

Sicurezza e qualità alimentare: strategie innovative integrate lungo la filiera

La qualità e la sicurezza alimentare costituiscono elementi strategici per la sostenibilità dei sistemi agroalimentari e la tutela della salute pubblica. In un contesto globale caratterizzato da sfide ambientali, sanitarie e produttive, le biotecnologie offrono strumenti avanzati per il controllo, la tracciabilità e la valorizzazione delle produzioni. L'articolo illustra le principali frontiere biotecnologiche – dalla diagnostica avanzata ai biosensori intelligenti, dalla tracciabilità omica al packaging bioattivo – ed evidenzia l'importanza di un'integrazione lungo la filiera basata su digitalizzazione, interoperabilità dei dati e approccio One Health, come via verso sistemi alimentari resilienti, sostenibili e trasparenti.

DOI 10.12910/EAI2025-064

di Emilia Pucci, Alessandra Bernardini, Valeria Poscente, Filippo Sevi*, Claudia Zoani – Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili, *Laboratorio Innovazione delle Filiere Agroalimentari

1. La qualità e la sicurezza alimentare nell'era delle biotecnologie

Garantire alimenti sani, sicuri e sostenibili rappresenta oggi una delle sfide centrali per i sistemi agroalimentari e per la società in generale. L'aumento della domanda di cibo, l'intensificazione dei processi produttivi, i cambiamenti climatici e la crescente complessità delle catene di approvvigionamento amplificano l'esposizione a rischi microbiologici, chimici e fisici, richiedendo approcci sempre più integrati e predittivi. In questo contesto si afferma l'approccio One Health, che riconosce l'interdipendenza tra salute umana, animale e ambientale, ponendo le basi per strategie di prevenzione e gestione del rischio fondate su una visione sistemica. Le biotecnologie applicate ai sistemi agroalimentari rappresentano un pilastro di questo paradigma, offrendo strumenti innovativi per la caratterizzazione dei pericoli biologici e chimici, la dia-

gnosi precoce di contaminazioni, la valutazione del rischio e il miglioramento della qualità e sostenibilità dei processi produttivi con l'obiettivo di coniugare innovazione scientifica e sostenibilità, favorendo la transizione verso sistemi alimentari resilienti e circolari in cui sviluppo tecnologico e tutela della salute pubblica procedono insieme.

2. Le nuove frontiere biotecnologiche per la sicurezza e la qualità alimentare

Diagnostica avanzata, biosensori e tecnologie omiche integrate

Le innovazioni nel campo della diagnostica avanzata stanno ridefinendo gli standard di qualità e sicurezza alimentare. **Scienze omiche**, tecniche di **biologia molecolare** e **analisi avanzate** e ad alta risoluzione consentono oggi di rilevare contaminanti biologici e chimici con rapidità, sensibilità e specificità senza precedenti. L'impiego di piattaforme ad alta risoluzio-

ne – come la **PCR digitale**, il sequenziamento di nuova generazione (**NGS**) e l'**analisi metagenomica** – permette l'identificazione rapida, accurata e sensibile di microrganismi patogeni (es. *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.*), anche non coltivabili e la caratterizzazione delle comunità microbiche lungo l'intera filiera, fornendo dati fondamentali ai fini della tracciabilità e della valutazione e gestione del rischio. La **genomica** e il **DNA barcoding** consentono di identificare con precisione le specie utilizzate e di verificare l'origine delle materie prime, contrastando frodi e sofisticazioni. La **metagenomica** consente di analizzare il microbioma alimentare per individuare patogeni e monitorare la microflora utile nei processi fermentativi. Attraverso **proteomica** e **metabolomica**, poi, è possibile caratterizzare proteine e metaboliti che definiscono le proprietà nutrizionali, aromatiche e sensoriali, oltre a rilevare allergeni o alterazioni di processo.

Parallelamente, un ampio spettro di **metodologie chimico-analitiche strumentali avanzate** consente oggi l'identificazione e la quantificazione di contaminanti e residui e la valutazione della qualità e dell'origine geografica, botanica o zoologica e dell'autenticità di materie prime e prodotti con elevata affidabilità.

Le tecniche cromatografiche accoppiate alla spettrometria di massa, quali GC-MS, LC-MS e LC-MS/MS, rappresentano oggi lo standard di riferimento per l'analisi multiresiduo di contaminanti organici, pesticidi, micotossine e composti xenobiotici, oltre che per la caratterizzazione dei profili di composti bioattivi, aromi e metaboliti di interesse nutrizionale e funzionale. A queste si affiancano le tecniche di spettroscopia atomica (es. ICP-AES) e spettrometriche (es. ICP-MS), che consentono la determinazione del profilo multielementale di materie prime, prodotti e agroecosistemi di produzione, inclusi gli

elementi tossici e potenzialmente tossici e le terre rare (REE - Rare Earth Elements), utili come fingerprint per studi di origine e autenticità.

L'IR-MS è impiegata per studi di autenticità e tracciabilità isotopica, mentre le tecniche di spettroscopia molecolare quali UV-Vis e NIR consentono analisi chimiche rapide, non distruttive e in tempo reale dei prodotti lungo le diverse fasi della filiera. Inoltre, i **biosensori di nuova generazione**, integrati con **sistemi microfluidici e reti IoT**, permettono il **monitoraggio "on site" in tempo reale** di patogeni, allergeni e tossine. Questa

convergenza tecnologica rende i controlli più rapidi, sensibili e predittivi, rafforzando la **tracciabilità e la tutela della salute pubblica**. L'integrazione con sistemi digitali e soluzioni di **blockchain**, consente di costruire una **"carta d'identità molecolare dell'alimento"**, garantendo tracciabilità e trasparenza lungo tutta la filiera.

dei processi fermentativi, riducendo il rischio di contaminazioni. Un ambito emergente è quello delle colture cellulari vegetali, che offrono la possibilità di produrre composti bioattivi e ingredienti funzionali in condizioni asettiche e controllate, garantendo elevati standard di sicurezza igienico-sanitaria. Attraverso tecniche di elicitazione¹ è possibile modulare

l'espressione di specifici geni coinvolti nella biosintesi di metaboliti secondari di interesse salutistico, riducendo al contempo l'uso di risorse e l'impatto ambientale. Queste tecnologie, integrate lungo la filiera, rappresentano un passo concreto verso un sistema alimentare più sicuro, sostenibile e orientato alla salute del consumatore.

Genome editing per la sicurezza, la qualità e la sostenibilità delle produzioni

Le tecniche di genome editing si configurano oggi come una delle più avanzate frontiere bio-

tecnologiche per il miglioramento mirato della sicurezza e qualità degli alimenti. Le Nuove Tecniche Genomiche (NGTs) consentono di introdurre modifiche precise e specifiche nel genoma di piante di interesse agroalimentare, intervenendo in modo puntuale su geni chiave per rafforzare i meccanismi di difesa fitosanitaria e modulare parametri nutrizionali e funzionali. A seconda del bersaglio genetico, è possibile ridurre la presenza di composti antinutrizionali o allergenici, oppure incrementare il contenuto di metaboliti bioattivi, contribuendo alla realizzazione di ali-



Biotecnologie microbiche, fermentazioni controllate e colture cellulari

Le biotecnologie microbiche applicate ai processi produttivi rappresentano un pilastro dell'innovazione agroalimentare. Le fermentazioni controllate o l'impiego di microbiomi caratterizzati permettono di valorizzare le materie prime, migliorandone stabilità, conservabilità e qualità sensoriale e nutrizionale. Parallelamente, l'applicazione della metagenomica permette di caratterizzare la comunità microbica associata alle diverse fasi produttive, contribuendo così a una gestione più sicura e tracciabile

menti funzionali con effetti benefici sulla salute umana. Parallelamente, il **genome editing** consente di aumentare la **resilienza delle colture a stress biotici e abiotici**, migliorando la loro **tolleranza a patogeni e condizioni climatiche estreme** e favorendo un'agricoltura più **sostenibile e adattiva** ai cambiamenti climatici.

Sul piano normativo, l'Unione Europea sta definendo un quadro regolatorio dedicato alle NGTs, che distingue tali approcci dagli OGM tradizionali, riconoscendone precisione, sostenibilità e contributo alla sicurezza alimentare lungo la filiera.

Packaging bioattivo, intelligente e sostenibile

La ricerca nel campo dei **materiali innovativi per la conservazione degli alimenti** sta evolvendo sempre più verso lo sviluppo di **imballaggi bioattivi, intelligenti e sostenibili**, capaci di **preservare e monitorare la qualità del prodotto**. I **film polimerici funzionalizzati** con composti naturali a proprietà **antimicrobiche o antiossidanti**, ottenuti da estratti vegetali o da **sottoprodotti agroalimentari ricchi in molecole bioattive**, oli essenziali o metaboliti microbici, consentono di prolungare la **shelf-life** degli alimenti e di **stabilizzarne le proprietà sensoriali e nutrizionali**. L'impiego di bioplastiche e biocompositi ottenuti da fonti rinnovabili o sottoprodotti agroalimentari contribuisce a ridurre l'impatto ambientale del packaging, favorendo la circolarità dei materiali e l'allineamento con i principi delle politiche europee. Parallelamente, l'integrazione di **indicatori ottici o chimici sensibili** – ad esempio – a **variazioni di pH, ossigeno o composti**

volatili permette di realizzare sistemi "intelligenti" in grado di fornire informazioni sullo stato di conservazione del prodotto, migliorando la gestione della qualità e la sicurezza per il consumatore. Questa integrazione tra **funzionalità bioattiva, sostenibilità ambientale** e tecnologie emergenti, definisce una delle traiettorie più promettenti per coniugare innovazione tecnologica, sicurezza e responsabilità ambientale.

3. Integrazione lungo la filiera: verso sistemi alimentari resilienti

L'innovazione tecnologica deve tradursi in un valore concreto lungo l'intera filiera agroalimentare. L'integrazione tra **biotecnologie, digitalizzazione e sostenibilità** permette di sviluppare sistemi **resilienti, efficienti e capaci di adattarsi** ai mutamenti ambientali e di mercato. In questa prospettiva, l'impiego congiunto di **biotecnologie, intelligenza artificiale (IA) e machine learning (ML)** contribuisce ad **ottimizzare i processi produttivi**, migliorare la **qualità e la sicurezza degli alimenti** e potenziare **tracciabilità e sostenibilità**, anche favorendo un **uso più razionale delle risorse**. Le tecnologie digitali – **sensori IoT, digital twin e piattaforme interoperabili** – consentono la raccolta e la condivisione in tempo reale di dati relativi a parametri produttivi, ambientali e qualitativi. L'integrazione con dati **omici e logistici** abilita un **decision making basato su evidenze**, supportando decisioni più tempestive e mirate e rafforzando la trasparenza lungo la filiera. L'utilizzo di **digital twin** consente inoltre di simulare scenari complessi supportando decisioni strategiche basate, ad esem-

pio, sulla valutazione dell'impatto di variabili climatiche, biologiche e logistiche sulla sicurezza e la qualità degli alimenti. In questo contesto, la collaborazione tra **ricerca, imprese e istituzioni** è cruciale per il trasferimento tecnologico e la standardizzazione dei controlli, rendendo la **sicurezza alimentare** un pilastro della sostenibilità e un vantaggio competitivo per il sistema agroalimentare europeo.

4. Conclusioni e prospettive: dalla ricerca alla fiducia del consumatore

L'integrazione tra biotecnologie, digitalizzazione e approccio sistemico One Health consente di affrontare in modo efficace le sfide emergenti della sicurezza e qualità alimentare. Tuttavia, il progresso tecnologico deve essere accompagnato da strategie di comunicazione, formazione e governance capaci di **tradurre l'innovazione scientifica in fiducia del consumatore e in valore socioeconomico**. Il rafforzamento del dialogo tra ricerca e industria, la creazione di infrastrutture di dati condivisi e l'adozione di standard comuni rappresentano condizioni indispensabili per il consolidamento di un sistema alimentare europeo resiliente, sicuro e sostenibile.

Le prospettive future indicano la necessità di consolidare l'approccio **One Health** come cornice di riferimento per la ricerca e le politiche, promuovendo la convergenza tra salute, ambiente e innovazione. In questa direzione, la sicurezza e la qualità alimentare non costituiscono soltanto requisiti normativi, ma pilastri fondamentali per la transizione verso un futuro alimentare equo, trasparente e basato sulla conoscenza.

¹ Tecnica che consiste nell'applicare alle cellule vegetali uno stimolo esterno, chimico, fisico o biologico, per attivare in modo naturale la produzione di composti bioattivi. In pratica si "accendono" selettivamente vie metaboliche che aumentano la sintesi di molecole utili, come polifenoli o antiossidanti.



Bibliografia

- Agroalimentare: da ENEA il packaging antimicrobico che allunga la conservazione delle fragole - <https://www.media.enea.it/comunicati-e-news/archivio-anni/anno-2025/agroalimentare-da-enea-il-packaging-antimicrobico-che-allunga-la-conservazione-delle-fragole.html>
- Di Bitonto P, Magarelli M, Novielli P, Romano D, Diacono D, de Trizio L, Zoani C, et al. From data to nutrition: the impact of computing infrastructure and artificial intelligence. *Explor Foods Foodomics*. 2024;2:810-29. <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00063>
- Magarelli, M., Di Bitonto P., Romano D., Novielli P., Ahsen R., Zoani C., et al. (2025) "Data-Driven Innovations in Food Safety: The Role of AI and Big Data in METROFOOD-IT," 2025 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0 & IoT), Castelldefels, Spain, 2025, pp. 168-172, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT66048.2025.11122087
- Motelica L, Ficai D, Oprea OC, et al. Antimicrobial Packaging for Plum Tomatoes Based on ZnO Modified Low-Density Polyethylene. *Int J Mol Sci*. 2024;25(11):6073. Published 2024 May 31. doi:10.3390/ijms25116073
- Poscente V, Di Gregorio L, Costanzo M, Bernini R, Bevivino A. Flow cytometry: Unravelling the real antimicrobial and antibiofilm efficacy of natural bioactive compounds. *J Microbiol Methods*. 2024;222:106956. doi:10.1016/j.mimet.2024.106956
- Poscente V, Di Gregorio L, Costanzo M, Bernini R, Bevivino A. Flow cytometry: Unravelling the real antimicrobial and antibiofilm efficacy of natural bioactive compounds. *J Microbiol Methods*. 2024;222:106956. doi:10.1016/j.mimet.2024.106956
- Poscente V, Di Gregorio L, Costanzo M, et al. Lactiplantibacillus plantarum monolayer enhanced bactericidal action of carvacrol: bio-film inhibition of viable foodborne pathogens and spoilage microorganisms. *Front Microbiol*. 2023;14:1296608. Published 2023 Nov 22. doi:10.3389/fmicb.2023.1296608
- Sorbo, A., Pucci, E., Nobili, C., Taglieri, I., Passeri, D., & Zoani, C. (2022). Food Safety Assessment: Overview of Metrological Issues and Regulatory Aspects in the European Union. *Separations*, 9(2), 53. <https://doi.org/10.3390/separations9020053>
- Sportelli MC, Ancona A, Volpe A, et al. A New Nanocomposite Packaging Based on LASIS-Generated AgNPs for the Preservation of Apple Juice. *Antibiotics (Basel)*. 2021;10(7):760. Published 2021 Jun 22. doi:10.3390/antibiotics10070760