



EDIZIONE A.S. 2025/26

ARTICOLO 2

RISORSE NATURALI E SALUTE

Come la ricerca ci aiuta a salvaguardare persone e ambiente

madforscience.fondazionediasorin.it

Risorse Energetiche Green: ricerca e sperimentazione di carburanti alternativi a quelli tradizionali che hanno un minor impatto sull'ambiente, preservano l'atmosfera, il territorio e di conseguenza la salute di cittadine e cittadini.

Le **biotecnologie ambientali** rappresentano una delle soluzioni più promettenti per contrastare l'inquinamento atmosferico, un problema globale che influisce negativamente sulla salute umana, sugli ecosistemi e sul clima. Tra gli interventi possibili rientrano anche pratiche virtuose come la cura dei boschi per la raccolta sostenibile di biomassa lignocellulosica, che favorisce un uso efficiente delle risorse agro-forestali. Questo approccio contribuisce alla prevenzione di incendi e dissesti idrogeologici, valorizza gli scarti di lavorazione e consente il recupero di aree marginali non adatte all'agricoltura, generando ricadute ambientali, sociali ed economiche positive per il territorio.

Uno dei settori più difficili da decarbonizzare è quello dei trasporti, in particolare quello dell'aviazione. Per questo, l'UE ha introdotto il regolamento ReFuelEU Aviation, che impone dal 2025 l'uso minimo del 2% di SAF (Sustainable Aviation Fuels), fino a raggiungere il 63% nel 2050. I SAF sono prodotti da materie prime rinnovabili e di scarto, come oli vegetali usati (UCO, olio da cucina usato, Used Cooking Oil), scarti agricoli e forestali, alghe e rifiuti organici. L'Italia si colloca nelle prime posizioni in questo settore innovativo: infatti, **un terzo del carburante aereo sostenibile** di cui ha bisogno l'Europa verrà prodotto in Sicilia, dalla bioraffineria di Gela di Enilive¹ partendo da rifiuti industriali e vegetali. L'impianto siciliano ha una capacità produttiva di 400 mila tonnellate/anno pari a 736 mila tonnellate/anno di biomassa proveniente da materie prime di scarto. Con la sempre crescente ricerca di fonti energetiche sostenibili e rinnovabili, due importanti processi chi-

mici si distinguono per la loro capacità di convertire biomasse e scarti organici in combustibili alternativi: **la transesterificazione e la pirolisi**.

La **transesterificazione** è una **reazione chimica**² che permette di trasformare **oli vegetali o grassi animali** in **biodiesel** (principalmente esteri metilici o etilici) e glicerina come sottoprodotto. Questo processo avviene mediante l'aggiunta di un alcol (come il metanolo o l'etanolo) in presenza di un catalizzatore (tipicamente una base come l'idrossido di sodio o di potassio). Il biodiesel ottenuto può essere utilizzato come combustibile nei motori diesel, rappresentando un'alternativa ecologica e rinnovabile ai carburanti fossili.

Un'altra tecnologia emergente è la **pirolisi**³, un processo termochimico **anaerobico** (avviene cioè in assenza di ossigeno) che permette di convertire **biomasse solide** (come residui agricoli, forestali o rifiuti organici) in tre principali prodotti: **bio-olio**, **biochar** e **gas di sintesi**. La pirolisi avviene a temperature elevate (tipicamente tra i 400 e i 700 °C) e, a seconda delle condizioni operative, è possibile ottimizzare la resa di uno dei prodotti desiderati.

Il **bio-olio** può essere raffinato per ottenere combustibili liquidi, il **biochar** – un materiale carbonioso – viene utilizzato come ammendante del suolo per migliorare la fertilità, per trattenere acqua e nutrienti e per favorire la crescita delle piante. Inoltre, il biochar ha un importante ruolo nella mitigazione dei cambiamenti climatici perché sequestra il carbonio nel suolo per lunghi periodi, riducendo la quantità di CO₂ in atmosfera. Infine, il **gas di sintesi** (o syngas) può essere impiegato per produrre energia termica o elettrica.

1 - Enilive: a Gela avviato l'impianto che produrrà fino a quasi un terzo della domanda europea di SAF, carburante sostenibile per l'aviazione

2 - Cavani, F., & Teles, J. H. (2009). *Chimica sostenibile*. Zanichelli. Concetti chiave della chimica verde, incluso il biodiesel come alternativa ai carburanti fossili.

3 - Valitutti, G., Tifi, A., Gentile, M., & Rado, G. (2012). *Chimica: concetti e modelli per il secondo biennio*. Zanichelli. Trasformazioni termochimiche della materia e i processi industriali sostenibili.

Un esempio perfetto di applicazione delle **biotecnologie ambientali** è il biometano. Questa eccellenza della **bioeconomia circolare**, si ottiene infatti dalla purificazione del biogas, prodotto tramite **digestione anaerobica di biomasse organiche** (scarti agricoli, rifiuti organici e liquami). La digestione anaerobica è un processo biologico in cui microorganismi degradano materia organica in assenza di ossigeno, **generando biogas** (principalmente metano e CO₂) e **digestato** (residuo liquido/solido). Il biogas viene poi sottoposto a processi di purificazione del gas (upgrading) per rimuovere CO₂, H₂S, acqua e impurità, ottenendo così il biometano, che ha caratteristiche analoghe al metano fossile, e può essere utilizzato come carburante, immesso nella rete del gas o impiegato per produrre energia. Il **digestato**⁴ – il residuo ricco di nutrienti derivante dalla digestione anaerobica – è un fertilizzante naturale utilizzato in agricoltura, contenente azoto, fosforo, potassio e materia organica. Può essere immagazzinato, trattato ulteriormente (separazione frazione solida/liquida) e distribuito nei terreni per migliorare la fertilità del suolo.

Per rendere il settore del biogas ancora più sostenibile, per migliorare l'efficienza del recupero

energetico e **per ridurre le emissioni di metano** e quindi l'impronta climatica legata allo stoccaggio del digestato, il Programma Regionale del Fondo Europeo di Sviluppo Regionale 2021-2027 dell'Emilia Romagna guidato dal CRPA Lab⁵ ha attivato il **BioMethane Tracer Project**, un progetto biennale (2024-2026) che ha come obiettivo sviluppare delle linee guida e un servizio per il monitoraggio continuo delle **emissioni fuggitive di biometano** negli impianti di digestione anaerobica.

Oltre a diversi tipi di microrganismi anaerobi, ogni gruppo con un ruolo specifico nella degradazione della biomassa fino alla produzione finale di metano, anche gli enzimi rivestono un ruolo chiave nei processi di digestione anaerobica. Un recente lavoro di revisione⁶ scientifica ha infatti evidenziato come l'aggiunta di enzimi esogeni, quali cellulasi, xilanasi e β-glucosidasi, migliori significativamente la degradazione della biomassa lignocellulosica. In particolare, tali integrazioni enzimatiche possono portare a incrementi fino al 100% nella produzione di metano, soprattutto quando applicate a residui agricoli (come paglia ed erba) e a fanghi provenienti da allevamenti zootecnici.



4 - CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali. (2024). Modelling Biomethane Emissions from Digestate Storage. European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE 2024), Sess. Biogas and Biomethane. <https://www.carpa.it>

5 - Biobiogas/biometano. Workshop tecnico, Reggio Emilia, ottobre 2023. Methane Tracer Project. (2023). Sistemi di monitoraggio delle emissioni fuggitive negli impianti di digestione anaerobica.

6 - Aworanti, O. A., Ajani, A. O., Agbede, O. O., Agarry, S. E., Ogunkunle, O., Laseinde, O. T., Kalam, M. A., & Fattah, I. M. R. (2023). *Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: A comprehensive review*. Frontiers in Energy Research, 11, 1170133. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>

Un **ulteriore metodo**, efficace e sostenibile, per potenziare la conversione della biomassa in biogas, ottimizzando l'efficienza complessiva del sistema è l'**augmentation microbica**. Essa prevede l'inoculo mirato di ceppi microbici⁷ selezionati all'interno dell'impianto di digestione anaerobica. Questi microrganismi producono naturalmente enzimi cellulolitici, come cellulasi e xilanasi, capaci di degradare la cellulosa e l'emicellulosa presenti in molte biomasse vegetali. La conseguente liberazione di zuccheri semplici fornisce substrati facilmente assimilabili per i batteri metageni, migliorando la resa del processo.

Un recente studio ha dimostrato che combinando il **pretrattamento a vapore** (*steam-explosion*), che rompe la struttura fisica della biomassa rendendo più accessibili i polisaccaridi, e la *bioaugmentation* con *Caldicellulosiruptor bescii*⁸, un batterio cellulolitico, capace di degradare la cellulosa e l'emicellulosa in zuccheri fermentabili, la produzione di metano aumenta di circa 80-100% rispetto al controllo senza trattamento.

A gennaio 2025, ricercatori del Centro Brasiliano per la Ricerca in Energia e Materiali (CNPEM) hanno ottenuto un **enzima** che potrebbe rivoluzionare il processo di decostruzione della cellulosa, consentendo, tra le altre applicazioni tecnologiche, **la produzione su larga scala del cosiddetto etanolo di seconda generazione**, derivato da scarti agroindustriali come la bagassa di canna da zucchero e la paglia di mais.

La ricerca pubblicata sulla rivista Nature⁹ (Febbraio, 2025), descrive questo **enzima** chiamato **CelOCE** (Cellulose Oxidative Cleaving Enzyme) in grado di degradare la cellulosa, il polimero rinnovabile più abbondante sulla Terra, una vera e propria sfida per la depolimerizzazione biologica.

Si tratta di un metallo enzima già pronto per esse-

re inglobato nei vari processi produttivi, anche se nato per applicazioni più strutturate, il CelOCE¹⁰ può essere infatti adattato a **laboratori meno specializzati** per produrre **etanolo** e per aumentare le materie prime utili per la **produzione di biocarburanti di seconda generazione** (feedstock) anche su piccola scala, contribuendo in modo concreto a una transizione energetica più inclusiva.

Questo enzima consente, infatti, l'ottimizzazione delle fasi cruciali – come il pretrattamento della biomassa e la fermentazione – facilitando l'accesso agli zuccheri contenuti nei materiali lignocellulosici e lo sfruttamento di risorse locali come scarti vegetali, potature o residui agricoli del proprio territorio. Infatti, il CelOCE potrebbe essere impiegato per idrolizzare la cellulosa in **zuccheri semplici**, principalmente glucosio e arabinosio, in condizioni di laboratorio più miti rispetto ai metodi tradizionali, operando efficacemente a circa 50 °C e pH 5, riducendo così sia i costi energetici sia l'impatto ambientale del pretrattamento chimico-fisico.

Gli **zuccheri fermentabili ottenuti** possono alimentare due principali percorsi biotecnologici. Il primo consiste nella fermentazione mediante batteri e lieviti per la produzione di etanolo di seconda generazione, con rese teoriche che possono superare i 0,45 g di etanolo per grammo di zucchero fermentabile¹¹. Il secondo approccio prevede l'uso di lieviti oleaginosi, microrganismi in grado di accumulare fino al 70% del loro peso secco in oli intracellulari, che possono essere successivamente trasformati, tramite transesterificazione, in biodiesel e glicerina.

7 - Ozsefil IC, Miraloglu IH, Ozbayram EG, Ince B, Ince O. Bioaugmentation of anaerobic digesters with the enriched lignin-degrading microbial consortia through a metagenomic approach. Chemosphere. 2024 May;355:141831. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141831. Epub 2024 Mar 30. PMID: 38561162.

8 - <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-018-1025-z> Mulat, D.G., Huerta, S.G., Kalyani, D. et al. Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment and bioaugmentation with cellulolytic bacterium *Caldicellulosiruptor bescii*. *Biotechnol Biofuels* 11, 19 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1025->

9 - A metagenomic 'dark matter' enzyme catalyses oxidative cellulose conversion, 2025. www.nature.com

10 - Natural enzyme capable of cleaving cellulose could transform biofuel production, 2025. phys.org

11 - Zhao, X. Q., Zi, L. H., Bai, F. W., Lin, H. L., Hao, X. M., & Yue, G. J. (2012). Bioethanol from lignocellulosic biomass. In *Biotechnology in China III: Biofuels bioenergy* (Vol. 128, pp. 25-51). Springer.

Nel percorso di decarbonizzazione globale anche il **bioidrogeno**¹² (ovvero idrogeno derivato da **biomasse** anziché da fonti fossili) e la sua integrazione con le infrastrutture esistenti come reti elettriche, gas, teleriscaldamento e trasporto, riveste un ruolo fondamentale. Il bioidrogeno può essere considerato come un vettore energetico strategico¹³ per gli sviluppi futuri (come riportato nei documenti della Strategia Nazionale Idrogeno SNI¹⁴ e della Strategia Italiana di Ricerca sull'Idrogeno, SIRI¹⁵).

I principali processi di produzione del bioidrogeno comprendono il **reforming a vapore** (*steam reforming*) del biometano derivante da biomasse zuccherine, amidacee e FORSU (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani). Si tratta di una reazione di conversione degli idrocarburi con vapore acqueo (H_2O), in presenza di un catalizzatore (tipicamente nichel), ad alte temperature (700-1.100 °C). L'impiego di biogas o biometano come materia prima nello *steam reforming* consente di integrare questo processo in un modello di produzione energetica più sostenibile.

La **gassificazione a vapore** (*steam gasification*) rappresenta un'altra tecnologia promettente per la produzione sostenibile di bioidrogeno. Si tratta di un **processo termochimico** in cui materiali organici – come scarti agricoli, residui forestali o frazioni organiche dei rifiuti – vengono convertiti in **gas di sintesi** (syngas), principalmente costituiti da H_2 , CO , CO_2 e CH_4 , mediante l'applicazione di vapore acqueo ad alta temperatura (tipicamente 700-900 °C). Anche in questo caso, utilizzando **biomassa rinnovabile**, la produzione di bioidrogeno via gassificazione a vapore può ridurre drasticamente le emissioni nette di gas serra. Il bioidrogeno è una soluzione green in crescita ma non ancora utilizzabile su larga scala per via dei costi

tuttora elevati e della bassa efficienza, anche se a livello internazionale si stanno avviando numerose sperimentazioni. Un esempio di economia circolare applicata alla bioenergia è rappresentato dal progetto **H2Wood – BlackForest**.

H2BlackForest¹⁶ comprende quattro sotto progetti che studieranno e renderanno possibile la produzione di idrogeno verde nella Foresta Nera. La gestione forestale e l'industria del legno di questa grande area boschiva generano grandi quantità di **scarti lignocellulosici**. Questi sottoprodotti, a basso valore economico e complessi da smaltire, rappresentano un **substrato promettente per la produzione di bioidrogeno**. Attraverso processi termochimici (gassificazione, pirolisi con reforming) o biologici (fermentazione oscura e fotofermentazione), tali biomasse possono essere convertite in **H2 rinnovabile**, privo di emissioni dirette di CO_2 in fase di utilizzo. Oltre ai residui legnosi, le **microalghe** offrono un ulteriore contributo alla produzione di bioidrogeno. Alcune specie fotosintetiche (*Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus*) sono in grado di produrre H_2 sfruttando la luce solare e l'attività di enzimi idrogenasi in condizioni di limitazione nutrizionale (es. carenza di zolfo). L'associazione tra **biomassa forestale** e **microalghe** si configura come un modello di **bioraffineria integrata**, capace di incrementare le rese complessive di bioidrogeno, ridurre l'accumulo di sottoprodotti indesiderati e di valorizzare residui locali. Questa strategia potrebbe trasformare la Foresta Nera in un laboratorio a cielo aperto di innovazione energetica, coniugando la gestione sostenibile delle risorse forestali con la produzione di **vettori energetici rinnovabili** ad alto valore strategico.

12 - Zayer Kabeh, Prussi & Chiaramonti, 2025 - "Advances in Bio-Hydrogen Production: A Critical Review of Pyrolysis Gas Reforming". Applied Sciences, 15(7), 3995. Articolo aggiornato che sintetizza i progressi recenti nelle tecnologie di produzione di bio-idrogeno, con attenzione a processi termochimici e rendimento dell'idrogeno.

13 - https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en. European Council COP 28 - Consilium»

14 - <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/paris-agreement-climate/cop28/>

15 - <https://www.mim.gov.it/documents/20182/2312362/Prime-indicazioniSIRI.pdf/a91b6eae-49cb-4fff-72cd-361e9fe5f36c?version=1.0&t=1605009647833>

16 - <https://pugnalom.io/it/h2blackforest-rende-l%27idrogeno-adatto-all%27uso-quotidiano/>

IL PROGETTO Mad for Science – Sicurezza, fattibilità e Dark Fermentation

La scheda progetto del Concorso *Mad for Science* richiede l'analisi dettagliata della fattibilità che consideri il numero di ore necessarie e gli spazi da dedicare alle esperienze, le risorse umane coinvolte, e, soprattutto, la garanzia che tutte le attività si svolgano in condizioni di assoluta sicurezza.

Alcuni processi ed esperimenti scientifici richiedono elevati standard di sicurezza; un esempio significativo è la **Dark Fermentation**, un processo biologico anaerobico in cui microrganismi degradano biomassa organica, come rifiuti alimentari o residui agricoli, per produrre idrogeno molecolare (H_2) senza necessità di luce. A causa della complessità e dei potenziali rischi associati, tale processo non è adatto a laboratori scolastici, anche se ben attrezzati. La fermentazione può infatti determinare l'accumulo di gas infiammabili, come idrogeno e metano, con conseguente rischio di esplosioni in ambienti chiusi o privi di adeguata ventilazione. Inoltre, può generare pressioni elevate all'interno dei bioreattori e, in caso di mancato controllo del pH o dei metaboliti, causare il rilascio di composti tossici.

Vista la complessità di questa reazione, la Dark Fermentation non deve essere realizzata in ambito scolastico; per garantire comunque la valenza didattica, anche a supporto di altre esperienze, è possibile ricorrere a simulazioni con modelli matematici e software, i cui link sono facilmente reperibili in rete.

IL PROGETTO Mad for Science – Gli obiettivi sperimentali e didattici con focus STEM

Nella stesura della scheda progetto per il Concorso *Mad for Science*, è essenziale che la domanda di ricerca venga ancorata agli **obiettivi sperimentali** che a loro volta dovranno essere **specifici** rispetto al tema studiato, **realizzabili** con le risorse disponibili e **coerenti** con la domanda di ricerca o l'ipotesi iniziale.

Una problematica ambientale diffusa è quella legata allo smaltimento degli scarti agricoli e a quelli delle grandi filiere zootecniche del Nord Italia, come per esempio il letame bovino, prodotto in grandi quantità negli allevamenti da latte e per la produzione di formaggi (es. Parmigiano Reggiano, in Emilia-Romagna). L'utilizzo di questi scarti per la **sintesi di biometano potrebbe contribuire alla risoluzione del problema**, producendo una fonte rinnovabile per alimentare autobus, camion o essere immessa in rete.

Un'alternativa "potenziata" alla digestione anaerobica tradizionale è l'innovativa **co-digestione anaerobica** in cui **si combinano due o più tipi di biomasse**: rifiuti alimentari e letame, oppure fanghi di depurazione e scarti agro-industriali. La ricerca potrebbe riguardare il confronto tra i diversi sistemi di produzione di biometano, di seguito alcuni quesiti sperimentali:

- Qual è il sistema più efficace? La produzione "tradizionale" di biometano in sistemi a base di soli rifiuti alimentari? Oppure solo letame o fanghi? O la co-digestione, attraverso la miscela dei due substrati?
- Qual è il rapporto ottimale di miscelazione tra rifiuti alimentari e co-substrato per massimizzare la resa di biometano?
- Quali sono le particolari condizioni operative (pH, temperatura, tempo di ritenzione) che influenzano l'efficienza della digestione anaerobica?

Anche gli **obiettivi didattici** dovranno essere **specifici**, se integrati con le discipline **STEM**, renderanno il lavoro più interdisciplinare. Alcuni esempi per il caso specifico:

Science: Comprendere i processi biologici e chimici alla base della digestione anaerobica e della produzione di biogas.

Technology: Sviluppare competenze nell'uso di strumenti e tecniche di laboratorio per la raccolta e l'analisi di dati sperimentali.

Engineering: Progettare e ottimizzare un sistema di co-digestione, comprendendo l'importanza delle variabili operative e del controllo dei parametri.

Mathematics: Analizzare quantitativamente i dati raccolti, interpretare grafici e calcolare rese e rapporti ottimali.

IL PROGETTO Mad for Science – La domanda di ricerca 2

In Italia si consumano circa 1,4 milioni di tonnellate di oli vegetali, che una volta utilizzati costituiscono un **elemento potenzialmente inquinante per gli ecosistemi**. Attualmente, il recupero si limita a circa 35.000 tonnellate all'anno, provenienti quasi esclusivamente da grandi utilizzatori come ristoranti, mense e fast food. L'attività sperimentale potrebbe prevedere la **trasformazione dell'olio esausto in biodiesel** attraverso il processo di transesterificazione per valutare la qualità del combustibile ottenuto, di seguito alcuni quesiti:

- Quali sono le proprietà chimico-fisiche del biodiesel ottenuto? Quali sono densità, viscosità, potere calorifico, e acidità del biodiesel da olio esausto?
- In che modo il biodiesel da olio esausto differisce da quello da olio fresco in termini di qualità e prestazioni?
- Quali sono le differenze di resa, qualità, etc. rispetto ai diversi oli utilizzati in partenza?

Poiché la procedura standard richiede l'uso di sostanze chimiche pericolose come idrossidi (NaOH/KOH) e metanolo, per consentire alle classi una **buona operatività e mantenere una buona valenza didattica** dell'esperienza a scuola, è possibile eseguirne versioni semplificate utilizzando per **esempio olio vegetale fresco ed etanolo**, meno tossico, per poi concentrarsi sull'analisi del prodotto finale, sempre nel rispetto delle condizioni di sicurezza.

