

# Digital Twins nei Sistemi Portuali e il contributo di GHG accounting: Una review della letteratura

*Assunta Di Vaio*<sup>\*</sup>, *Sabrina Palladino*<sup>\*\*</sup>, *Elisa Van Engelenhoven*<sup>\*</sup>

Received: 7 August 2024

Accepted: 3 April 2025

## Digital Twins in Port Systems and the contribution of GHG accounting: A literature review

### Abstract

This study explores the existing literature to better understand how Digital Twins (DTs) have been analyzed in the perspective of measuring and reporting the carbon footprint of port systems. The study also analyzes how greenhouse gas (GHG) accounting can contribute to feed the DTs information system regarding the values of emissions from mooring, unmooring and manoeuvring operations at the ship-port interface. Although several studies have explored the implementation of new technologies to improve the technical efficiency of ports and their effects on emissions, and others have analyzed GHG accounting for the measurement and reporting of the latter, it remains uncertain how GHG accounting can be integrated with DTs for predictive analytics of ship-port interface operations. This study conducts a literature review on a dataset of 47 articles from Scopus database and Google Scholar, published from 1990 to 2024. The results highlight that, since 2015, research on DTs in ports has highlighted their key role in reducing the carbon footprint and in achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG7. To the best of our knowledge, this is the first study that analyses, according to a holistic approach, digital systems for virtual representations (DTs) and measurement and reporting systems (GHG accounting) for environmental sustainability at the ship-port interface to support public management decisions. This study provides a different perspective of analysis to the decarbonization of the port sector, with theoretical and practical implications also in response to the UN 2030 Agenda and its SDGs.

**Keywords:** GHG Accounting, Digital Twins, GHG Emissions, Management Control Systems, Port Systems, Sustainable Development Goals.

---

<sup>\*</sup> University of Napoli Parthenope, Department of Giurisprudenza. Corresponding author: [susy.divaio@uniparthenope.it](mailto:susy.divaio@uniparthenope.it).

<sup>\*\*</sup> University of Salento, Department of Scienze Guidice.

## 1. Introduzione e Theoretical Background

Nelle ultime tre decadi, il management pubblico ha intensificato il proprio impegno verso la sostenibilità ambientale adottando politiche e pratiche mirate a ridurre l'impatto ecologico delle proprie attività promuovendo uno sviluppo sostenibile (Garzella, Capurro, 2024; Magliacani, 2023; Bebbington e Unerman, 2018). Questo processo ha portato a miglioramenti significativi nelle performance gestionali grazie all'adozione di pratiche innovative digitali che promuovono sia la conservazione ambientale che lo sviluppo economico (Mancini *et al.*, 2023).

Nel 1987 il rapporto "Our Common Future" rilasciato dalla commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo presieduta da Gro Harlem Brundtland ha introdotto il concetto di sviluppo sostenibile, cioè, sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri (Brundtland, 1987: p.15). Gli obiettivi di mitigazione del cambiamento climatico e sviluppo sostenibile sono stati discussi nel Protocollo di Kyoto, in vigore dal 2005, che ha richiesto ai 37 paesi industrializzati di ridurre le emissioni di gas serra del 5% entro il 2012 rispetto ai livelli del 1990. Nonostante gli sforzi, l'obiettivo del Protocollo si è rivelato inadeguato e difficile da raggiungere (Nespor, 2016). Pertanto, l'Accordo di Parigi, firmato alla Conferenza delle Parti il 12 dicembre 2015 (COP21) e ratificato il 4 novembre 2016, ha stabilito un quadro globale e giuridicamente vincolante per affrontare il cambiamento climatico. L'accordo è fondamentale per raggiungere i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals, SDGs) e i 169 target stabiliti nel piano d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità, sottoscritto da 193 paesi membri delle Nazioni Unite nel settembre 2015 e operativo dal 1° gennaio 2016.

L'Agenda 2030 rappresenta un piano d'azione globale per affrontare i cambiamenti climatici, mentre l'Accordo di Parigi chiarisce impegni dettagliati per la riduzione delle emissioni di gas serra, l'uso di tecnologie ecologiche e il mantenimento della trasparenza (UN, 2019). L'adozione di modelli di business che integrano gli SDGs ha richiamato l'attenzione dell'industria (Bebbington e Unerman, 2018) fornendo un consenso diffuso sull'importanza del contributo delle imprese e, più in generale, delle organizzazioni pubbliche e private nel mitigare il cambiamento climatico (Caprani, 2016). In questo scenario, i porti in un modello organizzativo-gestionale chiamato "landlord" guidato dalle autorità di sistema portuale, cioè enti pubblici non economici (Di Vaio *et al.*, 2011), sono chiamati a svolgere un ruolo attivo

nel perseguire gli obiettivi di riduzione della loro impronta di carbonio, specie nelle operazioni di interfaccia nave-porto (World Bank, 2007), in cui la letteratura riconosce l'interfaccia quale area operativa a più alto valore di emissioni (Di Vaio *et al.*, 2018). D'altra parte, tali operazioni identificate dall'art. 16 della Legge n. 84/1994, sono quelle in cui la nave si interfaccia direttamente con la terraferma e includono l'ormeggio, il disormeggio e le manovre. Durante l'ormeggio, la nave viene ancorata al molo o alla banchina, stabilizzandone la posizione per garantire la sicurezza. Il disormeggio è il processo inverso, in cui la nave viene liberata dalle sue ancore per riprendere il mare. Le manovre comprendono tutte le operazioni di navigazione necessarie per posizionare correttamente la nave all'interno del porto. Questi processi sono critici perché comportano l'uso di motori ausiliari e altre attrezzature che contribuiscono significativamente alle emissioni di gas serra e di inquinanti atmosferici. Dunque, i porti sono chiamati a contribuire al perseguimento degli SDGs. In particolare, la più recente letteratura ha mostrato l'interesse a identificare il contributo dei porti nel perseguimento dell'SDG7 'Energia pulita e accessibile per garantire a tutti l'accesso a un'energia accessibile, affidabile, sostenibile e moderna' (Alvino *et al.*, 2021).

Le crescenti pressioni istituzionali riguardo l'obiettivo di sostenibilità ambientale hanno portato le autorità di sistema portuale e i loro principali stakeholder a effettuare ingenti investimenti per migliorare le performance ambientali e operative nell'interfaccia nave-porto (Eom *et al.*, 2023; Di Vaio *et al.*, 2018). Tuttavia, le emissioni nei porti continuano a essere significativamente elevate (Alamouh *et al.*, 2022). Song (2024) ritiene che la riduzione delle emissioni passi attraverso un sistema più ampio, in grado di monitorare, condividere e pianificare le operazioni di tutti gli stakeholder coinvolti nel processo. Pertanto, le strategie di sostenibilità ambientale adottate dalle aziende di navigazione marittima diventano essenziali per predire l'efficientamento delle operazioni di interfaccia nave-porto (Yang *et al.*, 2024; Di Vaio *et al.*, 2018). Gli studi hanno evidenziato come l'integrazione delle tecnologie, quali Internet of Things (IoT), Intelligenza Artificiale (IA), Blockchain Technology (BT) e Port Community System (PCS) aiutino a migliorare l'efficienza operativa dei porti favorendo la riduzione delle emissioni nelle fasi operative, specie in quelle di interfaccia nave-porto (Dinh *et al.*, 2024; Del Giudice *et al.*, 2022; Di Vaio e Varriale, 2019).

Sebbene l'adozione della tecnologia sia ampiamente riconosciuta da studiosi e professionisti per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, è ugualmente riconosciuto che la creazione di Digital Twins (DTs), cioè una copia digitale di informazioni relative a un processo, un prodotto o anche un

sistema che consente di verificare oggi la reazione futura dell'ambiente duplicato sulla base di decisioni strategiche e operative, è più efficace rispetto ai metodi tradizionali per monitorare, analizzare e gestire in tempo reale le emissioni nei porti (Bofill *et al.*, 2023; Yao *et al.*, 2023). Originariamente introdotto dalla NASA come “gemellaggio” nel 1970 (Yu *et al.*, 2022), il concetto di Digital Twin (DT) è stato formalmente definito da Michael Grieves, durante il suo corso sul Product Lifecycle Management (Grieves, 2005). Grieves ha descritto il DT come un sistema che connette un'entità fisica con un modello digitale. DT si basa sull'integrazione di dati provenienti da varie fonti e sull'uso di strumenti analitici per ottimizzare le operazioni fisiche, creando una replica virtuale della realtà che viene continuamente aggiornata (Grieves, 2014: p.1).

I principi fondamentali dei DTs includono sincronizzazione, interoperabilità e resilienza (Kurupparachchi *et al.*, 2022). Questi sistemi richiedono tecnologie abilitanti che ne supportano la capacità di elaborazione e analisi dei dati. Tra queste tecnologie figurano: IoT, che consente la raccolta di dati in tempo reale tramite sensori interconnessi, mantenendo costantemente aggiornati i DTs; Cloud Computing, che permette di archiviare e gestire grandi quantità di dati provenienti dai DTs; IA, che ottimizza la previsione e la gestione dei processi; e la realtà estesa, che favorisce un'interazione immersiva tra oggetti fisici e digitali, integrando realtà aumentata, realtà virtuale e realtà mista (Attaran e Celik, 2023). Dal 2000 al 2010, sono state esplorate le potenzialità dei DTs (Shafto *et al.*, 2010; Grives, 2005). Tra il 2010 e il 2024, l'integrazione con IoT, Big Data e IA ha contribuito alla diffusione del concetto di DTs in vari settori, incluso quello marittimo (von Lukas, 2023). Nei porti, l'implementazione dei DTs ha facilitato analisi predittive e migliorato le prestazioni operative, dimostrando così il valore degli investimenti in tecnologie avanzate per un futuro sostenibile (Fonseca e Gaspar, 2021; Rasheed *et al.*, 2020; Stoumpos *et al.*, 2020). Per calcolare l'impronta di carbonio, i DTs necessitano della raccolta dettagliata di dati ambientali e operativi integrati da sensori IoT e informazioni logistiche (Radanliev *et al.*, 2022). Questi sistemi consentono un'analisi approfondita delle emissioni di gas serra, supportando una gestione più sostenibile e contribuendo alla riduzione dell'impronta di carbonio (Eom *et al.*, 2023). In questo contesto, GHG Protocol guida l'analisi degli effetti decisionali per la sostenibilità ambientale (Gillenwater, 2023; Gillenwater, 2022).

Nel 1998 dalla collaborazione tra World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) è stato introdotto il protocollo “GHG Protocol” per misurare e rendicontare le emis-

sioni di gas serra [(anidride carbonica (CO<sub>2</sub>); metano (CH<sub>4</sub>); ossido di diazoto (N<sub>2</sub>O); idrofluorocarburi (HFC); perfluorocarburi (PFC); esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>)]. Il protocollo si basa sui principi di pertinenza, completezza, coerenza, trasparenza e accuratezza, che garantiscono l'attendibilità dei dati raccolti e gestiti dalle aziende nel supportare le strategie ambientali (Bhatia e Ranganathan, 2004; World Business Council for Sustainable Developments, 2004). Dopo la fase di identificazione, GHG Protocol richiede alle aziende di ottemperare alla fase di quantificazione delle emissioni. Il protocollo identifica metodi di calcolo standardizzati e strumenti a supporto quali software e database per facilitare la raccolta e l'analisi dei dati, ad esempio indicatori di consumo specifico di energia e intensità di emissioni di gas a effetto serra (World Business Council for Sustainable Developments, 2004). Questi strumenti sono parte integrante del GHG Protocol Corporate Accounting e Reporting Standards (2004), generalmente indicato come Corporate Standard. Secondo WRI (2011), la misurazione delle emissioni e la relativa rendicontazione può avvenire sistematicamente con l'impiego di GHG accounting. In particolare, WRI ha chiarito che il GHG accounting è il processo sistematico di misurazione, monitoraggio e rendicontazione delle emissioni derivanti da diverse attività. Nei porti, è essenziale per analizzare le emissioni legate a operazioni di shipping, logistica e trasporto terrestre (International Chamber of Shipping, 2019). Il processo prevede l'identificazione e quantificazione delle fonti emmissive, offrendo un quadro chiaro dell'impronta di carbonio di un'entità, come indicato dal Greenhouse Gas Protocol Initiative (2015). La classificazione in Scope 1, 2 e 3<sup>1</sup> facilita l'allineamento con i regolamenti internazionali, che richiedono una misurazione accurata delle emissioni aziendali e settoriali. Il GHG accounting è inoltre connesso ai sistemi di rendicontazione obbligatori, come il Regolamento UE 2018/842 sull'"Effort Sharing", che stabilisce target di riduzione per settori inclusi i porti e il trasporto marittimo (Regolamento UE, 2018). Conoscere l'impronta di carbonio consente alle autorità portuali di individuare le principali fonti di

---

<sup>1</sup> Il GHG Protocol prevede che, in una prima fase, le aziende identificano le fonti di emissione, ossia le aree in cui si svolgono le principali operazioni tecniche. Queste fonti sono suddivise in tre categorie, chiamate "Scope". Precisamente, lo Scope 1 che include le emissioni dirette generate da fonti sotto il controllo diretto dell'azienda, come impianti, veicoli e macchinari; Scope 2 relativo alle emissioni indirette derivanti dall'energia elettrica sviluppata o consumata dall'azienda; e Scope 3 che include altre emissioni indirette legate all'intera catena di fornitura. Questa classificazione aiuta le aziende a monitorare e gestire in modo più efficace il proprio impatto ambientale (World Resources Institute, 2011).

emissione e concentrare gli sforzi in aree strategiche per la sostenibilità. Inoltre, facilita la conformità agli impegni climatici globali, come l'Accordo di Parigi, promuovendo iniziative ecologiche come l'elettrificazione delle attrezzature e l'uso di energie rinnovabili (International Maritime Organization, 2020). Tuttavia, il GHG accounting è un sistema complesso, influenzato da diverse visioni e interessi istituzionali e aziendali, con sfide significative nella contabilizzazione e gestione delle emissioni (Allini *et al.*, 2018). La misurazione e la rendicontazione delle emissioni aiutano a individuare inefficienze operative e a promuovere l'uso di energie rinnovabili per il raggiungimento dell'SDG7.

Le operazioni portuali, responsabili del 3% delle emissioni di gas serra (Misra *et al.*, 2017), rendono complessa la raccolta e l'analisi dei dati sulle emissioni. Tuttavia, il GHG accounting può supportare i DTs nel prevedere le emissioni durante le operazioni di ormeggio, disormeggio e manovra delle navi (Jusoha *et al.*, 2017). In questo contesto, la teoria istituzionale, che esamina l'influenza di strutture, regolamenti e normative sociali sul comportamento delle organizzazioni, offre una prospettiva utile nel contesto portuale. Politiche governative, regolamentazioni ambientali e pressioni sociali possono incentivare pratiche più sostenibili e innovative, migliorando le performance ambientali dei porti (DiMaggio e Powell, 1983). Tuttavia, resta aperta la questione di come il GHG accounting possa integrarsi con i DTs per il raggiungimento dell'SDG7. Per colmare questo gap conoscitivo, questo studio, attraverso una revisione sistematica della letteratura, prova a rispondere alla seguente domanda di ricerca: *Come possono i dati raccolti e elaborati da GHG accounting supportare i DTs nel simulare le operazioni di ormeggio, disormeggio e manovra delle navi misurando la riduzione delle emissioni e il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, in particolare dell'SDG7?*

Allo scopo di rispondere adeguatamente alla domanda di ricerca e analizzare l'integrazione di GHG accounting e DTs per le operazioni portuali, è fondamentale adottare un metodo rigoroso per esplorare la letteratura esistente, come suggerito da Hardies *et al.* (2023), che evidenziano come la revisione sistematica sia l'approccio più adatto per indagare temi con una letteratura ancora disomogenea. Il nostro studio, infatti, esamina gli studi precedenti su GHG accounting e DTs nel settore portuale nell'ambito della *sustainability accounting*, utilizzando questa metodologia per tracciare un quadro esaustivo delle pratiche e dei risultati ottenuti. Pertanto, questa metodologia consente di identificare aree di ricerca che necessitano di ulteriore esplorazione evitando la duplicazione di studi già condotti (Snyder, 2019). Dunque, la sua adozione permetterà di tracciare l'evoluzione storica delle

metodologie, delle pratiche e dei risultati facilitando una comprensione approfondita di come DTs e GHG accounting nei sistemi portuali si siano evoluti nel tempo e di come possano essere ottimizzati (Hiebl, 2023; Massaro *et al.*, 2016). Questo studio analizza 45 articoli scientifici pubblicati dal 1990 al 2024 in lingua inglese ottenuti da Scopus database e da Google Scholar (GS). La scelta del periodo di tempo trova le sue ragioni nel percorso temporale dei DTs.

Le restanti parti di questo articolo sono così di seguito strutturate. La sezione 2 spiega la metodologia che ha guidato la revisione sistematica della letteratura. La sezione 3 evidenzia i risultati della ricerca. La sezione 4 discute i risultati, così come le principali implicazioni teoriche e pratiche e le limitazioni dello studio. La sezione 5 conclude il lavoro.

## 2. Metodologia

Questo studio è basato su una revisione della letteratura attraverso un processo replicabile, scientifico e trasparente (Tranfield *et al.*, 2003: p. 211). Questa metodologia permette di identificare l'orientamento dei precedenti studi e comprendere le lacune esistenti nella letteratura per poi sviluppare, attraverso un'approfondita analisi del loro contenuto, nuovi quadri concettuali di ricerca (Di Vaio *et al.*, 2024; Massaro *et al.*, 2016). Inoltre, un approccio sistematico alla revisione della letteratura permette di eliminare i pregiudizi massimizzandone l'utilità attraverso l'uso di Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page *et al.*, 2021). Hiebl (2023: p.312) sottolinea che l'adozione di un protocollo è essenziale per superare le sfide metodologiche delle revisioni qualitative migliorando così la robustezza e la riproducibilità degli studi. Moher (2009) afferma che una revisione della letteratura ben condotta deve includere fonti multiple per evitare bias e garantire una copertura completa dell'argomento studiato, il che giustifica l'uso di più database di ricerca.

Questo studio ricorre all'uso di operatori booleani "AND" o "OR" nella rigiosità dell'approccio metodologico adottato (Gusenbauer *et al.*, 2020: p. 209). La figura 1 mostra una serie di parole chiave identificata attraverso i fondamenti teorici di questo studio e combinate nelle seguenti stringhe di ricerca.

- "carbon footprint" AND "GHG emiss\*" AND "digital twin\*"
- "digital twin\*" AND "port operation\*" AND "emiss\*"

- “digital twin\*” AND “GHG accounting” AND “port operation\*” AND “ship\*”
- “digital twin” AND “GHG emiss\*” AND (“smart port” OR “port operation”)
- “digital twin\*” AND (“port operation\*” OR “port”) AND (“sustainable development goal\*” OR “SDG7” OR “affordable clean energy”)

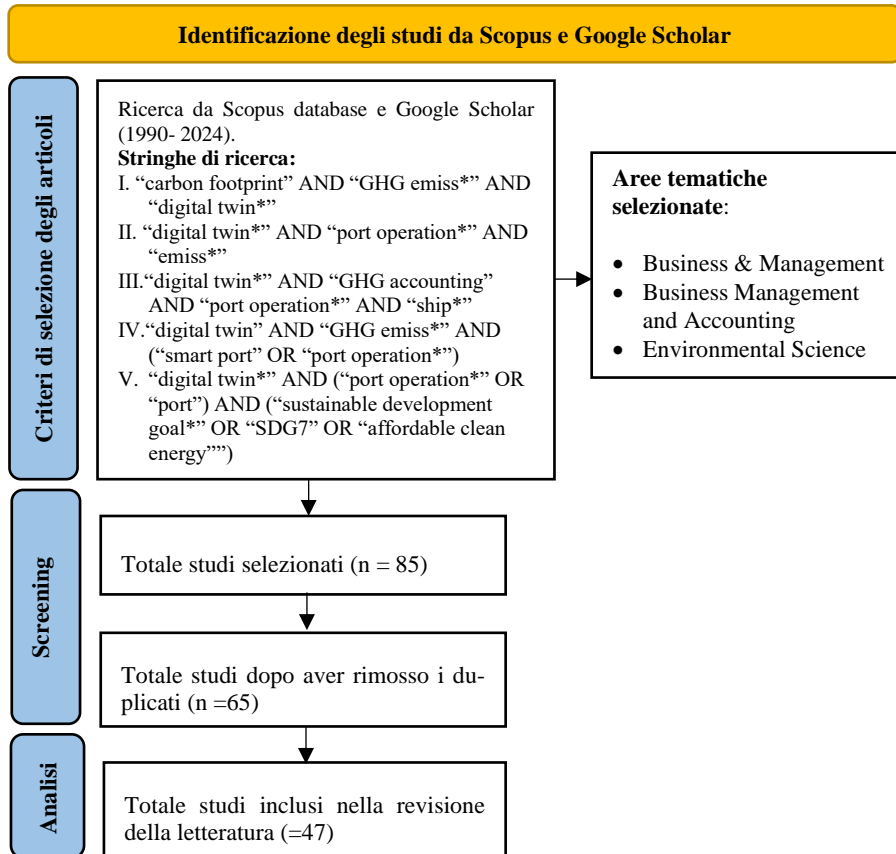
Ciò ha consentito di identificare articoli coerenti col tema oggetto di studio e utili a rispondere alla domanda di ricerca. Tre sono le aree tematiche in cui le stringhe di ricerca sono state esplorate. *Precisamente, Business & Management, Business Management and Accounting, Environmental Science.* Le funzionalità di ricerca avanzate del database selezionato e di GS, che includono la ricerca per parole chiave, il monitoraggio delle citazioni e un’interfaccia intuitiva, facilitano il recupero e l’analisi efficiente delle pubblicazioni pertinenti (Di Vaio *et al.*, 2024; Mongeon e Paul-Hus, 2016).

Nel nostro studio, sono stati selezionati un totale di 87 documenti (articoli, capitoli di libro, *proceedings*) dai database Scopus e GS, coprendo il periodo 1990-2024 e in linea con l’oggetto di ricerca di questo studio. Guidati da criteri di ammissibilità predefiniti (Hardies *et al.*, 2023; Massaro *et al.*, 2016), gli autori hanno cercato documenti in lingua inglese e, dopo averli identificati, hanno letto individualmente e collegialmente titoli, abstract e key words per comprendere il legame con la domanda di ricerca di questo studio; successivamente, sono stati rimossi documenti duplicati o non pertinenti agli obiettivi di questo studio giungendo a 65 documenti; un ulteriore screening è stato fatto dagli autori leggendo approfonditamente e individualmente l’introduzione dei documenti e discutendone collegialmente. Cosicché, gli autori hanno rimosso altri 18 documenti. Ciò ha determinato la numerosità finale del data collection di questo studio composto da 47 documenti, precisamente 34 da Scopus database e 13 da GS (Appendice I in: [www.sidrea.it/digital-twins-portuali](http://www.sidrea.it/digital-twins-portuali)). La figura 1 mostra le fasi del protocollo di ricerca seguito in questo studio (Haddaway *et al.*, 2022; Page *et al.*, 2021).

I documenti così ottenuti sono stati organizzati in cluster. Tale tecnica è efficace per diversi motivi. Innanzitutto, migliora la chiarezza e la coerenza raggruppando studi o temi simili, facilitando la sintesi e la comprensione dei modelli presenti nella letteratura (Webster e Watson, 2002). Come mostra la tabella 1, la suddivisione dei documenti in “cluster” ha consentito agli autori

di riorganizzare gli articoli raccolti, facilitando la successiva analisi del contenuto dei documenti selezionati. Gli articoli sono stati raggruppati in tre cluster tematici, in base agli ambiti di ricerca<sup>2</sup>.

**Figura 1.** Protocollo di ricerca



Fonte: Adattamento da Haddaway *et al.* (2022); Page *et al.* (2021). Disponibile al link: <https://www.eshackathon.org/software/PRISMA2020.html>

Il primo cluster include 28 documenti che esplorano i legami tra DTs e riduzione delle emissioni GHG, concentrandosi sul contributo dei gemelli

<sup>2</sup> Per il dettaglio dei documenti inclusi in ciascun cluster, si rinvia alla Tabella contenuta in: [www.sidrea.it/digital-twins-portuali](http://www.sidrea.it/digital-twins-portuali).

digitali nella simulazione di scenari operativi e nella riduzione delle emissioni. Il secondo cluster raggruppa 12 documenti che trattano dell'automazione dei terminal container e della riduzione delle emissioni tramite l'adozione di DTs. Infine, il terzo cluster comprende 7 documenti sull'integrazione dei sistemi contabili, come il GHG accounting, con i DTs per la misurazione e la rendicontazione delle emissioni. Il clustering consente di identificare tendenze, lacune e relazioni tra diverse aree di ricerca, facilitando un'analisi strutturata (Boell e Cecez-Kecmanovic, 2014). Questa tecnica è utile per gestire grandi volumi di letteratura, concentrandosi su specifici sottoargomenti senza perdere il contesto globale (Torraco, 2005). Se il numero di studi è limitato, una revisione lineare può essere più adeguata (Jesson *et al.*, 2011; Petticrew e Roberts, 2006). Tuttavia, per un numero di articoli tra 40 e 50, il clustering migliora il rigore, riducendo bias e migliorando la riproducibilità della revisione (Weißer *et al.*, 2020).

### 3. Risultati

Dagli anni '90 ai primi anni 2000, la ricerca scientifica ha dedicato poca attenzione ai benefici dei DTs nei contesti portuali. Tuttavia, dal 2015 l'interesse per questo tema è cresciuto (von Lukas, 2023, p. 44). Tra il 2018 e il 2024, gli studi hanno evidenziato come la crescente pressione per ridurre l'impronta di carbonio nei porti sia stata influenzata da una maggiore consapevolezza ambientale, normative più severe e dall'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Issa Zadeh *et al.*, 2023; Mihai *et al.*, 2022; Alzharani *et al.*, 2021). L'adozione dei DTs ha contribuito al raggiungimento degli SDGs, in particolare per l'approvvigionamento energetico sostenibile, permettendo una raccolta rapida di dati sul consumo energetico e le emissioni di gas serra (Pang *et al.*, 2024). Tuttavia, la mancanza di un quadro normativo unificato e di strategie di decarbonizzazione efficaci ha causato frammentazione tra gli stakeholder (Alamouh *et al.*, 2020). La collaborazione, l'automazione e la decarbonizzazione delle operazioni portuali sono soluzioni cruciali per rendere i porti più ecologici (Song, 2024; Eom *et al.*, 2023).

Un approccio integrato che combini politiche coerenti, tecnologie innovative e la collaborazione tra tutti gli attori coinvolti è essenziale per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione (Yang *et al.*, 2024). Come mostra la figura 2 (in: [www.sidrea.it/digital-twins-portuali](http://www.sidrea.it/digital-twins-portuali)), l'analisi dei risultati, organizzata attraverso la tecnica del *clustering*, evidenzia tre principali aree

tematiche in merito all'adozione di DTs e GHG accounting nei porti. Il primo cluster evidenzia il ruolo dei DTs nella decarbonizzazione confermando l'efficacia di questa tecnologia nella riduzione di gas serra, soprattutto attraverso la modellizzazione predittiva avanzata e la gestione ottimizzata delle risorse energetiche (Song, 2024; Alzahrani *et al.*, 2021). Tuttavia, permangono criticità legate alla scalabilità e alla personalizzazione dei modelli digitali in contesti portuali eterogenei (Du *et al.*, 2023). Il secondo cluster esplora l'automazione dei terminal container dove i DTs permettono di ottimizzare le operazioni di processo; tuttavia, le connotazioni territoriali dei porti evidenziano le difficoltà di adozione delle realtà aumentate su larga scala. Il terzo cluster esplora l'integrazione di DTs con i sistemi di GHG accounting per il monitoraggio e rendicontazione delle emissioni. Tuttavia, si evidenziano ostacoli principali alla sua diffusione su larga scala come la mancanza di standardizzazione e di interoperabilità dovute alle specificità ed esigenze di ogni singolo porto (Mihai *et al.*, 2022).

Gli studi sugli sviluppi tecnologici dei DTs hanno dimostrato di poter migliorare significativamente l'efficienza operativa dei porti mediante sistemi di automazione dei terminal container, applicazione dei sistemi combinati di digitalizzazione di IoT, Blockchain Technology, Big Data, IA (Antunes *et al.*, 2024; Du *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2021; Rasheed *et al.*, 2020) e sistemi di supporto decisionale riducendo le emissioni come analizzato nei porti di Busan, Qingdao, Shanghai, Yangshang e Ventotene (Yang *et al.*, 2024; Ding *et al.*, 2023; Eom *et al.*, 2023; Cumo, 2021).

Studi empirici sui terminal container automatizzati evidenziano come i DTs possano ottimizzare la pianificazione e il controllo dei veicoli a guida automatica, migliorando la gestione delle risorse e riducendo i tempi di inattività attraverso algoritmi avanzati come il Q-learning. Questi algoritmi facilitano la simulazione e la previsione di scenari complessi per adattare i porti alle navi autonome (Toygar, 2024; Gao *et al.*, 2024; Gao *et al.*, 2023). La sostenibilità ambientale è centrale nell'applicazione dei DTs nei porti per migliorare l'efficienza delle operazioni di interfaccia nave-porto, contribuendo all'SDG7 (Eom *et al.*, 2023; Alamoush *et al.*, 2020). Alcuni modelli di DTs sono stati sviluppati per valutare il rischio delle infrastrutture portuali rispetto ai cambiamenti climatici, utilizzando sistemi cloud per analizzare rischi climatici come inondazioni e tempeste (Kaklis *et al.*, 2023). Inoltre, i DTs consentono di stimare il consumo di carburante delle navi e ridurre il consumo energetico delle gru autonome, migliorando l'efficienza rispetto ai metodi tradizionali (Karatvuo *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2024; Sun e Bhowmik, 2023). Oliveira *et al.* (2022) hanno sviluppato una piattaforma DT per moni-

torare in tempo reale i container di merce pericolosa, migliorando la sicurezza portuale. Agostinelli et al. (2022) descrivono come l'integrazione di software di modellazione predittiva e *Geographic Information System* consenta di anticipare i picchi di emissione, favorendo una gestione proattiva delle emissioni. Inoltre, i DTs contribuiscono alla resilienza e al monitoraggio delle infrastrutture portuali, integrando dati storici per le previsioni climatiche (Zhou et al., 2022; Yu et al., 2023; Semeraro et al., 2021).

Secondo Song (2024) e Wang et al. (2023) le emissioni nei porti possono essere ridotte attraverso una combinazione di misure operative, tecniche e infrastrutturali. Questi studi sottolineano il ruolo fondamentale delle politiche ambientali e delle normative che influenzano significativamente l'adozione di tecnologie verdi e l'implementazione di pratiche sostenibili. È essenziale per i porti stabilire inventari delle emissioni considerando anche i fattori esterni, ad esempio politiche economiche e finanziamenti, per fissare obiettivi realistici di riduzione delle emissioni. D'altra parte, Neugebauer et al. (2024), Klar et al. (2023) e Künz et al. (2022) hanno evidenziato che i DTs possono aumentare la trasparenza operativa e agevolare le decisioni attraverso la raccolta di dati. Tuttavia, hanno anche rilevato sfide significative nella loro implementazione, in particolare nei paesi in via di sviluppo, come evidenziato anche da Alamouh et al. (2020), causate principalmente da costi elevati, necessità di standardizzazione e dalla mancata integrazione di metodi efficaci di ottimizzazione e simulazione delle attività portuali. Alzharani et al. (2021) e Tao et al. (2018) sostengono che le tecnologie avanzate come i DTs, supportati dai sistemi digitali quali IoT e IA, possano contribuire non solo alla riduzione delle emissioni ma anche all'ottimizzazione dei processi dalla gestione dell'energia alla manutenzione predittiva. D'altra parte, Issa Zahed et al. (2023) ritengono che i porti, visti come centri economici industrializzati, debbano bilanciare le loro stime ambientali includendo nei loro sistemi di gestione energetica politiche di emissioni di carbonio e infrastrutture ecologiche. Nonostante i molteplici benefici alcuni studiosi discutono delle problematiche legate all'implementazione dei DTs evidenziando la mancanza di interoperabilità e di architetture che migliorino la collaborazione e la fiducia tra i diversi stakeholder (Kurupparachchi et al., 2022; Hofmann e Branding, 2019).

In questo contesto, i DTs rappresentano un approccio innovativo per la gestione ambientale nei porti (Zhen et al., 2019). Il calcolo delle emissioni di gas serra (GHG) è considerato un metodo fondamentale nelle strategie di mitigazione delle emissioni, poiché consente di quantificare l'impronta di carbonio del porto attraverso un'analisi per attività. Questo metodo valuta le

emissioni durante le fasi di ormeggio, disormeggio e manovra, come evidenziato per il porto di Chennai (Misra *et al.*, 2017). Inoltre, l'implementazione di tecnologie per l'efficienza energetica e l'uso di energie rinnovabili, come dimostrato dal caso studio del porto di Anzio, migliora la sostenibilità energetica prodotta da fonti rinnovabili riducendo i consumi energetici e le emissioni di gas a effetto serra trasformando il porto in un "distretto a zero energia" (Agostinelli, 2022). Nonostante i potenziali benefici dall'integrazione delle tecnologie digitali a GHG accounting, vi sono diverse sfide da considerare nell'implementazione integrata del GHG accounting e DTs. Klar *et al.* (2023) sottolineano che l'assenza di una definizione chiara e condivisa dei DTs porta a un'applicazione eterogenea nei porti, ostacolando la loro integrazione con la GHG accounting, nonostante la loro importanza. Inoltre, la multicanalità delle piattaforme digitali utilizzate nei porti rappresenta un ulteriore impedimento all'implementazione dei DTs. Le difficoltà tecniche e culturali nel condividere una "realtà prospettica" comune limitano la competitività portuale. La diversità dei porti in termini di dimensioni, caratteristiche geografiche, governance e funzioni complica ulteriormente l'adozione di un approccio universale ai DTs (Klar *et al.*, 2023). Gao *et al.* (2023) evidenziano che, nonostante i progressi nei terminal automatizzati, l'efficienza non è ancora ottimale a causa di fattori incerti. I DTs, che creano modelli virtuali dinamici dei porti, offrono soluzioni per migliorare l'efficienza e gestire meglio gli scenari di interruzione. Alzahrani *et al.* (2021) sottolineano l'importanza di misurare gli indicatori delle emissioni di gas serra per il monitoraggio e il controllo delle emissioni nei porti, aiutando i decisori a prevenire e gestire le emissioni a lungo termine. Rasheed *et al.* (2020) sottolineano le caratteristiche di un DT operativo, come interoperabilità, sicurezza, affidabilità, sostenibilità e prevedibilità, essenziali per una gestione precisa delle emissioni GHG. L'integrazione dei DTs con il sistema di contabilizzazione GHG nei porti consente di monitorare e ottimizzare l'impatto ambientale, migliorando l'efficienza e la sostenibilità operativa.

#### 4. Discussione

I risultati evidenziano il crescente impegno delle autorità di sistema portuale nella promozione della sostenibilità ambientale. Tuttavia, nonostante i progressi compiuti, le emissioni nei porti rimangono elevate suggerendo che le strategie attuate finora non sono sufficienti per affrontare le sfide climatiche attuali (Wang *et al.*, 2023; Alamouh *et al.*, 2022). Attraverso l'uso dei DTs, i porti possono ottimizzare le operazioni di ormeggio e disormeggio

prevedendo i tempi ottimali di accensione e spegnimento dei motori delle navi riducendo significativamente il consumo di carburante durante le manovre e le ore di ormeggio in banchina (Eom *et al.*, 2023). In questo contesto, le pressioni normative, agiscono come leve per l'adozione di tecnologie come i DTs, poiché le autorità portuali sono obbligate a conformarsi a standard ambientali più severi, incentivando così l'innovazione tecnologica. Altresì, integrando dati provenienti da diverse fonti quali sensori di bordo delle navi e delle infrastrutture portuali (Wang *et al.*, 2023), l'integrazione della tecnologia DTs nei sistemi portuali permette di identificare le fonti di inefficienza energetica e le aree con potenziale riduzione delle emissioni (Agostinelli, 2022). D'altra parte, GHG accounting e DTs forniscono un processo strutturato per misurare e rendicontare le emissioni di gas serra derivanti dalle attività portuali, calcolando l'impatto delle riduzioni della velocità delle navi o dell'uso delle tecnologie di alimentazione a terra, e valutando l'efficacia delle misure implementate per la riduzione delle emissioni, minimizzando l'uso dei motori e dei rimorchiatori abbattendo le emissioni di CO<sub>2</sub> di oltre il 30% (Misra *et al.*, 2017).

Le informazioni prodotte da GHG accounting possono supportare i sistemi di DTs nei porti, migliorando l'efficacia nella gestione delle operazioni e nella riduzione delle emissioni. L'integrazione di dati precisi sulle emissioni di gas serra provenienti dalle attività portuali consente ai DTs di simulare con maggiore accuratezza i flussi operativi e le potenziali aree di inefficienza energetica, ottimizzando così le operazioni (Agostinelli *et al.*, 2022). Ad esempio, utilizzando i dati di GHG accounting, i DTs possono analizzare il consumo di carburante delle navi, prevedere le emissioni durante il processo di ormeggio e manovra, e proporre soluzioni per ridurre l'impatto ambientale (Misra *et al.*, 2017). Le fasi di GHG accounting e le relative informazioni che alimentano i sistemi di DTs nei porti includono: la misurazione delle emissioni, la quantificazione e registrazione delle emissioni, e infine verifica e reporting. Nella prima fase, vengono raccolti i dati riguardanti le fonti di emissioni, come il consumo di carburante delle navi e delle attrezzature portuali (Petticrew e Roberts, 2006). Questi dati forniscono informazioni vitali per i DTs, che utilizzano le misurazioni per simulare e prevedere l'impatto ambientale delle operazioni portuali, ottimizzando i processi operativi come l'ormeggio e la manovra delle navi (Agostinelli *et al.*, 2022). Nella seconda fase, le informazioni sulle emissioni vengono poi aggregate e classificate secondo le normative, come gli Scope 1, 2 e 3 del GHG Protocol (Wang *et al.*, 2023). Questi dati alimentano i DTs, che li utilizzano per identificare le aree di inefficienza energetica e proporre azioni correttive mirate (Eom *et al.*, 2023). Infine, nella terza fase le informazioni verificate sulle

emissioni vengono utilizzate per generare report sulle performance ambientali, che i DTs usano per simulare scenari futuri e testare l'efficacia di nuove tecnologie per la riduzione delle emissioni (Tzachor *et al.*, 2022).

Le normative che richiedono una rendicontazione chiara e una riduzione delle emissioni spingono le autorità portuali a integrare queste tecnologie, incentivando così la loro adozione attraverso un processo regolamentato di monitoraggio e rendicontazione. DTs e GHG accounting attraverso la misurazione e la rendicontazione delle emissioni nei sistemi portuali rappresentano un passo significativo al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030 (Pang *et al.*, 2024) in particolare dell'SDG7. Infatti, le pressioni normative esercitano un doppio effetto, obbligando i porti a implementare sistemi come i DTs e GHG accounting, non solo per conformarsi, ma anche per superare le sfide legate alle emissioni e accelerare il progresso verso l'efficienza energetica. Difatti, l'impiego integrato di GHG accounting e DTs permette di testare e validare nuove tecnologie verdi in un ambiente virtuale prima della loro implementazione pratica accelerando così l'adozione di soluzioni energetiche più sostenibili (Tzachor *et al.*, 2022).

Questo scenario sottolinea l'importanza di un'integrazione efficace tra GHG accounting e DTs, un approccio che potrebbe migliorare significativamente le capacità di monitorare, rendicontare e decidere come creare le condizioni di efficienza tecnica per gli scenari operativi futuri. La teoria istituzionale offre un quadro utile per esaminare come le pressioni normative influenzino le pratiche ambientali nei porti. Le pressioni coercitive, derivanti dall'obbligo di conformità a regolamenti come quelli dell'Organizzazione Marittima Internazionale e dell'Unione Europea, stimolano l'adozione di tecnologie sostenibili e promuovono un cambiamento nella governance portuale, favorendo la collaborazione tra attori pubblici e privati per integrare i DTs e il GHG accounting nei sistemi portuali (Eom *et al.*, 2023). Gli obblighi di misurare e riportare le emissioni di gas serra spingono all'adozione di sistemi di GHG accounting, mentre la gestione efficiente delle operazioni portuali rende essenziale l'integrazione dei DTs per ottimizzare i flussi operativi e ridurre le emissioni. Inoltre, le pressioni normative spingono i porti a adottare tecnologie avanzate per rispondere a sfide ambientali, offrendo vantaggi competitivi e reputazionali. Questi cambiamenti possono trasformare rapidamente le pratiche ambientali portuali (Oliver, 1991). Tuttavia, la frammentazione delle pratiche di decarbonizzazione evidenziata nella letteratura, indica la necessità di un approccio più coordinato e sistemico (Alamouh *et al.*, 2020). La digitalizzazione e le sue nuove applicazioni permettono di facilitare la stima delle emissioni consentendo una maggiore standardizzazione delle attività e un utilizzo più ampio di fonti energetiche rinnovabili in linea

con l'SDG7 (Del Giudice *et al.*, 2022). Difatti la digitalizzazione è considerata come uno strumento essenziale per armonizzare la complessità delle operazioni portuali e la diversità degli attori coinvolti essendo riconosciuta come l'unica in grado di integrare sistemi tecnologici all'avanguardia. L'adozione dei DTs, sebbene promettente, necessita di essere ripensata in un'ottica sistemica, prendendo in esame anche l'architettura informativa fornita da GHG accounting. Tuttavia, persistono sfide significative nell'implementazione integrata di questi sistemi. In particolare, secondo Wang *et al.* (2023), Kurupparachchi *et al.* (2022) e Hofmann e Branding (2019) esse sono evidenti in condizioni di mancanza di sinergie strutturali dei porti e di capacità nell'adottare tecnologie innovative. Queste debolezze possono essere ascritte alle diverse dimensioni dei porti, come anche agli aspetti tecnici delle strutture portuali nelle operazioni di interfaccia nave-porto. Dunque, si evidenzia la necessità di sviluppare soluzioni personalizzate che considerino le specificità operative locali per ogni singolo porto. Inoltre, la crescente privatizzazione delle operazioni portuali potrebbe complicare la cooperazione necessaria per una gestione efficace delle emissioni creando potenziali conflitti di interesse tra obiettivi pubblici e privati. Infine, il monitoraggio continuo e l'adattamento delle strategie ambientali si rivelano essenziali per garantire un progresso sostenibile. La mancanza di strumenti efficaci per la rendicontazione delle performance ambientali rappresenta una barriera significativa. Ne consegue che è essenziale sviluppare un framework sistemico che integri monitoraggio, analisi e misure correttive per integrare le sfide della sostenibilità ambientale nei porti.

La nostra revisione della letteratura si inserisce in un ampio dibattito accademico sulla sostenibilità e l'efficienza operativa portuale. Precedenti studi hanno evidenziato l'importanza delle pratiche di GHG accounting nella misurazione e pianificazione delle strategie di riduzione delle emissioni (Di Vaio e Palladino, 2024; Alzharani *et al.*, 2021). In particolare, Bouman *et al.* (2017) hanno sostenuto che una chiara rendicontazione delle emissioni è fondamentale per raggiungere obiettivi di neutralità climatica. Nonostante il crescente sviluppo della ricerca scientifica sull'implementazione dei DTs, la letteratura esistente si concentra principalmente sull'automazione e sulla movimentazione dei container nei terminal e sui processi operativi e logistici dei porti (Ding *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2023; Karatvuo *et al.*, 2022) dimostrando una carenza di studi che esplorano l'applicazione dei DTs nei punti critici ove si registrano i picchi di massima emissione come le operazioni di ormeggio, disormeggio e manovra nell'interfaccia nave-porto (Di Vaio *et al.*, 2018), trascurando la rendicontazione degli emissioni ascrivibili agli Scope 1 e 2. Inoltre, l'adozione della tecnologia digitale DTs per automatizzare le

operazioni di manovra delle navi potrebbe ridurre significativamente l'errore umano e il rischio di collisione con le banchine e altre attrezzature migliorando così l'affidabilità e la sicurezza delle operazioni. Diversi studi hanno esplorato l'adozione di tecnologie e piattaforme digitali per il monitoraggio e la riduzione delle emissioni nelle operazioni portuali. Uno dei primi studi a focalizzarsi sulle problematiche ambientali nell'interfaccia nave-porto, dalla prospettiva manageriale, è quello di Del Giudice *et al.* (2022), che mette in evidenza le operazioni alla banchina e la necessità di rilevare, misurare e rendicontare le emissioni come parte di un modello di business. In questo contesto, le tecnologie digitali fungono da fattori abilitanti per il raggiungimento dell'SDG7, e la partecipazione multi-stakeholder comprendente armatori, terminalisti e autorità di sistema portuale richiede piattaforme digitali per la condivisione operativa e informativa delle emissioni. Il nostro studio amplia le conoscenze in questo campo esplorando il contributo dei sistemi di accounting, in particolare di GHG accounting, a supporto di sistemi avanzati come i DTs. Il nostro approccio integrato e olistico contribuisce anche ad arricchire i risultati di altri studi. Infatti, Zhang *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2021) trattano separatamente l'adozione di DTs e il calcolo delle emissioni, senza considerare l'utilità della misurazione delle emissioni per i processi decisionali, un aspetto che invece i sistemi di GHG accounting rendono più agevole per i decisori portuali. Cao *et al.* (2025) analizzano la gestione automatizzata dei terminal container adottando un modello di gestione dei dati basato sui DTs e su algoritmi di machine learning. Eom *et al.* (2023) e Agostinelli *et al.* (2022) riconoscono il potenziale dei DTs per ottimizzare le operazioni portuali. Tuttavia, questi studi tralasciano le questioni di GHG accounting. Dunque, il nostro studio rappresenta il primo tentativo di analizzare in modo olistico l'adozione delle tecnologie digitali, specificamente di DTs, supportate da GHG accounting. Questo approccio consentirà ai porti di affrontare le sfide derivanti dall'adozione di fonti energetiche rinnovabili e dalla loro misurazione, nonché dalla rendicontazione a cui le imprese di shipping prestano sempre più attenzione. Un esempio significativo è rappresentato dai sistemi di carbon accounting per i biocarburanti sostenibili, su cui le imprese di trasporto marittimo stanno investendo per analizzare le sfide relative all'intensità di carbonio di tali biocarburanti. Questi sistemi evidenziano l'importanza di una contabilità del carbonio trasparente e basata sulla conoscenza, fondamentale per garantire che la diffusione su larga scala dei biocarburanti sia allineata agli obiettivi climatici (IMO, n.d.).

#### *4.1 Implicazioni teoriche e pratiche*

Questo studio arricchisce la letteratura esistente evidenziando i benefici per i porti derivanti dall'adozione dei DTs integrati con i sistemi di GHG accounting. È evidente la necessità di sviluppare un sistema di rendicontazione delle emissioni focalizzato sulle aree ad alto impatto, come le operazioni di ormeggio, disormeggio e manovra nell'interfaccia nave-porto. La teoria istituzionale fornisce un quadro utile per analizzare come le pressioni normative e la conformità ai regolamenti influenzino le pratiche di sostenibilità ambientale nei porti, incentivando l'adozione di tecnologie sostenibili e favorendo una maggiore collaborazione tra i vari attori coinvolti.

In questo contesto è necessario investire in formazione affinché manager e operatori del settore siano in grado di sfruttare appieno le potenzialità dei DTs e dei sistemi di GHG accounting. In questo modo le realtà portuali possono ottenere significativi vantaggi dall'implementazione di tecnologie avanzate, migliorando la loro legittimità istituzionale lungo l'intera *supply chain*. Vi è inoltre la necessità di adottare un approccio sistemico per sviluppare una rendicontazione delle emissioni focalizzata sulle aree di massima emissione quali le operazioni di ormeggio, disormeggio e manovra nell'interfaccia nave-porto. L'adozione del GHG Protocol nei porti rappresenta un ulteriore passo in avanti per garantire una rendicontazione rigorosa delle emissioni. Misurando e documentando dettagliatamente le emissioni ascrivibili agli Scope 1 e 2 è possibile individuare le aree di inefficienza operativa e implementare strategie per ridurre l'impatto ambientale. In questo scenario, i manager delle Autorità di Sistema Portuale dovrebbero adottare tecnologie avanzate e promuovere partenariati pubblico-privato per combinare risorse finanziarie e competenze, investendo nell'innovazione tecnologica. È fondamentale sviluppare standard comuni, migliorare il monitoraggio e la rendicontazione delle emissioni. I manager portuali devono integrare il GHG accounting nei DTs per la pianificazione strategica delle operazioni portuali, considerandolo essenziale per raggiungere la neutralità climatica e contribuire proattivamente agli obiettivi di sviluppo sostenibile, in particolare all'SDG7.

#### *4.2 Limitazioni dello studio*

Questo studio presenta alcune limitazioni. Innanzitutto, la revisione della letteratura è stata condotta solo su articoli in lingua inglese selezionati da Scopus e GS. Inoltre, la combinazione delle diverse parole chiave nelle stringhe di ricerca potrebbe non aver coperto tutte le possibili combinazioni

escludendo dei contributi significativi (Di Vaio *et al.*, 2024). Inoltre, si sottolinea che le informazioni ottenibili da Scopus sono aggiornate con una frequenza più elevata rispetto ad altri database (Valenzuela-Fernandez *et al.*, 2019). Di conseguenza, alcuni articoli rilevanti potrebbero non essere stati inclusi nel nostro data collection. Infine, è fondamentale considerare le diverse dimensioni dei porti e gli aspetti tecnici delle strutture portuali, in particolare per quanto riguarda le operazioni di interfaccia nave-porto, al fine di implementare in modo efficace la tecnologia dei DTs supportata GHG accounting. Pertanto, è essenziale sviluppare soluzioni personalizzate che tengano conto delle specificità operative locali di ciascun porto.

## 5. Conclusioni

Questo studio, basato sulla revisione sistematica della letteratura, evidenzia l'importanza crescente per i porti di integrare soluzioni innovative per la sostenibilità ambientale, con un focus specifico sull'uso delle tecnologie digitali come i DTs. Un elemento centrale emerso da questa ricerca è l'importanza di un approccio integrato tra GHG accounting e DTs. La misurazione e la rendicontazione delle emissioni, unite alla simulazione dei flussi operativi tramite i DTs, permettono di identificare e correggere le inefficienze energetiche, migliorando le performance operative e contribuendo in modo sostanziale alla riduzione dell'impatto ambientale delle attività portuali. Le informazioni fornite dal GHG accounting, una volta integrate nei sistemi di DTs, permettono di ottimizzare le operazioni portuali e garantire un monitoraggio continuo delle emissioni, basato su un processo strutturato di misurazione, quantificazione e verifica. Inoltre, la digitalizzazione delle operazioni portuali, mediante l'adozione di DTs, facilita la gestione integrata e standardizzata delle emissioni, rendendo i porti più resilienti alle politiche globali di decarbonizzazione.

Nonostante questi progressi, persistono sfide significative, come la frammentazione delle pratiche di riduzione delle emissioni e la mancanza di sinergie tra i vari attori coinvolti nella gestione portuale. La variabilità delle dimensioni e delle specificità operative dei porti richiede soluzioni personalizzate, in grado di affrontare le diversità strutturali e tecniche delle infrastrutture portuali. Inoltre, la crescente privatizzazione delle operazioni portuali potrebbe ostacolare la cooperazione necessaria per una gestione efficace delle emissioni, creando potenziali conflitti di interesse tra gli obiettivi pubblici e quelli privati. Per superare queste sfide, è fondamentale sviluppare un framework sistemico che integri monitoraggio, analisi e misure correttive.

Tale approccio potrebbe facilitare l'integrazione delle sfide ambientali nei porti, promuovendo un monitoraggio continuo e l'adattamento delle strategie ambientali. In questo contesto, il nostro studio contribuisce ad arricchire la letteratura esistente, mettendo in luce il potenziale dei DTs e del GHG accounting come strumenti complementari per ottimizzare le operazioni portuali e ridurre le emissioni.

In conclusione, l'integrazione di tecnologie avanzate come i DTs e i sistemi di GHG accounting rappresenta un passo fondamentale verso la sostenibilità portuale. Tuttavia, il successo di queste soluzioni dipende dalla capacità di affrontare le sfide legate all'adozione delle tecnologie e alla coordinazione tra i vari attori coinvolti, nonché dalla necessità di sviluppare approcci personalizzati che rispondano alle specificità operative di ciascun porto. La cooperazione tra pubblico e privato, unita a un quadro normativo favorevole, può essere vitale per realizzare una gestione sostenibile e resiliente delle operazioni portuali nell'interfaccia nave-porto, accelerando così il raggiungimento degli obiettivi climatici globali.

### **Ringraziamenti.**

Gli autori desiderano ringraziare l'E-in-C e i revisori per aver gestito l'articolo, fornendo commenti e suggerimenti costruttivi che hanno portato al miglioramento dell'articolo. Uno speciale ringraziamento va al Prof. L. Marchi. Questo lavoro è un outcome del "BlueShipping&Cruise Lab" (BSCLab), Dipartimento di Giurisprudenza, Università di Napoli Parthenope, Italia.

### **Finanziamento.**

Questo lavoro è stato finanziato da Ministero dell'Università e della Ricerca, DM n. 737/2021 progetto di ricerca dal titolo 'Transizione digitale per Modelli di Business Sostenibili e Resilienti nell'interfaccia nave-porto verso l'Agenda 2030' – P.I. Prof. Assunta Di Vaio.

### **Bibliografia**

- Agostinelli, S. (2022), "Digital twin model for zero-energy districts: the case study of Anzio port, Italy", in *The Sustainable City XVI WIT Transactions on Ecology and Environment* (S. Hernandez and J.L. Miralles i Garcia Eds.), 260, pp. 357-363.
- Agostinelli, S., Cumo, F., Nezhad, M. M., Orsini, G., Piras, G. (2022), Renewable energy system controlled by open-source tools and digital twin model: zero energy port area in Italy, *Energies*, 15(5), 1817, pp. 1-22.

- Alamouh, A. S., Ballini, F., Ölçer, A. I. (2020), Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review, *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111508, pp. 1-21.
- Alamouh, A. S., Ölçer, A. I., Ballini, F. (2022), Port greenhouse gas emission reduction: Port and public authorities' implementation schemes, *Research in Transportation Business & Management*, 43, 100708, pp. 1-18.
- Allini, A., Giner, B., Caldarelli, A. (2018), Opening the black box of accounting for greenhouse gas emissions: The different views of institutional bodies and firms, *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 2195-2205.
- Alvino F., Di Vaio A., Palladino R. (2021), Port governance e non-financial reporting nella prospettiva degli SDGs: evidenze dal contesto italiano, in *Porti. Storia, economia, amministrazione del sistema portuale italiano* (Natalini A. e Sognamiglio S. Eds.), pp. 271-290, Collana Percorsi. Il Mulino Ed., Milano.
- Alzahrani, A., Petri, I., Rezgui, Y., Ghoroghi, A. (2021), Decarbonisation of seaports: A review and directions for future research, *Energy Strategy Reviews*, 38, 100727, pp. 1-18.
- Antunes, J., Barata, J., da Cunha, P. R., Estima, J., Tavares, J. (2024), A Reference Architecture for Dry Port Digital Twins: Preliminary Assessment Using ArchiMate. In *International Conference on Research Challenges in Information Science* (pp. 131-145). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Attaran, M., Celik, B. G. (2023), Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, *Decision Analytics Journal*, 6, 100165, pp. 1-10.
- Bebbington, J., Unerman, J. (2018), Achieving the United Nations Sustainable Development Goals: an enabling role for accounting research, *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 31(1), pp. 2-24.
- Bhatia, P., Ranganathan, J. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition)*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. ISBN: 1-56973-568-9. Available through: <http://www.wri.org/publication/greenhouse-gas-protocol>.
- Boell, S. K., Cecez-Kecmanovic, D. (2014), A hermeneutic approach for conducting literature reviews and literature searches, *Communications of the Association for Information Systems*, 34(12), pp. 257-286.
- Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., Sampedro, G. A. (2023), Exploring Digital Twin-Based Fault Monitoring: Challenges and Opportunities, *Sensors*, 23(16), 7087, pp. 1-17.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., Strømman, A. H. (2017), State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, pp. 408-421.
- Brundtland, G. H. (1987), Our common future—Call for action. *Environmental conservation*, 14(4), pp. 291-294.
- Cao, Y., Zeng, Q., Haralambides, H. *et al.* (2025), Digital twins: digitalization of automated container terminals in seaports. *Marit Econ Logist*.
- Caprani, L. (2016), Five ways the sustainable development goals are better than the millennium development goals and why every educationalist should care, *Management in Education*, 30(3), pp. 102-104.
- Cumo, F. (2021), Digital twin for critical infrastructures: The Ventotene Island port case study, Italy, *Building Information Modelling in Design, Construction and Operations IV* (J. Casares, A. Galiano Garrigós Eds.), 205, pp. 217-247.
- Del Giudice, M., Di Vaio, A., Hassan, R., Palladino, R. (2022), Digitalization and new technologies for sustainable business models at the ship–port interface: A bibliometric analysis, *Maritime Policy & Management*, 49(3), pp. 410-446.

- Di Vaio, A., Palladino, S. (2024). Exploring digital twin and GHG accounting in European Ports: An empirical perspective. In BEING SEA-EU Abstract Booklet. (pp. 269-269). MLT.
- Di Vaio, A., Trujillo, L., Medda, F. R. (2011), An analysis of the efficiency of Italian cruise terminals. International journal of transport economics, *Rivista Internazionale di Economia dei Trasporti*, XXXVIII, 1, pp. 1000-1018.
- Di Vaio, A., Varriale, L. (2019), Port Community System e Smart Port per il miglioramento della performance: il caso del sistema portuale di Amburgo. In (Mancini D. Eds) Aziende come ecosistemi intelligenti. Profili informativi, gestionali e tecnologici (pp. 136-156). FrancoAngeli, Milano, Italia.
- Di Vaio, A., Varriale, L., Alvino, F. (2018), Key performance indicators for developing environmentally sustainable and energy efficient ports: Evidence from Italy, *Energy Policy*, 122, 229-240.
- Di Vaio, A., Zaffar, A., Chhabra, M., Balsalobre-Lorente, D. (2024), Carbon accounting and integrated reporting for net-zero business models towards sustainable development: A systematic literature review, *Business Strategy and the Environment*, 33(7), pp. 7216-7240.
- DiMaggio, P. J., Powell, W. W. (1983), The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields, *American Sociological Review*, 48(2), pp. 147-160.
- Ding, Y., Zhang, Z., Chen, K., Ding, H., Voss, S., Heilig, L., ... Chen, X. (2023), Real-Time Monitoring and Optimal Resource Allocation for Automated Container Terminals: A Digital Twin Application at the Yangshan Port, *Journal of Advanced Transportation*, 2023(1), 6909801, pp. 1-12.
- Dinh, G. H., Pham, H. T., Nguyen, L. C., Dang, H. Q., Pham, N. D. K. (2024), Leveraging Artificial Intelligence to Enhance Port Operation Efficiency, *Polish Maritime Research*, 31(2), pp. 140-155.
- Du, X., Liang, C., Zhao, N., Xuan, B. (2023), Container Terminal Digital Twin Yard System Construction, *Processes*, 11(7), 2223, pp. 1-14.
- Eom, J. O., Yoon, J. H., Yeon, J. H., Kim, S. W. (2023), Port digital twin development for decarbonization: A case study using the Pusan Newport International Terminal, *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1777, pp. 1-26.
- Fonseca, Í. A., Gaspar, H. M. (2021), Challenges when creating a cohesive digital twin ship: a data modelling perspective, *Ship Technology Research*, 68(2), pp. 70-83.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C. H. (2023), A digital twin-based approach for optimizing operation energy consumption at automated container terminals, *Journal of Cleaner Production*, 385, 135782, pp. 1-13.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C. H., Sha, M. (2024), A digital twin-based decision support approach for AGV scheduling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 130, 107687, pp. 1-21.
- Garzella S., Capurro R. (2024), "Sostenibilità sostenibile" e creazione di valore: elementi di pianificazione, gestione, controllo e rendicontazione, *Management Control*, n. 2, pp. 5-14. DOI: 10.3280/MACO2024-002001.
- Gillenwater, M. (2022), Examining the impact of GHG accounting principles, *Carbon Management*, 13(1), pp. 550-553.
- Gillenwater, M. (2023), What is Greenhouse Gas Accounting? Turning Away from LCA, 23(1), GHG Management Institute. Available at: <https://ghginstitute.org/wp-content/uploads/2023/12/What-is-GHG-Accounting-Turning-Away-from-LCA-Installation-N-1-23.12.19.pdf>.

- Greenhouse Gas Protocol Initiative (2015), GHG Protocol Corporate Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. Available at: <https://ghgprotocol.org/>
- Grievies, M. (2014), Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, *White paper*, 1, pp. 1-7.
- Grievies, M. W. (2005), Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises, *International Journal of Product Development*, 2(1-2), pp. 71-84.
- Gusenbauer, M., Haddaway, N. R. (2020), Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources, *Research Synthesis Methods*, 11(2), PP. 181-217.
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022), PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis, *Campbell Systematic Reviews*, 18, e1230.
- Hardies, K., Ohlrogge, F., Mentens, J., Vandennieuwenhuysen, J. (2023), A guide for accounting researchers to conduct and report systematic literature reviews, *Behavioral Research in Accounting*, 36(1), pp. 1-23.
- Hiebl, M.R.W. (2023), Literature reviews of qualitative accounting research: challenges and opportunities, *Qualitative Research in Accounting & Management*, 20(3), pp. 309-336.
- Hofmann, W., Branding, F. (2019), Implementation of an IoT-and cloud-based digital twin for real-time decision support in port operations. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), pp. 2104-2109.
- International Chamber of Shipping (2019). Shipping and the Environment: A Guide for the Shipping Industry. Available at: <https://www.ics-shipping.org/>
- International Maritime Organization (2020). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Available at: [www.imo.org](http://www.imo.org).
- International Maritime Organization (IMO) (n.d.). Future Fuels and Technology Project (FFT Project). International Maritime Organization. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Future-Fuels-And-Technology.aspx>.
- Issa Zadeh, S. B., López Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., Fernández-Sánchez, G., Garay-Rondero, C. L. (2023), Scope of the literature on efforts to reduce the carbon footprint of seaports, *Sustainability*, 15(11), 8558, pp. 1-16.
- Jesson, J. K., Lacey, F. M., Pine, S. (2011), *Doing Your Literature Review: Traditional and Systematic Techniques*. Sage Publications.
- Jiang, Z., Guo, Y., Wang, Z. (2021), Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT, *Journal of Industrial Information Integration*, 22, 100196, pp. 1-8.
- Jusoha, L. S., Hashim, H., Lima, J. S., Abu, N. N. (2017), Framework for greenhouse gas accounting towards green port, *Chemical Engineering*, 56, pp. 685-690.
- Kaklis, D., Varlamis, I., Giannakopoulos, G., Varelas, T. J., Spyropoulos, C. D. (2023), Enabling digital twins in the maritime sector through the lens of AI and industry 4.0, *International Journal of Information Management Data Insights*, 3(2), 100178, pp. 1-17.
- Karatvuo, H., Linde, M., Dolatshah, A., Mortensen, S. (2022), Improved Climate Change Adaptation in Port of Brisbane Using a Digital Twin Cloud-Based Modelling Approach. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 85857, p. V001T01A001). American Society of Mechanical Engineers.
- Klar, R., Fredriksson, A., Angelakis, V. (2023), Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience, *IEEE Access*, 11, pp. 71777-71799.

- Künz, A., Rosmann, S., Loria, E., Pirker, J. (2022), The potential of augmented reality for digital twins: A literature review. In 2022 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces (VR) (pp. 389-398).
- Kurupparachchi, P., Rea, S., McGibney, A. (2022), An architecture for composite digital twin enabling collaborative digital ecosystems, *2022 IEEE 25th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Hangzhou, China, pp. 980-985.
- Magliacani, M. (2023), How the sustainable development goals challenge public management. Action research on the cultural heritage of an Italian smart city, *Journal of Management and Governance*, 27(3), pp. 987-1015.
- Mancini D., Lavorato D., Piedepalumbo P. (2023), Il contributo di Management Control alla ricerca su tecnologie digitali e sostenibilità, *Management Control*, n. 2, pp. 5-18. DOI: 10.3280/MACO2023-002001
- Massaro, M., Dumay, J., Guthrie, J. (2016), On the shoulders of giants: undertaking a structured literature review in accounting, *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 29(5), pp. 767-801.
- Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D. V., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., ... Nguyen, H. X. (2022), Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4), pp. 2255-2291.
- Misra, A., Panchabikesan, K., Gowrishankar, S. K., Ayyasamy, E., Ramalingam, V. (2017), GHG emission accounting and mitigation strategies to reduce the carbon footprint in conventional port activities—a case of the Port of Chennai, *Carbon Management*, 8(1), pp. 45-56.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. (2009), Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement, *Annals of Internal Medicine*, 151, pp. 264-269.
- Mongeon, P., Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis, *Scientometrics*, 106, pp. 213-228.
- Nespor, S. (2016), La lunga marcia per un accordo globale sul clima: dal protocollo di Kyoto all'accordo di Parigi, *Rivista Trimestrale di Diritto Pubblico*, 1, pp. 81-121
- Neugebauer, J., Heilig, L., Voß, S. (2024), Digital twins in the context of seaports and terminal facilities, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36, pp. 821-917.
- Oliveira, L., Castro, M., Ramos, R., Santos, J., Silva, J., Dias, L. (2022), Digital twin for monitoring containerized hazmat cargo in port areas, *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, pp. 1-4.
- Oliver, C. (1991), Strategic responses to institutional processes, *Academy of Management Review*, 16(1), pp. 145-179.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021), The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, *BMJ*, 372.
- Pang, Y., He, T., Liu, S., Zhu, X., Lee, C. (2024), Triboelectric Nanogenerator-Enabled Digital Twins in Civil Engineering Infrastructure 4.0: A Comprehensive Review. *Advanced Science*, 11, 2306574, pp. 1-29.
- Petticrew, M., Roberts, H. (2006), *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell.
- Radanliev, P., De Roure, D., Nicolescu, R., Huth, M., Santos, O. (2022), Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 6(1), pp. 171-185.

- Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T. (2020), Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, *IEEE access*, 8, pp. 21980-22012.
- Regolamento (UE) 2018/842 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, relativo alle riduzioni annuali vincolanti delle emissioni di gas serra a carico degli Stati membri nel periodo 2021-2030. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0842>
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. (2021), Digital twin paradigm: A systematic literature review, *Computers in Industry*, 130, 103469, pp. 1-23.
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., Wang, L. (2010), Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *Technology area*, 11, pp. 1-32.
- Snyder, H. (2019), Literature review as a research methodology: An overview and guidelines, *Journal of Business Research*, 104, pp. 333-339.
- Song, D. P. (2024), A Literature Review of Seaport Decarbonisation: Solution Measures and Roadmap to Net Zero, *Sustainability*, 16(4), 1620, pp. 1-32.
- Stoumpos, S., Theotokatos, G., Mavrelou, C., Boulougouris, E. (2020), Towards marine dual fuel engines digital twins—integrated modelling of thermodynamic processes and control system functions, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 200, pp. 1-29.
- Sun, T. J., Bhowmik, S. (2023), CO2 Pipeline Integrity Management: A Digital Twin Approach. In Offshore Technology Conference (p. D011S010R004). OTC.
- Sundarasan, S., Rajagopalan, U., Alsmady, A. A. (2024), Environmental Accounting and Sustainability: A Meta-Synthesis, *Sustainability*, 16(21), 9341, pp. 1-16.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. (2018), Digital Twin in industry: State-of-the-art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 2405-2415.
- Torraco, R. J. (2005), Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples, *Human Resource Development Review*, 4(3), pp. 356-367.
- Toygar, A. (2024), Sustainability in the Maritime Industry: Integration of Digital Twin and Autonomous Control. In Strategic Innovations for Dynamic Supply Chains (pp. 31-49). IGI Global.
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P. (2003), Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review, *British Journal of Management*, 14(3), pp. 207-222.
- Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., Acuto, M. (2022), Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals, *Nature Sustainability*, 5(10), pp. 822-829.
- UN (2019), The Katowice climate package: Making the Paris Agreement Work For All. Building trust through transparency, United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/katowice-climate-package#Building-trust-through-transparency> (accessed 27 July 2024).
- Valenzuela-Fernandez, L., Merigó, J. M., Lichtenthal, J. D., Nicolas, C. (2019). A bibliometric analysis of the first 25 years of the Journal of Business-to-Business Marketing, *Journal of Business-to-Business Marketing*, 26(1), pp. 75-94.
- von Lukas, U. F. (2023), Promoting Digital Twins of the Baltic Sea, *INFOS 2023-Informatikunterricht zwischen Aktualität und Zeitlosigkeit* (pp. 43-53). Gesellschaft für Informatik eV.
- Wang, B., Liu, Q., Wang, L., Chen, Y., Wang, J. (2023), A review of the port carbon emission sources and related emission reduction technical measures, *Environmental Pollution*, 320, 121000, pp. 1-26.

- Wang, K., Hu, Q., Zhou, M., Zun, Z., Qian, X. (2021), Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports, *Case Studies on Transport Policy*, 9(3), pp. 1298-1312.
- Webster, J., Watson, R. T. (2002). Analizzare il passato per preparare il futuro: scrivere una revisione della letteratura. *MIS Quarterly*, 26(2), xiii-xxiii.
- Weißer, T., Saßmannshausen, T., Ohrndorf, D., Burggräf, P., Wagner, J. (2020), A clustering approach for topic filtering within systematic literature reviews. *MethodsX*, 7, 100831, pp. 1-10.
- World Bank (2007), Port Reform Tool Kit, 2<sup>nd</sup> Edition, Available at: <https://www.ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/Portoolkit/Toolkit/index.html>.
- World Business Council for Sustainable Developments (2004), A Corporate Accounting and Reporting Standard, Washington, USA. Available at: <https://archive.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy/Climate/Resources/A-corporate-reporting-and-accounting-standard-revised-edition>.
- World Resources Institute (2011), GreenHouseGas Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Available at: <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol-corporate-value-chain-scope-3-accounting-and-reporting-standard>.
- Yang, A., Liu, Y., Xin, C., Chen, Q., Wang, L. (2024), Towards intuitive visualisation goals for the operation optimisation of automated container terminal based on digital twin technology, *Maritime Policy & Management*, 51(4), pp. 631-652.
- Yang, W., Bao, X., Zheng, Y., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, Z., Li, L. (2024), A digital twin framework for large comprehensive ports and a case study of Qingdao Port, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(11), pp. 5571-5588.
- Yao, H., Wang, D., Su, M., Qi, Y. (2021), Application of digital twins in port system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1846, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Yao, J. F., Yang, Y., Wang, X. C., Zhang, X. P. (2023), Systematic review of digital twin technology and applications, *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 6(10), pp. 1-20.
- Yu, L. I., Daofang, C. H. A. N. G., Yinping, G. A. O., Qiang, L. I. N. G. (2023), Multi-AGV dynamic scheduling of automated container terminal based on digital twin, *Computer Integrated Manufacturing System*, 29(12), pp. 4175-4190.
- Yu, W., Patros, P., Young, B., Klinac, E., Walmsley, T. G. (2022), Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112407, pp. 1-14.
- Zhang, H., Li, G., Hatledal, L. I., Chu, Y., Ellefsen, A., Han, P., ... Hildre, H. P. (2022), A digital twin of the research vessel gunnerus for lifecycle services: Outlining key technologies, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 30(3), pp. 6-19.
- Zhen, L., Zhuge, D., Murong, L., Yan, R., Wang, S. (2019), Operation management of green ports and shipping networks: overview and research opportunities, *Frontiers of Engineering Management*, 6(2), pp. 152-162.
- Zhou, C., Xu, J., Miller-Hooks, E., Zhou, W., Chen, C. H., Lee, L. H., ... Li, H. (2021), Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port, *Decision Support Systems*, 143, 113496, pp. 1-14.
- Zhou, Y., Fu, Z., Zhang, J., Li, W., Gao, C. (2022), A digital twin-based operation status monitoring system for port cranes, *Sensors*, 22(9), 3216, pp. 1-17.