

# L'impatto ambientale dei biocarburanti: una revisione critica della letteratura

Michela Rossetti\*, Marco Frey†, Chiara De Bernardi‡

Sommario: 1. Introduzione – 2. Metodologia e perimetro dello studio – 2.1 Revisione degli studi selezionati – 2.1.1 Tipologie di biocarburante – 2.1.2 Obiettivo e campo di applicazione dello studio – 2.1.3 Unità funzionale – 2.1.4 Land Use Change – 3. Presentazione dei risultati – 3.1 Global Warming Power (GWP) – 3.2 Consumo energetico – 3.3 Altre categorie di impatto – 4. Discussione dei risultati – 4.1 Biocarburanti – 4.2 Veicoli elettrici – 4.3 Veicoli a celle a combustibile – 5. Conclusione – Bibliografia

## Abstract

This paper presents a critical review of Life Cycle Assessment studies concerning biofuels, with the aim of assessing their environmental performance and exploring their role in the ecological transition of the transport sector. The review draws upon peer-reviewed literature published between 2009 and 2024, focusing on key methodological parameters such as feedstock types, system boundaries, functional units, allocation strategies, and the treatment of land use change. Particular attention is given to how different generations of biofuels are assessed in terms of greenhouse gas emissions, energy efficiency, and other environmental impact categories. In addition to mapping the diversity of LCA approaches, the review compares the environmental profiles of biofuels with those of other emerging technologies, such as battery electric vehicles and hydrogen fuel cell systems. The analysis aims to highlight methodological gaps, identify critical variables influencing LCA outcomes, and support a more informed and context-specific evaluation of sustainable transport options.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Biocarburanti, Settore automotive

---

\* **Michela Rossetti**, stagista in Pirelli & C. S.p.A. quale Sustainability & LCA Professional; e-mail: michelarossetti.09@gmail.com

† **Marco Frey**, Professore Ordinario di Economia e Gestione delle Imprese, Istituto di Management, Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa; e-mail: marco.frey@santannapisa.it

‡ **Chiara De Bernardi**, Ricercatrice a tempo determinato di Economia e Gestione delle Imprese, Centro Interdisciplinare sulla Sostenibilità e il Clima, Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa; e-mail: chiara.debernardi@santannapisa.it

DOI: 10.15167/1824-3576/IPEJM2025.3.1744

## 1. Introduzione

Negli ultimi anni, il dibattito sulla sostenibilità ambientale e sulla necessità di ridurre gli impatti delle attività antropiche è diventato centrale nelle agende politiche e scientifiche. Tra i principali responsabili delle emissioni di gas serra (GHG) figura il settore dei trasporti, che rappresenta una delle sfide più complesse e urgenti. Nel 2022 ha contribuito a circa un quarto delle emissioni totali a livello europeo (EEA, 2024). Di conseguenza, la sua decarbonizzazione è una priorità sia a livello europeo che globale.

Nel contesto europeo, il *Green Deal*, lanciato nel 2019, costituisce il quadro strategico per una transizione ecologica, che mira alla neutralità climatica entro il 2050. Tale strategia è supportata da misure specifiche, tra cui la *Renewable Energy Directive III* (RED III)<sup>4</sup>, che fissa al 42,5% la quota di energie rinnovabili entro il 2030, con un minimo del 5,5% di biocarburanti avanzati e combustibili rinnovabili non biologici nel settore dei trasporti. A queste politiche si aggiunge il divieto di vendita di auto nuove a combustione interna a partire dal 2035, per il quale è prevista una revisione nei prossimi mesi al fine di valutare l'inclusione di tecnologie alternative, tra cui i biocarburanti.

Tale processo di transizione ha investito in modo rilevante le imprese automobilistiche che, in alcune circostanze, hanno deciso di anticipare la conversione verso soluzioni più ecologiche, salvo poi rivedere le proprie scelte strategiche nel momento in cui i mercati si sono mostrati meno orientati verso le alternative alla combustione interna.

In questo scenario, tre soluzioni tecnologiche emergono come cruciali per la transizione del settore: (i) l'elettrificazione, (ii) i veicoli a celle a combustibile e (iii) i biocarburanti.

L'elettrificazione, al centro dell'attenzione di istituzioni e dell'industria automobilistica, continua a presentare dei limiti strutturali. Sebbene nel 2024 le immatricolazioni di auto elettriche nell'Unione Europea abbiano raggiunto il 13,6% (ACEA, 2025), la loro incidenza sul parco auto circolante rimane marginale (1,8%), a fronte di una prevalenza ancora netta dei veicoli a combustione interna (ACEA, 2025). Inoltre, il beneficio effettivo dei veicoli elettrici dipende fortemente dal mix energetico nazionale (Verma *et al.*, 2022) e persistono criticità legate ad autonomia, infrastrutture di ricarica e costi elevati, in particolare per le batterie, la cui produzione è fortemente concentrata in Asia.

Anche i veicoli a celle a combustibile rappresentano una potenziale alternativa a zero emissioni in fase d'uso. Tuttavia, la loro diffusione è limitata da un processo tecnologico ancora in fase di sviluppo e da costi molto elevati, oltre che dalla scarsità di idrogeno verde (Xu *et al.* 2020), che attualmente rappresenta meno dell'1% della produzione globale (IEA, 2024).

---

<sup>4</sup> Direttiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 18 ottobre 2023, che modifica la direttiva (UE) 2018/2001, il regolamento (UE) 2018/1999 e la direttiva n. 98/70/CE per quanto riguarda la promozione dell'energia da fonti rinnovabili e che abroga la direttiva (UE) 2015/652 del Consiglio.

In questo contesto, i biocarburanti appaiono come una soluzione immediatamente applicabile, teoricamente in grado di contribuire alla riduzione delle emissioni nel breve periodo. Si tratta di combustibili derivati da materie prime biologiche, come colture energetiche, residui organici e scarti industriali, che possono essere utilizzati direttamente nel parco veicoli esistente, senza necessità di modifiche tecniche significative. Inoltre, favoriscono la promozione di un'economia circolare, valorizzando rifiuti e sottoprodotti.

Negli ultimi anni, la ricerca sui biocarburanti ha conosciuto una forte espansione. Nel 2023, la loro domanda ha rappresentato il 5,6% del fabbisogno globale di carburanti per i trasporti, con una previsione di crescita al 6,4% entro il 2030 (IEA, 2024). Inoltre, lo sviluppo tecnologico ha portato all'affinamento di diverse generazioni di biocarburanti, dalla prima basata su colture alimentari, fino alla quarta, ancora in fase sperimentale.

Dunque, è chiara l'urgenza di attuare una transizione ecologica all'interno del settore *automotive*. Poiché i biocarburanti sembrano essere la soluzione in grado di offrire benefici nel breve periodo, il presente elaborato si concentra su questa tecnologia. La domanda guida è: *quale ruolo possono svolgere i biocarburanti nella transizione di questo settore e in che misura le diverse generazioni contribuiscono alla riduzione degli impatti ambientali?*

Per rispondere a questa domanda si è scelto di condurre una *systematic literature review* degli studi basati sul *Life Cycle Assessment* (LCA) sui biocarburanti – uno strumento metodologico robusto in grado di valutare gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un processo – per evidenziarne i potenziali benefici ambientali, confrontarli con le altre tecnologie emergenti e identificare le condizioni in cui questa opzione può risultare effettivamente sostenibile.

L'approccio al ciclo di vita è fondamentale per valutare gli effetti ambientali connessi all'intera filiera, in modo tale da orientare le decisioni sia dei policy maker che delle imprese rispetto ai biocarburanti e alle alternative tecnologiche.

## 2. Metodologia e perimetro dello studio

L'obiettivo principale di questo elaborato è quello di sviluppare una comprensione più approfondita dei biocarburanti, esplorando in dettaglio il loro potenziale nel contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale del settore dei trasporti.

A tal fine, in primo luogo, si è inteso valutarne la fattibilità come soluzione concreta per una mobilità più sostenibile, individuando le principali sfide e opportunità nella loro produzione.

Inoltre, il lavoro si è proposto di identificare la generazione di biocarburanti che risulta più efficace nel ridurre i carichi ambientali, offrendo così indicazioni utili per orientare future ricerche e investimenti verso soluzioni più promettenti.

Infine, è stata condotta una comparazione dettagliata tra i biocarburanti e le altre tecnologie attualmente disponibili, considerando sia i carburanti convenzionali sia le alternative più sostenibili, ovvero l'elettrificazione e l'idrogeno.

In sintesi, verranno analizzati gli studi LCA esistenti, con l'obiettivo di identificare i benefici dei biocarburanti, gli *hotspot* su cui è necessario intervenire per ottenere un miglioramento ed effettuare un confronto con i risultati ottenuti relativamente alle altre tecnologie.

## **2.1 Revisione degli studi selezionati**

Per condurre una revisione della letteratura efficace, la fase iniziale ha previsto la ricerca e la selezione sistematica degli studi LCA sui biocarburanti (Torraco, 2005), attraverso i principali *database* accademici, tra cui Science Direct, Web of Science, Scopus, Econlit e Springer. L'obiettivo era individuare studi focalizzati sulla valutazione dell'impatto ambientale dei biocarburanti con un approccio di ciclo di vita.

Durante questa fase, è stata prestata particolare attenzione alla dimensione temporale. La ricerca ha mirato a includere studi recenti per garantire l'attualità delle informazioni e delle metodologie utilizzate. Di conseguenza, sono stati selezionati studi pubblicati tra il 2009 e il 2024, un intervallo di 15 anni che permette di ottenere dati relativamente aggiornati, mantenendo al contempo una prospettiva sufficientemente ampia per individuare eventuali tendenze e cambiamenti nelle metodologie di studio.

Un ulteriore criterio di selezione ha riguardato i limiti geografici. Inizialmente focalizzata sull'Europa, la selezione è stata successivamente estesa ad altri contesti rilevanti nella produzione di biocarburanti. Gli studi provengono in prevalenza da Asia ed Europa, seguiti dal Sud America; mentre Nord America, Africa e Australia risultano meno rappresentati.

Una volta individuati gli articoli rientranti all'interno del perimetro di interesse, si è proceduto a una prima scrematura basata sugli *abstract*, seguita dalla lettura dei testi completi, giungendo a un numero finale di 50 articoli pertinenti relativi a LCA sui biocarburanti, veicoli elettrici e celle a combustibile.

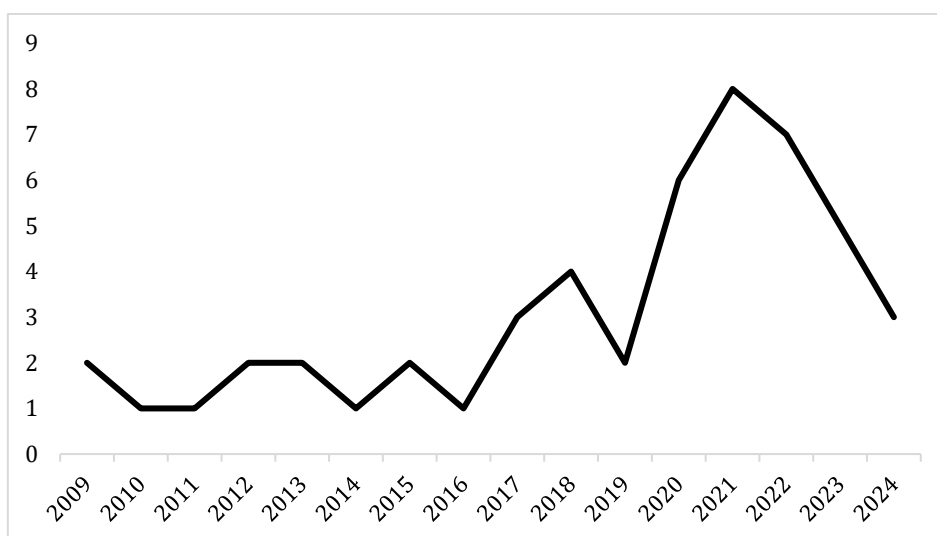
Durante la ricerca, è emersa una distinzione tra due tipologie di pubblicazione: gli studi LCA, che si concentrano su uno o più sistemi di prodotto, valutandone l'impatto ambientale lungo le varie fasi del ciclo di vita, e le *review*, che aggregano più studi LCA per trarre conclusioni più generali. Entrambe le tipologie di pubblicazioni sono state considerate per ampliare il numero di casistiche analizzate. La Tabella 1 riassume i *journal* e le riviste analizzate, mentre il Grafico 1 riporta mostra la distribuzione temporale delle pubblicazioni.

**Tabella n. 1 - Journal e riviste analizzate**

#	JOURNAL/RIVISTA	N° ARTICOLI
I	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	7
II	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	4
III	<i>Journal of Cleaner Production</i>	4
IV	<i>Applied Energy</i>	3
V	<i>Renewable Energy</i>	3
VI	<i>Sustainability</i>	3
VII	<i>Transportation Research Part D: Transport and Environment</i>	3
VIII	<i>BioEnergy Research</i>	2
IX	<i>Biomass and Bioenergy</i>	2
X	<i>Energies</i>	2
XI	<i>Energy Policy</i>	2
XII	<i>Fermentation</i>	2
XIII	<i>Bioresource Technology Reports</i>	1
XIV	<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	1
XV	<i>Energy</i>	1
XVI	<i>Energy Economics</i>	1
XVII	<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	1
XVIII	<i>European Review of Agricultural Economics</i>	1
IXX	<i>Frontiers in Energy Research</i>	1
XX	<i>Journal of Industrial Ecology</i>	1
XXI	<i>Procedia Structural Integrity</i>	1
XXII	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	1
XXIII	<i>Science of the Total Environment</i>	1
XXIV	<i>The International Journal of Life Cycle Assessment</i>	1
XXV	<i>Transportation Research Part A: Policy and Practice</i>	1

Fonte: elaborazione propria

**Grafico n. 1 - Orizzonte temporale degli articoli**



Fonte: elaborazione propria

Gli studi selezionati presentano differenze significative relative alle metodologie di studio, che verranno rappresentate di seguito.

### **2.1.1 Tipologie di biocarburante**

La tipologia di biocarburante è uno dei principali fattori di distinzione tra gli studi selezionati. La prima distinzione viene fatta tra biodiesel e bioetanolo, il primo che funge da sostituto del diesel convenzionale, mentre il secondo viene miscelato con la benzina per ridurre gli impatti ambientali. Inoltre, i biocarburanti sono classificati in quattro generazioni, a seconda delle materie prime impiegate nella loro produzione. I biocarburanti di prima generazione derivano da colture alimentari, come mais, grano e canna da zucchero, e oli vegetali. I biocarburanti di seconda generazione, invece, sono prodotti a partire da biomasse non alimentari, tra cui i residui agricoli e forestali, o da colture energetiche dedicate. La terza generazione di biocarburanti utilizza principalmente le alghe, mentre la quarta generazione, ancora in fase sperimentale, sfrutta le biomasse geneticamente modificate per migliorare l'efficienza del processo produttivo e ridurre ulteriormente i carichi ambientali.

Gli studi analizzati si concentrano principalmente sulle prime tre generazioni di biocarburanti. Ad esempio, Jeswani *et al.* (2020) esaminano la canna da zucchero e l'olio di palma, Borrion *et al.* (2012) analizzano la paglia di grano, mentre Foteinis *et al.* (2020) e Bhonsle *et al.* (2022) si sono focalizzati sull'olio di cucina esausto.

### **2.1.2 Obiettivo e campo di applicazione dello studio**

Una scelta metodologica importante, nell'ambito dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio, riguarda la definizione dei confini del sistema. Si evidenziano tre approcci adottati dagli studi selezionati: *cradle to gate*, *cradle to grave* e *gate to gate*. Il primo approccio, che nel caso dei carburanti è noto anche come *well to tank*, considera la fase di raccolta delle materie prime fino alla realizzazione del prodotto finito; il secondo, anche detto *well to wheel*, considera anche la fase di utilizzo e lo smaltimento del prodotto, mentre l'ultimo considera solo la fase di produzione. L'approccio ideale varia a seconda degli obiettivi dello studio: nel caso in cui si voglia effettuare una comparazione con un sistema di riferimento, l'approccio *cradle to grave* risulta il migliore in quanto considera l'intero ciclo di vita. Invece, nel caso in cui il focus dell'analisi sia il processo di produzione, gli altri due approcci risultano più adatti (Jeswani *et al.*, 2020).

La maggior parte degli studi selezionati ha adottato un approccio *cradle to gate* (46%), seguito poi dall'approccio *cradle to grave* (39%) e, infine, dall'approccio *gate to gate* (15%).

### 2.1.3 Unità funzionale

Un ulteriore elemento di distinzione tra gli studi selezionati è l'unità funzionale, che descrive la funzione del sistema di prodotto analizzato e serve come parametro di riferimento a cui rapportare i risultati delle analisi (Jeswani *et al.*, 2020). Anche la scelta dell'unità funzionale dipende dagli obiettivi dello studio: quando lo scopo dello studio è focalizzare l'analisi sul processo di produzione, l'unità funzionale più appropriata tende a essere il contenuto energetico del biocarburante. Al contrario, se l'obiettivo dello studio è analizzare l'intero ciclo di vita, può risultare più appropriato un'unità funzionale che rifletta la distanza percorsa da un veicolo alimentato con quel carburante. La Tabella 2 rappresenta le unità funzionali più ricorrenti negli studi selezionati.

**Tabella n. 2 – Unità funzionali**

UNITÀ FUNZIONALE	DESCRIZIONE	N° ARTICOLI
Distanza percorsa con un veicolo ideale	1 km o 100 km percorsi con un veicolo ideale	3
Contenuto energetico del biocarburante	MJ, GJ o kWh di energia prodotta	3
Massa del biocarburante	1 kg o 1 tonnellata di biocarburante prodotto	6
Volume del biocarburante	1 L di biocarburante	2
Massa della materia prima impiegata per la produzione del biocarburante	1 kg o 1 tonnellata di biomassa utilizzata	2
Area agricola in cui avviene la coltivazione della materia prima	Ettaro (ha)	1
Altro	Studi che effettuano una <i>review</i> della letteratura	6

Fonte: elaborazione propria

### 2.1.4 Land Use Change

Infine, un ultimo importante elemento distintivo tra gli studi analizzati è il *Land Use Change* (LUC). Questo fattore è particolarmente rilevante per i biocarburanti di prima generazione, i quali sono prodotti a partire da materie prime coltivate su terreni dedicati.

L'inclusione del LUC all'interno di uno studio LCA può influenzare significativamente i risultati, poiché la conversione di ecosistemi naturali in terreni agricoli comporta il rilascio di grandi quantità di CO<sub>2</sub> immagazzinata nella vegetazione e nel suolo. Oltre alle emissioni di carbonio, il LUC può generare impatti ambientali aggiuntivi, come la perdita di biodiversità, l'erosione del suolo e l'esaurimento delle risorse naturali.

Valutare gli impatti del LUC è un compito complesso perché richiede l'accesso a una vasta gamma di dati e informazioni, che non sempre sono facilmente disponibili. Per questo, molti studi scelgono di escluderlo dalle loro analisi. Tuttavia, questa scelta

metodologica comporta una significativa limitazione, poiché in questo modo si rischia di sottostimare o distorcere gli impatti ambientali del sistema di prodotto analizzato. Nel caso specifico dei biocarburanti, questa decisione può influenzare la capacità dello studio di fornire un quadro completo e accurato degli impatti ambientali associati alle diverse generazioni di biocarburanti. Per quanto riguarda gli studi selezionati ai fini della revisione, la maggioranza (86%) non include il *Land Use Change* all'interno dei confini dei sistemi studiati. Lo studio di Prapasongsa *et al.* (2017) è uno dei pochi a considerare questo elemento.

### 3. Presentazione dei risultati

L'impatto ambientale di un prodotto viene valutato analizzando più categorie di impatto, scelte in base agli obiettivi dello studio. Tra queste, la più ricorrente negli studi analizzati è il *Global Warming Potential* (GWP), che quantifica l'impatto delle emissioni di gas serra in termini di capacità di riscaldamento del pianeta. Un'altra categoria di impatto esaminata frequentemente è il consumo energetico dei biocarburanti, con particolare attenzione nei confronti del bilancio energetico, cioè il rapporto tra l'energia ottenuta dai biocarburanti e quella spesa nella loro produzione.

L'analisi che segue si focalizzerà su queste due categorie, fornendo una descrizione dettagliata delle evidenze emerse per ogni generazione di biocarburante, esplorando le diverse tipologie di materie prime impiegate e le relative implicazioni ambientali. Inoltre, verrà presentata una panoramica dei risultati per quanto riguarda altre categorie di impatto, come l'acidificazione del suolo e delle acque, l'eutrofizzazione, la qualità dell'aria e l'uso delle risorse idriche. L'inclusione di queste categorie è fondamentale per ottenere una valutazione completa e accurata del carico ambientale dei biocarburanti. Solo adottando questo approccio è possibile delineare un quadro realistico dei benefici e delle sfide ambientali associati all'utilizzo dei combustibili alternativi.

#### 3.1 *Global Warming Power (GWP)*

Il potenziale di surriscaldamento globale è la categoria di impatto più frequente negli studi LCA in generale, ma, anche nell'ambito degli studi sui biocarburanti, la valutazione delle emissioni di GHG e la loro riduzione rispetto ai combustibili fossili è un obiettivo centrale (Jeswani *et al.*, 2020). Tale obiettivo è in linea con la crescente pressione da parte delle istituzioni e degli organismi internazionali per mitigare il cambiamento climatico, spingendo verso la transizione ecologica e la riduzione delle emissioni di GHG.

La variabile più comunemente utilizzata come *proxy* per le emissioni di GHG è la quantità di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) equivalente emessa. La CO<sub>2</sub> è il gas serra rilasciato in maggiori quantità, ma all'interno del gruppo delle emissioni di GHG sono presenti altri elementi che, pur essendo rilasciati in quantità minori, hanno un

potenziale di impatto nettamente più alto. Tra queste, si evidenziano il metano (CH<sub>4</sub>), gli ossidi di azoto (Nox), i composti organici volatili (VOC) e il particolato.

Gli studi analizzati hanno mostrato risultati spesso contrastanti riguardo al potenziale di surriscaldamento globale dei biocarburanti. Tale variabilità è dovuta principalmente a scelte metodologiche differenti, le quali sono in grado di influenzare in modo notevole i risultati finali.

Per i **biocarburanti di prima generazione** si osserva un'elevata variabilità dei risultati a seconda della materia prima impiegata, sia per il bioetanolo sia per il biodiesel. Nel caso del bioetanolo, la materia prima più virtuosa sembra essere la canna da zucchero, che consente di ottenere una riduzione delle emissioni di circa il 60% rispetto alla benzina convenzionale (Jeswani *et al.*, 2020). Queste prestazioni consentono di rispettare i criteri imposti dalla direttiva RED III, che richiede una riduzione delle emissioni del 60% per i biocarburanti prodotti tra il 2015 e il 2020, mentre non consente di rispettare la soglia di riduzione del 65% per i biocarburanti prodotti a partire dal 2021. Altre materie prime, come mais, melassa, barbabietola da zucchero e grano, consentono di ottenere risultati meno soddisfacenti rispetto alla canna da zucchero. In particolare, il grano consente di ottenere una riduzione del 46% rispetto alla benzina convenzionale (Møller *et al.*, 2014), non soddisfacendo i criteri di sostenibilità imposti dalla direttiva sulle energie rinnovabili. Infine, un ultimo esempio di bioetanolo è quello prodotto a partire da patate dolci. Questo prodotto presenta emissioni pari a 48,1 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, che si traducono in una riduzione del 44% rispetto alla benzina convenzionale, se per quest'ultima si ipotizzano emissioni pari a 83,8 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ (Costa *et al.*, 2018).

Le materie prime più utilizzate per la produzione di biodiesel sono l'olio di palma, l'olio di colza e l'olio di cartamo. Il biodiesel prodotto dall'olio di palma sembra essere la soluzione con più potenziale (Jeswani *et al.*, 2020), nonostante i risultati siano altamente variabili. Prapasongsa *et al.* (2017) hanno studiato l'utilizzo dell'olio di palma, adottando un approccio *cradle to gate*, seguendo scenari di modellazione diversi. Lo scenario che include anche il *Land Use Change* evidenzia emissioni più elevate, pari a 63,73 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, mentre lo scenario che esclude il cambiamento del suolo presenta emissioni pari a 44,75 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ. Invece, lo studio di Arguelles-Arguelles *et al.* (2021) sulla produzione di biodiesel tramite l'idrogenazione dell'olio di palma evidenzia addirittura emissioni negative, raggiungendo una riduzione del 108% rispetto al diesel fossile, per il quale si assumono emissioni medie pari a 87,54 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ. Il biodiesel prodotto dall'olio di colza, considerando le fasi che vanno dall'estrazione delle materie prime fino alla produzione, presenta un *range* di emissioni che varia tra 70,57 a 77,25 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, a seconda della scala di produzione considerata (Gupta *et al.*, 2022), ma non viene fatta una comparazione diretta con le alternative fossili. Questa viene fatta, invece, da Møller *et al.*, (2014), che, adottando un approccio *cradle to grave*, hanno calcolato una riduzione delle emissioni pari al 49%.

I **biocarburanti di seconda generazione** rappresentano un'alternativa interessante ai biocarburanti di prima generazione, in quanto, derivando da biomasse non alimentari, consentono di ridurre il rischio di competizione con il mercato alimentare e di *Land Use Change*. Una materia prima ricorrente per la produzione di

bioetanolo di seconda generazione è la paglia di grano. Analizzata nello studio di Borrion *et al.* (2012), che considera l'intero ciclo di vita dall'estrazione delle materie prime fino alla combustione, ha evidenziato un significativo potenziale di riduzione delle emissioni rispetto alla benzina convenzionale. In particolare, lo studio ha analizzato due miscele di biocarburante, la prima composta per il 15% da bioetanolo e la restante parte da benzina (E15), mentre la seconda (E85) con l'85% di bioetanolo e il 15% di benzina. I risultati hanno mostrato che la prima miscela consente di ridurre le emissioni del 15% rispetto alla benzina convenzionale, mentre l'E85 presenta un potenziale di riduzione del 73%, con emissioni totali pari a 20,29 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ. Anche Møller *et al.*, (2014) hanno studiato il bioetanolo prodotto da paglia, evidenziando una riduzione delle emissioni pari al 33% rispetto alla benzina convenzionale. Un altro studio (Stephenson *et al.*, 2010) si è occupato di analizzare il ciclo di vita del bioetanolo prodotto a partire dal salice, ipotizzando due scenari diversi per la coltivazione della materia prima, il primo nel Regno Unito e il secondo in Polonia, con successiva esportazione per effettuare il processo produttivo nello stesso impianto nel Regno Unito. Entrambi gli scenari consentono di ottenere un miglioramento rispetto alla benzina tradizionale, con un leggero svantaggio del secondo, dettato dall'impatto del trasporto delle materie prime. Lo scenario del Regno Unito consente di ottenere una riduzione dell'88%, con emissioni pari a 10,11 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, mentre lo scenario della Polonia presenta emissioni pari a 12,76 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, consentendo di raggiungere una riduzione dell'85% rispetto alla benzina tradizionale. Infine, un ultimo studio (Mohd Yusof *et al.*, 2019) si è occupato di analizzare la produzione di bioetanolo dal succo zuccherino delle fronde di palma da olio. Focalizzandosi esclusivamente sul processo di produzione, le emissioni sono pari a 10,61 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ; tuttavia, è possibile migliorare ulteriormente questi risultati attraverso l'ottimizzazione dei processi di fermentazione della materia prima e di trasporto, che sono emersi quali i principali contributori.

Gli input utilizzati per la produzione di biodiesel di seconda generazione sono vari, tra questi si evidenziano i semi di dattero, la *Jatropha*<sup>5</sup> e l'olio di cottura esausto. Quest'ultimo sta guadagnando una crescente attenzione nell'ambito della produzione di biocarburanti di seconda generazione. Secondo Foteinis *et al.* (2020), che hanno adottato un approccio *gate to gate*, questa tecnologia genera emissioni totali pari a 14,63 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, consentendo di ottenere una riduzione di circa il 40% rispetto ai biocarburanti di prima generazione e una ancora maggiore rispetto a quelli di terza. Questa materia prima è stata studiata anche da Bhonsle *et al.* (2022), che si sono concentrati su due scenari di produzione differenti: la transesterificazione convenzionale e quella a temperatura ambiente. Il secondo metodo di produzione, più innovativo, presenta emissioni pari a 11,24 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, evidenziando una riduzione importante rispetto allo scenario convenzionale che genera emissioni pari a 58,58 di CO<sub>2</sub> eq/MJ. Infine, altre materie prime analizzate per la produzione del biodiesel di seconda generazione sono i gusci d'uovo (Chung *et al.*, 2019) e l'olio di

---

<sup>5</sup> La *Jatropha* è un arbusto tropicale non commestibile che produce semi ricchi di olio. Cresce su terreni marginali e richiede pochi *input* agricoli, rendendola una fonte sostenibile per la produzione di biocarburanti di seconda generazione.

semi di dattero (Al-Mawali *et al.*, 2021), per il quale sono risultate emissioni pari a 26,9 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ.

I **Biocarburanti di terza generazione** impiegano materie prime innovative, come alghe o lieviti oleaginosi, in grado di crescere rapidamente e produrre elevate quantità di biomassa. Inoltre, la coltivazione di questa tipologia di materie prime non richiede l'impiego di terreni che verrebbero sottratti all'agricoltura, incrementando l'impatto del *Land Use Change*.

Tuttavia, nonostante queste caratteristiche che li rendono una tecnologia interessante, i biocarburanti di terza generazione si trovano ancora a uno stadio arretrato del loro sviluppo, rendendo difficile la comprensione delle effettive potenzialità e sfide dal punto di vista ambientale. Tale difficoltà è stata riscontrata anche negli studi analizzati, i quali hanno evidenziato un'elevata variabilità dei risultati. Un primo elemento che influenza la variabilità dei risultati è il perimetro dello studio, come sottolineato da Carneiro *et al.* (2017). In questo studio viene analizzato il biodiesel prodotto da microalghe, il cui impatto varia sensibilmente a seconda del perimetro considerato: se si considera un perimetro *well to tank*, le emissioni possono assumere valori negativi, ma tali valori diventano positivi nel caso in cui venga considerato il perimetro *well to wheel*. Un ulteriore aspetto che può incidere notevolmente sui risultati finali è rappresentato dall'area geografica in cui è localizzato lo studio. Ciò è dimostrato nello studio di Menten *et al.* (2013), in cui viene evidenziato come un campione di biocarburanti di terza generazione in Europa presenti emissioni pari a 175,25 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ, mentre in Nord America il valore scenda a 2,02 g di CO<sub>2</sub> eq/MJ. Questa differenza può essere attribuita a fattori come le condizioni climatiche, le tecnologie di coltivazione e conversione utilizzate e la disponibilità di infrastrutture energetiche più efficienti in determinate aree.

Oltre alle alghe, i lieviti oleaginosi rappresentano un'altra fonte emergente per la produzione di biodiesel di terza generazione. Uno studio di Chopra *et al.* (2020) ha esplorato il potenziale di questi lieviti, ma i risultati hanno mostrato che il loro impatto ambientale è attualmente maggiore rispetto a quello del biodiesel prodotto da olio di palma o da olio di cottura esausto. Pertanto, è essenziale proseguire la ricerca per migliorare la sostenibilità di questi processi, riducendo i consumi energetici e sviluppando tecnologie di conversione più efficienti.

In conclusione, come sottolineato più volte, tutte e tre le categorie di biocarburanti presentano un'elevata variabilità dei risultati. Gli studi sulle prime due generazioni sono più affermati, mentre la terza, pur presentando un potenziale interessante, necessita un ulteriore sviluppo delle tecnologie di produzione, al fine di rendere i processi più efficienti.

### 3.2 Consumo energetico

Il consumo energetico può essere misurato utilizzando diversi indicatori, tra i più comuni vi sono il consumo di energia fossile, la domanda energetica (primaria, secondaria o cumulativa) e il bilancio energetico netto (Arvidsson *et al.*, 2012). L'indicatore maggiormente utilizzato all'interno degli studi selezionati è il rapporto

energetico netto (*Net Energy Ratio* – *NER*), che esprime il rapporto tra l'energia prodotta da una fonte e l'energia impiegata per produrla. Un *NER* superiore a 1 segnala un bilancio positivo e potenziali benefici ambientali.

I **biocarburanti di prima generazione**, pur avendo un potenziale significativo per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, presentano un'elevata variabilità dell'efficienza energetica. Sobrino *et al.* (2011) riportano un *NER* che varia tra 1,2 e 2, a seconda della tipologia di carburante, delle tecnologie di produzione utilizzate, della scala di produzione, delle pratiche agricole e delle fonti energetiche impiegate. Nel caso del biodiesel prodotto da olio di colza, Gupta *et al.* (2022) hanno riscontrato un *NER* pari a 1,3, suggerendo un bilancio energetico positivo ma moderato. Invece, risulta più promettente il biodiesel da olio di palma, che, con un *NER* pari a 2,4, produce oltre il doppio dell'energia impiegata (Prapaspongsa *et al.*, 2017).

La variabilità dei risultati si riscontra anche nel caso dei **biocarburanti di seconda generazione**, i quali hanno un potenziale significativo per ridurre il consumo di energia fossile, ma questo dipende in gran parte dall'ottimizzazione dei processi di conversione e dall'integrazione di sistemi di produzione che massimizzino l'utilizzo dei sottoprodotti. Il biodiesel prodotto da biomassa lignocellulosica presenta un *NER* compreso tra 2 e 4 (Morales *et al.*, 2015): l'energia ottenuta è significativamente superiore a quella utilizzata, soprattutto se vengono impiegati i rifiuti agricoli come materia prima. Tuttavia, il bioetanolo prodotto dal salice, secondo Stephenson *et al.* (2010), presenta un *NER* di 1,1, indicando un bilancio energetico positivo ma realmente modesto. Nel mezzo si colloca il biodiesel prodotto da olio di semi di dattero, che, come calcolato da Al-Mawali *et al.* (2021), mostra un *NER* pari a 2,5, dimostrando che si tratta di una soluzione energeticamente più vantaggiosa rispetto alle alternative convenzionali.

I **biocarburanti di terza generazione** presentano risultati meno incoraggianti rispetto alle altre due generazioni, pur mantenendo la linea comune della variabilità dei risultati. La produzione di biocarburanti da alghe, nonostante il suo potenziale teorico, non è ancora energeticamente sostenibile su larga scala, poiché la domanda energetica risulta nettamente superiore rispetto alle precedenti generazioni. L'unico studio che ha dato dei risultati positivi è quello di Chamkalani *et al.* (2020), che ha calcolato un *NER* che varia tra 1,3 e 1,8 per il biodiesel prodotto da alghe, tuttavia, restano ancora delle sfide significative per migliorare l'efficienza complessiva dei processi di coltivazione e conversione che attualmente limitano la sostenibilità energetica di questa soluzione.

### 3.3 Altre categorie di impatto

Oltre al potenziale di surriscaldamento globale e al consumo energetico, gli studi LCA analizzano altre categorie d'impatto per una visione più completa del sistema e per evitare lo spostamento degli impatti.

Tra queste, l'**acidificazione** e l'**eutrofizzazione** sono due categorie rilevanti. L'acidificazione si riferisce all'emissione di sostanze che, reagendo in atmosfera, causano la formazione di piogge acide, danneggiando suoli, acque ed ecosistemi.

L'eutrofizzazione, invece, riguarda l'eccessivo apporto di nutrienti in ambienti acquatici, provocando proliferazioni algali e carenza di ossigeno. I biocarburanti di prima generazione, derivati da colture alimentari, possono contribuire significativamente a questi impatti, soprattutto a causa dell'uso intensivo di fertilizzanti (Prapasongsa *et al.*, 2017). Quelli di seconda generazione mostrano un miglior profilo ambientale, anche se i risultati variano in base alla gestione dei residui e ai processi di conversione adottati (Morales *et al.*, 2015). Infine, i biocarburanti di terza generazione offrono un potenziale ancora maggiore di riduzione degli impatti: le alghe possono crescere in acque reflue e utilizzare nutrienti riciclati, limitando così l'uso di fertilizzanti (Carneiro *et al.*, 2017). In sintesi, l'evoluzione tecnologica nei biocarburanti mostra una tendenza verso una sempre minore incidenza sull'acidificazione ed eutrofizzazione.

La **riduzione dell'ozono stratosferico** è un impatto ambientale rilevante nei processi di produzione dei biocarburanti di prima generazione. Questo effetto è principalmente attribuito all'emissione di composti organici volatili e all'uso intensivo di fertilizzanti azotati, che rilasciano sostanze in grado di degradare lo strato di ozono (Arguelles-Arguelles *et al.*, 2021). I biocarburanti di seconda e terza generazione, invece, possono contribuire a ridurre questo impatto.

La **tossicità umana e terrestre** è principalmente legata all'uso di fertilizzanti, pesticidi e agenti chimici impiegati nella coltivazione e trasformazione delle biomasse. I biocarburanti di prima generazione, dunque, presentano impatti rilevanti in questo ambito (Jeswani *et al.*, 2020). Al contrario, i biocarburanti di seconda e terza generazione mostrano miglioramenti in queste categorie di impatto.

L'**impatto sulla biodiversità** dipende principalmente dal *Land Use Change*. La conversione di habitat naturali in aree dedicate alla coltivazione comporta una perdita di specie vegetali e animali (Hauschild *et al.*, 2018). Altri fattori rilevanti includono l'uso di pesticidi e fertilizzanti, lo sfruttamento intensivo del suolo e la diffusione di specie aliene invasive. Di conseguenza, i biocarburanti di prima e seconda generazione risultano avere un impatto maggiore sulla biodiversità rispetto a quelli di terza generazione, che generalmente sfruttano risorse meno impattanti.

Infine, anche il **consumo d'acqua** è una criticità ambientale nei biocarburanti. La prima generazione presenta un impatto elevato, principalmente a causa dell'acqua utilizzata per l'irrigazione delle colture (Borrion *et al.*, 2012). Invece, i biocarburanti di seconda generazione, derivati da residui lignocellulosici, possono ridurre significativamente questo consumo, migliorando la sostenibilità complessiva. Per i biocarburanti di terza generazione, ottenuti da microalghe, il consumo d'acqua è molto variabile e dipende fortemente dalle condizioni climatiche e geografiche locali (Jeswani *et al.*, 2020), rendendo necessarie delle valutazioni caso per caso.

In sintesi, mentre i biocarburanti rappresentano un'alternativa promettente ai combustibili fossili, è fondamentale considerare un'analisi più olistica dei loro impatti ambientali. Sebbene le generazioni avanzate di biocarburanti possano offrire miglioramenti significativi, la loro sostenibilità dipende fortemente dalle pratiche di gestione delle risorse e dall'efficienza dei processi di produzione adottati.

## 4. Discussione dei risultati

L'analisi e la comparazione degli studi selezionati per la presente revisione si sono rivelate un processo complesso a causa dell'alta variabilità dei risultati, legata a diversi fattori. In primo luogo, le assunzioni e le metodologie adottate nei vari studi differiscono significativamente, rendendo sfidante l'interpretazione dei risultati anche nel caso di sistemi di prodotto simili. Inoltre, gli studi selezionati riguardano prodotti diversi sotto vari aspetti, come biocarburanti di differenti generazioni, materie prime e processi produttivi con caratteristiche diverse, e questi fattori influenzano in modo significativo i risultati finali. Tale complessità sottolinea la necessità di una maggiore standardizzazione metodologica, oltre quanto già previsto dalle norme ISO 14040 e 14044 per gli studi LCA e ISO 14067 per la *carbon footprint* di prodotto, al fine di garantire confronti più affidabili e coerenti.

Di seguito verranno discussi i risultati presentati al paragrafo precedente per quanto riguarda i biocarburanti e, successivamente, sarà effettuata una comparazione con le altre tecnologie emergenti nel settore *automotive*.

### 4.1 Biocarburanti

L'analisi degli studi selezionati mostra chiaramente come il GWP vari significativamente a seconda della generazione di biocarburante. I biocarburanti di prima generazione consentono una rilevante riduzione delle emissioni, ma spesso non raggiungono le soglie richieste da normative come la direttiva RED III (Jeswani *et al.*, 2020). Questo è principalmente dovuto all'uso di colture alimentari, che richiedono elevate quantità di fertilizzanti e pesticidi e comportano un impatto significativo dal punto di vista del LUC. I biocarburanti di seconda generazione, invece, offrono un potenziale maggiore di riduzione grazie all'utilizzo di biomasse non alimentari, spesso derivanti da residui agricoli o forestali, che riducono il rischio di *Land Use Change* e valorizzano materiali di scarto (Foteinis *et al.*, 2020). La terza generazione, basata su tecnologie innovative come le microalghe, promette riduzioni ancora più elevate, ma la sua efficacia reale è difficile da valutare a causa della variabilità dei risultati e dell'imaturità tecnologica (Carneiro *et al.*, 2017 e Menten *et al.*, 2013).

Per quanto riguarda il ciclo di vita dei biocarburanti, le fasi con maggior impatto includono la coltivazione delle materie prime, particolarmente rilevante per i biocarburanti di prima generazione, la conversione in biocarburante, che richiede molta energia in tutte le generazioni, e l'utilizzo finale tramite combustione. Tuttavia, un punto di forza dei biocarburanti è la possibilità di compensare le emissioni grazie al sequestro di CO<sub>2</sub> durante la fase di crescita della materia prima.

Alla luce delle evidenze emerse, è possibile affermare che tra i vantaggi principali dei biocarburanti vi sono la riduzione delle emissioni di gas serra, soprattutto per quanto riguarda i biocarburanti di seconda e terza generazione, il potenziale di riduzione della domanda di energia fossile e la valorizzazione dei rifiuti e delle biomasse residue, particolarmente importante per i biocarburanti di seconda

generazione, tra cui si evidenzia il biodiesel prodotto da olio di cucina esausto. Inoltre, un ulteriore vantaggio di questa soluzione consiste nella possibilità di utilizzo immediato sul parco auto già circolante, consentendo di ottenere dei benefici nel breve periodo. Tuttavia, questa soluzione presenta anche delle sfide significative. Innanzitutto, la variabilità degli studi rende difficile stimare con precisione il potenziale reale di questa soluzione e delineare delle linee guida precise per la sua adozione. La competizione con colture alimentari rappresenta un problema che caratterizza in modo preponderante i biocarburanti di prima generazione, mentre le barriere tecnologiche ed economiche limitano ancora la diffusione dei biocarburanti più avanzati.

#### **4.2 Veicoli elettrici**

I veicoli elettrici sembrano essere la soluzione su cui sia le aziende automobilistiche, sia le istituzioni stanno puntando maggiormente per favorire la transizione ecologica del settore *automotive*, grazie all'assenza di emissioni durante la fase di utilizzo. Questa caratteristica rappresenta un importante vantaggio dal punto di vista ambientale. Tuttavia, per valutare l'effettivo beneficio dei veicoli elettrici è importante utilizzare lo strumento dell'LCA, che consente di considerare l'impatto lungo l'intero ciclo di vita.

Un fattore che è risultato determinante dall'analisi degli studi LCA è il mix energetico utilizzato per produrre l'elettricità necessaria alla ricarica. Questo può determinare variazioni significative nell'impatto complessivo del veicolo. Nei paesi in cui la produzione di energia è fortemente basata su fonti rinnovabili, come la Norvegia, i veicoli elettrici possono ridurre le emissioni complessive tra il 70 e l'80% rispetto ai veicoli con motore a combustione interna. Al contrario, in paesi ancora fortemente dipendenti dai combustibili fossili, come la Polonia, il beneficio in termini di riduzione delle emissioni è notevolmente ridotto (Verma *et al.*, 2022). Considerando una media del mix energetico europeo, le emissioni complessive dei veicoli elettrici risultano inferiori fino al 40% rispetto a quelle dei veicoli tradizionali (Hawkins *et al.*, 2013).

Nonostante il vantaggio ambientale nella fase di utilizzo, la fase di produzione dei veicoli elettrici comporta un impatto rilevante, in particolare a causa della produzione delle batterie. Le batterie rappresentano non solo la componente più costosa della tecnologia elettrica, ma anche la principale fonte di emissioni nella fase produttiva. Secondo Del Pero *et al.* (2018), la produzione complessiva di un veicolo elettrico può generare tra le 15 e le 25 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente, a fronte delle circa 7-8 tonnellate associate alla produzione di un veicolo ICE. Inoltre, la produzione delle batterie comporta anche impatti significativi su altre categorie ambientali, come l'eutrofizzazione e l'acidificazione, a causa dei processi estrattivi e di lavorazione delle materie prime necessarie, come litio, cobalto e nichel.

Anche la fase di fine vita, sebbene meno impattante rispetto alla produzione, può avere un ruolo significativo, soprattutto per quanto riguarda lo smaltimento delle batterie. Tuttavia, si stanno sviluppando nuove tecnologie orientate al recupero

efficiente dei materiali critici contenuti nelle batterie esauste<sup>6</sup>. Questi progressi potrebbero contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale complessivo, migliorando la circolarità e la sostenibilità del sistema.

Lo studio di Bicer e Dincer (2018) offre un confronto diretto tra il ciclo di vita completo di un veicolo elettrico e quello di un veicolo a combustione interna. I risultati confermano che i veicoli elettrici hanno un importante potenziale di riduzione delle emissioni. Tuttavia, la loro effettiva superiorità ambientale dipende da una serie di fattori, tra cui le modalità di produzione dell'energia, la durata del veicolo e la gestione della fase di fine vita.

In conclusione, i veicoli elettrici rappresentano una soluzione promettente per la riduzione delle emissioni del settore dei trasporti, ma non sono esenti da criticità ambientali, legate principalmente alla fase di produzione. L'efficientamento del processo di produzione delle batterie e l'adozione su larga scala di energia rinnovabile rappresentano degli elementi chiave per concretizzare i benefici ambientali che può offrire questa soluzione.

### **4.3 Veicoli a celle a combustibile**

I veicoli a celle a combustibile (*Fuel Cell Electric Vehicles* – FCEV) rappresentano una tecnologia affine ai veicoli elettrici a batteria, in quanto anch'essi non generano emissioni dirette durante la fase di utilizzo. L'energia che alimenta il motore elettrico è prodotta direttamente a bordo del veicolo attraverso una reazione elettrochimica tra idrogeno e ossigeno. Questo meccanismo consente di mantenere inalterato il vantaggio ambientale in termini di assenza di emissioni di scarico. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario adottare un'analisi sull'intero ciclo di vita.

L'aspetto più critico nella valutazione ambientale dei FCEV riguarda le emissioni indirette associate alla produzione dell'idrogeno. Sebbene il veicolo, durante l'uso, non emetta direttamente sostanze inquinanti, il processo attraverso il quale l'idrogeno viene prodotto può incidere in modo significativo sull'impatto complessivo. Ad oggi, la produzione globale di idrogeno è ancora fortemente basata su processi che richiedono l'utilizzo di combustibili fossili (IEA, 2024), i quali danno origine al cosiddetto idrogeno grigio. Questo processo comporta elevate emissioni di CO<sub>2</sub>, che rischiano di annullare i vantaggi ambientali derivanti dall'assenza di emissioni di scarico. In alternativa, l'idrogeno può essere prodotto tramite processi meno impattanti, come nel caso dell'idrogeno blu, ottenuto anch'esso da fonti fossili ma con l'applicazione di tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>, oppure attraverso l'idrogeno verde, che viene generato tramite l'elettrolisi dell'acqua<sup>7</sup> alimentata da fonti rinnovabili. Quest'ultima opzione rappresenta l'unica realmente sostenibile in un'ottica di decarbonizzazione.

---

<sup>6</sup> Riciclaggio chimico (utilizzo di processi chimici per separare e recuperare metalli preziosi dai componenti delle batterie esauste) e idrometallurgia (impiego di soluzioni acquose per estrarre i metalli preziosi).

<sup>7</sup> Processo elettrochimico che utilizza energia elettrica scindere l'acqua in idrogeno e ossigeno

In letteratura sono presenti diversi studi che hanno analizzato il potenziale dei veicoli a celle a combustibile in termini di riduzione delle emissioni lungo tutto il ciclo di vita. Secondo Verma *et al.* (2022), i FCEV possono abbattere le emissioni di GHG fino al 50-60% rispetto ai veicoli tradizionali con motore a combustione interna, ma l'entità di questo beneficio dipende in maniera sostanziale dal tipo di idrogeno utilizzato. Analisi più dettagliate condotte da Teimouri *et al.* (2022) e Halder *et al.* (2024) hanno dimostrato come le emissioni associate a un FCEV variano sensibilmente a seconda che l'idrogeno venga prodotto tramite il reforming del gas naturale<sup>8</sup>, la gassificazione del carbone<sup>9</sup> o l'elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili. Solo quest'ultima consente di ottenere benefici reali dal punto di vista dell'impatto ambientale.

Oltre alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, i veicoli a celle a combustibile possono offrire benefici anche in relazione ad altre categorie di impatto ambientale, come l'eutrofizzazione, l'acidificazione e la tossicità per l'uomo e per gli ecosistemi. Tuttavia, anche in questi ambiti, l'effettiva riduzione degli impatti è subordinata alla sostenibilità del processo di produzione dell'idrogeno.

In sintesi, i veicoli a celle a combustibile costituiscono una soluzione promettente per la mobilità sostenibile, ma il loro potenziale dipende fortemente dall'utilizzo di idrogeno verde. Questo rappresenta l'unico percorso credibile per garantire che questa tecnologia possa realmente contribuire alla decarbonizzazione del settore dei trasporti, evitando lo spostamento dei carichi ambientali da una fase all'altra del ciclo di vita.

## 5. Conclusione

Con l'obiettivo di comprendere il ruolo che i biocarburanti possono svolgere all'interno del processo di transizione ecologica del settore *automotive*, il primo passo della presente ricerca ha riguardato la selezione e l'analisi di studi LCA su questa tecnologia. Successivamente, l'indagine si è ampliata includendo l'analisi degli studi presenti in letteratura relativi ad altre tecnologie emergenti, in modo tale da effettuare un confronto tra le soluzioni disponibili e individuare, laddove possibile, l'alternativa più efficace dal punto di vista ambientale.

Comparare le diverse tecnologie è un compito complesso, principalmente a causa dell'elevata variabilità nei risultati degli studi e della mancanza di standardizzazione nei metodi di rappresentazione dei dati. Nonostante queste difficoltà, è possibile trarre alcune considerazioni utili. La prima conclusione evidente è che non esiste una soluzione unica e definitiva: ogni tecnologia presenta punti di forza e criticità, e il suo impatto ambientale dipende fortemente dal contesto in cui viene implementata e dalle modalità con cui viene sviluppata. Per questo motivo ha senso mantenere un

---

<sup>8</sup> Processo chimico mediante il quale il metano viene convertito in un gas di sintesi ricco di idrogeno, generalmente tramite reazione con vapore acqueo (steam reforming) o con ossigeno.

<sup>9</sup> Processo termo-chimico che trasforma il carbone in un gas combustibile (syngas), composto principalmente da monossido di carbonio, idrogeno e anidride carbonica, tramite reazione con ossigeno e/o vapore ad alte temperature

approccio strategico, sia da parte dei policy makers che da parte delle imprese, aperto a una combinazione di diverse soluzioni a seconda delle caratteristiche e della maturità dei mercati di riferimento.

I biocarburanti si configurano come una soluzione concreta per sostenere la transizione del settore automotive, molto efficace nel breve termine, soprattutto per la possibilità di essere utilizzati nei veicoli già in circolazione, senza necessità di modifiche strutturali. Tuttavia, il loro impatto ambientale dipende in maniera cruciale dalla sostenibilità dei processi di produzione. I biocarburanti di seconda generazione, prodotti a partire da scarti agricoli e materiali lignocellulosici, rappresentano l'opzione preferibile in quanto minimizzano il conflitto tra coltivazioni energetiche e coltivazioni alimentari, ottimizzando la riduzione degli impatti ambientali.

I veicoli elettrici, d'altro canto, offrono un'elevata capacità di ridurre le emissioni durante la fase di utilizzo, a patto che l'energia elettrica impiegata provenga da fonti rinnovabili. Tuttavia, il loro ciclo di vita è fortemente influenzato dalla fase di produzione, che risulta particolarmente impattante a causa delle batterie, sia per le emissioni di gas serra che per le altre categorie ambientali, come l'eutrofizzazione e l'acidificazione. Nonostante ciò, i veicoli elettrici restano tra le tecnologie più promettenti per la mobilità urbana, ma l'autonomia limitata costituisce ancora un ostacolo alla loro diffusione su larga scala, soprattutto nei contesti extraurbani.

Infine, i veicoli a celle a combustibile rappresentano una valida alternativa nel medio-lungo periodo. Questi veicoli combinano l'assenza di emissioni dirette durante l'utilizzo con un'autonomia paragonabile a quella dei veicoli tradizionali. Tuttavia, la loro efficacia è strettamente correlata al tipo di idrogeno utilizzato. Solo l'idrogeno verde consente una reale riduzione dell'impatto complessivo, però questo rappresenta ancora una quota molto ridotta della produzione globale di idrogeno.

In conclusione, da un punto di vista ambientale e alla luce delle attuali conoscenze e delle tecnologie disponibili, la strategia più efficace non sembra essere quella di puntare su una sola soluzione, ma piuttosto quella di adottare un approccio integrato che combini i vantaggi delle diverse opzioni. I biocarburanti possono svolgere un ruolo cruciale nella fase di transizione, in particolare per alimentare i veicoli già esistenti e, successivamente, per settori difficilmente elettrificabili, come l'aviazione o il trasporto pesante. I veicoli elettrici si confermano la scelta ideale per la mobilità urbana e di breve raggio, purché supportati da un sistema energetico basato su fonti rinnovabili. I veicoli a celle a combustibile, infine, possono rappresentare la soluzione ottimale per le lunghe percorrenze e per l'autotrasporto, a condizione che siano alimentati da idrogeno prodotto in maniera sostenibile.

È evidente, quindi, che il successo della transizione ecologica nel settore dei trasporti dipenderà non solo dallo sviluppo e dall'adozione di tecnologie più efficienti, ma anche dalla trasformazione del settore energetico. L'intero ciclo di vita dei veicoli, inclusa la produzione dei combustibili o dell'elettricità, deve essere improntato alla sostenibilità. Solo con un approccio integrato e coordinato sarà possibile realizzare l'obiettivo ultimo di decarbonizzazione di questo settore. La Commissione Europea sta affrontando proprio in questi mesi un'approfondita discussione su questi temi, in cui l'Italia sta spingendo molto per un pieno riconoscimento dei biocarburanti tra le

soluzioni da sostenere nell'ambito della transizione verso una mobilità sostenibile e del Green Industrial Deal.

Tra i motivi vi è anche quello dell'ancora limitata diffusione delle auto elettriche nel nostro Paese. Nel 2023, infatti, il 22,7% delle nuove immatricolazioni nell'Unione Europea erano veicoli elettrici (2,4 milioni di auto nuove), ma con differenze rilevanti: se in Norvegia l'elettrico ha superato il 90% delle nuove immatricolazioni, in Francia e Germania il dato è al 30%, e l'Italia è solo all'8%.

In questo contesto, caratterizzato da rapide trasformazioni tecnologiche e normative, ha senso domandarsi quali siano le implicazioni per le imprese del settore e quali gli scenari strategici. Come già osservato nei precedenti paragrafi, il processo di transizione ha coinvolto in modo significativo le imprese automobilistiche che, in alcuni casi, hanno anticipato il passaggio a soluzioni più ecologiche, per poi riconsiderare le loro scelte strategiche in risposta a mercati meno favorevoli alle alternative alla combustione interna.

Inoltre, la variabilità dei risultati emersa dall'analisi critica della letteratura sull'impatto ambientale dei biocarburanti evidenzia la necessità di un approccio di filiera che superi la valutazione del singolo processo produttivo e che sia capace, al contempo, di creare nuove opportunità di business, come la partecipazione a catene di approvvigionamento sostenibili e lo sviluppo di prodotti a basso impatto ambientale.

Le aziende dovrebbero pertanto adottare l'approccio al ciclo di vita (LCA) in modo olistico, fondamentale per una comprensione accurata degli effetti ambientali connessi all'intera filiera. Questa valutazione metodologica consente di prendere decisioni più informate e strategiche riguardo all'investimento in biocarburanti specifici o nell'esplorazione di alternative tecnologiche, ottimizzando così la sostenibilità delle proprie operazioni.

Infine, per posizionarsi come leader nella transizione ecologica, le imprese devono comunicare in modo trasparente e scientificamente fondato i benefici ambientali dei loro prodotti, sostenendo la collaborazione tra l'industria, le istituzioni e il mondo della ricerca per uniformare le metodologie di valutazione e accelerare lo sviluppo di soluzioni innovative. Questo approccio proattivo è essenziale non solo per rispettare le future normative, ma anche per guidare il settore verso una crescita che sia al contempo economicamente e ambientalmente sostenibile.

## **Bibliografia**

- Acar, C., & Dincer, I. (2020). The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3396–3406. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.149>
- ACEA (2025). *Economic and Market Report, Global and EU auto industry: Full year 2024*. <https://www.acea.auto/publication/economic-and-market-report-global-and-eu-auto-industry-full-year-2024/>

- ACEA (2025). *Vehicles on European Roads: January 2025*.  
<https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2025/>
- Aichberger, C., & Jungmeier, G. (2020). Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review. *Energies*, 13(23), 6345.  
<https://doi.org/10.3390/en13236345>
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy*, 123, 280–288.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.063>
- Al-Mawali, K. S., Osman, A. I., Al-Muhtaseb, A. H., Mehta, N., Jamil, F., Mjalli, F., *et al.* (2021). Life cycle assessment of biodiesel production utilising waste date seed oil and a novel magnetic catalyst: A circular bioeconomy approach. *Renewable Energy*, 170, 832–846. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.027>
- Arguelles-Arguelles, A., Amezcua-Allieri, M. A., & Ramírez-Verduzco, L. F. (2021). Life cycle assessment of green diesel production by hydrodeoxygenation of palm oil. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.690725>
- Arvidsson, R., Fransson, K., Fröling, M., Svanström, M., & Molander, S. (2012). Energy use indicators in energy and life cycle assessments of biofuels: Review and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 31, 54–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.001>
- Bhonsle, A. K., Singh, J., Trivedi, J., & Atray, N. (2022). Comparative LCA studies of biodiesel produced from used cooking oil using conventional and novel room temperature processes. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101072.  
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101072>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>
- Borrion, A. L., McManus, M. C., & Hammond, G. P. (2012). Environmental life cycle assessment of bioethanol production from wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 47, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.017>
- Carneiro, M. L. N. M., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S. P., Martins, A. R. F. A., Turkovics, F., *et al.* (2017). Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 632–653.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152>
- Chamkalani, A., Zendejboudi, S., Rezaei, N., & Hawboldt, K. (2020). A critical review on life cycle analysis of algae biodiesel: Current challenges and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110143.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110143>
- Chopra, J., Tiwari, B. R., Dubey, B. K., & Sen, R. (2020). Environmental impact analysis of oleaginous yeast based biodiesel and bio-crude production by life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122349.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122349>
- Chung, Z. L., Tan, Y. H., Chan, Y. S., Kansedo, J., Mubarak, N. M., Ghasemi, M., *et al.* (2019). Life cycle assessment of waste cooking oil for biodiesel production using waste chicken eggshell derived CaO as catalyst via transesterification. *Biocatalysis and*

- Agricultural Biotechnology*, 21, 101317.  
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101317>
- Commissione Europea. (10 Novembre 2022). Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality. *EC.EUROPA*.  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_6495](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495)
- Costa, D., Jesus, J., Virginio e Silva, J., & Silveira, M. (2018). Life cycle assessment of bioethanol production from sweet potato (*ipomoea batatas* L.) in an experimental plant. *BioEnergy Research*, 11(3), 715–725. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9932-1>
- Cui, P., Zhang, J., Liu, Y., Zhou, Y., Zhu, Z., Gao, J., *et al.* (2023). Comprehensive analysis of clean fuel vehicle life cycle environment under multiple fuel scenarios. *Energy*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127466>
- Del Pero, F., Delogu, M., & Pierini, M. (2018). Life cycle assessment in the automotive sector: A comparative case study of internal combustion engine (ICE) and electric car. *Procedia Structural Integrity*, 12, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>
- Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008, relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20240218>
- Direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716>
- Direttiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 18 ottobre 2023, che modifica la direttiva (UE) 2018/2001, il regolamento (UE) 2018/1999 e la direttiva n. 98/70/CE per quanto riguarda la promozione dell'energia da fonti rinnovabili e che abroga la direttiva (UE) 2015/652 del Consiglio. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/it/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
- Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2014). The significance of li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158–168. <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>
- EEA (2024). *Sustainability of Europe's mobility systems*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems#introduction>
- Elagouz, N., Onat, N. C., Kucukvar, M., Ayvaz, B., Kutty, A. A., & Osman Kusakci, A. (2023). Integrated modelling for sustainability assessment and decision making of alternative fuel buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117, 103656. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103656>
- EPA (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*.
- Fagundes, V. D., Machado, Ê L., de Cássia de Souza Schneider, R., & Colla, L. M. (2024). Life cycle assessment of bioethanol production from banana, potato, and papaya waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02342-6>

- Fernández-Dacosta, C., Shen, L., Schakel, W., Ramirez, A., & Kramer, G. J. (2019). Potential and challenges of low-carbon energy options: Comparative assessment of alternative fuels for the transport sector. *Applied Energy*, 236, 590–606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.055>
- Foteinis, S., Chatzisytheon, E., Litinas, A., & Tsoutsos, T. (2020). Used-cooking-oil biodiesel: Life cycle assessment and comparison with first- and third-generation biofuel. *Renewable Energy*, 153, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.022>
- Gnansounou, E., & Kenthorai Raman, J. (2016). Life cycle assessment of algae biodiesel and its co-products. *Applied Energy*, 161, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.043>
- Gupta, R., McRoberts, R., Yu, Z., Smith, C., Sloan, W., & You, S. (2022). Life cycle assessment of biodiesel production from rapeseed oil: Influence of process parameters and scale. *Bioresource Technology*, 360, 127532. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127532>
- Halder, P., Babaie, M., Salek, F., Shah, K., Stevanovic, S., Bodisco, T. A., et al. (2024). Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114543>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Stig, I. O. (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Cham: Springer.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/jiec.12011>
- IEA (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- IEA (2024). *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- Isler-Kaya, A., & Karaosmanoglu, F. (2022). Life cycle assessment of safflower and sugar beet molasses-based biofuels. *Renewable Energy*, 201, 1127–1138. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.041>
- Jarunglumlert, T., Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H., & Prommuak, C. (2021). Enhanced energy recovery from food waste by co-production of bioethanol and biomethane process. *Fermentation*, 7(4), 265. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040265>
- Jeswani HK, Chilvers A, Azapagic A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proc. R. Soc.* <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>
- Ji, M., & Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(78), 38612–38635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>
- Kargbo, H., Harris, J. S., & Phan, A. N. (2021). “Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110168>

- Khan, N., Sudhakar, K., & Mamat, R. (2021). Role of biofuels in energy transition, green economy and carbon neutrality. *Sustainability*, 13(22), 12374. <https://doi.org/10.3390/su132212374>
- Liu, B., Shumway, C. R., & Yoder, J. K. (2017). Lifecycle economic analysis of biofuels: Accounting for economic substitution in policy assessment. *Energy Economics*, 67, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.06.002>
- Menten, F., Chèze, B., Patouillard, L., & Bouvart, F. (2013). A review of LCA greenhouse gas emissions results for advanced biofuels: The use of meta-regression analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 108–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.021>
- Mohd Yusof, S. J. H., Roslan, A. M., Ibrahim, K. N., Syed Abdullah, S. S., Zakaria, M. R., Hassan, M. A., *et al.* (2019). Life cycle assessment for bioethanol production from oil palm frond juice in an oil palm based biorefinery. *Sustainability*, 11(24), 6928. <https://doi.org/10.3390/su11246928>
- Møller, F., Slentø, E., & Frederiksen, P. (2014). Integrated well-to-wheel assessment of biofuels combining energy and emission LCA and welfare economic cost benefit analysis. *Biomass and Bioenergy*, 60, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.001>
- Morales, M., Quintero, J., Conejeros, R., & Aroca, G. (2015). Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1349–1361. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.097>
- Musharavati, F., Sajid, K., Anwer, I., Nizami, A., Javed, M. H., Ahmad, A., *et al.* (2023). Advancing biodiesel production system from mixed vegetable oil waste: A life cycle assessment of environmental and economic outcomes. *Sustainability*, 15(24), 16550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.097>
- Naganuma, K., & Sakane, Y. (2023). Examining real-road fuel consumption performance of hydrogen-fueled series hybrid vehicles. *Energies*, 16(20), 7193. <https://doi.org/10.3390/en16207193>
- Nordin, I., Elofsson, K., & Jansson, T. (2022). Optimal localisation of agricultural biofuel production facilities and feedstock: A Swedish case study. *European Review of Agricultural Economics*, 49(4), 910–941. <https://doi.org/10.1093/erae/jbab043>
- Nordin, I., Elofsson, K., & Jansson, T. (2024). Cost-effective reductions in greenhouse gas emissions: Reducing fuel consumption or replacing fossil fuels with biofuels. *Energy Policy*, 190, 114138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114138>
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., *et al.* (2010). Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), 6550–6556. <https://doi.org/10.1021/es903729a>
- Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2015). Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? state-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Applied Energy*, 150, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.001>

- Patel, K., & Singh, S. K. (2023). Environmental sustainability analysis of biofuels: A critical review of LCA studies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(8), 2489–2510. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02596-y>
- Prapasongsa, T., Musikavong, C., & Gheewala, S. H. (2017). Life cycle assessment of palm biodiesel production in Thailand: Impacts from modelling choices, co-product utilisation, improvement technologies, and land use change. *Journal of Cleaner Production*, 153, 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.130>
- Rai, A. K., Al Makishah, N. H., Wen, Z., Gupta, G., Pandit, S., & Prasad, R. (2022). Recent developments in lignocellulosic biofuels, a renewable source of bioenergy. *Fermentation*, 8(4), 161. <https://doi.org/10.3390/fermentation8040161>
- Rosales-Tristancho, A., Brey, R., Carazo, A. F., & Brey, J. J. (2022). Analysis of the barriers to the adoption of zero-emission vehicles in Spain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 158, 19–43. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.01.016>
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., et al. (2008). Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>
- Sobrino, F. H., Monroy, C. R., & Pérez, J. L. H. (2011). Biofuels and fossil fuels: Life cycle analysis (LCA) optimisation through productive resources maximization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2621–2628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.010>
- Stephenson, A. L., Dupree, P., Scott, S. A., & Dennis, J. S. (2010). The environmental and economic sustainability of potential bioethanol from willow in the UK. *Bioresource Technology*, 101(24), 9612–9623. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.104>
- Teimouri, A., Zayer Kabeh, K., Changizian, S., Ahmadi, P., & Mortazavi, M. (2022). Comparative lifecycle assessment of hydrogen fuel cell, electric, CNG, and gasoline-powered vehicles under real driving conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(89), 37990–38002. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.298>
- Ternel, C., Bouter, A., & Melgar, J. (2021). Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102897>
- Thomas, C. E. (2009). Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6005–6020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003>
- Torraco, R. J. (2005). Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. *Human Resource Development Review*, 4(3), 356–367. <https://doi.org/10.1177/1534484305278283>
- Ubando, A. T., Anderson S. Ng, E., Chen, W., Culaba, A. B., & Kwon, E. E. (2022). Life cycle assessment of microalgal biorefinery: A state-of-the-art review. *Bioresource Technology*, 360, 127615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127615>

- Verma, S., Dwivedi, G., & Verma, P. (2022). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings*, 49, 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.666>
- Villacreses-Freire, D., Ketzer, F., & Rösch, C. (2022). Advanced metabolic engineering approaches and renewable energy to improve environmental benefits of algal biofuels: LCA of large-scale biobutanol production with cyanobacteria *synechocystis* PCC6803. *BioEnergy Research*, 15(3), 1515–1530. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10323-y>
- Xu, L., Yilmaz, H. Ü, Wang, Z., Poganietz, W., & Jochem, P. (2020). Greenhouse gas emissions of electric vehicles in Europe considering different charging strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102534. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102534>
- Zah, R., Faist, M., Reinhard, J., & Birchmeier, D. (2009). Standardized and simplified life-cycle assessment (LCA) as a driver for more sustainable biofuels. *Journal of Cleaner Production*, 17, S102–S105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.004>