



Dipartimento di Impresa
e Management

Cattedra di Organizzazione Aziendale

In che modo l'intelligenza artificiale può migliorare la sostenibilità di una Supply Chain?

Prof. Paolo Spagnoletti

RELATORE

Paolo Schillaci Matr. 285821

CANDIDATO

Anno Accademico 2024/2025

INDICE

1. Introduzione.....	5
2. Literature Review	7
2.1 Presentazione	7
2.2 Definizioni e Concetti Chiave	8
2.2.1 Intelligenza Artificiale: Definizioni, Ambiti e Tecnologie	8
2.2.2 Supply Chain Management: Evoluzione e Componenti Chiave	9
2.2.3 Sostenibilità nella Supply Chain: approccio ESG, modelli circolari e responsabilità sociale.....	10
2.3 Inquadramento teorico: evoluzione dell'IA nella supply chain sostenibile	12
2.3.1 Applicazioni dell'IA per la sostenibilità ambientale <i>Ottimizzazione dei trasporti e logistica verde</i>	14
2.3.2 L'IA e il trade-off tra efficienza e sostenibilità	18
2.3.3 Criticità e barriere all'adozione sostenibile dell'IA	20
3. Agenda di ricerca.....	24
3.1 Presentazione	24
3.2 Tassonomia dell'intelligenza artificiale: AI agents vs agentic AI.....	26
3.3 AI agents vs agentic AI e sostenibilità: domande di ricerca.....	28
3.3.1 Definizione	29
3.3.2 Livello di autonomia.....	29
3.3.3 Complessità del compito	30
3.3.4 Collaborazione.....	31
3.3.5 Apprendimento e adattamento.....	31
3.3.6 Applicazioni	32
3.4 Casi applicativi: utilizzo dell'intelligenza artificiale per la sostenibilità ESG nelle supply chain.....	32
4. Conclusioni.....	36
Bibliografia.....	38

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'attenzione verso la sostenibilità ha assunto una centralità crescente nei dibattiti accademici, politici e manageriali. Le crescenti pressioni derivanti dal cambiamento climatico, dalle disuguaglianze socio-economiche e dalle crisi ambientali globali hanno spinto governi, istituzioni e imprese a rivedere profondamente le proprie strategie, ponendo la sostenibilità al centro delle agende di sviluppo e innovazione. In questo contesto, la supply chain, intesa come l'insieme dei processi che regolano il flusso di beni, informazioni e relazioni dalla materia prima al consumatore finale, rappresenta uno degli ambiti più cruciali per la transizione verso modelli di produzione e consumo sostenibili.

Parallelamente, un'altra trasformazione di portata epocale ha fatto breccia nel mondo economico e industriale: la rivoluzione digitale e l'avvento dell'intelligenza artificiale (IA). L'IA, in quanto tecnologia abilitante per l'elaborazione automatica di dati, la generazione di previsioni, il supporto decisionale e l'automazione dei processi, sta modificando radicalmente il modo in cui le organizzazioni pianificano, coordinano e gestiscono le proprie attività. In particolare, l'applicazione dell'IA alle supply chain apre scenari inediti per l'efficienza operativa, la resilienza strategica e, aspetto centrale di questa tesi, il perseguimento di obiettivi sostenibili.

I prossimi capitoli si propongono di indagare in che modo l'intelligenza artificiale può contribuire a migliorare la sostenibilità delle supply chain, con un riferimento esplicito alle tre dimensioni ESG: ambientale, sociale e di governance. L'obiettivo è duplice. Da un lato, offrire una sistematizzazione critica della letteratura accademica più recente, per individuare le principali aree applicative dell'IA e i benefici attesi in termini di sostenibilità. Dall'altro lato, proporre un'agenda teorica che permetta di esplorare in modo più strutturato l'interazione tra diverse configurazioni di intelligenza artificiale, in particolare la distinzione tra AI Agents e Agentic AI e gli impatti ESG nei contesti organizzativi.

Di fatti, il lavoro si articola in due capitoli principali. Dopo questa introduzione, il Capitolo 2 presenta una revisione sistematica della letteratura, che permette di delineare

il panorama teorico e applicativo dell'intelligenza artificiale in ambito supply chain sostenibile. Viene analizzato come l'IA possa supportare obiettivi di sostenibilità ambientale, sociale e di governance, ma anche quali siano i trade-off, le barriere e le criticità connesse alla sua adozione. Il Capitolo 3, invece, adotta una prospettiva teorica più innovativa, introducendo una tassonomia dell'IA fondata sulla distinzione tra agenti intelligenti "passivi" (AI Agents) e sistemi agentici "autonomi" (Agentic AI). A partire da questa distinzione viene proposta un'agenda di ricerca, al fine di generare nuove domande teoriche e pratiche sul contributo dell'IA alla sostenibilità nelle supply chain. Infine, troveremo le conclusioni che saranno utili per tirare le somme del lavoro una volta completato. Preciso che ai fini di migliorare le fasi di brainstorming e di ricerca delle fonti, sono stati utilizzati anche strumenti di intelligenza artificiale (ChatGPT). Ho riformulato in chiave critica gli output generati, ed inoltre verificato l'attendibilità di tutte le fonti suggeritemi. Ho cercato di valorizzare le opportunità offerte dallo strumento rimanendo nei limiti concessi, in quanto il lavoro fondamentale rimane di mia competenza.

L'obiettivo della tesi quindi, è quello di offrire un contributo sia nella sintesi critica della letteratura esistente, sia nella proposta di un nuovo quadro teorico utile a comprendere meglio il ruolo dell'IA nei processi decisionali sostenibili. In un campo di studio in rapida evoluzione, dove l'adozione di nuove tecnologie procede sempre più velocemente, questo lavoro vuole creare una base utile per futuri sviluppi accademici e manageriali. Il punto di partenza è una domanda tanto semplice quanto cruciale: **può l'IA, oggi spesso vista come strumento di automazione e riduzione dei costi, diventare anche un agente attivo di sostenibilità e responsabilità sociale?**

2. Literature Review

2.1 Presentazione

Il capitolo si propone di analizzare criticamente la letteratura accademica esistente in merito all'applicazione dell'intelligenza artificiale (IA) nella gestione delle supply chain sostenibili. Nell'odierno contesto globale, sempre più sensibile alle tematiche ambientali, ma anche sociali ed etiche, le imprese si trovano ad affrontare sfide complesse dovute al fatto di dover raggiungere risultati economicamente soddisfacenti, ma allo stesso tempo perseguire obiettivi di tipo sociale. In questo scenario, l'integrazione dell'IA nei processi logistici e produttivi è il primo step che l'azienda fa per raggiungere obiettivi socialmente sostenibili. L'intelligenza artificiale, oltre a migliorare i risultati aziendali e a semplificare molte parti dell'organizzazione interna, può dare un grande apporto anche alla sostenibilità dell'azienda. Attraverso un'analisi della letteratura esistente, andremo ad osservare come le aziende possono migliorare la sostenibilità attraverso l'uso dell'intelligenza artificiale nella supply chain, che è identificata come la prima leva capace di rendere le aziende più sostenibili.

La sostenibilità delle supply chain viene intesa in questo lavoro secondo una prospettiva ESG (Environmental, Social and Governance), che comprende, oltre alla riduzione dell'impatto ambientale, anche la promozione della trasparenza, dell'etica negli approvvigionamenti, della tutela dei lavoratori e della governance responsabile. L'analisi verterà sui 3 parametri (E, S e G) con un focus particolare sul primo, ossia l'impatto ambientale. L'intelligenza artificiale, grazie alla sua capacità di elaborare grandi quantità di dati in tempo reale, generare previsioni accurate e ottimizzare flussi complessi, può contribuire in modo significativo a migliorare le performance delle catene di fornitura lungo queste tre dimensioni.

L'analisi è stata condotta secondo l'approccio della Systematic Literature Review (SLR), seguendo i principi metodologici suggeriti da Okoli (2015).

La domanda di ricerca alla base della revisione può essere formulata come segue: In che modo l'intelligenza artificiale può contribuire a migliorare la sostenibilità ambientale, sociale ed economica delle supply chain?

Partiremo inizialmente analizzando distintamente i concetti fondamentali: Intelligenza artificiale, Supply Chain e Sostenibilità. Successivamente analizzeremo accuratamente come questi concetti si incontrano tra di loro nella vita dell'organizzazione dell'azienda.

Attraverso questa struttura, il capitolo intende fornire una panoramica esaustiva e aggiornata sullo stato della letteratura, utile sia per orientare le future ricerche (che verranno sviluppate nel capitolo 3), sia per offrire una base solida di conoscenze teoriche e pratiche a supporto delle decisioni manageriali in ambito sostenibile e tecnologico.

2.2 Definizioni e Concetti Chiave

2.2.1 Intelligenza Artificiale: Definizioni, Ambiti e Tecnologie

L'intelligenza artificiale (IA) è una tecnologia in rapida evoluzione, finalizzata allo sviluppo di sistemi in grado di eseguire compiti tipicamente umani, quali il ragionamento, l'apprendimento, la percezione e la comprensione del linguaggio naturale (Daios et al., 2025). Gli studi recenti evidenziano come l'IA si basi principalmente su algoritmi di machine learning, deep learning e tecniche di data mining, capaci di analizzare e interpretare enormi volumi di dati in tempi molto ridotti. Questi sistemi non si limitano a seguire regole predefinite, ma apprendono autonomamente dai dati, migliorando continuamente le proprie performance e adattandosi a nuovi scenari. Le applicazioni dell'IA sono estremamente variegata e vanno dalla robotica all'elaborazione del linguaggio naturale, fino ad arrivare all'ottimizzazione dei processi produttivi e decisionali nelle organizzazioni. In ambito aziendale, l'utilizzo di algoritmi predittivi permette di anticipare trend e variazioni del mercato, supportando decisioni strategiche e contribuendo alla trasformazione digitale delle imprese. Ad esempio, recenti ricerche hanno dimostrato come il deep learning, grazie alla sua capacità di riconoscere pattern complessi nei dati, abbia rivoluzionato settori come il riconoscimento vocale, la visione artificiale e la personalizzazione dei servizi. Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda l'integrazione di tecnologie come il Natural Language Processing (NLP) e la Computer Vision, che permettono alle macchine di interpretare e interagire con dati non strutturati, quali testi e immagini. Questi strumenti sono ormai fondamentali per l'innovazione nei processi aziendali, consentendo

interazioni più naturali tra uomo e macchina e automatizzando attività complesse. Inoltre, l'IA è considerata un motore per la digitalizzazione, facilitando la raccolta e l'analisi di dati in tempo reale, che a loro volta supportano la pianificazione strategica e operativa delle imprese.

Nel contesto della trasformazione digitale, l'IA non rappresenta solo una tecnologia abilitante, ma anche un catalizzatore per il cambiamento organizzativo. Le imprese che adottano soluzioni basate sull'IA sono chiamate a rivedere i propri modelli di business e a investire in formazione, aggiornamento tecnologico e nella creazione di infrastrutture capaci di gestire in modo sicuro e scalabile l'enorme quantità di dati generata quotidianamente.

2.2.2 Supply Chain Management: Evoluzione e Componenti Chiave

Il supply chain management (SCM) si occupa della pianificazione, implementazione e controllo del flusso di materiali, informazioni e risorse lungo l'intera catena di fornitura, dalla produzione fino alla distribuzione. Negli ultimi anni, la crescente complessità dei mercati globali e la necessità di rapidità operativa hanno reso il SCM un elemento strategico cruciale per la competitività aziendale. Le nuove tecnologie digitali hanno trasformato il modo in cui le aziende gestiscono le proprie catene di fornitura, rendendo possibili monitoraggi in tempo reale e una maggiore trasparenza operativa.

Tra le componenti chiave del SCM rientrano la gestione degli acquisti, la pianificazione della produzione, la logistica e la distribuzione. Ogni segmento della catena ha beneficiato dell'innovazione tecnologica, soprattutto attraverso l'adozione di sistemi di tracciabilità che permettono di monitorare il flusso dei materiali e di ridurre il rischio di interruzioni. Inoltre, la digitalizzazione ha favorito l'emergere di piattaforme collaborative, in grado di connettere in maniera efficace tutti gli attori della catena e di ottimizzare i processi operativi. Un aspetto cruciale del SCM moderno riguarda la gestione degli stock e la previsione della domanda. L'adozione di modelli predittivi basati su algoritmi avanzati consente di anticipare le variazioni del mercato, riducendo al minimo il rischio di overstock o stock-out. Questi sistemi, integrati con i dati provenienti da numerose fonti – dai social media ai dati di vendita storici – permettono

alle aziende di effettuare previsioni più precise, migliorando la gestione degli inventari e ottimizzando la produzione.

La trasformazione della supply chain si manifesta anche nell'adozione di modelli più collaborativi e interconnessi. La condivisione dei dati in tempo reale tra i diversi attori della catena favorisce una coordinazione più efficace e consente una risposta tempestiva alle variazioni della domanda e alle problematiche logistiche. Questa interconnessione è supportata da tecnologie come il cloud computing e piattaforme di big data analytics, che offrono strumenti per una gestione dinamica e resiliente dell'intera catena di fornitura. Tali innovazioni permettono non solo di ottimizzare i costi operativi, ma anche di migliorare il livello di servizio offerto ai clienti, garantendo una maggiore competitività sul mercato globale.

2.2.3 Sostenibilità nella Supply Chain: approccio ESG, modelli circolari e responsabilità sociale

La sostenibilità nelle supply chain è l'integrazione strategica e coordinata degli obiettivi ambientali, sociali ed economici nei processi di filiera, con l'obiettivo di migliorare la performance di lungo periodo dell'impresa e della sua rete di fornitura (Zhang et al., 2018). In altre parole, una supply chain sostenibile bilancia i 3 risultati (ambientale, sociale ed economico) nello svolgimento delle attività logistico-produttive. Queste tre dimensioni, interdipendenti, offrono un quadro di riferimento per valutare e migliorare la sostenibilità lungo l'intera supply chain.

Per quanto riguarda la dimensione ambientale, si fa riferimento alla riduzione dell'impatto ecologico delle attività di approvvigionamento, produzione e distribuzione lungo la filiera. Ciò include iniziative di *green supply chain management*, come l'uso efficiente delle risorse, la minimizzazione dei rifiuti e delle emissioni inquinanti e il controllo dell'impronta di carbonio lungo il ciclo di vita dei prodotti. Ad esempio, integrare fattori ambientali nelle decisioni di supply chain (dalla progettazione dei prodotti alla scelta dei fornitori) contribuisce a ridurre le emissioni di CO₂ e il consumo

energetico, supportando così gli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'azienda (Zeng, Li, Zeng, 2022). Di conseguenza, pratiche ambientali sostenibili nella supply chain non solo migliorano la performance ambientale complessiva, ma possono anche ridurre rischi e costi operativi nel lungo termine (ad es. attraverso il risparmio energetico e la prevenzione di sanzioni ambientali (Hariyani et al., 2024).

La dimensione sociale riguarda le condizioni di lavoro e ai diritti umani lungo la filiera, assicurando uguali diritti e benessere per tutti gli stakeholder coinvolti (dai lavoratori dei fornitori fino alle comunità locali). Una supply chain socialmente sostenibile si impegna a garantire salari dignitosi, sicurezza e salute sul lavoro, il rispetto delle normative sul lavoro minorile, nonché a contribuire positivamente alle comunità in cui opera (Yawar, Seuring, 2017). In ambito accademico, questi aspetti sono spesso ricondotti ai temi della responsabilità sociale d'impresa applicata alla supply chain (*supply chain social responsibility*), che includono la gestione etica dei fornitori e la trasparenza sulle condizioni di produzione. Storicamente meno studiata rispetto alla sostenibilità ambientale, la sostenibilità sociale nella supply chain ha guadagnato maggiore attenzione negli ultimi anni, evidenziando come pratiche socialmente responsabili possano mitigare rischi reputazionali (ad es. scandali legati a sfruttamento del lavoro) e al contempo migliorare le performance operative attraverso relazioni di fornitura più stabili e collaborative.

La terza dimensione, quella della governance, riguarda le strutture di gestione, le politiche e i meccanismi di controllo che assicurano l'effettiva integrazione degli obiettivi ESG nelle decisioni e nei processi di supply chain. In una supply chain sostenibile, la governance si concretizza in pratiche come l'adozione di codici di condotta per i fornitori, sistemi di monitoraggio e auditing lungo la filiera, programmi di coinvolgimento degli stakeholder e trasparenza nelle comunicazioni di sostenibilità (Nguyen, Zuidwijk, 2025). La ricerca evidenzia che la supply chain governance sostenibile è un fattore chiave per allineare tutti gli attori della rete agli standard etici e di sostenibilità prefissati. In termini operativi, questo significa instaurare relazioni di fornitura basate su contratti e incentivi sostenibili, ma anche su fiducia e collaborazione di lungo periodo, così da garantire il rispetto di criteri ambientali e sociali lungo l'intera catena del valore. La governance comprende inoltre la struttura interna di decision-

making dell'azienda (procedure, controlli, ruoli di responsabilità) orientata alla sostenibilità: un solido sistema di controlli interni e di corporate governance assicura che le politiche ambientali e sociali siano effettivamente implementate e che l'impresa persegua gli interessi di tutti gli stakeholder, non solo degli azionisti. In sintesi, una robusta dimensione di governance funge da collante per le iniziative ambientali e sociali nella supply chain, garantendo coerenza strategica e credibilità nell'impegno sostenibile dell'azienda.

In conclusione, sostenibilità ambientale, sociale e governance nella supply chain sono dimensioni complementari e interconnesse. Le imprese leader adottano un approccio ESG in cui la riduzione dell'impatto ambientale si accompagna alla tutela dei diritti e del benessere lungo la filiera, il tutto sostenuto da meccanismi di governance trasparenti e responsabili. Questo approccio è ritenuto essenziale per dar vita a supply chain più resilienti, etiche e orientate al lungo termine, in linea con i principi dello sviluppo sostenibile e le aspettative degli stakeholder contemporanei.

2.3 Inquadramento teorico: evoluzione dell'IA nella supply chain sostenibile

Negli anni 2000 l'intelligenza artificiale inizia a trovare applicazione nella gestione della supply chain, focalizzandosi sulle attività operative come la logistica e la previsione della domanda. In questo periodo si registrano i primi utilizzi di algoritmi di *machine learning* per migliorare l'accuratezza delle previsioni di vendita e ottimizzare scorte e inventari, riducendo il rischio di sprechi. Allo stesso tempo, si sperimentano sistemi basati su IA (ad esempio reti neurali ed algoritmi evolutivi) per supportare l'ottimizzazione dei trasporti e delle consegne, con l'obiettivo di incrementare l'efficienza operativa lungo la filiera. Questo tipo di approcci, seppur inizialmente limitati ad applicazioni specifiche, posero le basi per un impiego più ampio dell'IA nella supply chain, concentrato prevalentemente sul miglioramento delle performance e la riduzione dei costi operativi.

Con il decennio 2010 e l'avvento dell'Industria 4.0, l'IA diventa un elemento chiave nelle supply chain digitali e interconnesse (Samuels, 2025). L'industria 4.0, caratterizzata da automazione diffusa, Internet of Things (IoT), analisi dei *big data* e connettività pervasiva, fornisce un terreno fertile per applicazioni IA avanzate nella gestione della filiera. In questa fase, l'IA viene integrata end-to-end nei processi decisionali della supply chain: sistemi smart utilizzano dati in tempo reale per supportare decisioni rapide su approvvigionamenti, scorte e distribuzione, abilitando ad esempio l'analitica predittiva per la domanda e l'ottimizzazione dinamica dei flussi logistici. La ricerca evidenzia applicazioni dell'IA in molti processi chiave dimostrando come queste tecnologie possano velocizzare le operazioni, migliorare la visibilità e ridurre i rischi lungo la catena. Nonostante le opportunità, studi del periodo sottolineano anche sfide nell'implementazione: l'integrazione efficace dell'IA nelle supply chain 4.0 risulta ostacolata da fattori come gli elevati costi iniziali, le preoccupazioni sulla sicurezza dei dati e la necessità di nuove competenze specialistiche per gestire sistemi così avanzati.

Negli anni recenti, la discussione si è spostata verso l'impiego dell'IA in ottica di sostenibilità ambientale e sociale, in parallelo all'emergere del paradigma di Industria 5.0. Introdotto nei primi anni 2020, *Industry 5.0* enfatizza un approccio *human-centric* in cui l'intelligenza artificiale collabora strettamente con l'uomo per soluzioni più adattive e personalizzate (Samuels, 2025). In questa visione, l'attenzione non è più rivolta solo all'automazione e all'efficienza, ma anche ai benefici etici e sostenibili: l'IA diventa uno strumento per coniugare le esigenze dell'impresa con il benessere della società, garantendo che i progressi tecnologici servano interessi comuni. Di conseguenza, le supply chain sostenibili moderne sfruttano l'IA per ridurre l'impatto ambientale (ad esempio minimizzando le emissioni tramite l'ottimizzazione dei percorsi di trasporto e favorendo modelli di economia circolare) e per migliorare la trasparenza sulle pratiche lungo la filiera. La letteratura accademica più aggiornata conferma che finora le applicazioni di IA nella supply chain hanno indirizzato soprattutto le dimensioni ambientali ed economiche della sostenibilità mentre appare ancora margine di progresso sul fronte sociale, ad esempio nel garantire migliori condizioni di lavoro e una gestione etica dei dati e delle decisioni automatizzate (Daios et al., 2025). Emergono dunque due filoni complementari nel dibattito attuale: da un lato l'IA come

leva per l'ottimizzazione eco-efficiente delle operazioni di supply chain, dall'altro l'IA human-centric orientata a supportare i decisori umani e a integrare considerazioni etiche e sociali nei processi aziendali. Questa evoluzione mostra come il focus sia passato dall'entusiasmo per le sole prestazioni operative dell'IA a una visione più olistica: oggi l'IA è considerata un fattore abilitante di supply chain sostenibili, resilienti e trasparenti, a patto che la sua implementazione avvenga tenendo conto delle implicazioni etiche e favorendo una sinergia uomo-macchina ottimale (Daios et al., 2025). In sintesi, l'uso dell'intelligenza artificiale nella supply chain si è evoluto da strumento di efficienza a pilastro di un nuovo paradigma sostenibile e human-centric, in linea con i principi di Industria 4.0 e 5.0.

2.3.1 Applicazioni dell'IA per la sostenibilità ambientale

Ottimizzazione dei trasporti e logistica verde

L'intelligenza artificiale sta rivoluzionando la logistica verde, ossia la pianificazione dei trasporti orientata alla sostenibilità. Algoritmi avanzati possono rendere i trasporti più eco-compatibili ottimizzando i percorsi in tempo reale (tenendo conto di traffico, meteo ecc.), favorendo il risparmio di carburante e riduzione delle emissioni di CO₂. L'uso di sistemi di routing intelligenti permette infatti di diminuire le distanze percorse inutilmente: ad esempio, è stato dimostrato che applicare l'IA alla logistica inversa consente di selezionare rotte di rientro a minimo consumo di carburante, riducendo significativamente l'impronta carbonica delle operazioni di reso. L'IA svolge un ruolo chiave nell'ottimizzare l'utilizzo dei veicoli e la pianificazione delle spedizioni, riducendo i viaggi a vuoto e supportando decisioni di trasporto più sostenibili – ad esempio facilitando la gestione efficiente di flotte a basse emissioni (come veicoli elettrici) e il *dynamic routing* in risposta alle condizioni operative.

Riduzione degli sprechi e dell'uso di risorse

L'IA contribuisce anche a diminuire gli sprechi e a utilizzare in modo più efficiente le risorse lungo la filiera. Algoritmi predittivi avanzati permettono di far combaciare meglio produzione e domanda, evitando eccessi di scorte o sovrapproduzione: grazie a

previsioni più accurate e all'ottimizzazione dei livelli di inventario si riducono gli sprechi e si garantisce un impiego ottimale delle risorse disponibili. Analizzando grandi quantità di dati, l'algoritmo riesce a scovare i trend di mercato, favorendo di conseguenza una maggiore produzione dei prodotti di cui ci si aspetta un'alta domanda, il principale vantaggio sul piano della sostenibilità è la riduzione degli sprechi, diminuendo la merce da smaltire e di conseguenza, l'inquinamento. Sul piano operativo invece, sistemi intelligenti possono ottimizzare i processi di magazzino, imballaggio e spedizione, minimizzando l'impiego di materiali e altre risorse e contenendo così l'impatto ambientale della supply chain (Chen et al., 2024). Un ulteriore contributo deriva dall'integrazione dell'IA in strategie di economia circolare, ad esempio migliorando la gestione dei resi e del riciclo di prodotti a fine vita. Una reverse logistics pianificata con algoritmi intelligenti consente di massimizzare il recupero di materiali dai beni dismessi e di ridurre la quantità di rifiuti destinati allo smaltimento.

Tracciabilità e impatto ambientale

L'IA risulta infine strategica per migliorare la tracciabilità della filiera e il monitoraggio dell'impatto ambientale delle attività di supply chain. Attraverso l'analisi di grandi moli di dati (provenienti ad esempio da sensori IoT lungo la catena del valore), gli algoritmi di IA possono mappare con dettaglio l'impronta ecologica delle varie fasi produttive e logistiche. L'approccio data-driven riesce a raccogliere ed elaborare i dati sulle emissioni generati dalle diverse attività della supply chain, identificando le aree a maggior impatto e suggerendo azioni correttive per ridurre le emissioni complessive. Parallelamente, l'IA rafforza la trasparenza end-to-end permettendo un monitoraggio puntuale dei parametri ambientali legati a fornitori e trasporti. In pratica, sistemi di supplier audit automatizzati analizzano numerose quantità di dati e permettono alle aziende di verificare in tempo reale le prestazioni di sostenibilità dei partner della filiera (ad esempio tracciando le emissioni lungo tutta la catena), aumentando la responsabilità ambientale condivisa e rispettando la conformità agli standard di sostenibilità.

Applicazioni dell'IA per la sostenibilità sociale e di governance

La dimensione sociale della sostenibilità richiede supply chain impostate su principi etici e su una totale trasparenza nelle operazioni. L'adozione di tecnologie di

intelligenza artificiale offre nuove opportunità per garantire una maggiore visibilità lungo l'intera filiera, facilitando il tracciamento dei materiali e delle pratiche di approvvigionamento in tempo reale. Le tecnologie digitali giocano infatti un ruolo cruciale nel migliorare la visibilità e la trasparenza nei processi di sourcing, permettendo alle aziende di identificare tempestivamente potenziali violazioni etiche o inefficienze.

Diversi studi sottolineano come l'orientamento dell'impresa verso la sostenibilità sociale abbia un impatto positivo sull'implementazione di tecnologie avanzate nella supply chain. Ad esempio, Bag et al. (2021) evidenziano che un forte orientamento alla sostenibilità sociale all'interno dell'organizzazione incoraggia l'adozione di pratiche supportate dall'IA, con ricadute positive sulle performance operative. Questo significa che le aziende impegnate eticamente tendono a sfruttare meglio gli strumenti di AI per finalità come il monitoraggio dei fornitori, la valutazione del rischio sociale e la tracciabilità dei prodotti. Inoltre, l'integrazione di soluzioni di AI con altre tecnologie emergenti, come la blockchain, può amplificare la trasparenza end-to-end: simili sinergie tecnologiche permettono di registrare e verificare ogni transazione o passaggio lungo la filiera, rendendo praticamente impossibile occultare pratiche non etiche.

Un altro aspetto centrale della sostenibilità sociale nelle supply chain è il controllo delle condizioni di lavoro presso i fornitori e lungo l'intera rete produttiva. L'intelligenza artificiale può svolgere il ruolo di monitorare e migliorare tali condizioni, attraverso l'analisi di grandi quantità di dati e l'identificazione proattiva di possibili criticità. Baryannis et al. (2019) includono, tra i rischi principali da gestire nella supply chain, anche quelli legati alla sicurezza e alla sostenibilità. Ciò implica che le imprese devono dotarsi di strumenti avanzati per individuare tempestivamente situazioni di pericolo per i lavoratori o violazioni dei diritti umani nei siti produttivi dei fornitori.

La complessità delle odierne supply chain globali, spesso articolate su più livelli di fornitori, rende difficile garantire il pieno rispetto degli standard sociali senza l'ausilio di strumenti intelligenti. Studi recenti suggeriscono che una governance sostenibile multi-livello efficace si realizza più facilmente in contesti a bassa complessità, dove è possibile fare leva su rapporti di fiducia diretti. All'aumentare della complessità della

rete (numerosi fornitori indiretti, subappalti in Paesi differenti, ecc.), diventa invece cruciale impiegare tecnologie digitali per mantenere elevata la visibilità e il controllo. L'IA può supportare la gestione di questa complessità integrando informazioni da diverse fonti e fornendo una visione unificata delle performance sociali dei fornitori. Ad esempio, sistemi data-driven possono attribuire un rating di rischio etico ai fornitori basato su vari indicatori (rispetto delle leggi sul lavoro, orari di lavoro, retribuzioni, tassi di turnover del personale) e aggiornare continuamente questi punteggi man mano che nuovi dati emergono.

Oltre a favorire trasparenza e monitoraggio, l'IA incide anche sulle dimensioni di governance della supply chain, trasformando i processi decisionali. I sistemi decisionali data-driven, possono supportare i manager nell'assumere decisioni complesse. L'adozione di strumenti di AI in questo ambito promette maggiore rapidità e precisione decisionale, contribuendo a mitigare rischi e incertezze lungo la supply chain. Per sfruttare appieno i benefici decisionali dell'IA senza compromettere gli aspetti etici e di governance, le imprese devono investire in capacità organizzative e competenze multidisciplinari. Da un lato, è fondamentale predisporre strutture organizzative adeguate e una cultura aziendale orientata ai dati: studi su trasformazioni digitali indicano che occorre promuovere collaborazione interfunzionale e scambio di informazioni aperto tra tutti gli attori interni ed esterni, evitando la creazione di *silos* informativi. Dall'altro lato, serve definire con chiarezza responsabilità e ruoli per la gestione dei sistemi di AI, assicurandosi che vi sia sempre un livello di controllo umano sulle decisioni automatizzate.

Infine, va considerato che le tecnologie digitali non garantiscono automaticamente esiti equi: spetta ai decisori assicurare che l'innovazione sia guidata da principi di inclusività e giustizia sociale. Come nota Ghobakhloo (2020), i benefici socio-ambientali dell'Industria 4.0 tendono a manifestarsi solo dopo aver conseguito miglioramenti economici di breve termine, ed è dunque necessario uno sforzo congiunto di tutti gli stakeholder per fare in modo che queste tecnologie producano effettivamente miglioramenti nel benessere sociale in maniera equa e diffusa. In definitiva, se ben governati, tali strumenti possono favorire non solo l'efficienza economica ma anche l'equità sociale e la responsabilità lungo l'intero ecosistema della supply chain.

2.3.2 L'IA e il trade-off tra efficienza e sostenibilità

La letteratura recente evidenzia chiare tensioni strategiche tra gli obiettivi di efficienza operativa e i valori ESG (Environmental, Social, Governance) nella gestione della supply chain supportata dall'IA. Da un lato, molti studi sottolineano il potenziale dell'intelligenza artificiale nel migliorare simultaneamente le prestazioni economiche e gli indicatori di sostenibilità. Samuels (2025) evidenzia come l'IA possa incentivare sinergie tra performance operative e obiettivi ambientali, ad esempio migliorando la capacità previsionale e la pianificazione dei trasporti in modo da minimizzare i viaggi a vuoto e il consumo energetico. In contesti favorevoli – ad esempio aziende con elevati livelli di innovazione e in presenza di regolamentazioni ambientali rigorose – l'adozione di sistemi IA mostra persino un impatto positivo sugli indicatori ESG, migliorando al contempo l'efficienza dei processi.

D'altro lato, Texeira et al. (2025) mettono in luce il rischio che un approccio esclusivamente orientato all'ottimizzazione economica possa di fatto privilegiare i risultati di breve periodo a scapito degli obiettivi di sostenibilità sociale e ambientale. Sul piano ambientale, l'IA presenta una dinamica complessa spesso descritta in termini di trade-off: se da un lato strumenti di AI come l'analisi predittiva e l'ottimizzazione delle rotte logistiche possono ridurre i consumi energetici operativi e le emissioni, dall'altro l'addestramento e l'esecuzione su larga scala di modelli AI richiedono ingenti risorse computazionali, traducendosi in elevati consumi di elettricità e produzione di e-waste. Questo paradosso – benefici operativi vs. costi ambientali – è stato infatti definito in letteratura come il “*paradosso della sostenibilità*” dell'AI (Frimpong, 2025), ad indicare la compresenza di impatti positivi e negativi delle tecnologie intelligenti sul fronte della sostenibilità. Allo stesso modo, per quanto riguarda la parte sociale l'adozione dell'IA presenta sfide significative: processi decisionali interamente automatizzati rischiano di ridurre il coinvolgimento umano e possono introdurre bias algoritmici o problemi di trasparenza, con potenziali ricadute negative sul benessere dei lavoratori e sull'equità nelle decisioni lungo la filiera. Queste criticità evidenziano come senza adeguate misure di governance l'IA possa spingere la performance operativa a

discapito della sostenibilità sociale, ad esempio attraverso la sostituzione del lavoro umano o decisioni non etiche guidate solo da logiche di efficienza.

Alla luce di queste tensioni, gli studiosi propongono approcci teorici e modelli utili per interpretare e gestire il trade-off tra efficienza e sostenibilità. Un filone di ricerca proposto da Hahn et al. (2015) sostiene la necessità di adottare una prospettiva integrativa che spinga le imprese a perseguire contemporaneamente le dimensioni economica, ambientale e sociale invece di gerarchizzarle rigidamente. In contrasto con la tradizionale logica del “business case” (che tende a enfatizzare solo le iniziative sostenibili con ritorni economici immediati), l’approccio del paradosso della sostenibilità, invita ad accettare le contraddizioni intrinseche tra obiettivi di profitto e responsabilità socio-ambientale, considerandole non come ostacoli bensì come leve per innovare i modelli di gestione (Hahn et al., 2015). Coerentemente con questa visione di fatti, le imprese leader stanno sviluppando strategie di doppio allineamento: da un lato investono in sistemi di AI e analisi dei dati per massimizzare l’efficacia operativa, dall’altro integrano esplicitamente metriche ESG nei processi decisionali, adottando obiettivi ambientali e sociali al pari degli indicatori finanziari nelle loro valutazioni di performance. Dal punto di vista metodologico, vengono proposti strumenti quantitativi per supportare tale equilibrio: ad esempio, modelli di ottimizzazione multi-obiettivo vengono impiegati per valutare soluzioni che contemperino costi logistici ed impatti ecologici, evidenziando possibili compromessi efficienti tra criteri confliggenti (Qu et al., 2024).

In sintesi, il dibattito accademico sul ruolo dell’IA nelle supply chain suggerisce che i benefici operativi non vadano considerati in isolamento, ma valutati insieme in un’ottica di lungo termine. La sfida consiste nel trovare un equilibrio dinamico: l’adozione dell’IA può certamente incrementare l’efficienza dei processi, ma richiede politiche e governance che ne indirizzino l’uso a favore della sostenibilità ambientale e sociale complessiva. Numerosi autori concordano sul fatto che privilegiare esclusivamente la performance economica di breve periodo sia sconsigliato; al contrario, incorporare criteri di sostenibilità nelle decisioni di supply chain management può rafforzare la competitività di lungo termine dell’azienda, migliorandone reputazione, conformità regolatoria e capacità di creare valore condiviso. In altre parole, l’IA può fungere da

doppia leva per efficienza ed ESG solo se inserita in una strategia aziendale olistica: bilanciando le logiche di ottimizzazione con i valori di sostenibilità, le imprese possono sfruttare le tecnologie intelligenti per ottenere supply chain sia performanti sia responsabili.

2.3.3 Criticità e barriere all'adozione sostenibile dell'IA

Nonostante l'intelligenza artificiale offra opportunità per migliorare la sostenibilità nelle supply chain, esistono anche persistenti limiti tecnici che ne ostacolano l'adozione diffusa in modo sostenibile. Una prima criticità riguarda la gestione dei dati e la compatibilità tecnologica: le applicazioni di AI richiedono enormi quantità di dati accurati e ben strutturati, ma molte aziende affrontano dati eterogenei, di bassa qualità o difficili da integrare nei sistemi. Senza adeguati strumenti di data analytics, i modelli di AI non riescono a fornire risultati significativi. Un ulteriore limite tecnico riguarda l'elevato consumo di risorse computazionali: addestrare e implementare sistemi di AI su larga scala richiede ingenti capacità di calcolo ed energia, sollevando dubbi sul bilancio ambientale complessivo di queste tecnologie. Come notato da Dauvergne (2022), l'uso diffuso di data center e algoritmi avanzati può aumentare significativamente l'impronta di carbonio, mitigando i benefici ambientali ottenibili dall'ottimizzazione della supply chain. Questa tensione tecnica tra efficienza operativa ed impatto ambientale evidenzia la necessità di innovazioni nell'AI verde, ossia algoritmi e hardware più sostenibili dal punto di vista energetico. In sintesi, senza progressi sul fronte dell'integrazione dei sistemi, della qualità dei dati, della trasparenza algoritmica e dell'efficienza energetica, le soluzioni di intelligenza artificiale rischiano di rimanere confinate a progetti poco pratici, incapaci di sfruttare pienamente il loro potenziale a beneficio della sostenibilità delle supply chain.

Le barriere di natura culturale e organizzativa rappresentano un ostacolo centrale all'adozione sostenibile dell'AI nelle filiere. La resistenza al cambiamento e la scarsa maturità digitale delle organizzazioni sono citate tra i principali fattori critici in letteratura. Implementare con successo l'AI richiede infatti una trasformazione organizzativa profonda: processi e workflow devono essere rivisti, e il personale deve

acquisire nuove competenze. Molte aziende però soffrono di un divario di competenze digitali, mancano data scientist, analisti o figure capaci di interpretare i risultati dei modelli, e incontrano difficoltà ad allineare la propria infrastruttura informativa ai requisiti delle soluzioni AI. Shrivastav et al. (2021) sottolineano come le imprese faticino a riconfigurare i propri sistemi e dati per supportare l'AI, e segnalano che problemi di data governance e privacy contribuiscono a "bloccare" progetti innovativi. Oltre alla carenza di competenze, un ostacolo rilevante è la diffidenza del capitale umano verso l'AI: in diversi contesti si osservano dipendenti e manager poco propensi a fidarsi delle soluzioni algoritmiche o timorosi che l'automazione possa minacciare il proprio ruolo lavorativo. Bisogna evidenziare dunque l'importanza di una solida gestione del cambiamento supportata dal top management per superare queste barriere: comunicazione trasparente, formazione mirata e coinvolgimento attivo degli stakeholder interni sono strumenti cruciali per costruire una cultura organizzativa data-driven e aperta all'innovazione. Senza tale evoluzione culturale, anche le tecnologie AI più avanzate rischiano di non essere adottate o di non produrre miglioramenti duraturi.

Vincoli economici e finanziari

Un ulteriore ordine di barriere riguarda gli aspetti economici e finanziari che condizionano l'adozione dell'AI in modo sostenibile. Implementare sistemi di intelligenza artificiale nella supply chain comporta costi iniziali elevati: investimenti ingenti in software avanzati, infrastrutture hardware (come sensori IoT, cloud, edge computing) e programmi di formazione del personale. Wamba et al. (2022) evidenziano che i costi di implementazione costituiscono una sfida significativa, specialmente per le piccole e medie imprese che dispongono di risorse limitate. Gli investimenti iniziali si accompagnano a un'incertezza sul ritorno dell'investimento (ROI): i benefici dell'AI spesso si concretizzano nel medio-lungo periodo e sono di difficile quantificazione immediata. Questa difficoltà nel misurare i risultati tangibili nel breve termine rende complesso giustificare economicamente i progetti di AI davanti agli stakeholder. Un altro vincolo è la competizione interna per le risorse finanziarie: allocare budget all'AI per la sostenibilità può confliggere con altre priorità d'investimento aziendali, se i benefici sostenibili non sono percepiti come strategici quanto gli obiettivi tradizionali di profitto. Inoltre, va considerato il rischio di costi nascosti legati all'AI: ad esempio,

l'eventualità di dover rivedere processi o dati errati può comportare spese aggiuntive, e il mantenimento di algoritmi e infrastrutture AI nel tempo (aggiornamenti, cybersecurity, energia) incide sui costi. Nasce quindi una tensione tra gli obiettivi di sostenibilità a lungo termine e le logiche di redditività a breve termine. Superare tale tensione implica ripensare i modelli di valutazione del valore, incorporando nei business case anche metriche di impatto ambientale e sociale accanto a quelle economiche, così da rendere più visibile il valore complessivo generato dall'AI sostenibile nella supply chain.

Implicazioni etiche e normative

L'adozione dell'AI nella supply chain solleva questioni di tipo etico e normativo che possono ostacolare la diffusione sostenibile. Un primo ambito critico riguarda la privacy e sicurezza dei dati: le applicazioni di AI richiedono l'accesso e la condivisione di enormi moli di dati (da dati dei consumatori a informazioni sensibili sui partner di filiera), il che espone le aziende a rischi crescenti di violazioni dei dati e attacchi informatici. In assenza di standard chiari e regolamentazioni robuste sull'uso dei dati, la fiducia degli attori verso le soluzioni AI ne risente. Un secondo aspetto etico cruciale è quello dei bias algoritmici e dell'equità: sistemi di intelligenza artificiale addestrati su dati storici possono involontariamente perpetuare pregiudizi, conducendo a decisioni non eque nella gestione della filiera (ad esempio, favorendo o penalizzando fornitori, mercati o lavoratori in modo ingiustificato). Tali distorsioni minano la sostenibilità sociale delle soluzioni AI, potenzialmente entrando in conflitto con principi di giustizia e inclusione. Inoltre, l'automazione spinta di attività decisionali pone dilemmi sul futuro del lavoro: l'AI può migliorare l'efficienza, ma anche sostituire mansioni umane, creando preoccupazioni circa la disoccupazione tecnologica. Questo impatto sul capitale umano richiede riflessioni etiche sul bilanciamento tra progresso tecnologico e responsabilità sociale d'impresa. Un'ulteriore implicazione riguarda la trasparenza e responsabilità (accountability) delle decisioni algoritmiche: modelli opachi rendono difficile attribuire responsabilità in caso di errori o decisioni dannose prese dall'AI, sollevando interrogativi su come garantire compliance a normative e standard (si pensi alle future regolamentazioni sull'AI, o alle leggi esistenti come il GDPR per la protezione dei dati). La mancanza di un chiaro framework di governance dell'AI

all'interno delle organizzazioni e nei rapporti inter-organizzativi è infatti citata come una delle barriere significative all'adozione di queste tecnologie⁴. In risposta a tali sfide, diversi autori invocano lo sviluppo di framework etici e regolamenti ad hoc: ad esempio, Ok et al. (2025) suggeriscono l'implementazione di regolamentazioni rigorose e linee guida di trasparenza, unitamente a un coinvolgimento attivo di tutti gli stakeholder, per assicurare che l'AI nella supply chain operi in modo responsabile e sostenibile. In sintesi, le implicazioni etiche e normative delineano un complesso terreno di tensione: da un lato vi è la spinta innovativa dell'AI e il suo potenziale di migliorare le performance di sostenibilità; dall'altro vi è la necessità di garantire equità, trasparenza e rispetto dei principi ESG nell'adozione di tali soluzioni. Affrontare con successo queste sfide richiede un dialogo continuo tra legislatori, comunità scientifica e aziende, allo scopo di definire standard condivisi e pratiche virtuose che orientino l'AI verso un contributo positivo e duraturo alla sostenibilità delle supply chain.

3. Agenda di ricerca

3.1 Presentazione

Il presente capitolo si propone di delineare un'agenda di ricerca sistematica e coerente che possa guidare gli sviluppi futuri nello studio dell'impatto dell'intelligenza artificiale (IA) sulla sostenibilità delle supply chain. L'importanza crescente di questo tema emerge in modo evidente dalla revisione della letteratura accademica effettuata nel Capitolo 2, la quale ha mostrato come l'IA sia progressivamente diventata un fattore abilitante per l'integrazione di pratiche sostenibili lungo tutta la catena del valore. Tuttavia, nonostante l'ampio interesse dimostrato da numerosi contributi, si osserva una frammentazione significativa negli approcci teorici, metodologici e applicativi, che limita la possibilità di formulare quadri interpretativi unificanti e di identificare direzioni comuni di sviluppo.

Uno dei principali limiti riscontrati nella letteratura è la tendenza ad affrontare il rapporto tra IA e sostenibilità in maniera settoriale, con focus prevalentemente operativo o tecnologico, spesso senza una concettualizzazione adeguata della natura dell'intelligenza artificiale coinvolta. Di conseguenza, manca un'adeguata riflessione teorica su come le diverse configurazioni funzionali dell'IA possano influenzare le dimensioni ambientali, sociali e di governance (ESG) della sostenibilità nelle supply chain.

Alla luce di queste considerazioni, il terzo capitolo introduce un cambio di prospettiva teorica, fondato sull'adozione di un framework concettuale tratto dalla recente letteratura sull'IA agentic. Il punto di partenza è rappresentato dallo studio di Sapkota, Roumeliotis e Karkee (2025), che propone una distinzione innovativa tra due grandi categorie concettuali: da un lato l'AI Agents, ossia intelligenze artificiali utilizzate come strumenti passivi, dall'altro l'Agentic AI, cioè intelligenze artificiali dotate di caratteristiche operative più sofisticate, come autonomia decisionale, capacità di apprendimento, adattabilità e intenzionalità simulata.

Questa distinzione, sebbene possa sembrare astratta, ha importanti ricadute pratiche per lo studio della sostenibilità. Infatti, molte delle applicazioni attualmente impiegate nelle

supply chain (ad esempio algoritmi di previsione o software gestionali) si collocano nella categoria degli AI agents: strumenti che eseguono compiti specifici sulla base di input umani. Tuttavia, con l'avanzamento tecnologico, si stanno sempre più diffondendo sistemi che possiedono un grado crescente di autonomia e capacità decisionale, spostandosi verso modelli agentici. Questi sistemi non si limitano a supportare il processo decisionale, ma in molti casi lo plasmano attivamente. Lo studio di Sapkota et al. (2025) fornisce una sintesi delle dimensioni funzionali, che caratterizzano il comportamento dei sistemi intelligenti e ne determinano l'impatto sui contesti organizzativi, come: autonomia, adattabilità, socialità, reattività, capacità comunicativa, intenzionalità simulata e apprendimento. Ognuna di queste può essere interpretata come una leva capace di influenzare in modo differenziato le tre componenti ESG della sostenibilità.

L'obiettivo principale di questo capitolo è quindi quello di costruire un framework teorico che colleghi queste dimensioni funzionali con gli ambiti chiave della sostenibilità delle supply chain, identificando per ciascuna relazione potenziale una o più domande di ricerca in grado di guidare futuri sviluppi accademici. In tal modo, si intende fornire un contributo originale al dibattito, proponendo non solo una sistematizzazione concettuale, ma anche una serie di piste di approfondimento empirico e teorico coerenti.

Il ricorso a questa distinzione consente inoltre di rafforzare la chiarezza terminologica all'interno del lavoro. Troppo spesso il concetto di "intelligenza artificiale" viene impiegato in modo generico e ambiguo, senza una definizione operativa che ne specifichi le caratteristiche rilevanti per l'analisi. In questo caso, adottare una visione strutturata consente di ancorare il discorso teorico a categorie osservabili e misurabili, facilitando al contempo la formulazione di ipotesi di ricerca testabili. Inoltre, l'utilizzo di una classificazione flessibile ma dettagliata permette di tener conto della rapidità con cui evolvono le tecnologie IA e delle loro applicazioni nei diversi settori industriali. L'integrazione di questa prospettiva teorica con l'analisi ESG rende possibile anche una lettura più articolata del concetto di sostenibilità. Non si tratta infatti solo di verificare se un sistema IA "aiuta a essere più green" o "migliora le condizioni di lavoro", ma di

comprendere come le sue caratteristiche tecniche e decisionali si traducano in impatti differenziali lungo le varie dimensioni della sostenibilità.

In sintesi, questo capitolo rappresenta il passaggio da una panoramica della letteratura esistente a una proposta teorica strutturata e orientata alla ricerca futura, nella quale le caratteristiche dell'intelligenza artificiale vengono analizzate attraverso la lente dell'Agentic AI vs AI Agents, e messe in relazione con le sfide e le opportunità legate alla sostenibilità delle supply chain.

3.2 Tassonomia dell'intelligenza artificiale: AI agents vs agentic AI

Nel crescente panorama dell'intelligenza artificiale applicata ai sistemi complessi, come le supply chain sostenibili, si è sviluppata l'esigenza di definire in maniera più chiara le categorie concettuali che distinguono le diverse forme di IA. L'articolo di Sapkota, Roumeliotis e Karkee (2025) propone un'importante distinzione tra due paradigmi: AI agents e Agentic AI. Tale distinzione è utile non solo per fini classificatori, ma anche, come vedremo successivamente, e soprattutto per analizzare l'impatto che diverse forme di IA possono esercitare sulla sostenibilità ambientale, sociale e organizzativa. Gli autori identificano sei categorie di confronto: definizione, livello di autonomia, complessità del compito, collaborazione, apprendimento e adattamento, applicazioni. Questi non sono meri indicatori tecnici, ma rappresentano veri e propri criteri interpretativi per valutare quanto un sistema IA sia in grado di comportarsi da agente completo, ovvero di manifestare caratteristiche funzionali proprie di un'entità autonoma, adattabile e socialmente integrata.

Definizione: Gli AI agents sono definiti come programmi software autonomi che eseguono compiti specifici, tipicamente all'interno di domini predefiniti. Si tratta di sistemi reattivi, il cui comportamento è fortemente guidato da input esterni e da regole fisse. Al contrario, l'Agentic AI è descritta come un insieme di agenti AI multipli che collaborano per raggiungere obiettivi complessi. Questo significa che la singola entità agentica non agisce isolatamente, ma si colloca all'interno di un sistema cooperativo, in grado di adattarsi dinamicamente al contesto.

Autonomia: I sistemi AI agents possiedono un'elevata autonomia, ma limitata all'ambito dei compiti specifici per cui sono stati programmati. L'Agentic AI, invece, è caratterizzata da un'autonomia superiore e più generale, che include la capacità di prendere decisioni in modo indipendente su compiti multi-step, anche in presenza di incertezza. Questo spostamento implica un cambiamento di paradigma: dall'autonomia tecnica a quella decisionale, con impatti diretti sulla capacità dell'IA di contribuire alla sostenibilità gestionale delle supply chain.

Complessità del compito: Gli AI agents sono costruiti per affrontare compiti singoli e ben definiti, come ad esempio la classificazione di immagini o la gestione di un assistente vocale. L'Agentic AI, invece, è orientata alla risoluzione di problemi complessi, multi-step e non necessariamente lineari, che richiedono pianificazione, prioritarizzazione e coordinamento tra sottocomponenti. Questo aspetto è cruciale nel contesto delle supply chain sostenibili, dove la complessità decisionale non può essere scomposta in moduli rigidi, ma richiede un approccio olistico e dinamico.

Collaborazione: Un altro punto discriminante è la capacità di collaborare. Gli AI agents operano prevalentemente in modo indipendente, anche quando sono distribuiti. Al contrario, l'Agentic AI si basa su modelli collaborativi, in cui gli agenti condividono informazioni, apprendono l'uno dall'altro e coordinano le azioni per raggiungere un obiettivo comune. Questo paradigma si ispira ai sistemi complessi naturali (come le colonie di insetti sociali) e trova una corrispondenza pratica nei processi collaborativi di gestione delle filiere, dove l'interoperabilità tra attori è essenziale per garantire sostenibilità ambientale e resilienza.

Apprendimento e adattamento: Gli AI agents classici sono capaci di apprendere, ma solitamente restano confinati al dominio specifico in cui sono stati addestrati. Possono aggiornare le loro conoscenze, ma non sono progettati per generalizzare su compiti diversi. L'Agentic AI, invece, apprende in modo continuo e trasversale, adattando il proprio comportamento a una varietà di compiti e ambienti. Questo tipo di apprendimento incrementale e contestuale è particolarmente rilevante per la sostenibilità, poiché consente agli agenti di adeguarsi a nuovi standard ambientali, sociali o normativi in modo flessibile.

Applicazioni: Infine, le applicazioni differenziano chiaramente i due approcci. Gli AI agents vengono utilizzati in contesti come chatbot per il customer service, assistenti virtuali o workflow automatizzati. Si tratta di strumenti che aumentano l'efficienza, ma il cui contributo strategico è limitato. L'Agentic AI è invece impiegata in ambiti complessi come la gestione della supply chain, l'ottimizzazione dei processi aziendali e la direzione virtuale di progetti. In questi casi, il sistema non solo supporta l'azione umana, ma la guida, suggerendo strategie, prendendo decisioni autonome e negoziando risorse.

Questa tassonomia evidenzia una transizione concettuale: dall'IA come “strumento” all'IA come “agente”. È un passaggio che ha implicazioni significative per il disegno di politiche sostenibili e per l'adozione di tecnologie intelligenti nella gestione industriale. In particolare, mentre gli AI agents tradizionali possono essere integrati in processi esistenti senza modificare profondamente la struttura decisionale, l'Agentic AI impone una riprogettazione dell'organizzazione in chiave collaborativa, distribuita e adattiva.

L'adozione della tassonomia proposta da Sapkota et al. permette inoltre di ancorare la riflessione teorica a una base classificatoria chiara, utile per definire i contorni del fenomeno studiato. In questa prospettiva, la sezione successiva (3.3) si occuperà di derivare da ciascuna delle caratteristiche dell'Agentic AI una o più domande di ricerca orientate alle implicazioni ESG, dando così forma a un'agenda teorica che collega le strutture tecniche dell'intelligenza artificiale alle sfide sistemiche della sostenibilità.

3.3 AI agents vs agentic AI e sostenibilità: domande di ricerca

In questa sezione, a partire da ciascuna delle sei dimensioni evidenziate nella tabella, viene proposta:

1. una riflessione sulle implicazioni ESG (ambientali, sociali, di governance);
2. la formulazione di domande di ricerca utili per sviluppi futuri.

3.3.1 Definizione

Gli AI agents sono programmi autonomi pensati per eseguire compiti specifici e delimitati, in ambienti relativamente stabili. L'Agentic AI invece è definita come un sistema composto da più agenti IA capaci di cooperare per raggiungere obiettivi complessi, spesso in ambienti dinamici e incerti. Nonostante la mera definizione non sia un parametro rilevante a livello tecnico, è comunque importante analizzarla in modo critico per una potenziale classificazione nei futuri studi.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: Sistemi multi-agente possono coordinarsi per ridurre collettivamente le emissioni o ottimizzare l'uso delle risorse.
 - Sociale: L'Agentic AI ridefinisce le modalità di interazione tra uomo e macchina, influenzando accettazione, ruoli lavorativi e coinvolgimento.
 - Governance: Nuove architetture collaborative richiedono regole per la gestione della responsabilità distribuita.
- **Domande di ricerca:**
 - In che modo i sistemi Agentic AI, rispetto agli AI agents tradizionali, favoriscono l'allineamento tra obiettivi operativi e obiettivi ESG?
 - Quali implicazioni emergono dalla transizione concettuale da “strumento” a “agente collaborativo” nella progettazione di supply chain sostenibili?

3.3.2 Livello di autonomia

Gli AI agents possiedono un'autonomia elevata, ma confinata a compiti predeterminati. L'Agentic AI estende questa autonomia alla gestione integrata e flessibile di task complessi e multi-step.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: L'autonomia consente un uso più efficiente dell'energia e delle risorse, ma può anche portare a decisioni non supervisionate che compromettano l'ambiente.

- Sociale: Può ridurre il controllo umano diretto, sollevando dubbi sulla sicurezza e la sostituzione occupazionale.
- Governance: Aumentano le esigenze di controllo algoritmico, auditabilità e chiarezza su chi risponde delle decisioni automatizzate.
- **Domande di ricerca:**
 - In che misura un'elevata autonomia dell'Agentic AI può migliorare la performance ambientale senza compromettere la trasparenza?
 - Quali sistemi di responsabilità sono necessari per governare decisioni ad alta autonomia in contesti ESG?

3.3.3 Complessità del compito

Gli AI agents gestiscono compiti singoli e specifici. L'Agentic AI affronta compiti articolati, sequenziali e interdipendenti, che richiedono coordinamento e pianificazione a lungo termine.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: La capacità di gestire compiti complessi permette di monitorare e ottimizzare l'intero ciclo di vita dei prodotti.
 - Sociale: La complessità richiede interfacce user-friendly per evitare esclusione digitale.
 - Governance: Richiede policy integrate e strutture decisionali multilivello.
- **Domande di ricerca:**
 - Come si possono progettare architetture di Agentic AI capaci di gestire la complessità ESG nelle filiere?
 - Quali meccanismi di controllo sono più efficaci per supervisionare compiti complessi svolti da IA multi-agente?

3.3.4 Collaborazione

Gli AI agents operano in modo indipendente. L'Agentic AI presuppone un ambiente di collaborazione tra più agenti e tra agenti e attori umani, con scambio di informazioni e co-decisione.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: Maggiore efficienza se più agenti collaborano per ottimizzare risorse distribuite.
 - Sociale: Maggior coinvolgimento degli operatori, ma anche necessità di nuove competenze per lavorare con IA.
 - Governance: Le decisioni condivise richiedono accountability collettiva e inter-organizzativa.
- **Domande di ricerca:**
 - In che modo la collaborazione tra agenti AI e stakeholder umani può facilitare la co-creazione di valore sostenibile?
 - Come va gestita la governance distribuita in sistemi agentici collaborativi per garantire allineamento agli obiettivi ESG?

3.3.5 Apprendimento e adattamento

Gli AI agents apprendono entro un dominio specifico. L'Agentic AI apprende trasversalmente, adattandosi a nuovi compiti e ambienti.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: Capacità di rispondere a cambiamenti climatici o normativi in tempo reale.
 - Sociale: Possibilità di apprendere da feedback umani e ridurre bias nei processi decisionali.
 - Governance: Rischio di perdita di controllo se i criteri di apprendimento non sono trasparenti.
- **Domande di ricerca:**
 - Come garantire che l'apprendimento adattivo dell'Agentic AI resti coerente con gli obiettivi ESG?

- In che misura i sistemi agentici sono in grado di adattarsi a cambiamenti normativi e ambientali mantenendo la conformità?

3.3.6 Applicazioni

Gli AI agents sono usati in contesti ristretti (es. chatbot, workflow automatizzati). L'Agentic AI è già impiegata in ambiti complessi come gestione di supply chain, project management e ottimizzazione aziendale.

- **Connessione ESG:**
 - Ambientale: Applicazioni agentiche possono ridurre significativamente l'impronta ecologica delle operations.
 - Sociale: Implicazioni su ruoli professionali, formazione e interazione umana.
 - Governance: L'ampiezza d'uso richiede standard etici e normativi più ampi.
- **Domande di ricerca:**
 - Quali sono le applicazioni dell'Agentic AI più efficaci per promuovere la sostenibilità operativa nelle supply chain?
 - Come possono essere valutate le performance ESG delle applicazioni agentiche rispetto a quelle degli AI agents tradizionali?

In sintesi, l'analisi delle sei dimensioni permette di sviluppare un'agenda di ricerca robusta e coerente con i più recenti sviluppi dell'intelligenza artificiale. Ogni asse della tassonomia comparativa tra AI agents e Agentic AI apre spazi teorici e pratici di esplorazione, consentendo di declinare le implicazioni tecnologiche in chiave ESG. Le domande proposte possono servire come base per studi empirici, riflessioni concettuali o sviluppo di framework valutativi per una IA realmente sostenibile nelle supply chain.

3.4 Casi applicativi: utilizzo dell'intelligenza artificiale per la sostenibilità ESG nelle supply chain

Negli ultimi anni, numerose aziende leader hanno avviato progetti basati sull'Intelligenza Artificiale per migliorare la sostenibilità ambientale, sociale e di

governance (ESG) delle proprie supply chain. Questa sezione esamina tre categorie di casi applicativi, distinguendo anche, dove possibile, tra approcci riconducibili a AI agents tradizionali e quelli più avanzati e cooperativi, tipici della Agentic AI.

Casi a impatto ambientale

L'AI viene ampiamente impiegata per ridurre l'impatto ambientale delle catene di fornitura, ad esempio ottimizzando l'uso di risorse, tagliando le emissioni e prevenendo gli sprechi. Maersk, gigante della logistica marittima, offre un esempio ad hoc: ha integrato algoritmi di machine learning in una piattaforma blockchain cloud-based per migliorare l'efficienza e la sostenibilità ambientale delle spedizioni. In pratica, Maersk utilizza sensori GPS e modelli predittivi per ottimizzare le rotte delle navi, evitando aree pericolose e percorsi non necessari. Ciò non solo incrementa la sicurezza, ma riduce anche il consumo di carburante e le emissioni di CO₂. Inoltre, la digitalizzazione delle documentazioni di carico tramite blockchain ha eliminato gran parte della burocrazia cartacea, contribuendo a una sensibile riduzione delle emissioni. Uno studio di Wong et al. (2023) documenta come queste innovazioni di Maersk abbiano portato a “riduzione della carta e delle emissioni di carbonio” e a un uso più efficiente dell'energia nei centri dati tramite l'allocazione dinamica delle risorse.

Nel caso di Maersk, il sistema mostra tratti riconducibili a Agentic AI: i moduli decisionali operano in autonomia, integrano fonti dati eterogenee, e collaborano con sottosistemi logistici per pianificare in modo proattivo. Non si tratta solo di AI agents reattivi, ma di un ecosistema digitale capace di gestire decisioni complesse in tempo reale e con impatti misurabili.

Un secondo esempio riguarda Unilever, multinazionale dei beni di consumo, impegnata a coniugare AI e sostenibilità ambientale nelle proprie filiere. Unilever ha sfruttato l'analitica avanzata e modelli predittivi per migliorare la pianificazione della supply chain, con risultati rilevanti nella riduzione degli sprechi e delle emissioni. In uno studio del 2024, James evidenzia un caso di Unilever in cui l'uso di business analytics e AI ha permesso di ottenere “significative riduzioni delle emissioni di gas serra” ottimizzando le decisioni di supply chain. Un esempio concreto è la supply chain dei gelati Unilever, altamente sensibile ai fattori climatici stagionali: attraverso l'AI, l'azienda analizza in

tempo reale i dati meteo per adattare le previsioni di domanda, evitando sovrapproduzione e prodotti invenduti.

Inoltre, Unilever impiega tecnologie di geolocalizzazione e visione satellitare AI per assicurare una fornitura sostenibile di materie prime critiche come l'olio di palma. Tramite partnership con startup tecnologiche, l'azienda monitora oltre 20 milioni di ettari di foresta in Asia, integrando dati satellitari e algoritmi di intelligenza artificiale per individuare precocemente segnali di deforestazione illegale lungo la filiera. Questo approccio ha contribuito a rendere il 97,5% della propria catena di approvvigionamento di palma da olio deforestation-free entro fine 2023.

In entrambi i casi, il passaggio da AI agents a Agentic AI emerge in modo evidente: non si tratta di sistemi che eseguono singole attività (forecasting, routing), ma di unità cognitive autonome, adattive, e capaci di interazione inter-sistemica, in linea con le caratteristiche chiave dell'Agentic AI.

Casi a impatto sociale

L'uso dell'AI nelle supply chain può anche generare ricadute positive sul piano sociale, migliorando le condizioni di lavoro, la trasparenza etica e il benessere delle comunità coinvolte. Un esempio rilevante è Patagonia, azienda nota per l'impegno nella responsabilità socio-ambientale lungo tutta la filiera. Negli ultimi anni l'azienda ha iniziato a integrare tecnologie digitali avanzate per rafforzare l'analisi e il monitoraggio della propria catena di fornitura in linea con i suoi valori etici.

In particolare, Patagonia utilizza piattaforme AI per migliorare la trasparenza tracciando i materiali usati nei prodotti lungo l'intera filiera. Questo sistema consente di identificare aree di potenziale rischio ambientale o sociale. Il sistema utilizzato presenta tratti di AI agent, in quanto è specializzato nel monitoraggio e non sembra includere un'autonomia decisionale estesa o capacità collaborative multi-agente. Tuttavia, l'evoluzione futura del sistema verso una maggiore proattività, adattamento e collaborazione tra nodi, potrebbe avvicinarlo a una struttura agentica più evoluta.

Casi a impatto di governance

La dimensione Governance dell'ESG attiene alle pratiche di gestione, controllo e trasparenza con cui le aziende guidano la propria supply chain. L'Intelligenza Artificiale può fungere da leva per migliorare la visibilità e il controllo sulle operazioni complesse, supportando decisioni data-driven. Walmart ha investito in AI per rafforzare la governance della propria catena globale. Utilizza chatbot e algoritmi per automatizzare le interazioni con i fornitori, assicurando standardizzazione e tracciabilità.

Nel caso Walmart, i sistemi sono riconducibili a una struttura mista: i chatbot rappresentano tipici AI agents mentre le soluzioni basate su blockchain e data analytics avanzati, se integrate in ecosistemi predittivi e collaborativi, si avvicinano al concetto di Agentic AI.

Anche Siemens offre un esempio evoluto: la sua piattaforma Design-to-Source Intelligence consente di prendere decisioni conformi a normative e vincoli ESG già nella fase progettuale. Gli algoritmi impiegati gestiscono milioni di dati, valutano rischi e segnali di mercato e suggeriscono azioni concrete, anticipando criticità. Questo tipo di architettura, che interconnette sistemi, automatizza scelte complesse e apprende da grandi quantità di dati, riflette pienamente la logica dell'Agentic AI.

Non si tratta più di strumenti a supporto decisionale (AI agents), ma di agenti digitali proattivi, in grado di ragionare entro vincoli ambientali, normativi e produttivi, partecipando attivamente al processo di governance della supply chain. Tuttavia, anche in questo caso, i benefici dipendono dalla qualità dei dati e dalla maturità dei processi decisionali aziendali.

In conclusione, i casi qui analizzati mostrano una transizione in corso: da applicazioni basate su AI agents tradizionali, focalizzate su task limitati, a soluzioni Agentic AI, in grado di apprendere, adattarsi, interagire e coordinarsi. Questo passaggio riflette non solo un'evoluzione tecnologica, ma anche un cambio di paradigma nel modo in cui le aziende intendono costruire supply chain sostenibili. L'efficacia di tali sistemi nel promuovere gli obiettivi ESG dipenderà dalla loro progettazione, governance e capacità di operare come veri "agenti responsabili" all'interno di reti complesse.

4. Conclusioni

La tesi ha esplorato in profondità il ruolo dell'intelligenza artificiale nel promuovere la sostenibilità delle supply chain, analizzando criticamente la letteratura esistente e proponendo un'agenda teorica strutturata per futuri sviluppi di ricerca. La riflessione di fondo che ha guidato la tesi è la necessità di superare una visione riduzionista dell'IA, intesa come mero strumento di efficienza, per comprenderne il potenziale trasformativo in relazione agli obiettivi ESG (Environmental, Social, Governance).

Nel Capitolo 2 è stata condotta una revisione sistematica della letteratura che ha evidenziato, da un lato, il crescente interesse per le applicazioni dell'IA nella gestione sostenibile delle filiere, e dall'altro, una frammentazione teorica e una focalizzazione eccessiva sulla sola dimensione ambientale della sostenibilità. È emerso come l'IA possa effettivamente supportare pratiche di green logistics, riduzione degli sprechi, tracciabilità e responsabilità sociale, ma anche come esistano numerose barriere tecniche, organizzative e normative alla sua adozione pienamente sostenibile. Particolarmente rilevante si è rivelata la tensione tra efficienza e sostenibilità: l'IA può ridurre consumi e costi, ma genera anche nuovi rischi (ambientali, etici, occupazionali) se non governata correttamente.

Per affrontare queste contraddizioni, il Capitolo 3 ha proposto un cambio di prospettiva teorica, introducendo la distinzione tra AI Agents (strumenti passivi, orientati a compiti specifici) e Agentic AI (sistemi autonomi, adattivi, proattivi). Questa tassonomia, ispirata ai lavori più recenti in ambito organizzativo e tecnologico, ha permesso di articolare una riflessione più profonda sulle implicazioni ESG delle diverse forme di intelligenza artificiale, offrendo una griglia concettuale utile a valutare il grado di allineamento tra IA e sostenibilità. Le sei dimensioni considerate – autonomia, adattabilità, collaborazione, apprendimento, complessità dei compiti e capacità di interazione – sono state messe in relazione con potenziali impatti ambientali, sociali e di governance, generando una serie di domande di ricerca orientate a colmare i principali gap evidenziati dalla letteratura.

Il contributo della tesi è dunque duplice: da un lato, offre una sintesi critica e aggiornata sullo stato dell'arte; dall'altro, propone un quadro teorico originale per analizzare l'adozione dell'IA in chiave ESG, utile sia per gli studiosi sia per i decisori aziendali. I casi applicativi discussi confermano che esistono già esperienze avanzate in cui l'IA viene utilizzata non solo per ottimizzare operazioni, ma anche per aumentare trasparenza, responsabilità e resilienza nelle supply chain.

Per il futuro, sarà cruciale approfondire empiricamente le differenze tra AI Agents e Agentic AI nelle imprese reali, valutandone gli impatti concreti sugli indicatori ESG. Inoltre, sarà necessario sviluppare framework di governance capaci di assicurare che l'adozione dell'IA sia effettivamente coerente con i principi della sostenibilità, evitando che l'innovazione tecnologica produca nuove forme di squilibrio o disuguaglianza. In definitiva, se ben progettata, regolata e governata, l'intelligenza artificiale può rappresentare non solo un acceleratore di performance, ma anche un agente attivo di trasformazione sostenibile nelle catene globali del valore.

Bibliografija

- Bag, S., Rahman, M. S., Srivastava, G., Giannakis, M., & Foropon, C. (2023). Data-driven digital transformation and the implications for antifragility in the humanitarian supply chain. *International Journal of Production Economics*, 266, 109059.
- Baryannis, G., Dani, S., & Antoniou, G. (2019). Predictive analytics and artificial intelligence in supply chain management: Review and implications for the future. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- Boorová, B., Mijušković, V., Aćimović, S., & Đurđić, D. (2024). *Application of Artificial Intelligence in Logistics 4.0: DHL case study analysis*. *Ekonomika preduzeća*, 72(5-6), 292-304.
- Chatterjee, S., Chaudhuri, R., Kamble, S., Gupta, S., & Sivarajah, U. (2023). Adoption of artificial intelligence and cutting-edge technologies for production system sustainability: A moderator-mediation analysis. *Information Systems Frontiers*, 25(5), 1779-1794.
- Chen, W., Men, Y., Fuster, N., Osorio, C., & Juan, A. A. (2024). Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review. *Sustainability*, 16(21), 9145
- Choi, T. M., Wallace, S. W., & Wang, Y. (2018). Big Data Analytics in Operations Management: Production and Operations Management Perspectives. *Production and Operations Management*, 27(5), 821-833.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management*. Pearson UK.
- Culot, G., Podrecca, M., & Nassimbeni, G. (2024). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review of empirical studies and research directions. *Computers in Industry*, 157, 103877.
- Daios, A., Kladovasilakis, N., Kelemis, A., & Kostavelis, I. (2025). AI Applications in Supply Chain Management: A Survey. *Applied Sciences*, 15(5), 2775.
- Dauvergne, P. (2022). Is artificial intelligence greening global supply chains? Exposing the political economy of environmental costs. *Review of International Political Economy*, 29(3), 696-718.
- Emmanuel, O. K., Aria, J., Jose, D., & Diego, C. Ethical Considerations and Challenges of AI in Supply Chain Management.

- Frimpong, V. (2025). The Sustainability Paradox of Artificial Intelligence: How AI Both Saves and Challenges Resource Management Efforts. *Available at SSRN* 5176930.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production*, 252, 119869.
- Hahn, T., Pinkse, J., Preuss, L., & Figge, F. (2015). Tensions in corporate sustainability: Towards an integrative framework. *Journal of business ethics*, 127, 297-316.
- Hangl, J., Behrens, V. J., & Krause, S. (2022). Barriers, Drivers, and Social Considerations for AI Adoption in Supply Chain Management: A Tertiary Study. *Logistics*, 6(3), 63
- Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., & Sharma, M. K. (2024). A literature review on green supply chain management for sustainable sourcing and distribution. *Waste Management Bulletin*.
- Hendriksen, C. (2023). Artificial intelligence for supply chain management: Disruptive innovation or innovative disruption? *Journal of Supply Chain Management*.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829–846.
- Kache, F., & Seuring, S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 10-36.
- Korherr, P., & Kanbach, D. (2023). Human-related capabilities in big data analytics: a taxonomy of human factors with impact on firm performance. *Review of Managerial Science*, 17(6), 1943-1970.
- Lessons from Patagonia. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 1477-1496.
- Li, R., Liu, W., & Zhou, S. (2024). *Digital transformation of supply chain management in the fast fashion industry: A case study of Zara*
- Newman, (2018). Zara turns to Robot as In-Store Pickups Surge. *The Wall Street Journal*.

- Nguyen, L. T., & Zuidwijk, R. (2025). Sustainable supply chain governance: A literature review. *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, 34(2), 541-564.
- Palan, J. (2024). *Walmart's Integration of AI and AR Technologies*. *IOSR Journal of Business and Management*, 26(6), 36-41.
- Patalas-Maliszewska, J., Szmołda, M., & Łosyk, H. (2024). Integrating Artificial Intelligence into the Supply Chain in Order to Enhance Sustainable Production—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(16), 7110.
- Pongratic, M. (2007). Greening the supply chain: A case analysis of Patagonia. *IR/PS CSR, Case*, 7-22.
- Qu, C., & Kim, E. (2024). Reviewing the Roles of AI-Integrated Technologies in Sustainable Supply Chain Management: Research Propositions and a Framework for Future Directions. *Sustainability*, 16(14), 6186.
- Queiroz, M. M., Pereira, S. C. F., Telles, R., & Machado, M. C. (2021). Industry 4.0 and digital supply chain capabilities: A framework for understanding digitalisation challenges and opportunities.
- Roux, M., Chowdhury, S., Kumar Dey, P., Vann Yaroson, E., Pereira, V., & Abadie, A. (2023). Small and medium-sized enterprises as technology innovation intermediaries in sustainable business ecosystem: interplay between AI adoption, low carbon management and resilience. *Annals of Operations Research*, 1-50.
- Samuels, A. (2025). Examining the integration of artificial intelligence in supply chain management from Industry 4.0 to 6.0: a systematic literature review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1477044.
- Sapkota, R., Roumeliotis, K. I., & Karkee, M. (2025). Ai agents vs. agentic ai: A conceptual taxonomy, applications and challenge.
- Shourkaei, M. M., Taylor, K. M., & Dyck, B. (2024). Examining sustainable supply chain management via a social-symbolic work lens: Lessons from Patagonia. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 1477-1496.
- Shrivastav, M. (2021). Barriers related to AI implementation in supply chain management. *Journal of Global Information Management (JGIM)*, 30(8), 1-19.
- Teixeira, A. R., Ferreira, J. V., & Ramos, A. L. (2025). Intelligent Supply Chain Management: A Systematic Literature Review on Artificial Intelligence Contributions. *Information*, 16(5), 399.

- *The Role of Business Analytics in Curbing the Negative Impact of Sustainability on Supply Chains: A Case Study on Unilever*. *International Journal of Business and Management*, 19(10), 45–59.
- Truant, E., Borlatto, E., Crocco, E., & Sahore, N. (2024). Environmental, social and governance issues in supply chains. A systematic review for strategic performance. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140024.
- Wamba-Taguimdje, S. L., Fosso Wamba, S., Kala Kamdjoug, J. R., & Tchatchouang Wanko, C. E. (2020). Influence of artificial intelligence (AI) on firm performance: The business value of AI-based transformation projects. *Business Process Management Journal*, 26(7), 1883–1902.
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W. T., & Papadopoulos, T. (2020). Big Data Analytics in Logistics and Supply Chain Management: Certain Investigations for Research and Applications. *International Journal of Production Economics*, 227, 107643.
- Wong, S., Yeung, J. K. W., Lau, Y. Y., & Kawasaki, T. (2023). A case study of how Maersk adopts cloud-based blockchain integrated with machine learning for sustainable practices. *Sustainability*, 15(9), 7305.
- Yawar, S. A., & Seuring, S. (2017). Management of social issues in supply chains: a literature review exploring social issues, actions and performance outcomes. *Journal of business ethics*, 141(3), 621-643.
- Zeng, H., Li, R. Y. M., & Zeng, L. (2022). Evaluating green supply chain performance based on ESG and financial indicators. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 982828.
- Zhang, M., Tse, Y. K., Doherty, B., Li, S., & Akhtar, P. (2018). Sustainable supply chain management: Confirmation of a higher-order model. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 206-221.