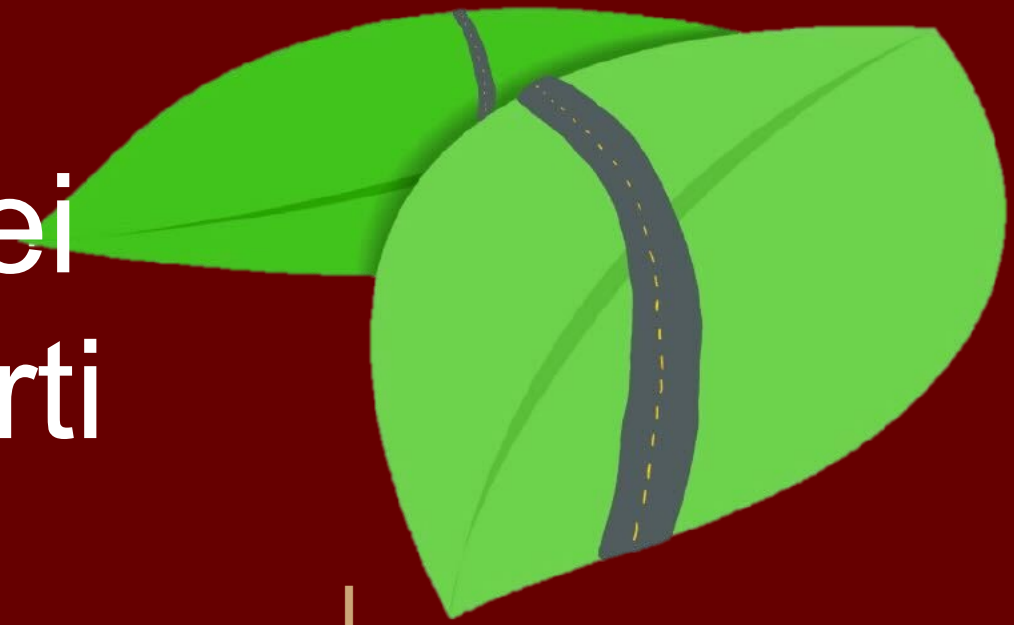
L’IA nei trasporti



Cathy Wu

Professoressa associata | MIT LIDS, CEE e IDSS

Letture preliminari

- Panoramica del settore dei trasporti rispetto ai cambiamenti climatici
  - Jaramillo, Paulina, et al. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of *Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Chapter 10: Transport). IPCC, 2023. (IPCC Executive Summary)*
- L'IA per i trasporti
  - Transportation Research Board Executive Committee, Transforming Transportation: *Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation . Washington, D.C.: National Academies Press, 2026. doi: 10.17226/29350. (PDF)*
- L'IA per il clima (focus sui trasporti)
  - Sandalow, David B. et al., Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Chapter 6: Road Transport), 2nd Ed. Academic Commons, 2024. (PDF)
  - D. Rolnick et al., "Tackling climate change with machine learning" (Section 2: Transportation), Jun. 2019. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2

Obiettivi di apprendimento

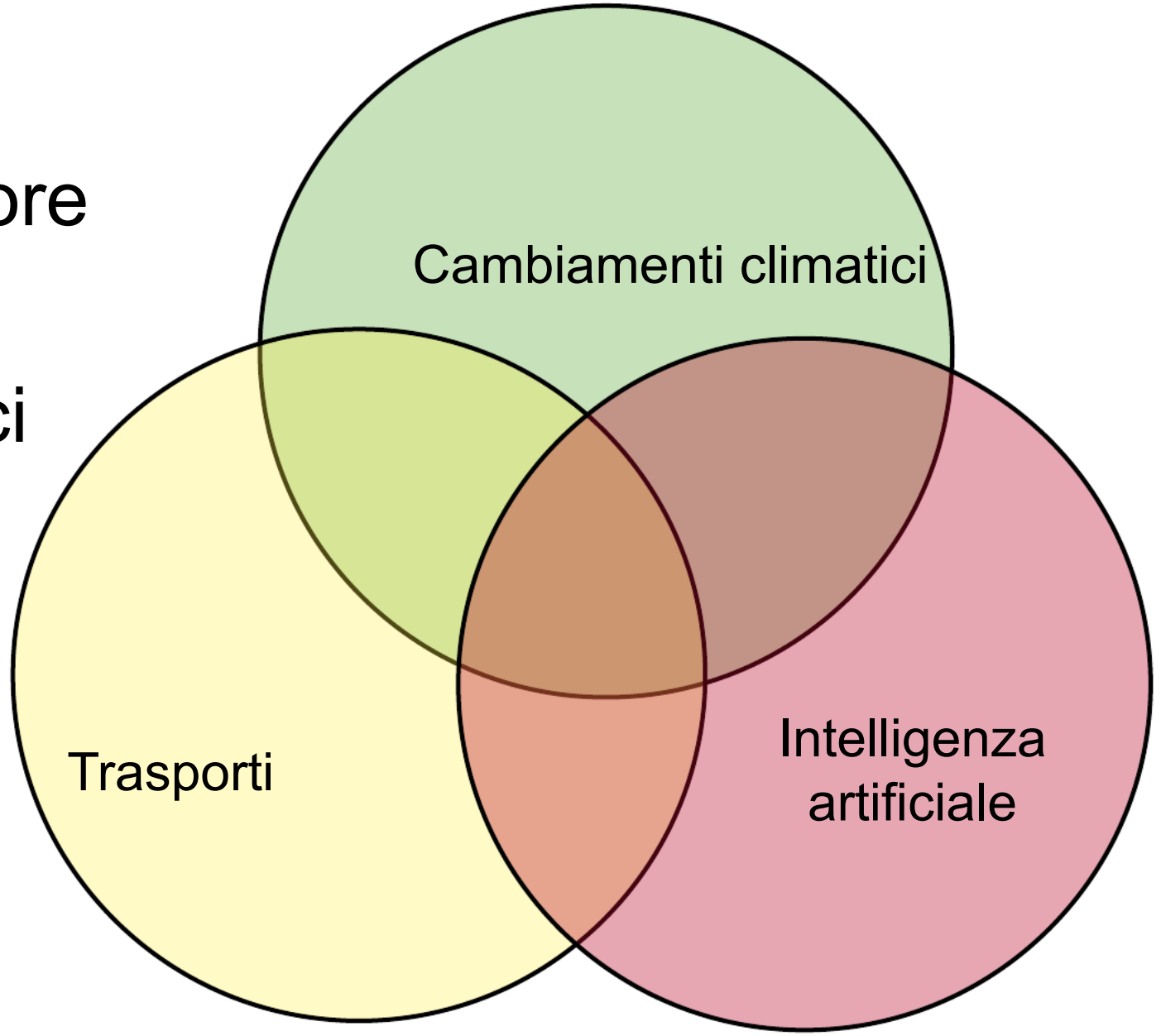
La lezione è pensata per approfondire le seguenti domande:

- Perché i trasporti sono difficili da decarbonizzare?
- Quali interventi sono importanti per la mitigazione?
- Dove l’IA aiuta davvero, e dove è una distrazione?
- Quali sono i rischi etici e di equità delle strategie di mitigazione?

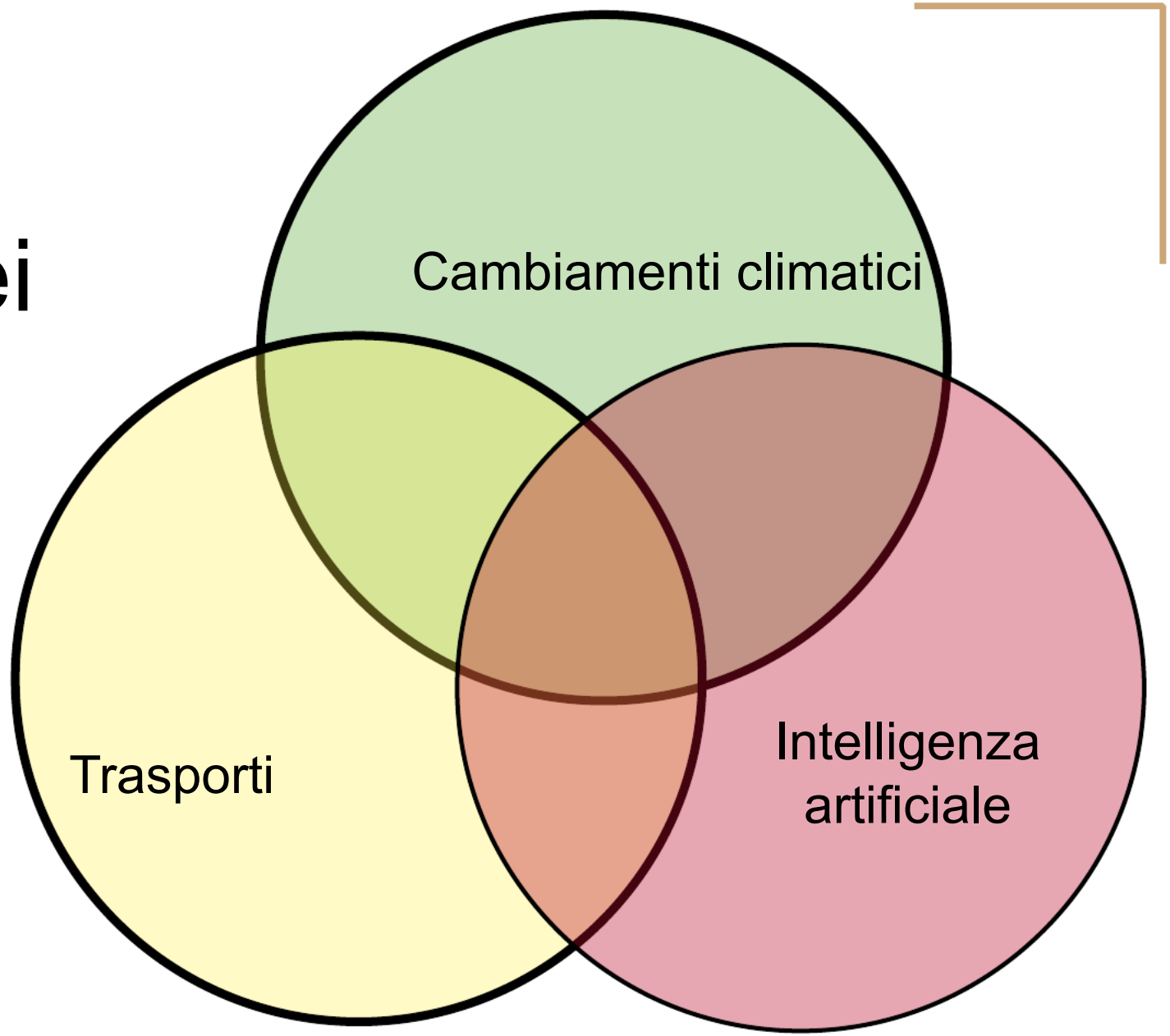
Indice

- Panoramica del settore
  - Emissioni dei trasporti: quadro e obiettivi
  - Perché i trasporti sono difficili da decarbonizzare
  - Quadro di decarbonizzazione
  - Panoramica dell'IA nei trasporti
  - L'IA per la mitigazione dei cambiamenti climatici nei trasporti
- Approfondimento
  - Migliorare: l'IA per l'elettrificazione
  - Spostare: l'IA per il cambio modale
  - Migliorare: l'IA per l'efficienza dei trasporti
- Considerazioni finali
  - Sintesi, punti di accesso e prossimi passi

Panoramica del settore Trasporti, cambiamenti climatici e IA



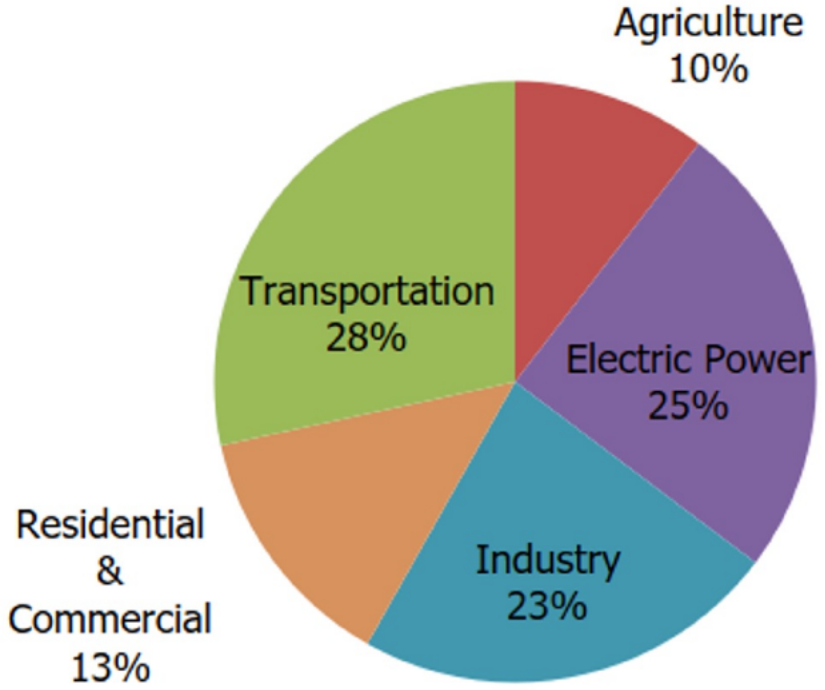
Emissioni dei trasporti: quadro e obiettivi



Stati Uniti: quadro e obiettivi sui gas serra

- Obiettivi dell'Accordo di Parigi [1]
  - Riduzione del 45% rispetto al 2010 entro il 2030
  - Zero netto entro il 2050
- Stati Uniti [2]
  - Picco nazionale delle emissioni nel 2005
  - Obiettivo: −50-52% rispetto al 2005 entro il 2030
  - 2025: emissioni del 18% sotto il 2005.
- I trasporti sono il primo settore per emissioni di gas serra negli USA [3]

Emissioni totali di gas serra degli USA per settore economico nel 2022



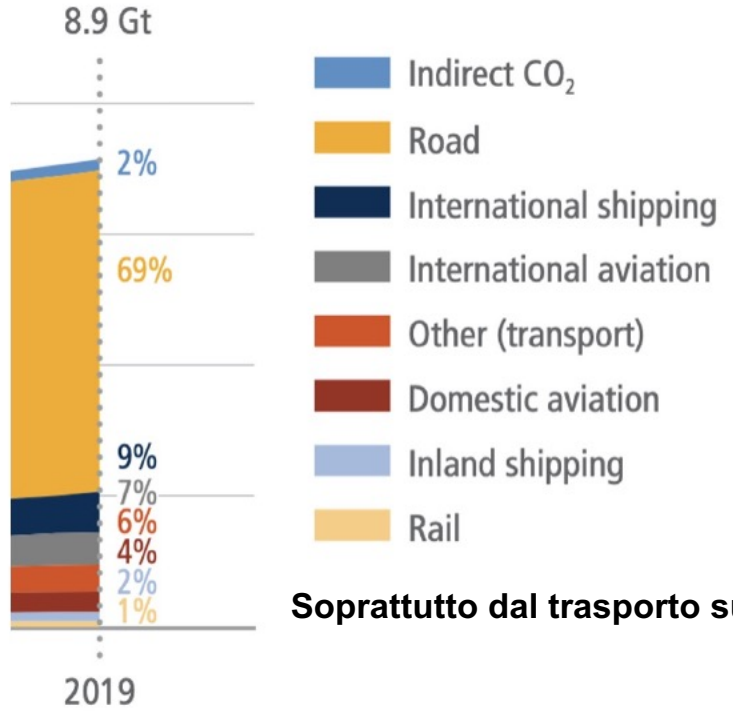
Fonte: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks, US EPA, 2026.

[1] Rogelj, J., D. et al, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 93-174, doi:10.1017/9781009157940.004.
[2] U.S. Department of State. (2021). The United States of America's Nationally Determined Contribution: Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target. Submitted to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in 2021.
[3] "Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks." US EPA, 10 June 2026, url .

Contributo del settore dei trasporti ai cambiamenti climatici



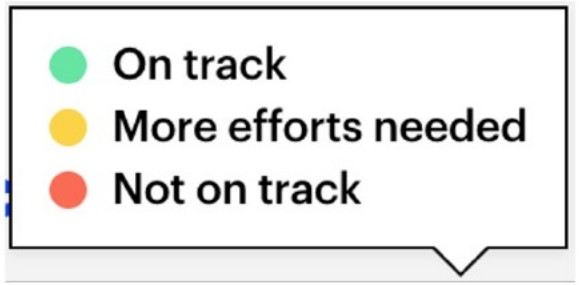
23% delle emissioni globali di CO_2 legate all'energia, in crescita



Soprattutto dal trasporto su strada

Jaramillo, P., et al., 2022: Transport. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926.012

Come stiamo andando?



Tracking Transport

Not on track

In 2022, the rebound in passenger and cargo transport activity following the coronavirus (Covid-19) pandemic led to a 3% increase in transport CO_2 emissions compared to the previous year. Transport emissions grew at an annual average rate of 1.7% from 1990 to 2022, faster than any other end-use sector except for industry (which also grew at around 1.7%). To get on track with the Net Zero Emissions (NZE) by 2050 Scenario, CO_2 emissions from the transport sector must fall by more than 3% per year to 2030. Strong regulations and fiscal incentives, as well as considerable investment in infrastructure to enable low- and zero-emission vehicle operations, will be needed to achieve these emissions reductions.

- **Transport**
- **Cars and Vans**
- **Trucks and Buses**
- **Rail**
- **Aviation**
- **International Shipping**
- **Electric Vehicles**

Vedi: rapporto 2026

Tracking Transport. International Energy Agency (IEA), 2023

Emissioni collegate ai trasporti (le definizioni contano)

- «Settore dei trasporti» = emissioni operative
  - Emissioni di gas serra allo scarico
- Escluse: emissioni collegate ai trasporti, incluso il settore industriale (emissioni incorporate)
  - Fornitura di carburante ed elettricità: estrazione/raffinazione del petrolio, produzione di idrogeno, generazione elettrica.
  - Ciclo di vita dei veicoli: produzione, batterie, manutenzione, smaltimento/riciclo.
  - Ciclo di vita delle infrastrutture: strade, ponti, ferrovie, aeroporti, porti, cemento, asfalto, acciaio.
  - Effetti dell'uso del suolo: dispersione urbana, parcheggi, traffico indotto, spostamenti più lunghi.
  - Effetti del digitale/dell'automazione: calcolo, sensori, data center, riposizionamento a vuoto, traffico indotto.

Perché i trasporti sono difficili da decarbonizzare

Numerosi meccanismi di inerzia e resistenza:

- **La domanda cresce con reddito, urbanizzazione ed e-commerce;**
- **Gli spostamenti dipendono da uso del suolo, abitazioni, lavoro e reti logistiche**
- **Gli asset si rinnovano lentamente (decenni): veicoli, strade, depositi, porti, colonnine, reti**
- **Le decisioni sono frammentate tra famiglie, imprese, città, utility e governi**
- **Benefici e danni sono distribuiti in modo diseguale**
- **I guadagni di efficienza possono tradursi in più viaggi, più km o tragitti più lunghi (paradosso di Jevons)**

I diversi sistemi di trasporto hanno strutture decisionali diverse:

Fattore	**Trasporto passeggeri**	**Merci / trasporto pesante**
Collo di bottiglia principale	Uso del suolo + opzioni di mobilità → costo/comodità → comportamento	Densità energetica + logistica → costo operativo
Struttura decisionale	Miliardi di famiglie e viaggiatori	Meno imprese, flotte, spedizionieri, vettori, porti
Percorso di elettrificazione	Più facile per i veicoli leggeri	Più difficile per il pesante e la lunga percorrenza
Rischio di domanda indotta	Viaggi più economici/facili → più km percorsi	Logistica/beni più economici → più merci

La decarbonizzazione non è l’unico obiettivo (multi-obiettivo)

Riflettete: questi obiettivi sono in competizione o complementari? Quanto possono allinearsi?

Obiettivi dei trasporti, in ordine sparso:

- Decarbonizzazione
- Accesso
- Accessibilità economica
- Mobilità
- Sicurezza stradale
- Efficienza / costo
- Salute pubblica
- Comfort / vivibilità
- Qualità dell’aria
- Sicurezza pubblica
- Privacy
- Resilienza
- Sicurezza energetica
- Economia locale

Quadri di decarbonizzazione

Lente 1: quadro Evitare-Spostare-Migliorare (ASI)

Evitare: ridurre i km percorsi

- urbanistica compatta,
- telelavoro,
- concatenamento dei viaggi,
- riforma della sosta,
- congestion pricing,
- consolidamento delle merci.

Spostare: trasferire i viaggi dai modi più emissivi a quelli meno emissivi

- pianificazione multimodale e navigazione (a piedi, bici, treno, trasporto pubblico),
- progettazione di strade complete,
- trasporto intermodale,
- priorità ai veicoli ad alta occupazione,
- mobilità come servizio (MaaS).

Migliorare: ridurre le emissioni per chilometro

- elettrificazione,
- veicoli efficienti,
- guida ecologica e anti-minimo,
- gestione del traffico,
- programmi di rottamazione dei veicoli inquinanti,
- carburanti più puliti e a basse emissioni.

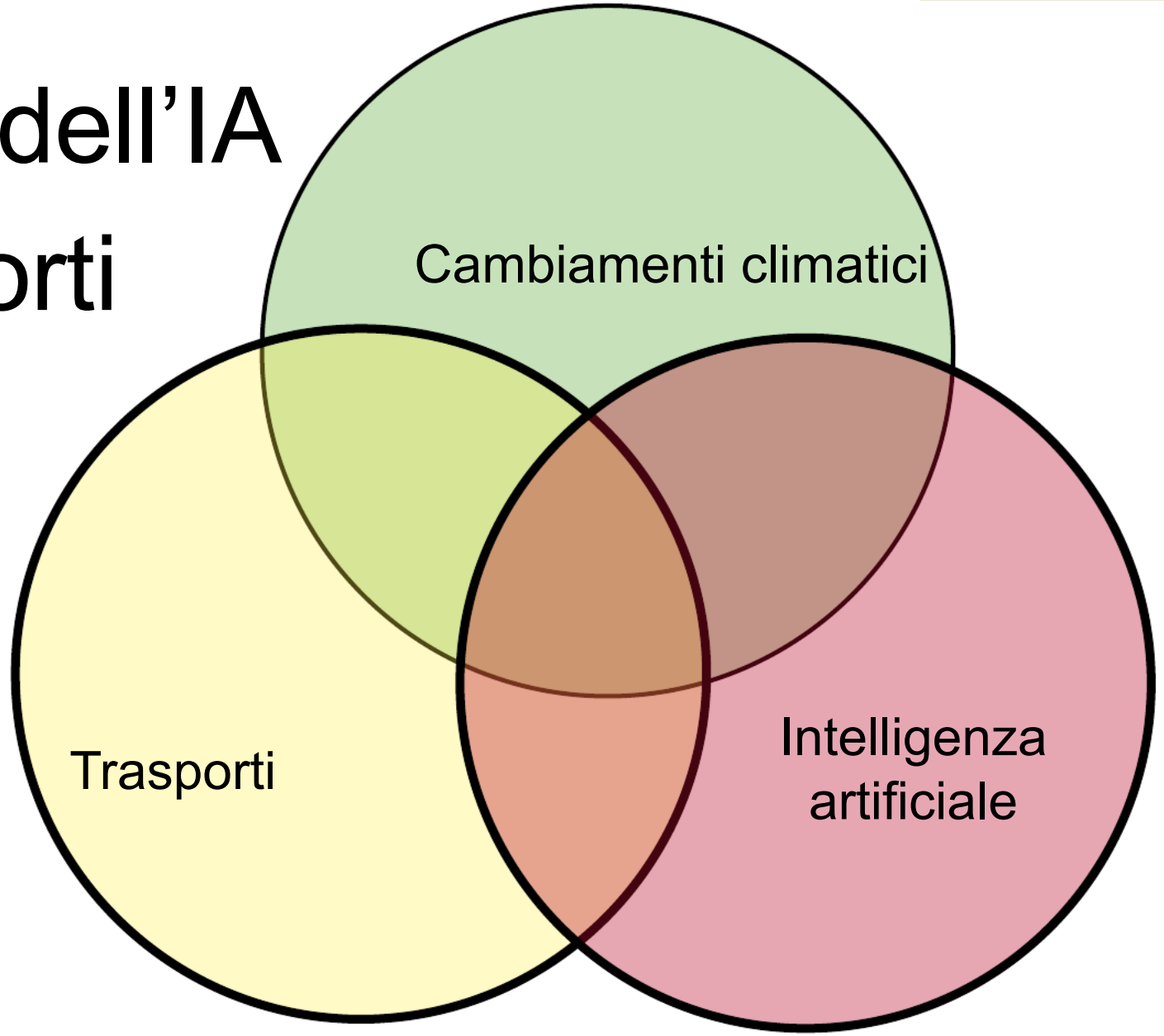
[1] P. Jaramillo and et al., “Transport,” in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024. doi: 10.1017/9781009157926.012.

Lente 2: una transizione rapida, giusta ed equa

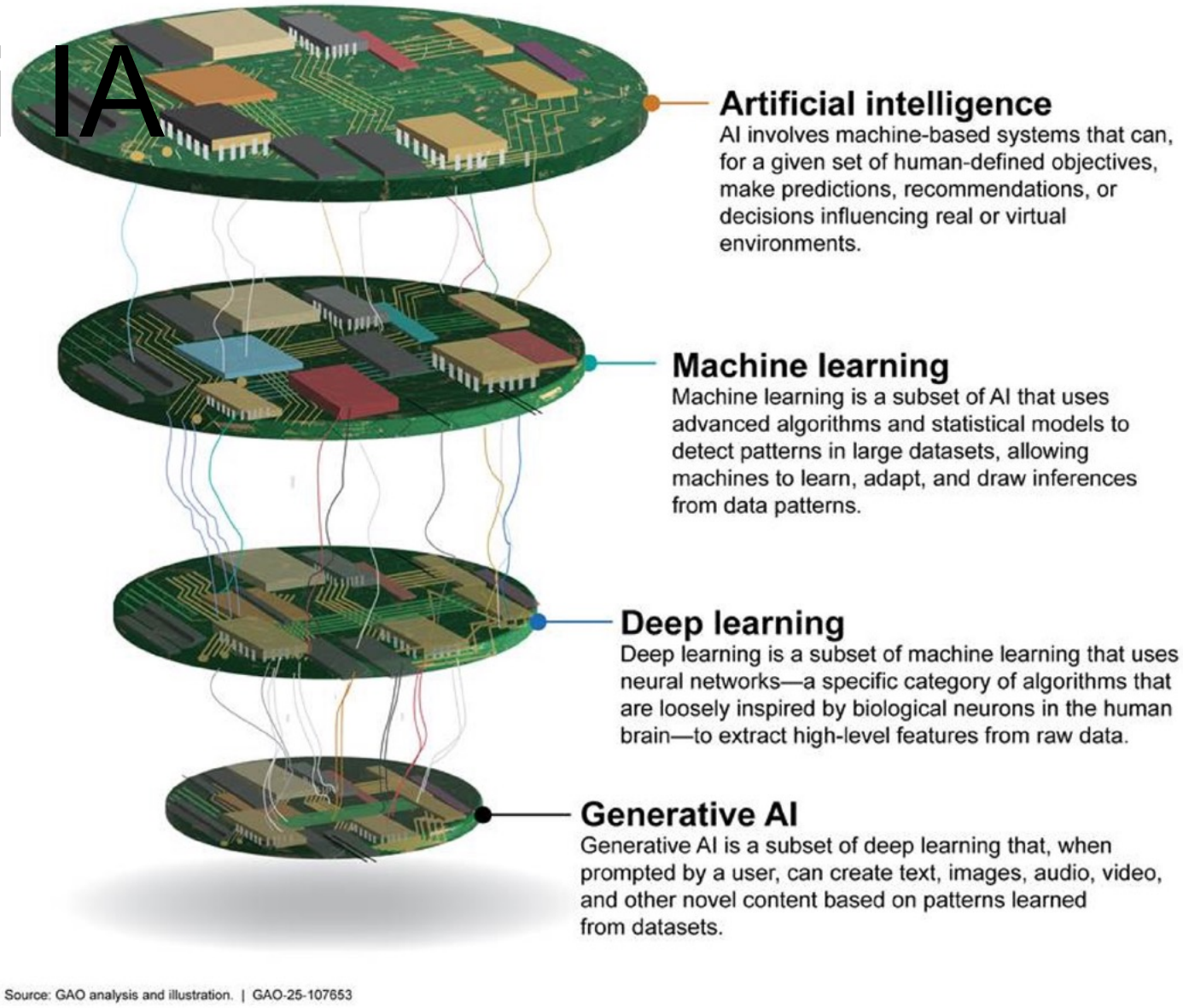


United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), "About Just Transition," 2025, unece.org/sustainable-energy/just-transition/about-just-transition.

Panoramica dell'IA nei trasporti



Definizione di IA



[1] C. Wright and K. Walsh, “Artificial intelligence: Generative AI use and management at federal agencies,” United States Government Accountability Office, Report to Congressional Requesters GAO-25-107653, 2025. [Online]. Available: https://files.gao.gov/reports/GAO-25-107653/index.html

Applicazioni comuni dell'IA nei trasporti



Fig. 1. Key applications of AI, ML, and DL in advanced transportation systems.

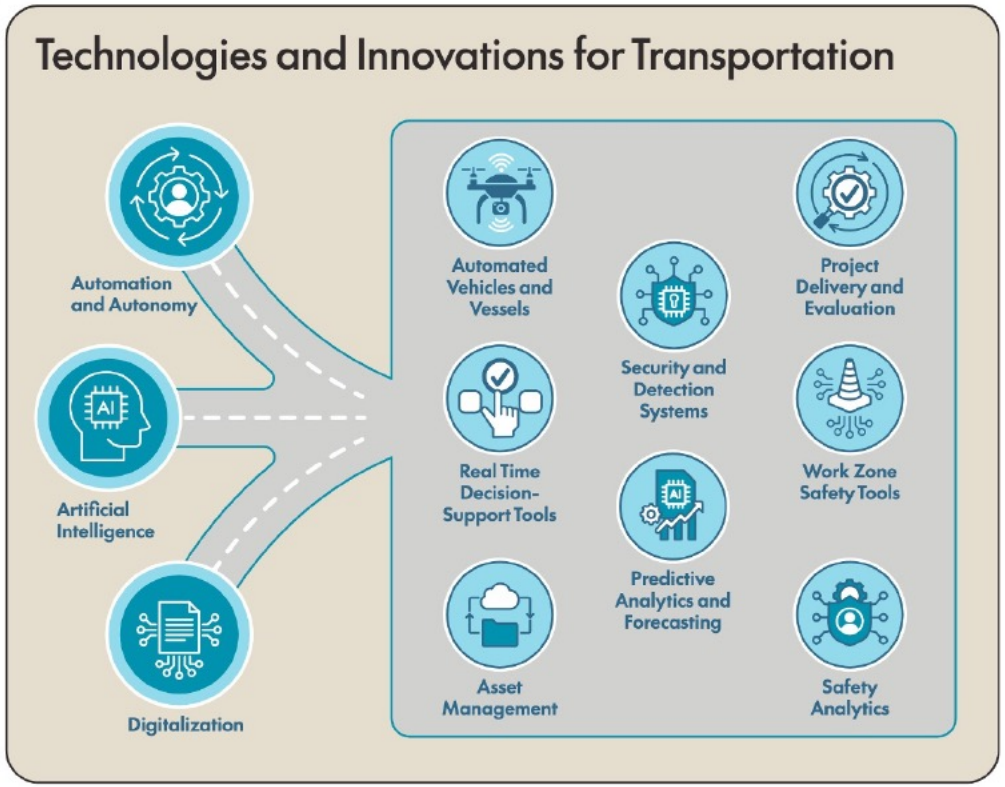


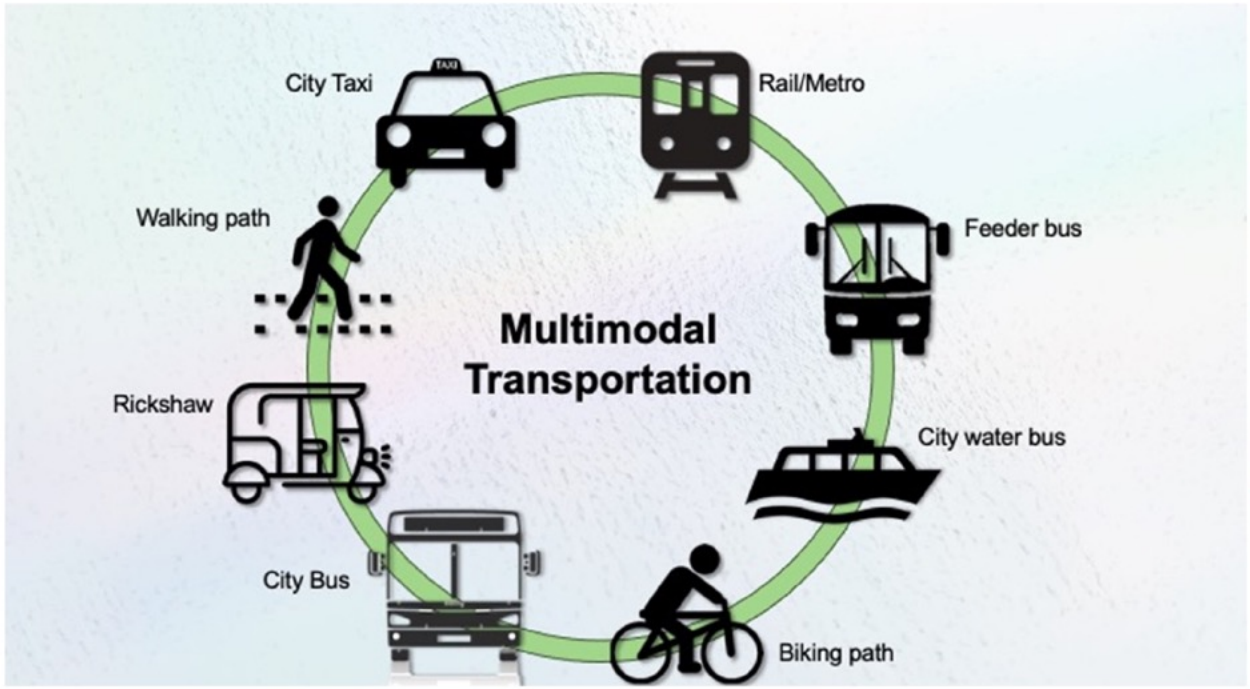
FIGURE 1. Artificial intelligence, advanced automation and autonomy, and digitalization are separately and jointly producing innovations in transportation.

[1] S. Saki and M. Soori, "Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced transportation systems, a review," Multimodal Transportation, vol. 5, no. 1, p. 100242, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.multra.2025.100242.
[2] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.

Modi di trasporto

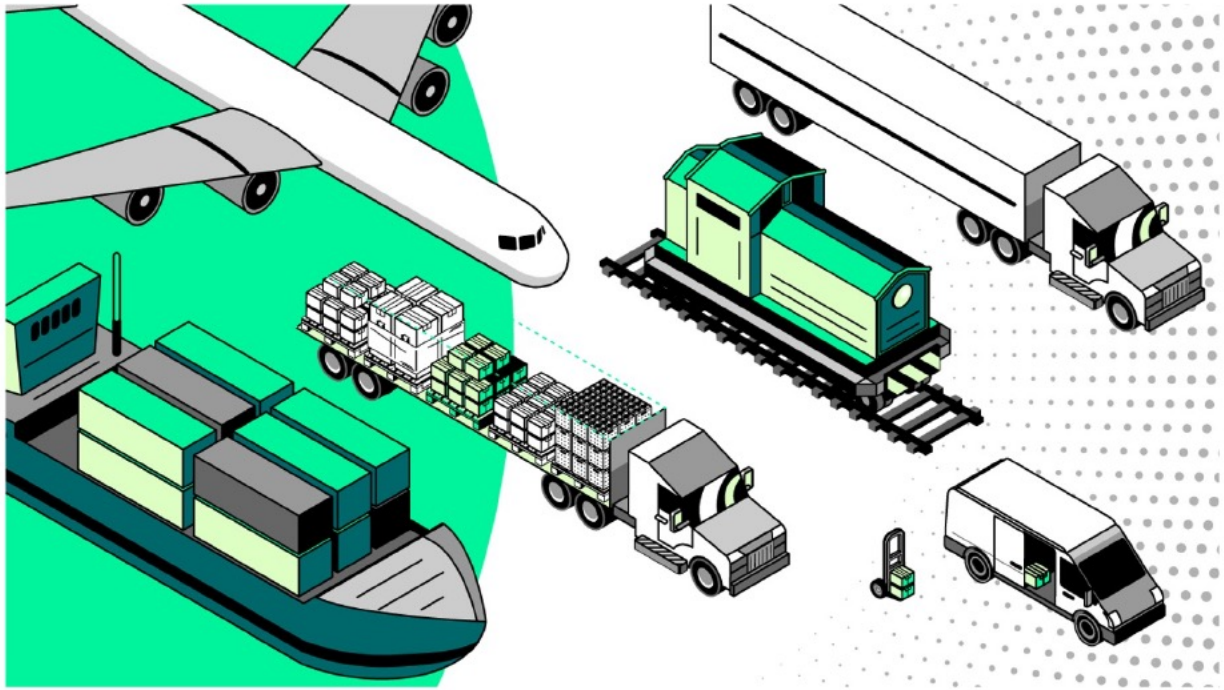
Camion e autobus: 8% dei veicoli, ma 35% dell’energia del trasporto su strada (AIE, 2026)

Movimento delle persone



Fonte: Audirac, Ivonne, et al. "Transportation and Mobility Modes." 2024.

Movimento delle merci

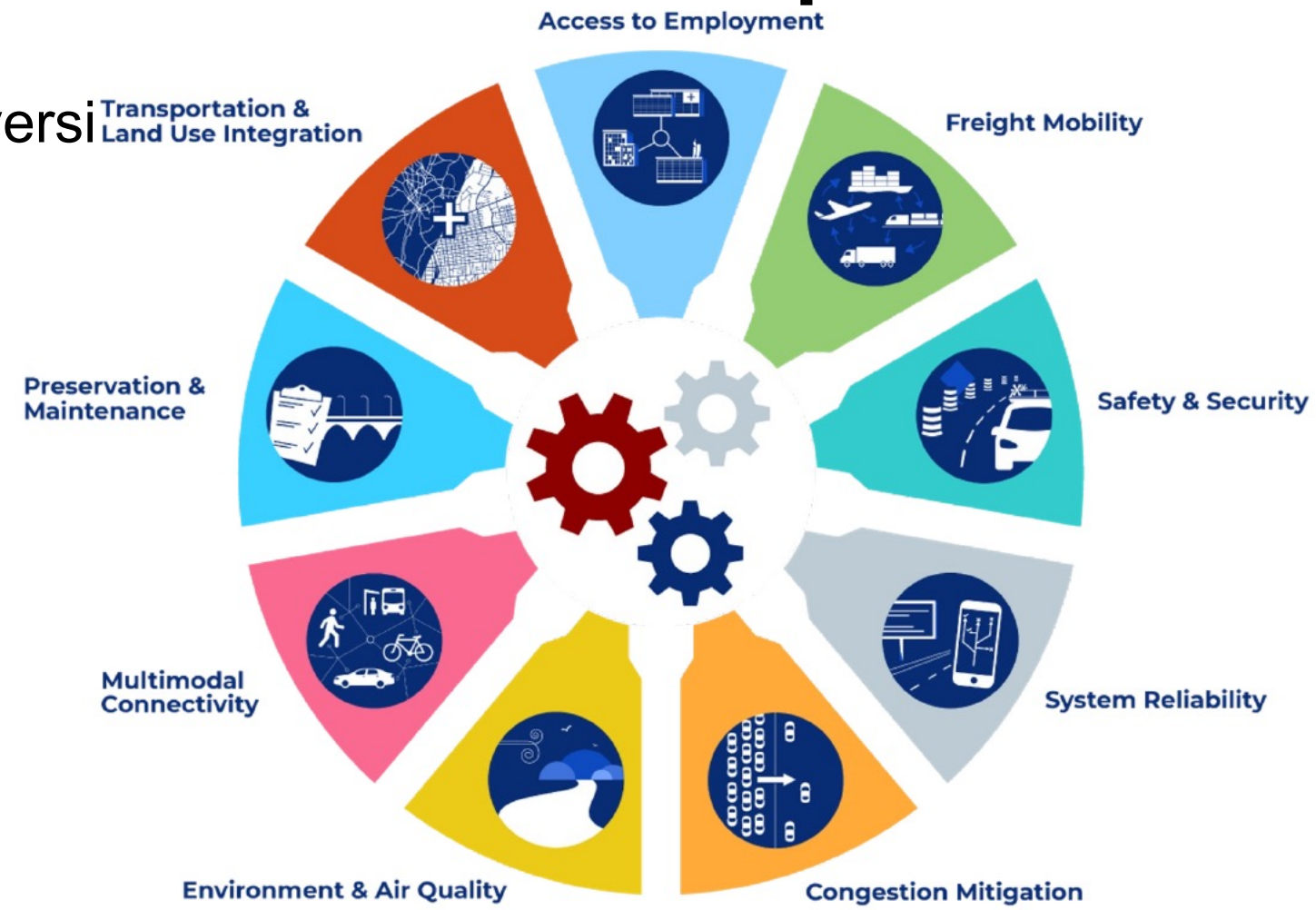


Fonte: RXO, 2026.

L’IA può essere applicata a diversi modi di trasporto

Obiettivi dei sistemi di trasporto

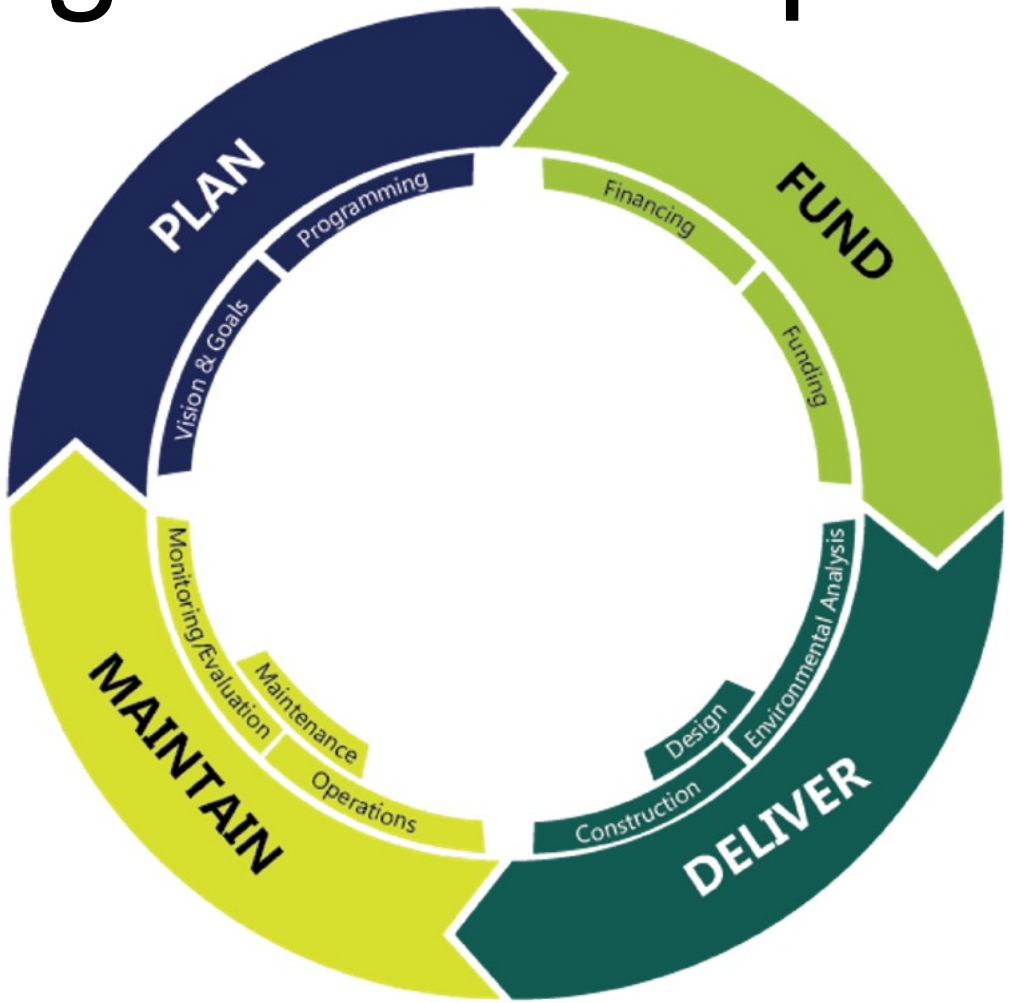
L’IA può essere applicata a diversi obiettivi di trasporto



Fonte: Plan RVA. "What is Transportation Planning?", 2019.

Ciclo di vita di un progetto di trasporto

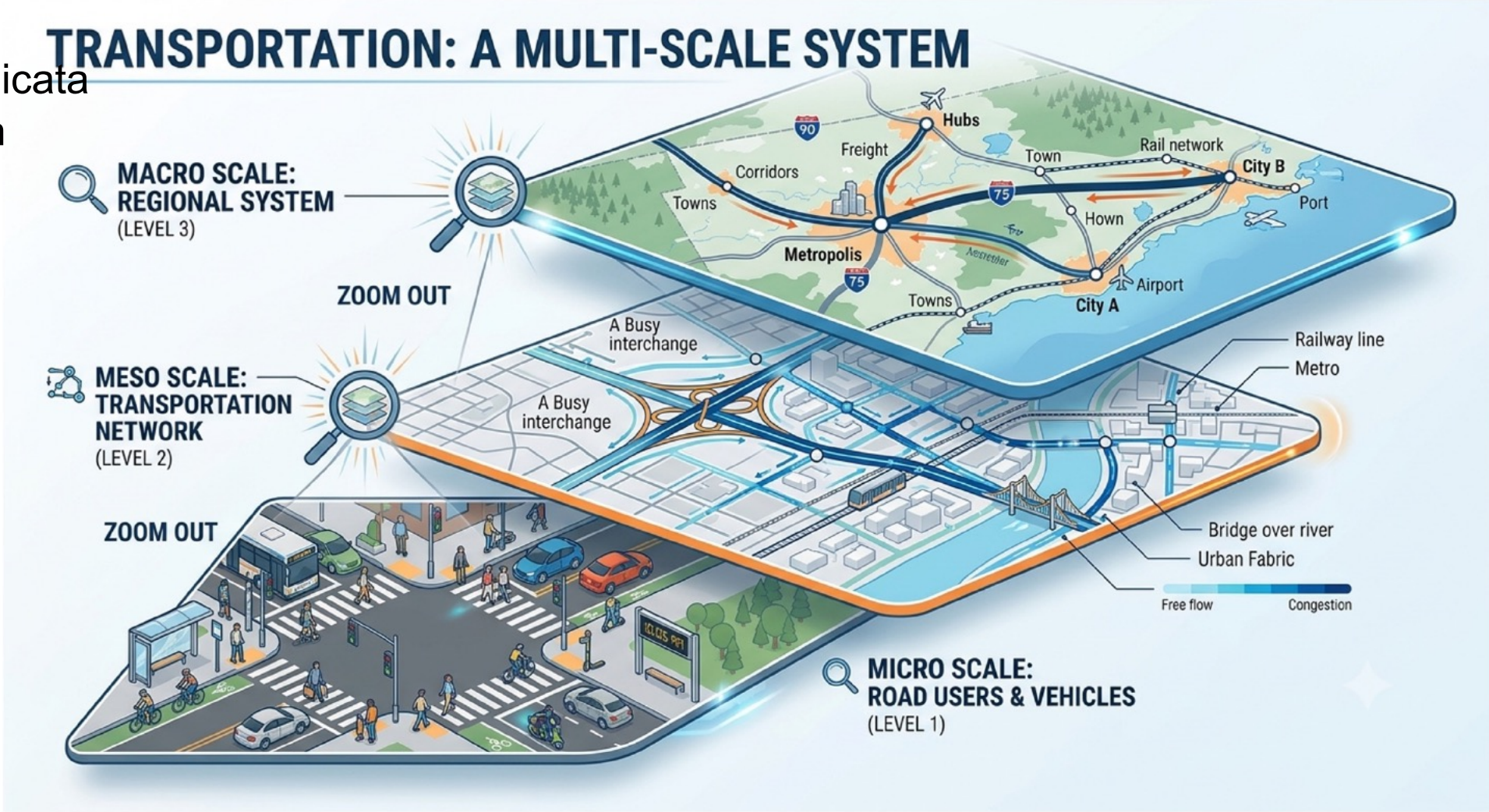
L’IA può essere applicata in diverse fasi del ciclo di vita di un progetto di trasporto



Fonte: US DOT. "Transportation Planning and Project Delivery." 2023.

I trasporti come sistema multiscala

L'IA può essere applicata a diverse scale di un sistema di trasporto



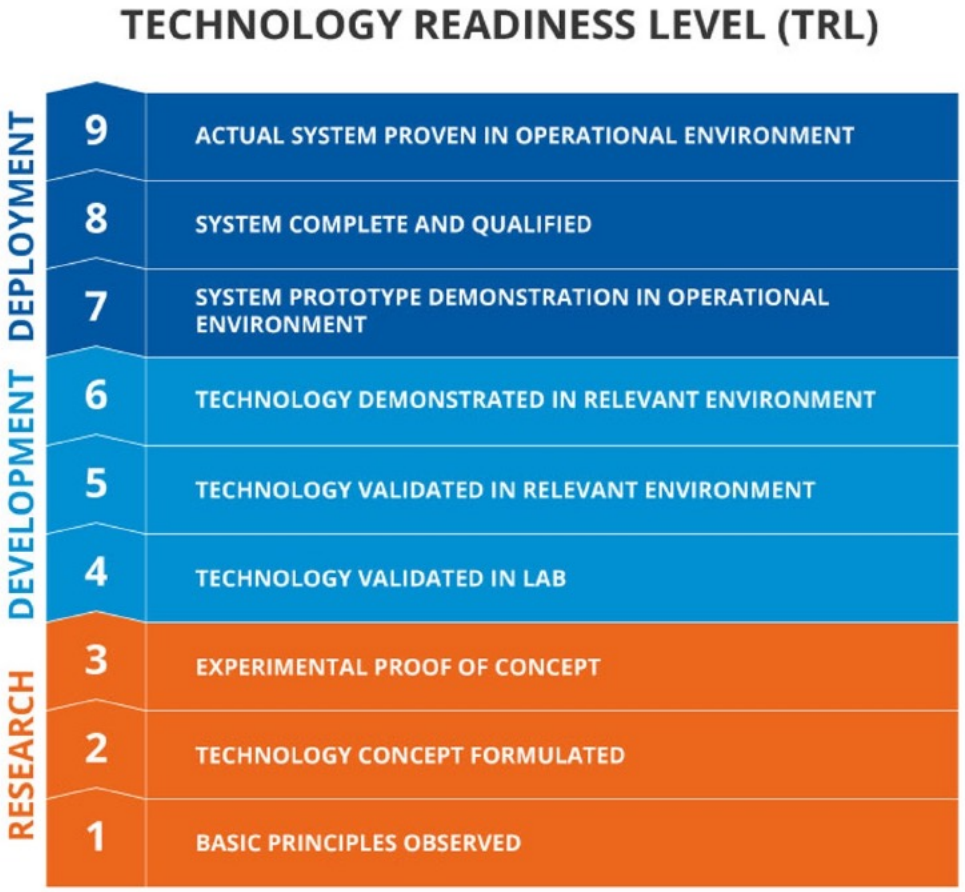
Fonte: generato con Gemini 3 (Nano Banana), 13/07/2026.

IA e livelli di maturità tecnologica (TRL)

- Confronta la maturità delle tecnologie
- Sviluppato dalla NASA negli anni Settanta per le tecnologie di esplorazione spaziale

Categorie di casi d'uso:

- Valutare la maturità delle tecnologie di IA (LLM, RL profondo, ecc.)
- Usare l'IA per valutare la maturità di altre tecnologie (VA, VE, ecc.)



Fonte: TWI Global.

US DOT Federal Highway Administration, What Is A Trl? - Technology Readiness Level Guidebook , 2017, www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/17047/001.cfm.

Visibilità e decisioni frammentate

Sfida: l'IA va applicata dal punto di vista di un gruppo di stakeholder

Adattato da S. S. R. Bonthu, et al., 2022.

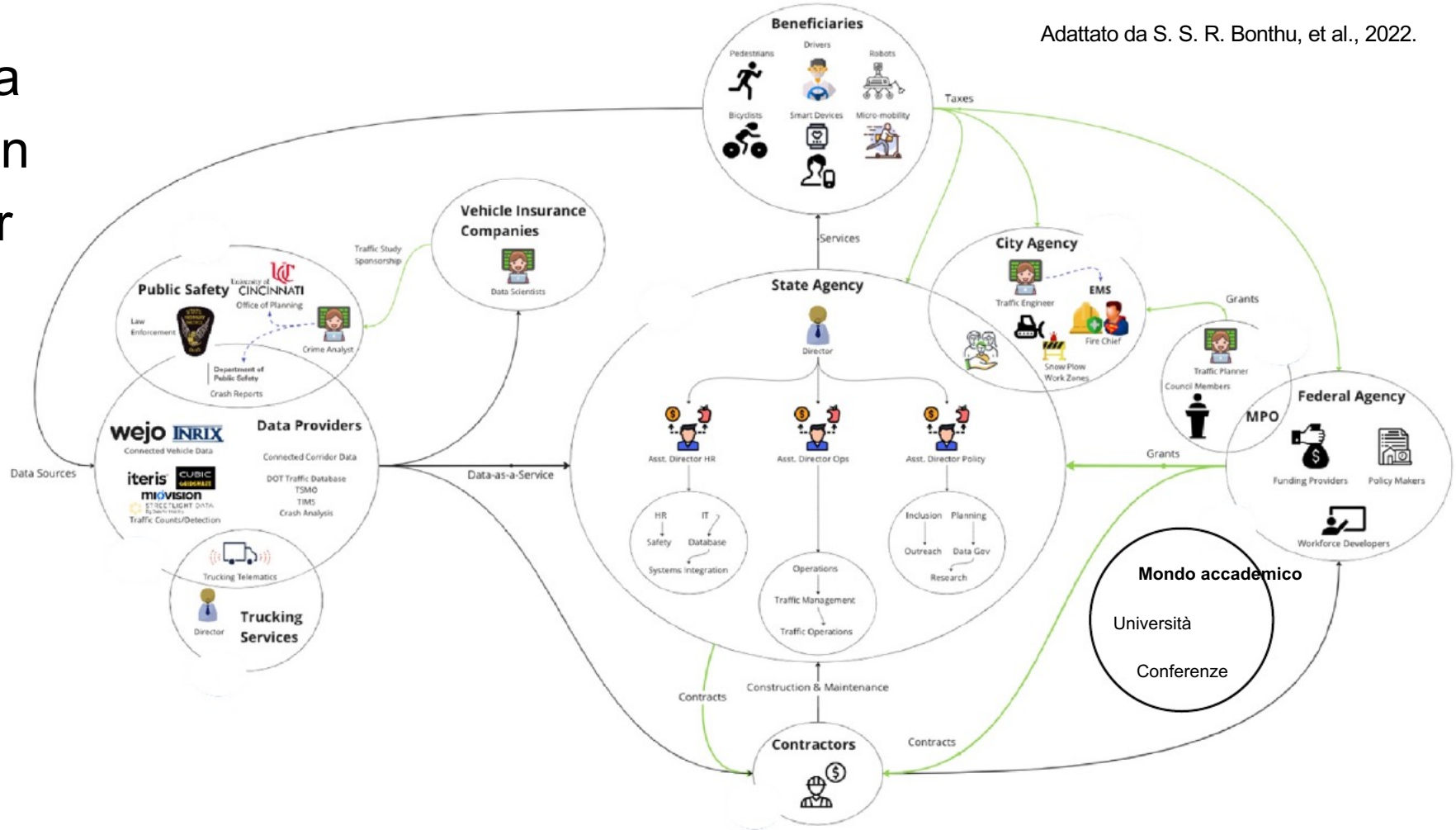


Figure 2. Complex transportation ecosystem with interview count highlighted across government agencies, data providers, and contractors.

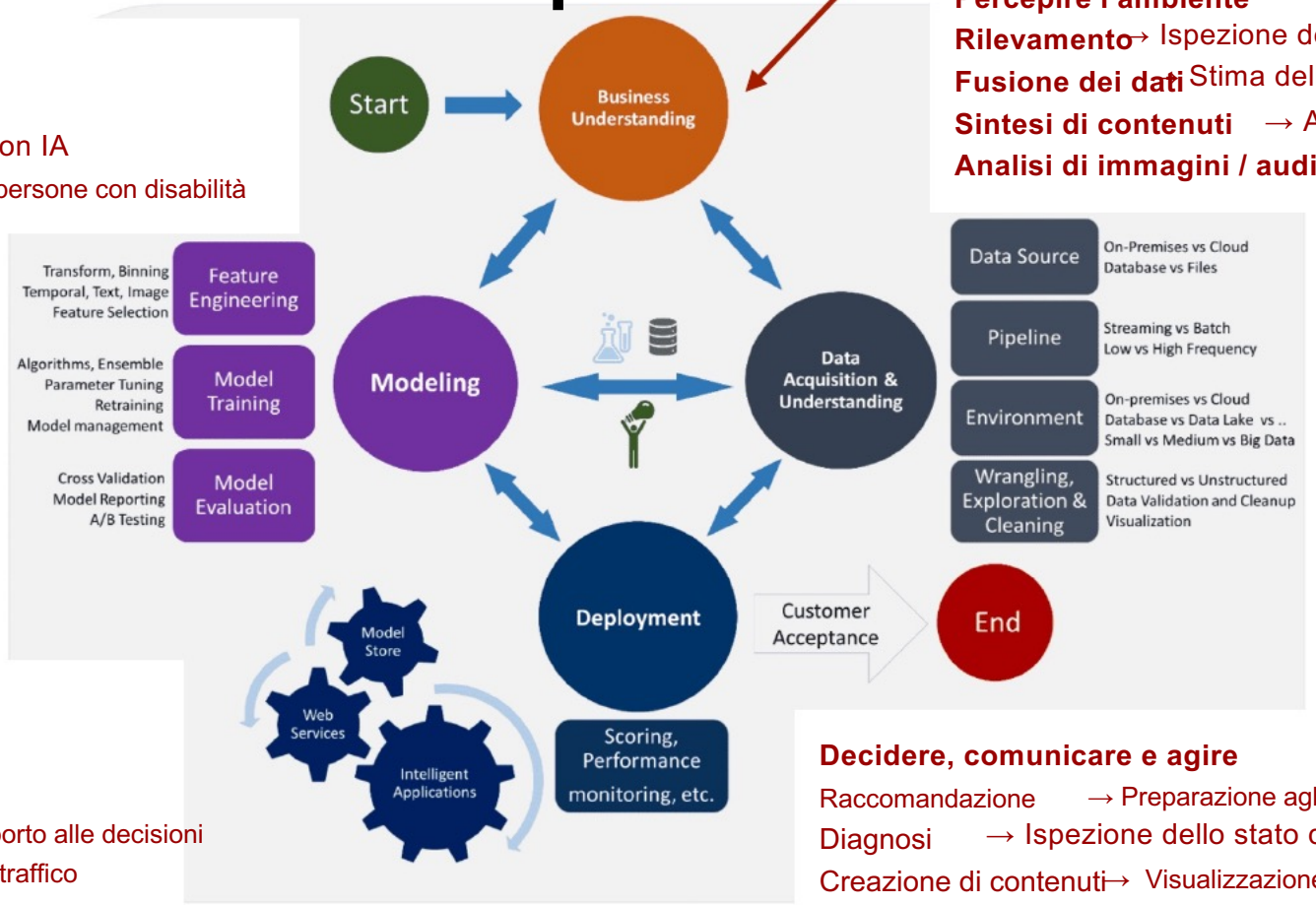
Data science nei trasporti

Scegliete un modo, una fase del ciclo di vita, una misura di prestazione, una scala, un TRL, un gruppo di stakeholder, ecc.

Ragionare e analizzare informazioni
Previsione → Previsioni degli spostamenti
Simulazione → Gemelli digitali del traffico con IA
Personalizzazione → Pianificazione dei viaggi per persone con disabilità

Percepire l'ambiente
Rilevamento → Ispezione dello stato delle infrastrutture
Fusione dei dati → Stima dello stato del traffico
Sintesi di contenuti → Analisi dei contributi del pubblico
Analisi di immagini / audio → Analisi della sicurezza

L'IA in diverse fasi di una pipeline di data science in un caso d'uso di trasporto



Fonte: Eric Mihail. "What is the Data Science Life Cycle?" 2026.

Imparare dall'esperienza
Ottimizzazione → Percorsi per i soccorsi
Scoperta → Materiali innovativi
Recupero di informazioni → Strumenti di supporto alle decisioni
Miglioramento delle prestazioni → Gestione del traffico
Monitoraggio → Telecamere o sensori di sicurezza

Decidere, comunicare e agire
Raccomandazione → Preparazione agli eventi meteo estremi
Diagnosi → Ispezione dello stato delle infrastrutture
Creazione di contenuti → Visualizzazione dei dati di viaggio
Assistenza digitale → Servizio clienti

[1] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.
[2] M. Vasudevan et al., "Identifying Real-World Transportation Applications Using Artificial Intelligence (AI)- Real-World AI Scenarios in Transportation for Possible Deployment," FHWA-JPO-20-810, Jul. 2020. Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50752.

L’IA supporta vari tipi di automazione nei trasporti

Automazione nei trasporti

- Automazione dei veicoli → auto o autobus SAE di livello 4
- Automazione robotica → attività di manutenzione
- Automazione dei processi → segnalazione degli incidenti sul campo



Il trasporto pubblico si affida alla robotica | Fonte: Sandalow, David B. et al., 2024.



Robot mobile di pulizia e disinfezione | Fonte: Fraunhofer IFAM, 2022.

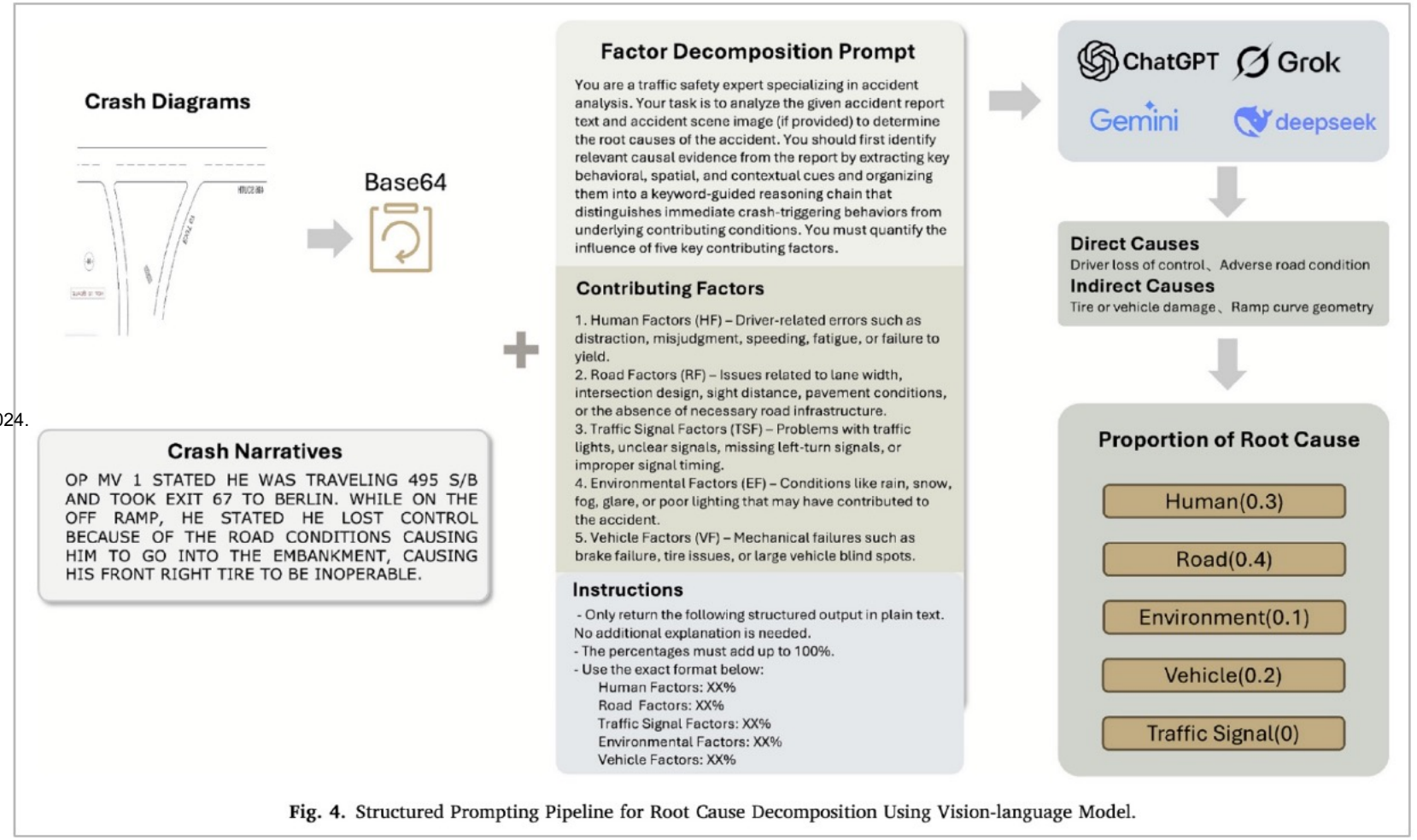
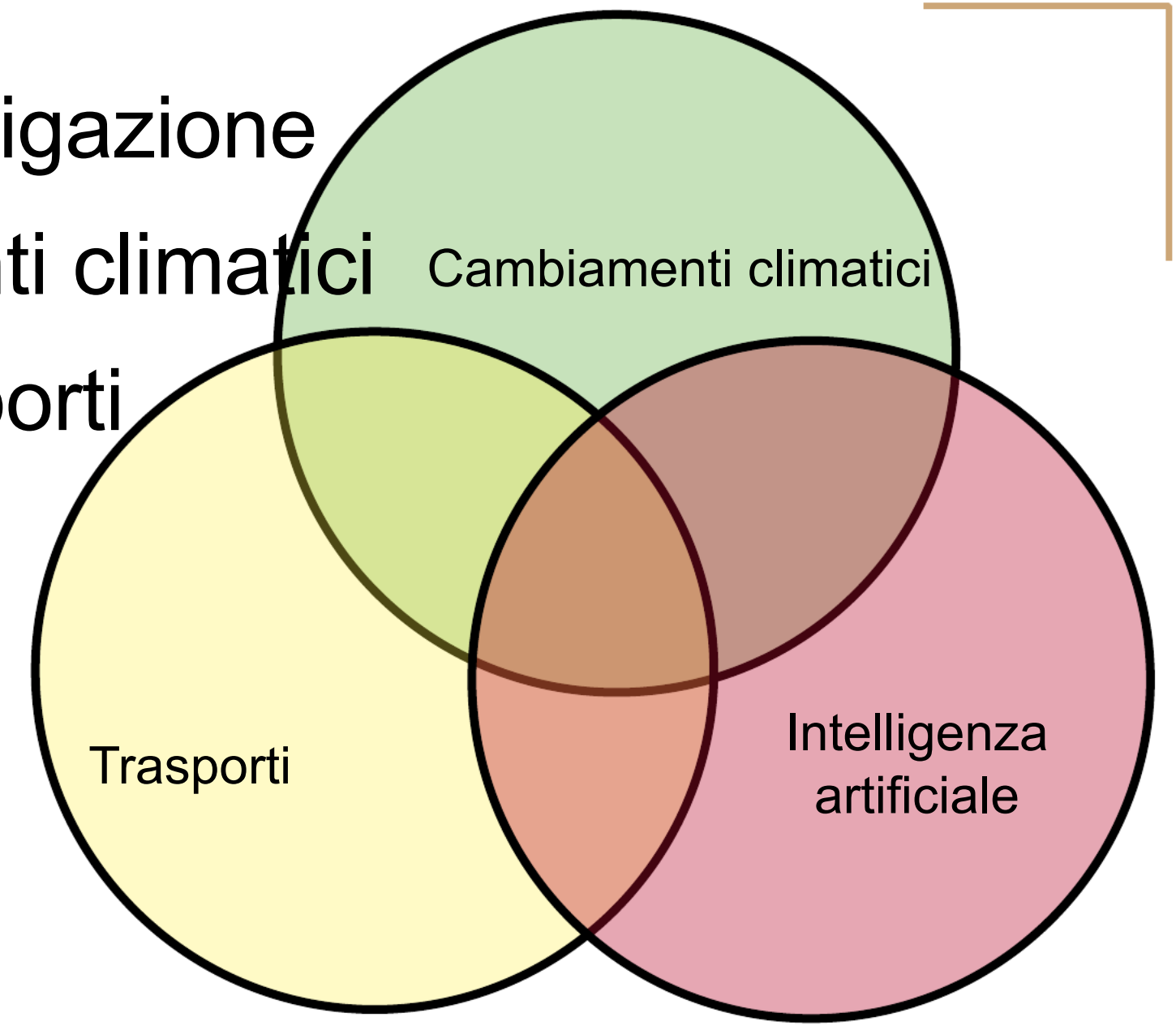


Fig. 4. Structured Prompting Pipeline for Root Cause Decomposition Using Vision-language Model.

Fonte: Wu, G., et al., “From crash reports to safer roads: a multimodal framework integrating vision-language models and streetview analysis,” 2026.

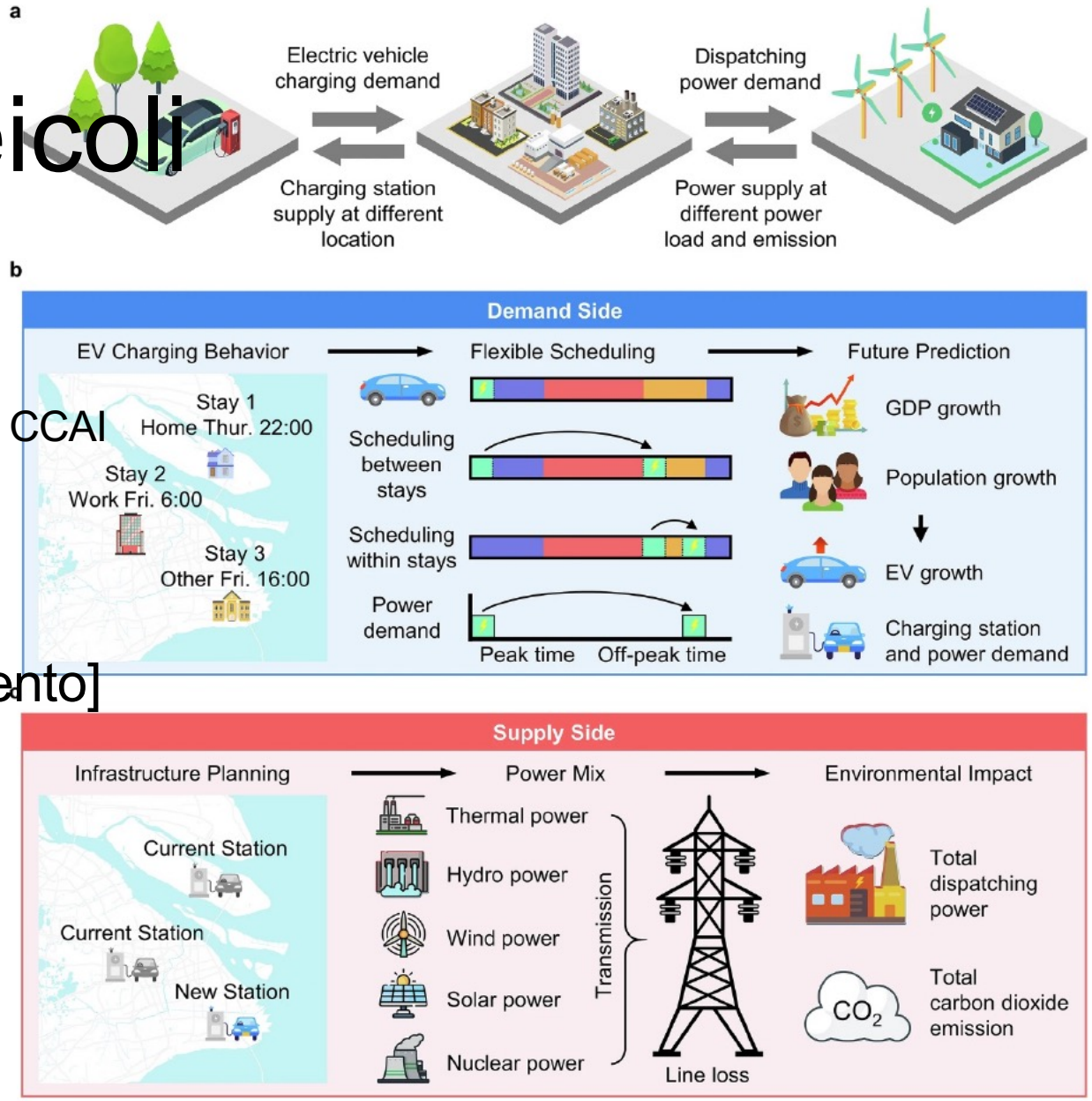
[1] Transportation Research Board Executive Committee, Transportation Research Board, and National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transforming Transportation: Leveraging the Power of Artificial Intelligence, Digitalization, and Automation. Washington, D.C.: National Academies Press, 2026, p. 29350. doi: 10.17226/29350.

L’IA per la mitigazione dei cambiamenti climatici nei trasporti



Elettrificazione dei veicoli

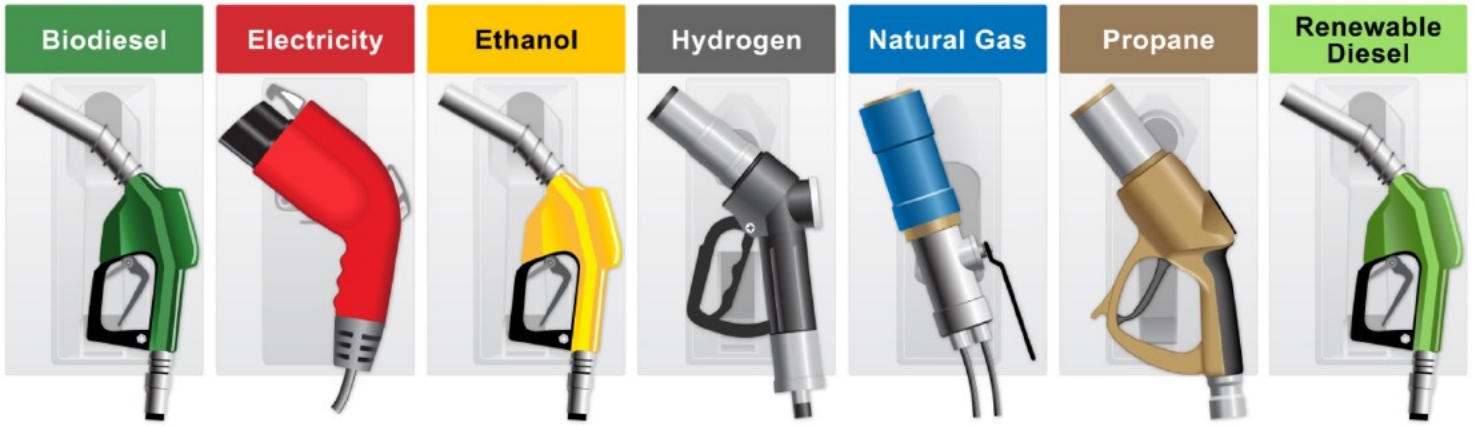
- Scoperta di materiali per batterie e motori
  - Vedi la lezione della Scuola estiva virtuale CCAI «AI for Accelerated Materials Science» di Francisco Martin-Martinez, gio. 13 agosto, 14:00–16:00 UTC
- Carica/scarica assistita dall'IA per la gestione dell'energia [approfondimento]
  - Veicolo (gestione della batteria)
  - Rete (ricarica bidirezionale, V2G/V2H/V2B)
- Previsione/gemelli digitali per salute, riciclo e riutilizzo delle batterie



[1] Sandalow, David B. et al., "Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition)," Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.
[2] Liao, Chenlei, et al. "Optimizing electric vehicle charging patterns and infrastructure for grid decarbonization." Commun. Sustain., 2026, doi:10.1038/s44458-026-00037-7.

Carburanti alternativi

- Uso ideale: mezzi pesanti, lunga percorrenza, casi affini ad aviazione/navigazione
- Carburanti: biocarburanti, carburanti sintetici, idrogeno, gas naturale compresso/liquefatto (GNC/GNL)
- Ruolo dell'IA: ottimizzare produzione di carburanti, catalizzatori, elettrolisi, celle a combustibile, combustione, logistica e pianificazione delle infrastrutture
- Avvertenza: i biocarburanti possono avere impatti tramite il cambio d'uso del suolo; il gas naturale è transitorio, non a zero emissioni



Fonte: US Department of Energy. "Federal Fleet Alternative Fuel Resources." Energy, 2026.

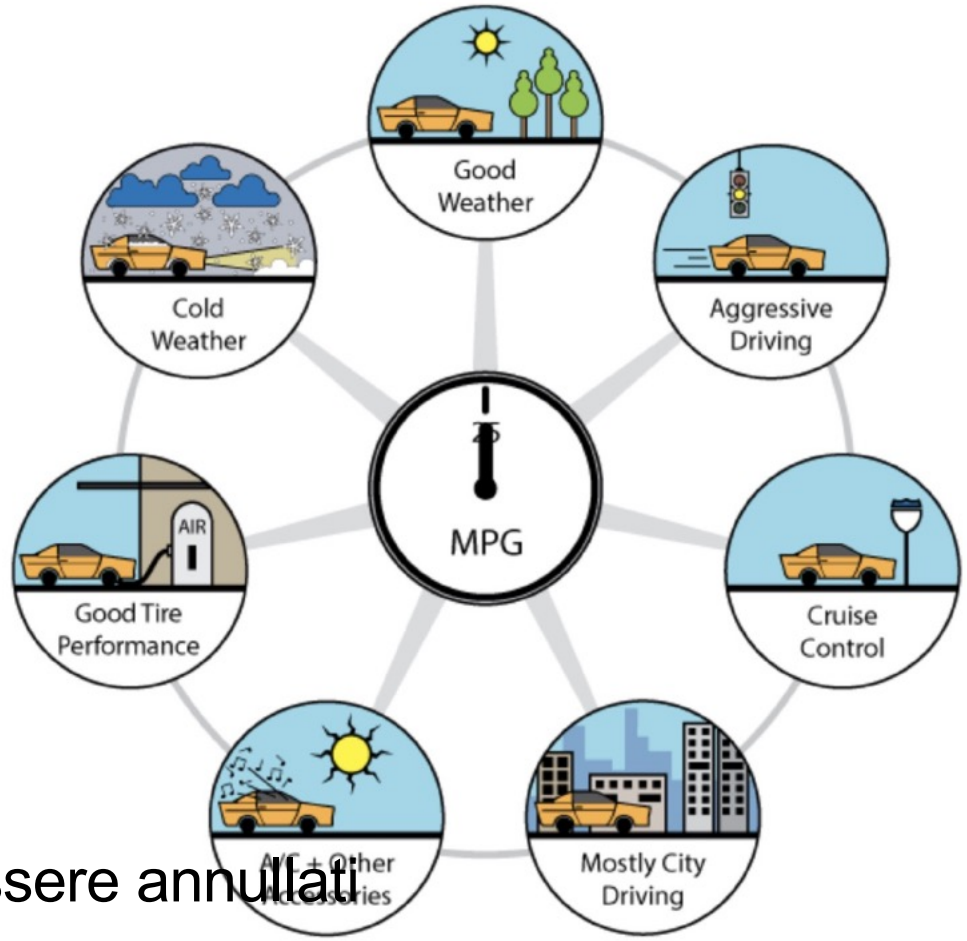
[1] Sandalow, David B. et al., "Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition)," Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Efficienza dei veicoli

Fattori che influenzano i consumi

L'IA per progettazione e utilizzo dei veicoli

- In progettazione, l'IA può supportare:
  - progettazione dei motori a combustione
  - riduzione del peso o della resistenza al rotolamento
  - strategie di gestione dell'energia ibrida
  - aerodinamica: modelli surrogati e carico inefficiente dei treni merci
  - produzione assistita dall'IA
- In esercizio, l'IA può supportare la guida ecologica, un traffico più fluido, il platooning e il controllo energetico [approfondimento]
- Avvertenza: i guadagni di efficienza possono essere annullati dal traffico indotto, soprattutto con i VA



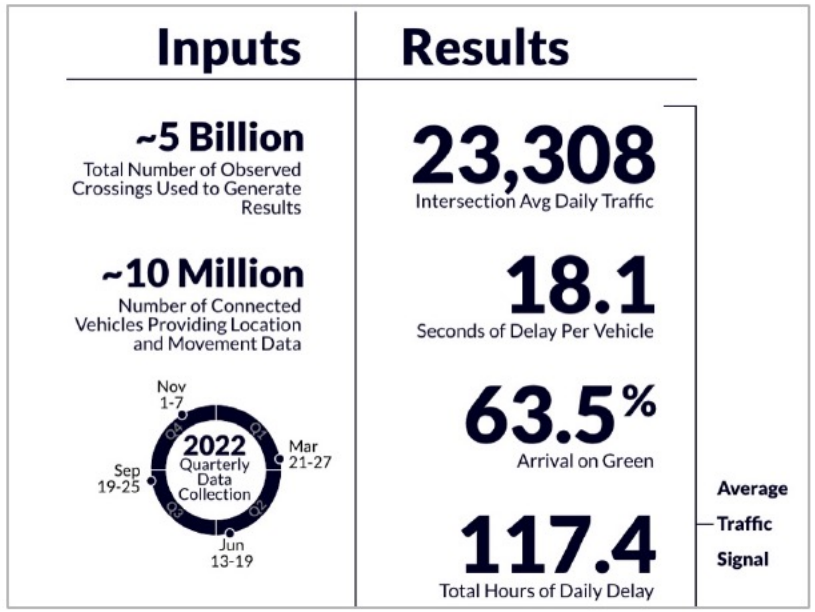
Fonte: US EPA, "Your Mileage May Vary," 2026.

[1] D. Rolnick et al., "Tackling climate change with machine learning," Jun. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2

Sistemi di trasporto intelligenti (ITS)

L'IA per infrastrutture e operazioni

- Prevedere congestioni e anomalie a partire da sensori, GPS, telecamere e dati di traffico.
- Ottimizzare semafori, percorsi, risposta agli incidenti, orari del trasporto pubblico e manutenzione per ridurre ritardi, congestione, consumi ed emissioni.
- La simulazione con IA può valutare l'ubicazione delle colonnine, piste ciclabili, politiche del traffico e domanda di energia.
- Sfide: infrastruttura dati (sensori, V2V/V2I, analisi edge, integrazione cloud)
- Avvertenza: sensori e calcolo hanno costi in termini di privacy, bias ed emissioni.



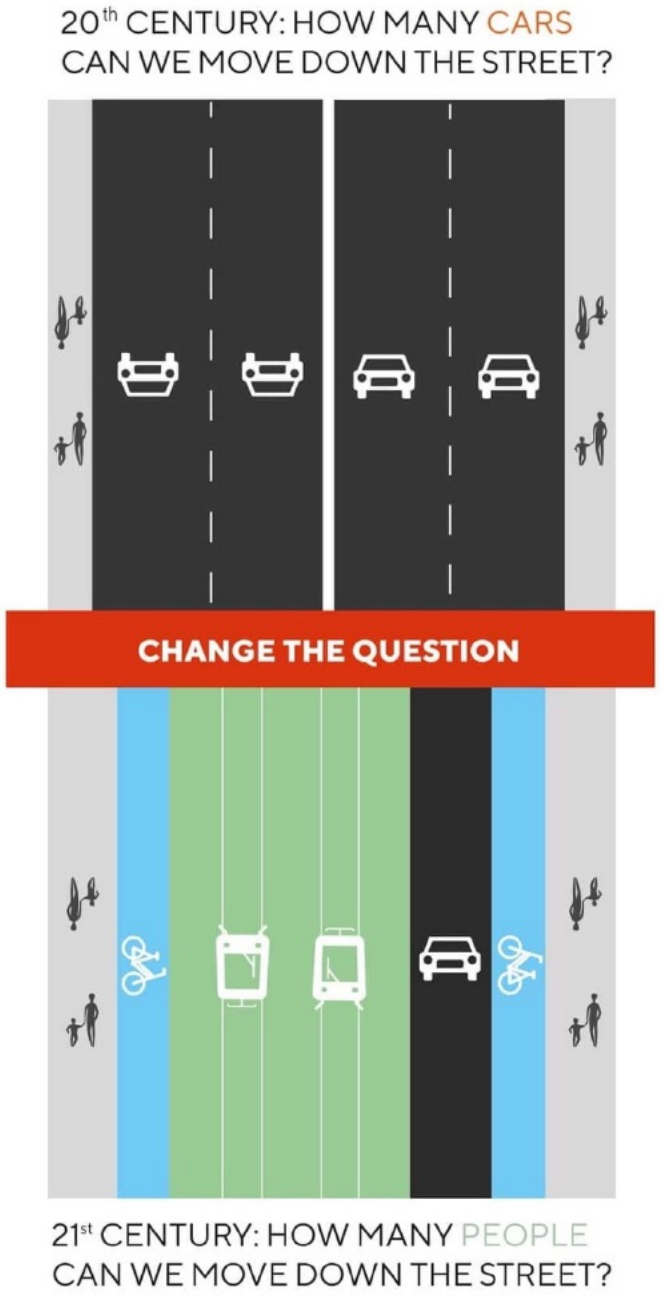


[1] Sandalow, David B. et al., "Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition)," Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.
[2] INRIX U.S. Signals Scorecard: 2022 Annual Summary. INRIX. https://inrix.com/signals-scorecard/.

Cambio modale

L’IA può rendere più facile scegliere i modi a basse emissioni

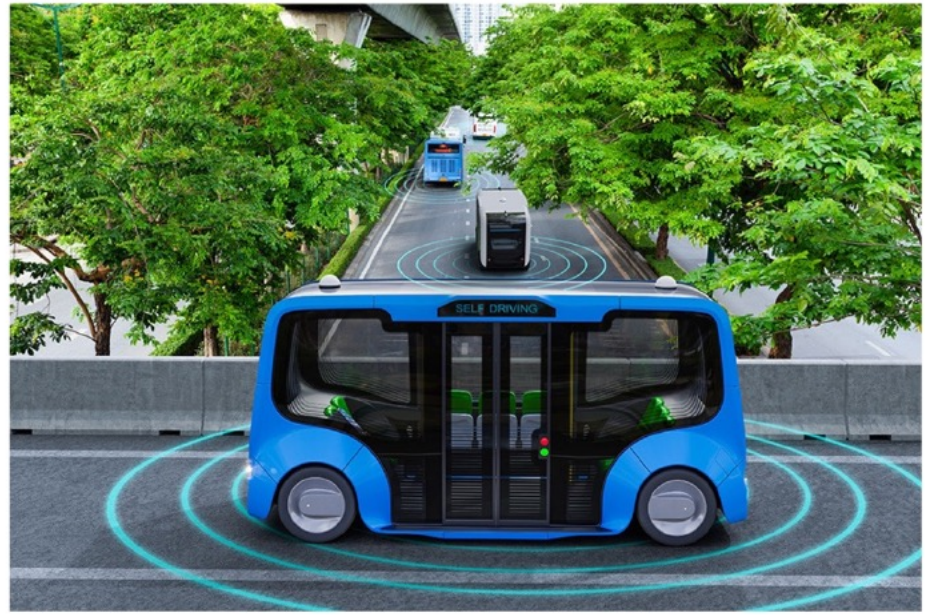
- Pianificazione dei servizi e del sistema
  a. Pianificazione del trasporto pubblico: prevedere la domanda
  b. Pianificazione multimodale: integrare piedi, bici, trasporto pubblico, treno, mobilità condivisa, trasporto pubblico autonomo e micromobilità [approfondimento]
- Esercizio e manutenzione
  a. Manutenzione predittiva e previsione degli orari di arrivo per migliorare l’affidabilità
  b. Percorsi, tariffe e raccomandazioni per spostare i viaggi.



Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Veicoli autonomi (VA)



Promessa climatica o rischio di rimbalzo?

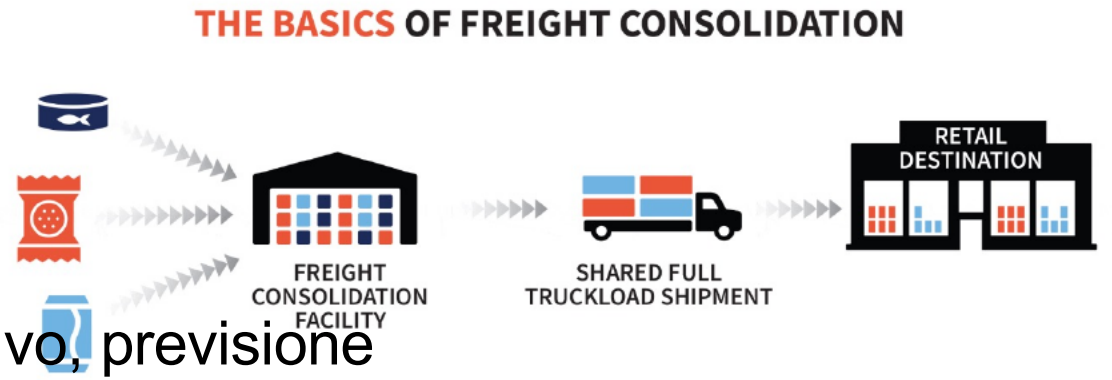
- Vantaggi: guida ecologica, platooning, parcheggio intelligente, traffico più fluido, flotte elettriche condivise, trasporto del primo/ultimo miglio.
- Rischio: viaggi più economici/facili aumentano i km.
- Rischio: i VA sostituiscono piedi, bici e trasporto pubblico.
- Scenario climatico migliore: elettrici + condivisi + **complementari al trasporto pubblico + regolati.**
  - Finora gli utenti non scelgono di condividere i viaggi
- In sintesi: i VA non sono intrinsecamente positivi per il clima.

[1] Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61.

Percorsi e consolidamento delle merci

Un caso d'uso IA + RO ad alto impatto→ riduce km a vuoto, veicoli più pieni

- Il consolidamento raggruppa spedizioni parziali → meno viaggi
- Percorsi migliori riducono ritorni a vuoto, deviazioni, minimo e tempi di sosta persi [approfondimento]
- Casi d'uso dell'IA: previsione degli orari di arrivo, previsione della domanda, previsione delle interruzioni, clustering dei fornitori, eco-routing, percorsi dinamici, accelerazione dell'ottimizzazione e supporto alle aste di trasporto



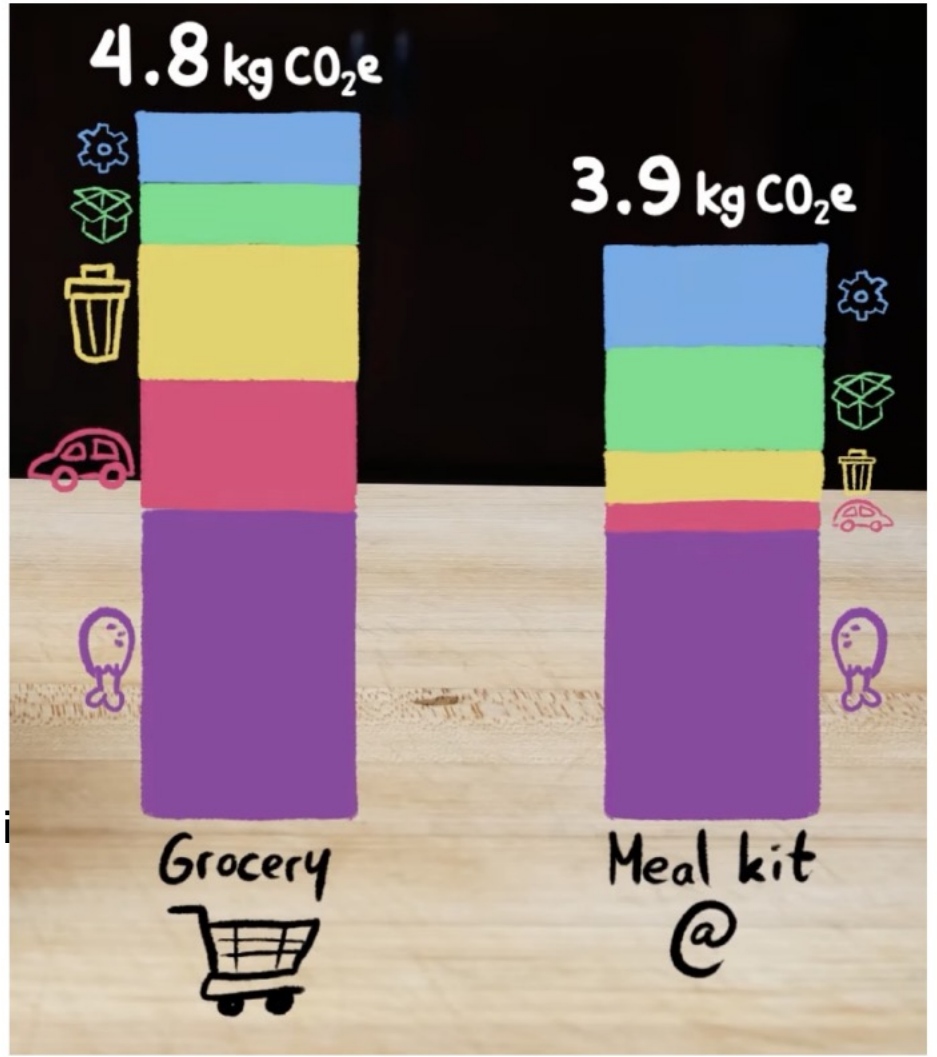
Fonte: Zipline Logistics, 2019.

[1] D. Rolnick et al., "Tackling climate change with machine learning," Jun. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1906.05433v2
[2] World Economic Forum, "Intelligent Transport, Greener Future: AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics." Jan. 2025.

Soluzioni di immobilità

L’IA per le strategie «Evitare»: ridurre la necessità di spostarsi

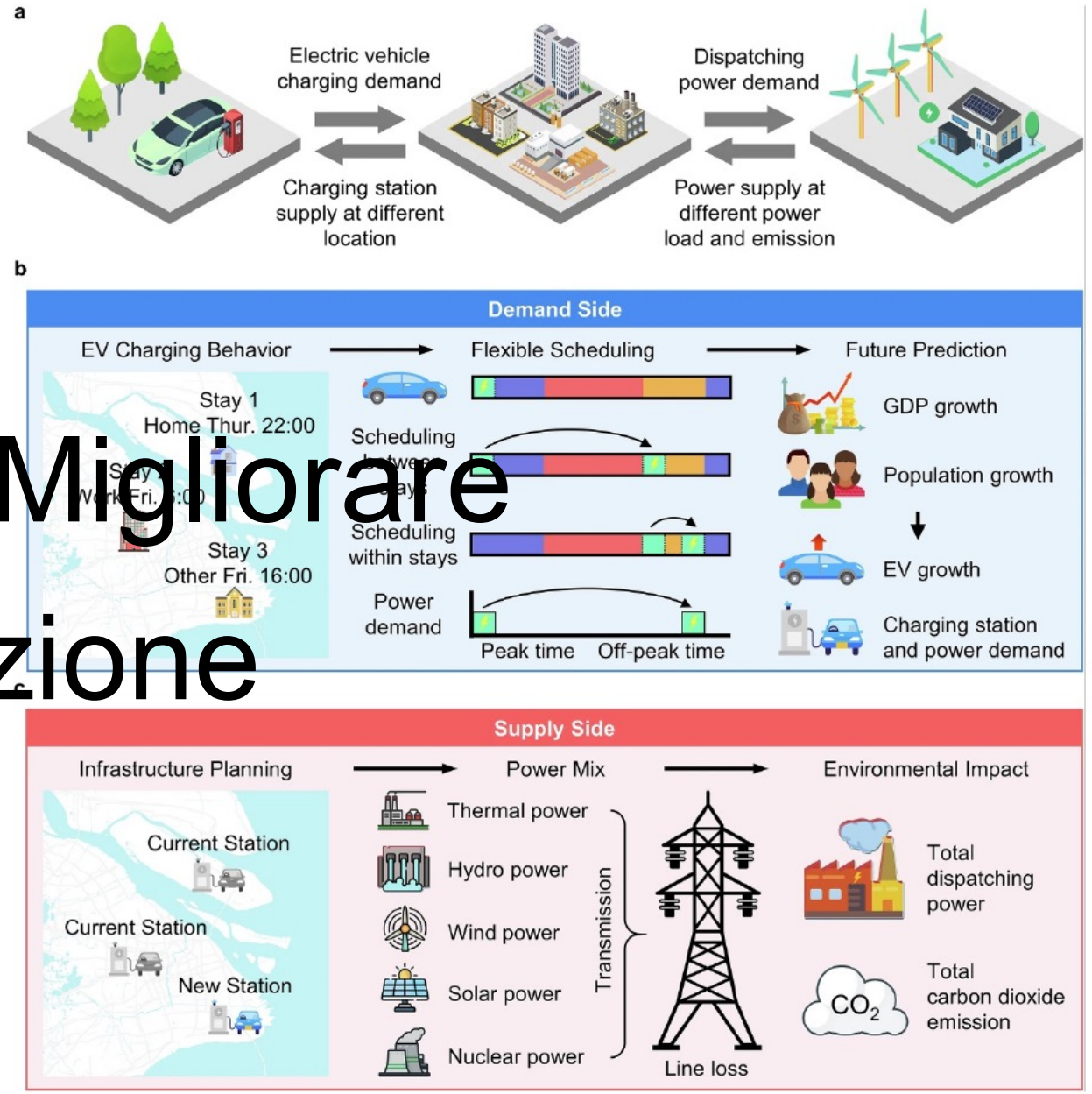
- La telepresenza può sostituire parte del pendolarismo e dei viaggi di lavoro
- I modelli di accessibilità individuano dove i bisogni quotidiani sono raggiungibili senza auto
- Le piattaforme di consegna possono consolidare i viaggi
- Ruolo dell’IA: previsione della domanda, mappe di accessibilità, raggruppamento, percorsi e programmazione attenta alle emissioni
- Avvertenza: tempo risparmiato e comodità possono tradursi in più viaggi, più consegne o tragitti più lunghi



I kit pasto possono ridurre le emissioni quando la logistica di consegna sostituisce i viaggi individuali per la spesa. Fonte: MinuteFood, 2023.

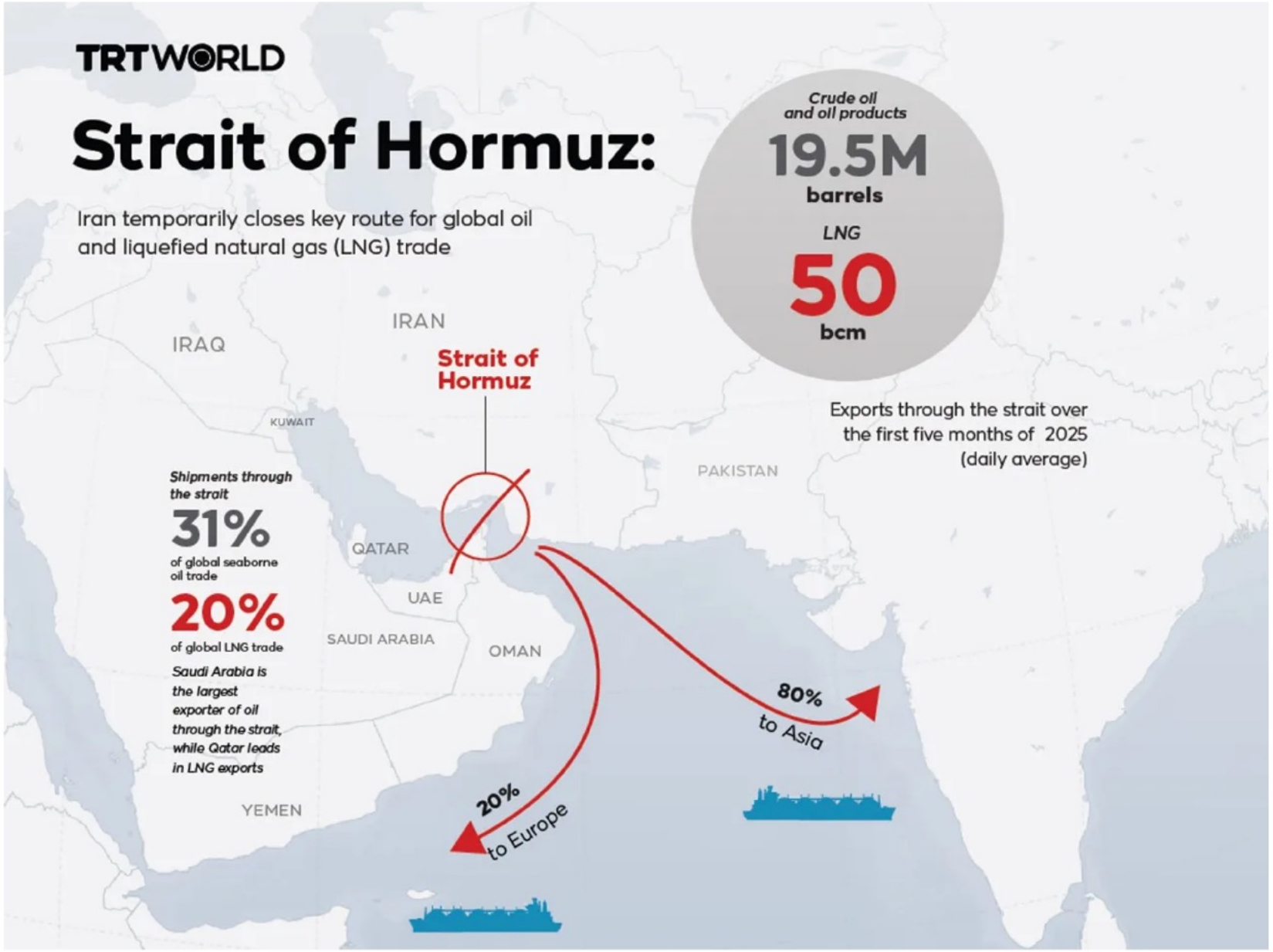
[1] P. Jaramillo and et al., “Transport,” in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024. doi: 10.1017/9781009157926.012.
[2] A. Nikolaeva, Y.-T. Lin, S. Nello-Deakin, O. Rubin, and K. C. von Schönfeld, “Living without commuting: experiences of a less mobile life under COVID-19,” Mobilities, vol. 18, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2023, doi: 10.1080/17450101.2022.2072231.

Approfondimento: Migliorare L'IA per l'elettrificazione



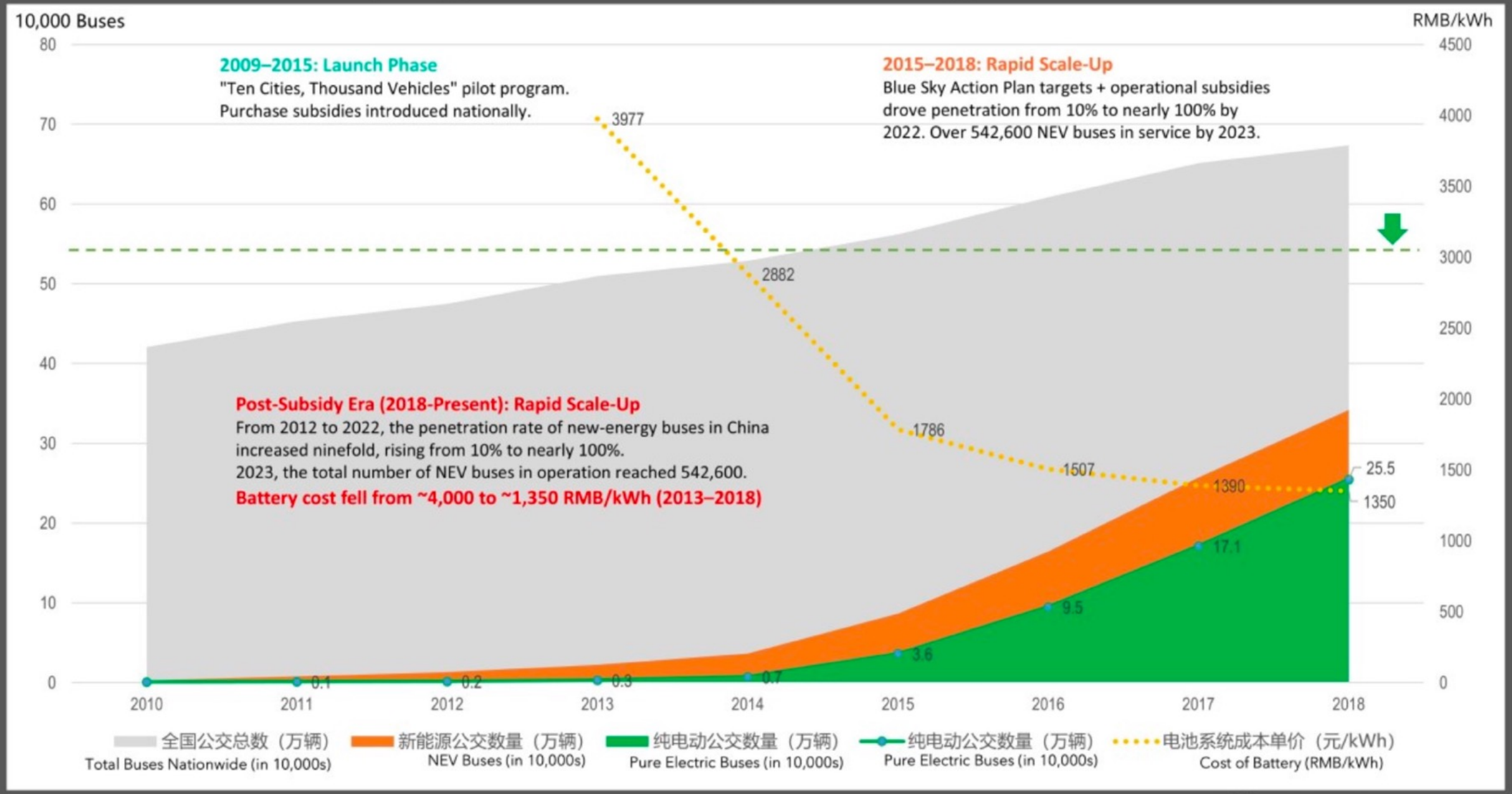
Perché elettrificare?

1. Sicurezza energetica



Fonte: TRT World, March 2, 2026

Electric Buses: Catalyzing China's Booming New Energy Vehicle Industry

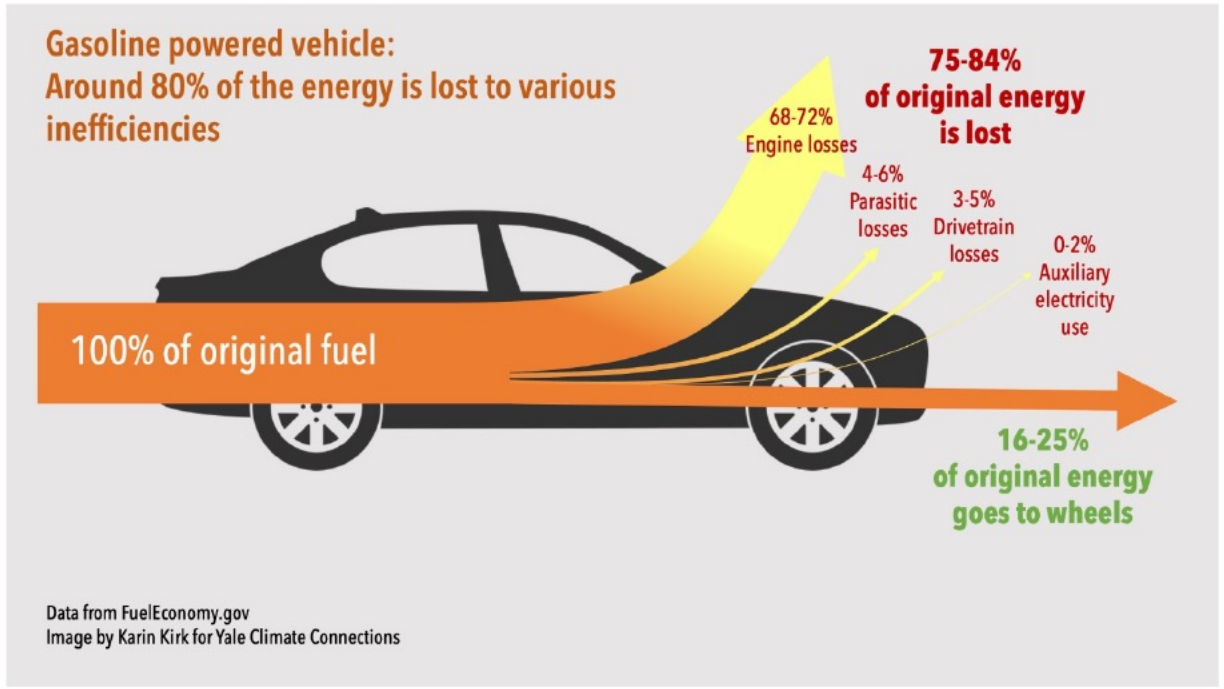


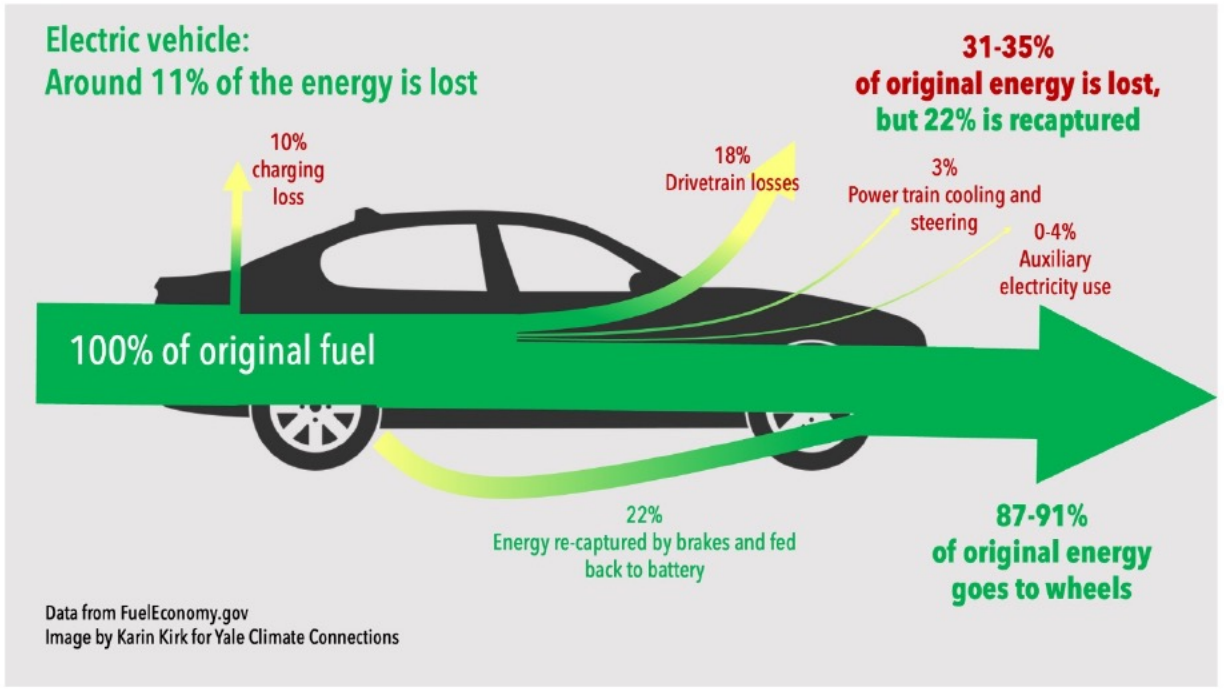
Credito: Daizong Liu, ITDP

ITDP Institute for Transportation & Development Policy

Perché elettrificare?

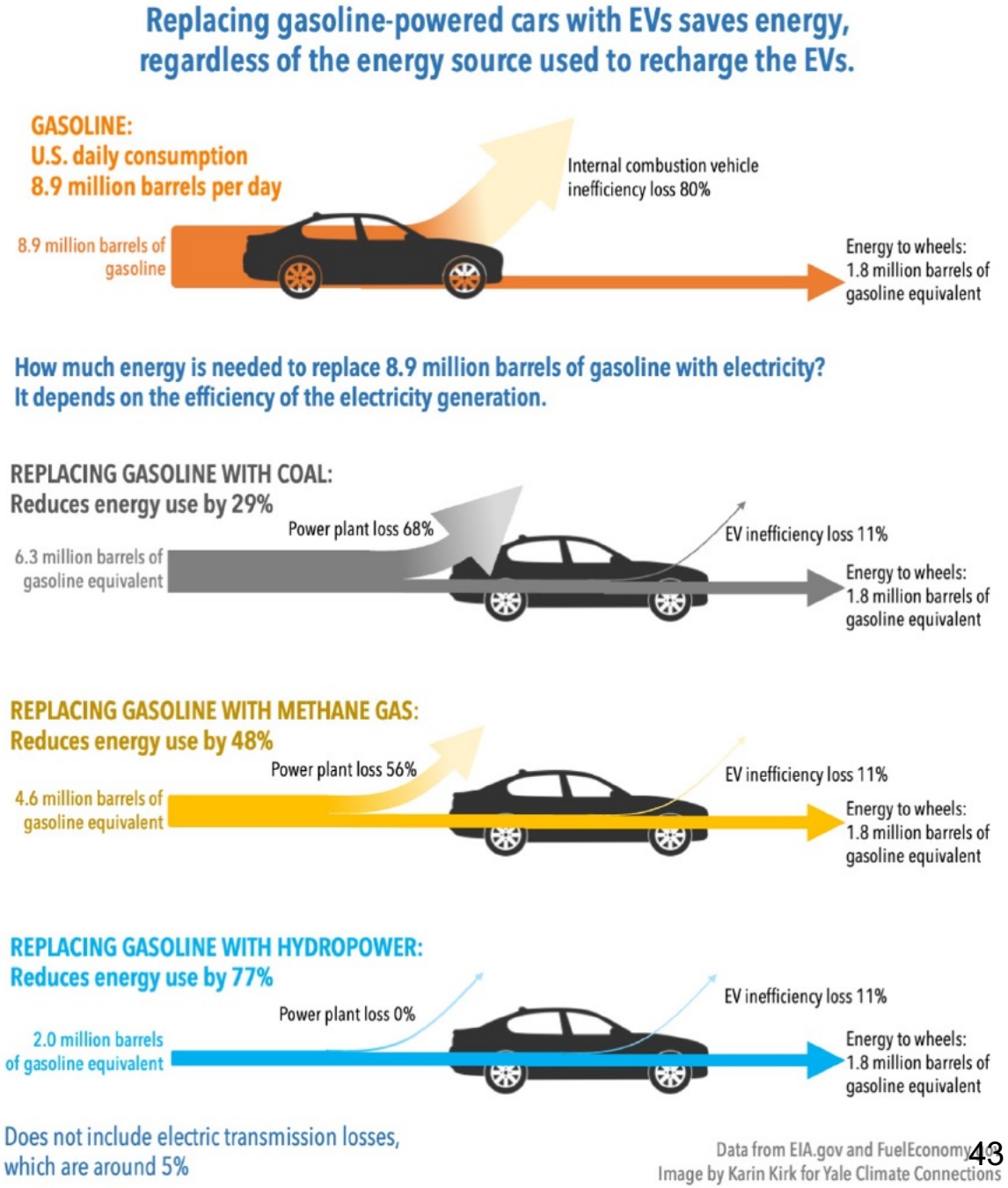
2. Ridurre il consumo di energia





Perché elettrificare?

3. Sfruttare le rinnovabili



Limiti dell’elettrificazione

- Fino al 92% di emissioni in meno nel ciclo di vita rispetto ai veicoli termici [1]
  - Se prodotti e alimentati con elettricità pulita e poi riciclati
- Emissioni operative
  - La rete elettrica non è ancora pulita
  - L’aumento previsto della domanda di trasporto può annullare le riduzioni
  - Congestione persistente, forte consumo di suolo per strade e parcheggi
- Emissioni incorporate e impatti
  - Il parco veicoli mondiale si rinnova in 15-20 anni
  - Il carbonio incorporato di VE e infrastrutture di ricarica sposta il problema in un altro settore: l’industria
  - Servono molta innovazione e impegno per una produzione pulita
  - Forte domanda di minerali critici (con propri problemi di sostenibilità)

[1] "Lifecycle Emissions Study: EVs vs. Conventional Vehicles." Great Plains Institute, 1 July 2025, betterenergy.org/electric-vehicle-lifecycle-analysis.

Scenario projections

Current Policies Scenario | Stated Policies Scenario

EV market | EV charging | EV energy impact

Cars | 2 and 3 wheelers | Vans | Buses | Trucks

EV sales projections

EV sales, cars

2025
21
million sales

2035
49
million sales

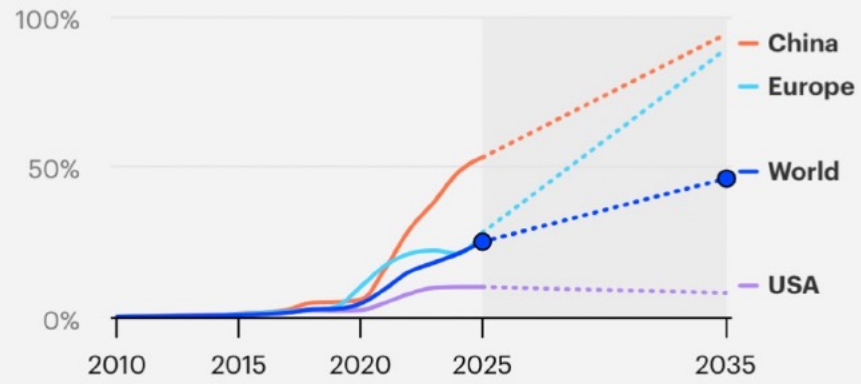
EV fleet projections

EV stock, cars

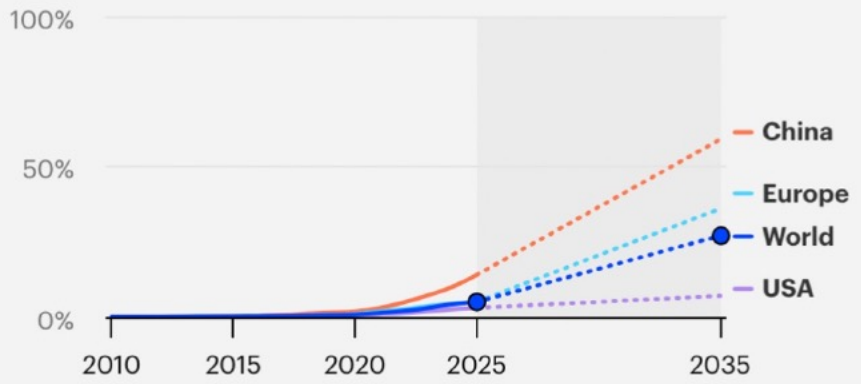
2025
75
million vehicles

2035
450
million vehicles

EV sales share, cars

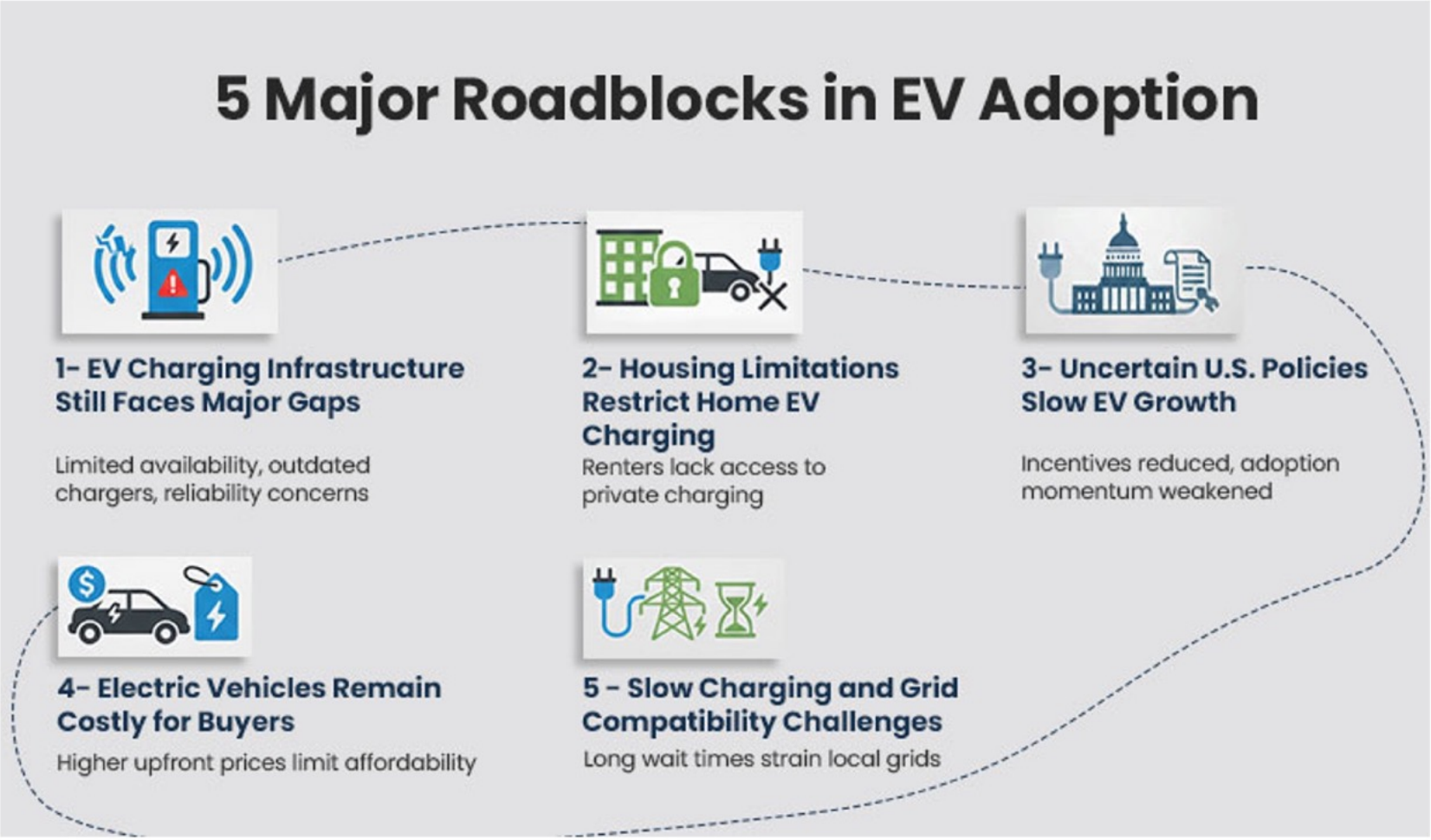


EV stock share, cars



"Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA." IEA, May 2026, www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer.

Le sfide dell'elettrificazione dei veicoli negli USA

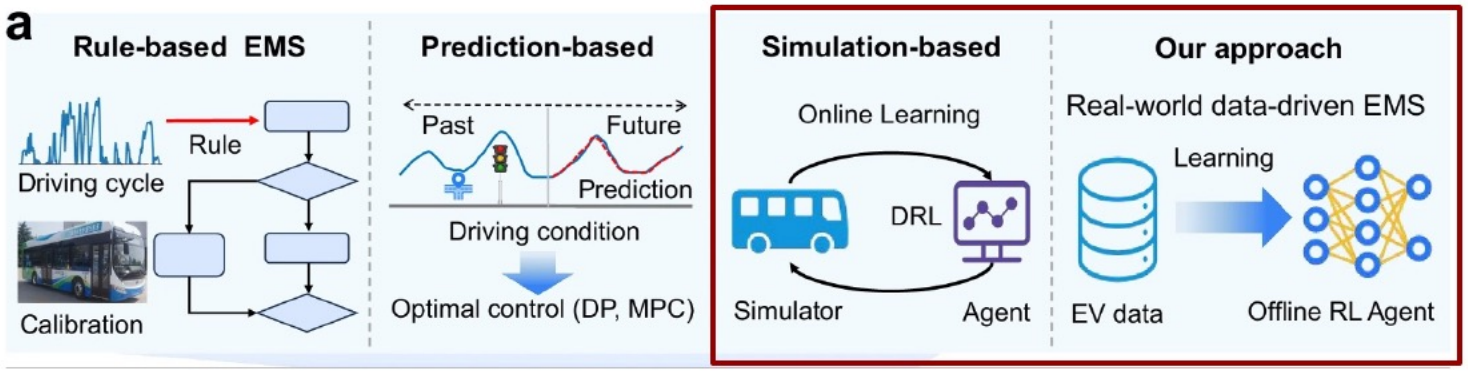


Fonte: SolarSME, 2026

[1] M. Liu et al., "Tariffs on electric vehicles deepen woes of U.S. electrification stagnation," npj Clim. Action, 2026, doi: 10.1038/s44168-025-00330-6.

Efficienza e durata delle batterie

- Aumentare autonomia e durata delle batterie allocando l'energia con apprendimento per rinforzo (RL)
- L'approccio potrebbe sfruttare la piattaforma cinese di monitoraggio dei VE, che raccoglie in tempo reale dati operativi da oltre 20 milioni di VE



Perché il problema si presta al RL profondo

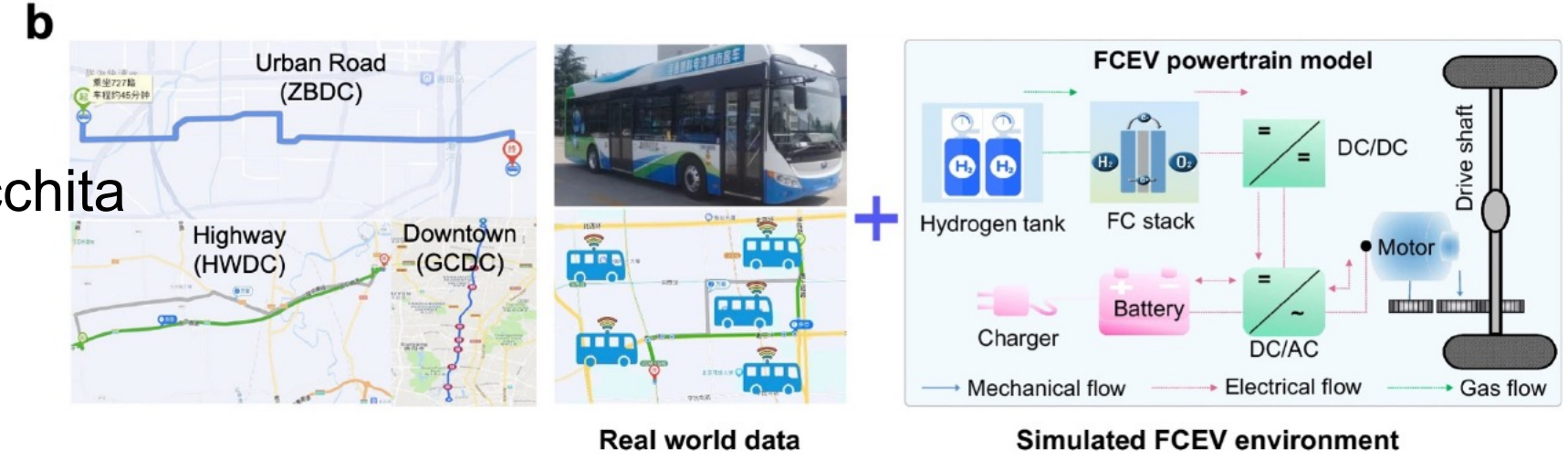
- Condizioni di traffico dinamiche → decisioni sequenziali
- Propulsori ibridi complessi (batteria, cella a combustibile, termico) → apprendere dai dati
- Applicazione in tempo reale → inferenza rapida dei modelli di ML

[1] X. Hu et al. Reinforcement Learning for Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Management: Recent Advances and Prospects. IEEE Industrial Electronics Magazine 13, 16-25 (2019). https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2913015 .

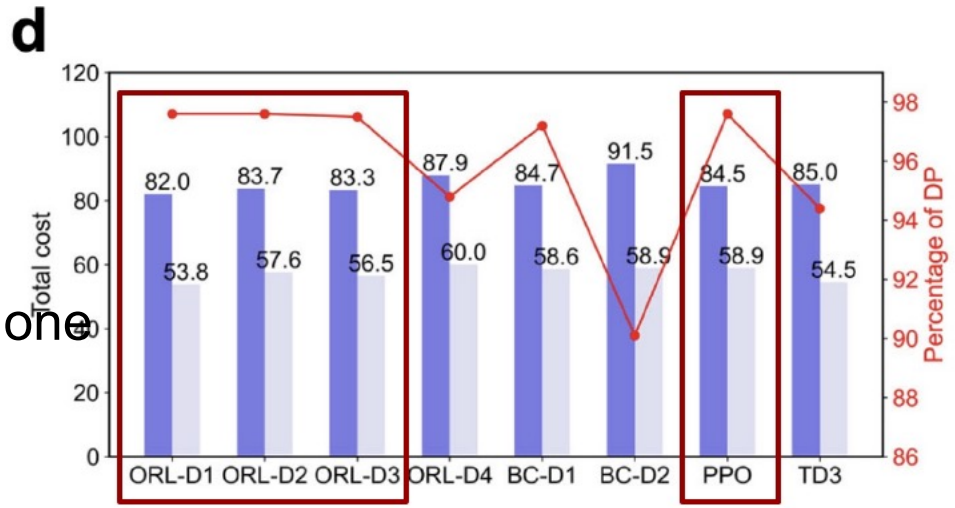
[2] Y. Wang, J. Wu, H. He, Z. Wei, and F. Sun, "Data-driven energy management for electric vehicles using offline reinforcement learning," Nat Commun, vol. 16, no. 1, p. 2835, Mar. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58192-9.

Efficienza e durata delle batterie

Simulazione arricchita dai dati



Il RL ottiene prestazioni quasi ottimali (calcolate con programmazione dinamica)

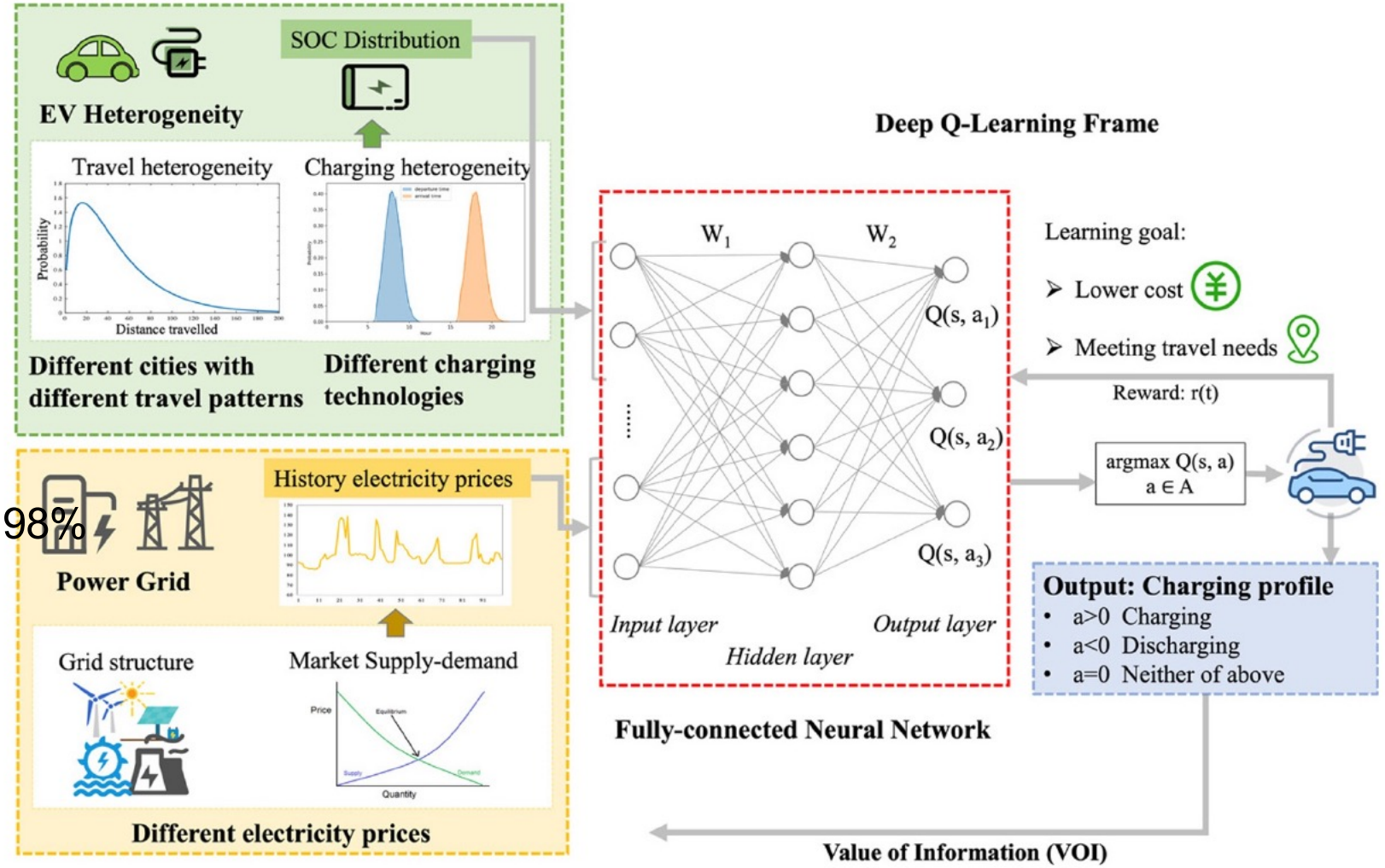


Risultato: il RL riduce il costo totale del 13% rispetto al controllore di serie
Avvertenza: il metodo di serie non considera la durata della batteria, il RL sì (penalizza la pendenza di potenza)

[1] Y. Wang, J. Wu, H. He, Z. Wei, and F. Sun, “Data-driven energy management for electric vehicles using offline reinforcement learning,” Nat Commun, 2025.

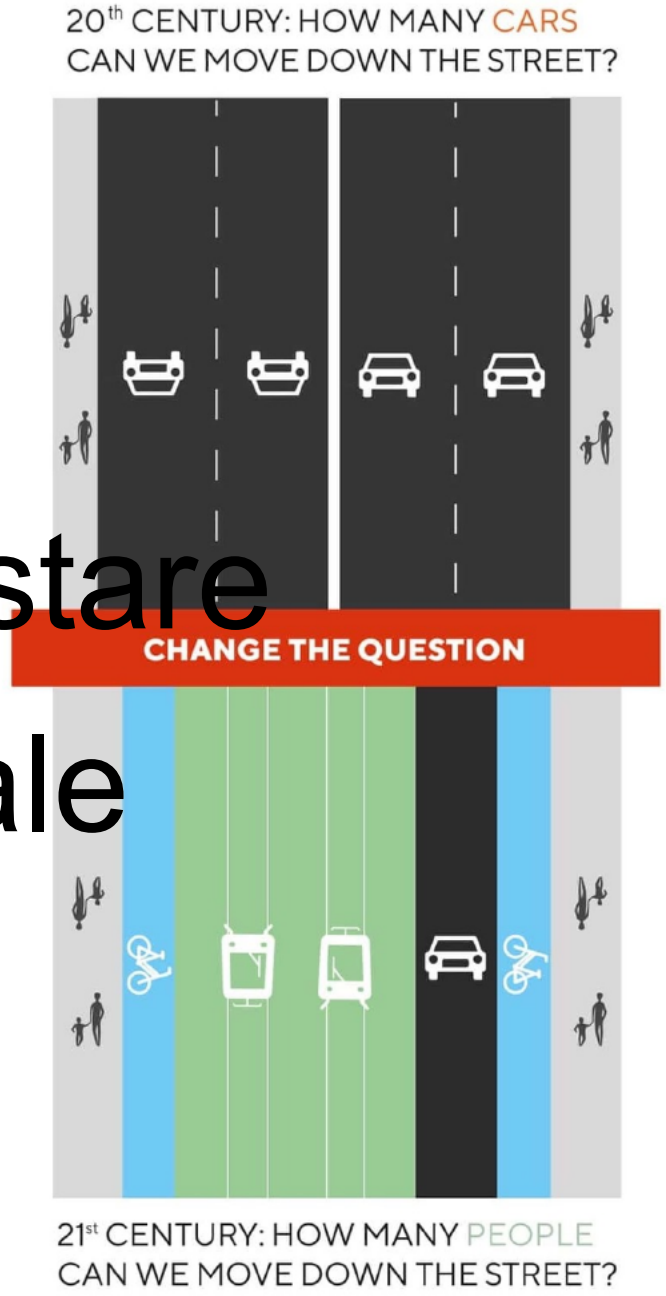
Ricarica intelligente / bidirezionale (V2G)

- I VE possono fungere da accumulo distribuito per spostare il carico urbano
- Q-learning profondo (DQN) per apprendere politiche di carica/scarica con prezzi e vincoli di mobilità
- 1 milione di km di dati di guida di VE cinesi
- La politica DQN ha risparmiato il 98% sul costo dell'elettricità rispetto alla ricarica il prima possibile (riferimento debole)



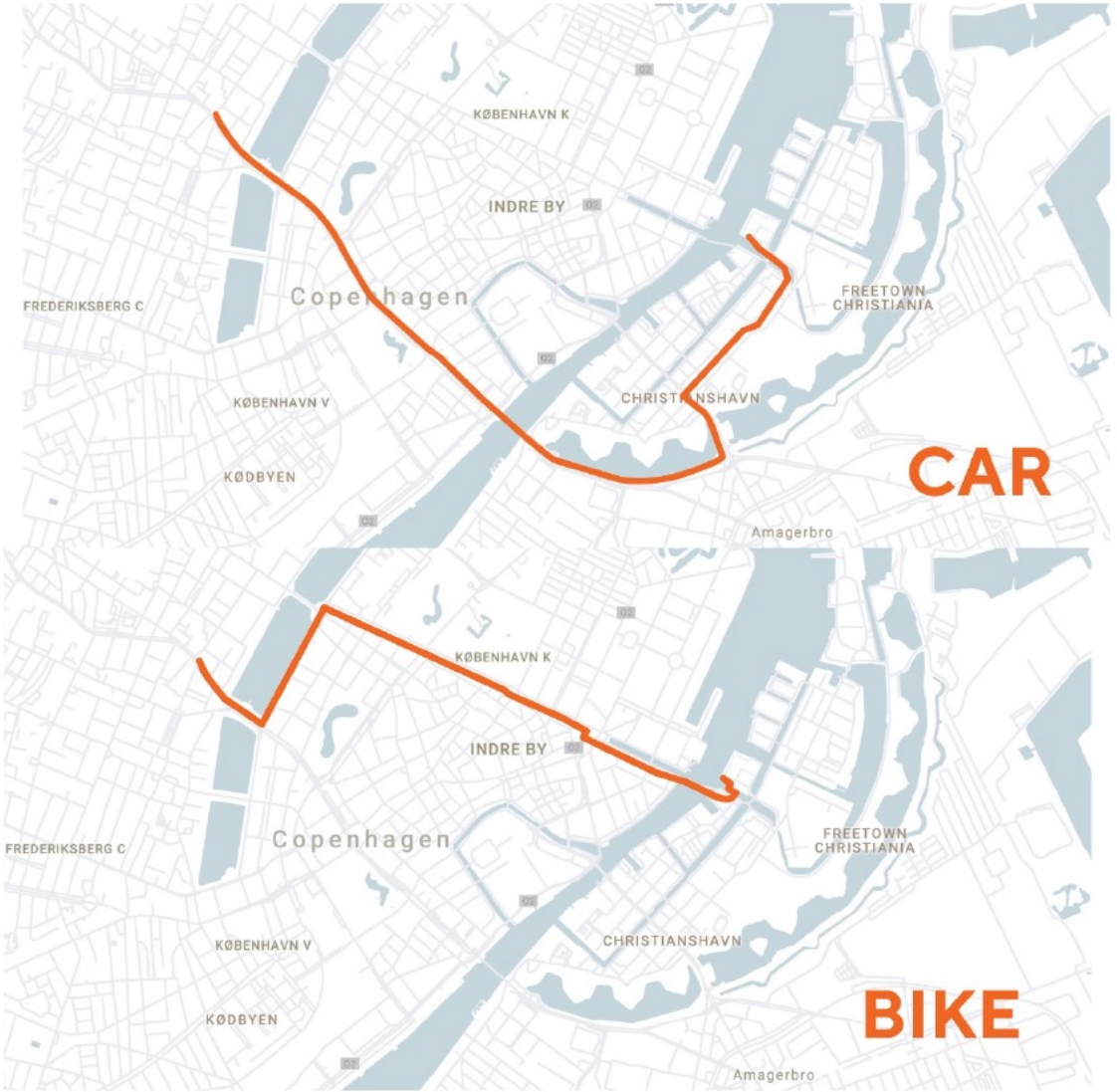
Hao, Xu, et al. "A V2G-oriented reinforcement learning framework and empirical study for heterogeneous electric vehicle charging management." Sustainable Cities and Society, vol. 89, 1 Feb. 2023, p. 104345, doi:10.1016/j.scs.2022.104345.

Approfondimento: Spostare L'IA per il cambio modale



Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

Perché la bici? (Copenaghen, Danimarca)





Fonte: Copenhagenize Design Company/Mikael Colville-Andersen, 2018.

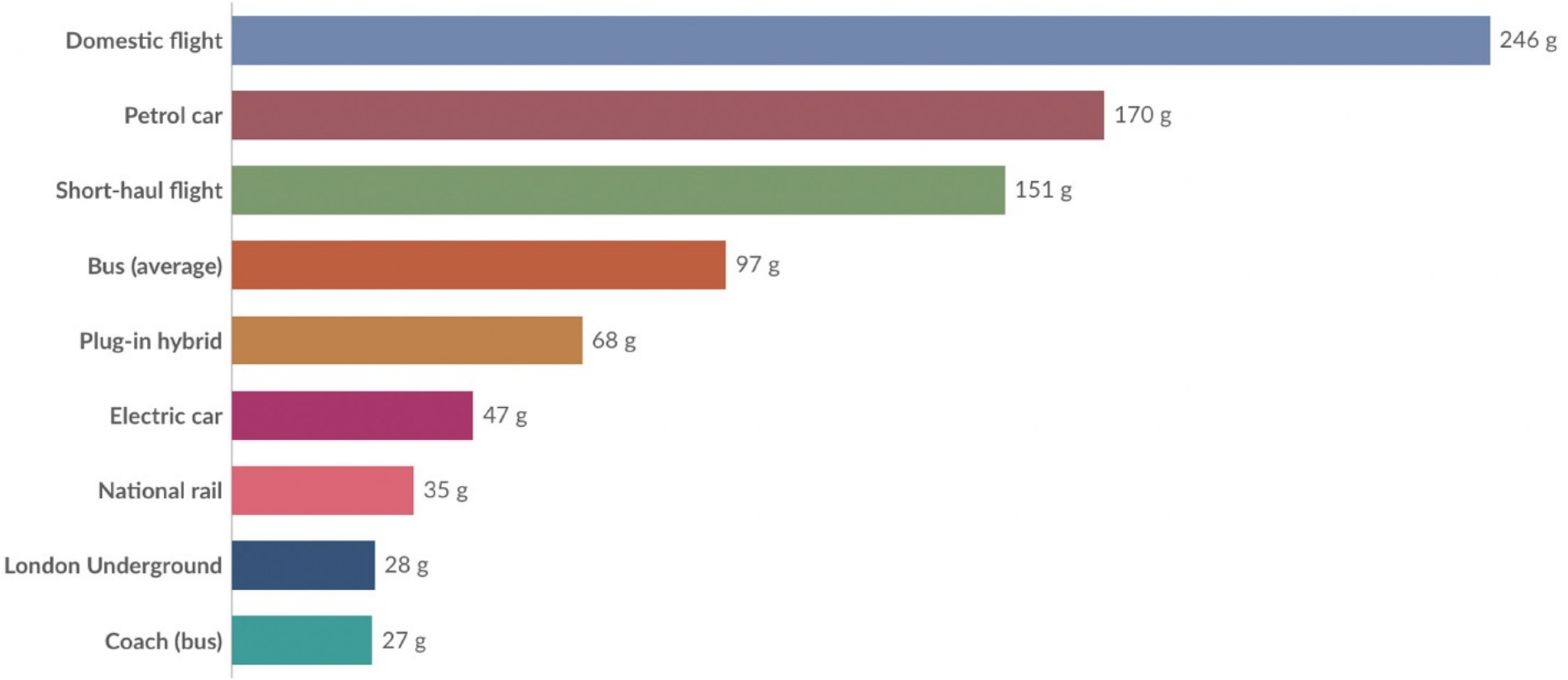
Carbon footprint of travel per kilometer, 2022

The carbon footprint of travel is measured in grams of carbon dioxide-equivalents per passenger kilometer. This includes the impact of increased warming from aviation emissions at altitude.

Our World in Data

Table | Bar

Edit countries and regions



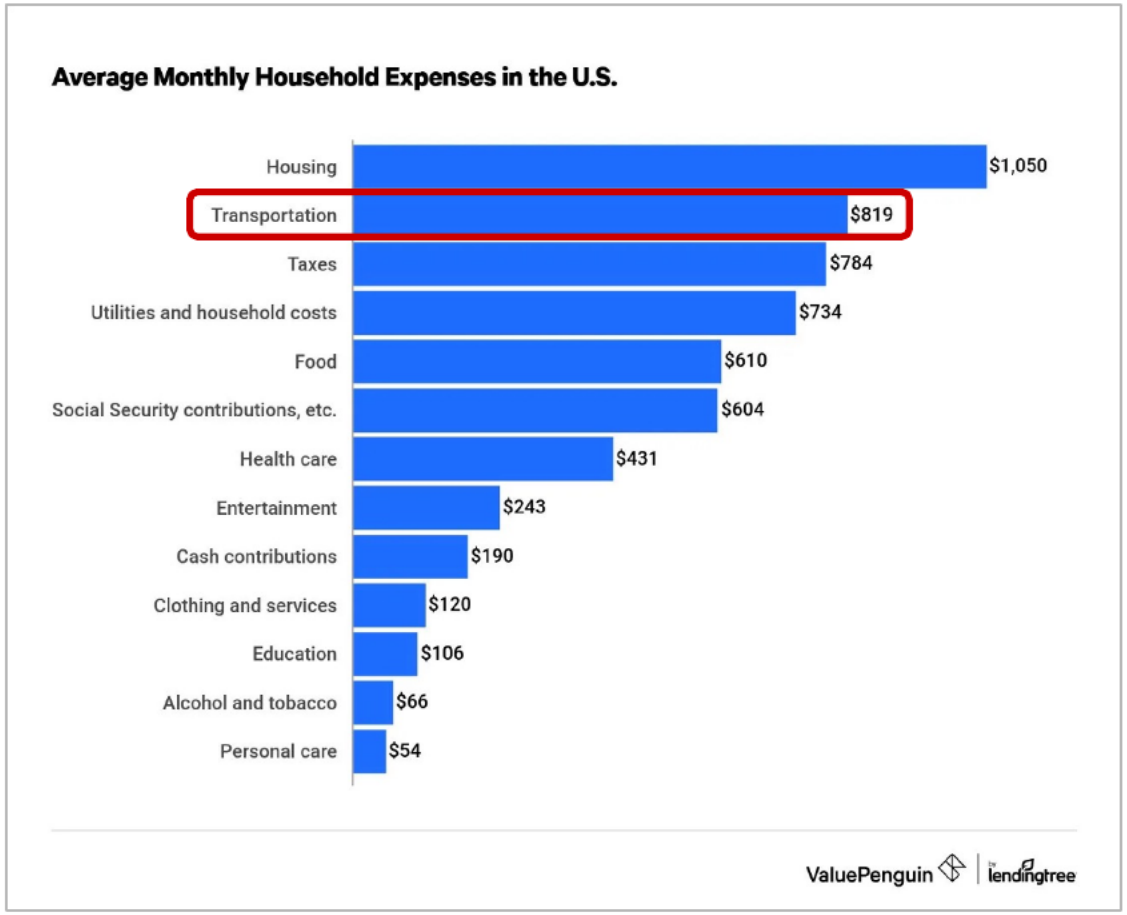
Data source: UK Government, Department for Energy Security and Net Zero (2022) – Learn more about this data

Note: Official conversion factors used in UK reporting. These factors will vary across countries depending on energy mix, transport technologies, and occupancy of public transport. Data for aviation is based on economy class.

OurWorldinData.org/transport | CC BY

Accessibilità economica e accesso

Nel 2024 il 45,5% delle famiglie statunitensi non guadagnava abbastanza per arrivare a fine mese.



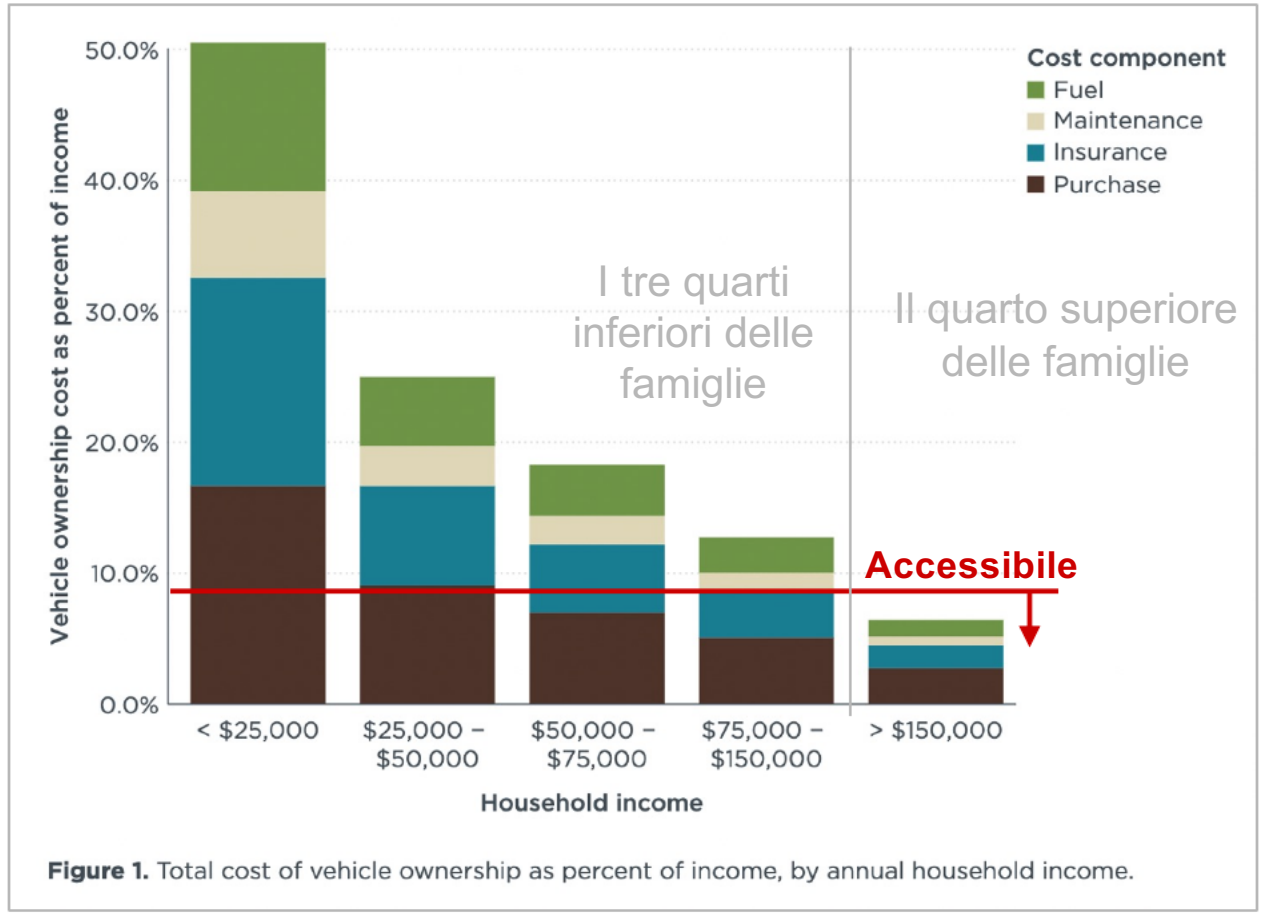


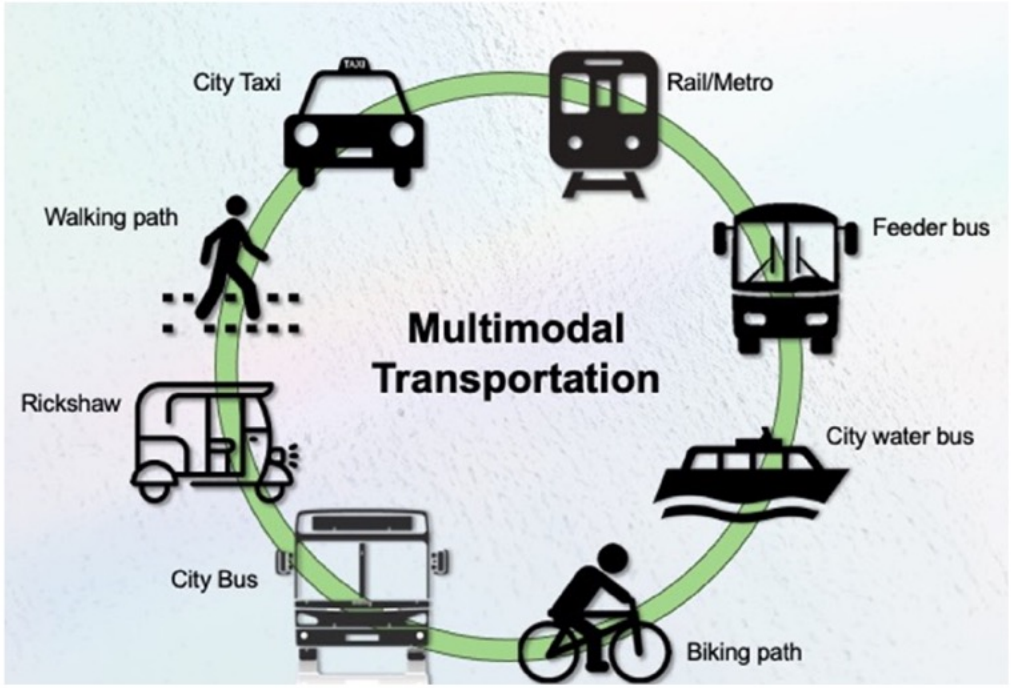
Figure 1. Total cost of vehicle ownership as percent of income, by annual household income.

[1] "States of Affordability: A series on where and why US households struggle to make ends meet | Brookings." Brookings, 24 June 2026, www.brookings.edu/articles/states-of-affordability-a-series-on-where-and-why-us-households-struggle-to-make-ends-meet .

[2] Bauer, Gordon, Chih-Wei Hsu, and Nic Lutsey. "When might lower-income drivers benefit from electric vehicles? Quantifying the economic equity implications of electric vehicle adoption." International Council on Clean Transportation. Working Paper 6 (2021).

Mobilità urbana multimodale

- Definizione: un approccio ai trasporti che supporta tutti i modi di spostamento (veicoli privati, piedi, bici, trasporto pubblico, mobilità condivisa, combinazioni di modi, ecc.).
- Strategie
  - Trasporto pubblico
  - Progettazione stradale: piste ciclabili, road diet, priorità semaforica
  - Congestion pricing (Bloomberg sul congestion pricing di New York)
  - Pianificazione dei viaggi e orientamento in tempo reale
  - Mobilità come servizio (MaaS), incl. pagamento integrato
- Perché è difficile
  - *Integrazione fisica: i cambi devono essere rapidi, sicuri, comodi*
  - *Coordinamento istituzionale: molti enti pubblici e operatori privati*
  - *Interoperabilità dei dati: orari, tariffe, percorsi e aggiornamenti in tempo reale devono collegarsi*
  - *Modello di business: chi paga, chi ne beneficia, chi condivide i dati?*
  - *Equità e privacy: un servizio integrato non deve escludere utenti a basso reddito o con pochi dati*



Fonte: Audirac, Ivonne, et al. "Transportation and Mobility Modes." 2024.

[1] StreetLight, "Multimodal Transportation: What Is It, and How Does It Benefit Everyone?", 2024, www.streetlightdata.com/what-is-multimodal-transportation.

L’IA per la simulazione dei trasporti basata su agenti

Previsione della domanda di spostamento

La previsione della domanda è fondamentale per valutare e pianificare i sistemi di trasporto

- Perché, quando e come si spostano le persone?

Perché

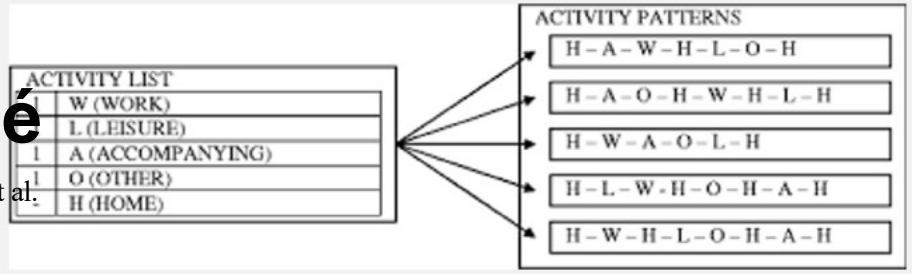


Immagine: Bifulco et al.

Quando

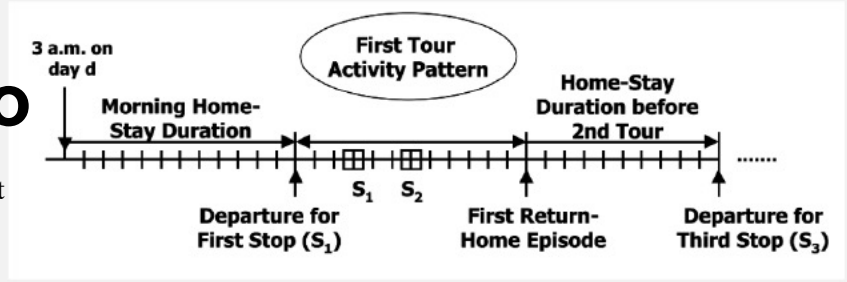


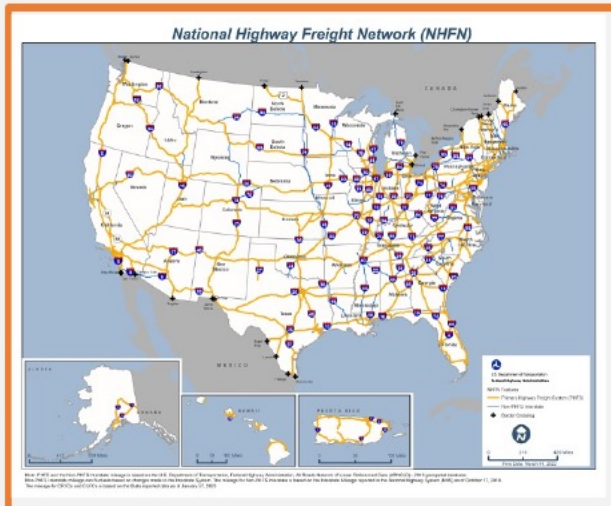
Immagine: Pinjari e Bhat

Come

$$U_c = \alpha T_c + \beta M_c + \varepsilon_c$$
$$U_b = \alpha T_b + \beta M_b + \theta_b Y + k_b + \varepsilon_b$$

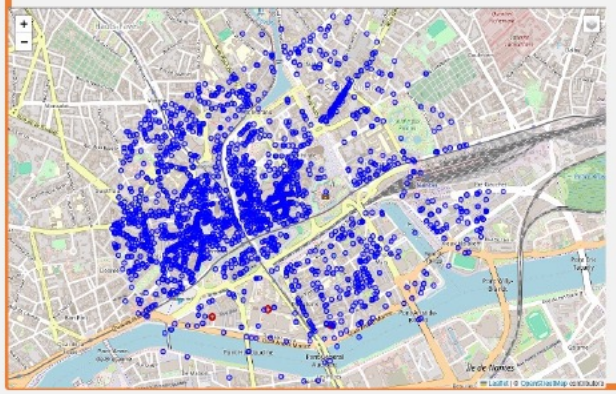
Immagine: Train

supporta



Modellazione del sistema

Immagine: FHWA



Dinamica Simulazione

Immagine: Matsim

Slide adattate da Tianming Liu (tianmliu@umich.edu)

Impatto della previsione della domanda di spostamento

La previsione della domanda guida le decisioni chiave di pianificazione e investimento degli enti pubblici, dal livello federale a quello locale.

Perché

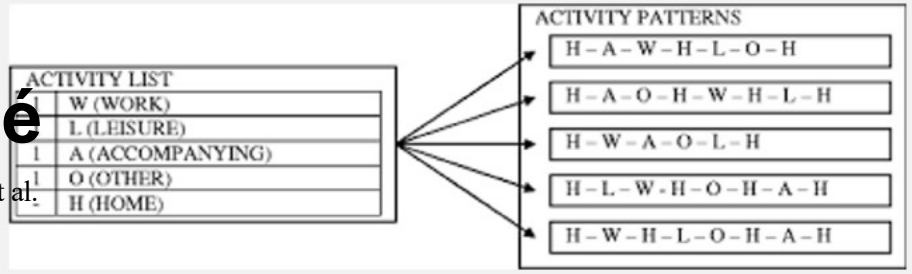


Immagine: Bifulco et al.

Quando

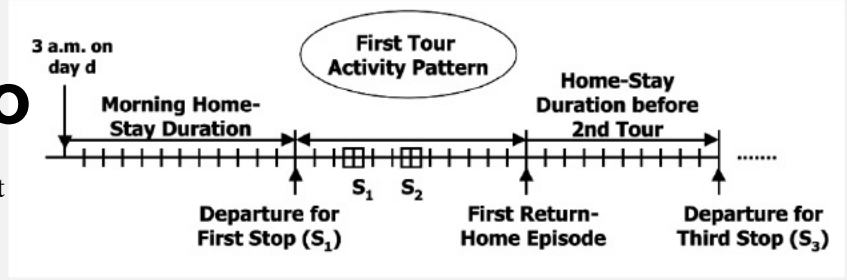


Immagine: Pinjari e Bhat

Come

$$U_c = \alpha T_c + \beta M_c + \varepsilon_c$$
$$U_b = \alpha T_b + \beta M_b + \theta_b Y + k_b + \varepsilon_b$$

Immagine: Train

Guida

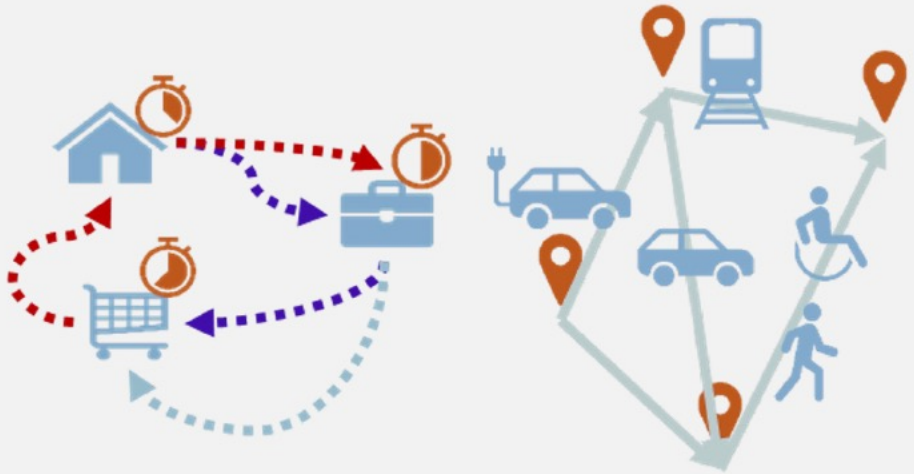


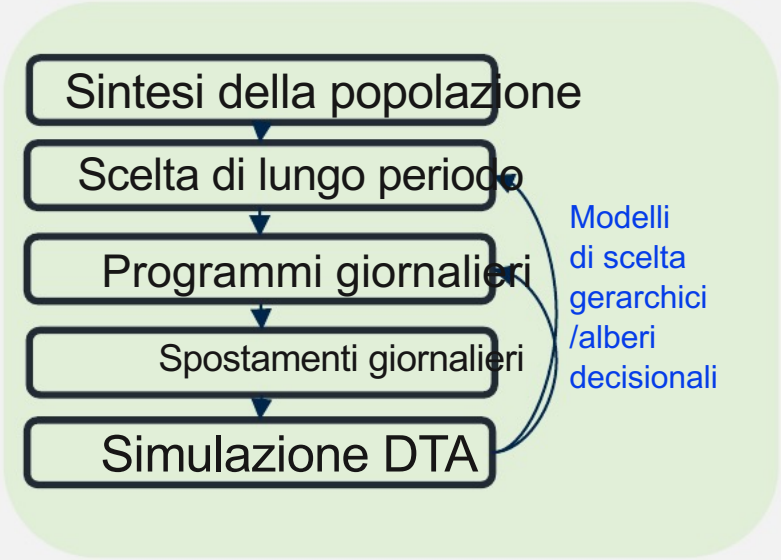


Slide adattate da Tianming Liu (tianmliu@umich.edu)

Modellazione della domanda basata sulle attività

- Il paradigma più avanzato della modellazione della domanda
- I lavori recenti usano soprattutto la simulazione basata su agenti





Gli agenti seguono regole condizione-azione codificate per programmare attività e spostamenti. Possono imparare, adattarsi e migliorare le interazioni con altri agenti e con l'ambiente dinamico.

Limiti degli approcci esistenti

- I limiti riguardano soprattutto le ipotesi e la **complessità di impostare un buon modello**

Ipotesi di modello necessarie

Esempio: modello MNL

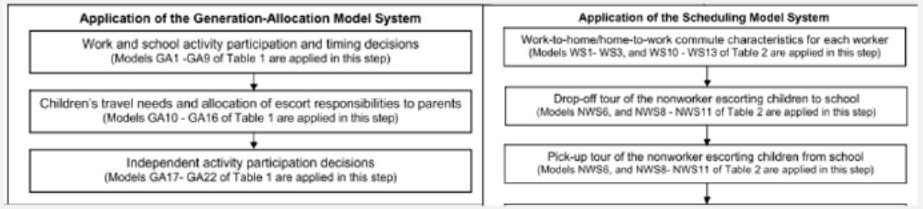
Assumption 1:
- We assume that the error terms each follow the Type-2 extreme value distribution (Gumbel distribution):
  - $\epsilon_{1n} \sim Gumbel(\eta, \mu)$
  - $\epsilon_{2n} \sim Gumbel(\eta, \mu)$

Assumption 2:
- We assume that ϵ_{1n} and ϵ_{2n} are independent and identically distributed (i.i.d.) across individuals, and independent of the attributes x_n.

I modelli richiedono ipotesi a priori per funzionare

Calibrazione complessa

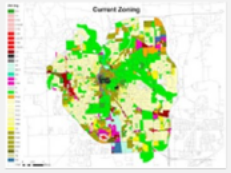
Esempio: un tipico ABM



In tutto, 49 modelli vanno calibrati per modellare i comportamenti di viaggio

Fabbisogno di dati complesso











Servono molti dati per costruire il modello (altrimenti i parametri vengono presi in prestito)

Agenti LLM e loro applicazioni nella simulazione

Simulacri del comportamento umano

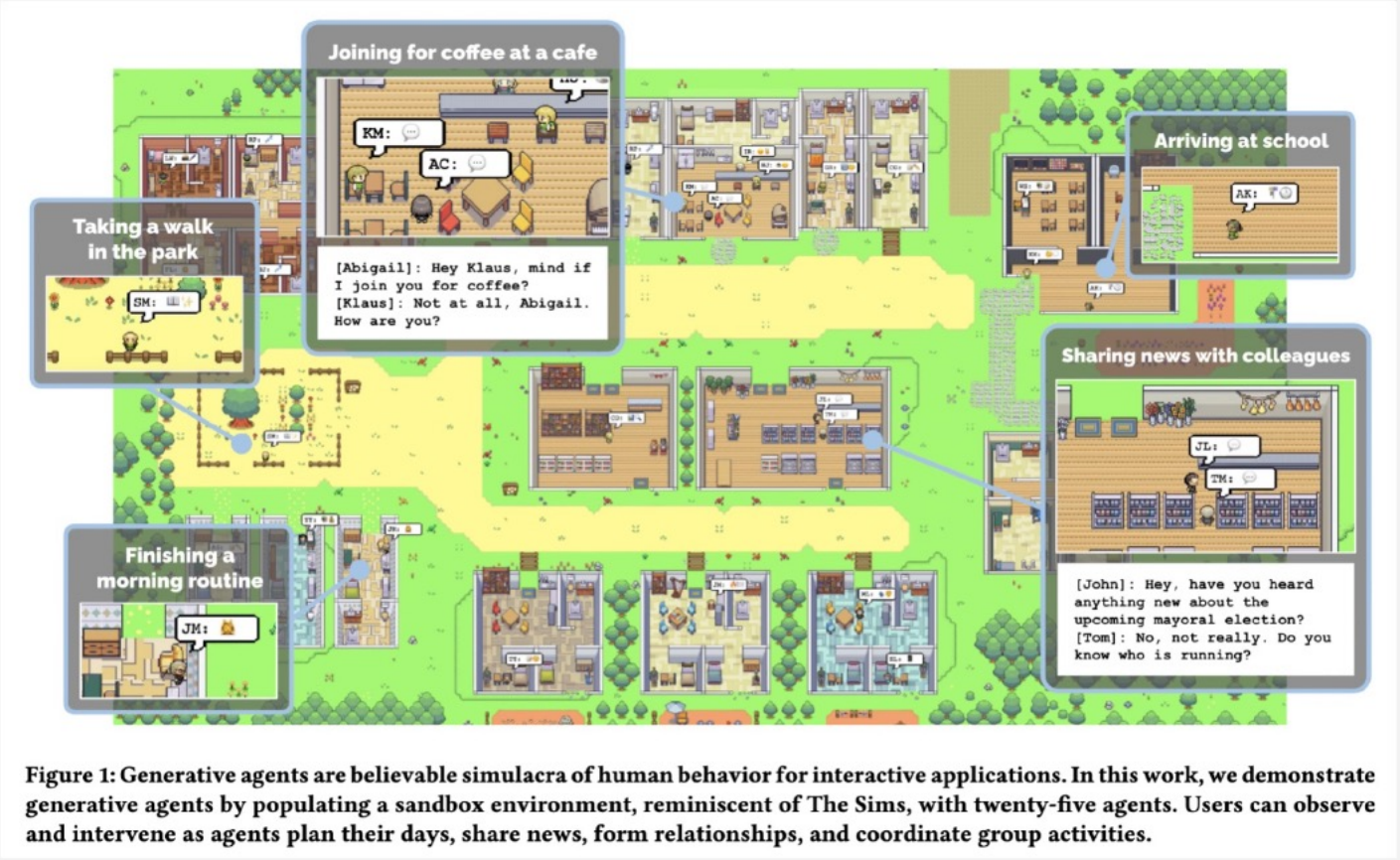


Figure 1: Generative agents are believable simulacra of human behavior for interactive applications. In this work, we demonstrate generative agents by populating a sandbox environment, reminiscent of The Sims, with twenty-five agents. Users can observe and intervene as agents plan their days, share news, form relationships, and coordinate group activities.

Gemini

Qwen3

gioco di ruolo



J. S. Park, et al., "Generative agents: Interactive simulacra of human behavior," in Proceedings of the 36th annual acm symposium on user interface software and technology, 2023.
Grossmann, et al., AI and the transformation of social science research, Science, 2023, 380 (6650).

Slide adattate da Tianming Liu (tianmliu@umich.edu)

L’LLM come sostituto del comportamento umano

- Ipotesi chiave: gli LLM potrebbero fungere da «campioni di silicio»
- Il motivo principale è che gli LLM hanno tre proprietà chiave:

Imitazione nell’apprendimento



Interazione di tipo umano



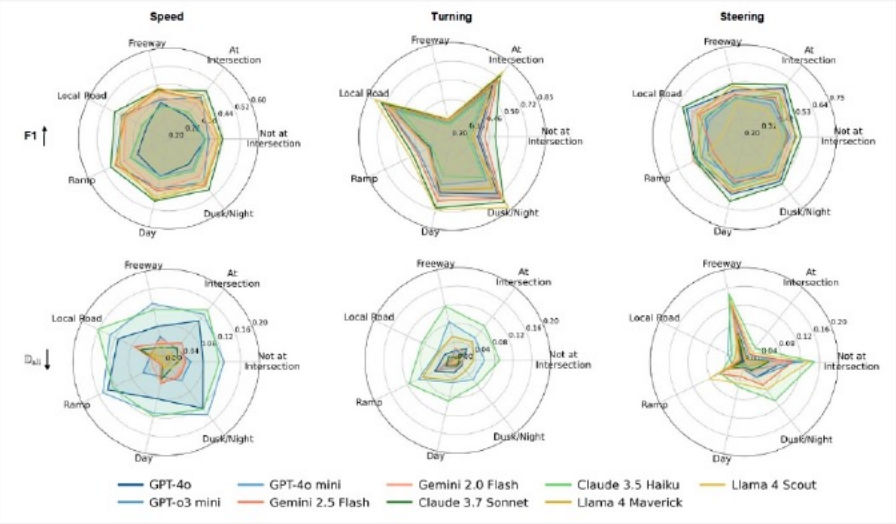
Seguire istruzioni e gioco di ruolo



Domanda critica: quanto si allineano al comportamento di viaggio umano?

* Grossmann, et al., AI and the transformation of social science research, Science, 2023, 380 (6650).
** Hutson, M., Can AI chatbots replace human subjects in behavioral experiments. Science, 2023, 381(6654).

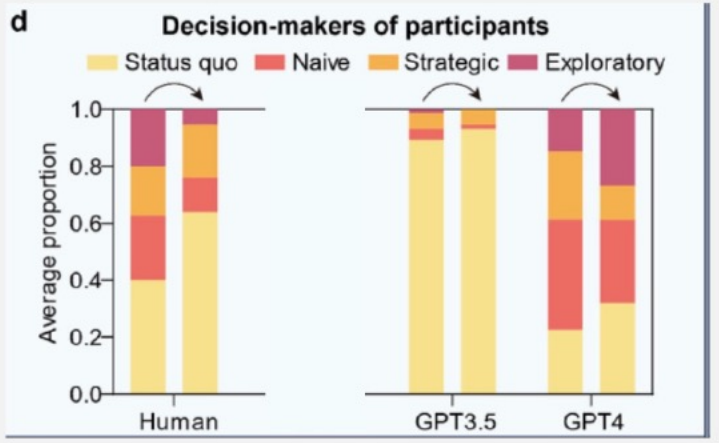
Gli LLM sembrano umani ma non lo sono autenticamente



Guida autonoma: più allineati ai conducenti aggressivi

Purpose	Income Elasticity			
	USDOT	Binsuwadan et al. (2023)*	Shires and de Jong (2009)**	GPT-4o
Commute	1	0.37	0.67	0.24
Business	1	0.53	0.47	0.21
Leisure	1	0.53	0.52	0.22
Personal	1	0.53	0.52	0.22

Valore del tempo: elasticità più basse



Giochi di congestione: imparare l'adattamento della scelta di percorso



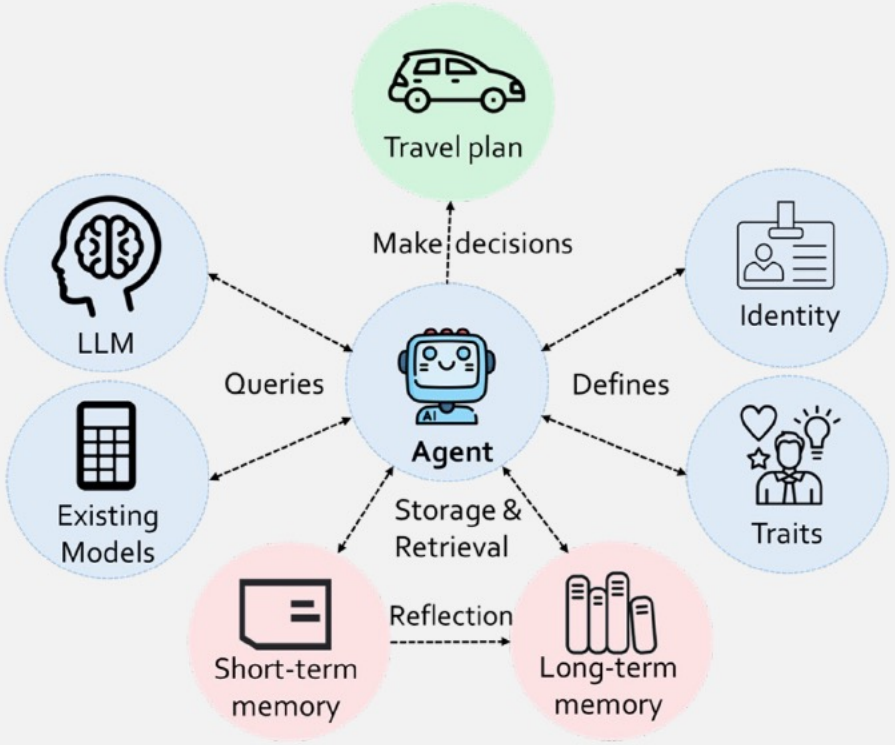
Etica della guida: bias nei principi

Serve allineamento

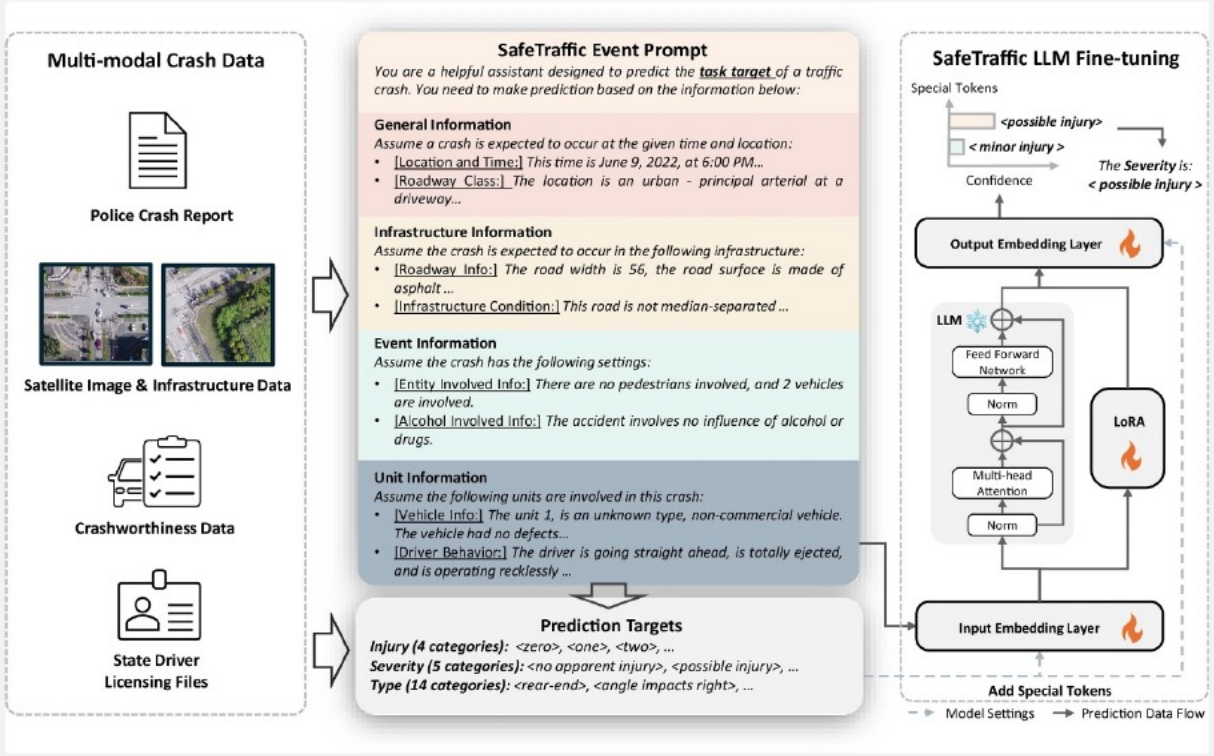


Wang, P., et al. "LLM agents can partially mimic human driving behaviors…." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 186 (2026): 105606.
Xu, Z. et al.. (2025). Where is morality on wheels? …. Travel Behaviour and Society, 40, 101039.
Wang, L. et al. (2025). Comparing AI and human decision-making mechanisms in daily collaborative experiments. Iscience, 28(6).
Yan, Y. et al. (2026). Valuing time in silicon: Can large language models replicate human value of travel time. Travel Behaviour and Society, 44, 101245.

Sviluppare LLM e agenti più umani



Agenti e ottimizzazione dei prompt per imitare i processi decisionali umani



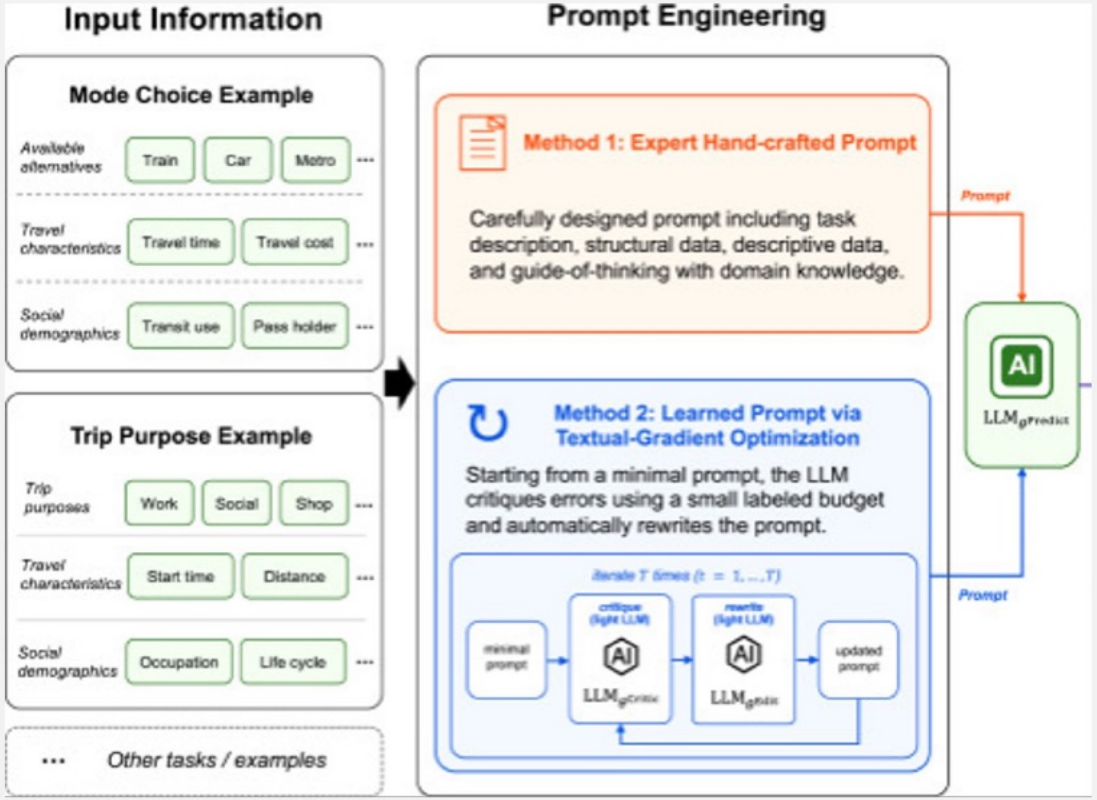
Post-addestramento perché gli LLM imitino le risposte umane

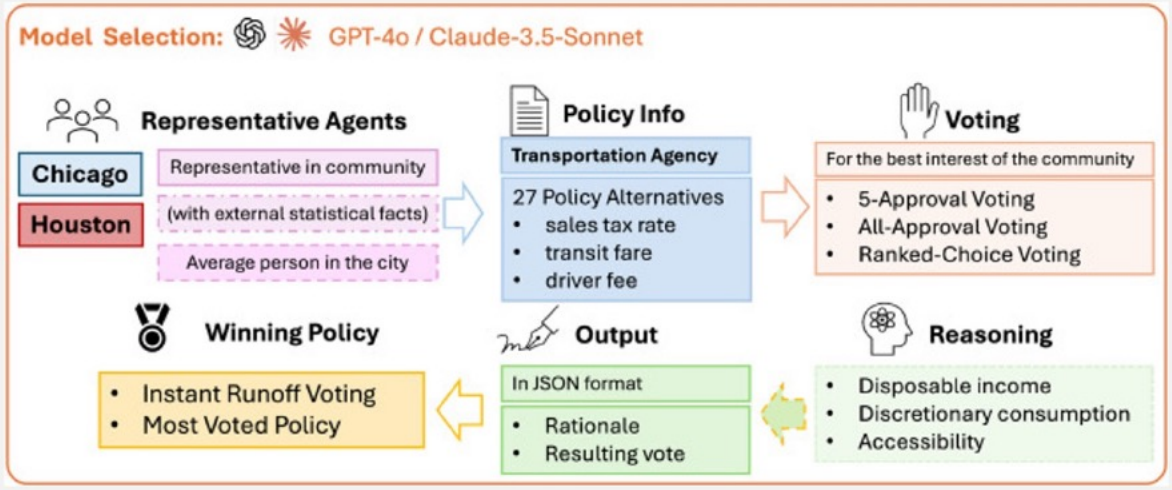
Liu, T. et. al. (2025). Toward LLM-agent-based modeling of transportation systems: A conceptual framework. Artificial Intelligence for Transportation, 1, 100001.

Zhao, Y, et al. (2025). SafeTraffic Copilot: adapting large language models for trustworthy traffic safety assessments and decision interventions. Nature Communications, 16(1), 8846.

Osservazioni della comunità finora

La conoscenza interna e il gioco di ruolo degli LLM possono facilitare la previsione dei comportamenti di viaggio e la pianificazione dei trasporti





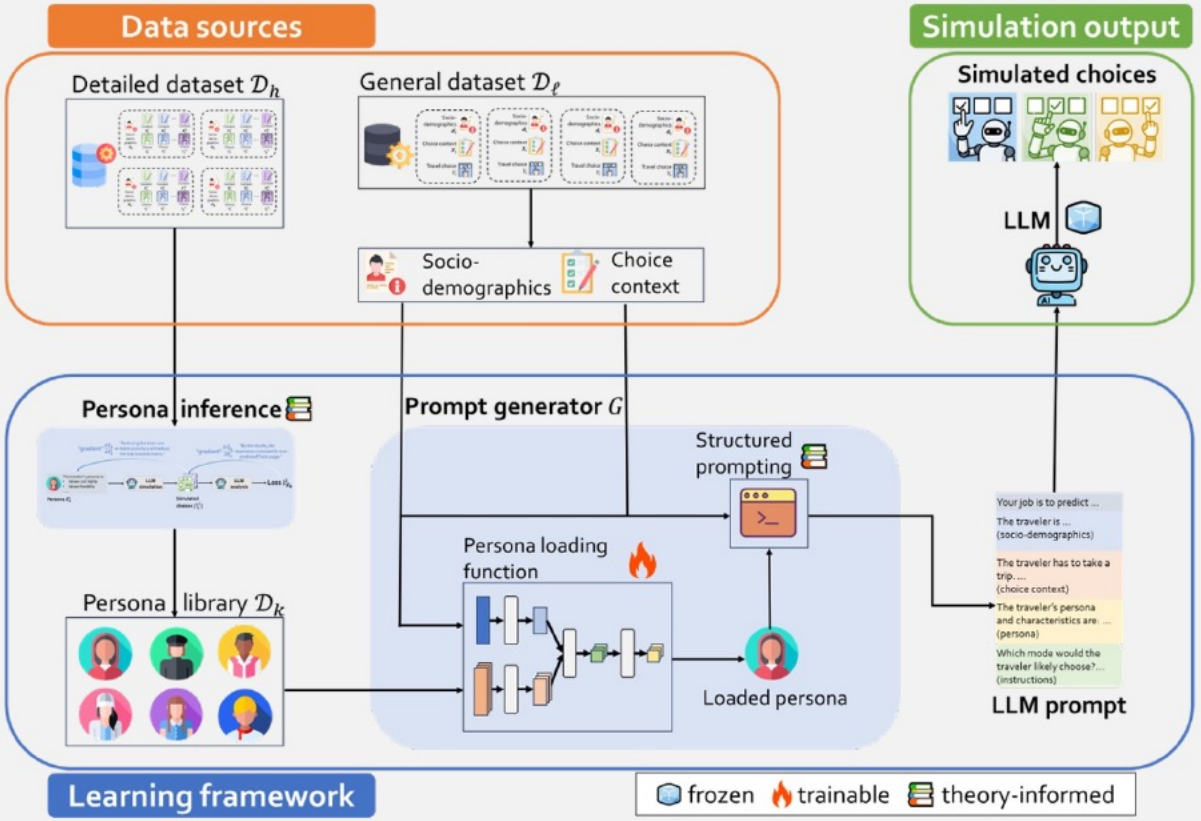
Gli agenti LLM possono fungere da agenti rappresentativi nella pianificazione dei trasporti per ridurre il bias di partecipazione

Gli LLM possono usare la conoscenza interna per simulare i comportamenti di viaggio

Mo.B. et al. (2026) Large language models for travel behavior prediction. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 38, 102124.
Yan, X., Dai, T., & Nie, Y. M. (2026). Addressing the alignment problem in transportation policy making: an LLM approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 188, 1
Cho, J. H., & Wu, C . (2026). AGORA: Can Deliberation and Governance Gates Absorb Participation Bias in Transit Planning?. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference.

Osservazioni della comunità finora

Addestrati con pochi dati umani, gli agenti LLM possono prevedere la domanda meglio dei modelli esistenti.



- Agli agenti LLM bastano pochi dati umani per simulare bene le scelte di viaggio
- Allentando le ipotesi comportamentali, gli agenti LLM si adattano a viaggiatori dai comportamenti diversi
- Con memoria, archetipi comportamentali e post-addestramento su dati umani, gli agenti LLM individuano schemi e intenzioni nelle tracce di mobilità e prevedono bene le traiettorie

Liu, T. et. al. (2026). Aligning LLM with Humans for Travel Choices: A Persona-Based Embedding Learning Approach. TransportationScience, Articles in Advance.
Liu, T. et al. (2026). Aligning LLM agents with human learning and adjustment behavior: a dual agent approach. TransportationResearch Part C: Emerging Technologies, 191, 105818.
Qin, Z. et.la. (2026). A foundational individual mobility prediction model based on open-source LLMs. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 185, 105562.
Wang, J. et al.. (2024). Large language models as urban residents: An llm agent framework for personal mobility generation. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 124547-124574.

Sfide

Fondamenti e casi d’uso

- Individuare il caso d’uso migliore e i compromessi degli LLM: dove rendono di più e quando conviene applicarli
- Sviluppare approcci e procedure unificati per applicare gli LLM in contesti diversi

Validazione

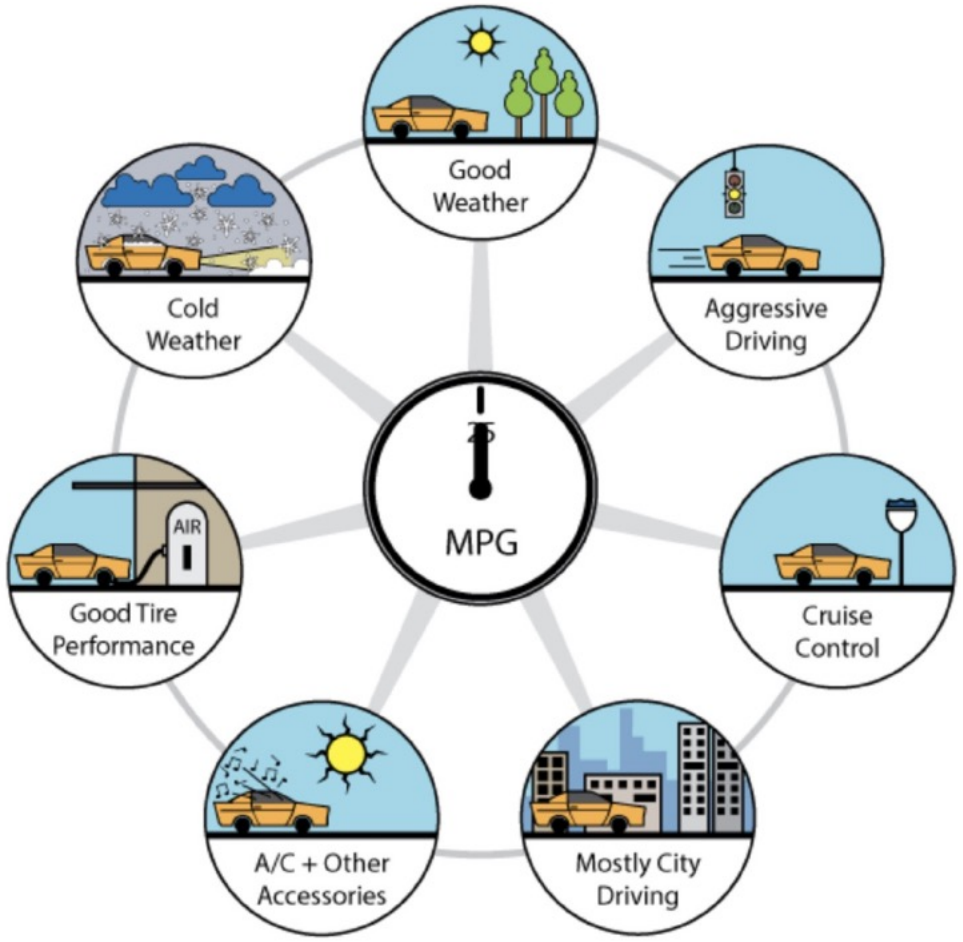
- Benchmark sistematico delle capacità e prestazioni degli LLM
- Andare oltre il comportamento osservato verso l’allineamento dei valori

Scalabilità

- Ridurre costo computazionale, consumo energetico e latenza per applicazioni su larga scala

Approfondimento: Migliorare L’IA per l’efficienza dei trasporti

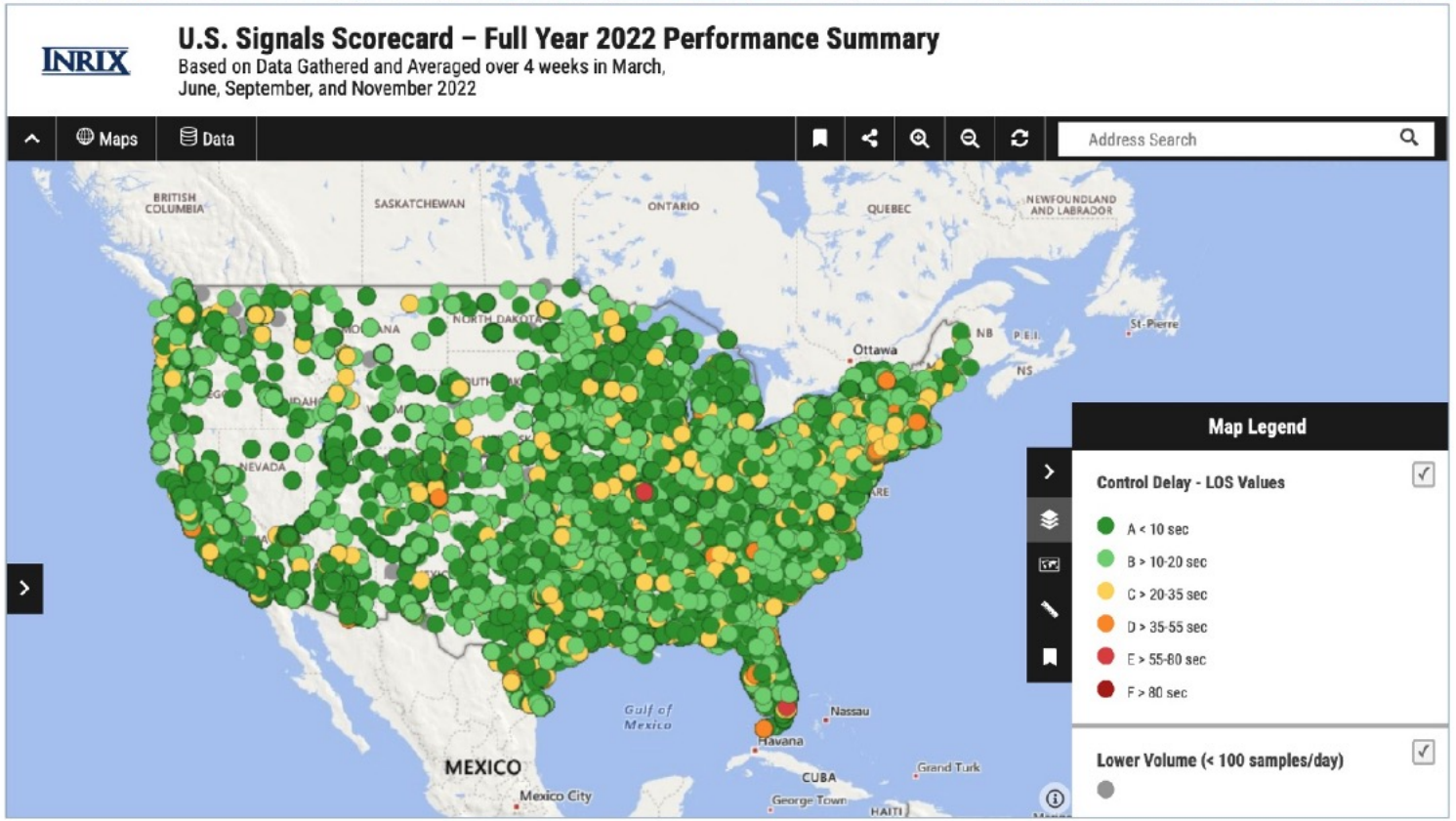
Fattori che influenzano i consumi



Fonte: US EPA, “Your Mileage May Vary,” 2026.

INRIX U.S. Signals Scorecard

2022 Annual Summary



Inputs

~5 Billion
Total Number of Observed Crossings Used to Generate Results

~10 Million
Number of Connected Vehicles Providing Location and Movement Data



242,757
Signalized Intersections Analyzed

All 50 States
(Plus District of Columbia)

400+ Regions

1,150+ Counties

Results

23,308
Intersection Avg Daily Traffic

18.1
Seconds of Delay Per Vehicle

63.5%
Arrival on Green

117.4
Total Hours of Daily Delay

2.53 Days
Days to Generate 1 Metric Tonne of Carbon Emissions From Delay

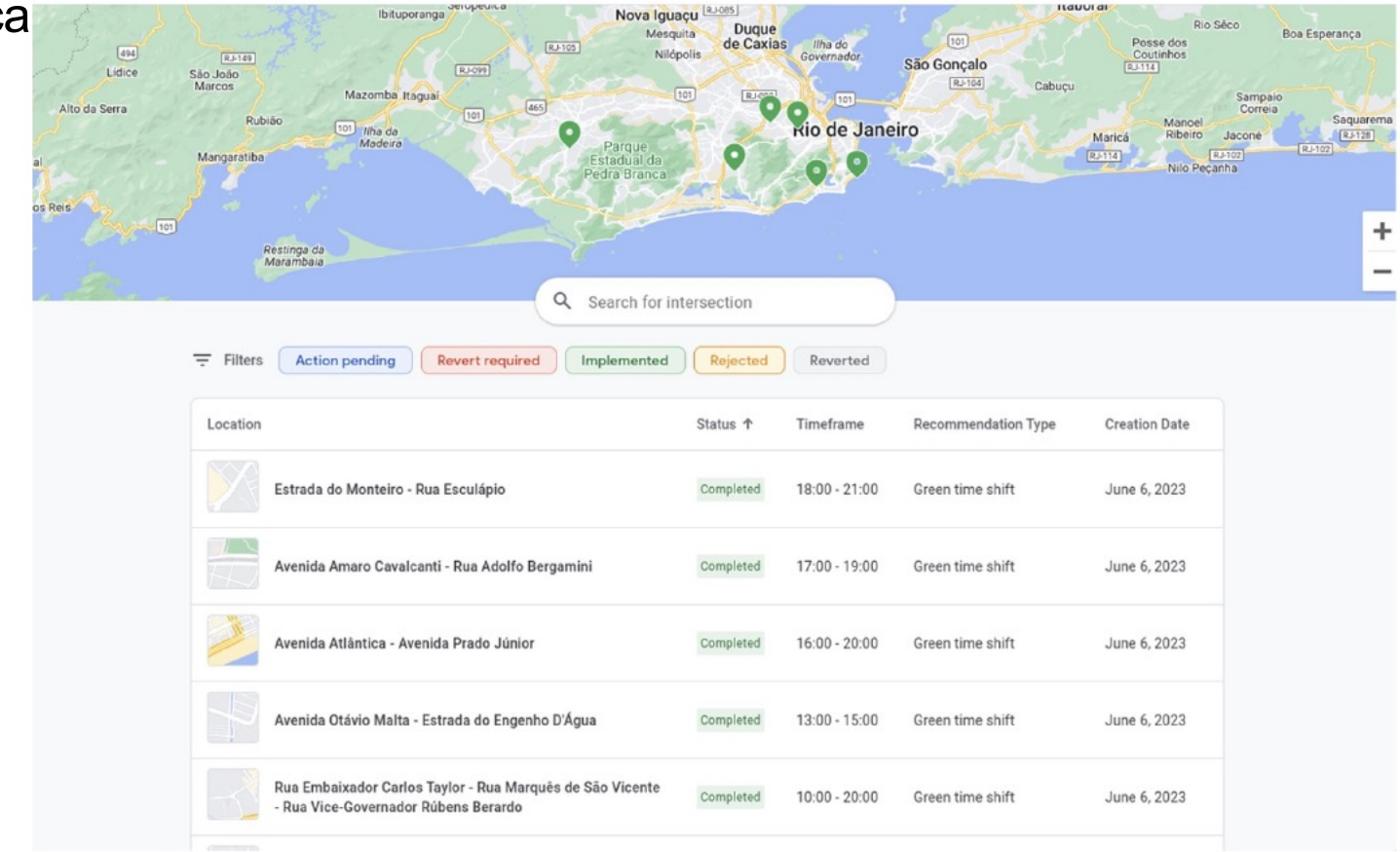
0.97 Days
Days to Consume 1 Barrel of Oil From Delay

Average Traffic Signal

INRIX U.S. Signals Scorecard: 2022 Annual Summary. INRIX. https://inrix.com/signals-scorecard/.

Project Green Light (Google AI)

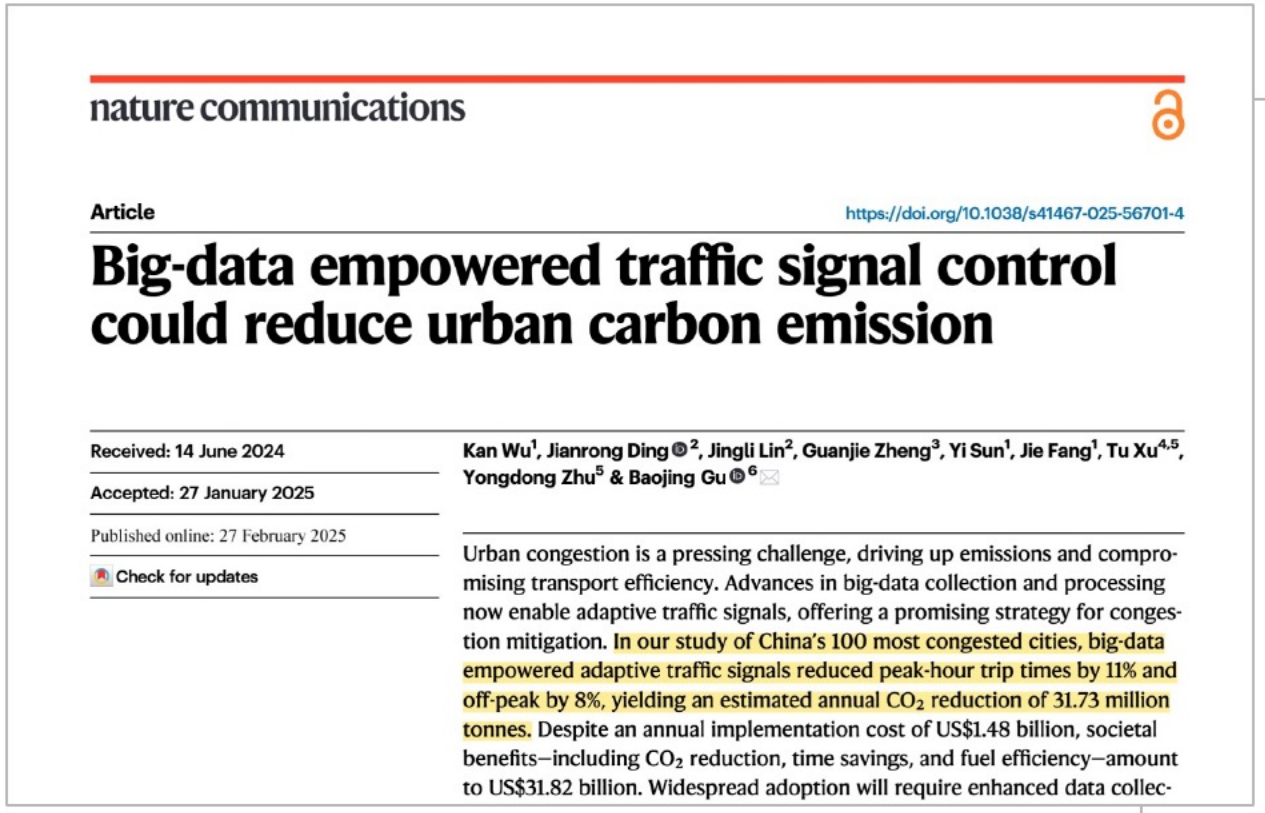
- Big data per la temporizzazione semaforica
  - Lanciato nel 2023; attivo in 20 città
  - Fino al 30% di fermate in meno e 10% di emissioni di gas serra in meno*
- Usa l'IA per dedurre i parametri attuali dei semafori a tempo fisso
  - Durata del ciclo
  - Tempo di transizione
  - Ripartizione del verde (tempo e ordine di precedenza)
  - Coordinamento
  - Funzionamento dei sensori (attuazione)
- Fornisce raccomandazioni agli ingegneri del traffico comunali per regolare i parametri dei semafori



* Nessun audit indipendente disponibile

Google AI's Green Light. sites.research.google/gr/greenlight.

L’IA per l’ottimizzazione semaforica



nature communications

Article

https://doi.org/10.1038/s41467-025-56701-4

Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission

Received: 14 June 2024

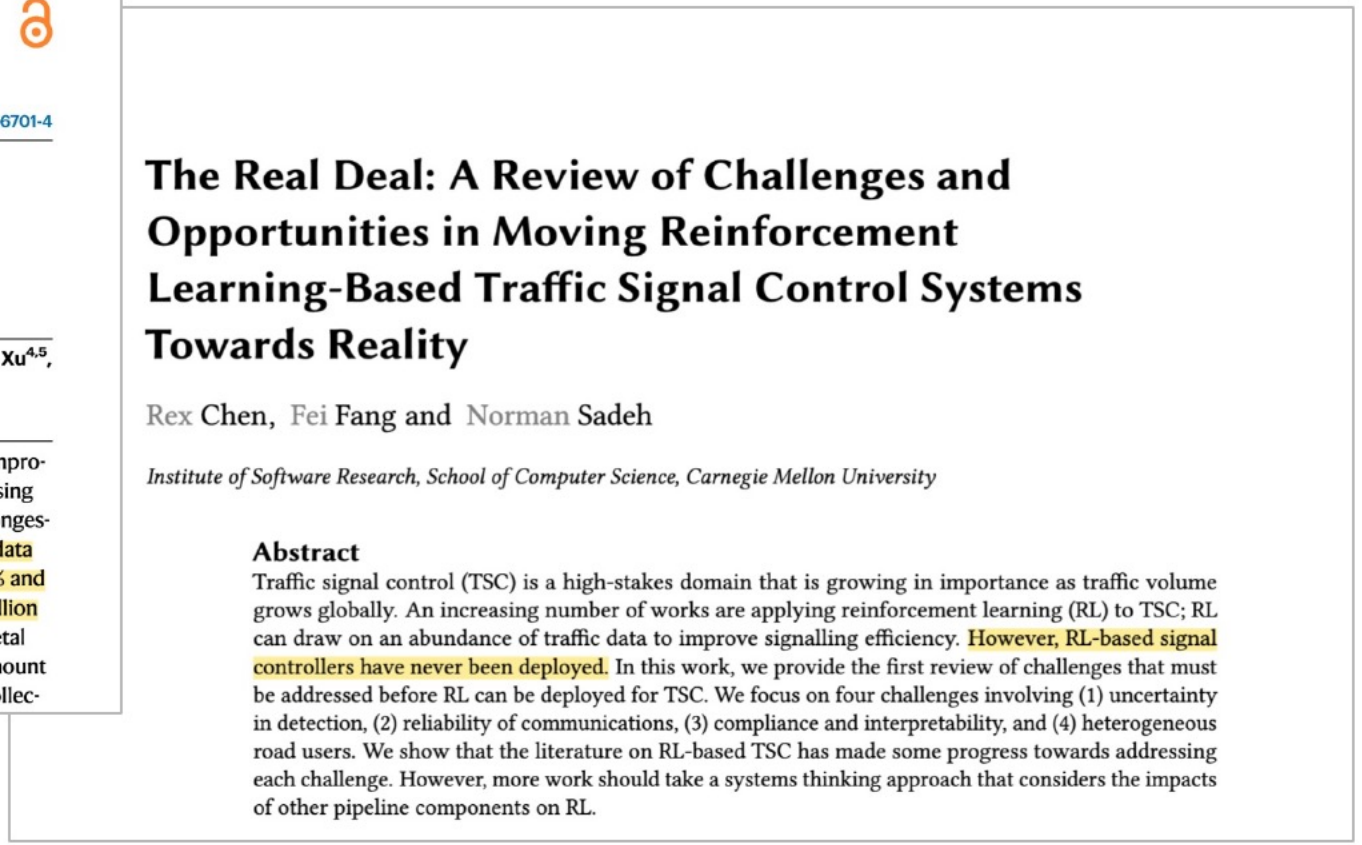
Accepted: 27 January 2025

Published online: 27 February 2025

Check for updates

Kan Wu[1], Jianrong Ding[2], Jingli Lin[2], Guanjie Zheng[3], Yi Sun[1], Jie Fang[1], Tu Xu[4,5], Yongdong Zhu[5] & Baojing Gu[6]

Urban congestion is a pressing challenge, driving up emissions and compromising transport efficiency. Advances in big-data collection and processing now enable adaptive traffic signals, offering a promising strategy for congestion mitigation. In our study of China’s 100 most congested cities, big-data empowered adaptive traffic signals reduced peak-hour trip times by 11% and off-peak by 8%, yielding an estimated annual CO_2 reduction of 31.73 million tonnes. Despite an annual implementation cost of US$1.48 billion, societal benefits—including CO_2 reduction, time savings, and fuel efficiency—amount to US$31.82 billion. Widespread adoption will require enhanced data collec-



The Real Deal: A Review of Challenges and Opportunities in Moving Reinforcement Learning-Based Traffic Signal Control Systems Towards Reality

Rex Chen, Fei Fang and Norman Sadeh

Institute of Software Research, School of Computer Science, Carnegie Mellon University

Abstract

Traffic signal control (TSC) is a high-stakes domain that is growing in importance as traffic volume grows globally. An increasing number of works are applying reinforcement learning (RL) to TSC; RL can draw on an abundance of traffic data to improve signalling efficiency. However, RL-based signal controllers have never been deployed. In this work, we provide the first review of challenges that must be addressed before RL can be deployed for TSC. We focus on four challenges involving (1) uncertainty in detection, (2) reliability of communications, (3) compliance and interpretability, and (4) heterogeneous road users. We show that the literature on RL-based TSC has made some progress towards addressing each challenge. However, more work should take a systems thinking approach that considers the impacts of other pipeline components on RL.

[1] K. Wu et al., “Big-data empowered traffic signal control could reduce urban carbon emission,” Nat Commun, 2025, doi: 10.1038/s41467-025-56701-4.
[2] R. Chen, F. Fang, and N. Sadeh, “The real deal: A review of challenges and opportunities in moving reinforcement learning-based traffic signal control systems towards reality,” arXiv preprint arXiv:2206.11996, 2022.

Energy Policy 38 (2010) 762–769

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Policy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol

Eco-driving: An overlooked climate change initiative

Jack N. Barkenbus

Climate Change Research Network, Vanderbilt University, 131 21st Avenue South, Nashville, TN 37203, United States

ARTICLE INFO

Article history:
Received 11 June 2009
Accepted 2 October 2009
Available online 28 October 2009

Keywords:
Climate change
Transportation
Mitigation

ABSTRACT

The actions individuals can take to mitigate climate change are, in the aggregate, significant. Mobilizing individuals to respond personally to climate change, therefore, must be a complementary approach to a nation's climate change strategy. One action item overlooked in the United States has been changing driver behavior or style such that eco-driving becomes the norm rather than the exception. Evidence to date indicates that eco-driving can reduce fuel consumption by 10%, on average and over time, thereby reducing CO_2 emissions from driving by an equivalent percentage. A sophisticated, multi-dimensional campaign, going well beyond what has been attempted thus far, will be required to achieve such savings on a large scale, however, involving education (especially involving the use of feedback devices), regulation, fiscal incentives, and social norm reinforcement.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

[1] J. N. Barkenbus, "Eco-driving: An overlooked climate change initiative," Energy Policy, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.021.

Guida ecologica per il pianeta (con l'IA)

Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale

Transportation Research Part C: Emerging Technologies 2025


Vindula Jayawardana


Baptiste Freydt


Ao Qu


Cameron Hickert


Edgar Sanchez


Catherine Tang


Mark Taylor


Blaine Leonard


Cathy Wu

Implicazioni politiche dei veicoli connessi e automatizzati?

Potenzialità dei VCA: guida ecologica agli incroci semaforizzati

Video: Audi



Da «come guidare in modo ecologico» (1000+ articoli)
a «dovremmo farlo?» (≈ 0 articoli)?

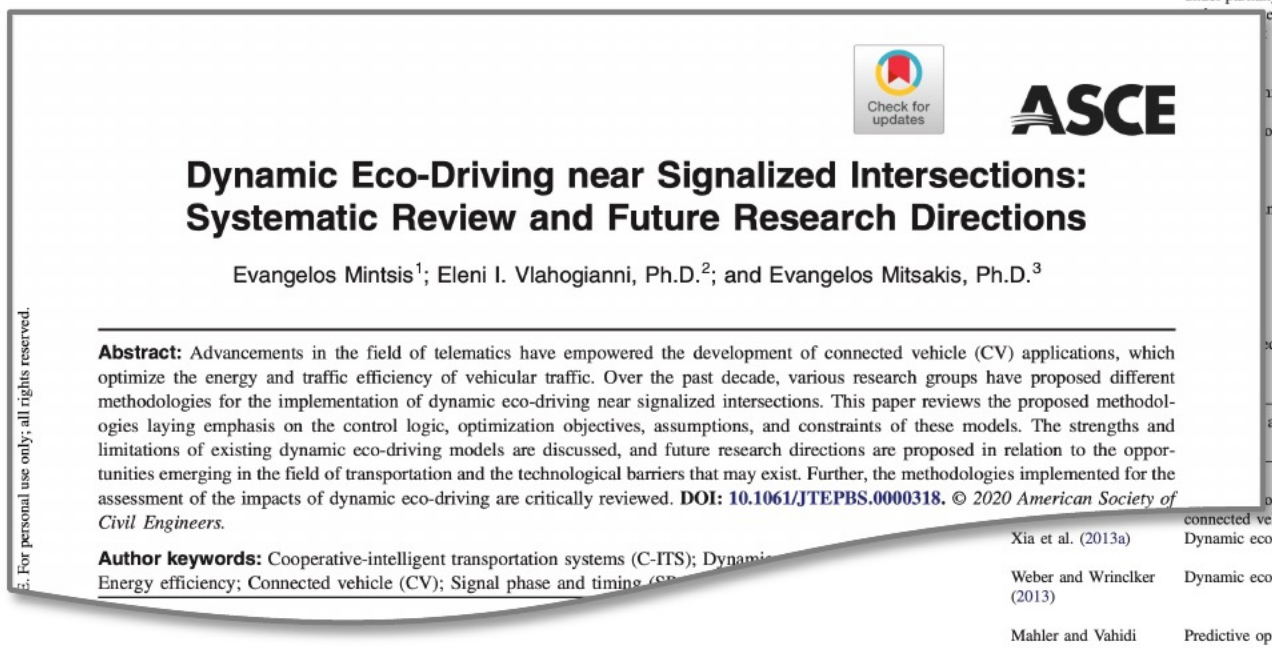
Domanda di ricerca: un controllo intelligente dei veicoli per ridurre la CO_2 agli incroci, su scala urbana, farebbe progredire gli obiettivi di mitigazione?

* Estimated using Google Scholar

[1] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part

Risparmi di energia / emissioni

Risparmi della guida ecologica



Check for updates

ASCE

Dynamic Eco-Driving near Signalized Intersections: Systematic Review and Future Research Directions

Evangelos Mintsis[1]; Eleni I. Vlahogianni, Ph.D.[2]; and Evangelos Mitsakis, Ph.D.[3]

Abstract: Advancements in the field of telematics have empowered the development of connected vehicle (CV) applications, which optimize the energy and traffic efficiency of vehicular traffic. Over the past decade, various research groups have proposed different methodologies for the implementation of dynamic eco-driving near signalized intersections. This paper reviews the proposed methodologies laying emphasis on the control logic, optimization objectives, assumptions, and constraints of these models. The strengths and limitations of existing dynamic eco-driving models are discussed, and future research directions are proposed in relation to the opportunities emerging in the field of transportation and the technological barriers that may exist. Further, the methodologies implemented for the assessment of the impacts of dynamic eco-driving are critically reviewed. **DOI: 10.1061/JTEPBS.0000318.** © *2020 American Society of Civil Engineers.*

Author keywords: Cooperative-intelligent transportation systems (C-ITS); Dynami
Energy efficiency; Connected vehicle (CV); Signal phase and timing (SP

. For personal use only; all rights reserved.

Table 3. Evaluation methodologies of existing dynamic eco-driving models and corresponding impacts

	Speed advisory model	Evaluation methodology	Test network configuration	Vehicle type	Energy savings (%)	Emissions savings (%)	Travel time savings (%)	Real-time ready
Hao et al. (2018)	AD	Field experiment (real-world traffic)	El Camino Real test site	Single-vehicle (2.5L 4-cylinder)	2 (all trips)	7 (CO) 18 (HC) 13 (NO_x)	—	—
Jiang et al. (2017)	Dynamic eco-driving under partially connected ed vehicles	Simulation (Excel VBA, MATLAB, and VISSIM)	Hypothetical intersection	—	2.02	1.97	10.80	Yes
		Field experiment (real-world traffic)	DRIVE C2X test site (Gothenburg, Sweden)	10 retrofitted prototype vehicles	—	—	—	Yes
	mendation	Field experiment	Virginia Smart Road Test facility	2014 Cadillac SRX	19	—	10	Yes
	o-driving	Field experiment (real-world traffic)	Signalized arterial corridor (Thessaloniki, Greece)	340 taxis	—	9 (compliant versus noncompliant)	—	Yes
		MATLAB	—	30 top sold vehicles in the US	—	—	—	Yes
	nce model	Simulation (EstiNet)	3.7 km urban arterial road in Beijing	—	—	2.13	8.15	—
		Numerical evaluation	Hypothetical intersection	—	3–12	5–20 (CO) 3–14 (HC) 6–21 (NO_x)	—	Yes
		Controlled experiment	Palmyrita Avenue, Riverside, California	2008 Nissan Altima	5–27	—	—	Yes
	d dynamic	Simulation (INTEGRATION)	Cross intersection (Blacksburg, Virginia)	—	13	13 (CO, HC, CO_2, and NO_x)	38	—
		Simulation	—	—	—	—	—	—
	—	MATLAB (GPOPS)	—	—	29	—	–9	Yes
	assistant	Field experiment (real-world traffic)	Urban network	5 different vehicles (series-production)	4.9	—	—	Yes
	—	MATLAB (sensitivity analysis)	—	—	—	50 (NO_x)	14	—
	o-driving for connected vehicles	Simulation (PARAMICS)	Hypothetical intersection	Single and multivehicle	31	—	—	Yes
Xia et al. (2013a)	Dynamic eco-driving	Simulation (PARAMICS)	11-signalized arterial corridor	Single and multivehicle	12.5	13 (CO_2)	0.7	Yes
Weber and Wrinclker (2013)	Dynamic eco-driving	Field experiment	Richmond Field Station test track El Camino Real test site	BMW mid-sized sedan	14	—	—	Yes
Mahler and Vahidi (2012)	Predictive optimal velocity planning algorithm	MATLAB Field experiment	— (Greenville, South Carolina)	— —	— —	— —	— —	Yes
Rakha et al. (2012)	—	MATLAB	—	—	30	—	—	—
Schuricht et al. (2011)	Predictive driver assistance	Simulation (IDM)	—	—	8.7	—	—	—
Rabitschek et al. (2011)	Predictive driving strategy	MATLAB Field experiment	— BMW test track (Aschheim, Munich, Germany)	—	10	—	—	Yes
Barth et al. (2011)	Dynamic eco-driving	Simulation (PARAMICS)	Hypothetical 10-signalized arterial	Mid-sized Sedan	12	12 (CO_2)	2	Yes
Asadi and Vahidi (2011)	PCC	SIMULINK (MATLAB)	Urban road Suburban road	—	47	56 (CO_2)	—	—
Tielert et al. (2010)	Speed adaptation model	Simulation (VISSIM)	Single-lane road segment Karlsruhe's inner city, Germany	EURO4 Otto and diesel engines	22 8	80 (CO); 35 (NO_x); 18 (PM) —	—	—
Vreeswijk et al. (2010)	—	Simulation (VISSIM)	Four-leg intersection (Rotterdam, Netherlands)	—	—	5 (CO_2 and NO_x)	—	Yes
Saust et al. (2010)	—	Field experiment	Ring road of Braunschweig, Germany (two-lane arterial road)	—	35	—	—	Yes
Mandava et al. (2009)	Arterial velocity planning algorithm	Stochastic simulation	Hypothetical 10-signalized arterial	LDV24 and LDV17	12–14	12–14 (CO_2)	—	—
Li et al. (2009)	ADAS	Parametric analysis Simulation	—	—	14 8	—	—	—

§ Risparmi stimati di energia / emissioni tra il 2 e il 56% (25 studi)

Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020

Wu

Calcolo dell'impatto (stima di massima*)

Impatto sulla guida

51.9%
x [6, 28]%
[3.1, 14.5]%

Km percorsi (VMT) vicino agli incroci semaforizzati [1]

Emissioni evitabili con la guida ecologica (± 1 dev. std da [2])

delle emissioni di CO_2 della guida sono semplicemente «sprecate» agli incroci

Impatto nazionale

x 29%
x 81%
[0.7, 3.41]%

Gas serra del settore dei trasporti [3]

↳ Gas serra dei veicoli stradali [4]

delle emissioni di CO_2 degli USA sono semplicemente «sprecate» agli incroci

Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy Ventures
Led by Bill Gates

[1] U.S. Federal Highway Administration (FHWA). Highway Statistics 2021. 2023.
[2] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020.
[3] U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks . 2023.
[4] U.S. Environmental Protection Agency, Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions . 2023.

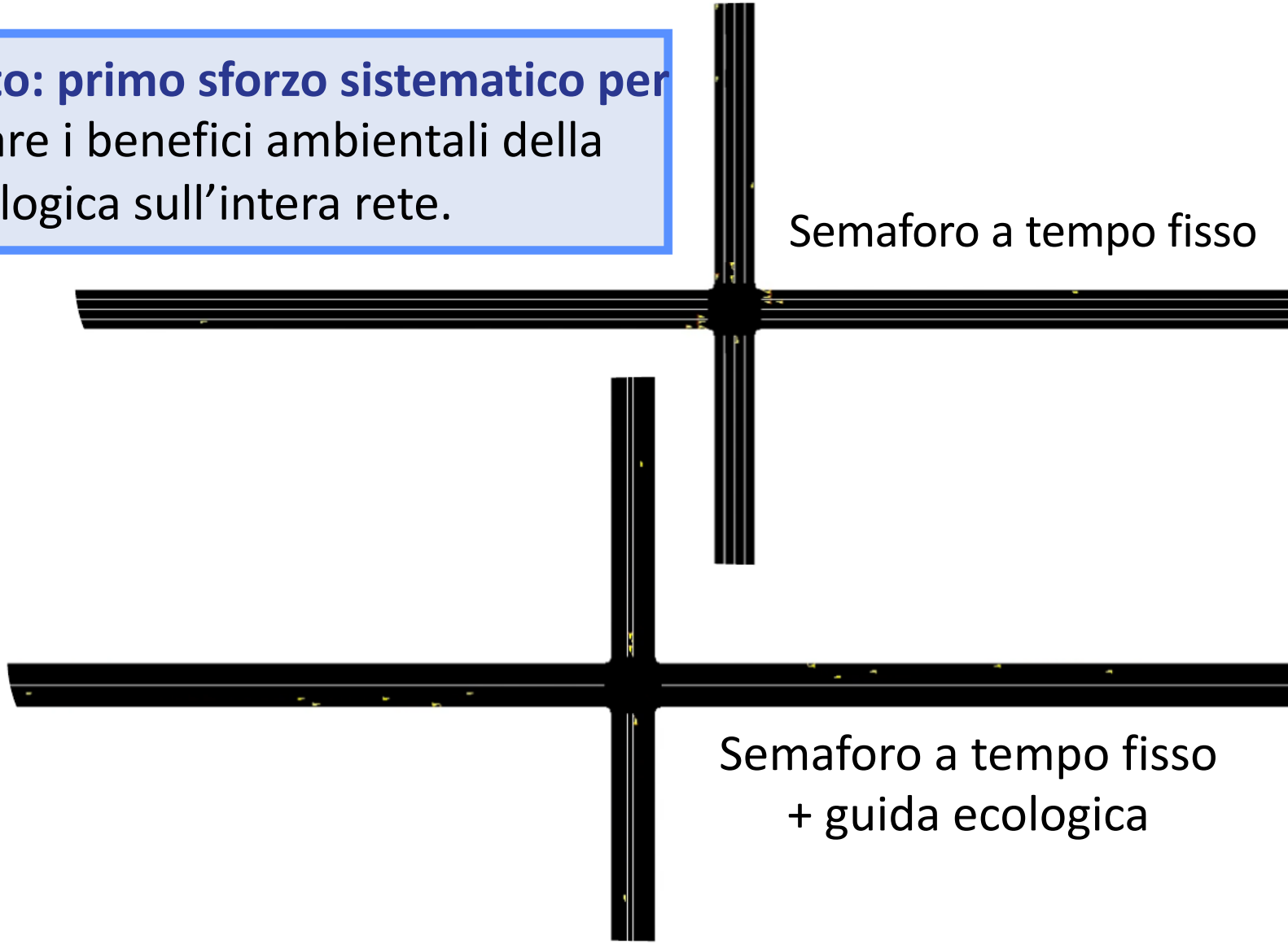
* Calcoli basati su statistiche statunitensi.

Guida ecologica su scala regionale



San Francisco

Contributo: primo sforzo sistematico per quantificare i benefici ambientali della guida ecologica sull'intera rete.



Obiettivo: riduzione attesa delle emissioni della flotta senza impatti rilevanti su tempi di viaggio e capacità dell'incrocio

Vincoli: requisiti di sicurezza, limiti degli attuatori del veicolo e codice della strada

Tutti gli scenari sono modellati in simulatori di livello industriale

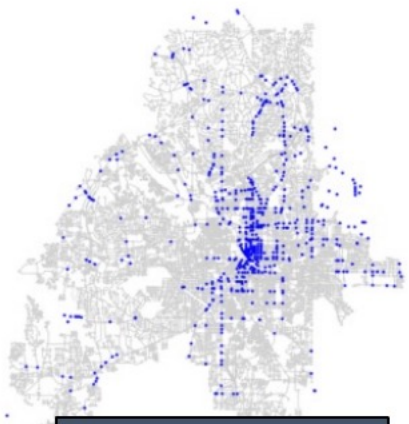
6011 incroci basati su dati reali, modellati nel simulatore microscopico SUMO di livello industriale



San Francisco

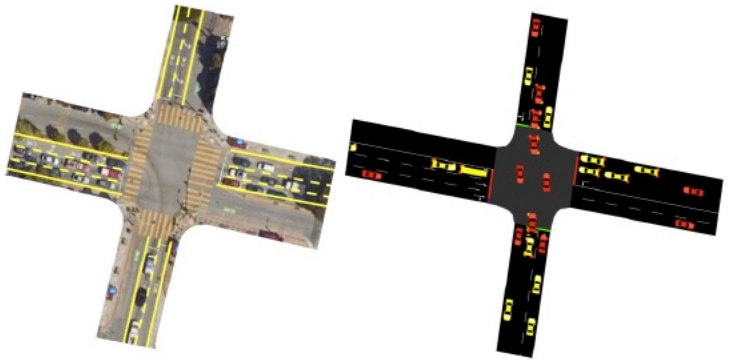


Los Angeles

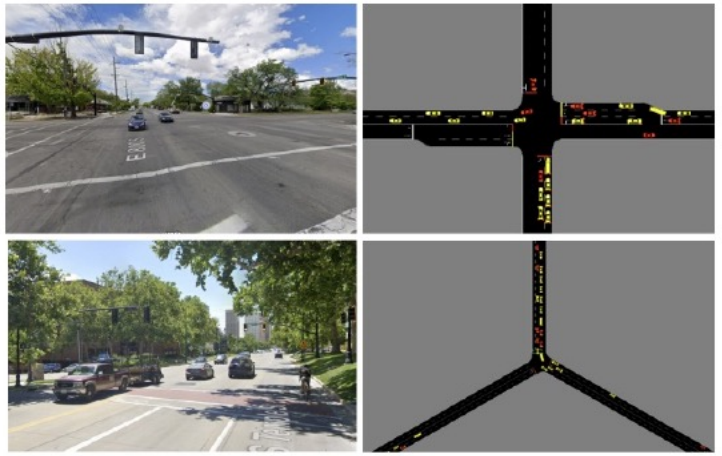


Atlanta

Oltre 1 milione di scenari di traffico





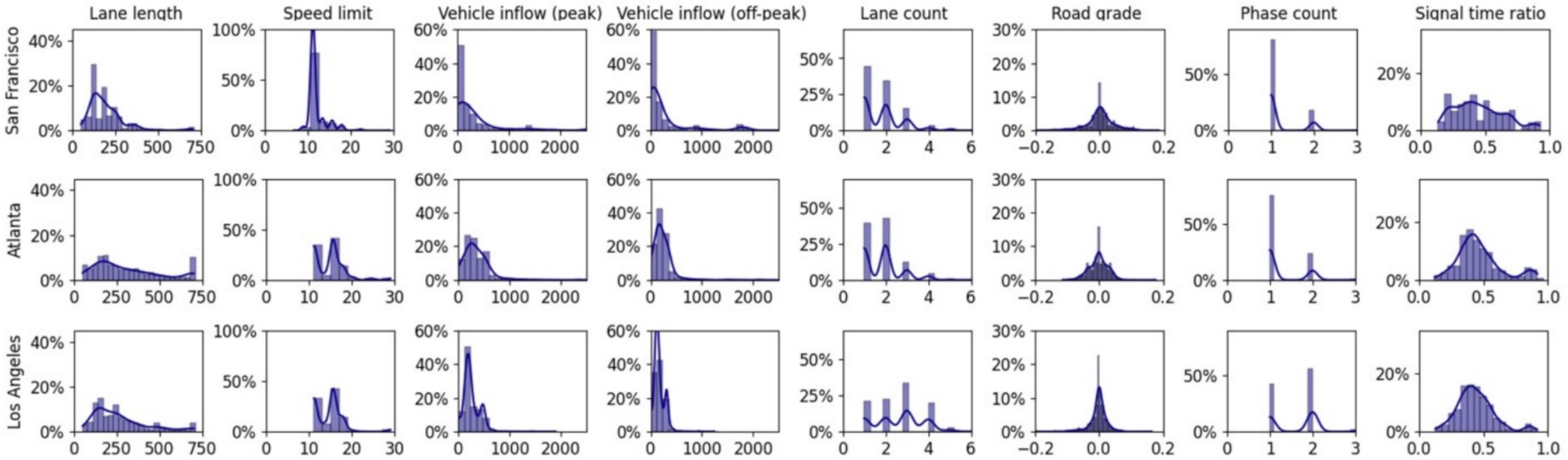


Incrocio reale vs simulazione

Qu, Valiveru, Tang, Jayawardana, Freydt, Wu, What is a typical signalized intersection in a city? A pipeline for intersection data imputation from OpenStreetMap , Transportation Research Board, 2023.
Jayawardana et al. IntersectionZoo: Eco-driving for benchmarking contextual reinforcement learning . International Conference on Learning Representations (ICLR), 2025.

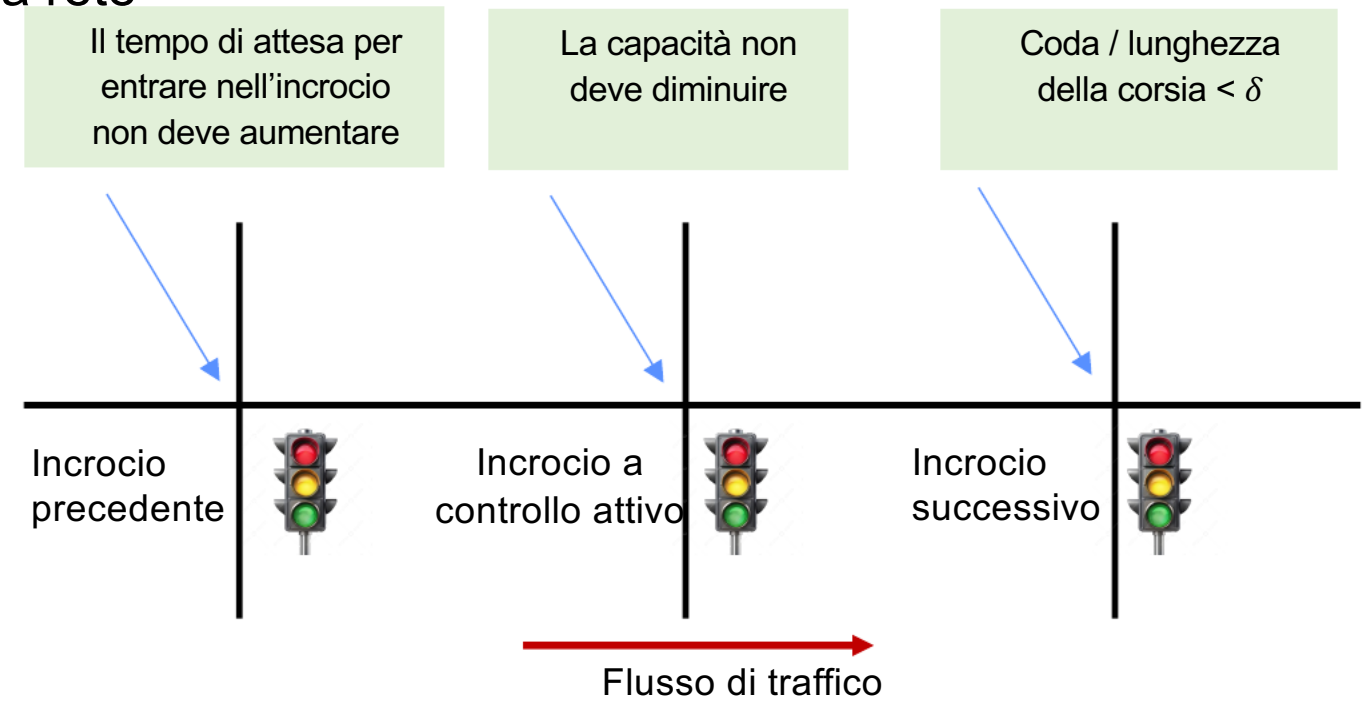
Tutti gli scenari sono modellati con dati e strumenti aperti

Servizio geologico degli Stati Uniti (USGS)



Scomposizione della rete

Requisiti per la scomposizione della rete



Se la guida ecologica viola uno di questi requisiti, i benefici sono posti a zero

I benefici sono quindi un limite inferiore dei benefici possibili

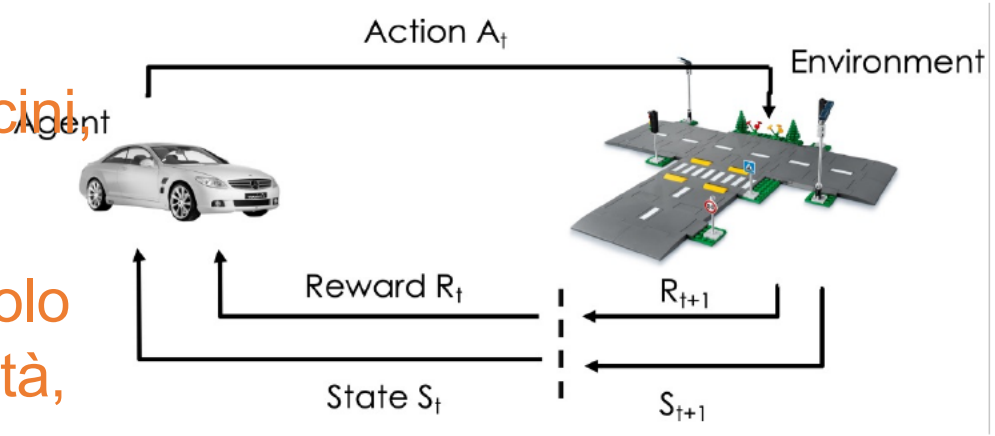
Modellare la guida ecologica come MDP

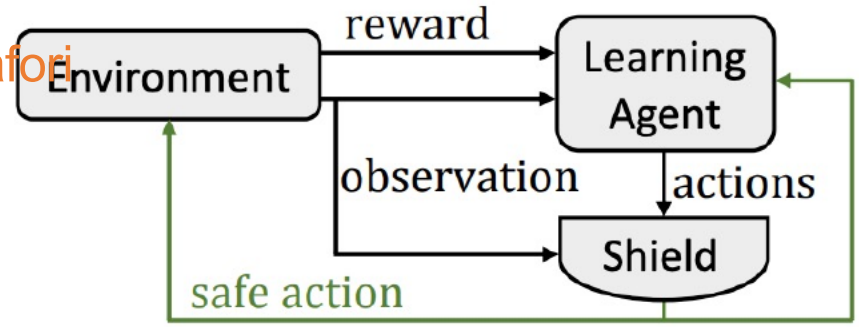
§ Protocollo di addestramento: RL multi-agente a parametri condivisi, con addestramento centralizzato ed esecuzione decentralizzata.

- Processo decisionale di Markov decentralizzato parzialmente osservabile (Dec-POMDP)

§ Per ogni veicolo in guida ecologica:

- Osservazione: sensori del veicolo, veicoli vicini, informazioni sui semafori e contesto dell'incrocio
- Azione: accelerazione longitudinale del veicolo
- Ricompensa: combinazione lineare di velocità, emissioni e minimo
- Funzione di transizione:
  - § Comportamento degli altri utenti della strada, semafori
  - § Vincoli rigidi garantiti con post-shielding
- Orizzonte: 12,5 min (1500 passi da 0,5 s) con fattore di sconto $\gamma = 0.99$
  - § Un ciclo semaforico tipico dura 1-3 min





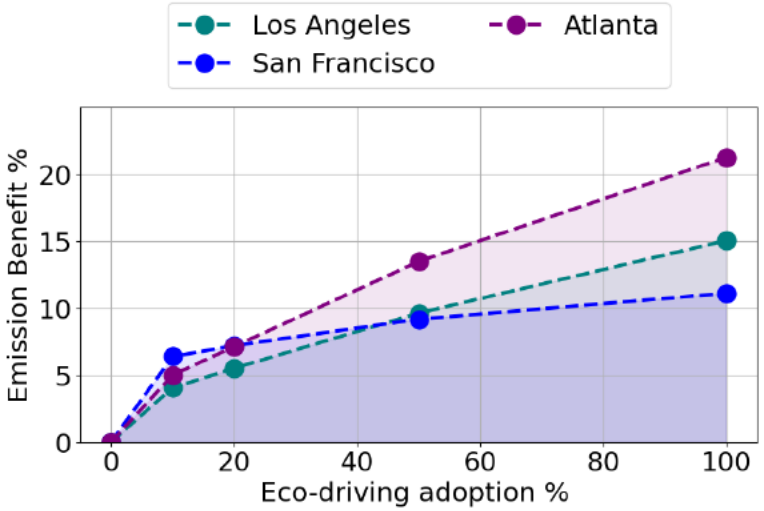
Wu

Risultati: efficacia complessiva

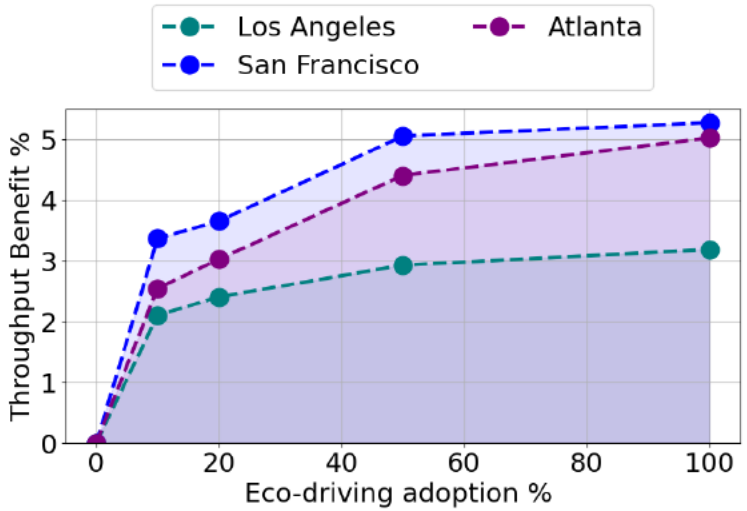
Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy
Led by Bill Gates

La guida ecologica potrebbe ridurre dell'11-21% le emissioni di CO_2 agli incroci di una città.
Ciò equivale all'1,34-2,68% delle emissioni di CO_2 degli USA.

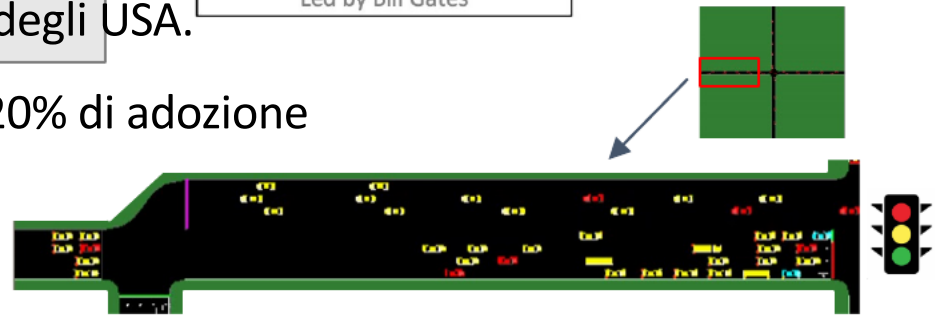
Riduzione delle emissioni



Aumento della capacità

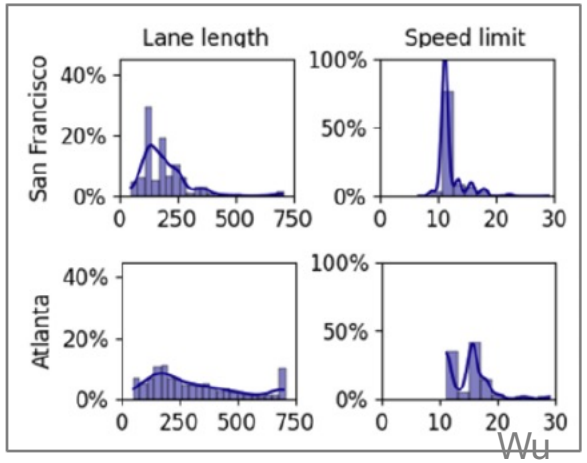


20% di adozione



100% di adozione





§ Scala non lineare: 25-50% dei benefici con il 10% di adozione

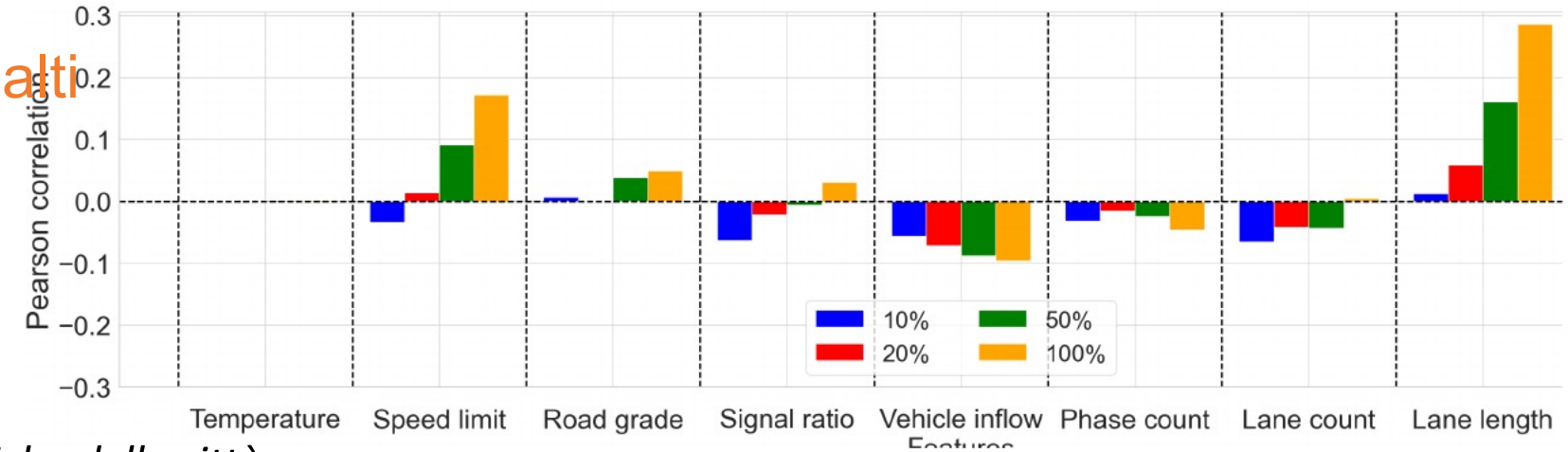
Wu

Perché Atlanta beneficia della guida ecologica più di San Francisco?

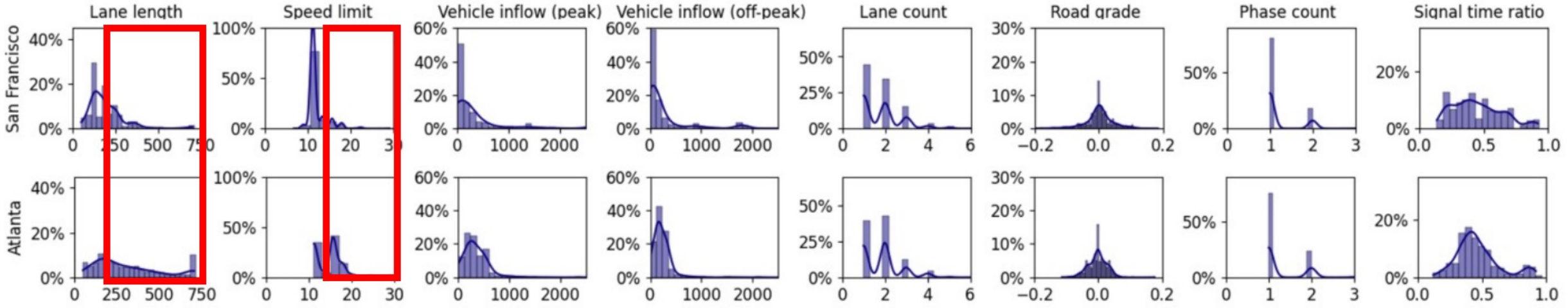
Atlanta vs San Francisco
§ Corsie più lunghe
§ Limiti di velocità più alti

Sono i due fattori **più correlati** con i benefici della **guida ecologica**

Correlazione di Pearson tra benefici della guida ecologica e fattori



Distribuzione delle caratteristiche delle città



V. Jayawardana, et al., C. Wu , "Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale," Transportation Research Part C: Emerging Technologies , 2025.

Calcolo complessivo dell'impatto della guida ecologica

Sito web

Impatto sulla guida

51.9%
x [11, 22]%

[5.7, 11.4]%

Km percorsi (VMT) vicino agli incroci semaforizzati [1]

Emissioni evitabili con la guida ecologica

delle emissioni di CO_2 della guida sono semplicemente «sprecate» agli incroci

Impatto nazionale

x 29%
x 81%

[1.3-2.7]%

Gas serra del settore dei trasporti [3]

↳ Gas serra dei veicoli stradali [4]

delle emissioni di CO_2 degli USA sono semplicemente «sprecate» agli incroci

Gold standard:
–1% global GHG
Breakthrough Energy Ventures
Led by Bill Gates

[1] U.S. Federal Highway Administration (FHWA). Highway Statistics 2021. 2023.
[2] Mintsis et al. Dynamic eco-driving near signalized intersections: Systematic review and future research directions . Journal of Transportation Engineering, Part A, 2020.
[3] U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks . 2023.
[4] U.S. Environmental Protection Agency, Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions . 2023.

* Calcoli basati su statistiche statunitensi.

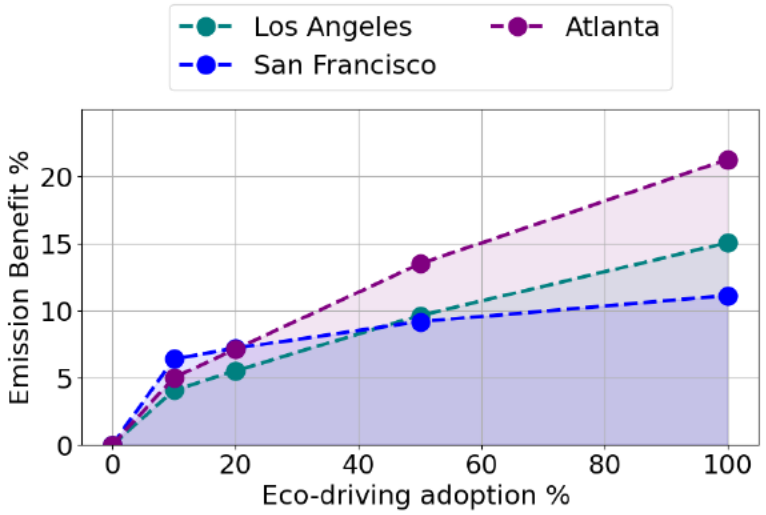
Risultati e implicazioni politiche

Impatto sulle emissioni: 11-22% delle emissioni di CO_2 agli incroci

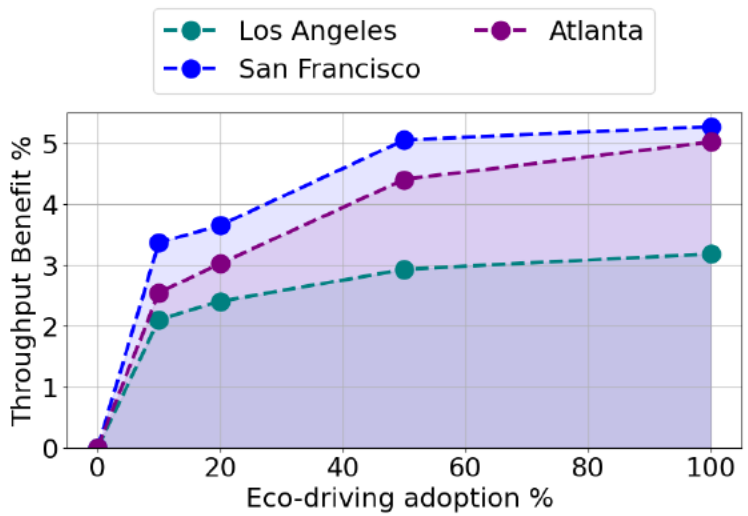
Potenziale nel breve periodo: gran parte dell'impatto viene da una minoranza di conducenti e di incroci

Rilevanza di lungo periodo: impatto solido fino al 2050 grazie agli effetti sul parco e alla domanda di viaggio

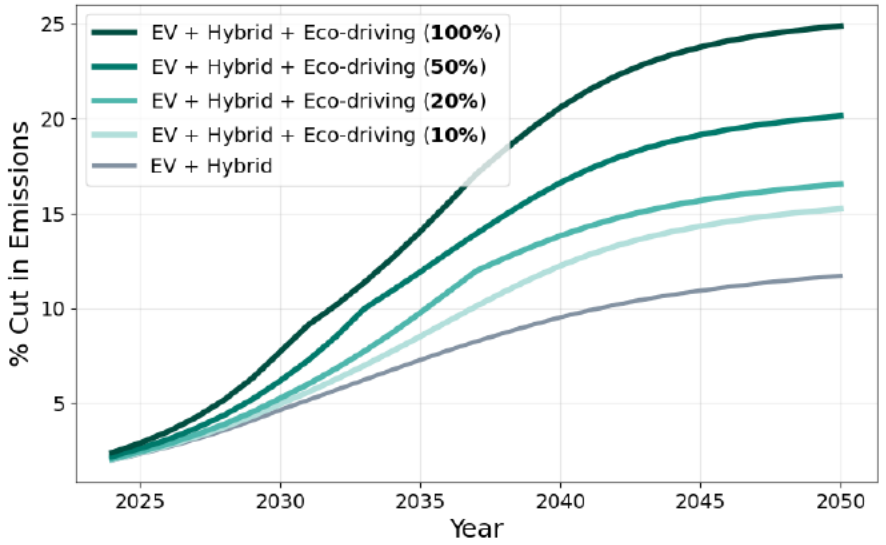
Riduzione delle emissioni



Aumento della capacità



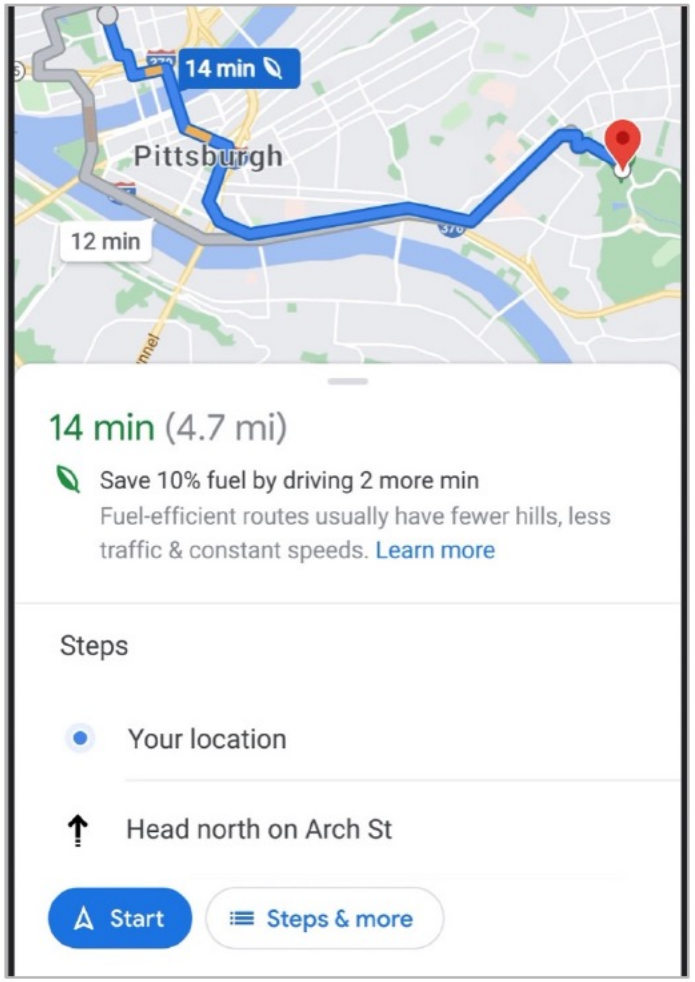
Proiezione al 2050 (LA)



Alto impatto, costo relativamente basso, e complementare agli interventi climatici esistenti

V. Jayawardana et al. , "Mitigating Metropolitan Carbon Emissions with Dynamic Eco-driving at Scale," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Apr. 2025.

Percorsi ecologici di Google Maps



Step 1

Simulate vehicle fuel efficiency across vehicle powertrains

NREL's **FASTSim** technology simulates fuel efficiency across various vehicle types and powertrains, incorporating second-by-second real-world driving data to calculate real-world fuel consumption over different road types and conditions with high accuracy.

Step 2

Predict fuel consumption across unique routes

NREL's **RouteE** is then trained by the FASTSim-calculated fuel consumption over different driving conditions to predict expected fuel consumption differences among a set of defined routes.

Step 3

Integrate Google's ML Routing Algorithm

Google integrates the insights and modeling from FASTSim and RouteE across all of Google Maps, incorporating Google's predicted traffic speeds with NREL's fuel consumption modeling to predict fuel consumption for all routes in the U.S., enabling a highly accurate model to maximize fuel efficiency.

Step 4

Set parameters to optimize journey time

Finally, we developed a set of parameters and time caps to determine the optimal time vs. fuel usage trade-off within Google Maps to avoid increasing travel time for negligible fuel savings. In this way, the vast majority of our recommended routes continue to be as fast as before.

[1] Google Research, "Google Maps Eco Friendly Routing," 2021.

ORION di UPS: ottimizzazione e navigazione integrate su strada



- Lanciato nel 2013
- Sceglie percorsi efficienti per gli autisti con informazioni in tempo reale (traffico, meteo, orari di ritiro)
- Riduzione stimata dei consumi di carburante di 10 milioni di galloni l'anno, e della produzione di CO_2 di 100.000 tonnellate (Informs)
- Uso dell'IA
  - Prevedere le prestazioni dei percorsi
  - Raccomandare percorsi specifici agli autisti
- L'IA è promettente per l'efficienza del trasporto merci quando migliora *decisioni operative ripetute: percorsi, consolidamento, abbinamento dei carichi, riduzione dei km a vuoto, pianificazione della flotta e risposta alle interruzioni*

L’IA per affrontare la coda lunga dell’ottimizzazione dei trasporti

Esempio: i problemi di instradamento dei veicoli (VRP)

Uno dei problemi più studiati nell'ottimizzazione combinatoria:

- ≈10.000 lavori pubblicati nel solo 2025 (Google Scholar), soprattutto euristiche
- Applicazione diretta nei sistemi reali che distribuiscono beni e forniscono servizi
- Consegne dell'ultimo miglio, raccolta rifiuti, assistenza sul campo, ride-pooling, trasporto a chiamata



~10.000

articoli nel 2025

11.000 mld $+

costi logistici globali, 2023

65 mln+

pacchi consegnati / giorno negli USA

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. "The Truck Dispatching Problem." Management Science, 1959.
Statistiche: Statista/Research & Markets (2024); rapporto ShipMatrix sui pacchi USA (2024).

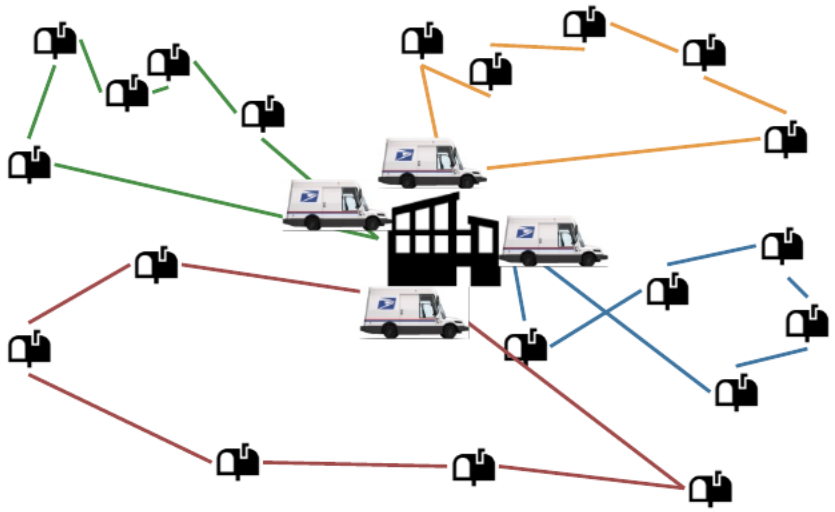
La coda lunga dei problemi di ottimizzazione dei trasporti

Definizione: problemi di instradamento dei veicoli (VRP)

Dati

- Deposito
- N clienti (posizione, domanda)
- Flotta di veicoli (capacità)
- … Altri vincoli …

Trovare l'insieme di percorsi a costo minimo che soddisfi tutti i clienti



Dimensioni classiche

- Capacità dei veicoli
- Finestre temporali
- Flotte eterogenee
- Depositi multipli
- Ritiro e consegna, carichi di ritorno
- Consegna frazionata
- Instradamento su archi (es. raccolta rifiuti)

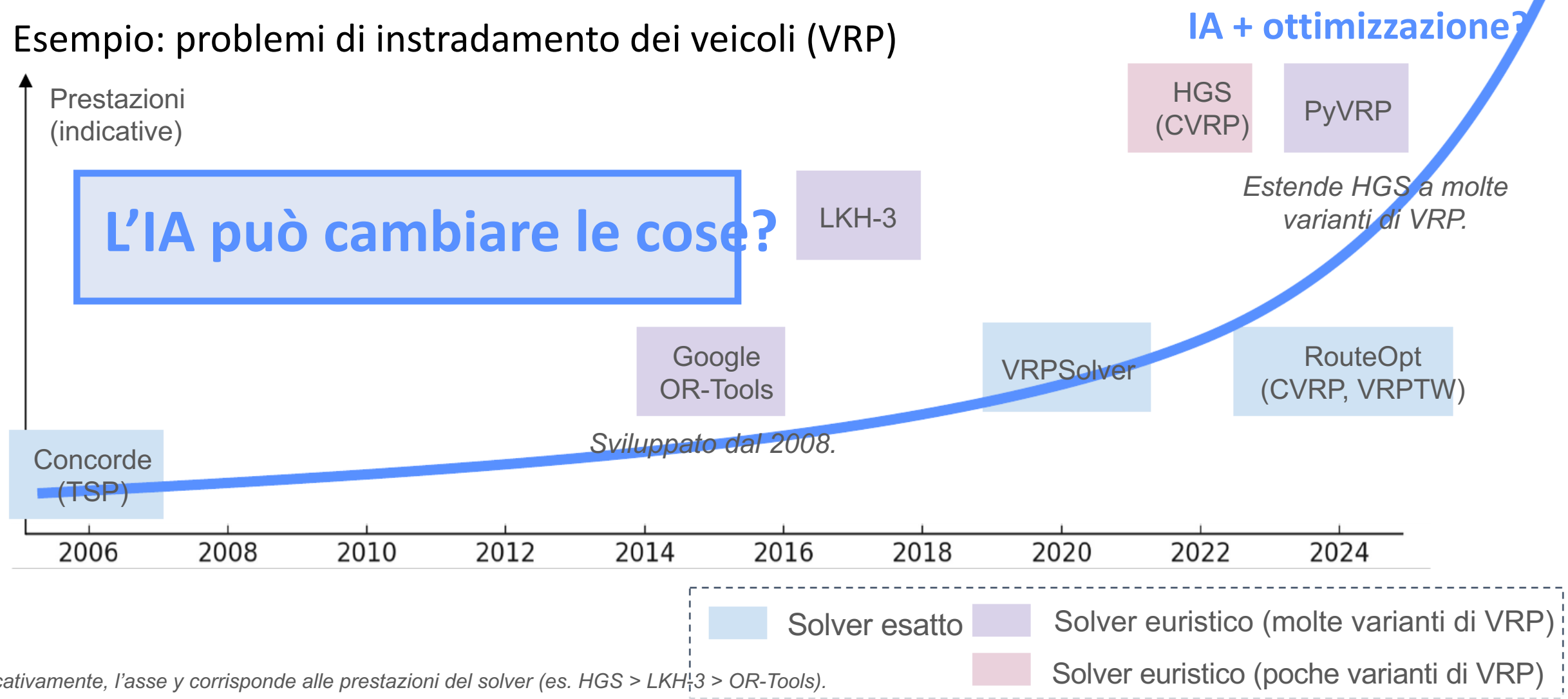
Varianti emergenti

- Instradamento di veicoli elettrici (decisioni di ricarica)
- Instradamento di droni (3D, limiti di autonomia)
- Instradamento in magazzino (picker, smistamento)
- Logistica multimodale (camion + drone, treno + camion)

Laporte, G. "Fifty Years of Vehicle Routing." Transportation Science, 2009.
Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. "The Truck Dispatching Problem." Management Science, 1959.

Risolvere la coda lunga è lento e laborioso

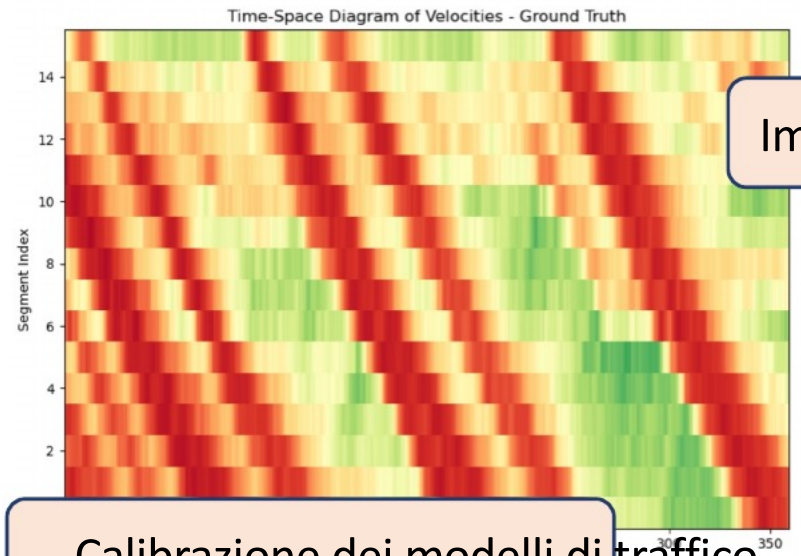
Esempio: problemi di instradamento dei veicoli (VRP)



*Indicativamente, l'asse y corrisponde alle prestazioni del solver (es. HGS > LKH-3 > OR-Tools).

Laporte, G. "Fifty Years of Vehicle Routing." Transportation Science, 2009.
Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. "The Truck Dispatching Problem." Management Science, 1959.

La coda lunga dell'ottimizzazione è trasversale

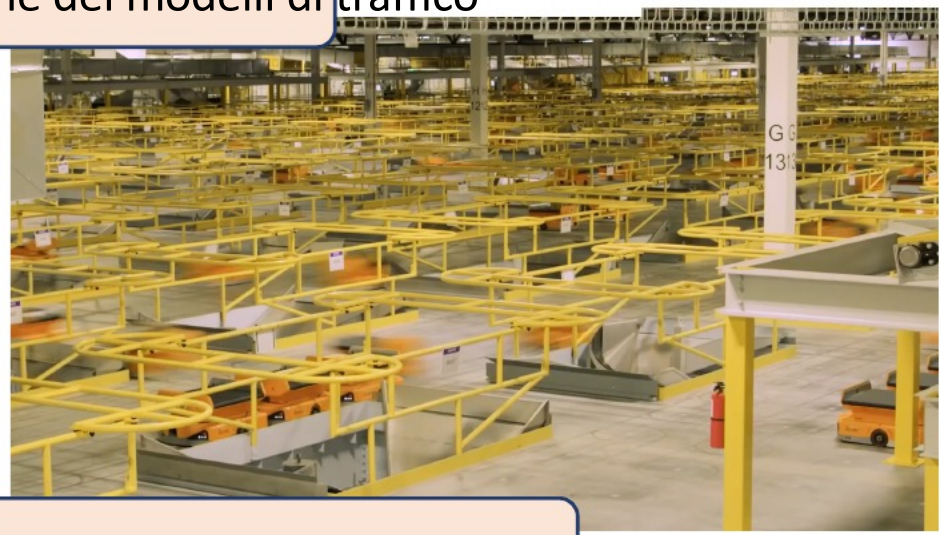


Calibrazione dei modelli di traffico

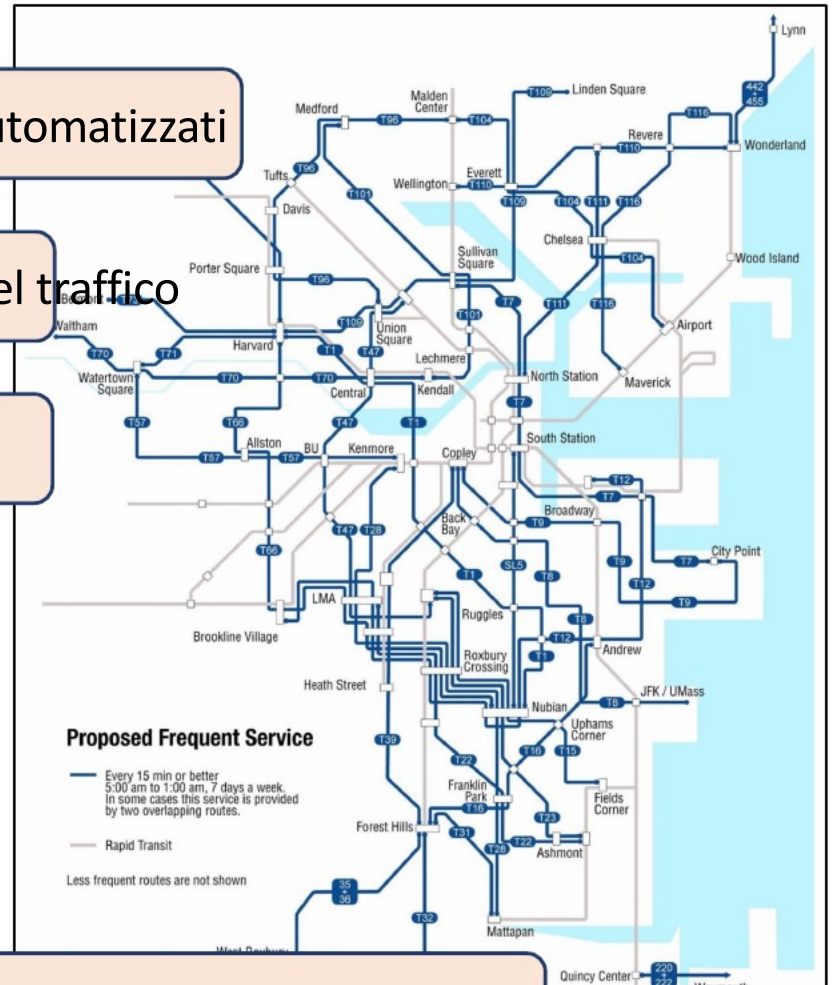
Impatti dei veicoli connessi e automatizzati

Assegnazione dinamica del traffico

Ottimizzazione di rete



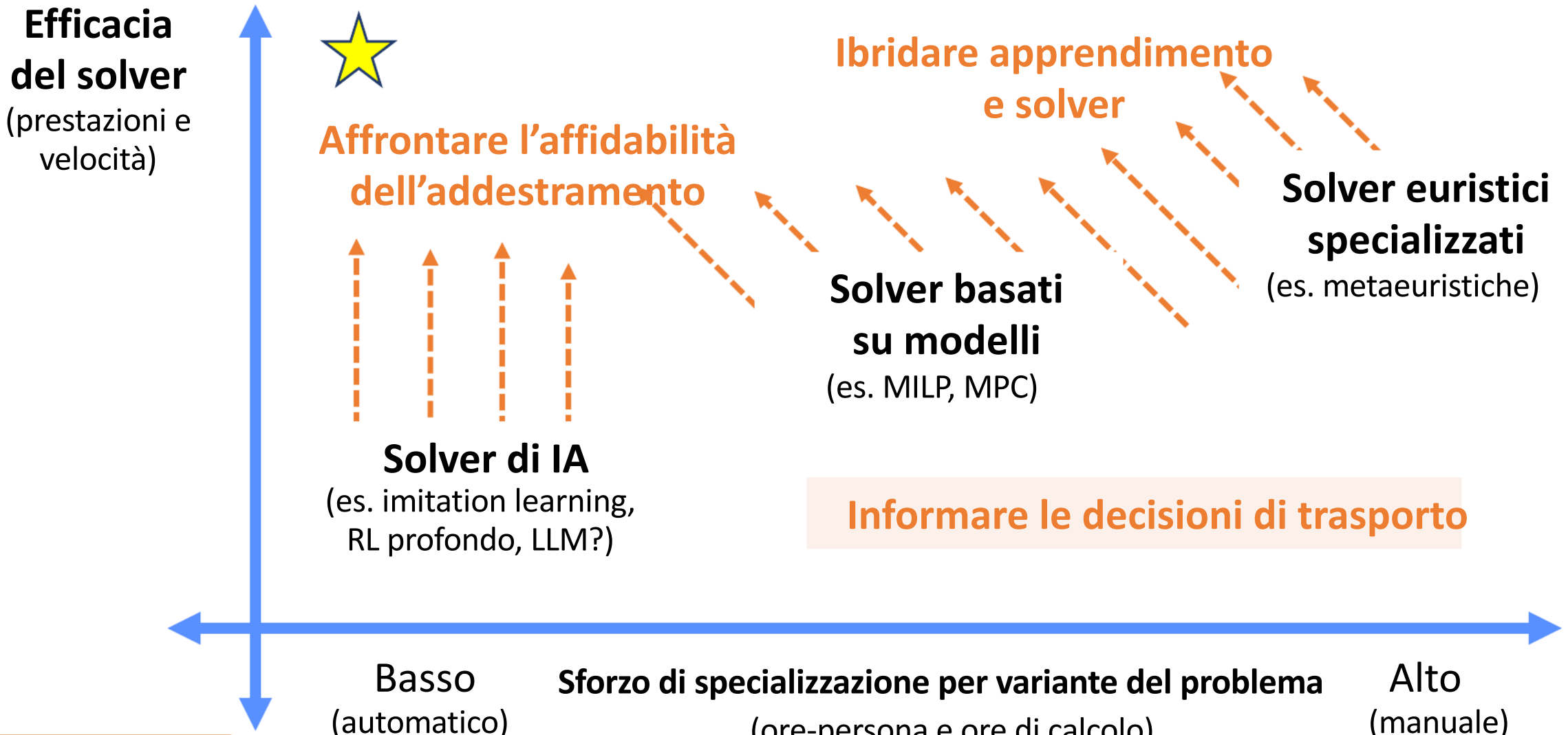
Operazioni di magazzino



Progettazione delle reti di ~~trasporto pubb~~lico

Wu

Panorama dei solver di ottimizzazione

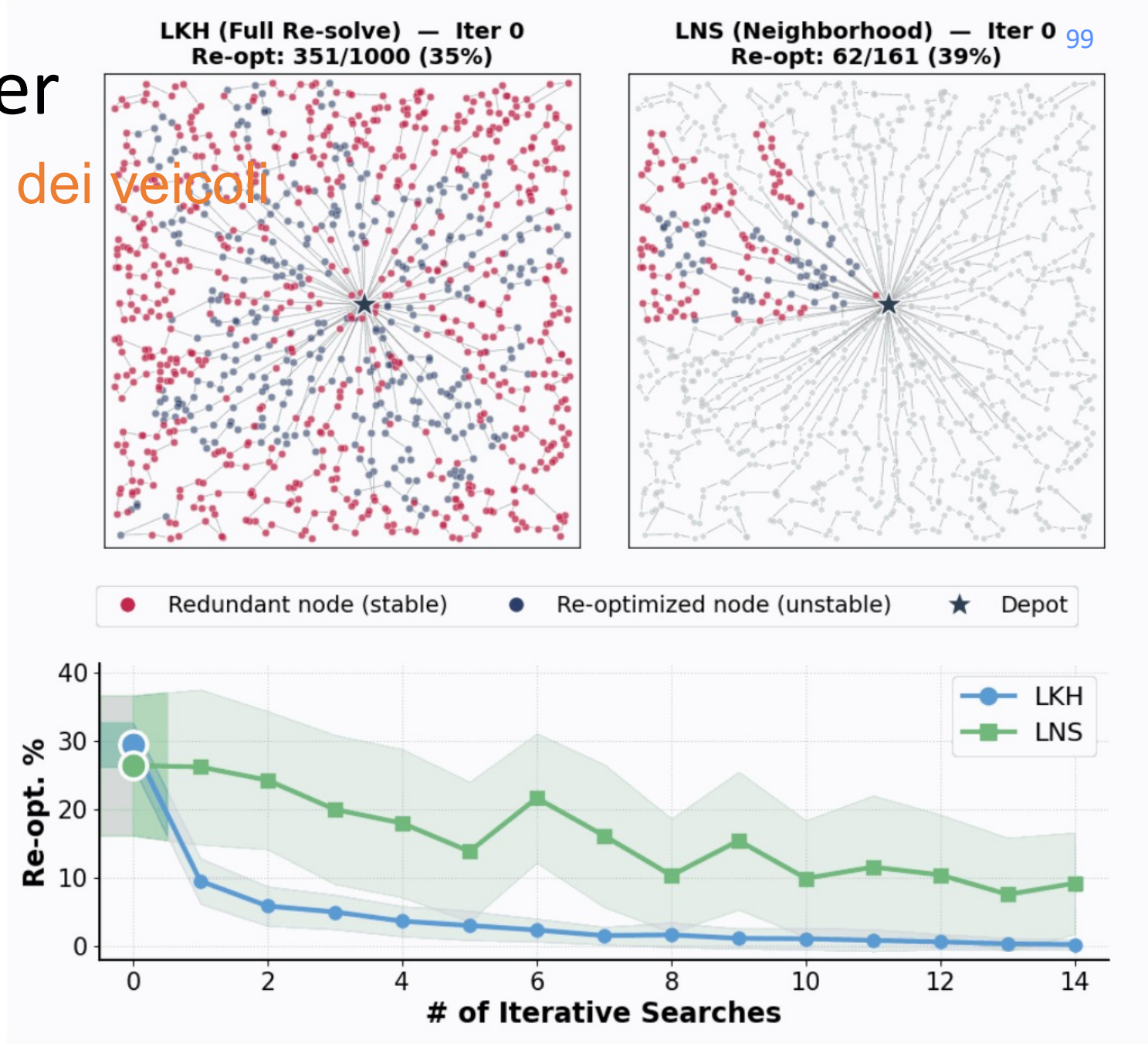


Il mio laboratorio

Ridondanza dei solver

§ Esempio: instradamento dei veicoli

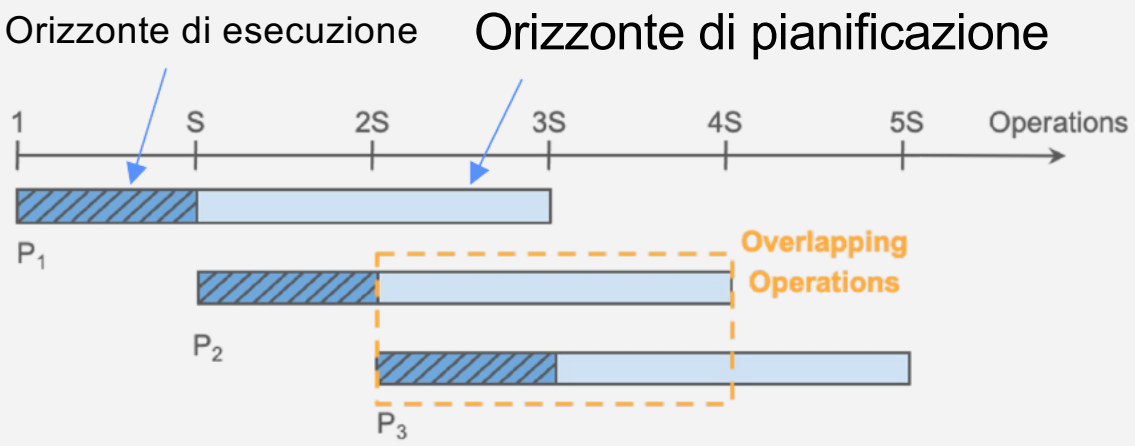
(solver: LKH, LNS + LKH)



W. Ouyang, S. Li, Y. Ma, and C. Wu, "Learning to Segment for Vehicle Routing Problems," International Conference on Learning Representations (ICLR), 2026. Oral

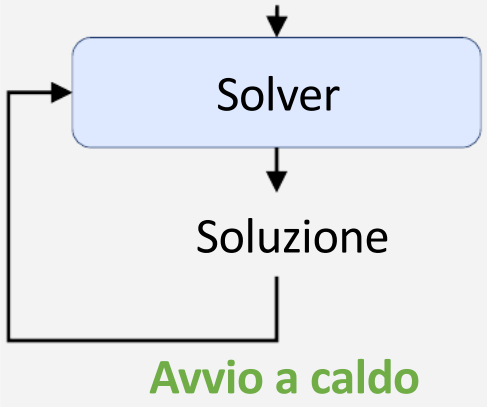
Imparare a riutilizzare: evitare calcoli ridondanti

Contesto: ottimizzazione a orizzonte mobile (RHO)

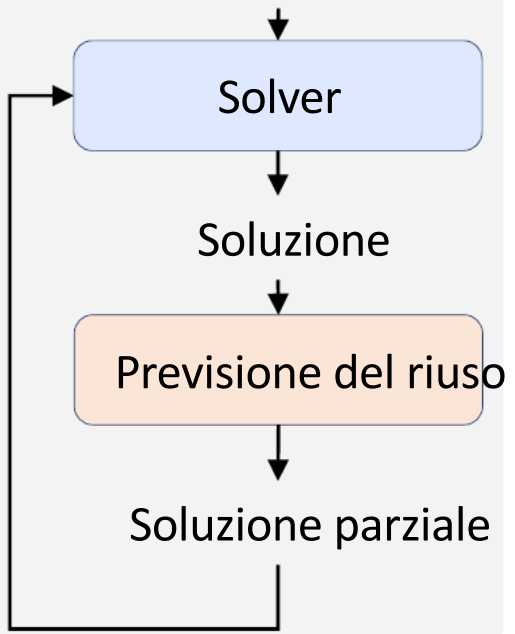


L-RHO: fino al 50% più veloce imparando a riutilizzare le soluzioni nei sottoproblemi RHO consecutivi [1]

RHO con avvio a caldo



L-RHO (nostro)

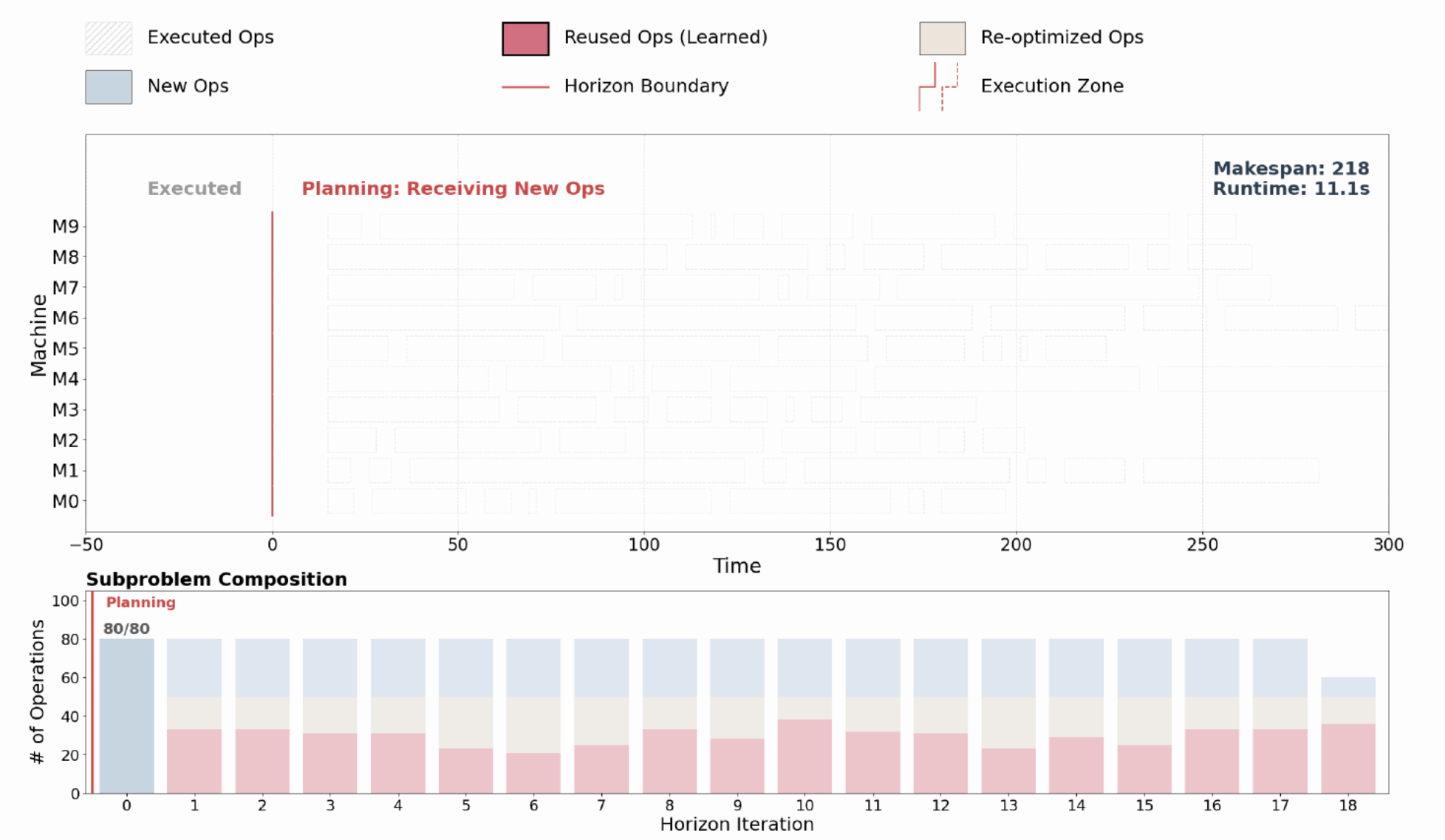


§ Metodo: addestrare una rete neurale profonda a prevedere se una variabile della soluzione cambierà da un sottoproblema al successivo

§ Etichette di addestramento: oracolo con previsione

S. Li, W. Ouyang, Y. Ma, and C. Wu , "Learning-Guided Rolling Horizon Optimization for Long-Horizon Flexible Job Shop Scheduling," in ICLR, 2025.

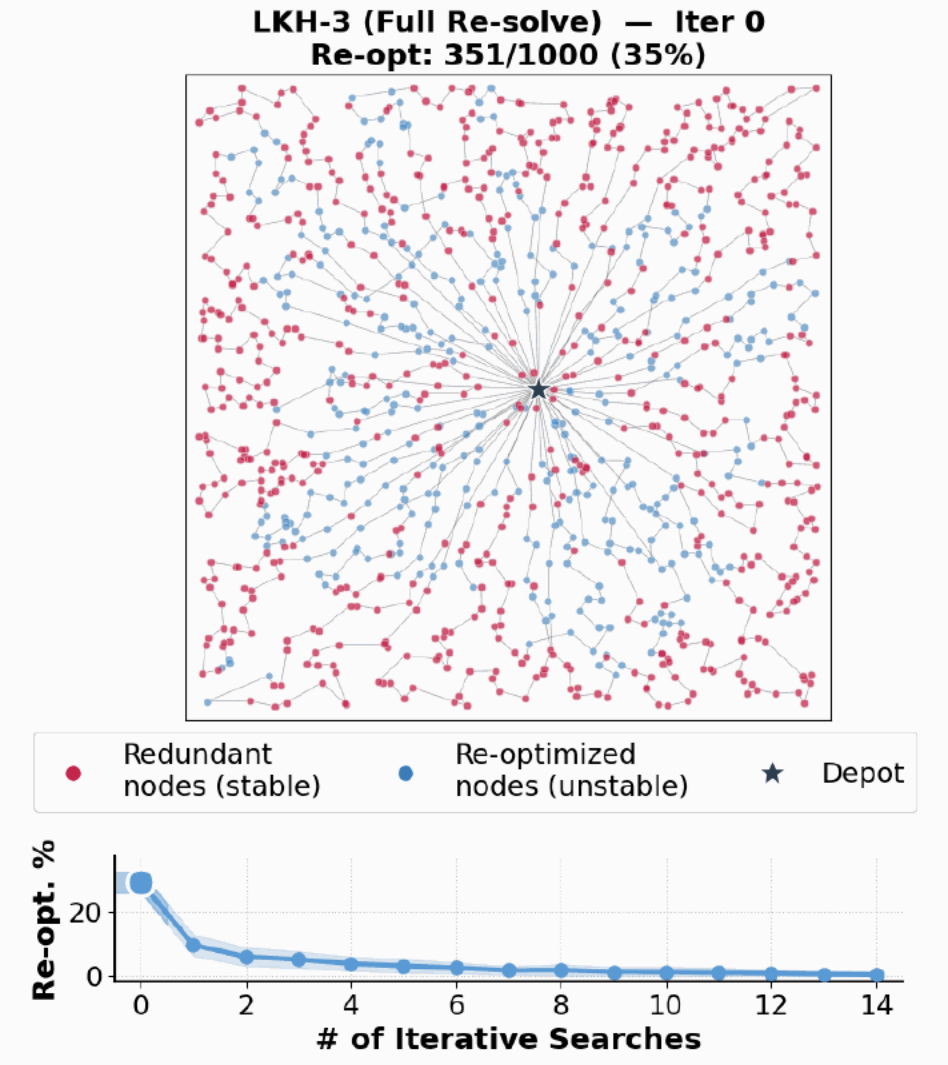
L-RHO per lo scheduling flessibile di job shop



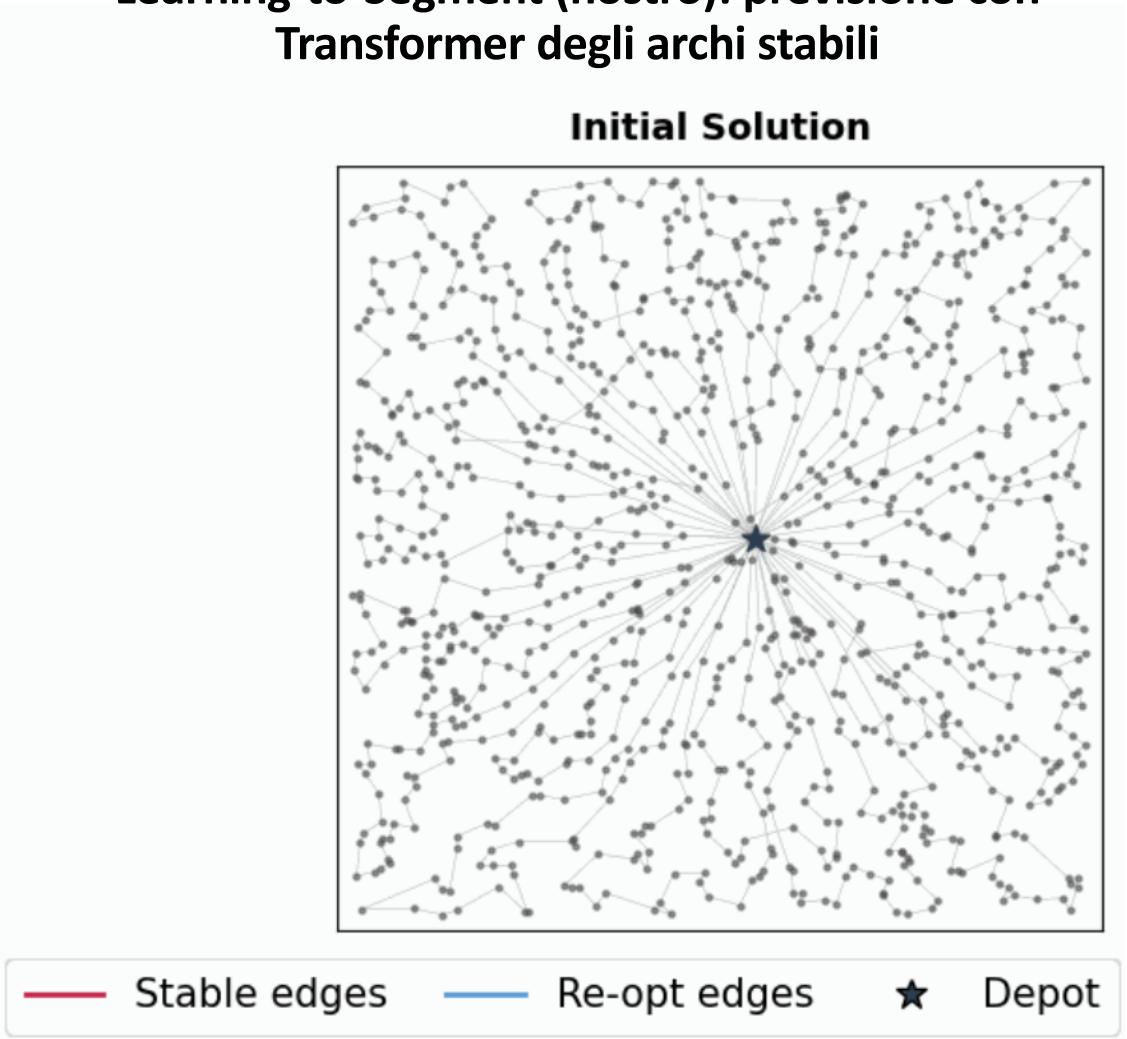
S. Li, W. Ouyang, Y. Ma, and C. Wu , “Learning-Guided Rolling Horizon Optimization for Long-Horizon Flexible Job Shop Scheduling,” in ICLR, 2025.

Imparare a riutilizzare nei grandi problemi di instradamento

Solver allo stato dell'arte LKH (metaeuristica)



Learning-to-Segment (nostro): previsione con Transformer degli archi stabili



Risultati: 7 volte più veloce su CVRP con 2000 clienti

W. Ouyang, S. Li, Y. Ma, and C. Wu , "Learning to Segment for Vehicle Routing Problems," International Conference on Learning Representations (ICLR), 2026. Oral

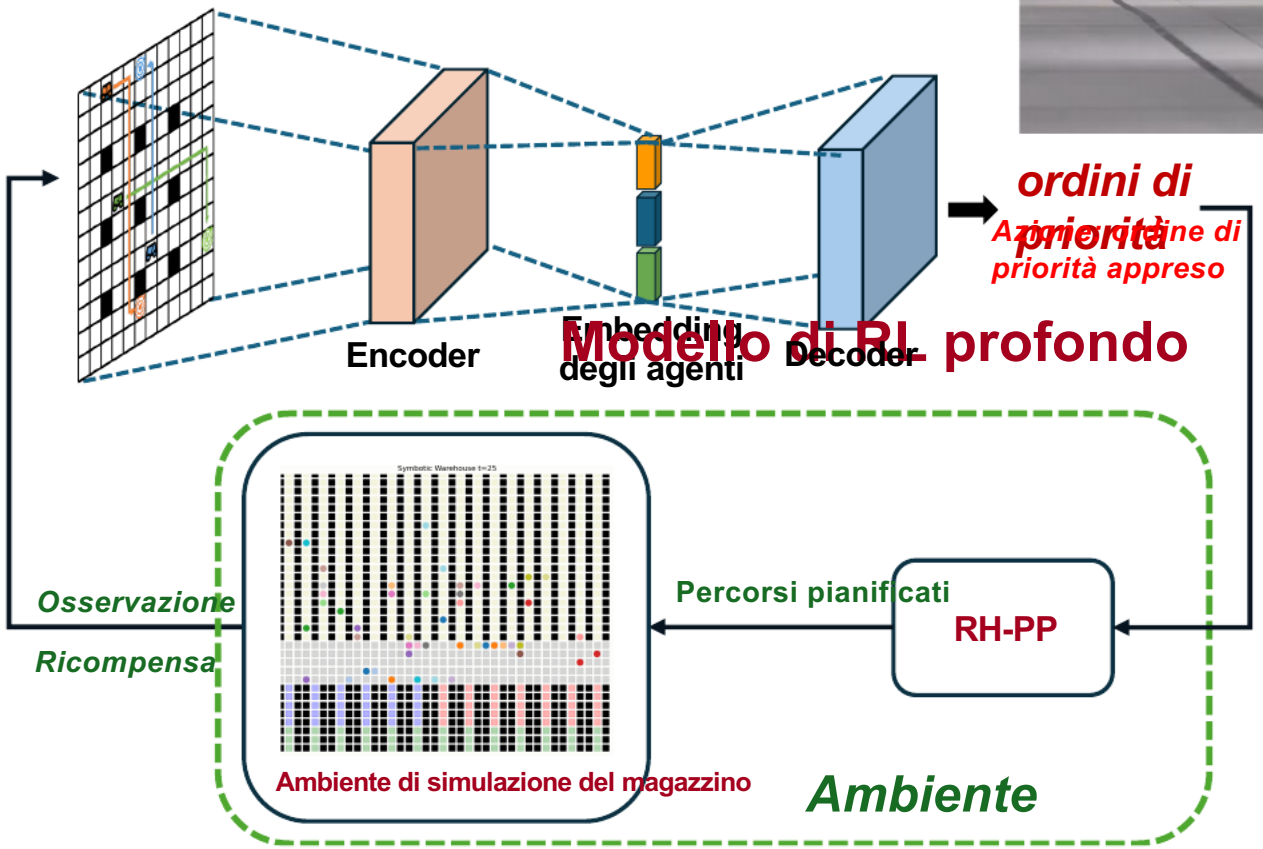
Mitigare la congestione nei magazzini automatizzati

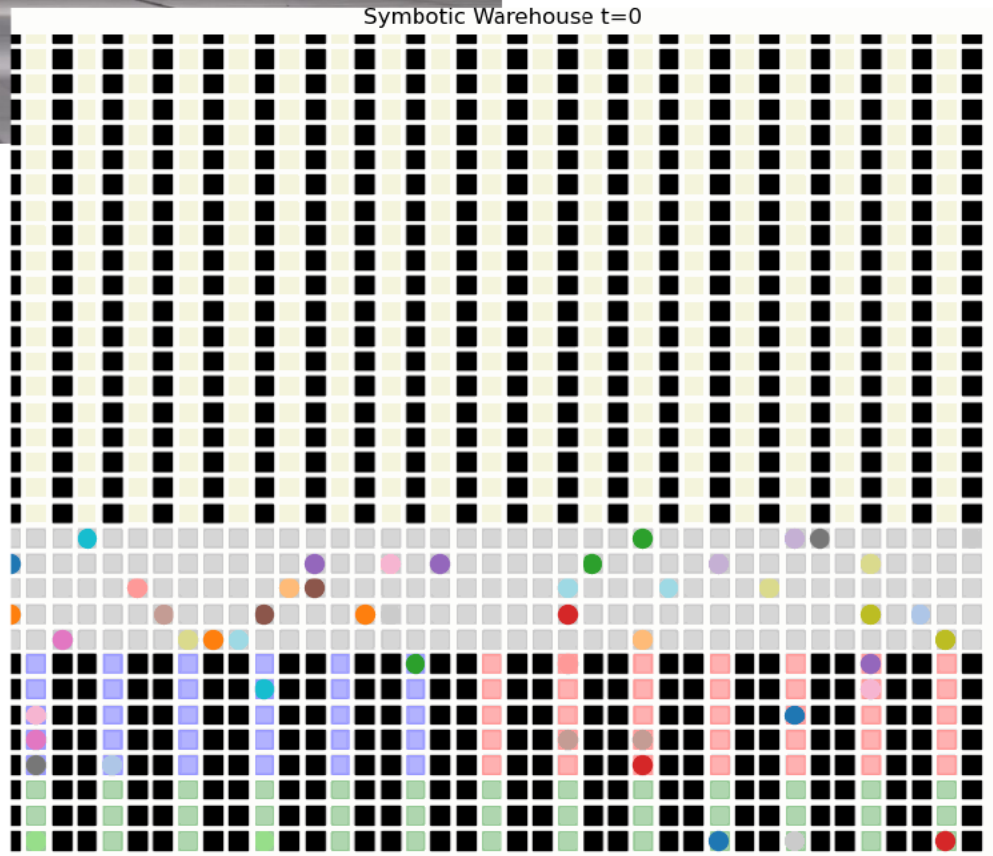
§ Imparare l'ordine di priorità degli agenti

§ Metodo: pianificazione prioritaria guidata da RL profondo

§ Risultati: +20% di capacità in **magazzini di tipo Symbotic**





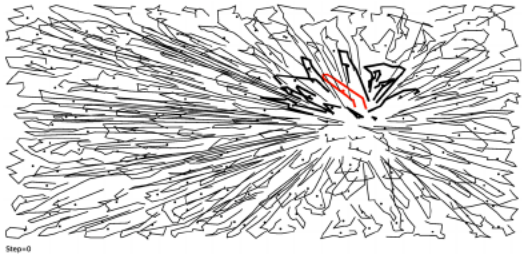


H. Zheng, Y. Ma, B. Araki, J. Chen, and C. Wu , "Learning-guided Prioritized Planning for Lifelong Multi-Agent Path Finding in Warehouse Automation," Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR) , 2026.

Ottimizzazione combinatoria guidata dall'apprendimento

Contributo: il deep learning può accelerare i solver di ottimizzazione combinatoria da 2 a 10 volte.

Imparare a focalizzare e dare priorità alla ricerca



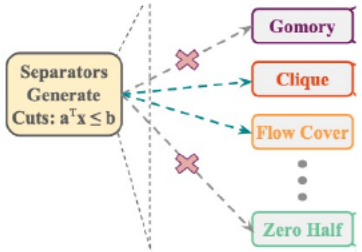
NeurIPS21 Spotlight (<3%)



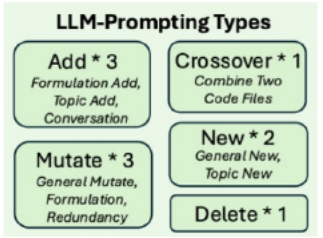
ICLR24

JAIR26

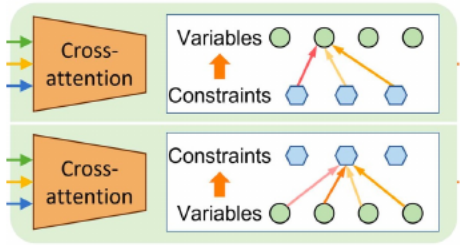
Apprendimento per la programmazione lineare intera mista



NeurIPS23

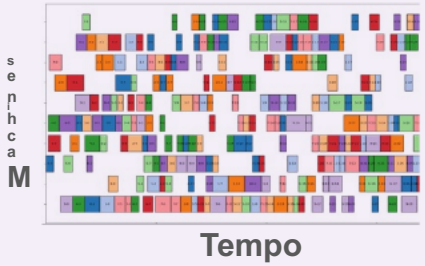


ICLR25

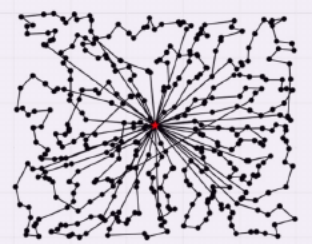


ICML26

Imparare a riutilizzare tra iterazioni

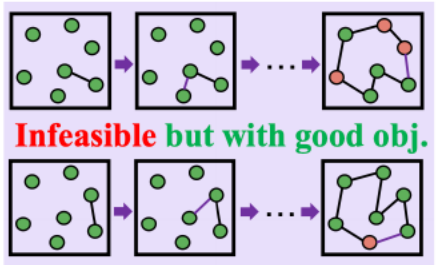


ICLR25



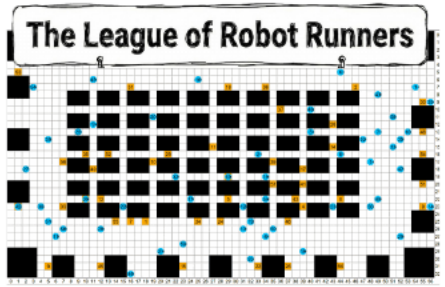
ICLR26 Oral (1%)

Imparare a riparare le soluzioni

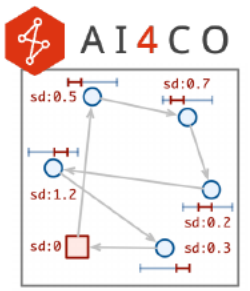


ICLR26

Benchmark e competizioni



ICAPS24

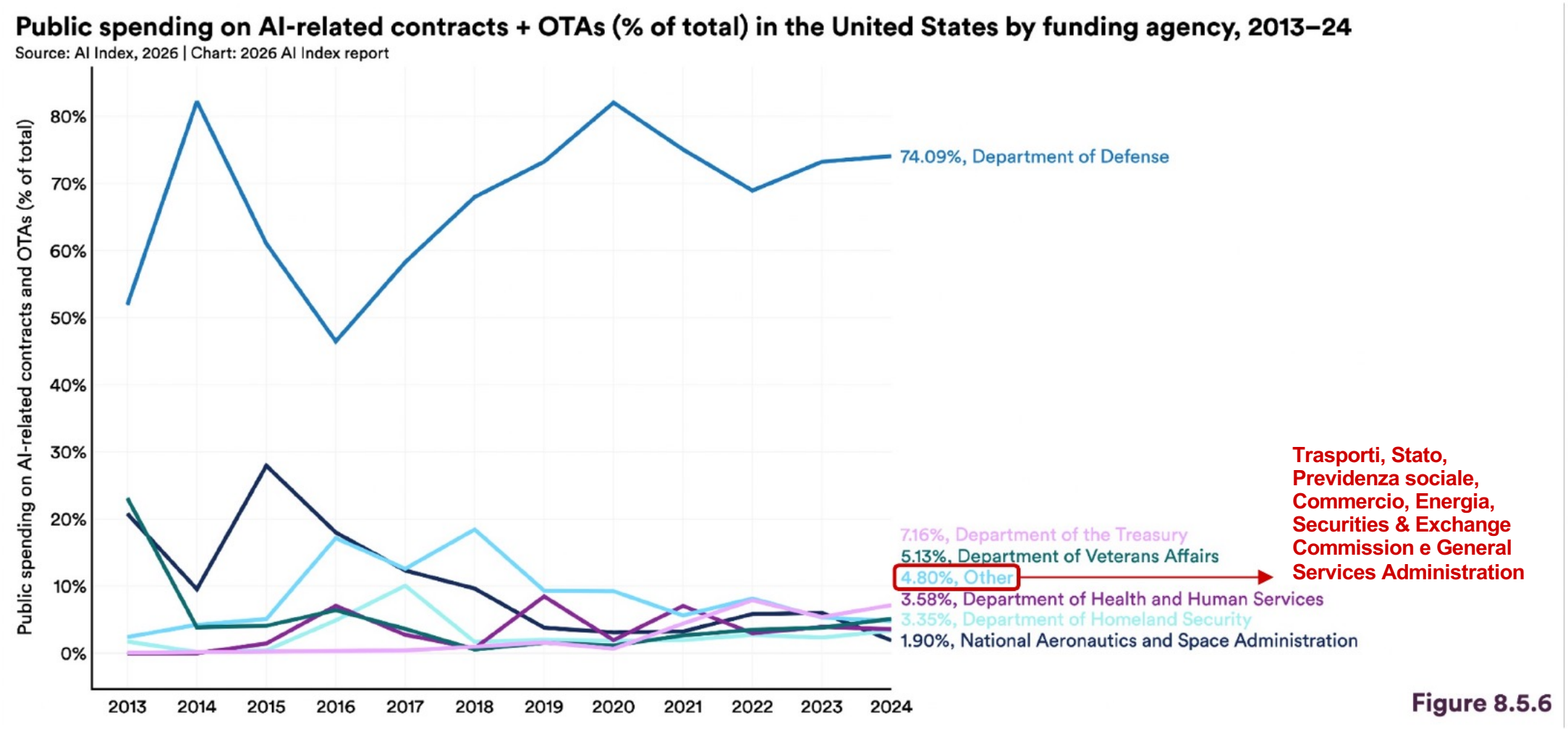


KDD25 Oral (9%)

Dati e calcolo modesti (1000 istanze, 1 giorno su V100) ; abbastanza generalizzabile.

Considerazioni finali

L’IA nei trasporti è ancora agli inizi



[1] S. Sha et al., “The AI index 2026 annual report,” in The AI index 2026 annual report, 2026. [Online]. Available: https://hai.stanford.edu/ai-index/2026-ai-index-report

Sintesi delle considerazioni chiave

- Teoria del cambiamento per decarbonizzare i trasporti
  - La decarbonizzazione dei trasporti non ha un promotore economico centrale che la sostenga
  - Il successo richiede un'ampia coalizione di attori con priorità allineate al clima
    - Cina → politica industriale → sicurezza energetica → elettrificazione
    - Classi lavoratrici e medie → voti → costo e comodità → cambio modale
    - Imprese → operazioni → costo → miglioramenti di efficienza
  - Riflettete: quali azioni per il clima coincidono con le tante priorità dei trasporti?
    - Esempio personale: Utah → regolare la guida → qualità dell'aria → guida ecologica
- Quando è utile l'IA?
  - L'IA può 1) costruire modelli dei processi di trasporto basati sui dati, 2) ottimizzare i modelli per trovare buone soluzioni, 3) automatizzare flussi digitali, 4) consentire l'automazione robotica
  - La parte più difficile è spesso capire quando uno di questi è un collo di bottiglia chiave e come si integra con il resto della soluzione/del sistema

Punti di accesso e prossimi passi

Partecipate: trasporti sostenibili

- Bridging Transportation Researchers (BTR)
  - Conferenza di ricerca sui trasporti a zero emissioni e zero costi (virtuale, 12-13 agosto!)
- National Association of City Transportation Officials (NACTO)
  - Associazione di città ed enti di trasporto nordamericani per sicurezza, sostenibilità, accesso ed equità nelle città
  - Conferenza Designing Cities (prossima edizione: Nashville, maggio 2027)
- Transportation Research Part D: Transport and Environment
  - Rivista di riferimento sugli impatti ambientali dei trasporti, le risposte politiche e le loro implicazioni per progettazione, pianificazione e gestione dei sistemi di trasporto
- Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting
  - Il TRB fa parte delle National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine
  - Ecosistema professionale centrale in Nord America (Washington DC, ogni gennaio)
  - Standing Committee on Transportation Energy Data and Analysis (AED18) (riunione precedente)
    - Focus: ricerca e innovazione su dati e metodi analitici per misurare uso di energia, consumo di carburante ed efficienza dei sistemi di trasporto.



Partecipate: IA + trasporti

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies
  - Rivista di riferimento su sviluppo, applicazioni e implicazioni nei sistemi di trasporto e nelle tecnologie emergenti
- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems
  - Rivista di riferimento sulla ricerca di base e applicata su tutti gli aspetti scientifici e tecnici dei sistemi di trasporto moderni
- Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting
  - Ecosistema professionale centrale in Nord America (Washington DC, ogni gennaio)
- IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (prossima edizione: Napoli, Italia, 15-18 sett.)
  - La principale conferenza IA/ITS del settore





Awesome RERITE: Una raccolta di dataset e benchmark aperti per la ricerca sui trasporti

https://www.rerite.org/awesome-rerite

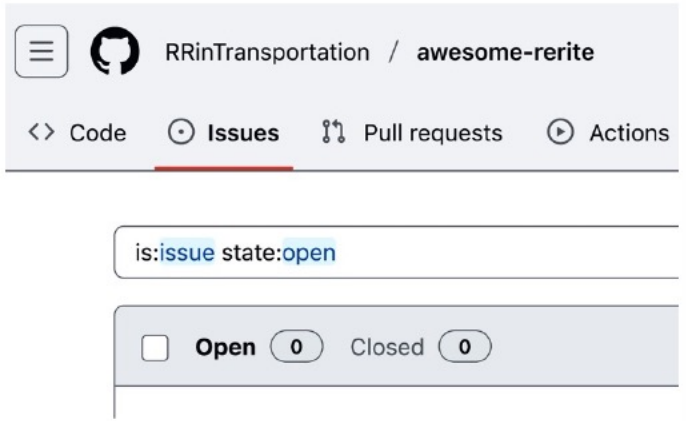
Tooling & Workflows

- **Global Urban Street Networks** — updated and published repository containing street network models for all 10,351 urban areas worldwide (GraphML, GeoPackages, and node/edge lists), plus indicators and metadata. Journal article: https://doi.org/10.1177/23998083261446991. Source code: https://github.com/gboeing/street-network-models.
- **OSMnx** — award-winning toolkit by Geoff Boeing for downloading, modeling, and analyzing street networks.
- **osm2gmns** — converts OpenStreetMap data into GMNS format; developed by Jiawei Lu and Xuesong (Simon) Zhou.
- **DTALite** — ASU Transportation AI Lab's macroscopic/mesoscopic AMS library that natively reads GMNS.
- **DTA** — Dr. Ke Han's open-source dynamic user equilibrium solver (see Networks and Spatial Economics, 2019).
- **OSRM** — C++14 routing engine providing lightning-fast shortest path queries.

Avete altre risorse da condividere? È facile!

Vogliamo promuovere e condividere di più con la comunità!

Aprite una issue sulla pagina GitHub o scriveteci!



Esploratore di scienza aperta per la ricerca sui trasporti



Call for interest: numero speciale su valutazioni e dataset nei trasporti (TR Part C e T-ITS)

Call for Interest: Transportation Evaluations & Datasets

RERITE is excited to announce a new initiative: In preparation for a Special Issue on "**Evaluations & Datasets for Transportation Research**", please let us know your evaluations & datasets **needs and wish list**. The special issue will be published with Transportation Research: Part C (TRC) and/or IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (T-ITS).

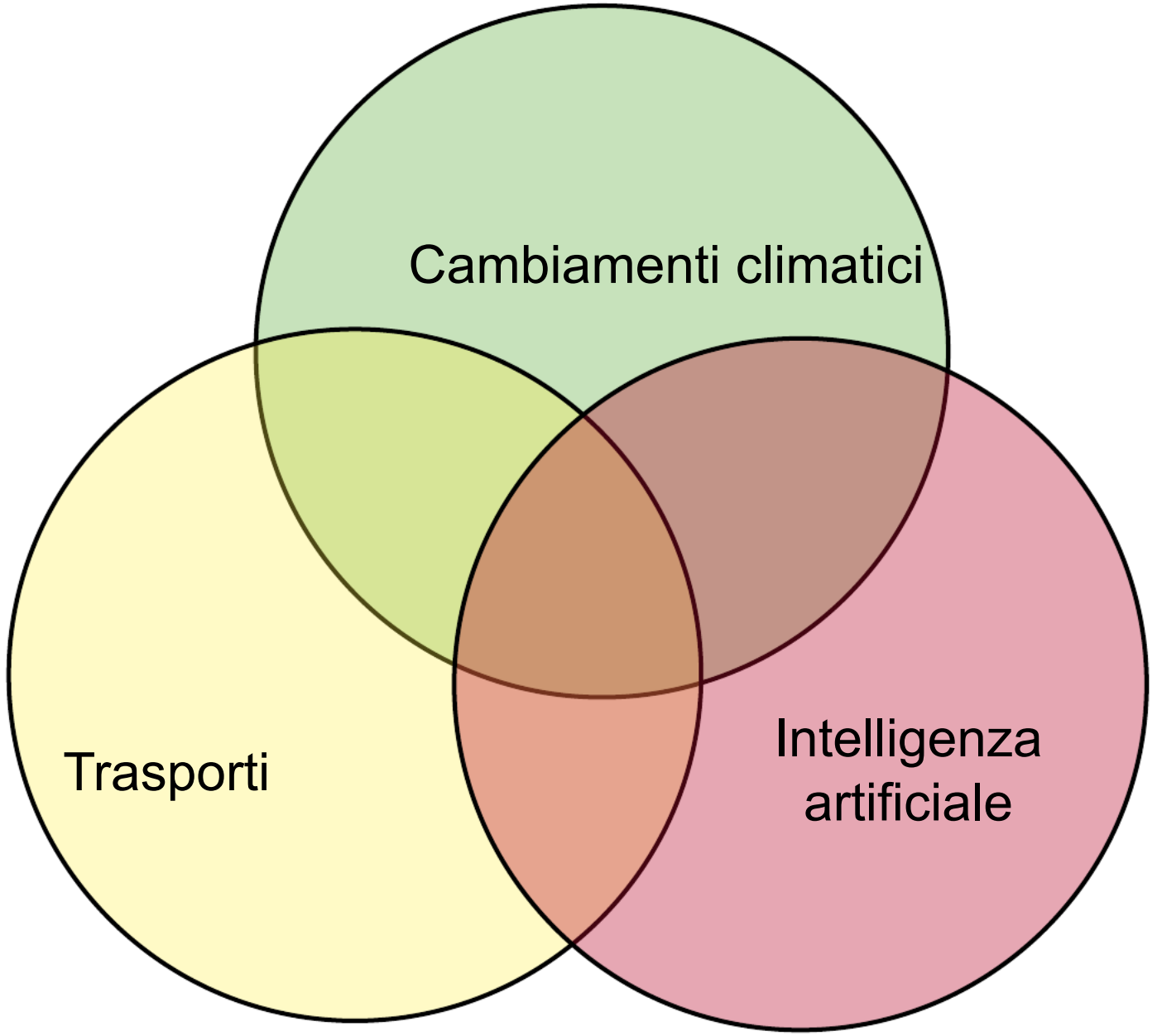
You are welcome to fill out the form as many times as you have wishes. Please include as much context as you can; the more context you provide, the more effectively we will be able to scope and target the special issue.

Do not worry about whether someone else will submit the same topic. The more a topic is expressed as a need, the more we can understand the needs of the community!

This initiative is modeled after the NeurIPS 2026 Evaluations & Datasets Track Call for Papers.

RERITE

rerite.org


Cambiamenti climatici
Trasporti
Intelligenza artificiale

Appendice

Temi aggiuntivi

- L’IA per la mitigazione nell’aviazione commerciale
  - Sandalow, David B. et al., “Artificial Intelligence for Climate Change Mitigation Roadmap (Second Edition),” (Chapter 7: Commercial Aviation), Nov. 2024, doi: 10.7916/2J4P-NW61 .
- L’IA per la mitigazione nel trasporto marittimo
  - World Economic Forum, “Intelligent Transport, Greener Future: AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics.” Jan. 2025. https://seminarleadership.ibo.pe/case-02/ .
- L’IA per l’adattamento e la resilienza dei trasporti
  - Costa, Miguel, et al. “Artificial Intelligence for Climate Adaptation: Reinforcement Learning for Climate Change-Resilient Transport.” arXiv, 2026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.06278 .