



Accessibilità delle reti di trasporto collettivo in ambito urbano e potenzialità della micromobilità elettrica

Prof. Ing. Marialisa Nigro; Ing. Rosita De Vincentis

ACCESSIBILITÀ DELLE RETI DI TRASPORTO COLLETTIVO IN AMBITO URBANO E POTENZIALITÀ DELLA MICROMOBILITÀ ELETTRICA

Prof. Ing. Marialisa Nigro (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre); Ing. Rosita de Vincentis (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: 2.25 - Accessibilità delle reti di trasporto collettivo in ambito urbano e potenzialità della micromobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana" Macro attività 3 (LA 2.25 e LA2.26)

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Gaetano Valenti

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre: prof. Ing. Marialisa Nigro

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 ACCESSIBILITÀ DELLE RETI DI TRASPORTO COLLETTIVO.....	7
3 MICROMOBILITÀ ELETTRICA.....	9
3.1 CARATTERISTICHE TECNICHE DEI MEZZI DI MICROMOBILITÀ ELETTRICA.....	9
3.2 MICROMOBILITÀ ELETTRICA IN SHARING.....	12
3.3 LA RAPIDA DIFFUSIONE DEI MONOPATTINI ELETTRICI COME MEZZI INDIVIDUALI ED IN SHARING.....	16
3.4 ANALISI IN SIMULAZIONE PER VALUTARE LE POTENZIALITÀ DELLA MICROMOBILITÀ ELETTRICA IN SHARING.....	18
4 DERIVAZIONE DELLA DOMANDA DI MICROMOBILITÀ ELETTRICA ATTRAVERSO L'ANALISI DI <i>PATTERN</i> VEICOLARI ESTRAPOLATI DA BANCHE DATI FLOATING CAR DATA (FCD).....	21
4.1 METODOLOGIA.....	21
4.1.1 <i>Analisi di compatibilità a livello di singola coppia Origine-Destinazione</i>	25
4.1.2 <i>Analisi di compatibilità infrastrutturale</i>	25
4.1.3 <i>Analisi di compatibilità multimodale</i>	27
4.2 RISULTATI NUMERICI.....	29
5 CONCLUSIONI.....	37
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	39
7 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	42

Sommario

Il presente documento riporta la descrizione delle attività condotte dal Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre, nella II annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, all'interno dell'Accordo di collaborazione "Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana" per quanto attiene la Macro attività 3 (LA 2.25 e LA2.26). Tale Macro attività si concentra sul *topic* della micromobilità elettrica e di come questa possa influire in ambito urbano sull'accessibilità in genere, e sull'accessibilità alle reti di trasporto collettivo in particolare, andando conseguentemente a ridefinire le scelte modali e la domanda di energia.

Il documento segue la struttura delle attività di seguito riportate:

- Viene definito il significato del termine accessibilità con riferimento alle reti di trasporto e quindi analizzata l'accessibilità alle reti di trasporto collettivo, visto quest'ultimo come soluzione alle problematiche di congestione da traffico e come modalità di trasporto sostenibile dal punto di vista energetico e ambientale;
- Si passa alla micromobilità elettrica come modalità emergente di trasporto sia per spostamenti monomodali di "ultimo miglio" sia in combinazione con il trasporto collettivo. Segue un'attenta analisi da letteratura sulle caratteristiche tecniche, prestazionali e funzionali dei mezzi di micromobilità elettrica;
- Un approfondimento è riportato sui monopattini elettrici, mezzi di micromobilità che si stanno sempre più diffondendo in Europa ed in Italia ed hanno subito una forte accelerazione sia come mezzi individuali che in modalità sharing a seguito della crisi sanitaria e dei conseguenti limiti alla mobilità dettati dal Covid-19;
- Segue un'analisi in simulazione delle potenzialità della micromobilità elettrica (con caso specifico ai monopattini elettrici) in termini di tempi e distanze su un'area studio della città di Roma, dove solo recentemente (2020) tali mezzi sono comparsi;
- Infine viene proposta una metodologia che a partire da dati Floating Car Data (FCD) forniti dall'ente di ricerca Enea permette di derivare le quote di domanda privata potenzialmente dirottabili su sistemi di micromobilità elettrica sia per singoli spostamenti origine-destinazione sia in combinazione con il trasporto collettivo ed in particolare a supporto delle fasi di accesso/egresso ad esso.

Quest'ultima metodologia, fortemente innovativa e trasferibile anche per analisi in contesti urbani tra loro differenti, è stata applicata alla città di Roma (Comune di Roma). Essa tiene conto di criteri di accessibilità in termini sia di infrastrutture su cui i mezzi di micromobilità devono muoversi, sia in termini di tempi e distanze di accesso.

1 Introduzione

La presente ricerca si colloca all'interno di uno scenario che vede un sempre maggiore incremento del tasso di penetrazione dei veicoli elettrici.

La problematica che ne deriva, con specifico riguardo agli ambiti urbani, è che l'incremento della mobilità elettrica da una parte non riduce la congestione veicolare e dall'altra genera problemi di richiesta di energia in termini di concentrazione della sua domanda nello spazio e nel tempo (*energy congestion*).

La soluzione che si configura è, anche in uno scenario di completa elettrificazione, la necessità di favorire la multimodalità; infatti:

- la multimodalità permette l'uso di sistemi di trasporto collettivo ad elevata capacità ed elevata potenzialità (minore uso dello spazio);
- la multimodalità permette di fermare i mezzi privati in aree più esterne della città, limitando la congestione usuale dei centri urbani e sposta la richiesta di energia a livello di spazio (non a destinazione ma dove avviene lo scambio multimodale);
- la multimodalità favorisce schemi *vehicle to grid*, in quanto l'energia accumulata nei mezzi privati non necessita di essere utilizzata completamente nel momento in cui avviene uno *shift* modale verso altri sistemi di trasporto;
- la multimodalità non si limita esclusivamente al passaggio da mezzo privato a trasporto collettivo ma può estendersi ad altre modalità di trasporto di rapida diffusione in particolare servizi in *sharing* ed in *pooling* compresa la micromobilità elettrica (biciclette elettriche, overboard, monowheel, monopattini elettrici).

A valle di ciò, emerge la necessità di:

1. definire quali sono le caratteristiche e le condizioni che determinano un buon livello di accessibilità delle reti di trasporto collettivo in ambito urbano, tali da favorire l'interscambio modale a supporto dei sistemi di trasporto collettivo;
2. valutare quelle che sono le potenzialità, sempre in termini di accessibilità alle reti di trasporto in genere ed alle reti di trasporto collettivo in particolare, dettate da una serie di sistemi di mobilità elettrica che si stanno sempre più diffondendo, i cosiddetti sistemi di micromobilità elettrica.

Tali necessità verranno di seguito approfondite:

- definendo il termine accessibilità e declinando lo stesso verso le singole modalità di trasporto che permettono di favorire lo *shift* modale verso il trasporto collettivo;
- analizzando l'emergere della micromobilità elettrica ed in particolare:
 - riportandone le caratteristiche tecniche, prestazionali e funzionali attraverso un'analisi di letteratura;
 - valutandone le potenzialità in termini di mobilità sostenibile tramite *best practices*;
 - testandone le sue capacità in termini di tempi risparmiati e distanze coperte attraverso un approccio in simulazione;
 - sviluppando una metodologia *ad hoc* che possa permettere, attraverso l'analisi dei *pattern* di mobilità dei veicoli privati da Floating Car Data (FCD), di quantificare la domanda potenziale dirottabile su sistemi di micromobilità elettrica.

Attraverso tali analisi e approfondimenti:

- si otterrà uno stato dell'arte dell'accessibilità alle reti di trasporto collettivo, che sarà d'ausilio per declinare la fattibilità dell'integrazione tra sistemi di micromobilità elettrica e trasporto collettivo;
- si offrirà un quadro esaustivo della micromobilità elettrica utile ai differenti stakeholders coinvolti nello sviluppo sostenibile della mobilità elettrica, *i.e.* enti di ricerca, operatori di servizi di mobilità elettrica, fornitori di energia, pianificatori dei trasporti e urbanisti;
- si svilupperà una metodologia innovativa basata principalmente su banche dati *FCD* e *open data* per derivare la domanda potenziale di micromobilità elettrica: i risultati, a valle dell'applicazione al caso studio di Roma, permetteranno di avere informazioni strategiche per la corretta localizzazione di eventuali servizi di micromobilità elettrica in *sharing*, nonché derivare la potenziale domanda di energia e la localizzazione ottima di stazioni di ricarica.

2 Accessibilità delle reti di trasporto collettivo

L'accessibilità è definita come la possibilità di raggiungere un generico punto/nodo/zona della rete di trasporto in una qualsiasi fase dello spostamento. L'accessibilità viene distinta in "attiva", qualora si misuri tale possibilità in uscita a partire da un punto/nodo/zona, o in "passiva" qualora la si misuri in ingresso verso un punto/nodo/zona. Una maggiore accessibilità implica una maggiore facilità di spostamento e mobilità. Essendo l'accessibilità fortemente condizionata dalle condizioni di offerta (infrastrutturale e di servizi), essa deve essere computata in rapporto all'alternativa modale di interesse.

In tale ricerca, il *focus* è in particolare sull'accesso ai sistemi di trasporto collettivo che sono sistemi discreti a cui si può accedere solo tramite specifici punti della rete (nodi fermata) e solo in specifici intervalli di tempo in funzione della tipologia di servizio (servizi a frequenza o ad orario). Per l'accesso ai sistemi di trasporto collettivo si può distinguere tramite:

1. Accesso in modalità pedonale o tramite sistemi di micromobilità;
2. Accesso "Tutto pubblico";
3. Accesso tramite mezzo privato (Park & Ride).

L'accesso tramite modalità pedonale può essere visto come il caso base per usufruire della rete di trasporto collettivo, di fatti tutte le fasi di accesso ai servizi di trasporto collettivo comportano una o più fasi di spostamento a piedi (Bernick e Cervero, 1997). Tradizionalmente esistono dei valori massimali di distanza per cui è possibile effettuare l'accesso a piedi (500-800 metri, Gori et al., 2014) nonché devono verificarsi condizioni infrastrutturali opportune della rete pedonale in termini di connettività, qualità e prossimità (Schlossberg, 2006). Esistono a tal fine diverse metriche da letteratura (Jacobs, 1993; Dill, 2004; Zhang e Kukadia, 2005; Handy et al., 2003; Peponis e Wineman, 2002; Rodríguez et al., 2006; Porta e Renne, 2005), nonché relativi valori di benchmark (Gori et al., 2014; Nigro et al., 2018).

Nel caso in cui le distanze in gioco non siano più compatibili con distanze pedonali, l'accesso al trasporto collettivo può essere realizzato tramite sistemi definiti di micromobilità tradizionali come le biciclette o i nuovi e sempre più diffusi servizi di micromobilità elettrica, siano essi in sharing o di proprietà. I servizi di micromobilità elettrica sono di particolare interesse ai fini del presente studio, sia perché da un lato si pongono come un'alternativa promettente e sostenibile per favorire la multimodalità ed in particolare per favorire l'accesso al trasporto collettivo, sia in virtù della loro alimentazione che influisce sulla richiesta nello spazio e nel tempo di energia.

Nel caso di accesso "tutto pubblico" si entra in uno spostamento generalmente definito "multimodale complesso" ovvero uno spostamento a parità di macro-categoria (trasporto pubblico), ma che prevede uno scambio tra servizi con caratteristiche differenti in termini di mezzi/frequenze/velocità: è questo ciò che accade ad esempio nell'interscambio tra linee "feeder" o di adduzione e rete primaria del trasporto collettivo. L'accesso o l'interscambio tra linee "feeder" e linee principali avviene generalmente in nodi definiti centri di trasbordo. La corretta progettazione dei servizi e del loro interscambio si trova all'interno del problema di progettazione ottima delle reti di trasporto collettivo (Transit Network Design, TND, Cipriani et al., 2012a; Cipriani et al., 2012b) che esula chiaramente dagli obiettivi del presente studio.

Qualora l'accessibilità tramite sistema di trasporto collettivo di adduzione alla rete portante non sia adeguata, l'utente può scegliere di raggiungere la fermata di interesse tramite mezzo privato (qualora quest'ultimo sia disponibile). In tal caso lo spostamento multimodale è detto spostamento di Park & Ride ed è usualmente facilitato dalla presenza di appositi parcheggi d'interscambio per le autovetture in prossimità delle stazioni. Il Park & Ride è stato ampiamente investigato da Nigro e Ferrara (2017, 2018), dove viene evidenziato come quest'ultimo, in uno scenario di medio-lungo periodo che veda un forte incremento di veicoli elettrici, possa essere una soluzione per ridurre la congestione da traffico (che, a parità di veicoli circolanti, siano essi elettrici o meno, non va a diminuire) e ridistribuire la domanda di energia nello spazio e nel tempo. Sempre nei precedenti studi vengono identificate come variabili esplicative principali, atte ad influenzare la domanda di Park & Ride, l'accessibilità garantita dal sistema di trasporto collettivo sia in origine che in destinazione, così come l'accessibilità dei parcheggi di scambio tramite mezzo privato.

3 Micromobilità elettrica

Lo scenario del trasporto urbano è drasticamente cambiato negli ultimi anni, in parte anche a seguito della crescita esponenziale di modalità di trasporto condivise (car sharing, ride pooling, bike sharing) e mezzi di micromobilità elettrica sia di proprietà che in sharing. Questi ultimi hanno permesso di aggiungere un crescente numero di alternative modali ed hanno offerto agli utenti la possibilità di sperimentare in maniera “*non convenzionale*” gli ambienti urbani (Scott Smith C., Schwieterman P., 2018).

La micromobilità elettrica ha le potenzialità per rappresentare il futuro del trasporto urbano se si dimostra effettivamente in grado di ridurre l’impatto dell’autovettura privata e offrire soluzioni dell’ultimo miglio complementari al servizio di trasporto pubblico, garantendo un miglioramento del sistema multimodale.

Nei seguenti paragrafi si passeranno in rassegna i principali sistemi di micromobilità elettrica, considerandone le relative caratteristiche tecniche, funzionali e prestazionali tramite letteratura tecnica, scientifica ed eventuali *best practices*; si effettuerà un focus sui monopattini elettrici (anche detti *e-scooter*) che hanno visto un forte incremento sia come mezzi individuali che in condivisione nell’ultimo biennio. A tal ragione sarà fornita anche un’analisi della loro diffusione in Italia e della relativa regolamentazione; infine, una prima analisi in simulazione permetterà la quantificazione dei benefici attesi dall’introduzione di servizi di micromobilità elettrica in un’area limitata del Comune di Roma.

3.1 Caratteristiche tecniche dei mezzi di micromobilità elettrica

La gamma di veicoli elettrici che rappresenta la micromobilità urbana include assieme alle biciclette elettriche (*e-bikes*) ed ai monopattini elettrici (*e-scooters*), altri mezzi di più ridotte dimensioni come *segway*, *hoverboard* e *monowheel*, questi ultimi attualmente non utilizzati per i servizi in sharing (se non in casi particolari quali noleggio per fini turistici).

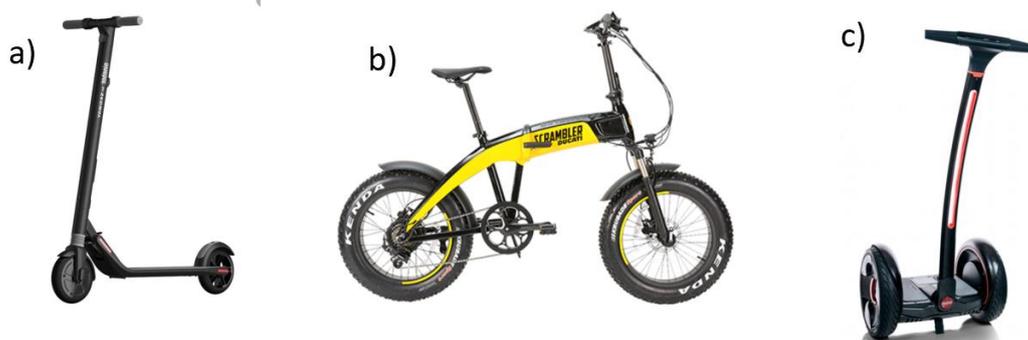


Figura 1. Esempi di e-scooter (a), e-bike (b) e segway (c) in commercio

Nelle tabelle seguenti sono elencate le caratteristiche di alcuni modelli dei suddetti veicoli attualmente in commercio.

Dalla Tabella 1, riassuntiva delle caratteristiche tecniche delle *e-bike*, si nota come la sostanziale differenza sia riferita per lo più all’autonomia del mezzo in seguito ad un ciclo di ricarica. Si passa infatti da un minimo di 45 km fino ad un massimo di 120 km per i mezzi più

performanti. Le velocità variano dai 25 km/h ai quasi 50 km/h per un peso sopportato sino ai 150 kg.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche e-bike in commercio

MODELLO	PESO [KG]	PESO SOPPORTATO [KG]	VELOCITÀ [KM/H]	AUTONOMIA [KM]	POTENZA [W]
F.LLI SCHIANO E-MOON	25	n/d	25	80	250
ELOPS 500E	26	125	n/d	45	250
ELOPS 900E	24	125	n/d	70	250
ELOPS 920E	25	125	n/d	70	250
ELOPS 940E	26	125	n/d	90	250
NCM HAMBURG	28	120	25	70	250
NCM MUNICH N8C	26	120	25	90	250
NCM MILANO	27	120	25	120	250
DUCATI URBAN-E	20	100	25	70	250
BUNAO CITY BIKE PIEGHEVOLE	23	110	30	70	250
HITWAY BK1-HW	20	120	25	45	250
SHENGMILLO MX21 PIEGHEVOLE	26	180	40	80	500
DJPP T750PLUS PIEGHEVOLE	33	150	35	80	500
ENGWE 750 W	32	150	45	60	750
SCRAMBLER DUCATI BIKE SCR-E	24	100	25	70	250

Per quanto riguarda segway (Tabella 4), hoverboard (Tabella 3) e monowheel (Tabella 2), le tabelle illustrano come si possa passare da veicoli più leggeri ma meno performanti in termini di velocità (10-20 km/h) a veicoli più pesanti ma con velocità di 30-40 km/h. Le pendenze sostenute da questi mezzi vanno dai 15° ai 30° e l'autonomia è generalmente più bassa delle e-bikes attestandosi sull'ordine dei 25-30 km.

Tabella 2: Caratteristiche tecniche monowheel in commercio

MODELLO	PESO [KG]	PESO SOPPORTATO [KG]	VELOCITÀ [KM/H]	AUTONOMIA [KM]	POTENZA [W]	PENDENZA [°]
INMOTIONV5F	12	120	25	25	550	18
INMOTIONV8F	15	120	35	50	1000	25
INMOTIONV10F	20,6	120	40	50	2000	30
ZKORN	20,6	120	20	30	800	30
KINGSONG KS-14D	14,5	100	30	40	800	30

Tabella 3: Caratteristiche tecniche hoverboard in commercio

MODELLO	PESO [KG]	PESO SOPPORTATO [KG]	VELOCITÀ [KM/H]	AUTONOMIA [KM]	POTENZA [W]	PENDENZA [°]
INMOTIONV5F	12	120	25	25	550	18
INMOTIONV8F	15	120	35	50	1000	25
INMOTIONV10F	20,6	120	40	50	2000	30
ZKORN	20,6	120	20	30	800	30

KINGSONG KS-14D	14,5	100	30	40	800	30
GEEKME	13,3	120	15	15	600	15
MYSIDA SCOOTER	10	100	12	20	600	15
SHIJIANX HOVERBOARD	8	100	10	20	700	20
TOEU HOVERBOARD	10,5	120	12	20	500	15
SOUTHERN-WOLF 8,5"	11	110	13	12	700	30

Tabella 4: Caratteristiche tecniche segway in commercio

MODELLO	PESO [KG]	PESO SOPPORTATO [KG]	VELOCITÀ [KM/H]	AUTONOMIA [KM]	POTENZA [W]	PENDENZA [°]
BEEPER OFF ROAD R3E	45	100	18	30	800	30
SEGWAY NINEBOT S N3M240	12,8	100	16	22	700	15

Così come per le altre tipologie di microveicoli, anche per i monopattini elettrici sono presenti in commercio differenti modelli (Tabella 5). Su di essi si riscontrano diversità in termini di caratteristiche strutturali e funzionali. È possibile trovare veicoli più leggeri, che presentano delle discrete velocità ma una ridotta autonomia, e veicoli molto più pesanti che hanno la capacità di raggiungere velocità più elevate e sono in grado di coprire una distanza molto maggiore con un solo ciclo di ricarica.

Tabella 5: Caratteristiche tecniche e-scooter in commercio

MODELLO	PES O [KG]	PESO SOPPORTA TO [KG]	VELOCIT À [KM/H]	AUTONOM IA [KM]	POTENZ A [W]	PENDENZ A [°]	TEMPO RICARIC A [H]
KUGOO S1 PRO	11	120	30	30	350	25	4
E-TWOWBOOSTER V	11,3	125	40	40	500	45	4
INMOTION L8F	11,7	100	30	30	300	27	5
SEGWAY ES2	12,5	100	25	25	300	18	4
XIAOMI M365 PRO	14,2	100	25	45	600	35	8,5
SEGWAY G30	18	100	25	65	350	35	6
RAZOR E300S	23	100	24	25	280	15	12
AERLANG H6	23	120	45	55	500	25	8
KUGOO G-BOOSTER	30	120	55	85	800	35	10
XIAOMI ELECTRIC SCOOTER PRO	15	100	25	45	300	12	9
SEAT MÓ EKICKSCOOTER 25	12,5	100	25	25	300	10	3,5
NINEBOT BY SEGWAY E45E	16,4	100	25	45	300	11	7,5
NINEBOT KICKSCOOTER E22E	13	100	25	45	300	11	7
DUCATI PRO-II	14	100	25	35	500	10	6
E-TWOW GT 2020 SMART EDITION	13	125	40	45	700	25	4,5

MODELLO	PES O [KG]	PESO SOPPORTA TO [KG]	VELOCIT À [KM/H]	AUTONOM IA [KM]	POTENZ A [W]	PENDENZ A [°]	TEMPO RICARIC A [H]
JOYOR X5S	15	120	30	45	500	15	6
URBETTER ES2	16	100	25	25	350	16	5

Dal confronto dei microveicoli analizzati il monopattino sembrerebbe porsi come un giusto compromesso per avere un veicolo leggero, resistente, facile da maneggiare e che garantisca delle buone caratteristiche funzionali in termini di velocità, potenza ed autonomia.

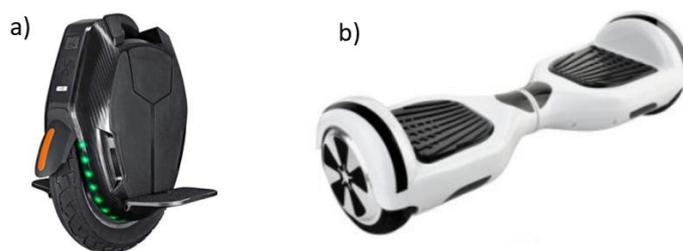


Figura 2. Esempi di Monowheel (a) e Hoverboard (b) in commercio

3.2 Micromobilità elettrica in sharing

La micromobilità elettrica in sharing nasce negli Stati Uniti nel 2017, principalmente tramite biciclette elettriche (*e-bikes*) a servizio dei campus universitari. Dopodiché si è rapidamente diffusa in tutto il mondo tramite operatori privati ed è considerata solo all’inizio del proprio ciclo di vita (Chang A. et al., 2019).

Attualmente l’industria della micromobilità elettrica in sharing è composta da una moltitudine di operatori che si contendono questo nuovo e promettente mercato, principalmente in NA, LATAM ed EMEA¹.

Secondo la definizione della NACTO (National Association of City Transportation Officials), la micromobilità elettrica in sharing comprende sia le *e-bikes* (siano esse *station based* o *dockless*, quindi basate rispettivamente sull’uso di rastrelliere/spazi dove posizionarle o viceversa completamente svincolate da un punto di collocamento) che i monopattini elettrici (*e-scooter*).

Le *e-bikes* sono sicuramente una tecnologia più consolidata rispetto ai monopattini elettrici nelle aree urbane e ciò è dovuto prettamente al fatto che queste siano il servizio con radici più consolidate nel tempo.

Esistono comunque profonde differenze nell’uso dei due mezzi e dei relativi servizi in *sharing*. Le *e-bikes* presentano un ventaglio più ampio di distanze percorribili, generalmente di medio raggio, dando prova che questo vettore si pone principalmente come alternativa monomodale, in competizione con il mezzo privato o con il trasporto collettivo (Jäppinen et al, 2013).

¹ NA North America; LATAM Latin America; EMEA Europe, Middle East, and Africa

Per la multimodalità, in Shelat et al. (2018) si evidenzia come la maggior parte dei viaggi combinati bici-trasporto collettivo venga effettuata utilizzando il treno come modalità principale e quindi su distanze maggiori rispetto a quelle che vedono l'uso di autobus di linea o metropolitane per la parte principale dello spostamento. Böcker et al. (2020) nelle loro analisi in Oslo evidenziano come l'uso di *e-bikes* al posto delle bici tradizionali possa rappresentare uno dei fattori determinanti nello *shift* modale verso modalità sostenibili, soprattutto in contesti urbani non tipicamente pianeggianti.

Ponendo a confronto *e-bikes* con *e-scooter*, dallo studio della Porsche Consulting (2019) emergono le maggiori potenzialità del servizio di *e-bikes* in termini di distanza media percorsa dagli utenti. Mentre nel caso delle *e-bikes* siamo sull'ordine dei 4-6 km, nel caso degli *e-scooters* si scende sull'ordine dei 2,5 (Figura 3).

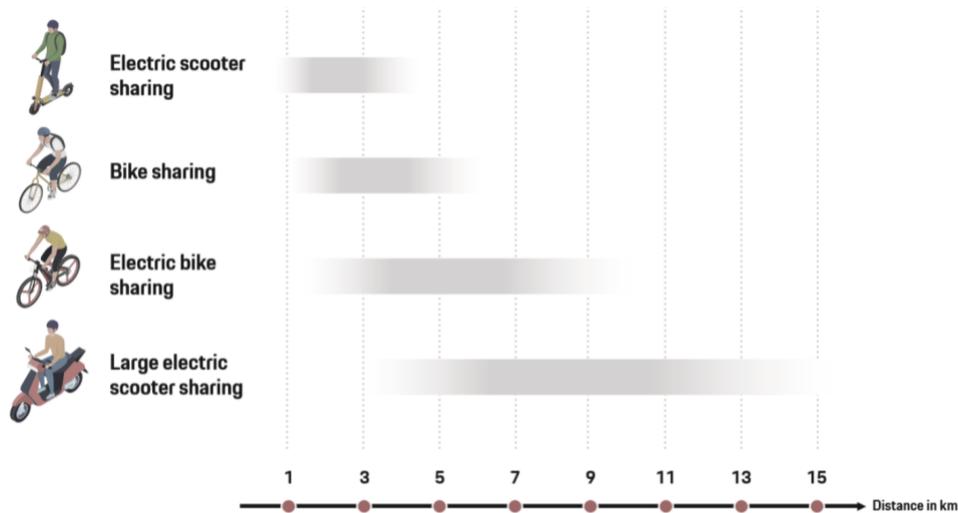


Figura 3. Distanza percorsa con differenti mezzi di micromobilità in sharing (Porsche Consulting, 2019)

Ciò si riscontra anche nei dati riportati in letteratura da Campbell et al. (2016) e da McKenzie (2020): il primo riporta per le *e-bikes* una distanza percorsa media di 4,5 km ed una mediana di 4 km, mentre il secondo, raccogliendo i dati di 6 servizi di micromobilità fra *e-scooter* ed *e-bikes*, ottiene i valori di media e mediana riportati in Tabella 6.

Tabella 6. Confronto tra distanze medie percorse dai servizi di e-scooter ed e-bike in sharing (McKenzie, 2020)

Servizio	Tipologia	Numero di mezzi	Numero medio di veicoli/giorno	Viaggi Totali	Distanza media (mediana) [m]
Bird	e-scooter	2328	134	20'475	2382 (2081)
Lime	e-scooter	2573	131	25'787	874 (405)
Lyft	e-scooter	3765	342	100'215	2159 (1789)
Skip	e-scooter	5953	489	178'531	1797 (1485)
Spin	e-scooter	1333	99	13'866	2274 (1859)
Jump	e-bike	467	141	39'112	4251 (3671)

Nonostante i servizi di *bike sharing* siano presenti da molti anni, la ricerca si è interessata a tale dominio principalmente nell'ultimo decennio, come riportato in Figura 4, e con un interesse specifico principalmente incentrato alla gestione ed all'ottimizzazione di tali servizi.

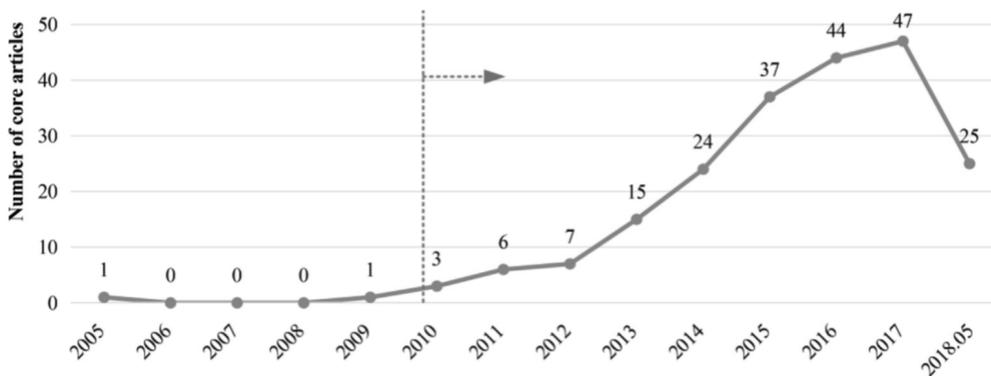


Figura 4. Numero di articoli dedicati al bike sharing, dall'anno 2005 a Maggio 2018 (Si, Shi, Wu, Chen, & Zhao, 2019).

Nel caso degli *e-scooter*, la letteratura internazionale non offre ancora una vasta gamma di studi. Gli studi presenti, per lo più statunitensi, effettuano analisi attraverso due principali approcci: in simulazione o tramite dati desunti da studi pilota e/o interviste.

In termini di riduzione del traffico e rafforzamento all'uso del trasporto pubblico, uno studio in simulazione di Smith e Schwieterman (2019) ha dimostrato che a Chicago il servizio di *e-scooter sharing* può essere un'alternativa all'auto privata per viaggi tra 0,8 e 3 km. In particolare, all'interno di questo raggio di distanza, gli *e-scooter* sono un'alternativa competitiva in termini di tempi di percorrenza nel 30% -39% dei viaggi (Figura 5 e Figura 6); per distanze più lunghe, l'*e-scooter sharing* può essere utile come servizio di adduzione al trasporto pubblico. Chang et al. (2019) hanno trovato risultati simili confrontando diversi servizi di micromobilità e osservando che la maggior parte dei viaggi (70% -73%) effettuati da monopattini elettrici copre una distanza inferiore a 1,6 km (Figura 7).

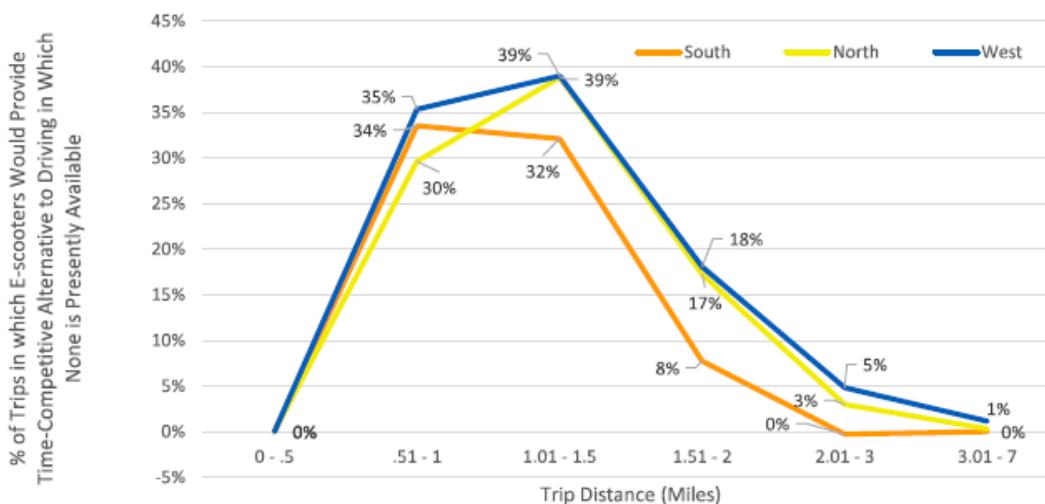


Figura 5. Relazione tra distanza percorsa e competitività del servizio di e-scooter sharing nella città di Chicago (Smith e Schwieterman, 2019)

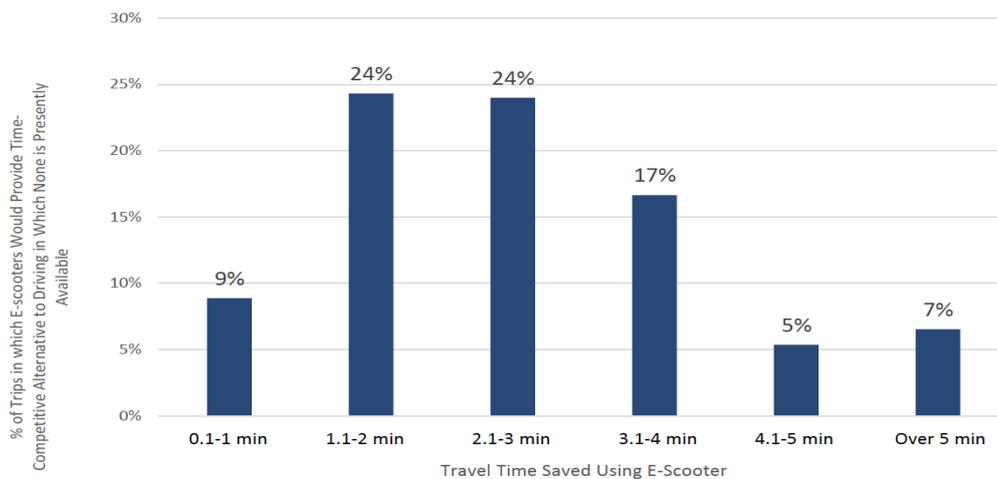


Figura 6: Tempo risparmiato con l'utilizzo del servizio di e-scooter nella città di Chicago (Smith e Schwieterman, 2019)

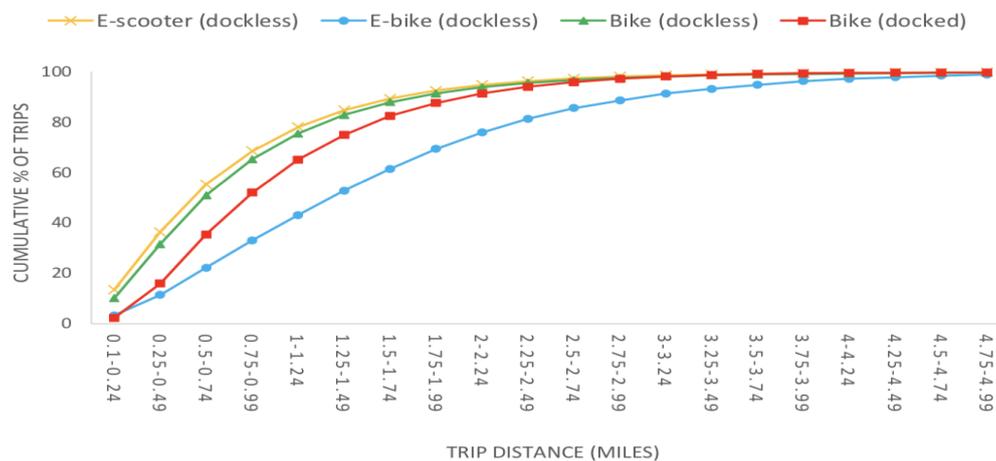


Figura 7: Distanze percorse per modalità di sistema di trasporto condiviso nella città di Washington (Chang et al., 2019)

Un sondaggio online condotto da Denver Public Works nel 2019 ha riportato che il 57% degli intervistati ha sostituito i viaggi a piedi o in bicicletta con i monopattini elettrici, mentre il 32% degli intervistati li ha adottati in sostituzione all'autovettura.

Uno studio del Portland Bureau of Transportation sempre nel 2019 ha analizzato i viaggi in monopattino elettrico a Portland per un periodo di quattro mesi: 700.369 viaggi che coprono 1,29 milioni di km utilizzando 2.043 scooter elettrici. È emerso che il 62% del campione ha accettato positivamente l'introduzione del nuovo servizio: il 71% degli utenti ha effettuato viaggi in *e-scooter* per raggiungere direttamente la destinazione finale e il 34% ha sostituito l'auto privata con il servizio di *e-scooter sharing*.

L'operatore *Lime* (2018) ha condotto un'analisi simile attraverso 7.000 interviste agli utenti della città di San Francisco: oltre il 60% degli intervistati ha sostituito l'auto con l'*e-scooter*, mentre il 40% ha adottato il servizio per avere una migliore accessibilità alle stazioni di trasporto pubblico. Anche Baek et al. (2021) mostrano attraverso l'uso di modelli comportamentali che, essendo il valore del tempo di percorrenza significativamente importante soprattutto per spostamenti "dell'ultimo miglio", la presenza di monopattini elettrici in *sharing* può aumentare i vantaggi per

gli utenti del sistema di trasporto, soprattutto per coloro che viaggiano all'interno di un corridoio in cui le modalità convenzionali dell'ultimo miglio non sono disponibili.

Ma la letteratura internazionale non sempre converge verso l'effettiva sostenibilità dei monopattini elettrici: ad esempio in Christoforou et al. (2021) si rileva attraverso un ampio sondaggio *face to face* agli utenti di monopattini elettrici a Parigi, che questi sono passati all'uso del monopattino principalmente dal camminare e dai trasporti pubblici (72%), mentre solo il 16% è passato al monopattino da una modalità motorizzata (auto privata, taxi, moto).

Ci sono ulteriori aspetti che devono essere considerati nell'uso di tali sistemi e che possono determinarne una maggiore o minore propensione all'uso (Trivedi, 2019). Uno di questi aspetti è senz'altro la sicurezza. Sempre nello studio del Portland Bureau of Transportation gli utenti hanno indicato le loro preferenze nell'uso di monopattini elettrici su strade a bassa velocità o piste ciclabili protette. Inoltre si tende a guidare sui marciapiedi (in Paesi in cui ciò è permesso), con un evidente disagio per i pedoni e un problema di accessibilità per i disabili. La propensione alla guida sui marciapiedi è correlata ad un'elevata percezione di sicurezza (Lime, 2018). Tuttavia, in Ma et al. (2021), si sottolinea come le condizioni di sicurezza degli e-scooter, come modalità emergente di micromobilità, siano significativamente sottovalutate a causa della mancanza di dati incidentali sufficienti per analizzarne in dettaglio il problema.

L'ubicazione e la disponibilità degli e-scooter sono altre due variabili che possono influenzare l'adozione del servizio: infatti, nel rapporto 6t-bureau de recherche (2019), i dati di Parigi, Marsiglia e Lione hanno sottolineato che circa il 60% degli intervistati ha rinunciato a utilizzare gli e-scooter a causa della loro scarsa disponibilità. Questo è normalmente verificato per qualsiasi servizio in condivisione.

Da quanto riportato sinora, nel considerare questi nuovi servizi di micromobilità elettrica è bene porre estrema attenzione alle modalità di trasporto che tali servizi vanno a sostituire. Essi andrebbero ad essere effettivamente sostenibili nel caso in cui fossero utilizzati in sostituzione all'autovettura o in maniera combinata con il trasporto collettivo. Laddove vanno a sostituire spostamenti pedonali (e questo può essere il caso soprattutto degli *e-scooter*), non rappresentano una soluzione quanto esclusivamente un incremento del *portfolio* di alternative degli utenti.

3.3 *La rapida diffusione dei monopattini elettrici come mezzi individuali ed in sharing*

Dall'estate del 2019, la mobilità a livello europeo si è arricchita di un altro modo di trasporto che si è espanso rapidamente negli ambiti urbani: il monopattino elettrico o *e-scooter*. Come per le *e-bike*, la presenza degli *e-scooter* è garantita dagli operatori di *sharing mobility*, che si occupano di fornire il servizio agli utenti attraverso dei veicoli a noleggio. Contestualmente si è anche alzata la quota di coloro che possiedono un monopattino elettrico (+140% di vendite di nei primi 7 mesi 2020 rispetto al 2019 a livello italiano, dati rilevazioni GfK).

Sino agli inizi del 2020 erano attive sei principali compagnie di monopattini in sharing (*Circ, Dott, Lime, Tier, Voi, Jump e Bird*), alcune di queste già in competizione tra di loro negli Stati Uniti, assieme ad alcuni operatori locali minori. La situazione degli operatori di *e-scooter sharing* è però in rapido mutamento, con alcuni operatori non più sul mercato o acquisiti da altri (è questo il caso di *Circ* acquisito da *Bird* nel corso del 2020).

Gli e-scooter non sono però disponibili solamente nelle principali città. Alcuni operatori hanno infatti introdotto rapidamente il proprio servizio all'interno di città di medie e piccole dimensioni, con circa 200.000 abitanti o meno (un esempio in tal senso sono le città di Mainz, Ingolstadt, Rimini e Pamplona).

Il numero di dispositivi presenti e la dimensione dell'area di copertura sono ovviamente funzione delle caratteristiche della città. Si passa infatti dai circa 10.000 veicoli presenti in città come Berlino e Stoccolma, ai circa 5.000 di città media come Monaco di Baviera e Lione, fino a meno di 1.000 dispositivi in piccole città come Ingolstadt e Mainz.

Sulla base di un campione di dati forniti da *Lime, Tier, Voi e Circ*, la società *Civity Management Consultants* ha evidenziato come la frequenza con cui questi mezzi vengono noleggiati durante l'arco della giornata possa variare da una media di circa 5 viaggi per veicolo per città come Budapest, Norimberga ed Oslo, fino ad una media di circa 2 viaggi per veicolo in città come Lione e Lisbona. Un ridotto numero di viaggi per veicolo può essere dovuto al fatto che l'offerta non è ben recepita dall'utenza o che il mercato è già saturo e la domanda si disperde tra le troppe alternative. Sempre la stessa analisi riporta per la città di Amburgo una maggiore concentrazione degli spostamenti durante il fine settimana e nelle ore pomeridiane facendo pensare ad un utilizzo degli *e-scooter* principalmente per scopi ricreativi e turistici.

In Italia il mercato dell'*e-scooter sharing* si può definire in una fase precompetitiva. Nel giugno 2019 (decreto 4 giugno 2019, [Gazzetta Ufficiale luglio 2019](#)), l'Italia ha adottato un regolamento sperimentale sulla micromobilità che stabilisce i requisiti tecnici per gli *e-scooter* (senza sedili, potenza nominale del motore massima 500W, velocità massima consentita 20 km/h e ridotta a 6 km/h nelle aree pedonali, luce rossa fissa sul retro, casco non obbligatorio e mantello catarifrangente durante le ore notturne) e rigorose linee guida per la circolazione nelle aree pedonali, sulle piste ciclabili e nelle strade urbane con velocità massima di 30 km/h.

Recentemente (febbraio 2020) il parlamento italiano ha approvato una riforma ([Testo dal sito del Senato della Repubblica Italiana](#)) in cui gli e-scooter sono considerati biciclette in termini di circolazione sulle strade urbane. Gli standard tecnici sono quelli del precedente regolamento (ad eccezione dei caschi che diventano obbligatori sotto i 18 anni). La nuova riforma è valida su scala nazionale e ogni comune è responsabile di recepire localmente tali direttive.

Alcune città, nella fase di apertura al servizio di *e-scooter sharing*, hanno definito un numero massimo di operatori: ad esempio, Milano ha stabilito un numero totale di 6'000 *e-scooter*, corrispondenti a otto operatori (scelti con il criterio "first-in / first-out") con una flotta di 750 *e-scooter* ciascuno. Rimini ha invece adottato una gara basata sulla migliore offerta tecnica, dove sono state concesse a due operatori le licenze per una flotta di 500 *e-scooter* ciascuno. I criteri di selezione della graduatoria hanno incentivato principalmente i seguenti requisiti tecnici: i) un sistema tariffario che, oltre alla tariffa standard al minuto, comprendesse pacchetti giornalieri, settimanali e mensili; ii) la qualità tecnica degli e-scooter; iii) elevati standard operativi in termini di controllo della flotta.

Torino e Verona hanno fatto entrare ogni operatore, ma mentre la prima ha imposto diversi requisiti quali un massimo di 500 *e-scooter* per operatore, la seconda ha dato libero accesso al mercato, chiedendo alle aziende di seguire solo alcune prescrizioni informali. Sul versante operativo gli operatori torinesi devono garantire: i) di rimuovere un e-scooter con parcheggio non conforme agli standard previsti in 24 ore dall'identificazione della criticità da parte della polizia, ii) di adottare veicoli a basse/zero emissioni per gestire la flotta e il ciclo di vita delle

batterie in conformità con le normative nazionali ed europee e iii) un adeguato magazzino localizzato in città.

Per quanto riguarda le politiche di parcheggio, solo Milano ha introdotto vincoli sugli *e-scooter*: nell'area operativa del servizio, il parcheggio degli *e-scooter* è stato consentito esclusivamente negli slot di parcheggio per biciclette. Questa misura è stata introdotta per preservare e mantenere l'accessibilità dei marciapiedi pubblici, una problematica sempre più sentita con la crescita del numero di operatori e mezzi nelle città.

Nella città di Roma solo a maggio 2020 è stato lanciato un bando pubblico per operatori di *e-scooter sharing* a sostegno della fase di mobilità post COVID-19. Roma ha integrato gli approcci di Milano e Torino, con alcune novità. Il limite massimo della flotta è stato fissato a 16.000 scooter elettrici consentendo a ciascun operatore di richiedere tra 750 e 1.000 licenze in prima tranche, e fino a 2.500 in seguito. Il regolamento locale è fortemente orientato a preservare l'accessibilità dei marciapiedi e il decoro urbano; gli operatori possono infatti schierare fino a 5 scooter di fila e devono rimuovere o ricollocare gli scooter parcheggiati in modo irregolare entro 6 ore dalla segnalazione. Esistono anche dei range di distanza da rispettare tra monopattini di operatori differenti.

3.4 *Analisi in simulazione per valutare le potenzialità della micromobilità elettrica in sharing*

Per valutare le potenzialità e l'attrattività della micromobilità elettrica in *sharing* si è deciso di simularne il servizio in un'area campione della città di Roma. L'area si trova lungo la via Nomentana, dove è stata recentemente realizzata una pista ciclabile riservata (circa 3,5 km). In questa zona sono ubicate due stazioni della metropolitana delle linee B/B1, non direttamente collegate con la pista ciclabile.

L'area di analisi (circa 9,5 chilometri quadrati) comprende un numero totale di 6'564 coppie origine-destinazione (*od*) non nulle ed un totale di circa 2'100 viaggi nell'ora di punta del mattino (7:00-8:00). Questi viaggi derivano da una matrice trasportistica del trasporto collettivo normalmente adottata e aggiornata dal Dipartimento di Ingegneria ed utilizzata per fini di ricerca. Le coppie *od* sono di breve-media distanza (distanze inferiori a 5 km per il 95%, 2,7 km in media).

Sono stati quindi simulati tre scenari adottando un'assegnazione standard al trasporto collettivo di tipo *frequency-based* tramite il software EMME (Spiess et al, 1989):

1. Uno scenario di non progetto, che dunque non considera la presenza di *e-scooter* in *sharing*;
2. Uno scenario di progetto con elevata disponibilità di *e-scooter* in *sharing*: tale scenario viene simulato considerando il servizio di *e-scooter* come modalità ausiliaria al trasporto collettivo e consentita esclusivamente lungo la pista ciclabile riservata con velocità di 15 km/h;
3. Uno scenario di progetto con scarsa disponibilità di *e-scooter* in *sharing*: tale scenario viene simulato considerando i monopattini elettrici disponibili solo per il 50% della domanda potenziale (per scarsa accessibilità o ridotto numero di mezzi a disposizione). Quindi, seguendo lo scenario precedente, gli *e-scooter* sono sempre rappresentati come modalità ausiliaria al trasporto collettivo e consentita solo lungo la pista ciclabile riservata, ma la velocità è dimezzata a 7,5 km/h in modo da rappresentare "sinteticamente" che solo il 50% degli utenti ha accesso a tale modalità.

I risultati mostrano che in caso di elevata disponibilità del servizio di *e-scooter in sharing*, il risparmio medio di tempo (ΔT) per ogni *od* rispetto allo scenario di non progetto è di circa 4 minuti. Tuttavia, questo valore diminuisce a 1 minuto se il risparmio di tempo di viaggio è ponderato per la domanda. Questo perché le *od* con un risparmio di tempo maggiore mostrano un numero di viaggi inferiore, mentre le *od* con un risparmio di tempo minore mostrano un numero di viaggi maggiore (Tabella 7 e Tabella 8).

Tabella 7. Distribuzione del risparmio temporale [minuti] e domanda intercettata rispetto allo scenario di non progetto in caso di elevata disponibilità di servizi in sharing

Risparmio medio di tempo [min]	Distribuzione del risparmio temporale [% di coppie od]	Domanda intercettata [%]
$\Delta T < 0$	3%	2%
$0 \leq \Delta T < 1$	12%	74%
$1 \leq \Delta T < 4.5$	39%	19%
$4.5 \leq \Delta T < 7$	25%	3%
$7 \leq \Delta T < 10$	15%	1%
$\Delta T > 10$	6%	1%

Tabella 8. Distribuzione del risparmio temporale [minuti] e domanda intercettata rispetto allo scenario di non progetto in caso di scarsa disponibilità di servizi in sharing

Risparmio medio di tempo [min]	Distribuzione del risparmio temporale [% di coppie od]	Domanda intercettata [%]
$\Delta T < 0$	5%	3.2%
$0 \leq \Delta T < 1$	32%	87%
$1 \leq \Delta T < 4.5$	54%	9%
$4.5 \leq \Delta T < 7$	7%	0.5%
$7 \leq \Delta T < 10$	2%	0.3%
$\Delta T > 10$	-	-

Se la variazione temporale è rapportata al tempo complessivo di viaggio ($\Delta T/T$), in media si ottiene un risparmio del 16%: il 33% dei casi mostra un decremento del tempo di viaggio compreso tra il 10 e il 20%, il 61% di casi superiore al 10% (Tabella 9).

In caso di scarsa disponibilità del servizio di *e-scooter in sharing*, sia il risparmio medio di tempo per singola *od*, sia il risparmio medio ponderato per la domanda diminuiscono rispettivamente a 3,4 e 0,4 minuti. La percentuale di tempo di viaggio risparmiato mostra una distribuzione diversa rispetto allo scenario con alta disponibilità di *e-scooter*: diverse *od* (45%) mostrano una riduzione del tempo di viaggio contenuta, cioè non superiore al 5% del rispettivo tempo di viaggio totale, mentre un ulteriore 50% superiore al 5% (Tabella 10).

Mentre nel caso di elevata disponibilità di *e-scooter*, non c'è un perfetto andamento tra risparmio di tempo e distanza percorsa, questo invece si verifica se inseriamo una disponibilità limitata (scenario di scarsa disponibilità), dove distanze maggiori implicano una minore percentuale di tempo di viaggio risparmiato. Tuttavia, in entrambi i casi, una distanza di 2,6-2,7 km

sembra essere il punto di *break-even* per l'adozione degli e-scooter, confermando così i valori evidenziati da letteratura. In caso di distanze maggiori, il risparmio di tempo diventa trascurabile.

Tabella 9. Distribuzione del risparmio temporale [%] e distanze medie percorse rispetto allo scenario di non progetto in caso di elevata disponibilità di servizi di sharing

Risparmio temporale rapporto al tempo di viaggio [%]	Distribuzione del risparmio temporale [% di coppie od]	Distanza media percorsa [km]
$\Delta T/T < 0$	3%	3.40
$0 \leq \Delta T/T < 5$	18%	3.30
$5 \leq \Delta T/T < 10$	18%	4.10
$10 \leq \Delta T/T < 20$	33%	3.00
$20 \leq \Delta T/T < 30$	19%	2.60
$30 \leq \Delta T/T < 50$	9%	2.25
$\Delta T/T > 50$	-	-

Tabella 10. Distribuzione del risparmio temporale [%] e distanze medie percorse rispetto allo scenario di non progetto in caso di scarsa disponibilità di servizi di sharing

Risparmio temporale rapporto al tempo di viaggio [%]	Distribuzione del risparmio temporale [% di coppie od]	Distanza media percorsa [km]
$\Delta T/T < 0$	5%	3.14
$0 \leq \Delta T/T < 5$	45%	2.73
$5 \leq \Delta T/T < 10$	25%	2.74
$10 \leq \Delta T/T < 20$	20%	2.19
$20 \leq \Delta T/T < 30$	5%	1.90
$30 \leq \Delta T/T < 50$	1%	1.69
$\Delta T/T > 50$	-	-

Chiaramente questa analisi in simulazione ha alcuni limiti dovuti alla necessità di adeguare un servizio in *sharing* all'interno di un simulatore di trasporti tradizionale "disegnato" per trattare modalità di trasporto standard, nonché nella mancanza di un modello di scelta modale che consideri i mezzi di micromobilità elettrica in sharing e che sia integrato nel framework modellistico.

Infatti, nella simulazione condotta gli *e-scooter* possono circolare solo su piste ciclabili riservate, mentre attualmente il servizio può circolare sulla maggior parte delle strade urbane, essendo equiparato a livello normativo alle biciclette. Inoltre, il servizio è simulato come una modalità di trasporto ausiliaria (il che equivale a rappresentarlo come un "pedone veloce"), dove la disponibilità della flotta viene convertita in una riduzione di velocità.

Se non si considera alcuna riduzione di velocità, il servizio è sempre disponibile: questa non è una condizione realistica ma consente di trovare un limite superiore ai risultati illustrati.

Nonostante ciò, i risultati sembrano in prima analisi confermare i dati da letteratura, almeno in termini di distanze percorse e meritano un approfondimento che verta a valutare la possibilità di uno *shift* modale verso la micromobilità elettrica.

4 Derivazione della domanda di micromobilità elettrica attraverso l'analisi di *pattern* veicolari estrapolati da banche dati Floating Car Data (FCD)

Questa fase della ricerca mira a determinare empiricamente la potenziale domanda che può essere spostata dal trasporto privato ai servizi di micromobilità elettrica (*e-bike* ed *e-scooter* in particolare, essendo questi ultimi i più diffusi sia a livello individuale che in *sharing*) oltre che al trasporto collettivo favorendone l'accesso e l'ingresso (ultimo miglio).

L'approccio utilizzato è fortemente innovativo. Infatti, solitamente la comprensione del potenziale *shift* modale a livello individuale è basata sull'uso di modelli comportamentali e su dati derivanti da interviste del tipo "preferenze rivelate" (Stopher et al 2017). Tuttavia, le difficoltà nell'ottenere un buon campionamento tramite indagini ed il continuo sviluppo di nuove tecnologie per automatizzare e facilitare la raccolta di dati disaggregati, tra i quali i dispositivi GPS o dati di telefonia mobile, possono aprire nuove sfide e generare conseguentemente nuove metodologie, più orientate ad un approccio *data driven*.

Pertanto, grazie all'opportunità offerta dalla telematica e alla sempre più diffusa penetrazione dei servizi di tracciamento delle autovetture (*i.e.* Floating Car Data - FCD), che consentono di ottenere informazioni in modo continuo nel tempo e nello spazio, nasce il primo obiettivo della presente metodologia: l'obiettivo è di indagare il trasporto privato urbano attraverso FCD al fine di identificare le caratteristiche del viaggio e dedurre la domanda potenzialmente interessata a passare a servizi di micromobilità elettrica.

Inoltre, sempre attraverso l'analisi degli FCD e delle relative caratteristiche del viaggio (*pattern* di mobilità), messa a sistema con le caratteristiche infrastrutturali della rete urbana e dell'offerta della rete di trasporto collettivo, viene determinato il secondo obiettivo della metodologia: come la micromobilità elettrica possa essere integrata con il sistema di trasporto collettivo.

4.1 Metodologia

Come detto in precedenza, il contributo innovativo della metodologia proposta consiste nel derivare la domanda potenziale di micromobilità elettrica attraverso l'estrapolazione di viaggi da Floating Car Data (FCD) considerati potenzialmente compatibili con la micromobilità stessa.

L'approccio adottato si compone di tre fasi principali (Figura 8):

- Nella prima fase vengono selezionati i viaggi FCD compatibili in termini di distanze percorse (*i.e.* $sp_k \leq sp_{max}^m$) con l'utilizzo della micromobilità elettrica (come già riportato, nello specifico saranno considerati *e-bike* ed *e-scooter*): questa fase verrà denominata "analisi di compatibilità Origine-Destinazione (OD)";
- In una seconda fase, vengono considerate le caratteristiche delle infrastrutture stradali lungo cui si svolgono i viaggi selezionati attraverso la definizione di un indice di compatibilità alla micromobilità denominato Micromobility Compatibility Index (MCI). Tale indice valuta la compatibilità/adequatezza delle infrastrutture stradali che devono essere

percorse dalla micromobilità elettrica ed è calcolato sulla base delle zone di traffico z (e relative infrastrutture) attraversate dal singolo veicolo sonda i . Quindi, vengono selezionati i viaggi che possono essere potenzialmente spostati da mezzo privato verso la micromobilità elettrica in termini sia di compatibilità con le distanze percorse sia in termini di compatibilità con le infrastrutture che attraversano;

- Infine (terza fase), la procedura prevede di indagare la possibilità di spostare parte dei viaggi non inclusi nella prima fase di selezione (cioè, $sp_k > sp_{max}^m$) dal trasporto privato verso il trasporto collettivo utilizzando la micromobilità elettrica per l'accesso/egresso (processo di verifica della compatibilità multimodale).

L'intera metodologia, descritta in dettaglio nei successivi paragrafi, è stata applicata alla città di Roma.

A tal fine sono stati utilizzati i dati FCD 2015 della flotta aziendale di Octo Telematics forniti dall'Enea per la presente ricerca. I dati coprono tutta l'area metropolitana di Roma e sono ottenuti da 243'784 veicoli (317 milioni di record, tasso di penetrazione del 7%) tracciati nel mese di novembre 2015. L'On Board Unit (OBU) presente su tali veicoli ha permesso di registrare la sequenza dei punti visitati dal veicolo durante il suo spostamento, oltre al punto di partenza ed ai punti di sosta, memorizzando così tutte le caratteristiche del percorso; in particolare, le informazioni disponibili nell'FCD sono l'ID del veicolo, la posizione georeferenziata del veicolo, il giorno e l'ora, la velocità istantanea, lo stato del motore, la distanza dalla posizione precedentemente registrata e la qualità del segnale GPS. La frequenza di registrazione della posizione del veicolo è attualmente impostata come segue: (1) ogni 30 secondi quando il veicolo si trova lungo la rete autostradale o alcune strade principali nelle aree metropolitane; (2) ogni due chilometri sulla restante viabilità.

Gli FCD sono stati ampiamente utilizzati in letteratura, anche per problematiche inerenti la stima della domanda di spostamento, ma con particolare riguardo al trasporto privato (Eisenman e George, 2004; Ásmundsdóttir, 2008; Ásmundsdóttir, Chen e Zuylen, 2010, Yang et al., 2018; Zhao et al. 2010).

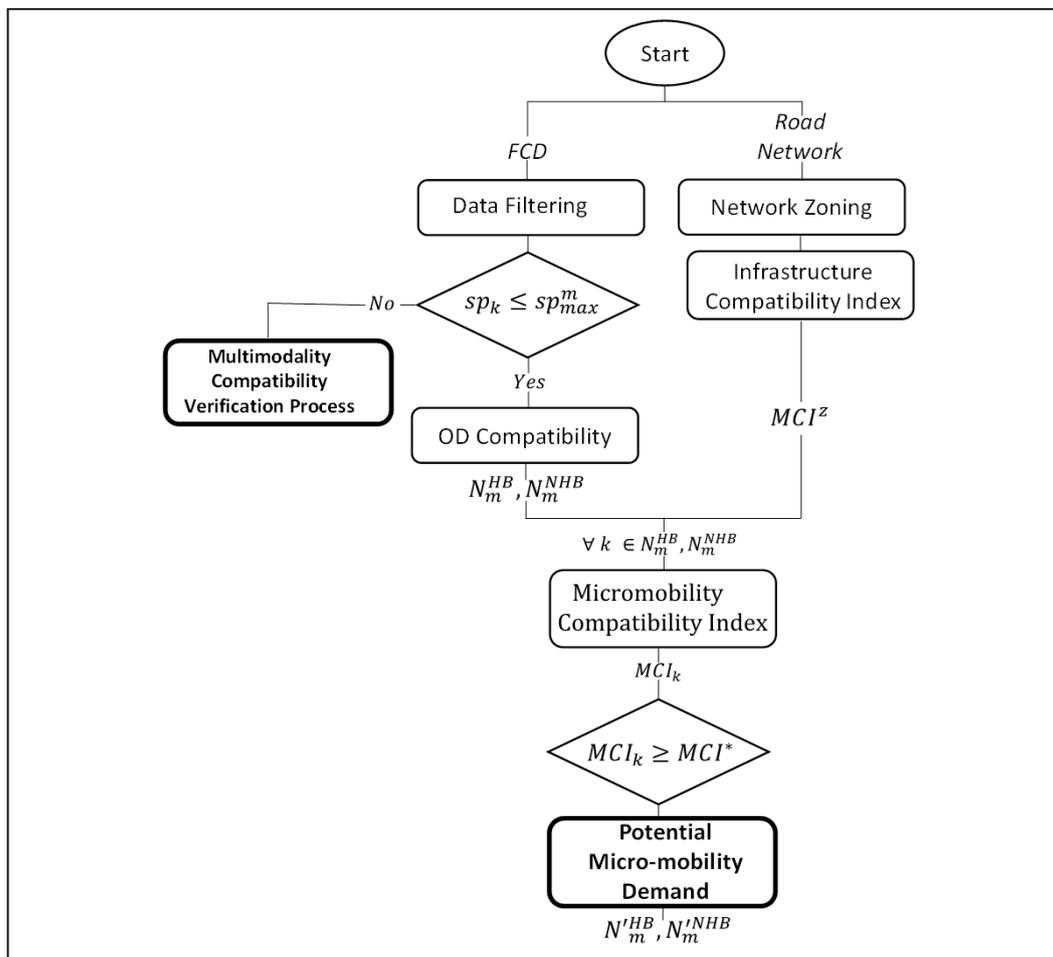


Figura 8. Workflow della metodologia utilizzata per la derivazione della domanda potenziale di micromobilità elettrica su dati FCD

I dati hanno richiesto prima un'analisi delle fonti di errore, la loro seguente correzione e filtraggio (Data Filtering). Dato un veicolo generico i (identificato tramite il $vehicle_ID$), viene inoltre effettuato un processo di concatenazione del viaggio al fine di identificare la destinazione finale (ad esempio, durante un viaggio casa-lavoro, il veicolo può fermarsi brevemente per motivi differenti dallo scopo principale dello spostamento, per perdita del segnale GPS o problemi di funzionalità del motore). Pertanto, dato un giorno, la prima posizione in cui viene acceso il motore del veicolo è considerata l'origine O di un viaggio FCD, mentre la posizione in cui viene spento il motore sarà considerata il punto finale (destinazione) D del viaggio. Tuttavia, se all'interno di un viaggio vengono registrate soste brevi differenti dal punto di destinazione (ovvero fermate intermedie della durata inferiore a 10 minuti in questo studio), è necessario filtrarle e rimuoverle per garantire la continuità del viaggio. Inoltre, vengono filtrati anche i viaggi la cui durata è inspiegabilmente lunga o la cui distanza è sufficientemente breve da poter essere compiuta interamente a piedi (es. distanza di viaggio inferiore ad una soglia pedonale massima), ottenendo un totale di viaggi N_{OD} .

Il set di dati è ulteriormente classificato tra viaggi in partenza da casa (Home Based, HB, il che significa che il luogo di origine o di destinazione è l'abitazione dell'utente) e viaggi "Not Home Based" (NHB). La classificazione avviene attraverso un metodo di localizzazione della residenza,

implementato *ad hoc* attraverso un algoritmo DbSCAN (Ester et al., 1996) per raggruppare le destinazioni raggiunte da ciascun veicolo sonda. In particolare, essa opera come segue:

1. Tutte le destinazioni di ogni viaggio FCD sono mappate sulla zonizzazione utilizzata;
2. Tutte le destinazioni sono clusterizzate adottando una tecnica di clustering DBScan con parametro ϵ (ovvero il raggio di prossimità tra punti dello stesso cluster) pari a 120 metri e numero minimo di punti per ogni cluster uguale a uno;
3. Si applica una regola per il conteggio del numero di soste notturne di ogni FCD in base all'orario di arrivo e di partenza alla/dalla destinazione;
4. La residenza è il cluster di destinazioni con valori più elevati di soste notturne.

La procedura è stata validata nel caso romano confrontando il numero di residenze risultanti in ciascuna zona con la popolazione censita, evidenziando un'elevata corrispondenza (R^2 pari a 0,7465, Figura 9).

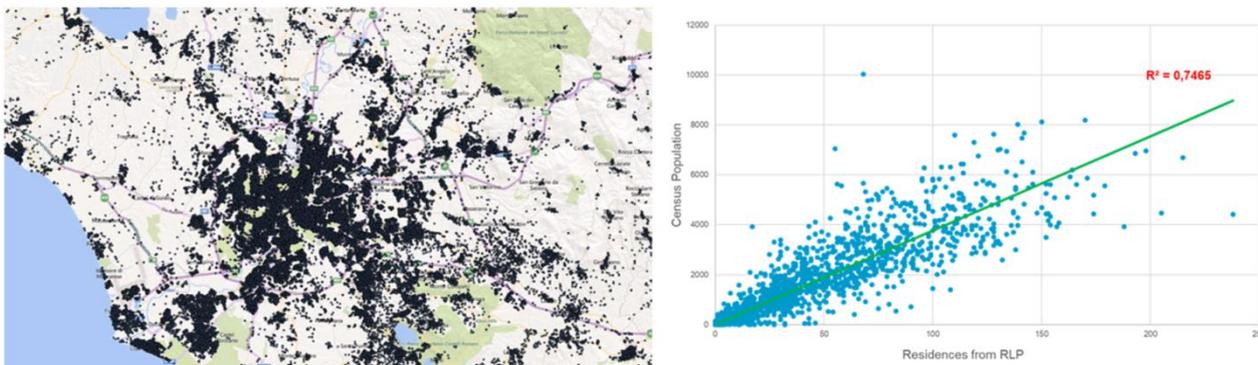


Figura 9. Mappa delle residenze dopo l'applicazione della procedura di localizzazione delle residenze (RLP) e confronto con i dati censuari

Infine, dalla distribuzione temporale della domanda FCD attraverso i giorni per cui si ha disponibilità del dato, i viaggi sono stati aggregati distinguendo se essi siano stati effettuati in un giorno feriale o nel fine settimana, e ulteriormente distinti tra viaggi all'interno della fascia di punta o al di fuori di essa.

Dividere la domanda tra fascia di punta e non di punta, nonché tra HB o NHB permette di definire con maggiore precisione l'effettiva motivazione del viaggio (spostamento sistematico o non sistematico), il che può aiutare a discriminare tra domanda potenziale di micromobilità elettrica in sharing o ad uso personale (monopattini elettrici ed *e-bike* di proprietà). Di seguito sono riportate alcune misure riepilogative dei dati FCD selezionati:

		CLASSI DI DISTANZA [KM]						Σ
		Da 0 a 1	Da 1 a 2	Da 2 a 3	Da 3 a 4	Da 4 a 5	Da 5 a 6	
ORE DI PUNTA [H]	dalle 7:00 alle 9:00	0,17 %	0,35 %	0,38 %	0,25 %	0,26 %	0,19 %	1,6 %
	dalle 12:00 alle 13:00	0,21 %	0,39 %	0,32 %	0,25 %	0,19 %	0,16 %	1,52 %
	dalle 16:00 alle 19:00	0,25 %	0,48 %	0,43 %	0,33 %	0,26 %	0,21 %	1,96 %
ORE DI MORBIDA [H]	dalle 9:00 alle 12:00	0,19 %	0,37 5	0,3 %	0,22 %	0,18 %	0,14 %	1,4 %
	dalle 13:00 alle 16:00	0,16 %	0,33 %	0,3 %	0,24 %	0,2 %	0,16 %	1,39 %
	dalle 19:00 alle 22:00	0,14 %	0,29 %	0,27 %	0,22 %	0,18 %	0,15 %	1,25 %
	dalle 22:00 alle 4:00	0,02 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %	0,3 %	0,03 %	0,47 %
	dalle 4:00 alle 7:00	0,02 %	0,03 %	0,04 %	0,03 %	0,03 %	0,03 %	0,18 %

CLASSI DI DISTANZA [km]	%
Da 0 a 1	2,9
Da 1 a 2	5,9
Da 2 a 3	5,3
Da 3 a 4	4,1
Da 4 a 5	3,5
Da 5 a 6	2,9

Figura 10. Distribuzione viaggi FCD HB infrasettimanali per classi di distanza (fino a 6 km) e fascia oraria

		CLASSI DI DISTANZA [KM]						Σ
		Da 0 a 1	Da 1 a 2	Da 2 a 3	Da 3 a 4	Da 4 a 5	Da 5 a 6	
ORE DI PUNTA [H]	dalle 9:00 alle 13:00	0,1 %	0,19 %	0,14 %	0,11 %	0,08 %	0,07 %	0,69 %
	dalle 15:00 alle 21:00	0,07 %	0,15 %	0,13 %	0,1 %	0,08 %	0,07 %	0,6 %
ORE DI MORBIDA [H]	dalle 13:00 alle 15:00	0,06 %	0,011 %	0,1 %	0,07 %	0,06 %	0,05 %	0,351 %
	dalle 21:00 alle 9:00	0,01 %	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,12 %

CLASSI DI DISTANZA [km]	%
Da 0 a 1	1,1
Da 1 a 2	2,0
Da 2 a 3	1,7
Da 3 a 4	1,4
Da 4 a 5	1,1
Da 5 a 6	0,9

Figura 11. Distribuzione viaggi FCD HB fine settimana per classi di distanza (fino a 6 km) e fascia oraria

4.1.1 Analisi di compatibilità a livello di singola coppia Origine-Destinazione

Il set di dati FCD filtrato è stato classificato in base a diverse soglie di distanza compatibili con la micromobilità elettrica e derivate dalla letteratura (si veda paragrafo 3.2).

In particolare si sono fissate due soglie di distanza: fino a 6 km, intesa come distanza massima del viaggio tramite *e-bike*, e fino a 3 km, intesa come distanza massima del viaggio tramite *e-scooter*. Quindi, i viaggi sono stati classificati in base alla loro soglia di distanza sp_{max}^m e, sia per spostamenti HB che NHB, la quota di domanda che potrebbe essere potenzialmente effettuata tramite la modalità m (es. *e-scooter* e *e-bike*) viene calcolata come segue:

$$N_m^{HB} = \frac{n_m^{HB}}{N_{OD}}; N_m^{NHB} = \frac{n_m^{NHB}}{N_{OD}} \quad (1)$$

Dove n_m^{HB} e n_m^{NHB} sono, rispettivamente, il numero di viaggi HB e NHB che rispettano la relativa soglia di distanza sp_{max}^m .

4.1.2 Analisi di compatibilità infrastrutturale

L'obiettivo è quello di definire un indice, che chiameremo Micromobility Compatibility Index (MCI) che possa essere utilizzato sia dai pianificatori che dagli operatori di micromobilità elettrica per valutare la capacità di infrastrutture stradali specifiche di ospitare *e-bike* ed *e-scooter*, tenendo conto delle caratteristiche fisiche e operative delle stesse, ottenute da dati *open-source* derivati da Open Street Map ([Sito Open Street Map](#)).

Il MCI viene innanzitutto calcolato per ciascuna zona di traffico z come rapporto tra la lunghezza totale delle infrastrutture stradali “adatte ad ospitare” la micromobilità elettrica L_m^z rispetto alla lunghezza effettiva ad uso delle auto private L_c^z :

$$MCI_z = \frac{L_m^z}{L_c^z} \quad (2)$$

dove L_m^z è determinato calcolando la somma delle lunghezze dei collegamenti classificati (in Open Street Map) come piste ciclabili, strade pedonali e strade residenziali, nonché considerando anche strade secondarie e terziarie con al massimo una corsia per senso di marcia e sentieri pavimentati all'interno di parchi e aree verdi.

Invece L_c^z è stata determinata come la somma delle lunghezze dei collegamenti classificati come autostrade, strade primarie, secondarie, terziarie e strade residenziali, ovvero di tutta la viabilità ad uso delle autovetture.

Quindi, per ogni viaggio fino a 6 km, ovvero la soglia di distanza massima precedentemente definita, l'indice di compatibilità MCI_k viene calcolato come media ponderata degli indici di ciascuna zona z che il veicolo sonda i attraversa all'interno del viaggio k (Figura 12):

$$MCI_k = \frac{\sum_{z \in I^i} MCI^z \cdot l_k^z}{\sum_{z \in I^i} l_k^z} \quad (3)$$

dove l_k^z è la lunghezza (in km) del percorso k nella zona z .

Fissando una soglia di compatibilità MCI^* , i viaggi n_k^{HB} e n_k^{NHB} il cui $MCI_k \leq MCI^*$ vengono sottratti alla domanda potenziale di viaggio calcolata in (1), ottenendo così una nuova frazione della domanda di spostamento N_m^{HB} e N_m^{NHB} potenzialmente fattibile con la micromobilità elettrica e che consideri anche la compatibilità delle infrastrutture stradali.

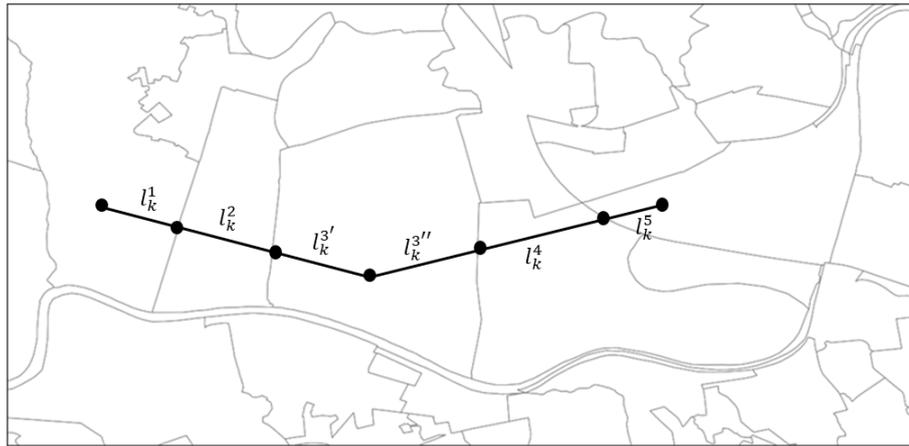


Figura 12. Esempio di *track point* FCD e calcolo della lunghezza attraversata in ciascuna zona

4.1.3 Analisi di compatibilità multimodale

Mentre nei precedenti paragrafi si sono considerati tutti i viaggi OD il cui intero itinerario è compatibile (per lunghezza del viaggio e per condizioni infrastrutturali) con le *e-bike* e gli *e-scooter*, ora si terrà conto della multimodalità considerando tutti i viaggi $OS_o - s_D D$ dove s_o e s_D sono i nodi di interscambio (i.e. una stazione metropolitana o una stazione ferroviaria in ambito urbano) utilizzati per il passaggio verso i servizi di trasporto collettivo (in particolare della rete portante del trasporto collettivo).

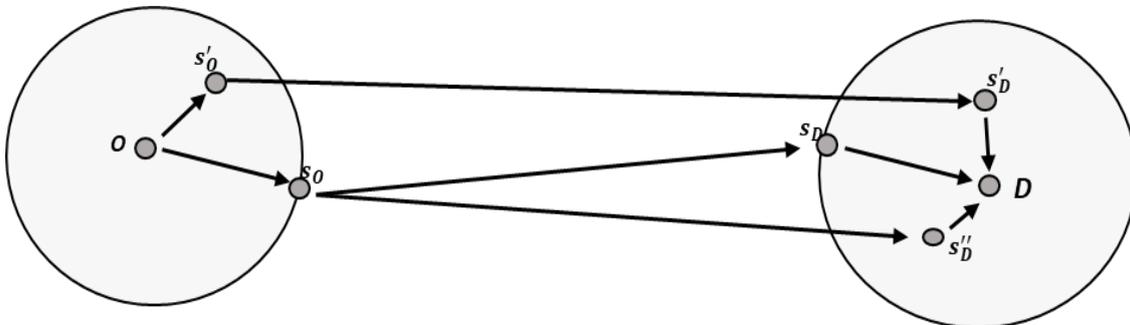


Figura 13. Rappresentazione delle fasi di accesso ed egresso tramite micromobilità elettrica da/per le stazioni portanti del sistema di trasporto collettivo

Tutti i viaggi la cui distanza tra origine e destinazione è superiore a 3 km sono considerati candidati per il processo di verifica della compatibilità multimodale. Per ogni viaggio k , il primo passo consiste nel cercare se esistono stazioni della metropolitana o ferroviarie entro un raggio di 3 chilometri sia dall'origine O che dalla destinazione D del viaggio. È stata adottata la soglia dei 3 km, considerando la soglia di distanza massima degli *e-scooter*: è facile infatti ipotizzare che gli *e-scooter* siano più facilmente trasportabili sulle carrozze rispetto alle *e-bike* per spostamenti multimodali e soprattutto in relazione alla rete metropolitana.

Quindi, se sono identificate due o più stazioni, tutte le possibili combinazioni OS_o e $s_D D$ (con $S_o = \{s_o, s'_o, \dots, s_o^n\}$ e $S_D = \{s_D, s'_D, \dots, s_D^p\}$) sono soggette ad una serie di vincoli al fine di determinare se la combinazione è compatibile con un viaggio multimodale in *e-scooter* e servizio di trasporto collettivo; in particolare:

$$\forall s_O, s_D \left\{ \begin{array}{l} d_{Os_O} + d_{s_D D} \leq \alpha_1 \quad (4) \\ \frac{d_{Os_O} + d_{s_D D}}{d_{OD}} \leq \alpha_2 \quad (5) \\ \frac{\Delta t_{OD}}{t_{OD}^{car}} = \frac{t_{Os_O}^{mm} + t_{s_O s_D}^{mm} + t_{s_D D}^{mm} - t_{OD}^{car}}{t_{OD}^{car}} \leq \alpha_3 \quad (6) \\ t_{Os_i}^{mm} + t_{s_O s_D}^{mm} + t_{s_D D}^{mm} \leq \alpha_4 \quad (7) \\ n_{transfer}^{mm} \leq \alpha_5 \quad (8) \end{array} \right.$$

- Il primo vincolo (4) valuta che la somma delle distanze di accesso (d_{Os_O}) e di egresso ($d_{s_D D}$) sia inferiore alla distanza media normalmente svolta col mezzo di micromobilità elettrica considerato;
- il vincolo (5) definisce il limite superiore del rapporto tra la distanza di accesso e di egresso dalla rete di trasporto collettivo attraverso la micromobilità e la lunghezza totale del viaggio (d_{OD});
- il vincolo (6) tiene conto della differenza di tempo di viaggio tra multimodalità (mm) ed effettuare il viaggio con l'auto privata. Il tempo di percorrenza totale tra le due stazioni $t_{s_O s_D}^{mm}$ viene calcolato mediante l'adozione di un Connection Scan Algorithm, CSA (Dibbelt et al., 2017) sviluppato in Enea ed utilizzato ai fini del presente studio.
- i vincoli (7) e (8) definiscono il tempo massimo di viaggio e il numero massimo di trasbordi ammessi durante il viaggio multimodale;
- $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ sono parametri che possono essere tarati sullo specifico caso studio e possono derivare da calibrazione o ottenuti tramite *best practices*.

Dato un viaggio k , se esiste almeno una combinazione $Os_O - s_D D$ in cui sono soddisfatti tutti i vincoli, allora il viaggio può essere considerato come parte della potenziale domanda di micromobilità elettrica in combinazione con il trasporto collettivo (spostamento multimodale). Pertanto, viene calcolata la nuova frazione di domanda potenziale multimodale $N_m''^{HB}$ e $N_m''^{NHB}$, rispettivamente per spostamenti HB e NHB (Figura 14).

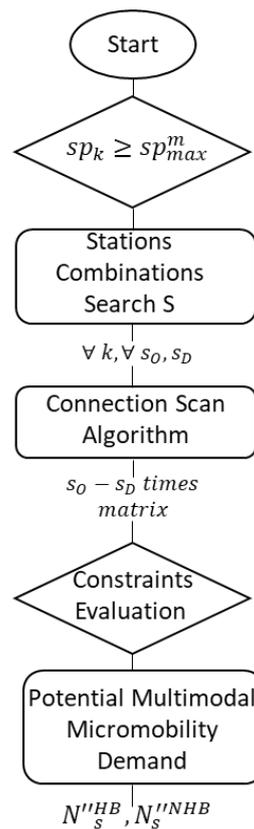


Figura 14. Workflow dell'analisi di compatibilità multimodale per derivare la domanda potenziale con e-scooter più servizio di trasporto collettivo

4.2 Risultati numerici

Di seguito si riportano i risultati della metodologia precedentemente esposta per la derivazione della domanda potenziale di micromobilità elettrica a partire da dati FCD nella città di Roma, dove a valle del processo di filtraggio sono stati ottenuti un totale di 9 milioni di viaggi registrati.

L'area di studio è stata suddivisa attraverso un sistema di zonizzazione che rappresenta un compromesso tra zone censuarie (13'656 zone) e zone urbanistiche (155 zone), costituite da 1'409 zone con una superficie media di 86 ha e una popolazione media per zona di 1'900 abitanti (Figura 15).

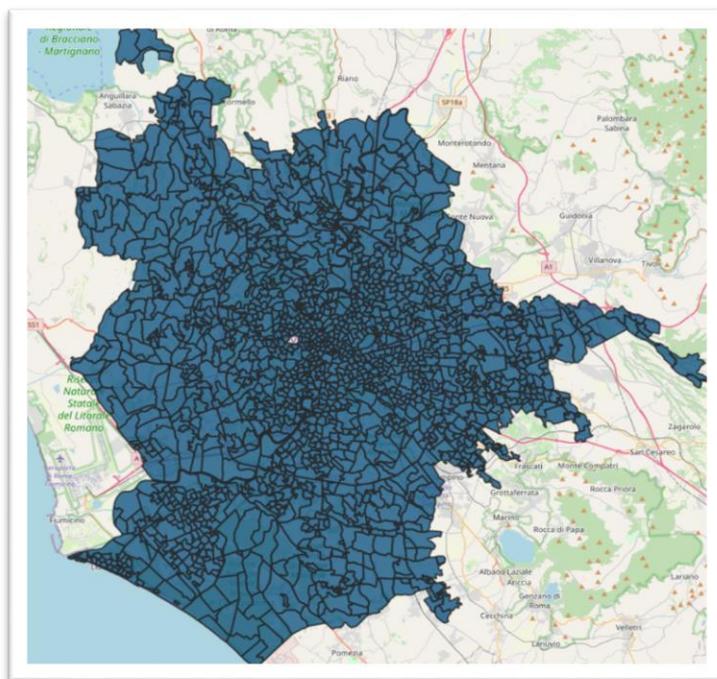


Figura 15. Zonizzazione utilizzata per il Comune di Roma

Dividendo i viaggi tra HB e NHB, tra giorni feriali e giorni del fine settimana, nonché tra le due soglie di distanza del viaggio di 3 km e 6 km, si è ottenuto il seguente numero di viaggi e relative quote (Tabella 11 e Tabella 12):

Tabella 11. Risultati dell'analisi di compatibilità OD per e-scooter

		Numero di viaggi	Quota rispetto al totale FCD [%]
Infrasettimanali	HB	1'296'129	14,10
Infrasettimanali	NHB	937'572	10,20
Infrasettimanali	Totale Infrasettimanale	2'233'701	24,30
Fine settimana	HB	438'813	4,70
Fine settimana	NHB	244'963	2,60
Fine settimana	Totale Fine settimana	683'776	7,30
-	Totale viaggi fattibili con micromobilità elettrica	2'917'477	31,60

Tabella 12. Risultati dell'analisi di compatibilità OD per e-bike

		Numero di viaggi	Quota rispetto al totale FCD [%]
Infrasettimanali	HB	2'255'902	24,60
Infrasettimanali	NHB	1'704'123	18,60
Infrasettimanali	Totale Infrasettimanale	3'960'025	43,20
Fine settimana	HB	752'820	8,20
Fine settimana	NHB	438'568	4,80
Fine settimana	Totale Fine settimana	1'191'388	13,00
-	Totale viaggi fattibili con micromobilità elettrica	5'151'413	56,20

Nonostante le quote di domanda potenziale (viaggi HB nei giorni feriali) risultino piuttosto elevate (24,60% fino a 6 km), se i viaggi risultanti sono riportati graficamente sulla zonizzazione di

Roma, si evidenzia come alcuni di essi siano generati da zone che non possono essere considerate orientate alla micromobilità (Figura 18).

Ciò ha evidenziato la necessità di un indice in grado di selezionare solo quei viaggi che possano realmente spostarsi lungo un'infrastruttura in grado di ospitare sistemi di micromobilità elettrica come e-scooter o e-bike.

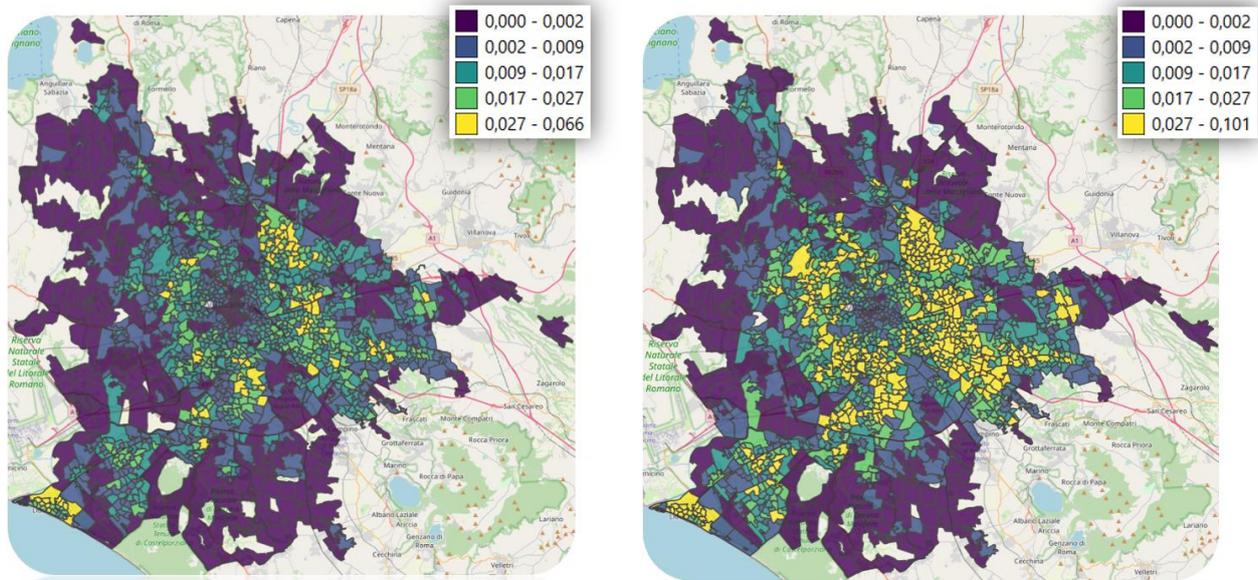


Figura 16. Frazione di domanda potenziale HB infrasettimanale per e-scooter (sinistra) ed e-bike (destra).

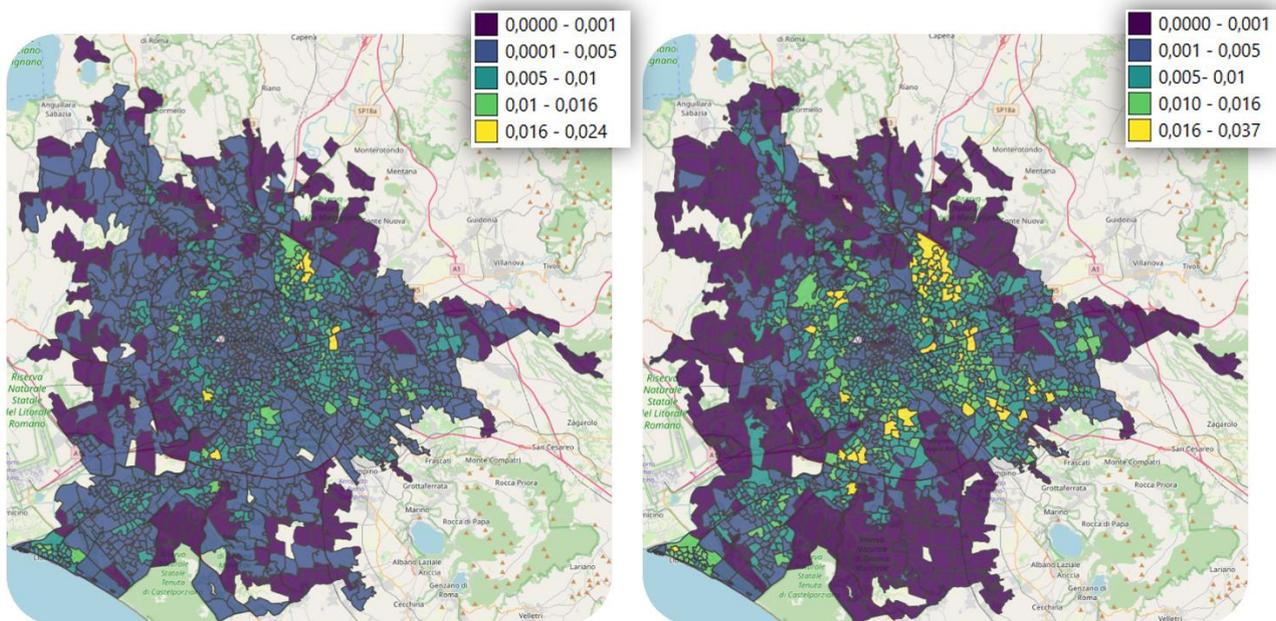


Figura 17. Frazione di domanda potenziale HB fine settimana per e-scooter (sinistra) ed e-bike (destra).

Così, i viaggi compatibili (per distanza) con la micromobilità elettrica sono poi stati legati alla configurazione delle infrastrutture stradali su cui i veicoli FCD si muovono, come spiegato in precedenza nell'analisi di compatibilità infrastrutturale.

In Figura 19 viene presentata la distribuzione del MCI^Z calcolato come visto in (2) per tutte le zone. Quindi, per ciascuno dei viaggi registrati k compatibile per distanza percorsa con *e-bike* o *e-scooter* (inferiori rispettivamente a 3 km e 6 km), l' MCI_k viene calcolato come riportato in (3).

L' MCI^Z per la città di Roma è mediamente pari a 0,998 e a 1,006 nel 75° percentile (Figura 19): ciò significa che c'è un equilibrio generale tra le infrastrutture utilizzabili da micromobilità elettrica rispetto alle infrastrutture per le auto. Riguardo a MCI_k , il suo valore medio è pari a 0,948 con una deviazione standard di 0,240 (Figura 19).

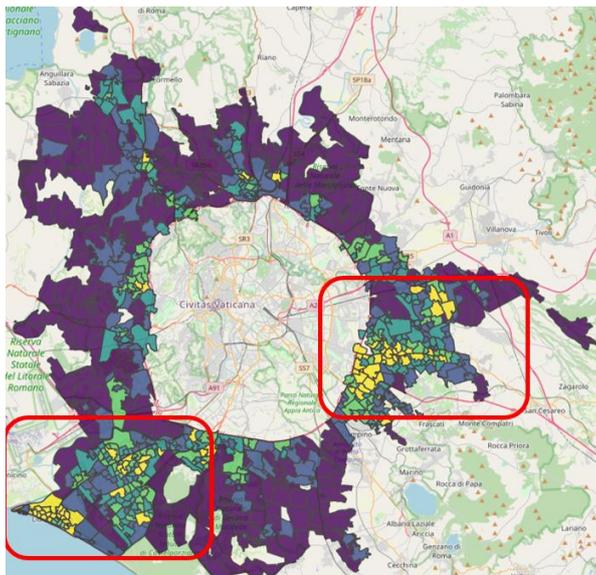


Figura 18. Dettaglio di alcune zone esterne al Grande Raccordo Anulare di Roma con elevata quota di domanda potenziale ma condizioni infrastrutturali non idonee

Se si fissa una soglia MCI^* per MCI_k , tutti quei viaggi il cui MCI_k è minore di MCI^* non sono considerati compatibili con la micromobilità per mancanza di infrastrutture adeguate e vengono quindi sottratti alle percentuali di domanda presentate in Tabella 11.

La Figura 20 e la Figura 21 mostrano come le percentuali calcolate nella Tabella 11 e nella Tabella 12 diminuiscano quando l' MCI^* diventa più vincolante: ad esempio, se MCI^* è uguale a 0,7 (cioè la differenza tra il valore medio della distribuzione MCI_k e la sua deviazione standard per città di Roma), le quote di domanda si riducono indicativamente di 1,1-1,8 punti percentuali per i giorni feriali e di 0,2-0,6 punti percentuali per i fine settimana rispetto al non considerare la compatibilità infrastrutturale (MCI^* pari a 0).

Se la soglia viene aumentata fino a 1,2 (ovvero il valore medio della distribuzione MCI_k più la sua deviazione standard), le quote di domanda diminuiscono fortemente a valori inferiori al 2% per i giorni feriali e inferiori all'1% per i fine settimana.

MCI^* pari a 1,1 sembra rappresentare un punto di variazione della pendenza della curva risultante nel grafico Domanda- MCI^* : ovvero, qualsiasi misura infrastrutturale in grado di aumentare l'indice al di sopra del valore di 1,1 può portare un elevato beneficio in termini di domanda potenziale di micromobilità elettrica.

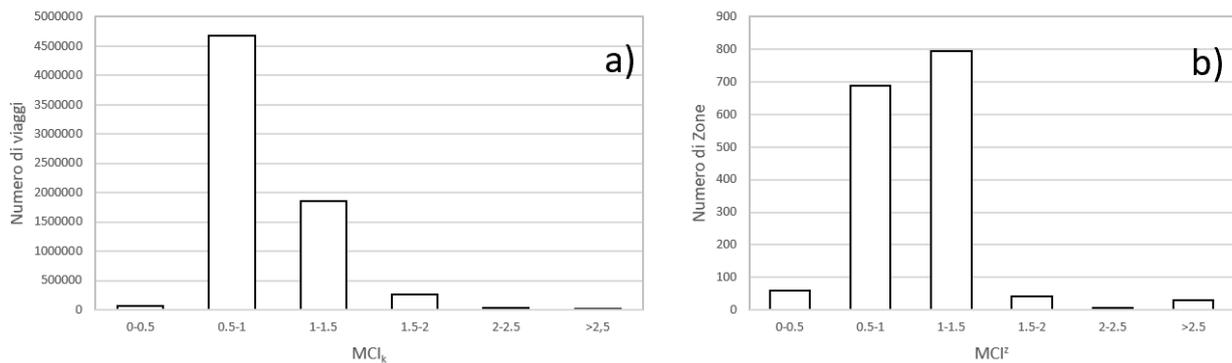


Figura 19. Distribuzione dei valori di MCI^2 (a) e MCI_k (b) nella città di Roma

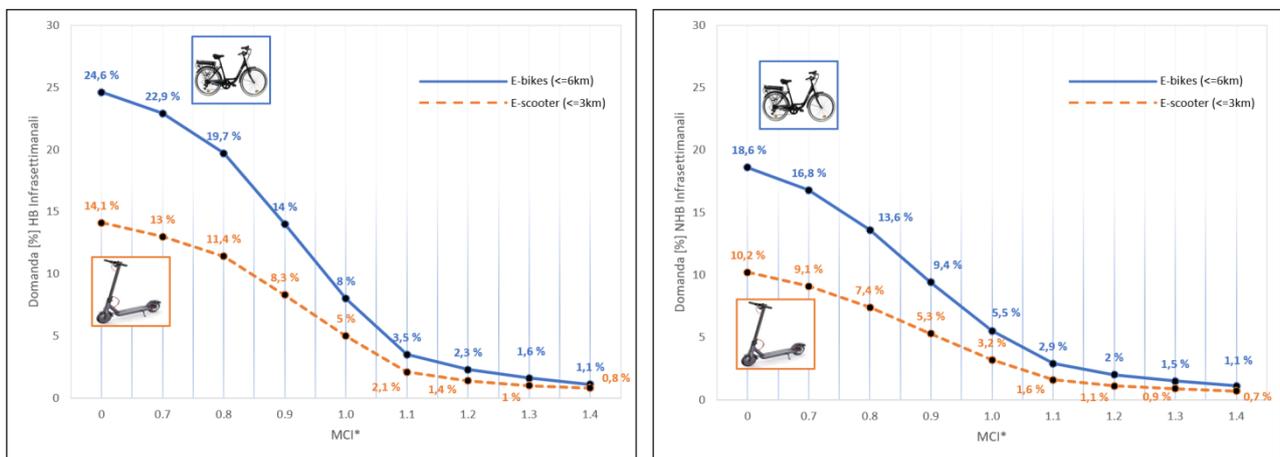


Figura 20. Impatto della soglia per MCI_k sul calcolo della domanda potenziale (giorni feriali, HB a sinistra, NHB a destra)

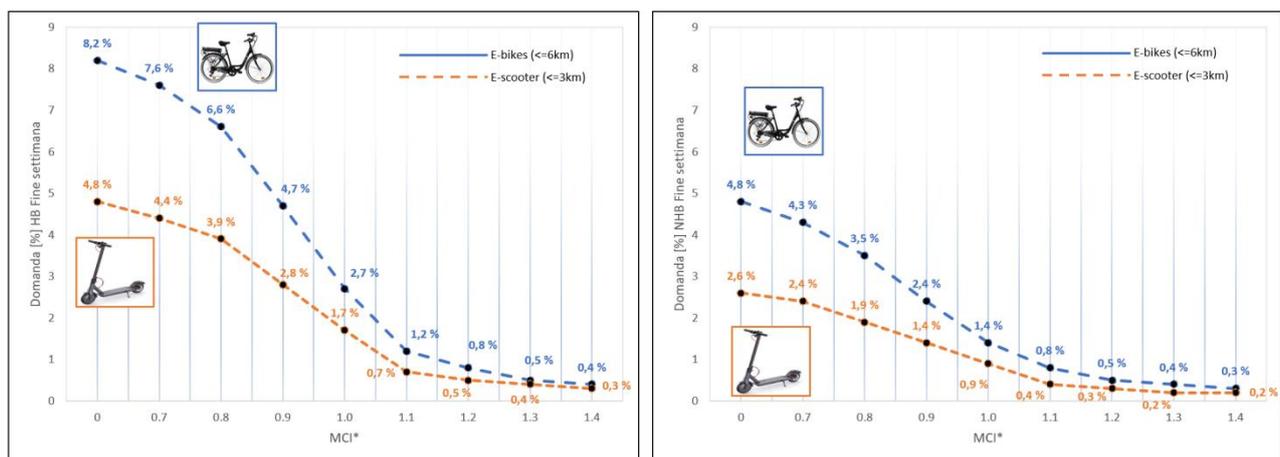


Figura 21. Impatto della soglia per MCI_k sul calcolo della domanda potenziale (Fine settimana, HB a sinistra, NHB a destra)

Poiché le zone considerate sono spazialmente molto piccole, si potrebbe ipotizzare che l'utente il cui viaggio k ha un MCI_k particolarmente basso possa cambiare il proprio percorso per spostarsi tra zone con un indice di compatibilità più elevato. Tuttavia, poiché l'indice è calcolato adottando il criterio della distanza minima percorsa tra i punti di tracciamento FCD, le ipotesi alla base del suo calcolo possono essere considerate accettabili in questa prima fase, passando

eventualmente all'analisi della scelta del percorso per la micromobilità elettrica solo in un successivo sviluppo della ricerca.

Passando all'analisi di compatibilità multimodale, questa è stata applicata considerando solo i viaggi HB relativi alla fascia di punta mattutina romana - dalle 7:00 alle 9:00 - dei giorni feriali: questa scelta è stata fatta in quanto ci si aspetta un maggior uso del multimodale in combinazione con gli *e-scooter* per fase di accesso/egresso proprio per tale tipologia di viaggi (a carattere sistematico).

Tutti i viaggi all'interno del set di dati FCD con distanze euclidee tra origine e destinazione maggiori di 3 km sono stati selezionati come candidati per il processo. I k viaggi filtrati ammontano a circa 380'500.

Quindi, per ogni viaggio, vengono individuate tutte le stazioni ferroviarie o metropolitane all'interno del comune di Roma (141 stazioni in totale) in un raggio di 3 km dall'origine O e destinazione D . Se non ci sono stazioni a tale distanza sia rispetto all'origine O che alla destinazione D , il viaggio viene scartato. Tuttavia, se ci sono due o più potenziali stazioni, vengono prese in considerazione tutte le possibili combinazioni tra le stazioni di origine s_O e le stazioni di destinazione s_D . Sono state così identificate 1'367'090 diverse combinazioni (3,5 combinazioni in media per viaggio), con il maggior numero di combinazioni all'interno del centro storico per la maggiore concentrazione di stazioni.



Figura 22. Tipologia di spostamento multimodale considerato nell'analisi

Per ogni combinazione s_O, s_D vengono determinati i tempi minimi di viaggio attraverso l'adozione del CSA - Connection Scan Algorithm dove gli input per il calcolo dei tempi derivano dagli *open data* GTFS del sistema di trasporto pubblico di Roma (Roma Agenzia per la Mobilità, 2021).

Le combinazioni s_O, s_D sono poi soggette ai vincoli riportati nelle equazioni da (4) a (8), dove i parametri per il caso studio di Roma sono stati impostati a $\alpha_1= 3\text{km}$; $\alpha_2, \alpha_3 = 0.5$; $\alpha_4= 1.5$ hours; $\alpha_5= 1$.

Su 380.500 viaggi candidati, 109.680 soddisfano tutti i vincoli e potrebbero essere effettuati efficacemente attraverso la combinazione di *e-scooter* e trasporto collettivo piuttosto che tramite auto privata. I viaggi compatibili rappresentano il 10% dei viaggi di punta mattutini totali FCD.

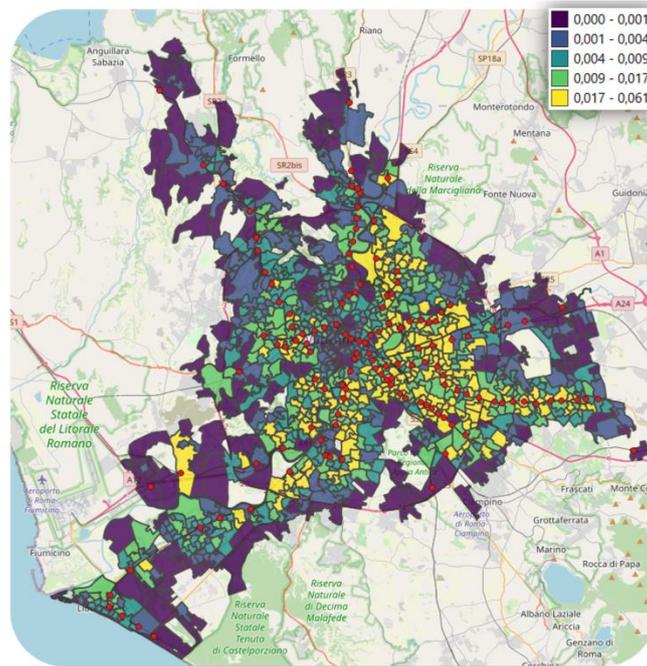


Figura 23. Frazione di domanda multimodale potenziale nella fascia di punta mattutina e distribuzione delle fermate metro/ferro.

I calcoli effettuati mostrano che esiste una componente significativa dei viaggi in auto che può essere trasferita verso modalità più sostenibili. Considerando che a Roma quotidianamente ci sono 280.000 viaggi in auto (PUMS Roma, 2020), se si promuovessero azioni per aumentare l'uso della micromobilità elettrica potrebbero essere raggiunti risultati rilevanti in termini di *shift* modale con conseguente beneficio per l'ambiente e la salute degli utenti.

D'altra parte, le analisi sin qui riportate potrebbero aiutare anche gli operatori di servizi di micromobilità elettrica ed i fornitori di energia a progettare la loro offerta di servizi localizzando rispettivamente mezzi elettrici/stazioni di ricarica nelle aree con maggiore potenzialità di utilizzo (Figura 24).

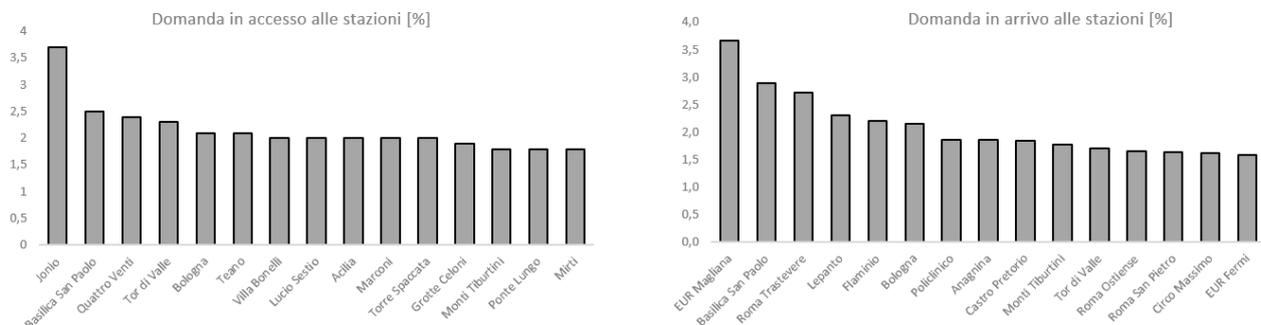


Figura 24. Distribuzione delle maggiori quote di domanda multimodale in accesso ed in egresso alle/dalle stazioni di Roma a valle dell'analisi di compatibilità multimodale

Infatti, un risultato importante dell'analisi di compatibilità multimodale è la possibilità di derivare la distribuzione spaziale della domanda multimodale e delle stazioni più attrattive all'interno del Comune di Roma sia nei punti di origine che in quelli di destinazione. Le percentuali più alte di domanda in accesso alle stazioni con gli e-scooter si trovano per lo più lungo le linee

metropolitane B1 e C della città, mentre le percentuali più alte di domanda in arrivo sono per lo più situate nel centro città ed in ulteriori zone con maggiore concentrazione di attività.

Questi risultati possono essere utili sia per fissare una priorità sulle stazioni da coprire, sia sulle zone che richiedono di essere rifornite.

5 Conclusioni

Il presente report si configura come la sintesi delle attività condotte nella II annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, all'interno dell'Accordo di collaborazione "Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana" per quanto attiene la Macro attività 3 (LA 2.25 e LA2.26).

Le attività hanno permesso di sviluppare il *topic* della micromobilità elettrica e di come questa possa influire in ambito urbano sull'accessibilità in genere, e sull'accessibilità alle reti di trasporto collettivo in particolare, andando conseguentemente a ridefinire le scelte modali e la domanda di energia.

La tematica è di ampio interesse per tutti gli stakeholders coinvolti nello sviluppo sostenibile della mobilità elettrica, i.e. enti di ricerca, operatori di servizi di mobilità elettrica, fornitori di energia, pianificatori dei trasporti e urbanisti.

Una parte importante di questa annualità di ricerca mette in essere un quadro metodologico per derivare la domanda di micromobilità elettrica partendo da dati di viaggio FCD. Il metodo è innovativo in termini di dati adottati, poiché solitamente gli FCD vengono utilizzati per ricavare metriche di performance della rete di trasporto o per derivare informazioni sulla domanda di mobilità privata.

Inoltre, trattandosi di un metodo parametrico, può essere facilmente adottato in altri contesti urbani dove i dati FCD siano disponibili seguendo le tre fasi individuate di:

1. analisi di compatibilità OD;
2. analisi di compatibilità infrastrutturale;
3. analisi di compatibilità multimodale.

La prima fase si basa solo sulle distanze percorse. La seconda richiede la definizione di un indice di micromobilità in grado di valutare la compatibilità delle infrastrutture rispetto alle soluzioni di micromobilità: può essere facilmente calcolato a partire da dati *open* derivanti da cartografia digitale (vedi Open Street Map). La terza fase è in grado di trovare quei viaggi in grado di passare dall'auto a una soluzione multimodale basata sul servizio di trasporto collettivo portante metro/ferro e sulla micromobilità elettrica per la fase di accesso/egresso a/da le stazioni.

Il metodo è stato applicato alla città di Roma dove la domanda potenziale di micromobilità elettrica stimata varia dal 24,6% del campione FCD per viaggi tramite *e-bike* HB durante i giorni feriali al 2,60% degli *e-scooter* per viaggi NHB durante i fine settimana.

Le percentuali sono piuttosto elevate poiché si basano solo sulla distanza percorsa. Infatti, se si considerano le infrastrutture nel processo, i valori precedenti scendono rispettivamente al 2,3% e allo 0,3% per un indice di compatibilità infrastrutturale pari a 1,2.

Si è trovato che un indice di compatibilità pari a 1,1 possa rappresentare un punto di *break even* per la città di Roma: ovvero qualsiasi misura infrastrutturale in grado di aumentare l'indice al di sopra del valore di 1,1 può portare ad un elevato beneficio in termini di incremento della potenziale domanda di micromobilità.

Passando alla multimodalità, circa il 10% della domanda di punta mattutina della città di Roma sarebbe compatibile con un viaggio multimodale basato su monopattini elettrici più servizio di trasporto collettivo portante.

Sono quindi state identificate le principali stazioni metro/ferro di attrazione e generazione sulla base della domanda potenziale come informazione strategica utile sia per gli operatori di micromobilità elettrica della città che per i *provider* di energia.

Nella successiva annualità della ricerca i risultati sin qui ottenuti saranno confrontati con un approccio standard ovvero con i dati di domanda potenziale derivanti dall'utilizzo di un approccio comportamentale.

Per far ciò, sarà necessario calibrare modelli di utilità aleatoria per la scelta della micromobilità elettrica come soluzione di viaggio e applicare tali modelli agli FCD per derivare la relativa probabilità di *shift* modale.

Saranno calibrati modelli che permettano di valutare l'uso sia di sistemi di micromobilità elettrica sia a livello individuale che condivisa e tramite tale approccio sarà possibile inserire attributi esplicativi delle scelte non considerati nell'estrapolazione da FCD, quali: livello di sicurezza percepita dall'utente e, nel caso di servizi in *sharing*, tempo per accedere al servizio e costo monetario dello stesso.

I modelli comportamentali permetteranno inoltre di effettuare analisi di sensitività su parametri fondamentali quali tempi e costi e hanno a loro vantaggio anche la possibilità di essere implementati all'interno di un simulatore per la mobilità elettrica.

6 Riferimenti bibliografici

1. Bernick M., Cervero R., "Transit villages in the 21st Century". McGraw-Hill, New York, 1997.
2. Gori S., Nigro M., Petrelli M., "Walkability indicators for pedestrian-friendly design", Transportation Research Record: Journal of the transportation research board, 2464(2014), pp. 38–45.
3. Schlossberg M., "From TIGER to Audit Instruments – Measuring Neighborhood Walkability with street data based on geographic information systems", Transportation Research Record: Journal of the transportation research board, 1982(2006), pp. 48–56.
4. Jacobs A.B., "Great streets". MIT Press, Cambridge, MA., 1993.
5. Dill J., "Measuring Network Connectivity for Bicycling and Walking", TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM
6. Zhang M., Kukadia N., "Metrics of urban form and the modifiable areal unit problem", Transportation Research Record: Journal of the transportation research board. N.1902(2005), pp. 71-79
7. Handy S., R.G. Paterson, Butler K., "Planning for Street Connectivity: Getting from Here to There", American Planning Association, 2003.
8. Peponis J., Wineman J., "Spatial structure of environment and behavior", Handbook of Environmental Psychology, 2002, pp. 271-291.
9. Rodríguez D.A., Khattak A.J., Evenson K.R., "Can new urbanism encourage physical activity? Comparing a new urbanist neighborhood with conventional suburbs", Journal of the American Planning Association 72 (2006), pp. 43-54.
10. Porta S., Renne J. L., "Linking urban design to sustainability: formal indicators of social urban sustainability field research in Perth, Western Australia", Urban Des International, 10(1), 2005, pp. 51-64.
11. Nigro M., Petrelli M., Ušpalytė-Vitkūnienė R., Žilionienė D., "Understanding the walkability propensity", Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 13(2), 2018, pp. 139-145.
12. Cipriani E., Gori S., Petrelli M., "Transit network design: A procedure and an application to a large urban area", Transportation Research Part C 20 (2012a), pp. 3–14.
13. Cipriani E., Gori S., Petrelli M., "A bus network design procedure with elastic demand for large urban areas", Public Transp (2012b) 4, pp. 57–76.
14. Nigro M., Ferrara M., "Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità" progetto D.7 Mobilità elettrica sostenibile. PAR 2016, 2017.
15. Nigro M., Ferrara M., "Simulatore di scenari urbani di mobilità veicolare elettrica: calibrazione, validazione e applicazione del modello di caratterizzazione della sosta nei parcheggi di interscambio" progetto D.7 Mobilità elettrica sostenibile. PAR 2017, 2018.
16. Scott Smith C., Schwieterman P., "E-scooter scenarios. Evaluating the potential mobility benefits of shared dockless scooters in Chicago". Chaddik Institute Policy Series, 2018.
17. Chang A., Miranda-Moreno L., Clewlow R., Sun L., "Trend or Fad? Deciphering the Enablers of Micromobility in the U.S." A Report of SAE International, 2019.
18. NACTO - National Association of City Transportation Officials. Retrieved from Shared Micromobility in the U.S.: 2018(2019): <https://nacto.org/shared-micromobility-2018/>
19. Sakari Jäppinen, Tuuli Toivonen, Maria Salonen, "Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in Greater Helsinki: An open data approach", Applied Geography 43 (2013), pp. 13-24
20. Sanmay Shelat, Raymond Huisman, Niels van Oort. "Analysing the trip and user characteristics of the combined bicycle and transit mode", Research in Transportation Economics 69 (2018), pp. 68–76.

21. Lars Böcker, Ellinor Anderson, Tanu Priya Uteng, Torstein Throndsen, “Bike sharing use in conjunction to public transport Exploring spatiotemporal age and gender dimensions in Oslo Norway”, *Transportation Research Part A* 138 (2020), pp. 389–401.
22. Porsche Consulting, “Deconstructing the Micromobility Phenomenon. A strategic analysis of crucial success factors”, 2019, Available at: https://www.porsche-consulting.com/fileadmin/docs/04_Medien/Publikationen/SRX03976_Deconstructing_the_Micromobility_Phenomenon/Deconstructing_the_Micromobility_Phenomenon_C_2019_Porsche_Consulting.pdf. Accessed 03 December 2019
23. Campbell A., Cherry C., Ryerson M., Yang X., “Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing”, *Transportation Research Part C* 67(2016), pp. 399-414.
24. McKenzie G., “Urban mobility in the sharing economy: A spatiotemporal comparison of shared mobility services”, *Computers, Environment and Urban Systems* 79(2020).
25. Si H., Shi J.-g., Wu G., Chen J., Zhao X., “Mapping the bike sharing research published from 2010 to 2018: A scientometric review”, *Journal of Cleaner Production* 213(2019), pp. 415-427.
26. Denver C.a.C.o., “Electric scooter data & survey results”, 2019. Available at: <https://www.theinformation.com/articles/inside-birds-scooter-economics>. Accessed 03 December 2019.
27. PBOT, “Portland Bureau of Transportation. 2018 E-Scooter Findings Report”, 2019. Available at: <https://www.portlandoregon.gov/transportation/e-scooter>. Accessed 03 December 2019
28. Lime, “The Data-Backed Case For Lime-S Electric Scooters In San Francisco”, 2018. Available at: <https://www.li.me/second-street/data-backed-case-lime-electric-scooters-in-san-francisco> Accessed 03 December 2019
29. Baek K., Lee H., Chung J-H, Kim, J., “Electric scooter sharing: How do people value it as a last-mile transportation mode?”, *Transportation Research Part D* 90 (2021) 102642.
30. Christoforou Z., Gioldasis C., de Bortoli A., Seidowsky R., “Who is using e-scooters and how? Evidence from Paris”, *Transportation Research Part D* 92 (2021) 102708.
31. Trivedi, T.K. et al., “Injuries associated with standing electric scooter use”, *JAMA Network Open*. 2(1), 2019.
32. Ma Q., Yang H., Mayhue A., Sun Y., Huang Z., Ma Y., “E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data”, *Accident Analysis and Prevention* 151 (2021) 105954.
33. 6t-bureau de recherché, “Uses and Users of Free-floating Electric Scooters in France”, 2019, 158 p. Available at: <https://6-t.co/en/free-floating-escooters-france/>
34. Spiess H., Florian M., “Optimal strategies: a new assignment model for transit networks”, *Transportation Research Part B* 23 (2, 1989), pp. 83–102
35. Stopher, Peter R., Asif Ahmed, Wen Liu, “Travel time budgets: new evidence from multi-year, multi-day data”, *Transportation* 44, no. 5 (2017), pp. 1069-1082.
36. Eisenman S., List G., “A technique for data collection and estimation of turning movements at roundabouts”, presented at TRB 2005. https://www.researchgate.net/publication/323175385_A_TECHNIQUE_FOR_DATA_COLLECTION_AND_ESTIMATION_OF_TURNING_MOVEMENTS_AT_ROUNDABOUTS
37. Ásmundsdóttir R., “Dynamic OD matrix estimation using Floating Car Data (Master Thesis)”, Delft, Netherlands: ITS Edulab-Delft University of Technology, 2008.

38. Ásmundsdóttir R., Chen Y., van Zuylen H. J., “Dynamic Origin–Destination Matrix Estimation Using Probe Vehicle Data as A Priori Information”, Traffic Data Collection and its Standardization, 2010, pp. 89-108, New York, USA: Springer.
39. Yang H., K. Xie, K. Ozbay, Y. Ma, Z. Wang, “Use of deep learning to predict daily usage of bike sharing systems”, Transp. Res. Rec., 2672 (36, 2018), pp. 92-102.
40. Zhao D., Ong G.P., Wang W., Hu X.J., “Effect of built environment on shared bicycle reallocation: A case study on Nanjing. China”, Transportation Research Part A: Policy and Practice 128(2019), pp. 73–88.
41. Ester M., Kriegel H. P., Sander J., Xu, X., “A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise”, in Kdd (Vol. 96, 34, pp. 226–231)
42. Dibbelt J., Pajor T., Strasser B., Wagner, D., “Connection Scan Algorithm”, 2017 arXiv:1703.05997 [cs]. <http://arxiv.org/abs/1703.05997>
43. Roma Agenzia per la Mobilità, GTFS Open Data 2021.
https://dati.comune.roma.it/catalog/dataset/c_h501-d-9000

7 Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

CV Marialisa Nigro

Marialisa Nigro è nata a Roma il 7 marzo 1981. Nel 2004 si è laureata in Ingegneria Civile, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", con il massimo dei voti, discutendo una tesi dal titolo "Sistemi di trasporto non convenzionali: campi applicativi e analisi di fattibilità – una applicazione a Roma Tre". Nel 2009 ha conseguito il titolo di Dottore di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile presso il Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università degli Studi Roma Tre con una tesi dal titolo "Correzione della domanda di trasporto in dinamica intraperiodale con l'ausilio di differenti fonti di dati". Da dicembre 2010 ad agosto 2019 è stata ricercatrice universitaria presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre". Da settembre 2019 è professore associato presso lo stesso Dipartimento, dove è docente titolare dei corsi di "Pianificazione dei Trasporti" e "Trasporto merci e logistica". Dal 2017 è membro del consiglio direttivo della Società Italiana Docenti Trasporti (SIDT).

Le principali attività di ricerca riguardano: calibrazione e validazione di modelli di domanda, correzione della domanda di trasporto, modelli di assegnazione dinamica, interazione trasporti-territorio, modelli di stima delle emissioni in ambito urbano, mobilità elettrica.

Ha partecipato a numerose ricerche nel campo dei trasporti sia a livello nazionale che internazionale quali:

1. Attività di ricerca all'interno del Progetto D.7 "Mobilità elettrica sostenibile". Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2016-2017. Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico-ENEA 2015-2017;
2. SAFER-LC "Safer Level Crossing by integrating and optimizing road-rail infrastructure management and design". Horizon 2020 research and innovation programme grant agreement. In corso;
3. Methods and tools for supporting the Use calibration and validation of Traffic simulation models – Multitude Project, European Union COST programme, 2011 - 2013;
4. BANDO CRUL - Progetto di Ricerca afferente alla filiera del Distretto Aerospazio: "Sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per applicazioni innovative di controllo e gestione del traffico terrestre per una mobilità sostenibile", 2010 – 2015;
5. Cooperazione culturale e scientifica tra CIRRELT (Università di Montreal) e Dipartimento Scienze dell'Ingegneria Civile Università Roma Tre in relazione a temi di ricerca inerenti l'Ingegneria dei Trasporti (ICAR05), 2010 – 2014;
6. Sistema Integrato per la mobilità sostenibile: gestione del traffico urbano e monitoraggio dell'aria - SIMS (POR Puglia 2007-2013);
7. Fondo per gli investimenti sulla ricerca di base: "Sistema avanzato di tracciatura delle merci nei trasporti intermodali" dal 2008 al 2010;
8. Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale: "Valutazione Integrata e Monitoraggio nei Processi di sviluppo delle Grandi Aree Urbane Degradate" dal 2006 al 2007;
9. Fondo per gli investimenti sulla ricerca di base: "Interazione tra la regolazione semaforica ed i flussi di percorso su una rete stradale" dal 2005 al 2006;
10. Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale: "Sistemi di trasporto non convenzionali: campi applicativi e analisi di fattibilità" dal 2005 al 2006.

Svolge attività di revisione per conto di convegni internazionali e riviste, in particolare: EUROPEAN Transport Research Review e IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems.

Infine, è autrice di oltre 60 pubblicazioni su riviste e volumi di interesse nazionale ed internazionale.

CV Rosita De Vincentis

Rosita De Vincentis è nata a Roma il 23 maggio 1990. Nel 2020 ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e Trasporti, presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", discutendo una tesi dal titolo "Tecniche data-driven per la rappresentazione di comportamenti di mobilità multimodali su reti urbane". Da gennaio a giugno 2020 ha effettuato un tirocinio curriculare per tesi di laurea magistrale presso ENEA principalmente incentrato sull'analisi di Floating Car Data.

Da settembre 2020 è vincitrice di una borsa di studio dal titolo "Analisi della domanda potenziale di micro-mobilità elettrica tramite banche dati Floating Car Data (FCD)" presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre".

L'attuale ambito di ricerca si incentra sullo sviluppo di modelli di domanda data-driven e comportamentali e sulla micro-mobilità.

Possiede competenze specifiche di: 1) strumenti per la macro-simulazione dei trasporti; 2) strumenti per la calibrazione di modelli di domanda disaggregati comportamentali; 3) strumenti per la rappresentazione dei comportamenti di mobilità attraverso tecniche di Machine Learning; 4) analisi e manipolazione di banche dati geografiche attraverso Sistemi Informativi Geografici (GIS), Database a oggetti e CAD; 5) analisi di dati geolocalizzati come punti geo-referenziati e Floating Car Data; 6) analisi di banche dati alfa-numeriche attraverso database ad oggetti; 7) linguaggio di programmazione Python per analisi statistiche, territoriali, infrastrutturali e modellizzazione.

Svolge attività di supporto agli studenti nel corso di Pianificazione dei Trasporti presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre".