Selvam, S. Senapati, Investigating the Impact of Combining Structured Peer Work with a Flipped Organic Chemistry Course for High School Students, *J. Chem. Educ.*, 2023, Dec. 12, **100**(12), 4625-37.
- Ş. Şen, A. Yilmaz, The effect of Process Oriented Guided Inquiry Learning (POGIL) on 11th Graders' conceptual understanding of electrochemistry, 2016, **17**(2).
- HG. Seyhan, GE. Türk, The Effect of Argumentation-Supported Problem-Based Learning Method in Teaching Chemical Equilibrium and Le-Chatelier's Principle, *Mimbar Sekolah Dasar*, 2022, Dec. 24, **9**(3), 413-30.
- L. Shah, CA. Rodriguez, M. Bartoli, GT. Rushton, Analysing the impact of a discussion-oriented curriculum on first-year general chemistry students' conceptions of relative acidity, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2018, Apr. 3, **19**(2), 543-57.
- N. Srisawasdi, P. Panjaburee, Implementation of Game-transformed Inquiry-based Learning to Promote the Understanding of and Motivation to Learn Chemistry, *J. Sci. Educ. Technol.*, 2019, Apr. 1, **28**(2), 152-64.
- IW. Suja, IW. Redhana, IBN. Sudria, Mental Model of Prospective Teachers on Structure and Properties Correlation of Organic Compounds, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, Jul., **1503**(1), 012034.
- S. Sunyono, L. Tania, A. Saputra, A. Saputra, A learning exercise using simple and real-time visualization tool to counter misconceptions about orbitals and quantum numbers, *Journal of Baltic Science Education*, 2016, **15**(4).
- S. Supasorn, V. Promarak, Implementation of 5E inquiry incorporated with analogy learning approach to enhance conceptual understanding of chemical reaction rate for grade 11 students, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, Jan. 14, **16**(1), 121-32.
- S. Supasorn, Grade 12 students' conceptual understanding and mental models of galvanic cells before and after learning by using small-scale experiments in conjunction with a model kit, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, Apr. 7, **16**(2), 393-407.
- E. Taş, S. Gülen, Z. Öner, C. Özyürek, The effects of classic and web-designed conceptual change texts on the subject of water chemistry, 2015, (2).
- LA. Tortajada-Genaro, Collaborative activities for solving multi-step problems in general chemistry, *J. Technol. Sci. Educ.*, 2014, Dec. 11, **4**(4), 250-9.
- G. Tsaparlis, ET. Pappa, B. Byers, Teaching and learning chemical bonding: research-based evidence for misconceptions and conceptual difficulties experienced by students in upper secondary schools and the effect of an enriched text, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2018, Oct. 2, **19**(4), 1253-69.
- YJ. Tseng, ZR. Hong, H. Lin, Exploring High School Students' Chemical Explanatory Levels of Thin-Layer Chromatography through Reflective Inquiry, *J. Chem. Educ.*, 2024, Sep. 10, **101**(9), 3635-42.
- M. Uce, Constructing models in teaching of chemical bonds: Ionic bond, covalent bond, double and triple bonds, hydrogen bond and molecular geometry, *ERR*, 2015, Feb. 23, **10**(4), 491-500.
- N. Ültay, ÜG. Durukan, E. Ültay, Evaluation of the effectiveness of conceptual change texts in the RE-ACT strategy, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, Jan. 14, **16**(1), 22-38.
- N. Ültay, The Effect Of Concept Cartoons Embedded Within Context-Based Chemistry: Chemical Bonding, *Journal of Baltic Science Education*, 2015, **14**(1), 96-108.
- B. Venkataraman, Emphasizing the Significance of Electrostatic Interactions in Chemical Bonding, *J. Chem. Educ.*, 2017, Mar. 14, **94**(3), 296-303.
- DA. Vilardo, AH. MacKenzie, EJ. Yezierski, Using Students' Conceptions of Air To Evaluate a Guided-Inquiry Activity Classifying Matter Using Particulate Models, *J. Chem. Educ.*, 2017, Feb. 14, **94**(2), 206-10.
- R. Wheeldon, Improving preservice chemistry teachers' content knowledge through intervention activities, *International Journal of Science Education*, 2017, Jun. 13, **39**(9), 1238-61.
- D. Xue, M. Stains, Exploring Students' Understanding of Resonance and Its Relationship to Instruction, *J. Chem. Educ.*, 2020, Apr. 14, **97**(4), 894-902.
- E. Yalçinkaya, Y. Boz, The effect of case-based instruction on 10th grade students' understanding of gas concepts, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, Jan. 14, **16**(1), 104-20.

- R. Yan, L. Zhu, D. Sun, B. Wei, Developing a Stop-Motion Animation in Improving Junior Secondary Students' Learning in Chemistry Lab: An Exploratory Study, *J. Chem. Educ.*, 2024, Apr. 9, **101**(4), 1583-91.
- Z. Yaseen, P. Aubusson, Exploring Student-Generated Animations, Combined with a Representational Pedagogy, as a Tool for Learning in Chemistry, *Res. Sci. Educ.*, 2020, Apr. 1, **50**(2), 529-48.
- T. Yildirim, N. Canpolat, An Investigation of the Effectiveness of the Peer Instruction Method on Teaching about Solutions at the High-School Level, *Egitim ve Bilim*, 2019, **44**(199).
- M. Yoshikawa, N. Koga, Identifying Liquid-Gas System Misconceptions and Addressing Them Using a Laboratory Exercise on Pressure-Temperature Diagrams of a Mixed Gas Involving Liquid-Vapor Equilibrium, *J. Chem. Educ.*, 2016, Jan. 12, **93**(1), 79-85.

Insegnare la *molecular dynamics* come pratica interpretativa in un contesto di *Team-Based Learning*

Renato Lombardo

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche
dell'Università di Palermo

e-mail: renato.lombardo@unipa.it

Abstract. Molecular dynamics is increasingly introduced in chemistry and life science courses, yet students often experience difficulties in interpreting simulation outputs and relating different descriptors to a coherent explanation. In this context, molecular dynamics can be approached as an interpretative practice rather than as a set of techniques. The experience described here was implemented in a graduate-level physical chemistry course for biotechnology students within a Team-Based Learning framework, designed to promote discussion, comparison of viewpoints and collective decision making based on available evidence. Particular attention is given to how students move from a descriptive reading of individual indicators to a more integrated interpretation through group interaction. The implementation and the observed learning dynamics are discussed, highlighting both strengths and critical aspects. The role of guided questioning, also supported by AI, is considered in relation to the development of students' ability to construct and justify interpretations. The experience suggests that focusing on interpretation and decision making can contribute to making physical chemistry more meaningful and closer to scientific practice.

Keywords: Team-Based Learning; molecular dynamics; chimica fisica; apprendimento collaborativo; intelligenza artificiale

1. Introduzione

Nei corsi di chimica fisica rivolti a studenti di area biologica e biotecnologica emerge spesso una difficoltà strutturale: il collegamento tra modelli teorici e sistemi reali. Gli studenti, con background eterogenei e una preparazione non sempre solida in matematica e fisica, tendono a percepire la disciplina come astratta e distante dalle applicazioni di interesse. Questa difficoltà è ben documentata nella letteratura sulla didattica delle scienze, che evidenzia come l'apprendimento risulti particolarmente problematico quando richiede il coordinamento di più livelli di rappresentazione e la costruzione di significato a partire da modelli [1, 2].

Il caso della *molecular dynamics* è emblematico di questa tensione. Sebbene essa sia sempre più presente nei curricula di chimica e scienze della vita, il suo valore didattico non risiede tanto nell'esecuzione delle simulazioni, quanto nella capacità di interpretarne i risultati [3]. Gli studenti si trovano infatti di fronte a una molteplicità di descrittori che spesso non forniscono semplici risposte dirette, ma richiedono di essere messi in relazione tra loro e interpretati nel contesto del sistema studiato. In assenza di un adeguato supporto, l'analisi tende a ridursi a una lettura descrittiva dei grafici: si osservano andamenti, si riconoscono pattern, ma raramente si arriva a costruire una spiegazione coerente del comportamento molecolare. Il problema non è quindi solo "capire i grafici", ma comprendere che cosa significhi usarli per prendere decisioni motivate.

1.1 La *molecular dynamics* come pratica interpretativa

In questa prospettiva, insegnare la *molecular dynamics* significa soprattutto insegnare a interpretarla. I diversi descrittori utilizzati nelle analisi rappresentano prospettive parziali sul sistema e acquistano significato solo quando vengono messi in relazione tra loro. Un esempio tipico riguarda l'inter-

pretazione congiunta di descrittori come la *Root Mean Square Deviation* (RMSD), *Root Mean Square Fluctuation* (RMSF), o indicatori di persistenza delle interazioni. Un andamento relativamente stabile dell'RMSD può suggerire che la struttura complessiva del sistema sia conservata nel tempo. Tuttavia, un'analisi dell'RMSF può evidenziare regioni con elevata flessibilità, in particolare in prossimità del sito di legame. In questo caso, una lettura superficiale porterebbe a concludere che il sistema sia stabile, mentre un'interpretazione più articolata suggerisce la presenza di dinamiche locali rilevanti per la funzione o per la stabilità del complesso. Analogamente, la persistenza delle interazioni tra ligando e proteina può fornire informazioni sulla stabilità del legame che non emergono direttamente dall'analisi delle fluttuazioni strutturali. Nessuno di questi indicatori, preso singolarmente, è sufficiente per trarre una conclusione: è il loro confronto che consente di costruire un'interpretazione plausibile. Questo tipo di ragionamento riflette da vicino la pratica scientifica, nella quale i dati non forniscono risposte immediate, ma devono essere integrati in un quadro interpretativo coerente [4, 5]. L'interpretazione diventa quindi un processo attivo, che richiede di confrontare ipotesi alternative, valutare la coerenza tra evidenze e giustificare le proprie conclusioni.

In questo contesto, l'obiettivo didattico non è semplicemente trasmettere conoscenze sui singoli descrittori, ma sviluppare la capacità di utilizzarli in modo coordinato per costruire decisioni motivate. Approcci didattici attivi risultano particolarmente adatti a tale scopo, in quanto promuovono la partecipazione, il confronto e la costruzione condivisa del significato [6, 7].

L'esperienza descritta nel presente lavoro si inserisce in questa prospettiva, proponendo un'attività basata sul *Team-Based Learning* in cui gli studenti sono chiamati a interpretare dati di *molecular dynamics* e a prendere decisioni collettive a partire da evidenze multiple.

2. L'attività didattica in un contesto di Team-Based Learning

Per affrontare le difficoltà legate all'interpretazione dei dati di *molecular dynamics*, è stata progettata un'attività didattica basata sul Team-Based Learning (TBL). La scelta di questo approccio è motivata dalla sua coerenza con l'obiettivo di sviluppare competenze interpretative: il TBL, infatti, mette gli studenti nella condizione di confrontare punti di vista diversi, esplicitare il proprio ragionamento e costruire decisioni condivise a partire da evidenze.

L'attività è stata implementata all'interno di un insegnamento di chimica fisica in un corso di laurea magistrale per biotecnologi e ha coinvolto un numero limitato di studenti, con background eterogenei. In questo contesto, il lavoro in piccoli gruppi e la strutturazione delle fasi si sono rivelati elementi fondamentali per sostenere il processo di apprendimento.

2.1 Il Team-Based Learning

Il Team-Based Learning (TBL) è un approccio di apprendimento cooperativo strutturato che combina preparazione individuale, lavoro in gruppi stabili e attività applicative basate su decisioni condivise. A differenza di forme più informali di lavoro di gruppo, il TBL prevede una sequenza precisa di fasi e una forte responsabilità individuale, che si integra con la costruzione collettiva della conoscenza [8]. Un elemento centrale del TBL è la formazione di gruppi eterogenei e stabili nel tempo. Nel caso descritto, i gruppi sono stati costruiti tenendo conto del background degli studenti e del loro livello di preparazione, in modo da distribuire competenze diverse all'interno di ciascun team. Questo ha favorito il confronto tra punti di vista differenti e ha reso la discussione una componente essenziale del processo di apprendimento. L'attività si è articolata secondo la sequenza mostrata in figura 1.

La prima fase prevede una preparazione individuale, nella quale gli studenti studiano materiali introduttivi sui concetti di base della *molecular dynamics* e sui principali descrittori utilizzati per analizzarne i risultati. Questa fase è fondamentale per garantire una partecipazione attiva alle fasi successive.

Segue un test di prontezza individuale (i-RAT), composto da domande a scelta multipla, che ha lo scopo di verificare la comprensione dei concetti chiave e rendere esplicite eventuali difficoltà. Lo stesso test viene poi ripetuto in gruppo (t-RAT), richiedendo agli studenti di discutere le risposte e raggiungere un consenso. Questa fase non ha solo una funzione valutativa: il confronto tra pari permette di chiarire fraintendimenti, mettere a confronto interpretazioni diverse e costruire una base condivisa di comprensione.

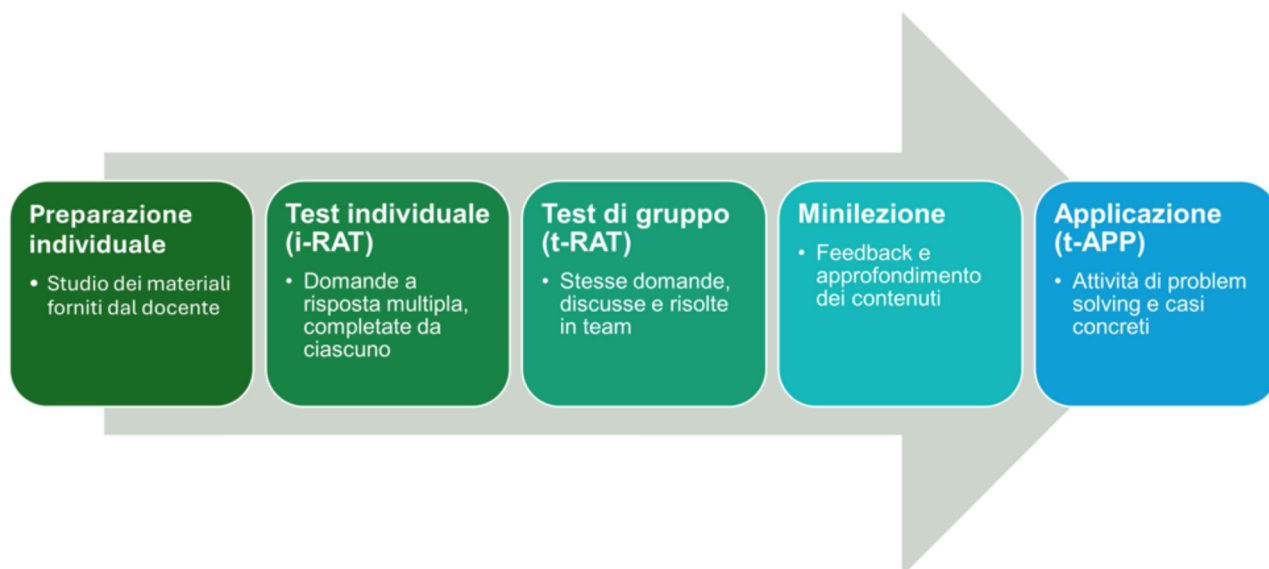


Figura 1. Struttura dell'attività di *Team-Based Learning*: preparazione individuale, test di prontezza individuale (i-RAT), test di gruppo (t-RAT), fase di chiarimento e attività applicativa (t-APP)

Dopo una breve fase di chiarimento guidata dal docente, si passa all'attività applicativa da svolgere in gruppo (t-APP), che rappresenta il cuore del TBL. In questa fase agli studenti viene proposto un problema complesso, per il quale non esiste una risposta immediata o univoca, e viene richiesto di prendere una decisione motivata.

Nel caso specifico, l'attività è stata progettata a partire da uno studio reale di *molecular dynamics* su una proteasi virale [9], opportunamente semplificato a fini didattici. Gli studenti, organizzati nei loro gruppi, hanno analizzato dataset contenenti diversi descrittori strutturali e dinamici e sono stati chiamati a selezionare il candidato più promettente tra più sistemi leganti/proteina, giustificando la loro scelta sulla base dei dati disponibili.

Un aspetto cruciale della progettazione è che nessun indicatore, preso singolarmente, è sufficiente per rispondere alla domanda. Gli studenti devono quindi confrontare e integrare informazioni diverse, passando da una lettura descrittiva dei grafici a una valutazione complessiva del comportamento molecolare. In questo senso, la struttura del TBL risulta particolarmente coerente con l'obiettivo di sviluppare una competenza interpretativa.

2.2 L'uso dell'intelligenza artificiale come supporto al ragionamento

Durante la fase applicativa è stato introdotto un agente (*Isacco*) basato su intelligenza artificiale (AI), utilizzando in particolare ChatGPT 5.1, configurato come "tutor socratico". L'uso dell'AI è stato concepito come supporto alla riflessione, non come strumento per ottenere rapidamente una risposta. In linea con quanto discusso nella letteratura recente sull'impiego delle tecnologie generative in educazione, l'efficacia di questi strumenti dipende, infatti, in modo decisivo dal modo in cui vengono integrati nel design didattico [10].

L'obiettivo non era fornire agli studenti un sistema in grado di risolvere il problema, ma un interlocutore capace di stimolare il ragionamento attraverso domande e richieste di giustificazione. Questo approccio si ispira ai principi del tutoring socratico, nei quali il supporto non consiste nel fornire soluzioni, ma nel guidare progressivamente il processo di interpretazione [11, 12].

Isacco è stato configurato attraverso un insieme di istruzioni di sistema progettate per vincolarne il comportamento. Al sistema è stato fornito accesso agli stessi materiali didattici degli studenti, incluse le slide del corso, gli articoli introduttivi e la descrizione del caso, in modo da garantire coerenza con il contesto disciplinare e con il livello di approfondimento richiesto. L'aspetto più rilevante è che

Isacco è stato esplicitamente costretto a non fornire risposte dirette. Le istruzioni prevedevano, ad esempio, il divieto di indicare quale fosse il candidato migliore, il divieto di correggere esplicitamente le risposte degli studenti e l'obbligo di porre domande, richiedere chiarimenti e suggerire confronti tra diversi descrittori.

3. Implementazione e risultati dell'esperienza

L'attività è stata implementata in due incontri consecutivi di due ore ciascuno, seguendo la struttura descritta nella sezione precedente. Il primo incontro è stato dedicato alla fase di preparazione e alla *readiness assurance* (i-RAT e t-RAT), nonché alla minilezione di approfondimento, mentre il secondo è stato interamente riservato all'attività applicativa (t-APP). Dal punto di vista operativo, tutti i gruppi hanno lavorato sullo stesso dataset e sullo stesso problema decisionale.

Uno degli aspetti più rilevanti emersi riguarda il modo in cui gli studenti affrontano l'interpretazione dei dati. In una prima fase, le analisi tendono a concentrarsi su un singolo indicatore, ad esempio l'R-MSD; la discussione di gruppo porta, però, a considerare altri descrittori e a rivedere le conclusioni iniziali. Il requisito di una decisione condivisa spinge gli studenti a esplicitare le proprie ipotesi, confrontarle e giustificare la scelta finale.

Anche la fase iniziale ha avuto un ruolo importante. Come tipico nel TBL, le prestazioni nei test di gruppo risultano superiori a quelle individuali, ma soprattutto il confronto tra pari aiuta a chiarire i concetti e a costruire un linguaggio condiviso, facilitando l'ingresso nella fase applicativa, in cui è richiesto un uso coordinato dei descrittori. Per quanto riguarda l'uso dell'intelligenza artificiale, l'agente è stato utilizzato in modo selettivo e non sistematico. Gli studenti tendevano a ricorrervi in momenti di incertezza o per verificare la coerenza delle proprie interpretazioni, piuttosto che come fonte primaria di risposta. Questo uso "moderato" è risultato coerente con l'obiettivo di mantenere il focus sull'attività di gruppo e sulla responsabilità degli studenti nel processo decisionale.

4. Conclusioni

Alla luce dell'implementazione, è possibile proporre una breve analisi dei punti di forza e delle criticità dell'approccio adottato.

Tra i principali punti di forza emerge l'elevato livello di coinvolgimento degli studenti, sostenuto dalla dimensione collaborativa e dalla presenza di un compito autentico. L'attività favorisce, inoltre, lo sviluppo di competenze trasversali, come la capacità di argomentare, confrontare interpretazioni e giustificare le proprie scelte sulla base dei dati.

Accanto a questi aspetti, emergono alcune criticità. La progettazione e la gestione dell'attività richiedono un investimento significativo in termini di tempo e competenze didattiche, mentre la complessità del compito può rappresentare una difficoltà nelle fasi iniziali. Anche l'integrazione dell'intelligenza artificiale richiede attenzione, per evitare un uso passivo e mantenere il focus sul processo di interpretazione.

Questi elementi mettono in evidenza un aspetto centrale: l'efficacia di approcci come il Team-Based Learning non dipende solo dalla struttura dell'attività, ma anche dal livello di preparazione con cui vengono progettati e implementati. In tal senso, assume un ruolo fondamentale la formazione dei docenti; l'implementazione dell'attività è stata, infatti, possibile anche grazie alla formazione che hanno ricevuto tramite il *Teaching and Learning Center* (TLC-CIMDU) [13] e al Progetto Mentore [14] dell'Università degli studi di Palermo.

Esperienze di questo tipo mostrano come un approccio centrato sull'interpretazione e sulla decisione possa contribuire a rendere la didattica della chimica fisica più accessibile e significativa per studenti con background diversi, avvicinandola maggiormente alla pratica scientifica reale.

Riferimenti bibliografici

- [1] L. A. E. Tibell, C.-J. Rundgren, Educational challenges of molecular life science: characteristics and implications for education and research, *CBE Life Sci. Educ.*, 2010, **9**(1), 25-33 (<https://doi.org/10.1187/cbe.08-09-0055>).
- [2] A. H. Johnstone, Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem, *J. Comput. Assist. Learn.*, 1991, **7**(2), 75-83 (<https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>).
- [3] D. E. Elmore, Why should biochemistry students be introduced to molecular dynamics simulations - and how can we introduce them?, *Biochem. Mol. Biol. Educ.*, 2016, **44**(2), 118-123 (<https://doi.org/10.1002/bmb.20943>).
- [4] Multiple representations in chemical education, in *Models and Modeling in Science Education* (Eds., J. K. Gilbert, D. Treagust), Springer Netherlands, Dordrecht, 2009, Vol. 4 (<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8>).
- [5] N. J. Nersessian, *Creating scientific concepts*, MIT Press, 2010.
- [6] S. Freeman, S. L. Eddy, M. McDonough, et al., Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2014, **111**(23), 8410-8415 (<https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>).
- [7] M. T. H. Chi, Active-constructive-interactive: a conceptual framework for differentiating learning activities, *Top. Cogn. Sci.*, 2009, **1**(1), 73-105 (<https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01005.x>).
- [8] L. K. Michaelsen, M. Sweet, The essential elements of Team-Based Learning, *New Dir. Teach. Learn.*, 2008, **2008**(116), 7-27 (<https://doi.org/10.1002/tl.330>).
- [9] Y. L. Weng, S. R. Naik, N. Dingelstad, M. R. Lugo, S. Kalyaanamoorthy, A. Ganesan, Molecular dynamics and in silico mutagenesis on the reversible inhibitor-bound SARS-CoV-2 main protease complexes reveal the role of lateral pocket in enhancing the ligand affinity, *Sci. Rep.*, 2021, **11**(1), 7429 (<https://doi.org/10.1038>).
- [10] E. Kasneci, K. Sessler, S. Küchemann, et al., ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education, *Learn. Individ. Differ.*, 2023, **103**, 102274 (<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>).
- [11] A. C. Graesser, P. Chipman, B. C. Haynes, A. Olney, AutoTutor: an intelligent tutoring system with mixed-initiative dialogue, *IEEE Trans. Educ.*, 2005, **48**(4), 612-618 (<https://doi.org/10.1109/TE.2005.856149>).
- [12] K. VanLehn, The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems, *Educ. Psychol.*, 2011, **46**(4), 197-221 (<https://doi.org/10.1080/00461520.2011.611369>).
- [13] A. M. Maggio, R. Lombardo, D. Chillura Martino, La formazione e l'aggiornamento dei docenti chimici dell'Università di Palermo: le attività del Progetto Mentore e del TLC-CIMDU, *CnS*, 2024, **4**, 4-16 (<https://chimicanellascuola.it/index.php/cns/article/view/198/332>).
- [14] G. Scaccianoce, O. Scialdone, R. Lombardo, I dieci anni del Progetto Mentore all'Università degli Studi di Palermo, in *Mentoring e Didattica Universitaria*, Collana del TLC-CIMDU, Palermo University Press, Palermo, 2024, pp. 159-163.

Le forze intermolecolari e gli stati condensati attraverso l'angolo di contatto

Rosa di Mundo

Liceo Scientifico e Artistico "G. Galilei" di Bitonto (BA)

e-mail: rosa.dimundo@lsgalilei.eu; rosadimundo@gmail.com

Abstract. This paper shows methodologies and results of a laboratory course in the frame of the POC program addressed to scientific high school students. The main objective of the activity was the use of contact angle measurements in a simple and easy to handle mode to explore surface properties of liquids and solids and search correlations with intermolecular forces. As a final task students have fabricated a superhydrophobic wood surface and have been guided in the interpretation of this extreme interface behavior.

Keywords: angolo di contatto; acqua; forze intermolecolari; legno superidrofobo; effetto loto

1. Introduzione

L'energia superficiale è una proprietà della materia ampiamente esplorata nella ricerca scientifica e tecnologica. Basti pensare ai numerosi lavori prodotti negli ultimi anni per comprendere il comportamento di materiali superidrofili o superidrofobi sia presenti in natura [1] sia al fine di fabbricarli artificialmente con numerose tecniche [2, 3]. Per contro, nella didattica liceale questo argomento è trattato solo marginalmente: sui testi più utilizzati, qualora presente, è riportato a margine delle sezioni dedicate alle forze intermolecolari. Ad esempio, si parla di tensione superficiale in riferimento alle forze intermolecolari esistenti nello stato liquido in correlazione ad altre proprietà come la tensione di vapore o la viscosità. In questo contesto è definita come la tendenza delle molecole della superficie a lasciarsi attrarre verso l'interno ed è tanto maggiore quanto più intense sono le forze attrattive tra le molecole del liquido [4].

Le forze intermolecolari costituiscono un cardine nell'insegnamento della chimica in quanto forze alla base della coesione della materia e, pertanto, sarebbe opportuno organizzare forme di sperimentazione adatte all'ambito liceale per rafforzarne l'apprendimento.

La tecnica dell'angolo di contatto è di uso comune nei laboratori di ricerca in cui si pratica la caratterizzazione chimico-fisica delle superfici solide e dei liquidi. L'angolo di contatto è la misura dell'angolo formato all'interfaccia tra un liquido, un solido e un gas (o un altro liquido). È definito dall'equazione di Young, la relazione matematica che definisce l'angolo di contatto ideale in base alle tensioni interfacciali tra solido, liquido e vapore [5]. È stato mostrato come da questa relazione discenda la possibilità di ottenere informazioni indirette sull'energia superficiale del liquido poiché, a parità di superficie solida, l'angolo di contatto diminuisce al diminuire dell'energia superficiale del liquido.

Ancora più sfruttata è la possibilità di determinare indirettamente l'energia superficiale del solido dal momento che uno stesso liquido mostra angoli di contatto più bassi su superfici con maggiore energia superficiale. Questa tematica offre notevoli potenzialità didattiche, ma difficilmente può essere trattata nella didattica curricolare di un liceo. Per tali ragioni ho realizzato un percorso laboratoriale sul tema, nell'ambito del progetto "Scienze Lab" del Programma Operativo Complementare (POC) 2025-26, svoltosi in orario pomeridiano, a dicembre 2025, con 20 studenti di classi diverse del terzo e quarto anno.

Agli studenti ho proposto un approccio semplice alla tecnica dell'angolo di contatto, al fine di indagare differenze nel comportamento dei liquidi e dei solidi che potessero poi essere interpretate in base

alle conoscenze acquisite sulle forze intermolecolari. Una volta appreso il metodo di misura e alcune sue potenzialità, è stato proposto un esperimento di fabbricazione di materiale superidrofobo (effetto Loto) realizzabile in un laboratorio didattico.

2. Metodologia e materiali

Il percorso laboratoriale è progettato in modo da risultare facilmente fruibile dagli studenti liceali del terzo anno che abbiano già affrontato il legame chimico, il concetto di polarità, le forze intermolecolari e la diversa intensità che possono presentare. I ragazzi hanno lavorato in gruppi di due-tre in attività organizzate secondo una metodologia di apprendimento attivo: dopo una breve presentazione, hanno lavorato autonomamente muniti di un foglio di lavoro con alcune essenziali indicazioni, tabelle per la raccolta dati e domande/stimoli all'interpretazione personale, da riportare sullo stesso foglio e da usare come base per dei momenti di discussione collettiva.

L'angolo di contatto è stato misurato con il metodo della goccia sessile, cioè analizzando il profilo di una goccia depositata su una superficie [6, 7]. A questo scopo sono state utilizzate pipette monouso o Pasteur per depositare delicatamente piccole quantità di liquido (diametro della goccia non superiore ai 2-3 mm) che sono state poi riprese frontalmente con un dispositivo con funzione di fotocamera come un tablet o, qualora permesso, uno smartphone. L'immagine è stata elaborata con applicazioni disponibili in rete (Angle Meter o similari) idonee a misurare l'angolo tra l'interfaccia solido-liquido e la tangente al profilo della goccia nel punto in cui interseca la superficie. (Figura 1).

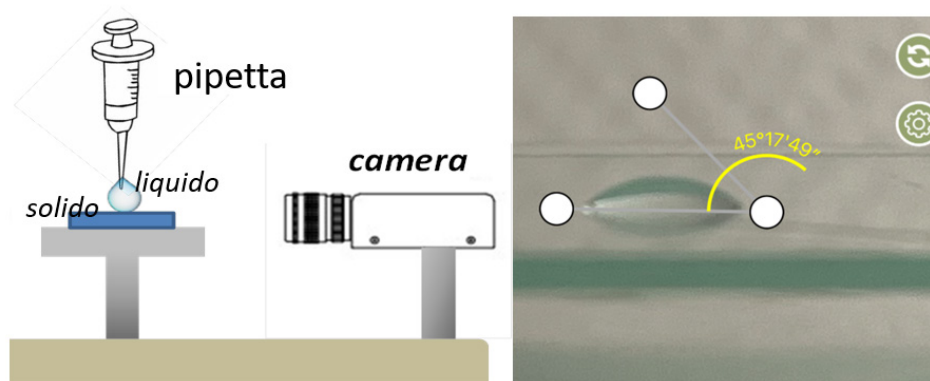


Figura 1. Schema del sistema di misura dell'angolo di contatto, usando come fotocamera un tablet posizionato per una ripresa frontale; nell'immagine a destra un esempio di elaborazione dell'immagine della goccia mediante un'applicazione per la misura di angoli

La misura, per rispettare una gradualità didattica, è stata effettuata solo in modalità statica, sebbene ulteriori informazioni potrebbero derivare da misure con la goccia in movimento [7]. I valori riportati sono mediati su almeno tre misurazioni considerando un'incertezza massimo-minimo di 4°.

Il percorso è stato articolato in tre fasi.

- 1) Confronto tra liquidi: misura di angolo di contatto per acqua distillata, etanolo ed esano (Sigma-Aldrich) su una superficie solida di riferimento.
- 2) Confronto tra superfici solide: misura di angolo di contatto di acqua su diversi materiali solidi per testarne il carattere idrofilo o idrofobo.
- 3) Fabbricazione di una superficie con effetto loto.

Nella seconda fase i materiali solidi utilizzati sono vetro (vetrino portaoggetti), marmo di Carrara levigato, plastica poliolefinica (Parafilm), alluminio (foglio di alluminio laminato) e legno (essenza di rovere, non trattato). Le superfici di tali materiali sono state analizzate così come ricevute nel loro confezionamento, dopo aver riscontrato l'assenza di macchie o irregolarità macroscopiche.

Nella fase di fabbricazione è stata usata una soluzione spray, parte di un kit didattico della Advanced Materials Science, consigliato per superfici porose, legno o pietra. La soluzione spruzzata è stata lasciata asciugare per 24 ore. Uno stereoscopio digitale (Celestron 44308) è stato utilizzato per osservare la superficie del legno.

3. Risultati

In figura 2a è possibile osservare la differenza tra l'assetto della goccia sul vetrino portaoggetti nel caso di acqua distillata, etanolo ed esano. Il vetro è quindi usato come superficie solida di riferimento per la sua stabilità chimica e per la sua superficie particolarmente liscia. La misura del valore dell'angolo di contatto è al limite della fattibilità per l'etanolo e l'esano, dato il pronunciato spandersi del liquido sulla superficie; tuttavia, per l'etanolo è possibile rilevare una lieve inclinazione nel profilo del liquido alla quale si può attribuire un valore di 5° , mentre per l'esano si osserva uno spandimento completo del liquido depositato al quale è stato assegnato un valore di 0° . Per l'acqua, invece, gli studenti hanno rilevato una netta differenza registrando un angolo di contatto di 45° . Hanno così apprezzato in modo diretto una proprietà dei liquidi di cui si può far esperienza nel quotidiano, ma su cui difficilmente si focalizza l'attenzione. Gli studenti sono stati poi stimolati a interpretare i risultati cercando una correlazione con le forze intermolecolari da loro studiate nel corso curricolare di Scienze Naturali.

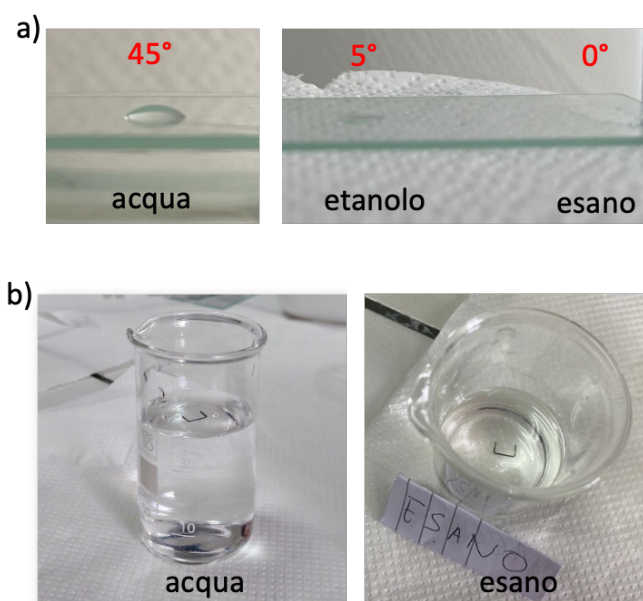


Figura 2. a) Immagini delle gocce di acqua, etanolo ed esano su vetrino porta-oggetti con l'indicazione dell'angolo di contatto misurato; b) test della spilla appoggiata sulla superficie del liquido nel caso dell'acqua e dell'esano

Sul foglio di lavoro è stata posta la domanda *Come interpreti questi risultati? Pensi possa esistere una correlazione con le forze intermolecolari? Elabora una risposta motivata.*

Molti hanno motivato la risposta pensando all'acqua come la sostanza che presenta allo stato liquido la forza intermolecolare più forte e riportano una scala di forze a partire da quella più intensa: legame idrogeno > forza dipolo-dipolo > forze di London. Il momento di discussione comune è poi servito a spiegare che in effetti anche nell'etanolo esiste un legame idrogeno, ma meno forte rispetto all'acqua dato che la molecola presenta una parte anche apolare. Una prova empirica di tensione superficiale (ad alcuni già nota) si è avuta osservando cosa succede appoggiando una sottile spilla di ferro sulla superficie dell'acqua e dell'esano: nel primo caso galleggia, mentre nel secondo affonda (Figura 2b).

Nella seconda fase dell'esperienza si è utilizzata l'acqua come liquido di riferimento per testare la diversa adesione su materiali diversi, effettuando dunque prove di misura di angolo di contatto con acqua, *water contact angle* (WCA). I risultati ottenuti sono visibili nelle foto riportate in figura 3, utilizzate per la misura e poi rappresentati nell'istogramma di figura 4.

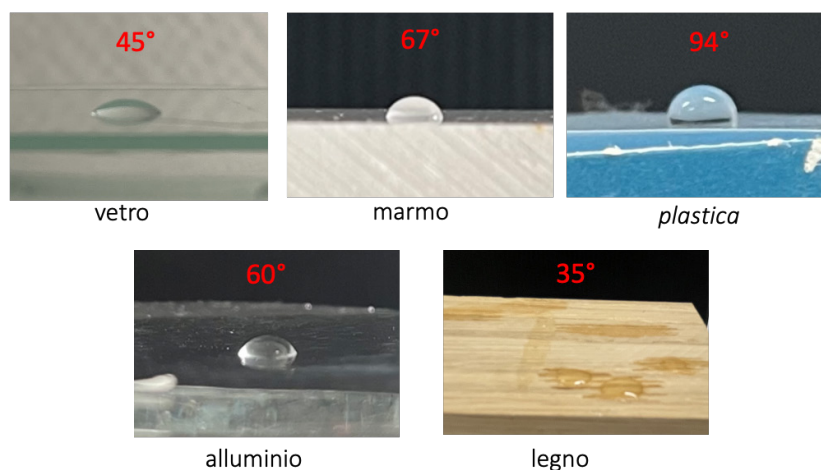


Figura 3. Immagini per la misura dell'angolo di contatto con acqua di superficie di vetro, marmo (marmo di Carrara), plastica (polimero poliolefinico, parafilm), alluminio (pellicola in alluminio per alimenti), legno (rovere)

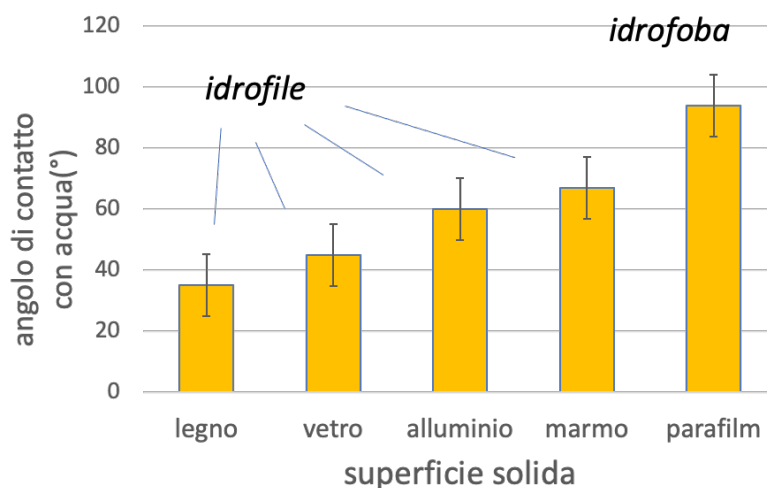


Figura 4. Istogramma dei valori di angolo di contatto con acqua per i materiali solidi esaminati

Si osserva come l'alluminio e il marmo diano gocce dal profilo simile a quella del vetro, sebbene con differenze significative di valori (rispettivamente 60 e 67°); sul legno si osserva, invece, un angolo più basso e, nel tempo, un assorbimento della goccia; infine, sul polimero plastico il valore osservato è nettamente più elevato (94°).

Sulla scheda di lavoro agli studenti è stato fornito lo schema di figura 5 che, in base al valore di angolo di contatto con acqua, suddivide le superfici solide in superidrofile, idrofile, idrofobe e superidrofobe; in questo modo gli studenti sono in grado di valutare il comportamento dei materiali presi in considerazione, riportandolo sul foglio di lavoro (e poi sull'istogramma). Il vetro, il marmo, l'alluminio, il legno possono essere considerati idrofilici, mentre solo il materiale plastico risulta idrofobo.

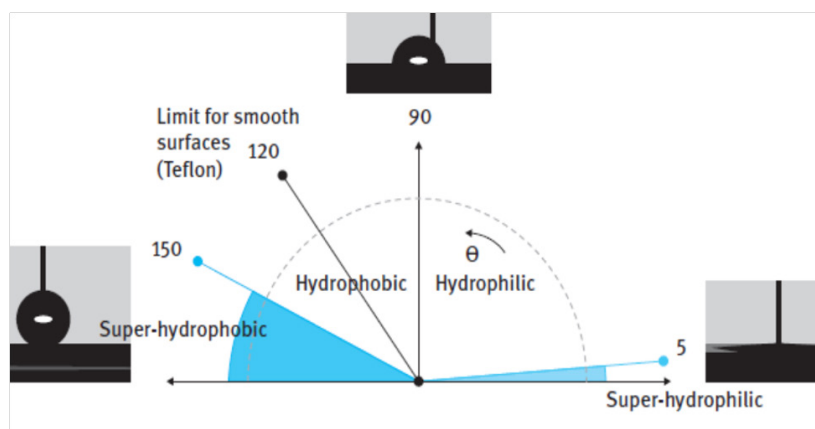


Figura 5. Classificazione delle superfici in base al valore dell'angolo di contatto osservato usando acqua

A questo punto gli studenti sono stati nuovamente stimolati a interpretare le differenze evidenziate elaborando una risposta motivata alle domande: *Come puoi spiegare il diverso comportamento idrofobo/idrofilo dei materiali osservati? Puoi interpretarlo in base alle forze intermolecolari?*

Le risposte fornite e la successiva discussione hanno mostrato una diffusa incertezza, probabilmente dovuta alla scarsa conoscenza del legame nello stato solido. Le risposte sono rimaste su un piano più generico rilevando che nel caso del materiale plastico si desume una bassa adesione tra la sua superficie e l'acqua. Nella discussione, l'interpretazione dei risultati è stata guidata presentando le caratteristiche dei legami nei solidi analizzati; in particolare, è stata messa in luce la struttura molecolare del polimero poliolefinico, facendo leva sulla conoscenza posseduta dai ragazzi sul carattere apolare delle catene idrocarburiche.

L'ultima fase del percorso, come detto, è stata dedicata alla realizzazione di una superficie superidrofoba o superficie con effetto loto. A questo scopo è stato utilizzato uno spray indicato come rivestimento per legno o pietra; si tratta di una miscela di polisilossanici, fluoroalchilici e idroformiati consigliata nel kit didattico per materiali porosi per il cui uso, in questo caso specifico, non è stata fornita una spiegazione, perché la motivazione doveva emergere solo successivamente alla realizzazione dell'esperienza. La soluzione è stata dunque spruzzata su un campione di legno della stessa tipologia di quello già analizzato, avendo cura di ricoprire tutta la superficie (cosa facilmente verificabile per l'effetto bagnato lasciato dallo spray); dopo il trattamento il campione è stato fatto asciugare per 24 h. Contestualmente, la stessa procedura è stata applicata a un vetrino, come superficie di controllo.

In figura 6 sono riportate le immagini e i relativi valori di angolo di contatto con acqua per il legno (a sinistra) e per il vetro (a destra) trattati con lo spray.

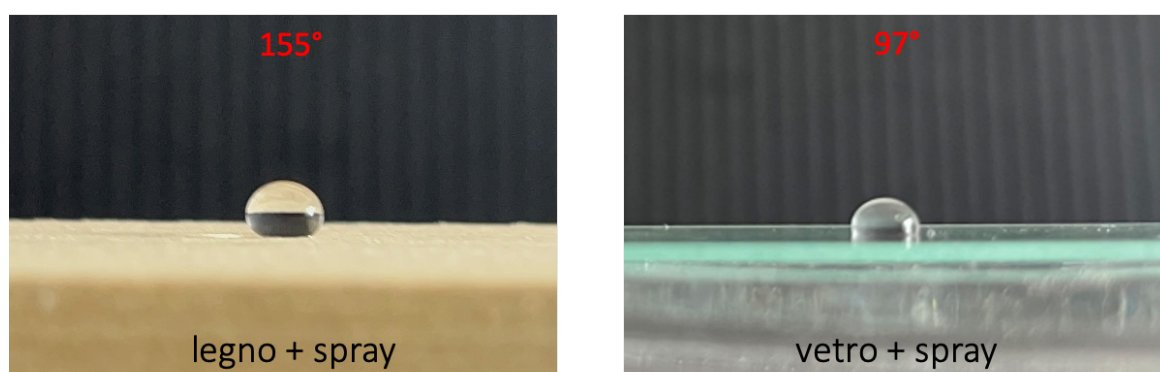


Figura 6. Goccia d'acqua e misura dell'angolo di contatto su legno (sinistra) e vetro (destra) trattati con lo spray

Il risultato sul legno ha sorpreso gli studenti sia per la quasi sfericità della goccia, sia per l'angolo pari a 155° , che permette di classificare la superficie come superidrofoba, sia per l'instabilità della stessa goccia che tendeva a scivolare via dalla superficie al minimo movimento del campione (effetto loto [2, 8]). Come detto, le misure di angolo di contatto sono state effettuate solo in modalità statica, ma questa ulteriore osservazione dinamica ha permesso di rendere più tangibili aspetti applicativi, come il carattere autopulente, antimacchia, impermeabile. Il confronto con il valore riscontrato sul vetro (solo 97°) trattato nello stesso modo ha permesso di spiegare la modalità di funzionamento di tale rivestimento. In questo caso, data la difficoltà, è stata posta la seguente domanda, più circostanziata: *Ammettendo che il rivestimento ricopra completamente il profilo della superficie solida, come puoi spiegare che il legno sia notevolmente più idrofobo?* I ragazzi sono stati, quindi, guidati nel ragionamento inducendoli a focalizzare l'attenzione sul profilo che assume una goccia d'acqua a contatto con l'aria (tende a curvarsi) e sulla diversa morfologia della superficie del legno e di quella del vetro, cioè costituzionalmente porosa la prima e compatta e liscia la seconda.

La figura 7a riporta un'immagine del campione di legno trattato che gli studenti hanno ottenuto con lo stereoscopio digitale in dotazione nel laboratorio.

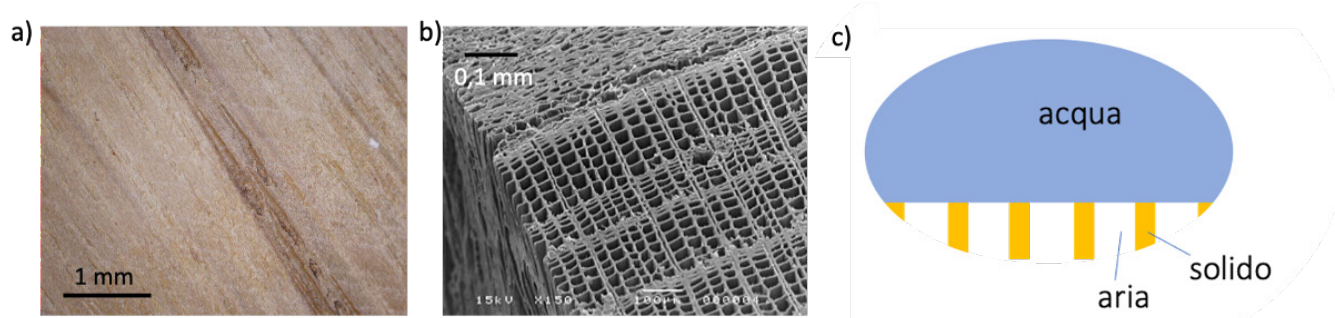


Figura 7. a) Immagine della superficie di legno con stereoscopio digitale; b) immagine una ottenuta con microscopio elettronico a scansione che rivela la porosità micrometrica (<https://it.wikipedia.org/wiki/Legno>); c) uno schema interpretativo semplificato dell'effetto superidrofobo

Con questo tipo di osservazione microscopica la superficie del legno trattato appare indistinguibile da quello del legno non trattato. L'immagine, sebbene ripresa dall'alto, rivela la presenza di protrusioni e avvallamenti sub-millimetrici ai quali, però, devono aggiungersi porosità micrometriche, tipicamente presenti nel tessuto vascolarizzato del legno, come è possibile osservare in immagini da microscopio elettronico presenti in rete (un esempio in figura 7b) e ricercate con i ragazzi. Questa particolare porosità è responsabile dell'assorbimento di acqua nel legno non trattato (idrofilo), mentre nel legno modificato con lo spray (quindi, reso idrofobo) l'acqua non riesce a penetrare e, pertanto, la sua superficie a livello microscopico è una mescolanza di solido e aria (schema in figura 7c): è la presenza di aria ad amplificare il carattere idrofobo (fino a superidrofobo) del legno trattato, come è spiegato da innumerevoli studi noti ai ricercatori nel campo dei materiali superidrofobi [8, 9].

4. Conclusione

In questo lavoro sono stati presentati i risultati di un percorso laboratoriale svolto nell'ambito dei progetti POC (percorsi complementari di Orientamento 2024-2025) realizzati nel liceo scientifico e artistico G. Galilei di Bitonto. Il percorso ha offerto la possibilità di esplorare proprietà dei materiali e relativi metodi di indagine, che difficilmente vengono presentati nelle attività curricolari, e, quindi, ha costituito sia un'occasione di ampliamento e potenziamento formativo, sia un'opportunità di orientamento rispetto al campo della ricerca scientifica e tecnologica. In particolare, ho

proposto un metodo di semplice applicazione per la misura dell'angolo di contatto che, sebbene non offra le prestazioni precise e potenti delle strumentazioni professionali, permette comunque di ricavare alcune informazioni basilari sull'energia superficiale di solidi e liquidi, che i ragazzi possono cercare di correlare alle conoscenze teoriche sulle forze intermolecolari. La sperimentazione effettuata stimola all'osservazione invitando a rilevare/misurare fenomeni ubiquitari nella vita quotidiana (il profilo di una goccia di liquido su di una superficie), su cui spesso non si pone attenzione, e incoraggia a trovare modalità autonome di indagine. La parte finale del percorso, dedicata alla fabbricazione di un legno superidrofobo ha consentito di mostrare in forma elementare come le conoscenze acquisite nella ricerca possono essere sfruttate per ottenere applicazioni e prodotti innovativi.

Ringraziamenti

Il progetto "Scienze Lab" è stato possibile grazie al Programma Operativo Complementare (POC) "Per la scuola 2014-2020", Obiettivo specifico 10.1, Azione 10.1.6 "Azioni di orientamento, di continuità e di sostegno alle scelte dei percorsi formativi, universitari e lavorativi".

Un sentito grazie agli alunni del liceo Galilei che si sono cimentati nel percorso arricchendolo di curiosità e stimoli per progetti futuri.

Riferimenti bibliografici

- [1] W. Barthlott, C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 1997, **202**, 1-8.
- [2] R. Di Mundo, F. Bottiglione, G. Carbone, Cassie state robustness of plasma generated randomly nano-rough surfaces, *Appl. Surf. Sci.*, 2014, **316**, 324-332.
- [3] A. J. Meuler, J. D. Smith, K. K. Varanasi, J. M. Mabry, G. H. McKinley, R. E. Cohen, Relationships between water wettability and ice adhesion, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, **2**, 3100-3110.
- [4] G. Valitutti, P. Amadio, M. Falasca, *Chimica: concetti e modelli*, (terza edizione), Zanichelli, Bologna, 2023.
- [5] T. R. Young, An assay on the cohesion of fluids, *Philos. Trans. Soc. R. Lond.*, 1805, **95**, 65-87.
- [6] L. Sabbatini, et al., *Polymer surface characterization*, Berlin/Boston, De Gruyter, 2014.
- [7] R. Di Mundo, F. Palumbo, Comments regarding 'an essay on contact angle measurements', *Plasma Process. Polym.*, 2010, **8**, 14-18.
- [8] D. Quéré, Non-sticking drops, *Rep. Prog. Phys.*, 2005, **68**, 2495-2532.
- [9] A. B. D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.*, 1944, **40**, 546-551.

Analisi Green delle Microplastiche nella sabbia dei litorali italiani: una proposta di *Citizen Science*

Teresa Cecchi¹ e Davide Poletto²

¹ITT "G. e M. Montani" di Fermo; ²Venice Lagoon Plastic Free, Campo S. Cosmo di Venezia

e-mail: cecchi.teresa@istitutomontani.edu.it; segreteria@plasticfreevenice.org

Abstract. Microplastics are a dramatic emerging problem for human health and ecosystems. Since we cannot pollute to quantify pollution, during the Green Chemistry and Outreach course, taught to a fifth-grade class at ITT Montani in Fermo, we evaluated the impact and effectiveness of analytical strategies currently used to monitor microplastics in sand. We worked to substantially improve them using CLIL and Inquiry-Based Learning methodology. The citizen science campaign was made possible by cooperation with the non-governmental organization Venice Lagoon Plastic Free, which coordinated the field sampling campaigns and funded them entirely through the MICRO 1.0 and 2.0 projects. Finally, we engaged in outreach campaigns as part of the EU Ocean Mission activities.

Keywords: service learning; citizen science; chimica verde; educazione civica; scoperta guidata

1. Introduzione

Viviamo in un ambiente definito come “plastisfera” a causa della presenza ubiqua della plastica nelle nostre vite. Ci stiamo accorgendo che i suoi meravigliosi vantaggi, ovvero la durabilità e la resistenza, stanno diventando un drammatico problema. L'uso di plastica riciclata è aumentato del 70% dal 2018 [1], ma le plastiche di origine fossile, rilasciate nell'ambiente sin dal loro avvento, persistono e si accumulano. A causa dei raggi ultravioletti o delle temperature estreme tendono a frammentarsi con conseguente rilascio di vari additivi [1] e generazione di mesoplastiche e microplastiche (MP), che hanno, per definizione, una dimensione inferiore ai 5 mm [3] more precisely in the Venice-Lido Port Inlet, Grand Canal under Rialto Bridge, and Saint Marc basin. In this study, MPs were analyzed through optical microscopy for their relative abundance and characterized based on their color, shape, and size classes, while the concentration and the mean of nanoparticles were estimated via the Nanoparticle Tracking Analysis technique. Bulk seawater sampling, combined with filtration through a cascade of stainless-steel sieves and subsequent digestion, facilitates the detection of MPs of relatively small sizes (size classes distribution: >1 mm, 1000–250 µm, 250–125 µm, 125–90 µm, and 90–32 µm).

Le MP sono inquinanti emergenti onnipresenti nell'ambiente e addirittura negli organismi viventi: gli impatti per la salute umana e per quella degli ecosistemi sono preoccupanti [4].

Sono stati compiuti progressi significativi per mitigare l'inquinamento da MP attraverso (i) la restrizione dell'uso di MP primarie intenzionalmente prodotte, (ii) la prevenzione della generazione di MP secondarie, attraverso il divieto di articoli in plastica monouso, (iii) la promozione di articoli riutilizzabili non tossici e (iv) lo sviluppo di plastiche biodegradabili e a base biologica [5].

L'ambiente marino è il principale recettore finale di tutte le MP rilasciate nell'ambiente [2] e per questo è ampiamente studiato. Il monitoraggio ambientale ripetuto nel tempo e su aree molto vaste è fondamentale per documentare la contaminazione attuale e capire se, nel tempo, siamo di fronte a un accumulo o a una diminuzione dell'inquinamento da MP statisticamente significativo. A questo proposito, la *citizen science*, cioè la costruzione di dati scientificamente solidi grazie alla partecipazione dei cittadini, è una risorsa cruciale. A oggi è stata determinante solo nella fase

del campionamento [6] delle MP in ambienti marini. Ciò è dovuto alle difficoltà tecniche della successiva fase analitica. Viceversa, le competenze teoriche e tecniche dei discenti dell'articolazione di Chimica e Materiali, rispetto a quelle del comune cittadino, permettono di sviluppare sia le fasi preanalitiche che analitiche nella determinazione delle MP. Le studentesse e gli studenti, sotto la supervisione dei loro insegnanti, possono essere essenziali per ampliare le capacità di ricerca e fornire un monitoraggio ambientale su base nazionale. Un'attività del genere si inquadra nella cornice pedagogica del Service Learning promossa da Ministero dell'Istruzione e del Merito (<https://www.mim.gov.it/service-learning>): l'apprendimento basato su progetti di utilità sociale e compiti di realtà sviluppa il talento mediante il coinvolgimento nel perseguire obiettivi di interesse comune.

Attualmente mancano metodi analitici standardizzati per valutare le concentrazioni di MP in vari compartimenti ambientali; ne consegue che i risultati in letteratura sono incoerenti e non confrontabili [7]. Inoltre, la scarsità di campagne di monitoraggio delle MP su vaste aree geografiche ostacola una comprensione completa del problema.

Presso L'Istituto Tecnico e Tecnologico "G. e M. Montani" di Fermo, da tre anni è stato istituito il corso di *Green Chemistry and Outreach*. Lo scopo è stimolare l'adozione di pratiche analitiche e sintetiche, ispirate ai 12 principi della chimica verde, e sviluppare la capacità di interagire con la società civile, trattando le cogenti sfide contemporanee come ottimi spunti di apprendimento. Nel corso, come metodologie didattiche, si utilizzano il CLIL, per favorire il multilinguismo necessario nel mondo scientifico e l'*Inquiry Based Learning* (IBL), per porre studenti e studentesse al centro del processo formativo, stimolando la curiosità e il pensiero critico, la capacità di indagine autonoma, la sperimentazione per risolvere problemi reali e costruire attivamente la propria conoscenza. Il corso, unico in Italia, valorizza un insegnamento *research oriented* secondo il modello della Ricerca-Azione Partecipata, un approccio alla produzione della conoscenza che cerca di capire il mondo e trasformarlo [8]. Convinti che la *citizen science* permetta l'apprendimento significativo e un servizio alla società e rappresenti un'enorme risorsa per l'urgente necessità di ricerca nel campo dell'analisi delle MP, si è costruita un'unità di apprendimento estremamente motivante. Abbiamo intrecciato Green Chemistry ed Educazione Civica: il problema scientifico complesso può diventare, infatti, un'opportunità per formare cittadini consapevoli, responsabili e attivi; per questo sono state anche progettate attività di disseminazione e comunicazione a vari livelli.

Di seguito è descritto lo scenario di apprendimento costruito per la determinazione delle MP nella sabbia di un'oasi del WWF a Venezia: dopo un brainstorming iniziale, partito da domande stimolo che hanno scandito le varie fasi del percorso didattico, durato per l'intero anno scolastico, la classe è stata guidata a realizzare un processo analitico più logico e più "verde" di quelli disponibili nella letteratura.

2. Brainstorming e IBL

Le attività sono iniziate mettendo le studentesse e gli studenti di fronte al problema ambientale descritto nell'Introduzione e chiedendo loro di documentarsi per poter partecipare nel miglior modo possibile alla fase di brainstorming. Sono stati indicati e forniti i riferimenti bibliografici più recenti sulle varie procedure analitiche. L'esame critico delle metodiche esistenti nella letteratura scientifica internazionale ha permesso di evidenziare che le procedure sono variegiate, ma quasi tutte/i condividono la proposta presente in una pubblicazione della National Oceanic and Atmospheric Administration [9].

È stata sottolineata la mancanza di protocolli ufficiali e la lacuna legislativa, a livello europeo e mondiale, circa i limiti di concentrazione tollerabili per le MP in vari comparti ambientali.

Si è preso atto dei limiti delle varie procedure o in termini di efficacia o in termini di *greenness*, cruciale nel contesto educativo scolastico e culturale nel senso più ampio.

L'obiettivo condiviso ha riguardato lo sviluppo di una strategia analitica efficace, ma al tempo stesso

non inquinante, per misurare l'inquinamento da MP e la sua applicazione in una campagna pilota di *citizen science*. La campagna è stata sviluppata grazie alla cooperazione con Venice Lagoon Plastic Free (VLPF), un'organizzazione no-profit fondata nel 2019 che utilizza il sito Patrimonio Mondiale UNESCO di Venezia e della sua Laguna, come laboratorio per la prevenzione, il monitoraggio e la mitigazione dell'inquinamento da plastica. VLPF ha coordinato l'intera iniziativa MICRO1.0 e 2.0 (Microplastics Investigation for Comprehensive Research and Observation), definendo il disegno sperimentale, selezionando i siti rappresentativi e finanziando le attività sul campo grazie al supporto di IMG Group.

Prima domanda stimolo: Come svolgere un campionamento efficiente e rappresentativo?

L'Oasi Alberoni del WWF nel Lido di Venezia è il sito di campionamento prescelto per il valore simbolico della natura incontaminata. L'associazione Venice Lagoon Plastic Free ha interamente finanziato la campagna di campionamento delle MP iniziata il 15 novembre 2024, in condizioni di mare calmo, assenza di precipitazioni e bassa marea, a cui hanno partecipato le studentesse e gli studenti della classe 5CMA. VLPF ha curato l'intera organizzazione logistica: il coordinamento con le autorità locali, le autorizzazioni per operare nell'Oasi, il trasporto e la conservazione dei campioni, e il collegamento con i media e le istituzioni del territorio. L'approccio integrato ha previsto, parallelamente al campionamento delle microplastiche, il monitoraggio del macrolitter spiaggiato, mediante strumenti digitali sviluppati da VLPF nell'ambito dei progetti Horizon Europe delle missioni Oceano REMEDIES e SeaClear2.0, consentendo la classificazione codificata, la conta e la pesatura dei rifiuti secondo gli standard EMODnet.

L'estensione dell'area da campionare è stata scelta come compromesso fra la rappresentatività e una operatività ragionevole. Sono stati svolti dei calcoli temporali. Volendolo terminare l'attività in circa 3 ore al massimo, si è proposto un campionamento a telaio in tre posizioni equidistanti 5 m l'una dall'altra sulle linee di bassa marea, intertidale e alta marea, lungo cinque transetti ortogonali alla battigia, distanti 25 m l'uno dall'altro. In questo modo, è stato possibile campionare 15 posizioni e 1.000 m² di spiaggia (Figura 1). In ogni posizione, la sabbia è stata prelevata ai vertici e al centro di un quadrato di 50 cm per 50 cm, fino a una profondità di 5 cm, utilizzando un cucchiaino di acciaio inossidabile. Quindi in totale la sabbia è stata prelevata in 75 punti.

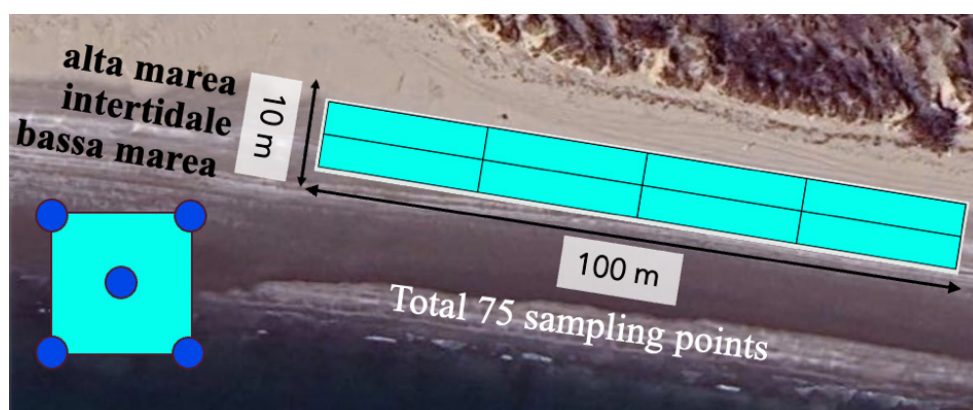


Figura 1. Sito di campionamento, quadro di campionamento con 15 punti di campionamento e quadrato con 5 punti di campionamento

Si è, inoltre, discussa l'importanza di avere un campione composito, per cui si è deciso di unire la sabbia di tutti i punti campionati nella linea di bassa marea mescolandola in un contenitore di vetro con tappo metallico a vite; la stessa procedura è stata ripetuta per la linea di battigia e la linea intertidale; i contenitori sono stati trasferiti in laboratorio e conservati a 4 °C prima dell'analisi.

Seconda domanda stimolo: Quali precauzioni dobbiamo prendere per evitare che il campione si contamini con MP provenienti dal laboratorio?

Poiché le MP sono ubiquo e anche presenti nell'aria indoor abbiamo cercato di capire come evitare la contaminazione dei campioni durante il loro processamento laboratoriale.

Prima di qualsiasi operazione, le superfici di lavoro sono state pulite con acqua ultra-pura filtrata Milli-Q ($0,45\ \mu\text{m}$). La vetreria da laboratorio è stata lavata in lavastoviglie e asciugata in un forno. Tutti i camici indossati sono stati in cotone. Il tempo di esposizione dei campioni all'aria è stato limitato il più possibile. I contenitori di vetro sono sempre stati coperti.

L'esperimento è stato eseguito in triplicato e per la correzione dei risultati è stato utilizzato un controllo negativo in bianco, contenente la sabbia campionata posta a $700\ ^\circ\text{C}$ in muffola per un giorno ed usando tutti i reagenti come per il campione. In questo modo si è tenuto conto della contaminazione residua ineliminabile anche prendendo tutte le precauzioni.

Terza domanda stimolo: A quale temperatura è bene essiccare la sabbia?

La domanda permette di recuperare concetti della chimica dei polimeri, familiari per studentesse e studenti del quinto anno. Anche se autorevoli rapporti tecnici raccomandano una temperatura di asciugatura elevata, fino a $90\ ^\circ\text{C}$ [10], si è discusso su quale potesse essere la temperatura di essiccazione ottimale per evitare la degradazione dei polimeri termoplastici: si è scelto di essiccare a $40\ ^\circ\text{C}$ tenendo conto della transizione vetrosa del nylon [11], la più bassa fra quelle dei comuni polimeri.

Quarta domanda stimolo: Come isolare le MP dalla sabbia con un metodo efficiente ma rispettoso dell'ambiente e della salute?

La prima ipotesi proposta è stata la setacciatura della sabbia, ma subito è stata scartata data la simile dimensione dei granelli di sabbia e delle MP. Si è presto intuito che le densità delle MP e della sabbia sono ben diverse, per cui in una soluzione avente una densità superiore a quella delle MP, ma inferiore a quella delle particelle inorganiche (granelli di sabbia e frammenti di conchiglie), le MP galleggiano, mentre le altre precipitano nel fondo del contenitore. Poiché il galleggiamento sulla base del principio di Archimede è un fenomeno studiato anche nella scuola secondaria di primo grado ed è uno dei fenomeni esplorati fin dall'infanzia, questo esperimento si presta molto bene ad eventi di *Outreach* dedicato a bambine e bambini.

Un gruppo di studenti ha, dunque, ricercato le densità dei polimeri più comuni: tutti, tranne il PTFE, dovrebbero galleggiare in una soluzione la cui densità è pari o superiore a $1,45\ \text{g/ml}$ [12] so-called microplastics (particle size, $1\text{--}5,000\ \mu\text{m}$, mentre la sabbia, la cui densità è di circa $2,65\ \text{g/ml}$, dovrebbe affondare. Si è, però, anche trovato che la densità finale della plastica può differire da quella del polimero a causa degli additivi (plastificanti, stabilizzanti UV, pigmenti e riempitivi) o per modifiche ambientali dovute ai raggi UV, biofouling e adsorbimento di minerali [13].

Un altro gruppo di studenti ha invece ricercato i soluti da considerare per avere soluzioni ad alta densità. Dallo screening basato solo sulla densità si è passati a considerare la sicurezza ed eventuali interazioni con gli analiti (ad es., depolimerizzazione delle MP) o con gli altri comuni reattivi (ad es., l'acqua ossigenata che si usa per rimuovere la materia organica). La figura 2 presenta 19 soluzioni in ordine di densità crescente con le principali limitazioni associate a ciascun specifico soluto.

Quindi, la soluzione ideale dovrebbe:

- avere una densità di almeno $1,45\ \text{g/ml}$
- non presentare alcun rischio per gli organi interni (sicurezza per l'operatore)
- non creare alcun danno all'ambiente acquatico
- non reagire con H_2O_2 , utilizzata per rimuovere la materia organica
- non avere un pH basso (poliammidi possono depolimerizzare)
- non avere un pH elevato (poliesteri possono depolimerizzare)
- non presentare una viscosità elevata
- avere caratteristiche di economicità

Saturated solutions	D (g/ml)	Pictogram
Sodium Chloride	1.2	
Sodium hexametaphosphate	1.3	
Calcium Chloride	1.4	
Sucrose	1.45	⚠
Iron (III) Chloride	1.5	⚠ ☠
Calcium Nitrate (1€/kg)	1.50	⚠ ☠
Xylitol	1.50	
Potassium Formate (90€/kg)	1.57	
Sodium Silicate	1.6	⚠ ☠ ☠
Zinc Chloride	1.6-1.7	⚠ ☠ ☠
Sodium Iodide	1.6	⚠ ☠ ☠
Potassium Iodide	1.7	☠
Calcium/Strontium Bromide (320€/kg)	1.8	⚠
Cesium Chloride	1.90	☠
Zinc Bromide	1.99	⚠ ☠ ☠
Cesium Iodide	2.4	☠ ☠
Cesium Formate	2.4	⚠ ☠
Potassium Carbonate	2.43	⚠
Sodium/Cesium tungstate (800€/kg)	2.8	⚠

Figura 2. Possibili soluti in grado di fornire mezzi di separazione ad alta densità, classificazione di pericolo e il pittogramma (Regolamento (CE) n. 1272/2008): i soluti sono disposti in ordine di densità crescente e sono evidenziati in rosso, se procurano danno agli organi, in giallo, se sono potenzialmente pericolosi a livello di pH a causa dell'idrolisi del polimero o della reazione con il perossido di idrogeno, in marrone, se la viscosità è troppo elevata; in arancione è riportato il costo, quando troppo elevato

Alla luce di questi requisiti si sono studiati criticamente i metodi generalmente applicati nella letteratura scientifica per permettere il galleggiamento delle MP.

Il cloruro di sodio è uno dei soluti più utilizzati [14] perché è economico, non pericoloso e rispettoso dell'ambiente. Tuttavia, tutte le MP con densità superiore a 1,2 g/ml, incluso il PET ampiamente diffuso, non verrebbero recuperate. Allo stesso modo, le densità delle soluzioni di esametafosfato di sodio e cloruro di calcio non danno densità sufficienti. Si sono, dunque, evidenziate le conseguenze dell'uso delle soluzioni con densità non sufficientemente alte: le MP verrebbero sottostimate.

Il cloruro di zinco è il sale prevalente utilizzato [13] per garantire un elevato recupero di MP; il politungstato di sodio, nonostante sia molto costoso, è raccomandato perché anche il polimero più denso, ovvero il PTFE, potrebbe galleggiare nella sua soluzione. Però, dato che questo polimero è presente nelle MP in minima percentuale e che entrambi questi sali minacciano la vita acquatica con effetti di lunga durata, il loro utilizzo è da escludere.

L'analisi della letteratura ha, quindi, rafforzato l'idea che si potesse incrementare la *greenness* della procedura e questa consapevolezza ha reso le successive attività particolarmente motivanti.

Il cloruro di ferro (III) non è stato considerato un soluto adatto a causa del pH acido delle sue soluzioni, che potrebbe depolimerizzare le poliammidi. Il carbonato di potassio è stato utilizzato nella valutazione delle MP nella sabbia, ma lo ione carbonato è fortemente basico e il pH alcalino della soluzione potrebbe depolimerizzare i poliesteri. Diversi ioduri e bromuri potrebbero reagire con il perossido di idrogeno, necessario per ossidare la sostanza organica residua; pertanto, non possono essere utilizzati. Inoltre, il loro impiego comporterebbe ulteriori problematiche tossicologiche e ambientali. L'elevatissima viscosità delle soluzioni di silicato di sodio, xilitolo e saccarosio impedisce alle

MP di galleggiare in tempi ragionevoli. Infine, la soluzione di formiato di potassio può reagire vigorosamente con H_2O_2 , per cui non può essere utilizzato.

Alla fine dell'analisi, il nitrato di calcio è stato considerato il miglior soluto per la separazione in base alla densità. In un'ottica di economia circolare, il nitrato di calcio può essere ottenuto tramite la neutralizzazione degli effluenti della produzione di acido nitrico; inoltre, gli ioni calcio e nitrato svolgono ruoli biologici essenziali tanto che il nitrato di calcio è un fertilizzante. Inoltre, il suo smaltimento non presenta particolari problemi. La sabbia a contatto con soluzioni di nitrato di calcio, una volta risciacquata correttamente, può essere restituita in sicurezza all'ambiente e la soluzione può essere riutilizzata.

Una volta scelto il sale, due studentesse hanno preparato una sua soluzione ad alta densità e misurato la densità effettiva a 20°C mediante un picnometro.

Si è operato in triplicato su campioni compositi (500 g) ottenuti mescolando quantità uguali di sabbia essiccata e setacciata (con setacci aventi una porosità di 5 mm), proveniente dalla linea di alta marea, dalla linea intertidale e dalla linea di bassa marea; si sono provati diversi rapporti fra il campione di sabbia e la soluzione; considerata la quantità di liquido che imbibisce la sabbia, 1000 ml di una soluzione satura di nitrato di calcio sono stati sufficienti per 500 g di campione composito; sono stati mescolati per 30 min in un becher, poi la miscela è stata lasciata a riposo per tutta la notte in modo da consentire la sedimentazione della sabbia. Il surnatante è stato, infine, accuratamente pipettato in una bottiglia di vetro avendo cura di sciacquare le pareti del becher con una soluzione satura di nitrato di calcio per rendere quantitativo il trasferimento.

Quinta domanda stimolo: Come evitare che materiale biotico potenzialmente galleggiante possa essere confuso con le MP?

La sabbia proviene da un ecosistema e, pertanto, può contenere materiale biotico (cellule vegetali o animali) che può galleggiare in una soluzione ad alta densità, interferendo con l'analisi delle MP. Lo studio della letteratura scientifica ha permesso di notare la variabilità delle strategie adottate per limitare tali interferenze.

Alcuni autori usando la digestione acida della miscela con acido nitrico concentrato bollente o idrossido di sodio concentrato [15] non è stata considerata appropriata, perché alcuni polimeri vengono danneggiati o idrolizzati da questi trattamenti [16] e perché la procedura è pericolosa.

Altri autori trattano la miscela ottenuta con perossido d'idrogeno. Ragionando sul buon potere ossidante dell'acqua ossigenata e constatato che il prodotto della sua riduzione è l'innocua l'acqua, e che, data l'esotermicità della reazione di ossidazione, non sono necessari apporti energetici esterni, si è inserita nella procedura una fase ossidativa, per aumentare la selettività del metodo, utilizzando dunque il perossido d'idrogeno. Sono stati, quindi, aggiunti 100 ml di H_2O_2 al 30% m/m alla miscela contenente le MP; la bottiglia è stata coperta con un foglio di alluminio e la vigorosa ossidazione della materia organica è stata monitorata visivamente fino a quando la miscela, inizialmente torbida, è diventata incolore e trasparente; ci sono voluti tre giorni a temperatura ambiente. Per assicurarsi che l'ossidazione fosse quantitativa, dopo tre giorni sono stati aggiunti altri 10 ml di H_2O_2 al 30% m/m per valutare eventuali ulteriori reazioni.

Sesta domanda stimolo: Come quantificare correttamente le MP?

Considerando che la dimensione delle MP è molto rilevante nei confronti della loro tossicità e mobilità ambientale, è necessario quantificare le MP appartenenti a specifiche classi dimensionali. Molti metodi in letteratura o non distinguono le classi dimensionali di MP o misurano la loro dimensione al microscopio, ma tale procedura è suscettibile di soggettività ed errori. Far passare la miscela contenente le MP attraverso una serie di setacci con porosità di 1000, 300 e 100 μm è stata considerata la procedura migliore per ottenere la suddivisione oggettiva delle MP in varie classi dimensionali. Ciascun setaccio è stato risciacquato e ogni retentato è stato trasferito con acqua ultra-pura alla filtrazione sottovuoto su un filtro in nitrocellulosa Whatman (diametro 47 mm, porosità 0,45 μm) alloggiato in un kit di filtrazione in vetro. Ciascun filtro con il relativo retentato (di una specifica classe dimensionale) è stato conservato in una capsula di Petri di vetro coperta e lasciato asciugare a

temperatura ambiente per 24 ore, per la successiva osservazione e conta delle MP di quella specifica classe dimensionale.

La stereomicroscopia è un semplice e diffuso strumento per contare le MP in ciascuna classe dimensionale e classificarle in base alla forma (filamento/fibra, frammento, pellet/perline/granuli, pellicola, schiuma) e al colore (incolore, bianco, nero e colorato).

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati medi e le deviazioni standard.

Tabella 1. Risultati medi espressi in MP/kg (3 repliche) e deviazioni standard ottenuti con la soluzione saturata di $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ come mezzo galleggiante

Classe dimensionale	Fibre	Frammenti	Film	Pellet	Spugna	Totali
1000-5000 μm	29 $\pm$ 8	29 $\pm$ 9	0	0	0	59
300-1000 μm	39 $\pm$ 10	26 $\pm$ 8	1 $\pm$ 1	6 $\pm$ 2	0	72
100-300 μm	42 $\pm$ 11	31 $\pm$ 9	4 $\pm$ 1	11 $\pm$ 4	0	88
Totale	110	87	5	17	0	219

L'abbondanza totale di MP per tutte le classi di dimensioni è di 219 MP/kg. Rispetto ai risultati più recenti che presentano migliaia di MP/kg in Malesia [17], Galapagos [18] ed Ecuador [19], quelli ottenuti in questo studio sono incoraggianti. Sono, comunque, leggermente superiori a quelli trovati nella Riserva della Biosfera delle Mangrovie UNESCO di Can Gio in Vietnam (da 31,99 a 92,56 MP/kg), anche se in quel caso il sale di separazione della densità era NaCl, quindi non tutti gli MP potevano essere stimati [20].

Le fibre sono le MP più abbondanti e la figura 3 ne mostra una (riconosciuta al microFTIR come poliammide).

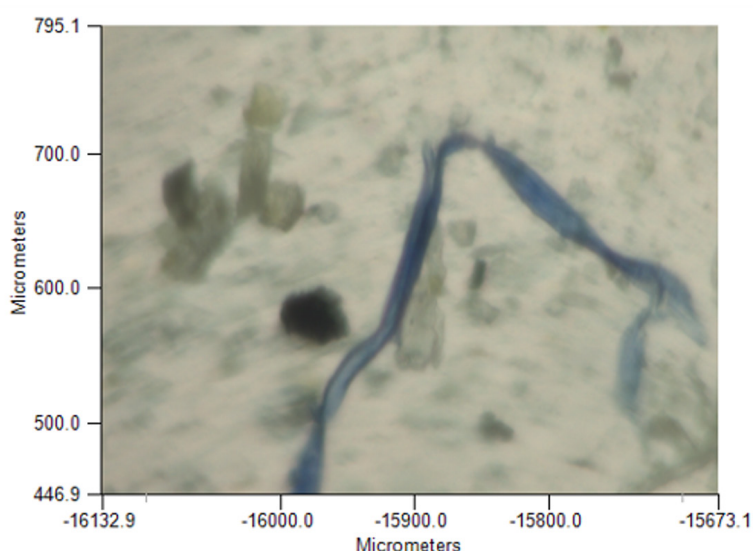


Figura 3. Esempio di fibra sintetica

Le MP classificate e quantificate possono essere ulteriormente analizzate tramite metodi strumentali più sofisticati. Attualmente stiamo lavorando sulla caratterizzazione dei polimeri delle MP, attività

che difficilmente può essere effettuata in altri istituti, dato che necessita dello spettrofotometro FTIR e possibilmente del microFTIR.

Il colore delle MP è importante perché influenza la possibile reazione delle specie marine. Occorre ricordare che, nell'ambiente, gli agenti atmosferici e l'invecchiamento naturale (che comprende i processi di fotoinvecchiamento, termoinvecchiamento, invecchiamento biologico e meccanico) possono modificare l'aspetto delle materie plastiche, ma la maggior parte di esse sono nere o blu.

La Figura 4 mostra sia il flusso di lavoro preanalitico che quello analitico, seguiti nel presente studio.

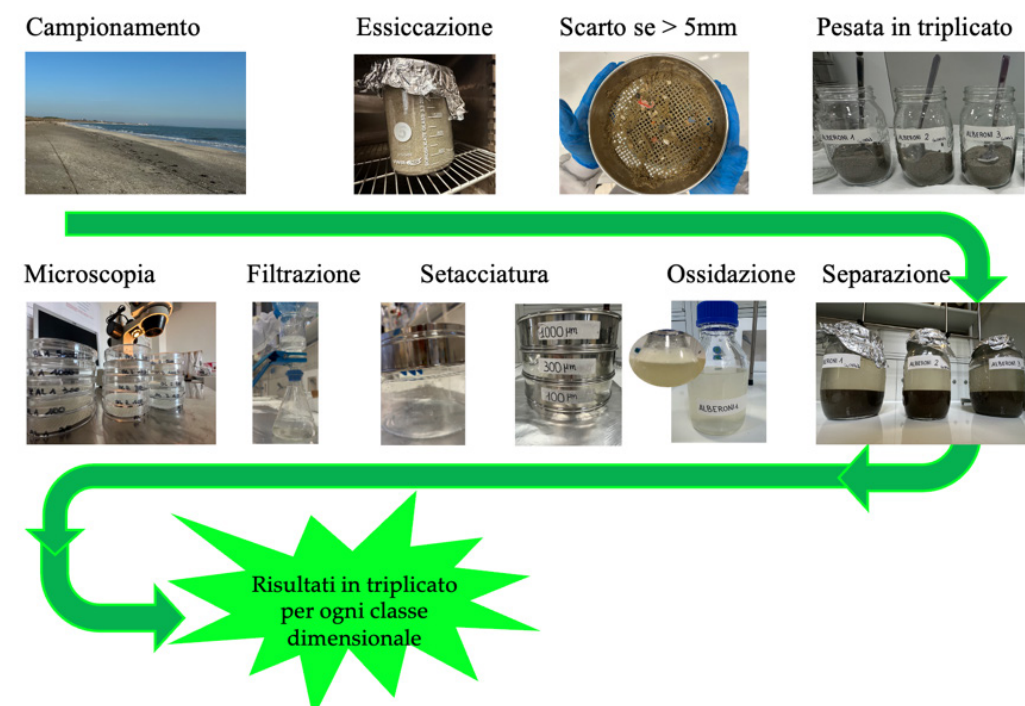


Figura 4. Flusso di lavoro preanalitico e analitico

Settima domanda stimolo: Come quantificare l'aderenza ai 12 Principi della Chimica Verde di questo protocollo innovativo?

Abbiamo valutato le varie metriche della chimica verde. La metrica AGREE è la più adatta, perché specifica per l'ambito analitico. Utilizzando il programma disponibile abbiamo costruito la Figura 5, che illustra l'aumento del punteggio AGREE [21]"ISSN": "15206882", "abstract": "Green analytical chemistry focuses on making analytical procedures more environmentally benign and safer to humans. The amounts and toxicity of reagents, generated waste, energy requirements, the number of procedural steps, miniaturization, and automation are just a few of the multitude of criteria considered when assessing an analytical methodology's greenness. The use of greenness assessment criteria requires dedicated tools. We propose the Analytical GREENness calculator, a comprehensive, flexible, and straightforward assessment approach that provides an easily interpretable and informative result. The assessment criteria are taken from the 12 principles of green analytical chemistry (SIGNIFICANCE (da 0,66 a 0,81) in seguito della sostituzione di ZnCl_2 con $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. L'aumento è dovuto principalmente all'assenza di tossicità per l'operatore e per la vita acquatica del nitrato di calcio. Le soluzioni utilizzate per la separazione in base alla densità possono, inoltre, essere recuperate sul fondo della cascata di setacciatura, ricostituite fino alla densità appropriata, rifiltrate e riutilizzate, per ridurre drasticamente l'acquisto di sali e la generazione di rifiuti, aumentando così la sostenibilità della procedura.

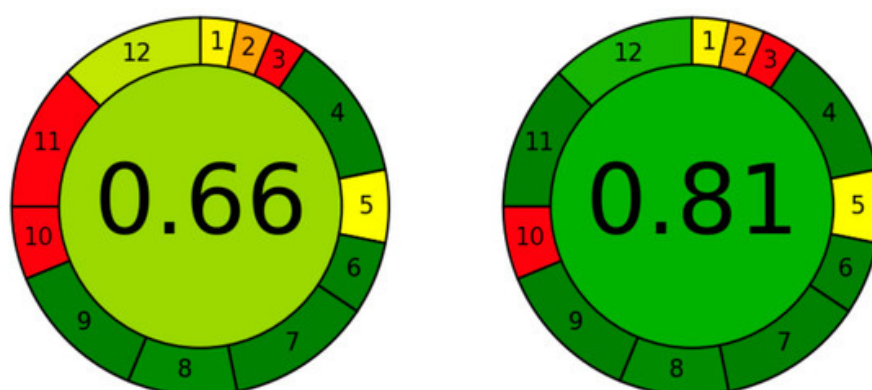


Figura 5. Punteggi di sostenibilità ambientale AGREE per ZnCl_2 (sinistra) e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (destra) come sali per ottenere soluzioni adatte per separazione in base alla densità; il pittogramma circolare a 12 segmenti con codifica a colori mostra l'impatto ambientale dei metodi analitici; i colori passano dal rosso (non ecologico/cattivo) al verde scuro (completamente ecologico/buono)

Ottava domanda stimolo: Come massimizzare l'impatto educativo di questa attività a livello scolastico e sulla società?

Il progetto didattico proposto è stato sviluppato a stretto contatto con Venice Lagoon Plastic Free, un'organizzazione non governativa veneziana che dal 2019 opera come catalizzatore di iniziative di citizen science, monitoraggio ambientale e blue circular economy nella Laguna di Venezia, Patrimonio Mondiale UNESCO. VLPF ha sviluppato soluzioni digitali per il monitoraggio dei rifiuti marini, nell'ambito dei progetti europei Horizon Europe REMEDIES e SeaClear2.0, e ha consolidato una rete di collaborazioni con istituti di ricerca, enti locali e partner internazionali. L'incontro fra le competenze chimico-analitiche dell'ITT Montani e la capacità operativa e progettuale di VLPF ha generato un modello replicabile di *Citizen Science* esperta, in cui la raccolta di dati scientificamente solidi si accompagna alla formazione dei giovani e alla sensibilizzazione della società civile.

L'educazione civica centrata sullo studio della Costituzione può mettere a fuoco gli aspetti cruciali legati alla sostenibilità, alla salute delle persone e degli ecosistemi e alla legalità. Le MP rappresentano un caso perfetto di minaccia al "bene comune". La decisione di agire anche a livello legislativo (ad es., bando delle MP dai cosmetici, limiti di concentrazione nelle acque potabili, tassazioni/incentivi) richiede scelte collettive. La consapevolezza circa la presenza e la pericolosità delle MP mostra che la raccolta differenziata, un dovere civico, non basta, perché la plastica si degrada e genera MP.

La *Citizen Science* è intrinsecamente una potente azione di educazione civica per il coinvolgimento attivo nella ricerca scientifica dei cittadini, i quali mettono a disposizione il loro tempo ed impegno e, nel caso degli studenti e studentesse di chimica, anche la loro competenza disciplinare. La rete degli istituti tecnici e tecnologici, in questo contesto, riveste un potenziale ruolo cruciale: se, utilizzando un kit di campionamento standardizzato, sotto la supervisione esperta dei loro docenti, studentesse e studenti di chimica in tutta Italia svolgessero una singola campagna di campionamento ed analisi delle MP (anche mediante il diffuso stereomicroscopio), si potrebbe ottenere un formidabile set di dati analitici e un alto impatto sociale. I risultati possono consentire una valutazione comparativa dell'influenza dei diversi stili di vita sull'inquinamento da plastica. Dai risultati analitici deve sorgere una domanda: Chi è responsabile delle MP che abbiamo trovato? Dalla risposta deve nascere l'educazione civica che veicola la consapevolezza ambientale e possibilmente un cambiamento comportamentale, secondo la strategia delle 4R (Ridurre, Riutilizzare, Riciclare, Recuperare).

In questo contesto l'Outreach è cruciale per rendere la cittadinanza capace di comprendere i dati scientifici e l'importanza del cambio di stile di vita verso scelte in linea con la sostenibilità. Per raggiungere tale obiettivo sono stati preparati alcuni interventi importanti in vari Festival Scientifici, in

rassegne teatrali, in eventi di ludicizzazione della chimica dedicati ai più piccoli. Attualmente, la nostra proposta di Outreach, selezionata nell'ambito del Progetto del Ministero della Cultura e del Ministero dell'Istruzione e Merito "Cinema ed Immagini per la Scuola", sta diventando un Cortometraggio dedicato alla sensibilizzazione verso questa tematica.

Nona domanda (per il/la docente): Come valutare gli apprendimenti?

La valutazione ha accompagnato tutto il percorso didattico.

Per quanto riguarda la valutazione formativa si è usata una griglia osservazionale con indicatori precisi:

- Partecipazione al brainstorming e qualità delle domande e delle proposte
- Rigore nella progettazione sperimentale
- Partecipazione, coordinazione, capacità di lavorare in team durante la fase outdoor di campionamento, attività di laboratorio ed esperienze di outreach
- Competenza pratica ed attenzione alla sicurezza
- Competenza nella raccolta dei dati, discussione critica dei risultati nell'ottica del miglioramento
- Chiarezza e creatività nella comunicazione
- Competenze nel videomaking scientifico e nell'uso dell'AI per la musica

Oggetto della valutazione sommativa è stata, invece, una relazione critica circa le attività laboratoriali e gli aspetti teorici alla base della procedura costruita (relativi al valore statistico del dato analitico, alla chimica dei polimeri, ai metodi separativi etc.).

Al fine di favorire l'attitudine all'autoapprendimento le attività sono state ulteriormente elaborate per redigere Capolavoro per il Curriculum dello Studente.

Infine, per la diffusione della buona pratica nella comunità scientifica i risultati completi sono stati messi a disposizione mediante una pubblicazione scientifica [22].

3. Ulteriori sviluppi: MICRO2.0, la campagna 2025 a Sant'Alvise e Isola della Certosa

Il successo di MICRO1.0 ha naturalmente condotto alla seconda edizione dell'iniziativa: MICRO2.0, Microplastics Investigation for Comprehensive Research and Observation. Questa edizione si è svolta il 13 e 14 novembre 2025 e ha ampliato significativamente la portata della campagna pilota, coinvolgendo 23 studenti e studentesse di chimica dell'ITT Montani, sotto la supervisione di due docenti di chimica e con il coordinamento operativo di VLPF.

A differenza della prima edizione, limitata a un solo sito (l'Oasi Alberoni al Lido), MICRO2.0 ha interessato due aree della Laguna nord-orientale: la Secca di Sant'Alvise, nel centro storico di Venezia, e l'Isola della Certosa. Il disegno di campionamento ha seguito lo stesso protocollo verde messo a punto nel primo anno, impiegando nitrato di calcio come mezzo di separazione per densità e perossido di idrogeno per la digestione della materia organica.

A Sant'Alvise sono stati raccolti 40 campioni ambientali (5 campioni $\times$ 4 stazioni $\times$ 2 linee parallele alla battigia) su un'area di circa 300 m². A Certosa, la griglia di campionamento è stata estesa a 75 campioni (5 campioni $\times$ 5 stazioni $\times$ 3 linee), su un'area di circa 1.000 m², in collaborazione con Vento di Venezia della Venezia Certosa Marina. Tutti i campioni sono stati mescolati per ogni risultato in triplicato.

Parallelamente al campionamento delle microplastiche, è stato condotto il monitoraggio del macro-litter con gli strumenti digitali di VLPF. A Sant'Alvise sono stati censiti 1.780 oggetti per un totale di 139,7 kg di rifiuti rimossi, di cui 19,4 kg di plastica. Le categorie più rappresentate sono costituite da frammenti di vetro e da bottiglie di plastica per bevande, confermando la pressione legata alle attività urbane e turistico-ricreative. A Certosa sono stati rimossi 120,36 kg di rifiuti, di cui 40,22 kg di plastica. Complessivamente, la campagna ha rimosso oltre 260 kg di rifiuti su un'area lagunare di circa 4 km². L'impronta della plastica (plastic footprint), calcolata tramite l'app SeaClear2.0, ha stimato che questo materiale raccolto a Sant'Alvise equivale al consumo annuo di 0,35 persone in Italia, mentre quella di Certosa corrisponde a 0,72 persone.

Di particolare interesse scientifico è stato il fatto, del tutto inatteso, che i campioni di Sant'Alvise hanno dato esito positivo alla reazione di Fenton: la presenza di ruggine nel sedimento ha innesca-

to una reazione violenta con il perossido di idrogeno, causando il traboccamento della soluzione e la perdita delle microplastiche galleggianti. Questo ha richiesto la modifica del protocollo, con l'aggiunta graduale di 100 ml di H_2O_2 al 30%, in aliquote da 1 ml, nell'arco di 3 ore. L'episodio dimostra come la *citizen science* esperta debba essere capace di adattare le procedure ai contesti reali. L'analisi FTIR dei polimeri è attualmente in corso presso il laboratorio del Montani, utilizzando lo spettrofotometro FTIR Spectrum Two e il micro-FTIR Spotlight 200i (Perkin Elmer). La correlazione fra dati di macrolitter e composizione polimerica delle microplastiche costituirà un contributo originale per la comprensione delle dinamiche di frammentazione della plastica nell'ecosistema lagunare veneziano.

4. Le microplastiche quali contaminanti emergenti: il contesto normativo europeo nella didattica chimica

Il professionista chimico deve muoversi nel contesto normativo. Per questo abbiamo inquadrato l'aspetto scientifico nella prospettiva del diritto internazionale in una lezione dedicata all'importanza del supporto scientifico per "informare" i *policy makers*.

Le microplastiche sono oggi classificate come contaminanti emergenti (Contaminants of Emerging Concern, CEC), una categoria che include sostanze la cui presenza nell'ambiente e i cui effetti sulla salute umana e sugli ecosistemi sono oggetto di crescente attenzione scientifica e normativa. L'ambiente marino è il principale recettore finale delle microplastiche e la Laguna di Venezia, con dieci fiumi immissari e solo tre bocche di porto verso l'Adriatico, funge da trappola naturale per i rifiuti plastici, rendendo particolarmente rilevante il nostro lavoro di monitoraggio.

Il quadro normativo europeo si sta rapidamente evolvendo: nel febbraio 2026, il Consiglio dell'UE ha formalmente adottato la direttiva che aggiorna l'elenco delle sostanze inquinanti per le acque superficiali e sotterranee, includendo farmaceutici, pesticidi, bisfenoli e PFAS. Per la prima volta, la direttiva introduce regole per valutare il rischio cumulativo delle miscele di sostanze e, aspetto cruciale, inserisce le microplastiche e gli indicatori di resistenza antimicrobica nelle watchlist europee per le acque. Secondo i dati dei piani di gestione dei bacini idrografici, il 46% delle acque superficiali e il 24% delle acque sotterranee nell'UE non soddisfa gli attuali standard di qualità ambientale. Gli Stati membri avranno tempo fino al 2039 per adeguarsi.

La Direttiva Acque Potabili (UE) 2020/2184 ha già classificato le microplastiche come materia di attenzione emergente. Nel 2024, il Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea ha pubblicato una metodologia armonizzata per la misurazione delle microplastiche nell'acqua potabile, basata su spettroscopia IR e Raman, con volumi di campionamento di almeno 1.000 litri. I polimeri più riscontrati sono risultati polietilene, PET, poliestere e polipropilene, gli stessi polimeri identificabili con il nostro protocollo verde tramite FTIR.

Questo contesto normativo, in rapida evoluzione, conferma la rilevanza del lavoro di *citizen science* avanzato, condotto attraverso i progetti MICRO. La necessità di metodologie standardizzate, accessibili e sostenibili per il monitoraggio delle microplastiche su vaste aree geografiche è esattamente ciò che il nostro protocollo verde intende offrire: dati scientificamente robusti, generati con il coinvolgimento di studenti e società civile, senza ricorrere a reagenti pericolosi per l'operatore e per l'ambiente.

5. Conclusioni e prospettive

Insegnare in una scuola tecnica permette di concepire l'azione didattica come produzione e non mera riproduzione dei saperi. Abbiamo declinato l'insegnamento non per dare risposte, ma per far sorgere domande e per costruire soluzioni e relazioni umane. Il risvolto epistemologico relativo all'azione didattica progettata e svolta è enorme: le studentesse e gli studenti non imparano soltanto come si progetta e si svolge un'analisi, ma interiorizzano l'importanza dello sforzo cognitivo per cambiare il modo in cui si realizza un'analisi chimica nell'ottica della sostenibilità. Il Popperiano principio di falsificabilità viene applicato non a una teoria, ma a una procedura normalmente accettata dalla comunità scientifica: i principi della chimica verde diventano un criterio per validare la produzione di conoscenza.

Orientati dalla proposta pedagogica del Service Learning, crediamo nell'importanza dell'apprendimento basato su progetti di utilità sociale e compiti di realtà. Gli aspetti epistemologici si intrecciano con quelli psicologici e sociologici perché l'attività permette al discente di essere protagonista del percorso di scoperta guidata, in un'età che è quella più adatta per stimolare la creatività.

Ringraziamenti

TC ringrazia VLPPF e IMG Group per il supporto finanziario, in qualità di donatori ufficiali delle attività legate a MICRO1.0 e MICRO2.0. Il finanziamento ha coperto tutti i costi relativi alla logistica e ai trasporti per rendere possibile il campionamento. Si ringraziano Stefania Scatasta, Nadia Fraticelli, Roberto Barbieri e gli studenti e le studentesse di chimica dell'ITT "G. e M. Montani" per il loro prezioso supporto, così come Gherardo Toso, Gulce Korkmaz e Zehra Senem Nurel di VLPPF.

Riferimenti bibliografici

- [1] Plastic Europe 2024 (<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>).
- [2] T. Cecchi, Analysis of Volatiles Organic Compounds in Venice Lagoon Water Reveals COVID 19 Lockdown Impact on Microplastics and Mass Tourism Related Pollutants, *Sci. Total Environ.*, 2021, 146951 (doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146951).
- [3] T. Cecchi, D. Poletto, A. C. Berbecaru, E. M. Cârstea, M. Râpă, Assessing Microplastics and Nanoparticles in the Surface Seawater of Venice Lagoon—Part I: Methodology of Research, *Materials (Basel)*, 2024, **17**, 1759 (doi:10.3390/MA17081759/S1).
- [4] I. Ansari, C. Arora, A. Verma, et al., A Critical Review on Biological Impacts, Ecotoxicity, and Health Risks Associated with Microplastics, *Water, Air, Soil Pollut.*, 2025, **236**, 1-32 (doi:10.1007/S11270-024-07731-Z).
- [5] EU Commission Regulation (EU) 2023/2055 - Restriction of Microplastics Intentionally Added to Products - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/chemicals/reach/restrictions/commission-regulation-eu-20232055-restriction-microplastics-intentionally-added-products_en) (accessed on 26 November 2025).
- [6] B. A. Walther, F. Pasolini, Š. Korez Lupše, M. Bergmann, Microplastic Detectives: A Citizen-Science Project Reveals Large Variation in Meso- and Microplastic Pollution along German Coastlines, *Front. Environ. Sci.*, 2024, **12** (doi:10.3389/fenvs.2024.1458565).
- [7] M. Tiwari, T. D. Rathod, P. Y. Ajmal, R. C. Bhangare, S. K. Sahu, Distribution and Characterization of Microplastics in Beach Sand from Three Different Indian Coastal Environments, *Mar. Pollut. Bull.*, 2019, **140**, 262–273 (doi:10.1016/j.marpolbul.2019.01.055).
- [8] A. Malorni, C. H. Lea, K. Richards-Schuster, M. S. Spencer, Facilitating Youth Participatory Action Research (YPAR): A Scoping Review of Relational Practice in U.S. Youth Development & out-of-School Time Projects, *Child. Youth Serv. Rev.*, 2022, **136**, 106399 (doi:10.1016/j.childyouth.2022.106399).
- [9] NOAA Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments, 2015.
- [10] J. Masura, J. Baker, G. D. Foster, C. Arthur, C. Herring, *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments*; 2015 (<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296>).
- [11] S. Grishanov, Structure and Properties of Textile Materials, *Handb. Text. Ind. Dye. Princ. Process. Types Dye*, 2011, **1**, 28-63 (doi:10.1533/9780857093974.1.28).
- [12] M. Wagner, S. Lambert, *Freshwater Microplastics - The Handbook of Environmental Chemistry 58*, 2018 (ISBN 9783319616148).
- [13] M. Tiwari, S. K. Sahu, T. Rathod, et al., Comprehensive Review on Sampling, Characterization and Distribution of Microplastics in Beach Sand and Sediments, *Trends Environ. Anal. Chem.*, 2023, **40**, e00221 (doi:10.1016/j.teac.2023.e00221).

- [14] B. Quinn, F. Murphy, C. Ewins, Validation of Density Separation for the Rapid Recovery of Microplastics from Sediment, *Anal. Methods*, 2017, **9**, 1491-1498 (doi:10.1039/C6AY02542K).
- [15] M. Claessens, L. Van Cauwenberghe, M. B. Vandegehuchte, C. R. Janssen, New Techniques for the Detection of Microplastics in Sediments and Field Collected Organisms, *Mar. Pollut. Bull.*, 2013, **70**, 227-233 (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2013.03.009).
- [16] GESAP Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean: GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, *Rep. Stud. GESAMP* 2019, **99**, 138.
- [17] A. A. Khalid, N. I. Abd Razak, S. T. Anuar, et al., Microplastics Contamination in Natural Sea Turtle Nests at Redang Island, Malaysia, *Mar. Pollut. Bull.*, 2025, **211** (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117412).
- [18] D. J. Basurto Alcívar, M. A. Chavarría Peñarrieta, M. F. Pincay Cantos, J. M. Calderón Pincay, Microplastics on the Coasts of San Cristobal, Galapagos: A Threat to the Archipelago, *Visions Sustain.*, 2024, **22**, 1-19 (doi:10.13135/2384-8677/10344).
- [19] I. Arteaga, V. Pinos-Vélez, M. Capparelli, et al., Microplastic Occurrence and Distribution in the Gulf of Guayaquil, Ecuador, *Mar. Pollut. Bull.*, 2024, **209**, 117288 (doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117288).
- [20] V. T. K. Khuyen, D. V. Le, A. R. Fischer, C. Dornack, Comparison of Microplastic Pollution in Beach Sediment and Seawater at UNESCO Can Gio Mangrove Biosphere Reserve, *Glob. Challenges*, 2021, **5**, 1-9 (doi:10.1002/gch2.202100044).
- [21] F. Pena-Pereira, W. Wojnowski, M. Tobiszewski, AGREE - Analytical GREENness Metric Approach and Software, *Anal. Chem.*, 2020, **92**, 10076-10082 (doi:10.1021/acs.analchem.0c01887).
- [22] T. Cecchi, Microplastics in Sand: Green Protocol for Expert Citizen Science over Large Geographical Areas, *Appl. Sci.*, 2025, **15**, 13007 (doi:10.3390/app152413007).

Fare chimica con il latte

Anna Maria Madaio^{1,2}

¹Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana; ²IIS “B. Focaccia” di Salerno

e-mail: annamariamadaio@libero.it

Abstract. This paper illustrates an interdisciplinary educational experience aimed at transforming the study of biomolecules into active scientific investigation. Through the Inquiry-Based Learning (IBL) methodology, students explored the nature of cow's milk not only as a food, but as an extraordinarily complex chemical-physical system. The program integrates the study of colloidal systems with experimental protocols for the separation and characterization of milk's main components (caseins, whey proteins, lactose, and mineral salts). Particular attention was paid to lactose intolerance, as a health issue, and to the laboratory production of lactose-free milk. Furthermore, the valorization of dairy waste from a circular economy perspective was explored, with a focus on its reuse for the production of bioplastics, textile fibers, adhesives, and artistic applications. The activity allowed students to connect abstract theoretical knowledge to everyday phenomena, promoting scientific citizenship skills in line with the goals of the 2030 Agenda.

Keywords: latte; caseine; inquiry-based learning; lattasi; sostenibilità

1. Introduzione

Il percorso didattico si configura come un'esperienza innovativa e fortemente laboratoriale nello studio delle proprietà chimiche delle biomolecole. Il punto di partenza è rappresentato dal latte, un liquido di uso quotidiano, ma caratterizzato da una composizione complessa, che consente di creare un collegamento immediato tra i contenuti disciplinari e la realtà concreta degli studenti. L'intero percorso si fonda sulla metodologia dell'*Inquiry-Based Learning*, favorendo un apprendimento attivo, partecipato e di tipo interdisciplinare. Gli studenti non si limitano ad acquisire conoscenze in modo passivo, ma sono guidati, attraverso domande-problema e attività di ricerca su fonti affidabili, a costruire il proprio sapere. In questo contesto, essi progettano ed eseguono protocolli sperimentali, assumendo un ruolo centrale e consapevole nel processo di apprendimento, con l'obiettivo di applicare e consolidare le conoscenze pregresse. L'esperienza si inserisce, inoltre, nel quadro degli obiettivi dell'Agenda 2030, contribuendo allo sviluppo di competenze trasversali e di cittadinanza scientifica.

Il percorso è rivolto principalmente alle classi del triennio dell'indirizzo Chimica, Materiali e Biotecnologie, con contenuti calibrati in funzione dell'anno di corso. Tuttavia, selezionando opportunamente gli argomenti e modulando il livello di approfondimento, può essere efficacemente adattato anche agli studenti del primo biennio degli istituti tecnici e all'intero percorso dei licei. L'attività coinvolge diverse discipline, tra cui Chimica organica e biochimica, Chimica analitica e strumentale, Chimica fisica, Tecnologie chimiche industriali e Storia, favorendo un approccio interdisciplinare all'argomento.

Per affrontare efficacemente il percorso, anche in base alla classe di riferimento e al livello di approfondimento che si vuole raggiungere, è richiesto agli studenti il possesso di alcune conoscenze di base, tra cui i concetti di miscugli, legami intermolecolari, isomeria ottica, proprietà chimiche delle biomolecole e catabolismo anaerobico del glucosio.

2. Il latte: proprietà chimico-fisiche, composizione e trasformazione

L'attività ha avuto inizio con una fase di ingaggio centrata sull'osservazione macroscopica del latte. Agli studenti è stato chiesto di analizzarne alcune caratteristiche evidenti, come colore, trasparenza e filtrabilità, per avviare una prima riflessione sulla sua natura come miscuglio e come sistema colloidale. Successivamente sono state indagate la composizione del latte, le proprietà chimico fisiche dei componenti e i processi di trasformazione lattiero-caseari.

2.1 Il latte come sistema colloidale complesso

Sebbene il latte appaia a prima vista uniforme, l'indagine sperimentale ne mette in evidenza la complessità: ha un aspetto lattiginoso, non è filtrabile con carta da filtro e, se sottoposto a centrifugazione, mostra una chiara separazione di fase. Queste osservazioni conducono a considerare il latte come un miscuglio eterogeneo complesso, costituito da più componenti finemente dispersi.

L'attività ha rappresentato per gli studenti un'occasione per riprendere e approfondire i concetti fondamentali della chimica fisica dei sistemi colloidali, utili per la comprensione del "sistema latte".

Un colloide è un sistema in cui una sostanza è dispersa in un'altra sotto forma di particelle di dimensioni intermedie tra quelle delle soluzioni e delle sospensioni (circa 1-1000 nm) ed è costituito da una fase dispersa e da una fase disperdente. In particolare, si distinguono colloidali liofobi (o idrofobi, se il mezzo disperdente è acquoso), caratterizzati da scarsa affinità tra le fasi e quindi meno stabili, e colloidali liofili (o idrofili), in cui le particelle disperse hanno affinità con il mezzo disperdente e danno luogo a sistemi più stabili, spesso sotto forma di soluzioni colloidali macromolecolari o micellari.

La natura colloidale del latte è evidenziata dall'effetto Tyndall: illuminando il campione di latte con una sorgente luminosa, il fascio diventa visibile a causa della diffusione della luce da parte delle particelle disperse che lo compongono, le cui dimensioni sono confrontabili o superiori alla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

La stabilità del sistema colloidale è dovuta a diversi fattori.

I moti browniani, dovuti agli urti continui delle molecole del mezzo disperdente sulle particelle colloidali, contrastano la sedimentazione causata dalla gravità, mantenendo le particelle in sospensione finché restano sufficientemente piccole. Tuttavia, l'azione di forze attrattive, come quelle di Van der Waals, può favorire l'aggregazione delle particelle e portare alla loro coagulazione.

Un altro parametro fondamentale è il Potenziale Zeta (ζ) associato al doppio strato elettrico che circonda le particelle colloidali, il cui andamento decresce esponenzialmente. Valori elevati indicano una maggiore stabilità della dispersione colloidale, poiché le repulsioni elettrostatiche impediscono l'aggregazione, mentre valori prossimi allo zero (ad es., in corrispondenza del punto isoelettrico nelle proteine) favoriscono la flocculazione delle particelle colloidali.

A seconda della natura delle due fasi (solido, liquido o gas) possono esistere diversi tipi di dispersioni colloidali (ad es., sospensioni, emulsioni).

Un'emulsione è un sistema colloidale formato da due liquidi immiscibili, in cui uno è disperso nell'altro sotto forma di goccioline. Le emulsioni, che possono essere di tipo olio in acqua (O/A) o acqua in olio (A/O), sono sistemi intrinsecamente instabili e tendono a separarsi. La loro stabilità è garantita dalla presenza di emulsionanti, sostanze tensioattive dotate di una parte idrofila e di una lipofila, capaci di interagire con entrambe le fasi e di mantenere stabile la dispersione.

Come risultato della loro indagine, gli studenti hanno avuto la conferma che il latte è un sistema eterogeneo complesso costituito da tre principali frazioni: una frazione lipidica, composta prevalentemente da trigliceridi dispersi sotto forma di globuli emulsionati nel mezzo acquoso; una frazione proteica, costituita da caseine e sieroproteine organizzate in strutture colloidali; una fase acquosa, nella quale risultano disciolti carboidrati (principalmente lattosio), vitamine idrosolubili e sali minerali [1, 2].

Il latte può essere, quindi, descritto come un sistema colloidale complesso in cui coesistono emulsioni, dispersioni colloidali e soluzioni vere, la cui stabilità dipende dall'azione combinata di diversi fattori chimico-fisici. In una fase successiva del percorso, gli studenti sono stati guidati dal docente nell'esplorazione di diversi aspetti chimici e tecnologici del latte, attraverso domande-stimolo e attività di ricerca. Tali attività li hanno condotti a conoscere e approfondire la composizione del latte, le differenze tra il latte

di diverse specie animali e quello vegetale, gli effetti dell'aggiunta di aceto o succo di limone al latte e le cause della cagliatura durante la conservazione in frigorifero, nonché i processi di trasformazione nei prodotti lattiero-caseari.

Le informazioni raccolte sono state costantemente integrate con momenti di confronto e discussione in classe per giungere a risultati condivisi.

2.2 Composizione e proprietà chimico-fisiche dei componenti del latte

Dagli studi effettuati è emerso che la composizione del latte varia in funzione della specie animale; l'analisi comparativa ha consentito agli studenti di riflettere sul valore nutrizionale dei diversi tipi di latte (bovino, caprino, ovino, bufalino e umano), evidenziando in particolare la maggiore concentrazione di lattosio nel latte umano rispetto a quello bovino e il più elevato contenuto di grassi nel latte di bufala rispetto agli altri. È emerso, inoltre, che il latte vegetale (ad es., latte di soia) è privo di lattosio e presenta generalmente un inferiore contenuto naturale di calcio, motivo per cui esso viene aggiunto alla bevanda per garantire un adeguato apporto nutrizionale.

Grazie alle conoscenze pregresse, una parte rilevante del percorso, propedeutica alle attività sperimentali successive, è stata dedicata all'approfondimento delle caratteristiche chimiche delle frazioni proteiche [2, 3]. Le strutture tridimensionali delle proteine sono state esplorate dagli studenti anche mediante la consultazione della banca dati del sito PDB (*Protein Data Bank*), favorendo l'integrazione tra biochimica strutturale e didattica laboratoriale [4, 5].

Dai loro studi è emerso che le caseine, che rappresentano circa l'80% della frazione proteica totale, sono fosfoproteine idrofobiche organizzate in micelle colloidali di dimensioni comprese tra 20 e 300 nm, all'interno delle quali sono incorporati ioni calcio e fosfato in forma colloidale. Esse comprendono quattro principali frazioni: α 1-caseina, α 2-caseina e β -caseina, che sono idrofobiche e legano il calcio fosfato tramite legami esterei con gruppi OH di residui di serina, e κ -caseina, una glicoproteina idrofila localizzata sulla superficie micellare, fondamentale per mantenere le micelle in fase dispersa. L'idrolisi della κ -caseina determina la perdita di stabilità colloidale e la conseguente coagulazione delle caseine. Le micelle di caseina sono formate da sottomicelle di diametro di 12-15 nm unite tramite legami secondari (interazioni a ponte idrogeno, idrofobiche ed elettrostatiche) e ponti di fosfato di calcio colloidale con i gruppi carbossilici dei residui amminoacidici o con serina fosfato.

Inoltre, le caseine sono caratterizzate da catene polipeptidiche ricche di residui di prolina, che ostacolano la formazione di strutture secondarie ordinate, come α -eliche e foglietti β . Esse assumono pertanto una conformazione aperta e flessibile, simile a quella delle proteine globulari denaturate, costituita da catene poco ripiegate o organizzate in strutture casuali. In aggiunta, l'assenza di ponti disolfuro nelle catene polipeptidiche impedisce la formazione di una struttura terziaria stabile e ordinata. Questa caratteristica conferisce alle caseine una particolare resistenza alla denaturazione termica, poiché vi è una limitata struttura organizzata da disgregare. La conformazione aperta comporta, infine, un'elevata esposizione dei residui idrofobici degli amminoacidi nel mezzo disperdente, determinando l'insolubilità delle caseine in acqua. Al pH fisiologico del latte (ca. 6,6) le cariche negative dei gruppi fosfato contribuiscono alla stabilità colloidale; abbassando il pH fino a 4,6, punto isoelettrico delle caseine, si verifica la protonazione dei gruppi fosfato, l'azzeramento della carica netta e l'aggregazione micellare con precipitazione (coagulazione) delle proteine. L'aumento del pH del latte fino a valori intorno a 8,0 induce la disgregazione delle micelle di caseina, trasformando il sistema in una dispersione opalescente. L'innalzamento del pH determina, infatti, un incremento della carica negativa superficiale delle micelle con conseguente intensificazione delle repulsioni elettrostatiche tra di esse, favorendone la dispersione nel mezzo acquoso. Le caseine hanno proprietà acide pronunciate; i gruppi carbossilici liberi degli amminoacidi e i gruppi ossidrilici dell'acido fosforico interagiscono facilmente con gli ioni calcio, così come con altri sali di metalli alcalini e alcalino terrosi (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}), formando caseinati.

Le sieroproteine (principalmente α -lattoalbumina e β -lattoglobulina) costituiscono circa il 20% della frazione proteica, sono proteine globulari idrosolubili caratterizzate dalla presenza di numerosi ponti disolfuro e da strutture secondarie e terziarie ben definite; diversamente dalle caseine, esse risultano termolabili e soggette a denaturazione per effetto del calore (Figura 1).

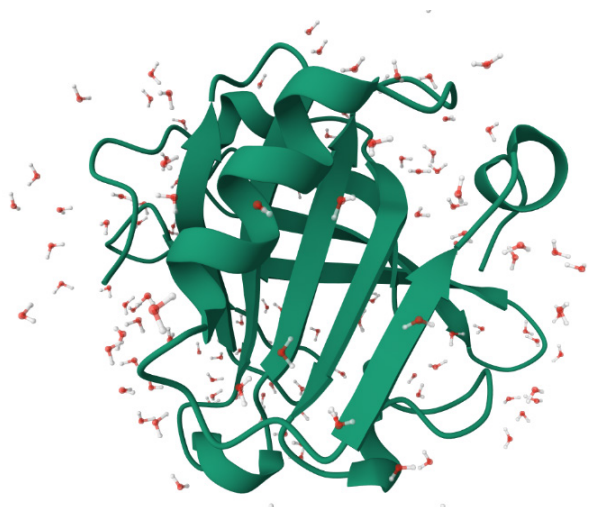


Figura 1. β -lattoglobulina bovina

Dal punto di vista chimico-fisico, il latte può essere descritto come un'emulsione naturale stabile di tipo olio in acqua (O/A), in cui le proteine svolgono il ruolo di tensioattivi naturali. Esse si dispongono all'interfaccia tra fase lipidica e fase acquosa, riducendo la tensione superficiale e contribuendo alla stabilizzazione dei globuli di grasso. In particolare, le proteine si orientano con le regioni idrofobiche rivolte verso la fase lipidica e quelle idrofile verso la fase acquosa, diminuendo così la tendenza delle due fasi a separarsi. Questa funzione emulsionante è strettamente legata alla loro conformazione strutturale; le proteine più efficaci in questo ruolo presentano strutture poco compatte e relativamente flessibili. Nel latte, tale caratteristica è particolarmente evidente nelle caseine, che, grazie alla loro struttura "aperta", risultano particolarmente adatte a stabilizzare l'emulsione. In aggiunta, la natura fosfoproteica delle caseine favorisce le interazioni sia con la fase lipidica sia con quella acquosa, contribuendo a impedire l'aggregazione dei globuli di grasso e a mantenere stabile l'emulsione nel tempo.

2.3 Trasformazioni del latte: coagulazione e processi lattiero-caseari

Sulla base delle conoscenze acquisite, gli studenti hanno compreso che il trattamento del latte con aceto o succo di limone determina un abbassamento del pH fino al punto isoelettrico delle caseine, provocandone la coagulazione e la conseguente formazione di un precipitato bianco (cagliata), separato dalla fase liquida (siero). Grazie ai prerequisiti già in loro possesso, gli studenti sanno che il lattosio è un disaccaride riducente, idrosolubile, costituito da galattosio e glucosio uniti tramite un legame glicosidico β (1 $\rightarrow$ 4), otticamente attivo e soggetto a mutarotazione, e che il glucosio, in condizioni adeguate, può essere trasformato in acido lattico per azione di microrganismi attraverso processi fermentativi. L'integrazione di tali conoscenze ha permesso di comprendere che la formazione della cagliata nel latte conservato a lungo in frigorifero è dovuta alla proliferazione di batteri lattici (ad es., appartenenti ai generi *Lactobacillus* e *Streptococcus*), i quali, anche a basse temperature, fermentano il lattosio producendo acido lattico, determinando un progressivo abbassamento del pH che favorisce l'aggregazione delle micelle di caseina e la comparsa dei caratteristici fiocchi di cagliata. In dettaglio, gli studenti hanno appreso che i batteri lattici utilizzano l'enzima lattasi (β -galattosidasi) per scindere il lattosio in galattosio e glucosio. Il galattosio viene poi fosforilato dalla galattochinasi in galattosio-1-fosfato, successivamente epimerizzato a glucosio-1-fosfato e, infine, isomerizzato a glucosio-6-fosfato dalla fosfoglucomutasi. Il glucosio-6-fosfato, derivante sia dal galattosio che dal glucosio, entra nella glicolisi e viene metabolizzato a piruvato, che attraverso la fermentazione lattica viene convertito in acido lattico dall'enzima lattato deidrogenasi.

Gli studenti hanno inoltre compreso che, nell'industria lattiero-casearia, la coagulazione delle caseine viene ottenuta principalmente mediante l'enzima chimosina (o rennina), un'endopeptidasi

estratta tradizionalmente dall'abomaso dei vitelli. La chimosina idrolizza selettivamente la κ -caseina a livello del legame peptidico tra gli amminoacidi fenilalanina 105 e metionina 106, separando la parte idrofila della caseina da quella idrofoba, inducendo l'aggregazione micellare e la formazione della cagliata. Questo processo rappresenta la fase iniziale della produzione dei formaggi, le cui caratteristiche dipenderanno dalle successive condizioni di lavorazione e maturazione.

3. Componenti del latte: separazione, quantificazione e caratterizzazione

Partendo dall'analisi delle proprietà chimiche dei componenti del latte, gli studenti hanno analizzato protocolli sperimentali [6], finalizzati alla separazione, caratterizzazione e quantificazione delle principali frazioni (caseine, sieroproteine, sali minerali e lattosio), cimentandosi anche nella preparazione di latte delattosato. Le attività sono state guidate da domande-problema riguardanti le modalità di separazione dei diversi componenti del latte, la caratterizzazione e la determinazione quantitativa del lattosio e i processi per ottenere latte privo di lattosio.

Gli studenti, suddivisi in quattro gruppi di lavoro, hanno eseguito la separazione sequenziale dei componenti del latte, seguendo i protocolli da essi studiati ed elaborati [7]. Durante tutte le fasi operative è stato mantenuto un confronto continuo, sia all'interno dei singoli gruppi sia tra gruppi diversi, favorendo la discussione critica dei risultati ottenuti e la revisione delle procedure sperimentali. L'attività è stata condotta utilizzando latte scremato, al fine di evitare un'inefficace rimozione della frazione lipidica mediante l'utilizzo di comuni centrifughe da laboratorio.

La separazione dei componenti del latte è stata effettuata sfruttando le loro specifiche proprietà chimiche. In particolare, le caseine sono state isolate mediante precipitazione al punto isoelettrico; le sieroproteine attraverso denaturazione termica; il lattosio per precipitazione dal siero, indotta dalla variazione della polarità del mezzo; infine, i sali minerali sono stati separati in base alla loro insolubilità in un solvente meno polare dell'acqua.

Di seguito vengono schematizzate le fasi dell'attività laboratoriale, svolte in maniera sequenziale a partire da latte scremato.

3.1 Separazione delle caseine

Il latte scremato è stato riscaldato a circa 40-45 °C e acidificato con acido acetico al 10% fino al raggiungimento del punto isoelettrico (pH = 4,6), provocando la precipitazione delle caseine (cagliata), come riportato in figura 2. Il precipitato ottenuto è stato separato per filtrazione, lavato successivamente con acqua distillata, etanolo ed etere etilico, quindi essiccato in stufa e pesato.

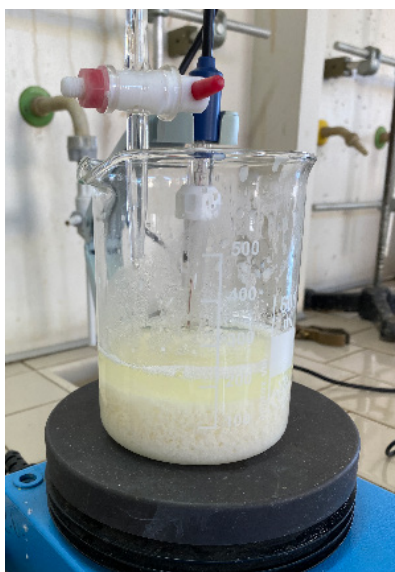


Figura 2. Precipitazione delle caseine

3.2 Separazione delle sieroproteine

Per evitare possibili fenomeni di idrolisi del lattosio durante il riscaldamento, il siero acido residuo è stato preliminarmente neutralizzato mediante carbonato di calcio. Successivamente il campione è stato portato a circa 90 °C per favorire la denaturazione termica e la precipitazione delle sieroproteine, separate per filtrazione.

3.3 Separazione del lattosio

Il siero residuo, contenente lattosio e sali minerali, è stato dapprima concentrato per evaporazione e successivamente, per diminuire la polarità del mezzo e permettere la precipitazione del lattosio, è stato aggiunto etanolo e portato a ebollizione. Il lattosio è solubile a caldo in etanolo e insolubile a freddo, mentre i sali minerali non sono solubili in queste condizioni. Dopo filtrazione a caldo della miscela, il filtrato è stato lasciato raffreddare lentamente per favorire la cristallizzazione del lattosio, che è stato recuperato per filtrazione, essiccato in stufa a 50 °C e pesato (Figura 3).

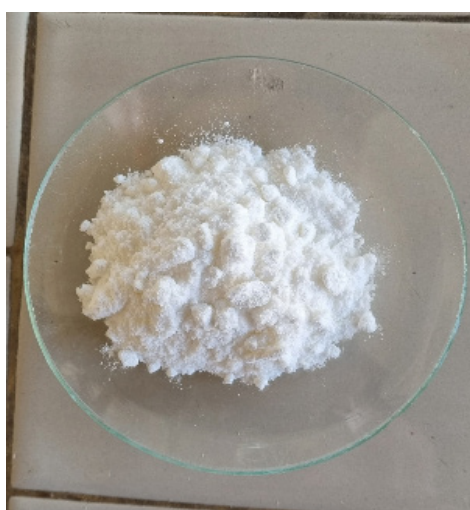


Figura 3. Lattosio estratto dal latte bovino

3.4 Separazione dei sali minerali

Dopo la filtrazione a caldo della miscela, i sali minerali rimasti sul filtro sono stati lavati con acqua distillata, seccati in stufa e pesati.

La caratterizzazione e la verifica della purezza del lattosio isolato, effettuata tramite determinazione del punto di fusione e del potere rotatorio specifico [7], ha rappresentato un momento di particolare rilevanza sia didattica che tecnico-scientifica, consentendo agli studenti di applicare diverse metodologie analitiche e di confrontare i risultati sperimentali con i dati riportati in letteratura. La determinazione quantitativa del lattosio contenuto nel latte bovino è stata effettuata tramite titolazione con reattivo di Fehling [7], sfruttando il potere riducente del gruppo aldeidico.

I risultati sperimentali ottenuti dagli studenti, suddivisi in quattro gruppi di lavoro, sono mostrati nella Tabella 1 in cui, per confronto, sono riportati anche i valori trovati in letteratura.

Nei casi in cui i dati non risultavano omogenei e si discostavano, seppur in misura differente, da quelli attesi, gli studenti hanno cercato di individuarne le cause, confrontandosi sulle operazioni svolte e sugli eventuali errori commessi.

Per quanto riguarda la separazione dei componenti del latte, le quantità di caseine rilevate dai primi tre gruppi risultano complessivamente in linea con i valori attesi. La minore quantità ottenuta dal Gruppo 4 può verosimilmente essere attribuita a perdite di prodotto verificatesi durante la fase di filtrazione.

I valori delle sieroproteine sono risultati superiori al previsto, probabilmente a causa dell'eccesso di CaCO_3 utilizzato per neutralizzare il siero ed evitare l'idrolisi del lattosio. I valori di lattosio risultano adeguati solo per il Gruppo 3; negli altri gruppi, le condizioni operative (pH acido e temperatura elevata) hanno probabilmente favorito l'idrolisi del lattosio. La ridotta quantità di sali minerali può anch'essa essere attribuita a perdite di prodotto durante le filtrazioni.

I valori ottenuti per la determinazione del punto di fusione del lattosio sono risultati abbastanza in accordo con il valore di riferimento riportato in letteratura, pari a 202,8 °C, confermando il buon grado di purezza del campione isolato.

Dai risultati della misurazione del potere rotatorio specifico della molecola di lattosio si osserva che il valore più coerente con quello riportato in letteratura (pari a +55,4°) è quello ottenuto alla concentrazione più elevata di lattosio, verosimilmente a causa della limitata sensibilità dello strumento. I dati risultano compatibili con la presenza della miscela di equilibrio degli anomeri α e β , consentendo agli studenti di collegare le evidenze sperimentali ai concetti di mutarotazione e stereochimica dei carboidrati.

Per la determinazione quantitativa del lattosio con il reattivo di Fehling, i risultati sperimentali sono coerenti con i valori attesi per il latte vaccino (4,7 g/100 ml di lattosio nel latte scremato); la quantità più bassa di lattosio rilevata dal Gruppo 2 è verosimilmente dovuta a un processo di idrolisi, determinato dalle condizioni operative particolarmente acide e ad alta temperatura. In ogni caso, indipendentemente dalla precisione dei risultati, gli studenti hanno compreso correttamente il procedimento di separazione e l'importanza di controllare attentamente le condizioni sperimentali.

Tabella 1. Risultati sperimentali ottenuti dagli studenti, confrontati con dati di letteratura

Separazione dei componenti del latte					
Composizione latte vaccino (g/100 ml)					
Dati	dato medio di letteratura	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 3	Gruppo 4
Caseine	2,8	2,90	3,03	3,30	2,42
Sieroproteine	0,6	0,9	1,2	1,0	1,5
Lattosio	4,5	0,05	0,83	3,79	2,70
Sali minerali	0,75	0,15	//	0,44	0,08
Determinazione del punto di fusione del lattosio in °C (in letteratura, 202,8 °C)					
Dati	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 3	Gruppo 4	
Punto di fusione lattosio	202,5 °C	204,7 °C	203,0 °C	204,5 °C	
Determinazione del potere rotatorio specifico del lattosio (in letteratura, +55,4°)					
Dati	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 3	Gruppo 4	
Concentrazione lattosio	5,0%	5,0%	8,0%	8,0%	
Rotazione osservata (gradi)	+2,5°	+3,0°	+4,4°	+4,5°	
Potere rotatorio specifico	+50,0°	+60,0°	+55,0°	+56,3°	
Determinazione quantitativa del lattosio con reattivo di Fehling (in letteratura, 4,7 g/100 ml)					
Dati	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 3	Gruppo 4	
Volume in ml di siero aggiunti	7,3	11,0	7,4	7,7	
Quantità di lattosio g/100 ml	4,63	3,07	4,56	4,38	

4. Sostenibilità ed economia circolare: la valorizzazione degli scarti lattiero-caseari

Il percorso ha permesso agli studenti di comprendere come i componenti del latte possano trasformarsi in risorse sostenibili, valorizzando quello che normalmente viene considerato uno scarto dell'industria lattiero-casearia, legando strettamente la didattica agli obiettivi di sostenibilità dell'Agenda 2030.

Il siero di latte, ad esempio, può essere impiegato nella produzione biotecnologica di acido lattico attraverso la fermentazione microbica del lattosio, trasformandolo in un composto utile in diversi settori: come additivo in ambito alimentare, come idratante e antimicrobico in ambito cosmetico e farmaceutico, e come componente per la produzione di PLA (acido polilattico), un materiale biodegradabile utilizzato in imballaggi, oggettistica, tessile e stampa 3D. Allo stesso modo le caseine hanno mostrato interessanti proprietà polimeriche, permettendo applicazioni sia industriali che artistiche. Da una ricerca storico-scientifica, gli studenti hanno appreso che, dal punto di vista tecnologico, le caseine estratte possono essere utilizzate per produrre plastiche biodegradabili, come la Galalite, inventata e brevettata nel 1897 da Friedrich Adolph Spitteler, che l'ha ottenuta trattando la proteina con formaldeide per creare legami crociati che conferiscono resistenza e flessibilità. Questo materiale, negli anni '20 e '30 del XX secolo, rivoluzionò il mondo dei bottoni poiché era una alternativa naturale ai materiali di origine animale (corno, madreperla, guscio di tartaruga e avorio).

Analogamente, la fibra tessile Lanital, la "lana di latte", sviluppata in Italia nel 1935 dall'ing. Antonio Ferretti con l'obiettivo di creare una fibra sostitutiva della lana, testimonia la versatilità della caseina come risorsa proteica per la produzione di materiali innovativi e rappresenta un esempio storico di economia circolare applicata agli scarti lattiero-caseari. Commercializzata dalla SNIA Viscosa, il Lanital scomparve dal mercato con l'avvento delle fibre sintetiche.

In laboratorio, gli studenti hanno prodotto una bioplastica alla caseina, simile alla Galalite, a partire dalla cagliata. Il latte scremato (100 ml) è stato riscaldato a circa 50 °C e trattato con acido acetico al 10% fino alla coagulazione delle caseine. La cagliata ottenuta è stata separata dal siero mediante filtrazione su tela e, quindi, è stata pressata per eliminare l'acqua in eccesso. Il materiale è stato successivamente lavorato a mano, modellato in diverse forme e lasciato essiccare in stufa a 65 °C per circa 4 ore, ottenendo un materiale solido e poroso, rifinibile con carta vetrata e colorabile anche mediante aggiunta preventiva al latte di coloranti alimentari.

Oltre agli impieghi industriali, le caseine sono state esplorate nel campo artistico e del restauro attraverso la produzione di colla alla caseina, un adesivo ad alta tenuta per legno e carta, ottenuto trattando la cagliata con basi come bicarbonato di sodio o una soluzione di ammoniaca al 10% fino alla formazione di una sospensione omogenea di caseinato di sodio o di ammonio.

In laboratorio, la colla è stata preparata stemperando in acqua distillata la cagliata, precedentemente ottenuta per precipitazione con acido acetico delle caseine, e aggiungendo lentamente la base; durante questa fase si è osservato lo sviluppo di CO₂ dovuto alla neutralizzazione dell'acido e la progressiva fluidificazione della massa. L'agitazione prolungata fino alla scomparsa dei grumi ha consentito di ottenere un adesivo che, applicato su materiali porosi, come carta e legno, e lasciato essiccare per alcune ore, ha evidenziato elevate proprietà adesive, dovute alla formazione di legami intermolecolari stabili dopo l'evaporazione dell'acqua, risultando efficace e resistente anche all'umidità.

Mescolando la caseina con pigmenti in polvere e acqua si ottiene la tempera alla caseina, un legante pittorico resistente e duraturo, utilizzato storicamente per dipinti su tela o legno.

In laboratorio, gli studenti hanno preparato la tempera utilizzando latte parzialmente scremato e succo di limone o aceto per ottenere la cagliata. I fiocchi di caseina così ottenuti sono stati filtrati attraverso un colino foderato di tela a trama fine, lavati più volte con acqua fredda e, secondo necessità, conservati in frigorifero per un massimo di tre giorni. Successivamente, la caseina è stata miscelata con i pigmenti e una piccola quantità di acqua fino a ottenere un miscuglio colorato e cremoso, che gli studenti hanno applicato su diversi supporti, ottenendo buona copertura, adesione e resistenza nel tempo (Figura 4).



Figura 4. Tempera alla caseina

La produzione di caseina per qualsiasi uso può essere ottenuta, in maniera più sostenibile, usando latte acido e limoni di scarto.

5. Intolleranza al lattosio ed educazione alimentare

Il percorso è stato integrato da temi di rilevanza sanitaria, come l'intolleranza al lattosio, introdotta mediante domande-problema volte a stimolare l'osservazione del sapore del latte normale rispetto a quello delattosato e la ricerca delle cause dell'intolleranza. Gli studenti hanno verificato sperimentalmente la maggiore dolcezza del latte delattosato, attribuendola alla presenza del glucosio derivante dall'idrolisi del lattosio e caratterizzato da un potere dolcificante superiore al disaccaride originario. Attraverso attività di ricerca guidata, gli studenti hanno approfondito i processi industriali di delattosazione, basati sull'impiego dell'enzima lattasi (β -galattosidasi), che idrolizza il legame glicosidico tra glucosio e galattosio, riducendo il contenuto residuo di lattosio a valori inferiori allo 0,1%.

Successivamente gli studenti sono arrivati a capire il motivo dell'intolleranza al lattosio, una condizione dovuta al deficit dell'enzima lattasi a livello intestinale, che può manifestarsi intorno ai quattro-cinque anni di vita, e che comporta la progressiva perdita della capacità di metabolizzare il lattosio. Quest'ultimo, non essendo digerito nell'intestino tenue, viene fermentato dal microbiota intestinale, con produzione di gas e conseguente comparsa di disturbi digestivi, rendendo necessario per i soggetti intolleranti l'uso di latte vegetale, latte animale delattosato o di compresse di lattasi prima dei pasti.

In laboratorio gli studenti hanno preparato latte senza lattosio utilizzando le compresse di lattasi e monitorando la reazione di idrolisi con striscette reattive per la determinazione enzimatica del glucosio nelle urine di pazienti diabetici [7].

Per verificare il funzionamento delle striscette reattive, gli studenti hanno preparato due campioni di controllo, uno di acqua distillata e un altro formato da una soluzione diluita di glucosio, riscaldati entrambi a 37 °C. Immergendo le striscette nei due campioni, per confronto con la scala colorimetrica riportata sul contenitore delle striscette reattive, che presenta colori diversi a seconda della concentrazione di glucosio rilevata, si è osservato che nell'acqua la striscia non mostra nessuna variazione di colore, mentre nel campione contenente la soluzione diluita di glucosio il colore della striscia cambia da verde acqua marina a marrone, confermando la presenza di glucosio e la corretta reattività delle striscette.

Per produrre latte delattosato, gli studenti hanno aggiunto una compressa di lattasi frantumata al latte intero, a 37 °C, monitorando l'idrolisi mediante le strisce reattive a intervalli di cinque minuti; il progressivo cambiamento del colore delle strisce reattive fino al marrone ha confermato la completa trasformazione del lattosio in glucosio e galattosio, come riportato in figura 5.



Figura 5. Verifica dell'azione della lattasi

6. Conclusioni

Il percorso didattico ha consentito agli studenti di affrontare in modo integrato e laboratoriale lo studio delle biomolecole, utilizzando il latte come sistema complesso capace di collegare teoria, sperimentazione e realtà quotidiana. Attraverso attività di indagine, progettazione ed esecuzione di protocolli sperimentali, gli studenti hanno sviluppato una comprensione approfondita dei fenomeni chimico-fisici e biochimici, consolidando al contempo competenze operative, capacità di analisi critica e lavoro collaborativo. Particolarmente significativa è risultata la capacità di interpretare i dati sperimentali, anche in presenza di scostamenti dai valori attesi, individuandone le possibili cause e riflettendo sull'importanza del controllo delle variabili sperimentali.

L'integrazione con tematiche di sostenibilità, economia circolare ed educazione alimentare ha ulteriormente arricchito il percorso, permettendo agli studenti di riconoscere il valore applicativo della chimica nella valorizzazione degli scarti e nella comprensione di problematiche di rilevanza sanitaria, come l'intolleranza al lattosio.

Al termine delle attività, il questionario di autovalutazione ha evidenziato un elevato grado di coinvolgimento e interesse: gli studenti hanno percepito il percorso come stimolante, formativo e in alcuni casi anche divertente, apprezzando in particolare il lavoro di gruppo, il confronto continuo e l'approccio integrato tra teoria e pratica. È emersa, inoltre, una maggiore consapevolezza del proprio apprendimento e del ruolo attivo nel processo formativo, insieme al desiderio di approfondire ulteriormente alcuni aspetti, quali le determinazioni analitiche e i processi enzimatici.

Nel complesso, l'esperienza si è rivelata efficace nel promuovere una didattica orientativa e centrata sullo studente, capace di stimolare curiosità e motivazione, di valorizzare le conoscenze pregresse e di favorire lo sviluppo di competenze disciplinari e trasversali, utili sia per il proseguimento degli studi sia per una cittadinanza scientifica consapevole.

Riferimenti bibliografici

- [1] V. Brandolini, *Insegnamento di Chimica degli alimenti e integratori alimentari*, Università di Ferrara, Materiale didattico A.A. 2012-13 (<https://www.unife.it/farmacia/lm.ctf/insegnamenti-dellordinamento-2005/mini-siti-a-a-2012-2013/chimica-degli-alimenti-e-integratori-alimentari-a-a-2012-2013/materiale-didattico/Latte.pdf>).
- [2] M. A. Ferrer, H. D. Goff, A. Hill, *Dairy Science and Technology eBook*, Canada, University of Guelph, 1996 (<https://books.lib.uoguelph.ca/dairyscienceandtechnologyebook/>).

- [3] V. M. Berzhets, O. Yu. Emelyanova, S. V. Khlgatian, S. Yu. Petrova, L. A. Pishulina, Structure and biological functions of milk caseins, *Russian Open Medical Journal*, 2022, **11**(2), 1-7 (DOI: 10.15275/rusomj.2022.0209).
- [4] *Computed structure model of Alpha-S1-casein*, RCSB, Protein Data Bank (https://www.rcsb.org/3d-view/AF_AFO62823F1/deposited).
- [5] *Bovine beta-lactoglobulin, Lattice X*, RCSB, Protein Data Bank (<https://www.rcsb.org/3d-view/1BEB/1>).
- [6] L. Abraham, J. M. Cabalsa, Exploring biochemical reactions of proteins, carbohydrates, and lipids through a milk-based demonstration and an inquiry-based worksheet: A COVID-19 laboratory experience, *Journal of Chemical Education*, 2020, **97** (9), 2669-2677 (DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c00666).
- [7] A. M. Madaio, Fare chimica con il latte, in *I tanti volti della Chimica. Percorsi innovativi per insegnarla e comprenderla* (a cura di E. Aquilini, E. Ghibaudi, M. Venturi, G. Villani) CLUEB, Bologna, 2024, pp. 294-311.

Gamification e pensiero critico nella didattica delle scienze: una riflessione a partire dall'esperienza del Detective Game della Scienza

Carmine Iorio e Sabina Gainotti

Unità di Bioetica dell'Istituto Superiore di Sanità

e-mail: carmine.iorio2508@gmail.com; sabina.gainotti@iss.it

Abstract. The Science Detective Game is a board game devised by the Bioethics Unit of the Italian National Institute of Health to explore, in a playful way, the dynamics of disinformation and the infodemic that emerged during the COVID-19 pandemic.

The game, illustrated by Lucia Baldassarri with graphics by Pietro Maiozzi, was tested as part of the European Researchers' Night 2025, at the stand 'Who killed Science during COVID?'

The game was created primarily to stimulate critical thinking and awareness of anti-science among participants, promoting a critical approach based on verifying information and evaluating sources. Taking on the role of detectives, participants are tasked with investigating who spread fake news, in what context and through what mechanisms during the COVID-19 pandemic crisis.

Through themed cards, unexpected twists, and interactions with researchers, the game offers an active learning experience in which participants may occasionally revisit their hypotheses, mirroring the revision process typical of the scientific method. In this sense, the game serves as an effective tool for making complex concepts accessible and fostering greater awareness of the value of evidence and factchecking, thereby contributing to the dialogue between science and the public.

Keywords: apprendimento ludico; pensare criticamente; fake news; educazione scientifica; metodo scientifico

1. Introduzione

La pandemia di COVID-19, come ormai ampiamente riconosciuto, è stata accompagnata da un fenomeno che si è rivelato significativo quanto persistente e duraturo, la cosiddetta infodemia [1].

Come riportato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, con l'espressione infodemia, ormai entrata nel linguaggio comune, si vuole indicare l'eccesso di informazioni, comprese quelle false o fuorvianti, diffuse in ambienti digitali e fisici durante un'epidemia [1]. È necessario sottolineare quanto, in situazioni di emergenza sanitaria, la sovrabbondanza informativa renda difficile orientarsi e distinguere tra fonti affidabili ed inaffidabili.

In questo contesto sono state proposte alcune categorie, qui riportate a scopo illustrativo, pur riconoscendo i limiti intrinseci di qualsiasi classificazione: disinformazione, disinformazione e malinformazione [2].

Le prime due tipologie condividono la caratteristica di veicolare informazioni false, ma differiscono in termini di intento: la disinformazione viene diffusa senza l'intenzione di ingannare, spesso in buona fede, mentre la disinformazione è creata deliberatamente per fuorviare chi la riceve [2]. La malinformazione, in generale, si riferisce a contenuti tendenzialmente veri, ma estrapolati dal contesto, condivisi in un momento o in un contesto diverso, o reinterpretati alla luce di nuovi eventi [2]. In situazioni caratterizzate da incertezza e paura, le informazioni false, che per comodità indicheremo come *fake news*, si diffondono sfruttando profondi bisogni cognitivi, quali, per citarne solo alcuni, la ricerca di spiegazioni semplici ed immediate ed il *bias* di conferma, ovvero la tendenza a selezionare unicamente o preferibilmente informazioni che confermano la nostra idea iniziale.

La possibilità, virtualmente per chiunque, di diffondere fake news e la rapidità con cui le stesse si dif-

fondono rende necessaria una riflessione sulla scienza e sul modo in cui essa può essere comunicata e, soprattutto, condivisa: in questo contesto si inseriscono il Detective Game della Scienza (Figura 1) e il presente contributo.



Figura 1. Poster per presentare il gioco *Chi ha ucciso la Scienza durante il COVID-19?*

Tra le riflessioni emerse, particolare attenzione è rivolta ad alcune questioni chiave per la didattica delle scienze:

- Come promuovere una migliore comprensione del metodo scientifico?
- Come favorire lo sviluppo di competenze di pensiero critico?
- Attualmente esistono dei metodi innovativi per rispondere a queste esigenze?

Sicuramente gli approcci didattici attivi [3], tra cui la *gamification* [3], che mirano a coinvolgere gli studenti e le studentesse in processi di apprendimento partecipativi potrebbero rappresentare una possibile risposta. Attraverso il gioco infatti è possibile simulare e ricreare dinamiche complesse, cercando di renderle il più accessibili possibili.

2. Il Detective Game della Scienza

Il gioco trae ispirazione dal volume *Antiscienza e salute- Come difendersi da fake news e infodemia*, curato da Margherita Venturi, Silvano Fuso e Carmine Iorio (Figura 2), che analizza i principali meccanismi alla base della disinformazione in ambito scientifico e sanitario [4].

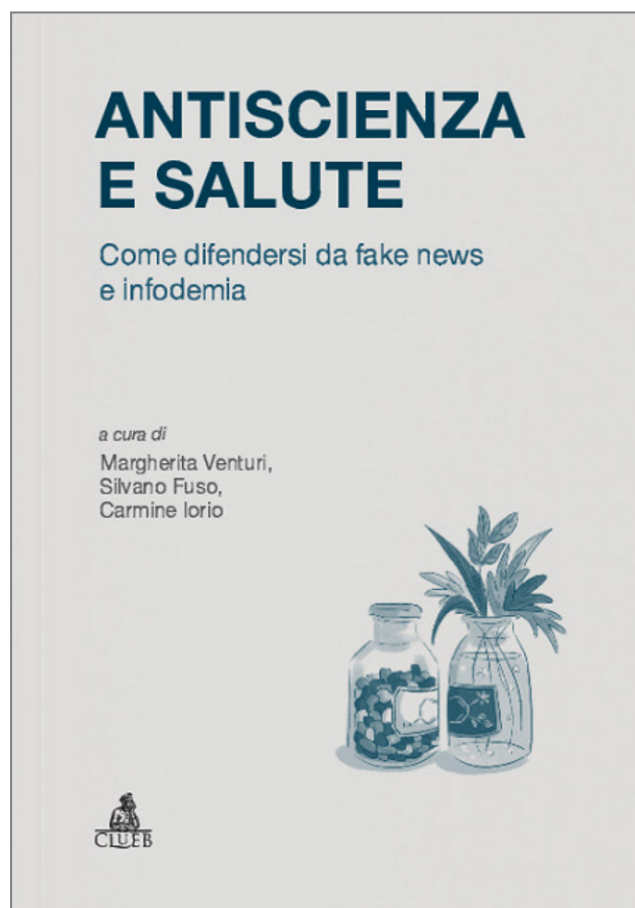


Figura 2. Libro *Antiscienza e Salute - Come difendersi da fake news e infodemia*, CLUEB, 2025

Il Detective Game della Scienza rappresenta un tentativo di tradurre tali contenuti in un’esperienza didattica, in cui i partecipanti possano confrontarsi attivamente con le dinamiche della disinformazione e con alcuni aspetti del metodo scientifico.

I partecipanti assumono il ruolo di detective e sono chiamati a ricostruire i meccanismi di diffusione di una fake news, individuando chi l’ha diffusa, in quale contesto e attraverso quali strumenti o armi.

La struttura si basa su alcuni elementi semplici: i personaggi (Figura 3), che rappresentano possibili diffusori di disinformazione, il tabellone (Figura 4), che riproduce simbolicamente i luoghi dell’infodemia, gli strumenti di diffusione delle fake news (Figura 5) e una serie di carte che regolano lo svolgimento della partita, le “carte imprevisto”. In particolare, queste ultime hanno un ruolo centrale, perché introducono azioni, ad esempio avanzare, retrocedere, o mostrare alcune carte, e informano i partecipanti su alcuni meccanismi di diffusione delle fake news, come l’editoria predatoria, il publication bias e l’uso dei preprint, ma anche del loro smascheramento attraverso il fact checking. Durante la notte dei ricercatori e delle ricercatrici 2025, gli input forniti dalle carte imprevisto hanno permesso ai ricercatori di interagire con i giocatori per approfondire temi quali l’infodemia, il funzionamento degli algoritmi dei social, l’uso non corretto dei medicinali e quello inappropriato degli integratori.



Figura 3. I personaggi del Detective Game della Scienza

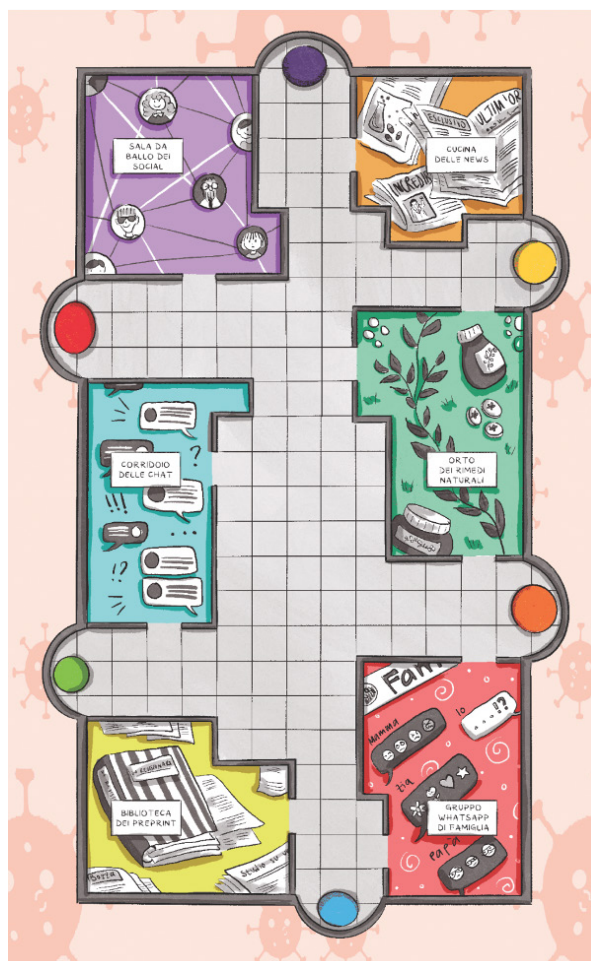


Figura 4. Il tabellone del Detective Game della Scienza



Figura 5. Gli strumenti di diffusione delle fake news

Con questa dinamica duale il gioco ha permesso di alternare momenti di indagine e confronto, mantenendo un equilibrio tra dimensione ludica e didattica.

3. Cosa ne pensa chi ha giocato?

Grazie al contributo di due giocatrici è stato possibile comprendere meglio l'impatto dell'esperienza, raccogliendo alcune impressioni di chi ha partecipato al gioco.

3.1 Come descriveresti il gioco?

Alice, 13 anni: all'inizio sembra un gioco facile, ma andando avanti diventa più complicato. Non basta indovinare, bisogna ragionare su quello che ti viene detto e mettere insieme le informazioni. Io ho chiesto alcuni chiarimenti a chi guidava il gioco e ho imparato cose nuove.

3.2 Cosa ti ha colpito di più durante il gioco?

Costanza, 13 anni: a me hanno colpito i disegni, soprattutto le facce dei colpevoli e le armi del delitto, sono molto divertenti. E poi il confronto con i ricercatori. Potevi fare domande e capire meglio alcuni concetti che di solito senti nominare, come gli algoritmi dei social o le fake news, ma senza approfondirli davvero.

3.3 Cosa pensate di aver imparato?

Alice: che sui social girano molte fake news, non bisogna credere a tutto. Anche quando una notizia sembra vera è meglio controllare e fare "fact checking".

Costanza: che è facile farsi convincere, soprattutto quando le informazioni sono presentate in modo semplice. Però ho anche capito che si può imparare a riconoscere certi meccanismi.

4. Conclusioni

Il Detective Game della Scienza vuole stimolare lo sviluppo del pensiero critico, la comprensione del metodo scientifico e la conoscenza delle dinamiche della disinformazione attraverso attività ludiche e partecipative. Come gli altri detective game, a mano a mano che evolve, il gioco richiede di raccogliere prove e indizi e scartare ipotesi iniziali, proprio come avviene nella costruzione della conoscenza scientifica.

I riscontri raccolti durante l'attività sono stati nel complesso positivi e hanno confermato come approcci di questo tipo possano rappresentare un valido supporto alla didattica delle scienze. La gamification, in questo senso, si dimostra utile a rendere accessibili temi complessi e stimolare una maggiore attenzione verso la qualità dell'informazione scientifica.

Resta comunque centrale la necessità di fornire alle studentesse e agli studenti strumenti per orientarsi in modo critico tra informazioni, evidenze e disinformazione: una sfida che oggi appare più che mai complessa.

Ringraziamenti

Si ringraziano Lucia Baldassarri per le illustrazioni del gioco e Pietro Maiozzi per la progettazione grafica, il cui contributo è stato fondamentale per la realizzazione del Detective Game della Scienza. Si segnala inoltre che il gioco è stato presentato anche nel Notiziario dell'Istituto Superiore di Sanità (Volume 39, n. 2, febbraio 2026), nell'articolo "Science Detective Game: a board game to debunk hoaxes and train critical thinking" (<https://www.iss.it/en/-/volume-39-n.-2-2026-il-progetto-salga-kro-avvio-di-un-percorso-di-studio-epidemiologico-partecipato-con-la-comunit%C3%A0-di-crotone.-i-cristalli-illuminano-l-imaging-medico-scintillatori-ispirati-dal-minerale-perovskite.-detective-game-della-scienza-un-g>).

Riferimenti bibliografici

- [1] World Health Organization, Infodemic (https://www.who.int/health-topics/infodemic#tab=tab_1).
- [2] Canadian Museum for Human Rights, Misinformation, Disinformation and Malinformation (<https://humanrights.ca/resource-guide/misinformation-disinformation-and-malinformation>)
- [3] C. Vlad, *Gamification - An innovative teaching method*, Galati University Press, 2021 (https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/project-result-content/63bd8c6a-86c0-4a75-9196-7ac990770101/Gamification_book%20Gamest.pdf).
- [4] M. Venturi, S. Fuso, C. Iorio, *Antiscienza e salute - Come difendersi da fake news e infodemia*, CLUEB, Bologna, 2025.