

## Fare chimica con il latte

Anna Maria Madaio<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana; <sup>2</sup>IIS "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 ( $\zeta$ ) 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

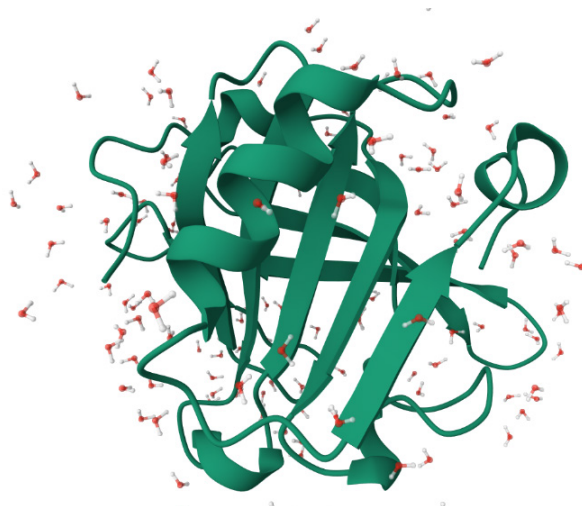
Dagli studi effettuati è emerso che la composizione del latte varia in funzione della specie animale; l'analisi comparativa ha consentito agli studenti di riflettere sul valore nutrizionale dei diversi tipi di latte (bovino, caprino, ovino, bufalino e umano), evidenziando in particolare la maggiore concentrazione 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:  $\alpha$ 1-caseina,  $\alpha$ 2-caseina e  $\beta$ -caseina, che sono idrofobiche e legano il calcio fosfato tramite legami esterei con gruppi OH di residui di serina, e  $\kappa$ -caseina, una glicoproteina idrofila localizzata sulla superficie micellare, fondamentale per mantenere le micelle in fase dispersa. L'idrolisi della  $\kappa$ -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  $\alpha$ -eliche e foglietti  $\beta$ . 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 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), formando caseinati.

Le sieroproteine (principalmente  $\alpha$ -lattoalbumina e  $\beta$ -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.**  $\beta$ -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  $\beta$  (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 ( $\beta$ -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  $\kappa$ -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.

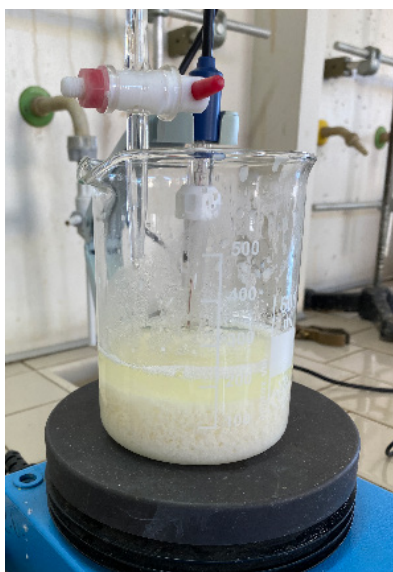


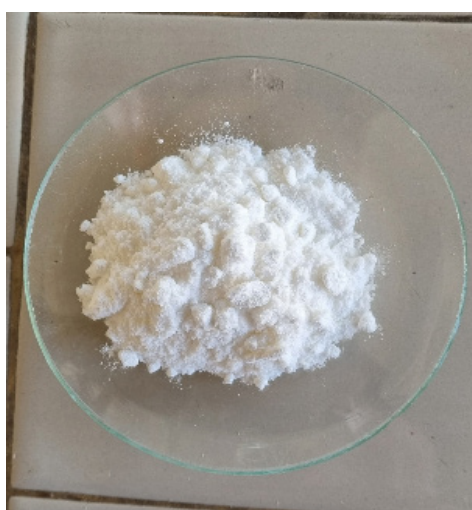
Figura 2. Precipitazione delle caseine

### 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  $\text{CaCO}_3$  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  $\alpha$  e  $\beta$ , 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

<b>Separazione dei componenti del latte</b>					
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
<b>Determinazione del punto di fusione del lattosio in °C (in letteratura, 202,8 °C)</b>					
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	
<b>Determinazione del potere rotatorio specifico del lattosio (in letteratura, +55,4°)</b>					
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°	
<b>Determinazione quantitativa del lattosio con reattivo di Fehling (in letteratura, 4,7 g/100 ml)</b>					
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 CO<sub>2</sub> 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 ( $\beta$ -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-dellordnamento-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](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.

