



Ricerca di Sistema elettrico

## Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità

Marialisa Nigro, Marina Ferrara

## MODELLI DI SCELTA MULTI-MODALE PER SCENARI DI ELETRIFICAZIONE DELLA MOBILITÀ

Marialisa Nigro, Marina Ferrara (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Simulatore fabbisogno energetico mobilità urbana

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità"

Responsabile scientifico ENEA: Gaetano Valenti

Responsabile scientifico Università: Marialisa Nigro

Si ringrazia l'ing. Andrea Gemma per le elaborazioni iniziali condotte sui dati FCD utilizzati nel presente studio.

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 DEFINIZIONE DELL'OFFERTA DI SOSTA PER SPOSTAMENTI DI PARK & RIDE .....	6
2.2 DOMANDA DI MOBILITÀ E DOMANDA DI SOSTA DA FLOATING CAR DATA (FCD).....	10
2.3 INTERAZIONE TRA DOMANDA DI SOSTA ED OFFERTA DI SOSTA .....	17
2.4 MODELLO MULTIMODALE PER I VEICOLI ELETTRICI: ELEMENTI TEORICI .....	30
2.5 MODELLO MULTIMODALE PER I VEICOLI ELETTRICI: CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE.....	42
3 CONCLUSIONI.....	50
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	52

## Sommario

Il presente studio riporta le attività di specificazione, calibrazione e test di un modello di simulazione atto a rappresentare comportamenti di scelta multimodali da parte dei veicoli elettrici che possa essere implementato all'interno di una piattaforma di simulazione di scenari di mobilità elettrica, così come previsto nel progetto D.7 Mobilità elettrica sostenibile, relativa all'accordo PAR 2016.

Il modello calibrato e validato calcola in particolare le variazioni di domanda di sosta presso i parcheggi che permettono lo scambio modalità privata – trasporto pubblico (parcheggi di Park & Ride) al variare del livello di servizio fornito dall'offerta di trasporto, dell'interazione tra domanda di spostamento ed offerta stessa, delle caratteristiche territoriali ed insediative dell'area di studio, con riferimento ad un caso applicativo di elevate dimensioni ed elevata complessità (Roma). Il modello si configura come un modello di natura aggregata: l'output è la quota di domanda di Park & Ride emessa da ciascuna zona dell'area di studio per ogni intervallo temporale nell'arco della giornata feriata media. Il modello è stato calibrato secondo un approccio data driven, dove le singole variabili derivano da elaborazioni di dati FCD (lato mobilità privata) e open data (lato mobilità su trasporto collettivo), nonché vengono utilizzati dati di natura statistica (popolazione, estensione delle zone etc.). Il metodo utilizzato per la calibrazione e la validazione del modello appartiene alle tecniche di Machine Learning ed in particolare si configura come una tecnica Random Forest.

Al modello precedentemente calibrato e validato è stata affiancata e proposta una metodologia per l'introduzione di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici, andando dunque ad incrementare l'attrattività dei parcheggi stessi e dello scambio verso il sistema di trasporto collettivo.

La possibilità di simulare scenari di multi modalità per i veicoli elettrici ed in particolare lo scambio modalità privata – trasporto pubblico presso i parcheggi di Park & Ride, permetterà di valutare scenari che includano politiche di tariffazione degli accessi (congestion charging) e di incentivazione all'uso del trasporto collettivo, con il doppio fine di ridurre la congestione sulla rete e ridistribuire la domanda di energia elettrica sul territorio.

## 1 Introduzione

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma Tre si collocano all'interno del progetto "D.7 Mobilità elettrica sostenibile" per lo sviluppo di un simulatore di scenari di elettrificazione della mobilità urbana.

Oggetto del contratto è lo sviluppo di modelli di simulazione atti a rappresentare comportamenti di scelta multimodale da parte dei veicoli elettrici che possano essere implementati all'interno di una piattaforma di simulazione di scenari di mobilità elettrica.

Si ipotizza di fatti che in uno scenario di medio-lungo periodo, nonostante l'incremento del tasso di penetrazione dei veicoli elettrici, le problematiche di congestione in ambito urbano non subiranno una riduzione a causa del mantenimento del numero di veicoli circolanti (siano essi elettrici o meno). Tali problematiche potranno essere limitate tramite l'introduzione di opportune politiche di limitazione degli accessi e/o tramite l'incremento della multi modalit  con il passaggio verso i sistemi di trasporto collettivo.

La multi modalit  veicoli elettrici-sistema di trasporto collettivo permetterebbe di "fermare" i veicoli sul territorio sub-urbano riducendo la congestione delle aree centrali. Inoltre, tale politica permetterebbe di rispondere a problematiche relative a picchi di energia, promuovendo la distribuzione della domanda di ricarica dei veicoli elettrici sul territorio.

Le attivit  previste nel presente contratto vedono una fase di specificazione, calibrazione e test della struttura modellistica atta a rappresentare lo scambio veicoli elettrici-sistema di trasporto collettivo.

Per far ci , si partir  dalla caratterizzazione della situazione attuale in termini di ricostruzione dell'offerta di sosta (parcheggi di scambio o parcheggi di Park & Ride) e di domanda di sosta. I parcheggi saranno individuati tramite Open Data e convertiti in file geografici con relativi attributi (ID, posizione, Capacit , linea/e di interscambio). Verr  quindi ricostruito lo stato attuale della mobilit  veicolare urbana sia in termini di domanda origine-destinazione che in termini di domanda di sosta attraverso dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli privati (FCD - Floating Car Data).

A seguire saranno definite le potenziali variabili esplicative del fenomeno di Park & Ride. Si dovranno definire le variabili indipendenti del modello, che potranno essere legate alle caratteristiche del trasporto privato (impedenze legate alla fase di accesso ai parcheggi), del trasporto pubblico (impedenze legate alla fase dello spostamento su mezzo pubblico), dei parcheggi di scambio (posizione, riempimento) ma anche alle caratteristiche della zona di origine o destinazione dello spostamento (caratteristiche legate al sistema delle attivit ) e all'intervallo temporale in cui si effettua lo spostamento.

Il legame tra domanda di sosta e variabili indipendenti sar  desunto attraverso un approccio data driven basato su specifiche tecniche di machine learning denominate Random Forest.

A valle della fase di training e test dei modelli, verranno condotte analisi di sensitivit  e validazione attraverso l'applicazione della struttura modellistica al caso della citt  di Roma.

Sar  infine valutata e proposta una metodologia per l'introduzione nel modello di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici, andando dunque ad incrementare l'attrattivit  dei parcheggi stessi e dello scambio verso il sistema di trasporto collettivo.

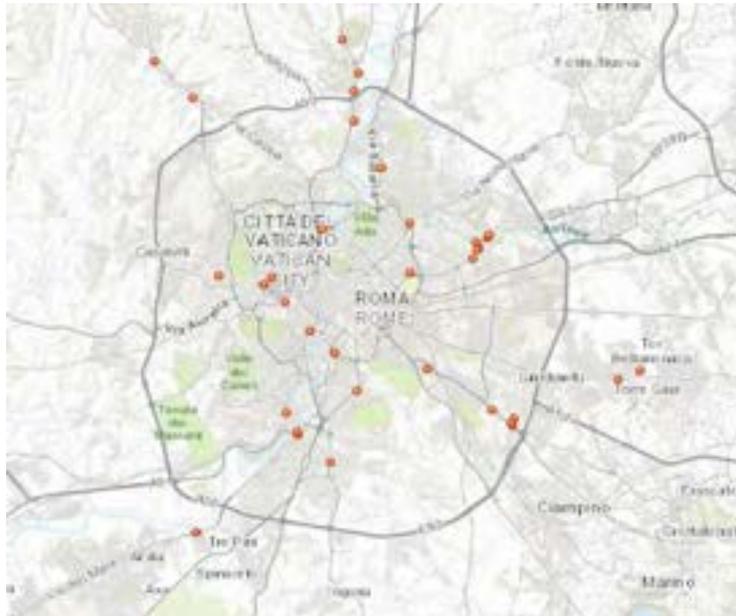
## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Definizione dell'offerta di sosta per spostamenti di Park & Ride

Per poter procedere allo sviluppo di modelli in grado di rappresentare l'interscambio tra veicoli privati elettrici e sistema di trasporto collettivo, il primo passo consiste nella caratterizzazione della situazione attuale in termini di ricostruzione dell'offerta di sosta (parcheggi di scambio o parcheggi di Park & Ride) con riferimento all'ambito territoriale di studio (parcheggi del Comune di Roma).

A tal fine sono stati utilizzati principalmente open data forniti dall'Agenzia della Mobilità del comune di Roma (<https://romamobilita.it/it/tecnologie/open-data/dataset>), i quali hanno fornito informazioni riguardanti 35 parcheggi di scambio (Figura 1, Tabella 1) presenti sul territorio comunale e situati nei pressi delle principali stazioni delle linee metropolitane A, B, B1 e C, le fermate delle ferrovie metropolitane (Ferrovie Laziali, Roma-Viterbo e Roma-Lido) e presso i nodi di interscambio con le linee di superficie. Le informazioni ottenute dagli open data sono state integrate tramite dati reperibili on-line (<http://www.atac.roma.it>), individuando così ulteriori 21 parcheggi di scambio (

Tabella 2).



**Figura 1. Mappa dei parcheggi di scambio (Open Data Agenzia della Mobilità di Roma).**

I parcheggi di scambio offrono la possibilità di lasciare l'auto privata a tariffe agevolate (o gratuitamente in caso di abbonamento al servizio di trasporto pubblico) per la sosta di lunga durata e proseguire verso le aree centrali della città servendosi del sistema di trasporto pubblico.

Dei 56 parcheggi individuati, 53 si trovano nel Comune di Roma e 3 nel Comune di Monte Compatri (Pantano 1, 2 e Pantano Multipiano). Questi ultimi vengono comunque ad essere considerati in quanto, seppur non localizzati nel territorio comunale, assolvono alla funzione di parcheggi di scambio per spostamenti in ingresso a Roma. La maggior parte dei parcheggi si trova in prossimità delle stazioni delle linee A, B e C della metropolitana, dove sono presenti anche numerosi capilinea delle linee di superficie, e nei pressi delle stazioni delle linee ferroviarie concesse e regionali. Solo due parcheggi si trovano in prossimità di sole linee di trasporto pubblico di superficie e sono i parcheggi di Elio Rufino e Trastevere.

Oltre alla suddivisione intra ed extra Comune di Roma, si nota come 34 dei 56 parcheggi si collocano nell'area all'interno del Grande Raccordo Anulare (GRA), mentre 22 sono esterni al GRA. Questi ultimi sono disposti lungo quattro principali direttrici, la Via Casilina a est del Comune di Roma, la Via Ostiense/Via del Mare a sud, la Via Cassia e la Via Flaminia a nord. La capacità complessiva offerta da tali parcheggi è pari a circa 20.000 stalli.

**Tabella 1. Elenco dei parcheggi di scambio e relative caratteristiche (Open Data Agenzia della Mobilità di Roma).**

	Nome	localizzazione	tipologia	capacità	interscambio con TP
1	ANAGNINA	Via Tuscolana	a raso	134	metro A e linee di superficie
2	ANAGNINA A e C	Via Vincenzo Giudice	multipiano	1495	metro A e linee di superficie
3	ANAGNINA B	Via Otello Stefanini	a raso	301	metro A e linee di superficie
4	ARCO DI TRAVERTINO	Via dell'Arco di Travertino	multipiano	997	metro A e linee di superficie
5	AUDITORIUM	Viale Maresciallo Pilsudski	interrato	1005	linee di superficie
6	CINECITTA'	Via Tuscolana	multipiano	592	metro A e linee di superficie
7	CIPRO	Via Angelo Emo	a raso	282	metro A e linee di superficie
8	ELIO RUFINO	Via Marco e Marcelliano	a raso	127	linee di superficie
9	FONTANA CANDIDA	Via Giarratana	a raso	383	metro C e linee di superficie

10	GROTTE CELONI	Via Casilina	a raso	532	metro C e linee di superficie
11	LA CELSA	Via Flaminia	a raso	125	Roma-Viterbo e linee di superficie
12	LA GIUSTINIANA	Via Bassano Romano	a raso	236	FL3, Roma-Viterbo e linee di superficie
13	LA STORTA	Via della Storta	a raso	489	FL3 e linee di superficie
14	LABARO	Via Flaminia (St. Labaro)	a raso	209	Roma-Viterbo e linee di superficie
15	LAURENTINA	Via De Suppè	multipiano	1268	metro B e linee di superficie
16	MAGLIANA	Via di Valfiorita	multipiano	962	metro B, Roma-Lido e linee di superficie
17	MATTIA BATTISTINI	Via Lucio II	a raso	177	metro A e linee di superficie
18	MONTEBELLO	Via Flaminia (St. Montebello)	a raso	350	Roma-Viterbo e linee di superficie
19	NUOVO SALARIO	Via della Serpentara	modulare	222	FL1 e linee di superficie
20	OSTIENSE Ad. MAGLIANA	Via Ostiense	a raso	151	metro B, Roma-Lido e linee di superficie
21	PALMIRO TOGLIATTI	Via P. Togliatti (metro P.Mammolo)	a raso	419	metro B e linee di superficie
22	PARTIGIANI	Piazzale dei Partigiani	a raso	430	metro B, Roma-Lido, FL1, FL3, FL5 e linee di superficie
23	PONTE MAMMOLO 1	Via delle Messi d'Oro	a raso + modulare	1317	metro B e linee di superficie
24	PONTE MAMMOLO 2	Rampa Via P. Togliatti-Via Tiburtina	a raso	271	metro B e linee di superficie
25	REBIBBIA 1	Via Casal de' Pazzi	a raso	465	metro B e linee di superficie
26	REBIBBIA 2	Via Tiburtina	a raso	136	metro B e linee di superficie
27	S. M. DEL SOCCORSO	Via Tiburtina	a raso	575	metro B e linee di superficie
28	SAXA RUBRA	Viale Maurizio Barendson	a raso	499	Roma-Viterbo e linee di superficie
29	STAZIONE NONENTANA	Via Val D'Aosta	a raso	105	FL1 e linee di superficie
30	STAZIONE SAN PIETRO	Via della Stazione San Pietro	interrato	148	FL3, FL5 e linee di superficie
31	STAZIONE TIBURTINA	Via Pietro L'Eremita	a raso	100	metro B, FL1, FL2 e linee di superficie
32	TRASTEVERE	Viale delle Mura Portuensi	modulare	221	linee di superficie
33	VALLE AURELIA	Via G. Di Bartolo	a raso	126	metro A, FL3 e linee di superficie
34	VILLA BONELLI	Via della Magliana Nuova	a raso	329	FL1 e linee di superficie
35	VITINIA	Via Ostiense	a raso	150	Roma-Lido e linee di superficie

**Tabella 2. Elenco dei parcheggi di scambio e relative caratteristiche (Atac).**

	Nome	localizzazione	tipologia	capacità	interscambio con TP
36	BORGHESIANA	Via Casilina	a raso	328	metro C e linee di superficie
37	CASAL BERNOCCHI	Via Ostiense 1707	a raso	200	Roma-Lido e linee di superficie
38	CESANO	Via della Stazione di Cesano	a raso	280	FL3 e linee di superficie
39	FIDENE	Via Incisa in Val D'Arno	a raso	30	FL1 e linee di superficie
40	FINOCCHIO	Piazza Serrule	a raso	80	metro C
41	GEMELLI	Via della Pineta Sacchetti 506	a raso	250	FL3 e linee di superficie
42	GIARDINETTI	Via Casilina	a raso	248	metro C e linee di superficie
43	GIUSTINIANA	Via della Giustiniana 15	a raso	80	Roma-Viterbo e linee di superficie
44	IPOGEO DEGLI OTTAVI	Via Trionfale 12350	a raso	280	FL3 e linee di superficie
45	JONIO	Via del Gran Paradiso	multiplano	252	metro B1 e linee di superficie
46	MONTE MARIO	Via Cesare Castiglioni	a raso	350	FL3 e linee di superficie
47	OLGIATA	Via Braccianese Claudia Il tronco	a raso	280	FL3 e linee di superficie
48	OSTIA ANTICA	Via Ostiense 2389	a raso	350	Roma-Lido e linee di superficie
49	OSTIA LIDO NORD	Viale dei Romagnoli 229	a raso	265	Roma-Lido e linee di superficie
50	OSTIA STELLA POLARE	Viale Vega	a raso	100	Roma-Lido e linee di superficie
51	PANTANO 1	Via Casilina n.163	a raso	322	metro C e linee di superficie
52	PANTANO 2	Via Casilina n.163	a raso	160	metro C e linee di superficie
53	PANTANO MULTIPIANO	Via Casilina n.163	multiplano	382	metro C e linee di superficie
54	TOR DI VALLE	Piazzale Ezio Tarantelli	a raso	328	Roma-Lido e linee di superficie
55	TORRE ANGELA	Largo Ettore Paratore	a raso	80	metro C
56	STAZIONE TRASTEVERE	Piazzale Flavio Biondo	a raso	120	FL1, FL3, FL5 e linee di superficie

La tariffa varia tra i parcheggi situati all'interno e all'esterno dell'anello ferroviario:

- All'interno dell'anello ferroviario (Cipro, Stazione San Pietro, Stazione Tiburtina):
  - € 2,00 per 12 ore consecutive di sosta;
  - € 3,00 fino a 16 ore consecutive di sosta.
- All'esterno dell'anello ferroviario (tutti gli altri parcheggi di scambio):
  - € 1,50 per 12 ore consecutive di sosta;
  - € 2,50 fino a 16 ore consecutive di sosta.

I parcheggi di scambio possono essere automatizzati o non automatizzati, con diverse modalità di pagamento ed esenzione per le due categorie:

- Parcheggi automatizzati: è possibile effettuare il pagamento della tariffa di sosta presso le casse automatiche o, laddove previsto, presso le casse presidiate da personale;
- Parcheggi non automatizzati: il pagamento della tariffa può avvenire tramite parcometro oppure tramite applicazione su smartphone.

Esistono parcheggi a tariffa non vincolata situati in particolari punti di attrazione della città che offrono modalità di tariffazione differenziata sia per favorire l'uso a rotazione degli spazi di sosta, sia per venire incontro alle esigenze di particolari categorie (residenti, lavoratori, turisti ecc.). Si tratta dei parcheggi Auditorium, Partigiani (prossimità stazione Ostiense) e Trastevere.

In particolare, le tariffe del parcheggio Auditorium sono:

- oraria diurna 06.00 - 21.00: € 1,00;



parcheggio di scambio/area diventa essenziale nella fase di calibrazione di un modello che vuole correlare la domanda stessa con le caratteristiche dell'offerta di sosta.

Ad ogni parcheggio corrisponde dunque un'area di parcheggio; nel caso in cui due o più parcheggi appartengano alla stessa area di parcheggio vengono contrassegnati dallo stesso codice di "AREA PARK".

Le aree di parcheggio individuate sono 51 rappresentate tramite poligoni in Quantum GIS (Figura 3). Ad ogni area di parcheggio corrispondono i seguenti attributi:

- ID: codice identificativo progressivo dell'area;
- AREA PARK: codice identificativo dell'area di parcheggio;
- ID parking: codici dei parcheggi compresi nella singola area di parcheggio;
- NOME: nome dell'area di parcheggio;
- ZONA ISTAT: zona ISTAT2011 di appartenenza.



**Figura 3. Area di parcheggio Anagnina, con i parcheggi di Anagnina A e C (ID1), Anagnina B (ID2) e Anagnina (ID56).**

Per le aree di parcheggio è stato considerato un buffer di 30 metri attorno all'area effettiva per tenere conto dell'errore dovuto al processo di map matching dei veicoli sonda, che sono stati utilizzati per la definizione della domanda in arrivo all'area, nonché per differenziare la vera e propria domanda di park & ride da una eventuale domanda di parcheggio limitrofa all'area stessa, ma non interessata al passaggio verso la rete di trasporto collettivo.

## **2.2 Domanda di mobilità e domanda di sosta da Floating Car Data (FCD)**

I dati utilizzati nel presente studio con il fine di ricostruire la domanda di mobilità privata e la domanda di sosta presso i parcheggi di Park & Ride derivano da un campione di veicoli sonda (Floating Car Data, FCD) circolante nell'area metropolitana di Roma (banca dati OctoTelematics). Attualmente l'uso di FCD per estrarre modelli di mobilità/traffico e comportamenti di viaggio che si verificano nelle aree urbane è fortemente presente nella letteratura scientifica [1, 2, 3, 4, 5].

OctoTelematics raccoglie questa tipologia di dato per fornire valore aggiunto ai servizi offerti dalle compagnie di assicurazione auto e dagli operatori di flotte veicolari. Nel 2013, il sistema FCD gestito da OctoTelematics era composto da circa 2 milioni di auto private. Le auto sono dotate di un'unità di bordo (OBU) che memorizza posizione, direzione, velocità del veicolo, nonché qualità del segnale GPS e, periodicamente, li trasmette ad un centro di elaborazione dati. L'OBU memorizza le misurazioni GPS ogni 2 chilometri percorsi o, in alternativa, ogni 30 secondi quando il veicolo percorre un'autostrada o un tratto di viabilità urbana principale; ciò implica la necessità di una fase di processamento del dato per il matching

rispetto alla rete stradale e la successiva individuazione dei percorsi. Il dataset FCD utilizzato in questo studio include circa 150'000 veicoli tracciati durante l'intero mese di maggio 2013.

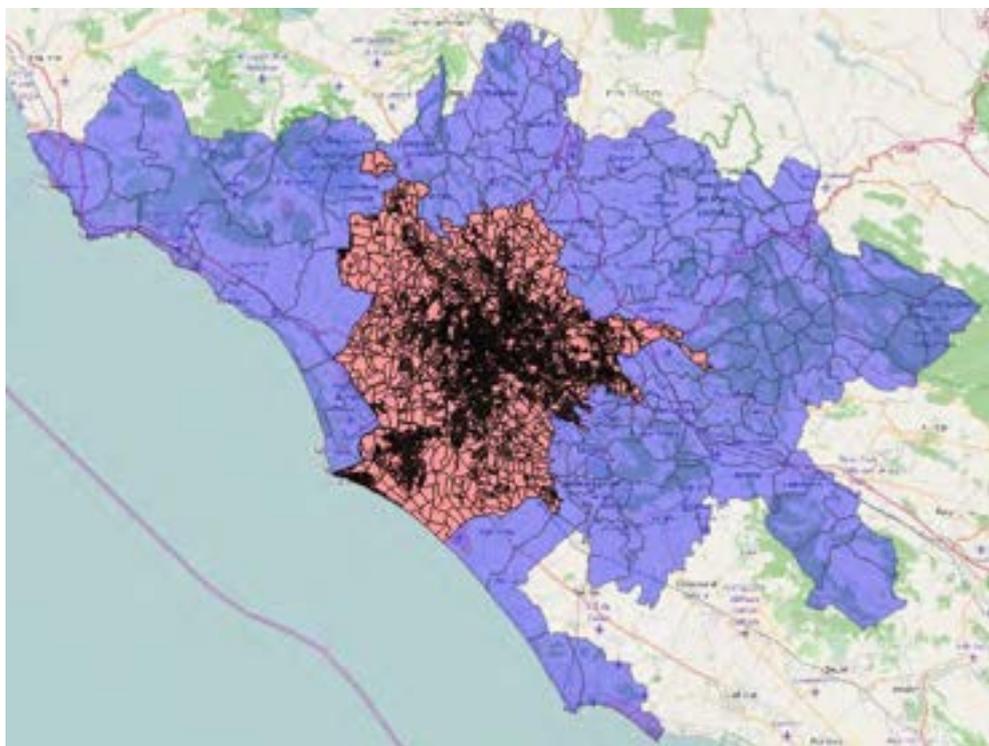
I dati sono stati utilizzati a livello di singoli viaggi, ovvero spostamenti che non comprendono soste intermedie e che iniziano con l'accensione del motore del veicolo e terminano con lo spegnimento dello stesso. Possibili unioni di viaggi, considerando eventuali fermate intermedie non superiori ai 15 minuti sono state inizialmente computate ma poi scartate in quanto ciò andava a ridurre fortemente il campione.

L'obiettivo è stato quello di arrivare a definire gli spostamenti FCD generati ed attratti nell'area di studio, nonché le quote di tali spostamenti che afferiscono ai parcheggi di interscambio.

Per far ciò, è necessario dapprima definire una zonizzazione dell'area di studio con estensione e dimensione adeguata a rappresentare il fenomeno in atto (l'interscambio tra mezzo privato e mezzo pubblico). A tal fine, si è stabilito di estendere l'ambito territoriale di analisi all'intero territorio provinciale romano, in quanto gli spostamenti che effettuano Park & Ride sono per loro natura caratterizzati da una quota rilevante di spostamenti in partenza dal territorio provinciale ed arrivo nei parcheggi periferici.

Inizialmente la zonizzazione considerata è stata la zonizzazione fornita dall'ISTAT 2011 basata su sezioni censuarie che comprende 13.656 zone per il territorio del Comune di Roma e 120 zone per i restanti comuni della provincia (Figura 4). Per il Comune di Fiumicino, data l'estensione territoriale e l'importanza di tener conto delle differenti direttrici di trasporto collettivo che fungono da collegamento tra il Comune e la Capitale, si è deciso di operare un frazionamento della zona comunale ISTAT di partenza. Dunque la zona comunale di Fiumicino (codice ISTAT 58120) è stata suddivisa in 3 zone e per ognuna di esse è stato creato un apposito identificativo di zona, come segue:

1. Passoscuro, Torrimpietra, Aranova, Maccarese (id=581200000001);
2. Maccarese Scalo, Fregene, Focene (id=581200000002);
3. Fiumicino, Aeroporto di Fiumicino, Isola Sacra (id=581200000003).



**Figura 4. Zonizzazione ISTAT 13.656 zone e ISTAT Comuni Provincia di Roma.**

Data la precedente zonizzazione, i singoli spostamenti sono stati aggregati come somma di tutti i martedì, i mercoledì e i giovedì del mese di Maggio 2013 con intervalli temporali di aggregazione di 1 ora e poi organizzati in matrici di dati. Le matrici sono in particolare:

- Matrice Origine (o)-Destinazione (d) (mat\_od) contenente i dati relativi a 344'238 coppie o-d coperte, per un totale di 3'134'837 spostamenti. In particolare ogni coppia o-d, che può quindi comprendere più di uno spostamento, è caratterizzata dagli attributi: zona di origine, zona di destinazione, intervallo temporale, distanza media percorsa, tempo medio dello spostamento, deviazione standard della distanza, deviazione standard del tempo di percorrenza, tempo minimo, tempo massimo, distanza minima, distanza massima, numero di spostamenti e numero di veicoli;
- Matrice Origine (o)-Parcheggio (p) (mat\_op) contenente i dati relativi a 5'484 coppie o-p coperte, per un totale di 13'599 spostamenti da o a p. In particolare ogni coppia o-p, che può comprendere più di uno spostamento, è caratterizzata dagli attributi: zona di origine, zona di destinazione (area di parcheggio), intervallo temporale, distanza media percorsa, tempo medio dello spostamento, deviazione standard della distanza, deviazione standard del tempo di percorrenza, tempo minimo, tempo massimo, distanza minima, distanza massima, numero di spostamenti e numero di veicoli.
- Matrice relativa alle aree di parcheggio (park\_occ) contenente il numero di veicoli entrati e il numero di veicoli usciti per ogni area di parcheggio e per ogni intervallo temporale, considerando in uscita solo i campioni registrati in ingresso, imponendo in questo modo il bilanciamento entrati-usciti in ogni area di parcheggio.

Per verificare la rappresentatività del dato FCD e livello di zonizzazione utilizzata è stato effettuato un confronto tra gli spostamenti complessivamente generati da ogni origine ( $G_o^{FCD}$ ) nelle 24 ore e i dati della popolazione provenienti dalle statistiche ISTAT 2011 ( $Pop_o$ ) attraverso una regressione lineare semplice.

La prima regressione, effettuata a livello delle 13.656 zone interne al Comune di Roma, ha mostrato un risultato in termini di indice  $R^2$  non buono ( $R^2 = 0,069$ ), mentre la stessa analisi effettuata per le zone dei comuni esterni (122 zone) mostra una buona corrispondenza (Figura 5).

Per questo motivo si è deciso di utilizzare un livello di aggregazione maggiore internamente al comune di Roma, passando da 13.656 zone a 155 zone secondo la definizione di zone urbanistiche (Figura 7). La regressione ottenuta tra  $G_o^{FCD}$  e  $Pop_o$  sulle 155 zone è risultata soddisfacente (Figura 6) e dunque le zone urbanistiche sono state il livello di zonizzazione spaziale utilizzato nel prosieguo dello studio per l'area interna al Comune di Roma.

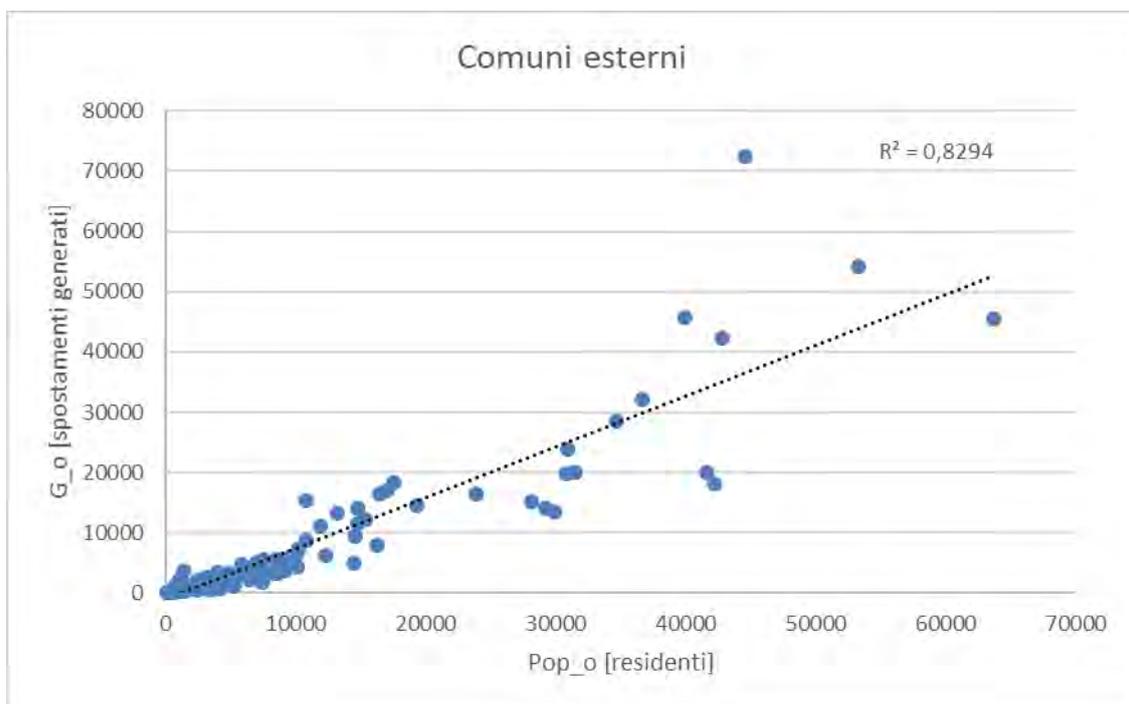


Figura 5. Regressione lineare generati FCD-popolazione ISTAT per i comuni esterni.

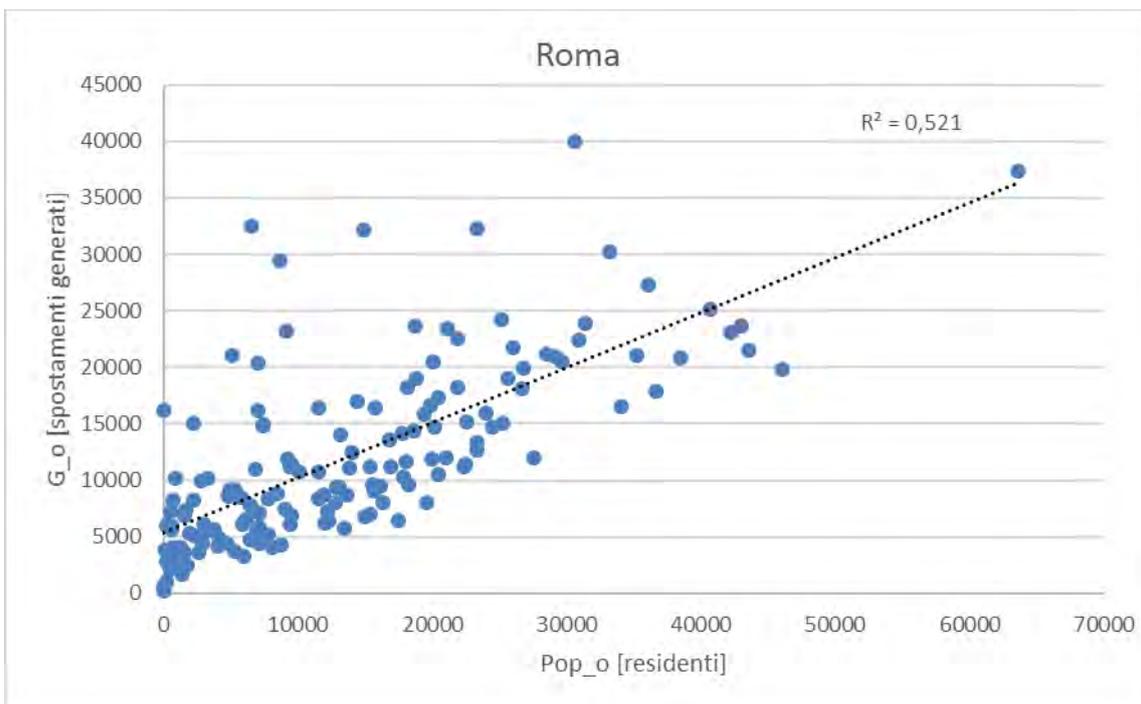


Figura 6. Regressione lineare generati FCD-popolazione ISTAT per zone urbanistiche Roma (155 zone).



Figura 7. Zone urbanistiche Comune di Roma e 51 aree di parcheggio

Una volta validato il livello di aggregazione spaziale da utilizzare nello studio, si è operato un processo di filtraggio dati per rendere più significativo il dato desunto da FCD per le finalità di calibrazione del modello di scelta multi-modale.

Il primo livello di filtraggio ha riguardato 1) gli spostamenti avvenuti nelle ore notturne, 2) le coppie o-d e o-p con un tempo medio di spostamento eccessivamente elevato e 3) gli spostamenti verso aree di parcheggio non esistenti all'epoca del rilevamento dei dati FCD. In relazione al punto 3), si sono identificati 8 parcheggi di scambio non esistenti al 2013 in quanto localizzati lungo l'attuale metro C (Grotte Celoni, Giardinetti, Borghesiana, Pantano, Fontana Candida, Finocchio, Torre Angela) e metro B1 (Jonio).

Per la matrice Origine-Destinazione sono stati eliminati:

- gli spostamenti avvenuti nelle ore notturne, in particolare nell'intervallo 00:00-04:00 perché non influenti ai fini della modellazione del fenomeno di Park & Ride;
- le coppie o-d con un tempo medio di spostamento maggiore di 4 ore, considerato come limite ultimo di uno spostamento in ambito provinciale.

A valle della pulizia la matrice Origine-Destinazione comprende 330'777 coppie o-d coperte dai dati e 3'092'204 spostamenti tra origine e destinazione effettuati da 1'973'314 veicoli.

Per la matrice Origine-Parcheggio sono stati eliminati:

- gli spostamenti avvenuti nelle ore notturne, in particolare nell'intervallo 00:00-04:00 perché non influenti ai fini della modellazione del fenomeno di Park & Ride;
- le coppie o-p con un tempo medio di spostamento maggiore di 2 ore, considerato come limite ultimo temporale di raggiungimento di un parcheggio di scambio esistente a partire da una origine estrema al territorio provinciale;
- gli spostamenti aventi come destinazione le aree di parcheggio non esistenti al 2013, anno a cui risale il dato FCD.

A valle della pulizia la matrice Origine-Parcheggio comprende 4'467 coppie o-p coperte e 11'435 spostamenti tra origine e area di parcheggio effettuati da 6'998 veicoli.

Successivamente è stata effettuata una analisi sugli spostamenti per classi di distanza. Per ogni classe è stato calcolato il tempo minimo e il tempo massimo impiegato a percorrere la distanza minima e la distanza massima all'interno della singola classe, utilizzando come velocità massima 100 km/h e come velocità minima 10 km/h. In questo modo sono state eliminate le coppie o-d e o-p con un tempo medio di percorrenza inferiore al tempo minimo calcolato o con un tempo medio di percorrenza superiore al tempo massimo calcolato.

Per la matrice Origine-Destinazione i dati sono stati raggruppati in base alla distanza media percorsa, a partire da una distanza minima di 500 m fino a 100 km, con classi di ampiezza 5 km (20 classi), più un'ulteriore classe per distanze superiori ai 100 km. Dopo questo ulteriore filtraggio sui dati, la matrice o-d comprende 328'540 coppie o-d coperte (21% di copertura rispetto a tutte le possibili relazioni o-d nelle 20 ore) per 3'086'809 spostamenti.

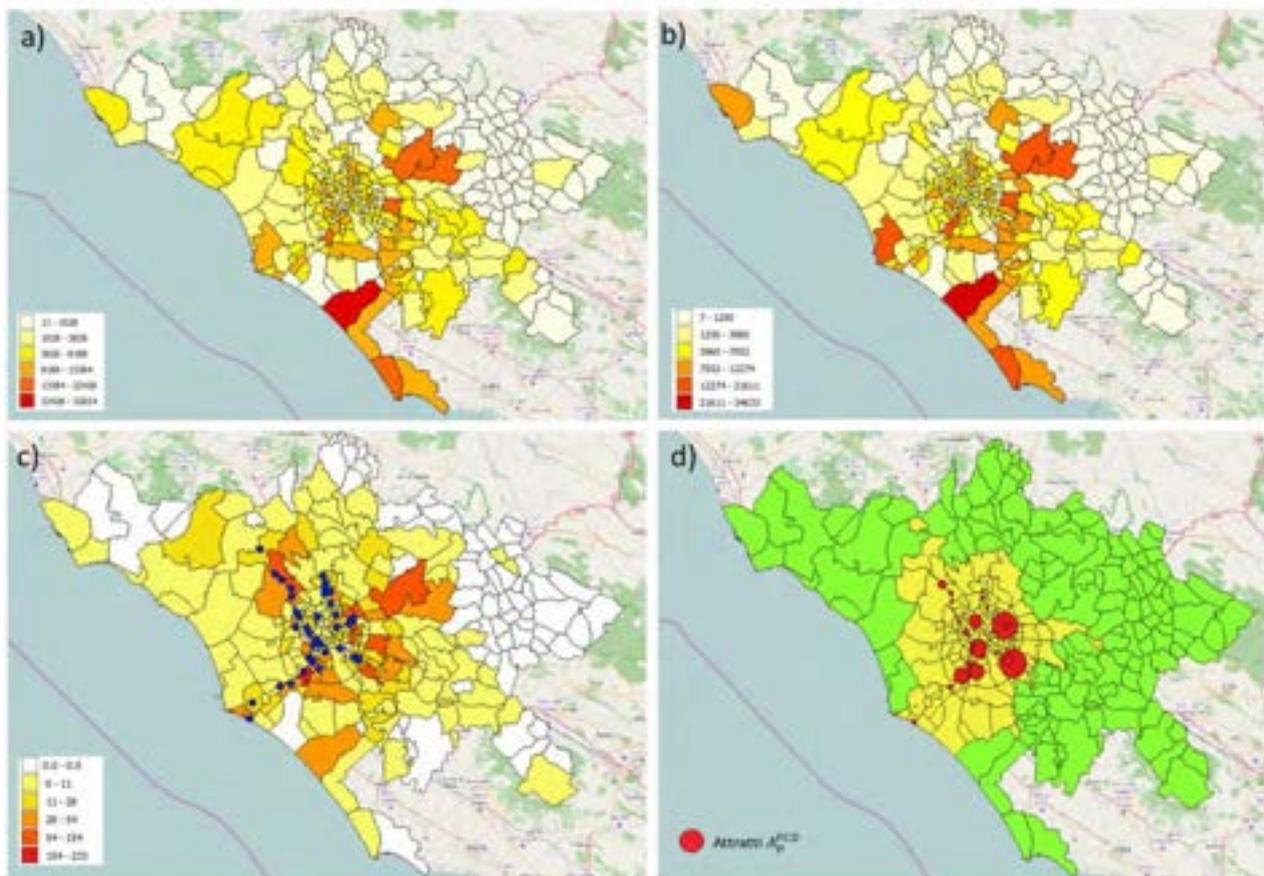
Per la matrice Origine-Parcheggio i dati sono stati raggruppati in base alla distanza media percorsa, a partire da una distanza minima di 500 m fino a 50 km, in classi di ampiezza di 5 km (10 classi), più un'ulteriore classe per distanze superiori ai 50 km. Dopo questo ulteriore filtraggio sui dati la matrice o-p comprende 4'428 coppie o-p coperte (2% di copertura rispetto a tutte le possibili relazioni o-p nelle 20 ore) per 11'377 spostamenti.

Ulteriore processo di filtraggio ha riguardato le aree di parcheggio, in cui, come illustrato nel successivo paragrafo 2.3, alcune sono state eliminate a causa di trend non attesi dei riempimenti ed arrivando così ad un totale di 40 aree considerate.

A valle del filtraggio, dalle nuove matrici o-d e o-p scaturite sono state estratte le seguenti informazioni:

- spostamenti FCD generati da ogni zona di origine verso tutte le zone di destinazione ( $G_o^{FCD}$ ) per ogni intervallo temporale (Dt) pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice di dimensione 277, 155 zone interne e 122 zone esterne, per 20 ore)
- spostamenti FCD generati da ogni zona di origine che fanno Park & Ride ( $G_o^{FCD/PARK}$ ) per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice 277 x 20)
- il rapporto tra  $G_o^{FCD/PARK}$  e  $G_o^{FCD}$  per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice 277 x 20)

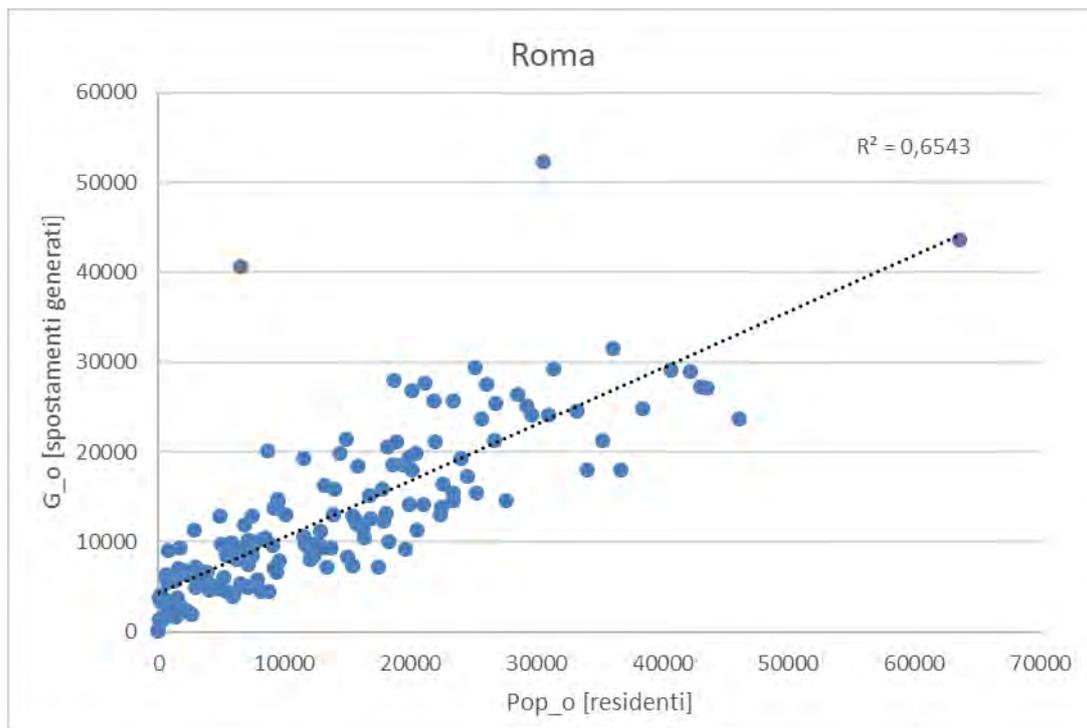
- spostamenti FCD attratti da ogni destinazione  $A_d^{FCD}$  per ogni Dt pari ad 1 h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice 277 x 20)
- spostamenti FCD attratti da ogni area di parcheggio  $A_p^{FCD}$  per ogni Dt pari ad 1 h nell'intervallo 04:00-00:00 (matrice 40, aree di parcheggio, x 20)
- flussi FCD da ogni zona di origine ad ogni zona di destinazione, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 277 destinazioni x 20 ore)
- tempi medi di percorrenza da ogni zona di origine ad ogni zona di destinazione, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 277 destinazioni x 20 ore)
- distanze medie percorse da ogni zona di origine ad ogni zona di destinazione, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 277 destinazioni x 20 ore)
- flussi FCD da ogni zona di origine ad ogni area di parcheggio, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 40 aree di parcheggio x 20 ore)
- tempi medi di percorrenza da ogni zona di origine ad ogni area di parcheggio, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 40 aree parcheggio x 20 ore)
- distanze medie percorse da ogni zona di origine ad ogni area di parcheggio, per ogni Dt pari ad 1h nell'orizzonte di analisi 04:00-00:00 (matrice tridimensionale 277 origini x 40 aree di parcheggio x 20 ore).



**Figura 8. Distribuzione spostamenti generati nelle zone dell'area di studio nella fascia oraria 6:00-11:00 (a); distribuzione spostamenti attratti nelle zone dell'area di studio fascia oraria 6:00-11:00 (b); distribuzione degli spostamenti generati che effettuano Park & Ride nelle zone dell'area di studio fascia oraria 6:00-11:00 e relative 40 aree di parcheggio (c); spostamenti attratti alle 40 aree di parcheggio di scambio nella fascia oraria 6:00-11:00 (d).**

A titolo di esempio si riportano in Figura 8 alcune elaborazioni grafiche della domanda FCD contenuta all'interno delle matrici o-d ed o-p con riferimento alla fascia oraria mattutina 6:00-11:00: queste permettono di identificare la distribuzione sul territorio della domanda in partenza ed in destinazione, nonché della domanda di Park & Ride e della domanda in arrivo ai parcheggi di scambio.

A valle della pulizia dei dati è stata effettuata nuovamente la regressione lineare tra gli spostamenti FCD e i dati della popolazione ISTAT 2011 considerata la zonizzazione definitiva a 155 zone interne al comune di Roma e 122 zone esterne al Comune (ambito provinciale). I risultati, come atteso, sono analoghi o migliorativi rispetto al caso pre-filtraggio, come riportato nelle figure a seguire:



**Figura 9. Regressione lineare generati FCD-popolazione ISTAT per zone urbanistiche Roma (a valle filtraggio).**

Le ultime informazioni acquisite nel presente studio per la calibrazione del modello multimodale sono state informazioni circa il livello di servizio fornito dalla rete di trasporto collettivo nell'area di studio. Di fatti, il fenomeno di scambio da modalità di trasporto privata a modalità di trasporto pubblico dipende anche dalle impedenze del trasporto collettivo in relazione alle impedenze dell'alternativa modale in gioco.

In particolare, i dati acquisiti sul servizio di trasporto collettivo sono stati forniti dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" all'interno dello stesso progetto.

Tali dati sono relativi a tempi di viaggio sul trasporto pubblico e numero di mezzi utilizzati sia per singola relazione origine-destinazione che per singola relazione area di parcheggio-destinazione per ogni ora del giorno feriale medio. La metodologia utilizzata per l'estrazione di tali informazioni si basa principalmente su algoritmi di routing di tipo CSA, con l'introduzione di opportune modifiche che ne consentono l'utilizzo nei sistemi urbani considerando anche percorsi pedonali realistici per il cambio di fermata e di mezzi di trasporto [6]. I dati di input derivano da banche dati open dei sistemi di trasporto collettivo presenti nell'ambito urbano di riferimento.

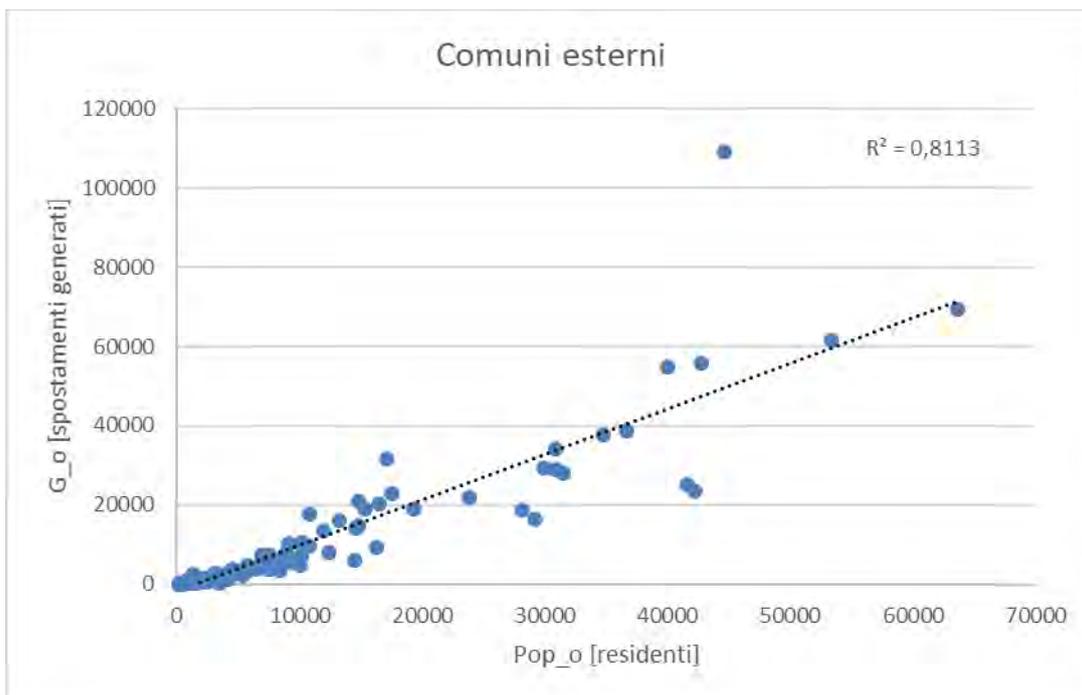


Figura 10. Regressione lineare generati FCD-popolazione ISTAT per i Comuni esterni (a valle filtraggio).

### 2.3 Interazione tra domanda di sosta ed offerta di sosta

La domanda di sosta da FCD nel giorno feriale medio (dunque, come precedentemente detto, calcolata come somma di tutti i martedì, i mercoledì ed i giovedì del mese di Maggio 2013) è stata rapportata all’offerta di sosta della rispettiva area per poter definire l’andamento del riempimento campionario nelle ore del giorno. Questo dato risulterà di fondamentale importanza per lo sviluppo del modello multimodale, in quanto un grado di riempimento pari alla capacità pregiudica la possibilità di accogliere ulteriore domanda di sosta.

Per il calcolo dei riempimenti campionari sono stati considerati in uscita dalle aree di parcheggio solo i veicoli registrati in ingresso imponendo così il bilanciamento della domanda ingresso/uscita in ogni area (cfr. caso Laurentina, Tabella 3).

Il numero di veicoli presente in ogni area è stato quindi ottenuto calcolando la differenza tra gli ingressi e le uscite per ogni intervallo temporale e sommando i veicoli già presenti nell’intervallo precedente.

Si è assunto che al numero massimo di veicoli registrati in sosta nella singola area corrispondesse il massimo grado di riempimento del parcheggio (raggiungimento della capacità). Conseguentemente sono stati calcolati gli ulteriori riempimenti nelle restanti ore del giorno.

Nella maggior parte delle aree di parcheggio il grado di riempimento raggiunge il valore massimo tra le 08:00 e le 09:00, per poi mantenersi più o meno costante fino alle 14:00, da quest’ora in poi si assiste ad un progressivo svuotamento delle aree di parcheggio (Tabella 5).

Per alcune aree di parcheggio si evidenziano trend non attesi, come si vede nel grafico seguente per l’area di parcheggio di Valle Aurelia. Ciò può essere dovuto a diverse problematiche:

- il parcheggio è coperto oppure interrato;
- la qualità del segnale GPS è bassa;
- l’area di parcheggio è di difficile delimitazione, quindi vengono conteggiati anche veicoli che effettuano la sosta nell’area limitrofa al parcheggio.

Tabella 3. Ingressi e uscite dall'area di parcheggio di Laurentina nel giorno feriale medio (dato FCD).

AREA DI PARCHEGGIO id	ORE h	ENTRATI n_in	USCITI n_out
13	0	0	0
13	1	4	1
13	2	2	3
13	3	6	2
13	4	69	1
13	5	280	16
13	6	212	27
13	7	32	19
13	8	18	12
13	9	20	23
13	10	20	27
13	11	49	45
13	12	42	52
13	13	49	41
13	14	21	55
13	15	22	90
13	16	29	132
13	17	13	150
13	18	11	135
13	19	5	49
13	20	5	14
13	21	4	13
13	22	0	6
13	23	0	0

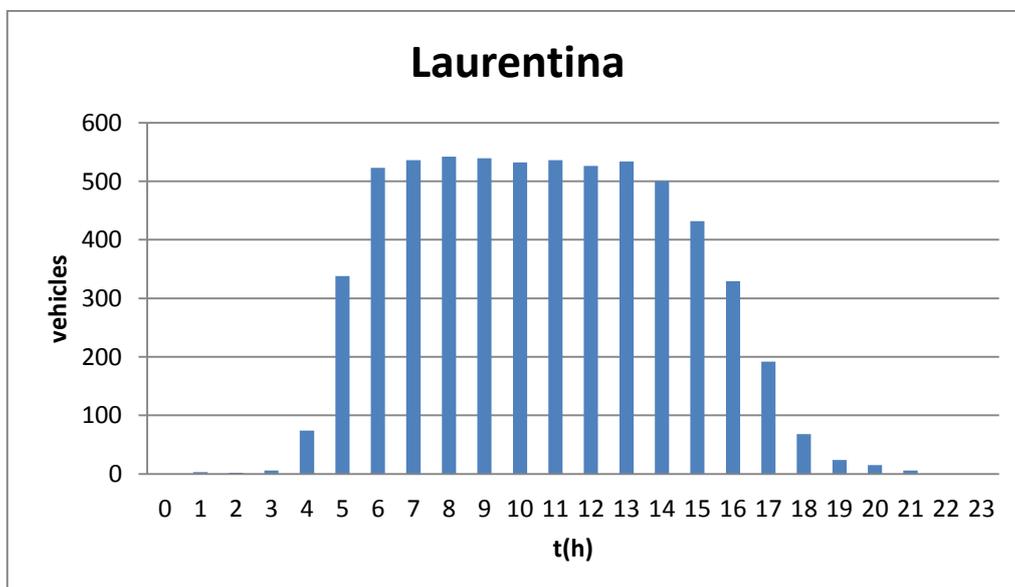


Figura 11. Numero di veicoli presenti per ora nell'area di parcheggio di Laurentina.

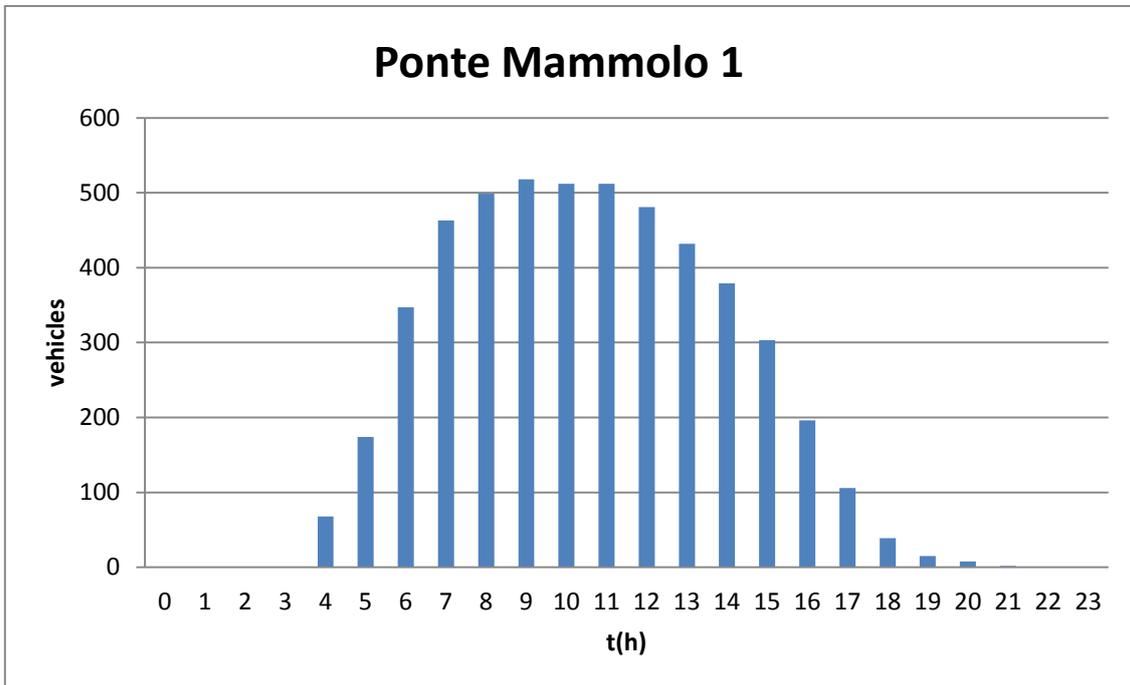


Figura 12. Numero di veicoli presenti per ora nell'area di parcheggio di Ponte Mammolo 1.

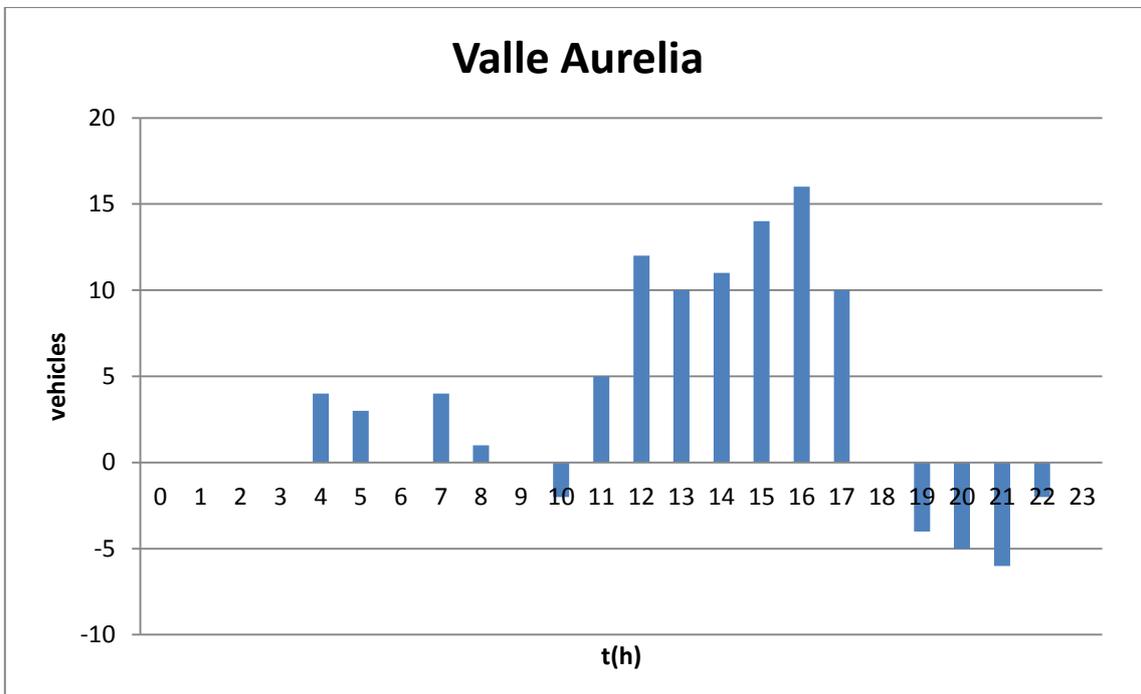


Figura 13. Numero di veicoli presenti per ora nell'area di parcheggio di Valle Aurelia.

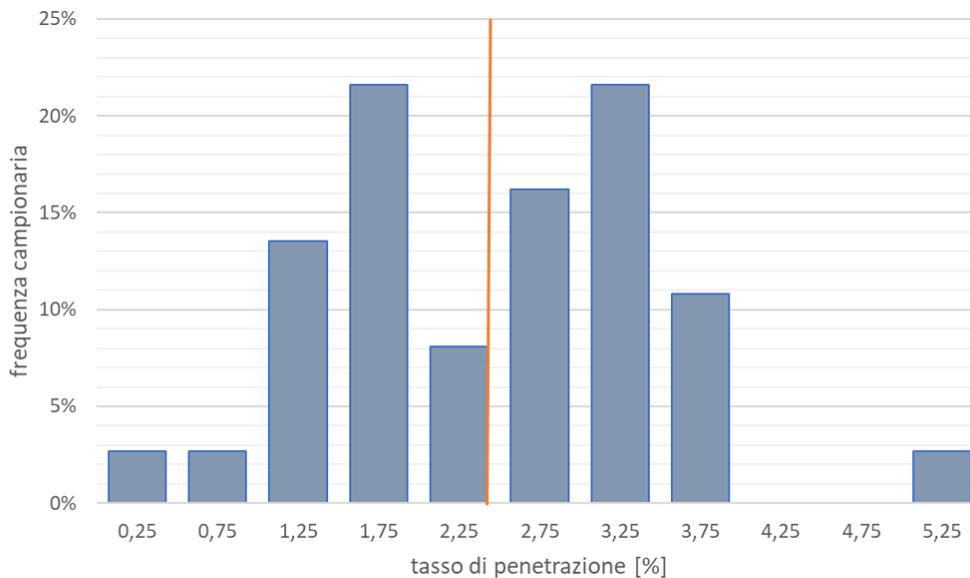
Le aree di parcheggio che presentano un trend non atteso sono state le seguenti (6):

**Tabella 4. Aree di parcheggio con trend non atteso del livello di riempimento campionario.**

ID	NOME
2	Valle Aurelia
3	Arco di Travertino
15	Stazione Nomentana
25	Villa Bonelli
38	Stazione Giustiniana
44	Ostia Lido Nord

Per Arco di Travertino, Stazione Nomentana e Villa Bonelli, per sopperire all'informazione mancante sul grado di riempimento, sono stati utilizzati i dati relativi ad un precedente studio di ATAC SpA - Agenzia per la Mobilità del Comune di Roma sui parcheggi di scambio [7]. I rimanenti 2 parcheggi sono stati esclusi per la successiva fase di calibrazione del modello.

Noto il numero massimo di veicoli campionati in sosta nelle aree di parcheggio è stato possibile valutare la rappresentatività dei dati FCD dividendo tale numero per 14 (giorni feriali considerati, somma di tutti i martedì, i mercoledì e i giovedì di Maggio 2013) e successivamente rapportandolo alla capacità dell'area di parcheggio. Il tasso di penetrazione così calcolato si attesta mediamente attorno al 2,5% (Figura 14).



**Figura 14. Distribuzione tasso di penetrazione FCD nell'intervallo 09:00-10:00 nei parcheggi campionati.**

**Tabella 5. Numero massimo di veicoli in sosta per ogni area di parcheggio ed intervallo orario in cui ciò si registra.**

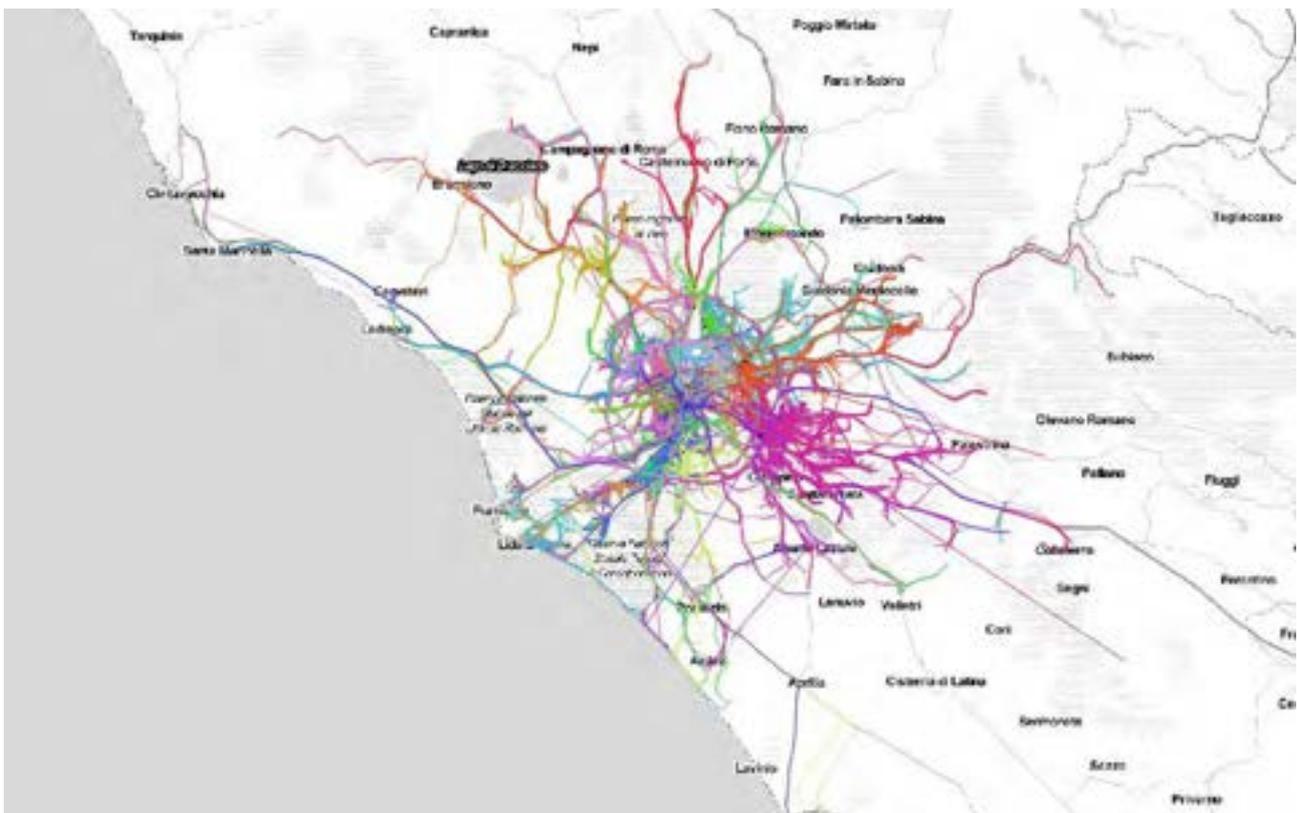
<b>Area di parcheggio</b>	<b>n° max veicoli in sosta</b>	<b>intervallo t</b>
Anagnina	931	08:00-09:00
Arco di Travertino	409	11:00-12:00
Auditorium	189	11:00-12:00
Battistini	80	08:00-09:00
Cipro	57	07:00-08:00
Elio Rufino	65	10:00-11:00
Magliana	508	08:00-09:00
La Giustiniana	61	10:00-11:00
La Storta	262	10:00-11:00
Laurentina	542	08:00-09:00
Montebello	163	08:00-09:00
Stazione Nomentana	131	11:00-12:00
Nuovo Salario	77	09:00-10:00
Palmiro Togliatti	119	08:00-09:00
Partigiani	197	09:00-10:00
Rebibbia	268	08:00-09:00
S.M. del Soccorso	235	10:00-11:00
Stazione S. Pietro	34	09:00-10:00
Saxa Rubra	87	09:00-10:00
Stazione Tiburtina	48	11:00-12:00
Trastevere	61	08:00-09:00
Villa Bonelli	181	10:00-11:00
Vitinia	55	08:00-09:00
Cinecittà	311	09:00-10:00
Monte Mario	17	07:00-08:00
Casal Bernocchi	39	10:00-11:00
Tor di Valle	155	08:00-09:00
Gemelli	91	05:00-06:00
Olgiate	77	07:00-08:00
Cesano	52	08:00-09:00
Ipogeo degli Ottavi	100	07:00-08:00
Fidene	32	07:00-08:00
Ostia Antica	89	09:00-10:00
Ostia Stella Polare	50	08:00-09:00
Stazione Trastevere	53	08:00-09:00
La Celsa	24	08:00-09:00
Labaro	56	13:00-14:00
Ostiense ad. Magliana	51	12:00-13:00
Ponte Mammolo 1	518	09:00-10:00
Ponte Mammolo 2	126	09:00-10:00

Le ultime analisi sulla domanda di sosta derivata da FCD hanno riguardato la sua interazione con il bacino di origine (i.e. individuare sul territorio quali sono le origini interessate ad una determinata area di parcheggio), nonché valutare quali sono i tempi di permanenza medi e le distanze medie per accedere alle aree di parcheggio.

Queste analisi, che mettono in relazione la domanda di sosta con il territorio e con la rete infrastrutturale sottostante, permettono da un lato di valutare l'efficacia della domanda derivata da dato campionario nonché di ottenere informazioni rilevanti per la successiva fase modellistica.

Per individuare l'ampiezza del bacino di origine di ogni area di parcheggio è stata utilizzata la matrice origine-parcheggio e tramite Quantum GIS sono stati geo referenziati tutti i viaggi in essa contenuti (Figura 15).

Come si può vedere dal risultato nel caso dell'area di parcheggio di Anagnina (Figura 16), c'è una forte componente in accesso ai parcheggi che deriva dal territorio sud-est del Comune di Roma e dall'area dei castelli romani. Muovendosi verso aree di parcheggio più centrali, come il caso di Partigiani (Figura 17), si perde questa forte direzionalità, con spostamenti in accesso che abbracciano l'intero territorio ed una conseguente concentrazione interna al Grande Raccordo Anulare.



**Figura 15. Spostamenti FCD in accesso alle aree di parcheggio.**

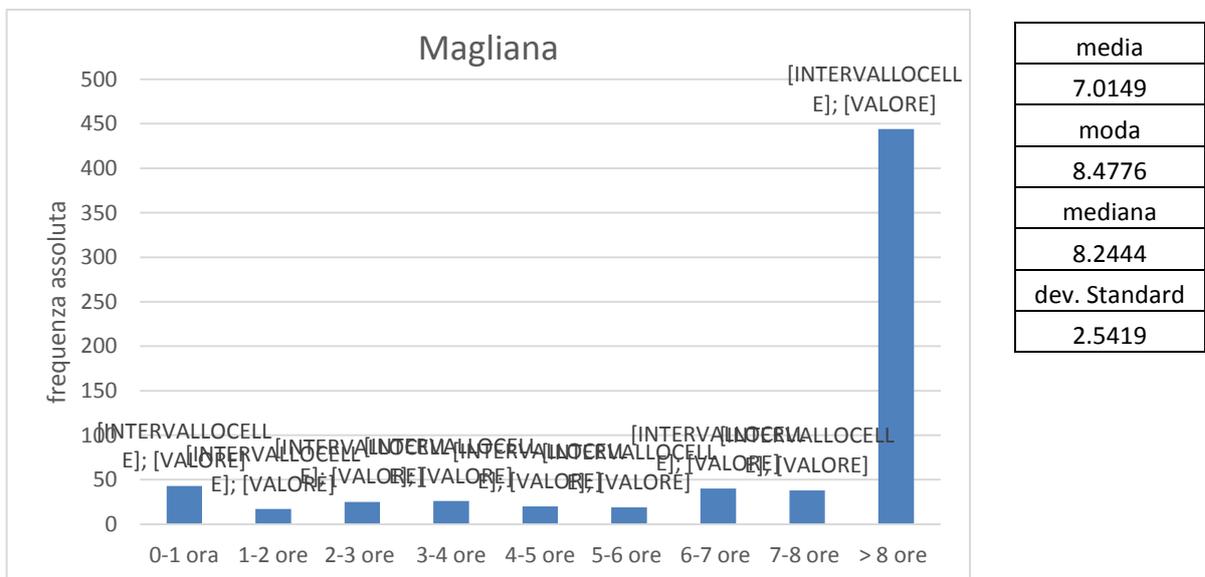


L'analisi dei tempi di sosta nelle singole aree di parcheggio è stata effettuata, sempre a partire dalla matrice origine-parcheggio, raggruppando i viaggi in classi in base alla durata della sosta nell'area di parcheggio, differenza tra l'istante in cui il veicolo arriva dall'origine al parcheggio e si spegne, e l'istante in cui il veicolo è ripartito per effettuare il viaggio successivo dal parcheggio alla destinazione. Il campione è stato raggruppato in 9 classi, di cui le classi dalla 1 alla 8 di ampiezza pari ad un'ora, mentre la classe 9 comprende tutti gli spostamenti in cui il tempo di sosta al parcheggio supera le 8 ore.

- Classe 1: tempo di sosta  $\leq$  1 ora
- Classe 2: 1 ora < tempo di sosta < 2 ore
- Classe 3: 2 ore < tempo di sosta < 3 ore
- Classe 4: 3 ore < tempo di sosta < 4 ore
- Classe 5: 4 ore < tempo di sosta < 5 ore
- Classe 6: 5 ore < tempo di sosta < 6 ore
- Classe 7: 6 ore < tempo di sosta < 7 ore
- Classe 8: 7 ore < tempo di sosta < 8 ore
- Classe 9: tempo di sosta > 8 ore

Per ogni area di parcheggio è stata calcolata la distribuzione in classi ed i relativi indici statistici di sintesi.

Nella maggioranza delle aree di parcheggio si riscontra che la sosta ha mediamente una durata che supera le 8 ore (Tabella 6), cosa che ci si può aspettare dal fenomeno del Park & Ride, prettamente utilizzato per spostamenti di natura sistematica del tipo casa-lavoro. A titolo di esempio si sono riportati dei grafici per il parcheggio di Magliana. Nel primo grafico (Figura 18), che riporta la distribuzione delle soste relative all'intera giornata, vediamo che le soste con durata maggiore di 8 ore sono il 66% del totale, mentre nel secondo grafico (Figura 19), che riguarda solamente l'intervallo di tempo che va dalle ore 06:00 alle ore 11:00, queste costituiscono il 70% del totale.



**Figura 18. Distribuzione dei tempi di sosta dell'area di parcheggio di Magliana sull'intera giornata.**

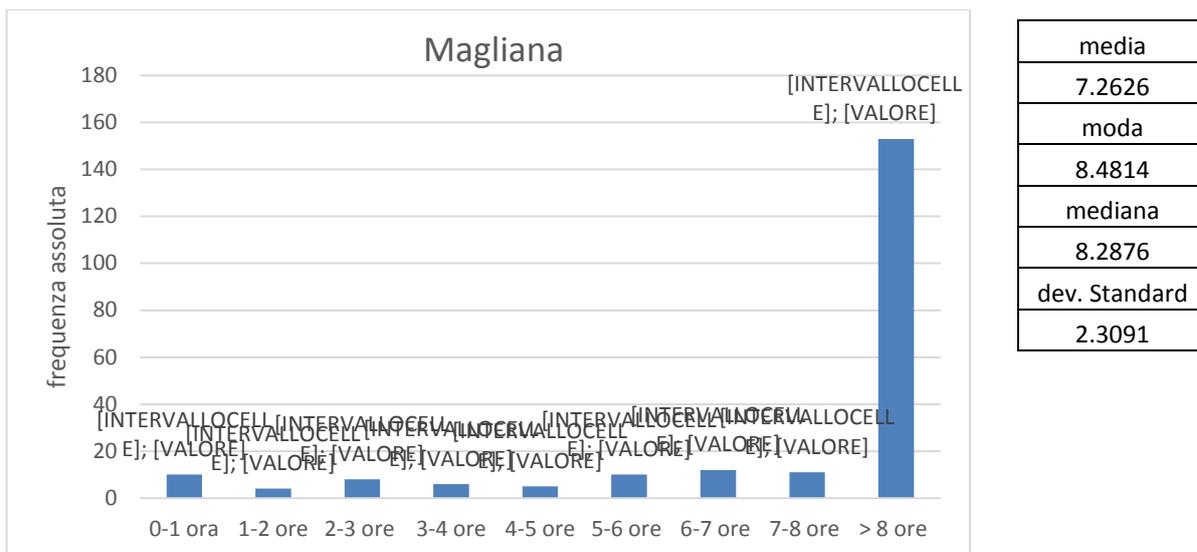
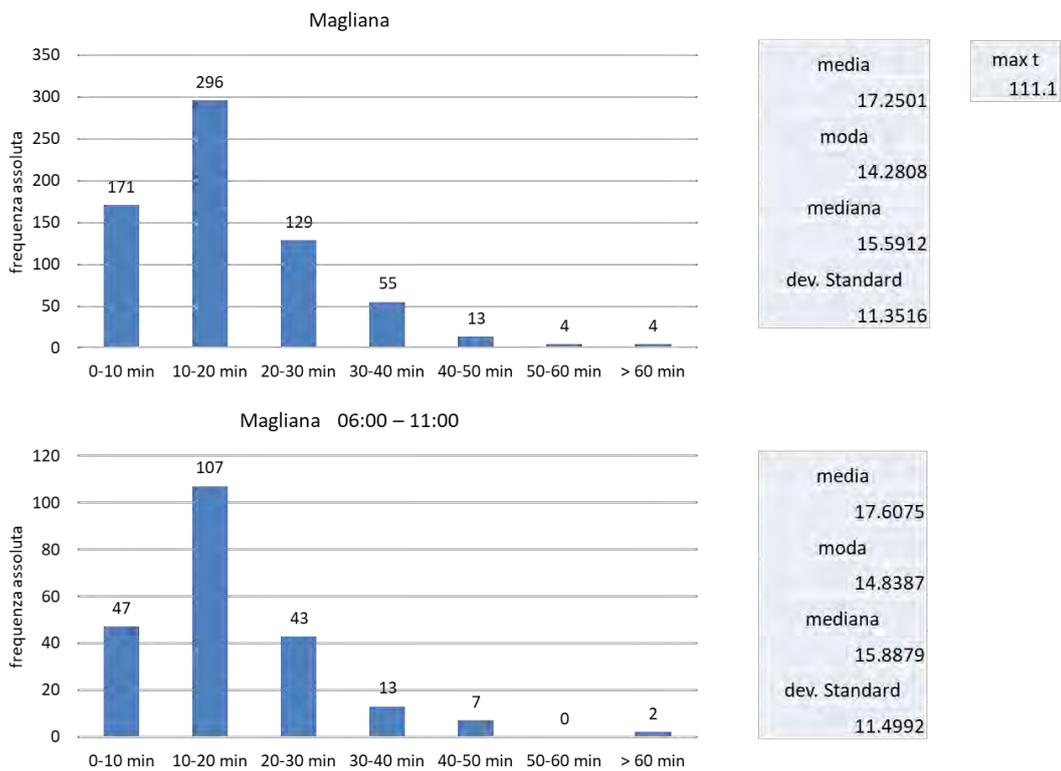


Figura 19. Distribuzione dei tempi di sosta dell’area di parcheggio di Magliana nell’intervallo 06:00-11:00.

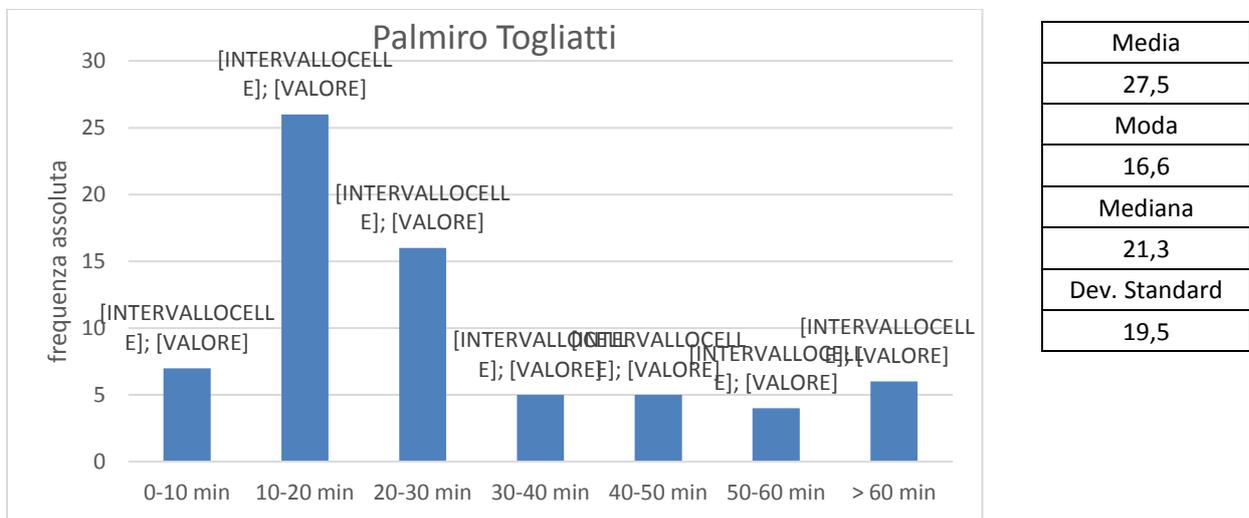
Per quanto riguarda la distribuzione dei tempi di percorrenza dall’origine ai parcheggi sono state individuate 7 classi, tra queste le prime sei hanno un’ampiezza di 10 minuti mentre l’ultima classe raggruppa tutti i viaggi con un tempo di percorrenza superiore ai 60 minuti.

- Classe 1: tempo di percorrenza <= 10 minuti
- Classe 2: 10 minuti < tempo di percorrenza < 20 minuti
- Classe 3: 20 minuti < tempo di percorrenza < 30 minuti
- Classe 4: 30 minuti < tempo di percorrenza < 40 minuti
- Classe 5: 40 minuti < tempo di percorrenza < 50 minuti
- Classe 6: 50 minuti < tempo di percorrenza < 60 minuti
- Classe 7: tempo di percorrenza > 60 minuti

Per ogni area di parcheggio è stata calcolata la distribuzione in classi ed i relativi indici statistici di sintesi. Nell’esempio di Magliana (Figura 20), ripetuto in questo caso come nel precedente, sia per l’intera giornata che per gli spostamenti nella fascia di punta mattutina, ci si trova su una media di 17 minuti per spostamento. Per altri parcheggi, tali tempi possono aumentare arrivando anche, come nel caso di Palmiro Togliatti a valori medi di 30 minuti (Figura 21). Si riscontra in generale una forte variabilità tra i valori dei tempi medi di accesso alle diverse aree di parcheggio, con un valore massimo pari a circa 60 minuti, registrato per l’area di parcheggio di Ponte Mammolo 1, e un valore minimo pari a 10 minuti, corrispondente all’area di parcheggio La Giustiniana. Considerando complessivamente le 40 aree di parcheggio è stato calcolato un tempo medio di accesso pari a 24 minuti ed una deviazione standard pari a 12 minuti (Tabella 6).



**Figura 20. Distribuzione dei tempi di accesso all'area di parcheggio Magliana per l'intera giornata e per spostamenti nell'intervallo 06:00-11:00.**



**Figura 21. Distribuzione dei tempi di accesso all'area di parcheggio P.Togliatti nell'intervallo 06:00-11:00.**

Per quanto riguarda infine la distribuzione delle distanze percorse dall'origine ai parcheggi sono state individuate 5 classi, tra queste le prime quattro hanno un'ampiezza di 5 chilometri mentre l'ultima classe raggruppa tutti gli spostamenti tra origine e parcheggio in cui è stata percorsa una distanza superiore ai 20 chilometri.

- Classe 1: distanza percorsa  $\leq 5$  km;
- Classe 2:  $5 \text{ km} < \text{distanza percorsa} < 10 \text{ km}$ ;
- Classe 3:  $10 \text{ km} < \text{distanza percorsa} < 15 \text{ km}$ ;
- Classe 4:  $15 \text{ km} < \text{distanza percorsa} < 20 \text{ km}$ ;

- Classe 5: distanza percorsa > 20 km.

Per ogni area di parcheggio è stata calcolata la distribuzione in classi ed i relativi indici statistici di sintesi. Tali distribuzioni mostrano ovviamente delle caratteristiche proprie del singolo parcheggio e relative ai bacini di origine abbracciati dalla singola area in funzione anche delle destinazioni che il sistema di trasporto collettivo permette di raggiungere a partire dall'area di parcheggio stessa.

Ad esempio le distribuzioni delle classi di distanza di Magliana (Figura 22) mostrano delle differenze all'interno delle diverse fasce orarie, mentre ci sono aree di parcheggio (come il caso di Ponte Mammolo 1, Figura 23, Figura 24) in cui la distanza percorsa non mostra mediamente variazioni all'interno della giornata.

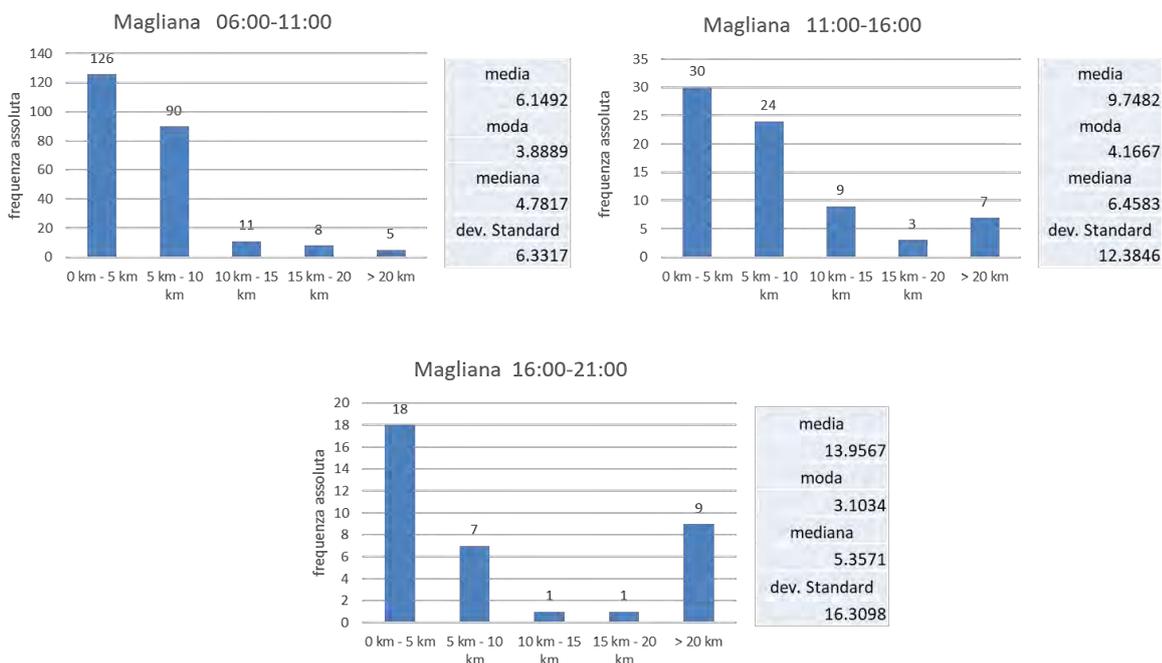


Figura 22. Distribuzione delle distanze di accesso all'area di parcheggio Magliana nelle varie fasce temporali.

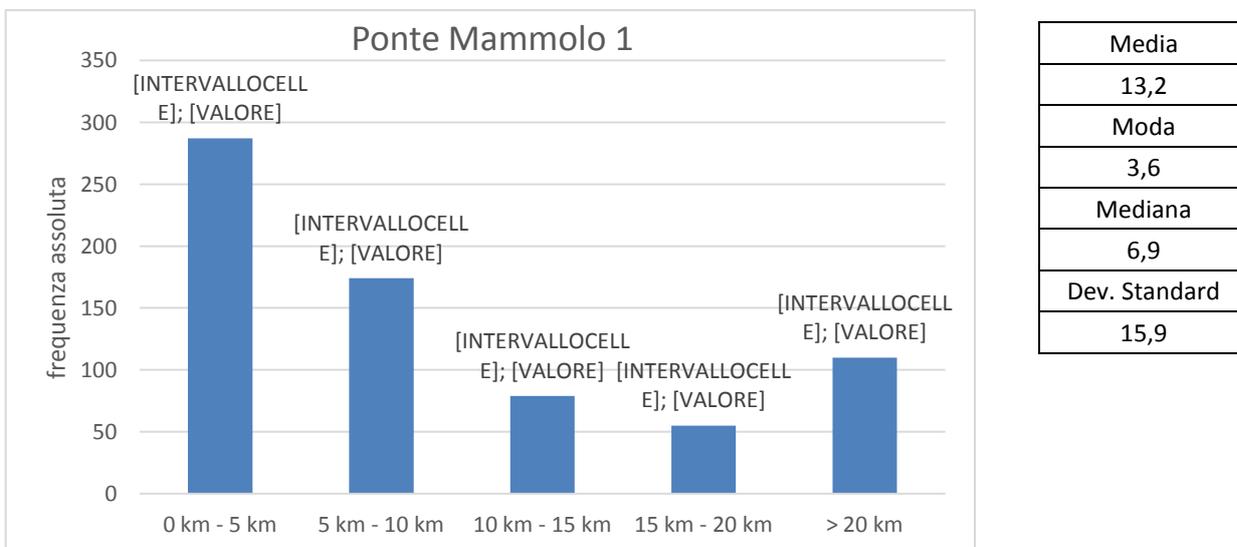
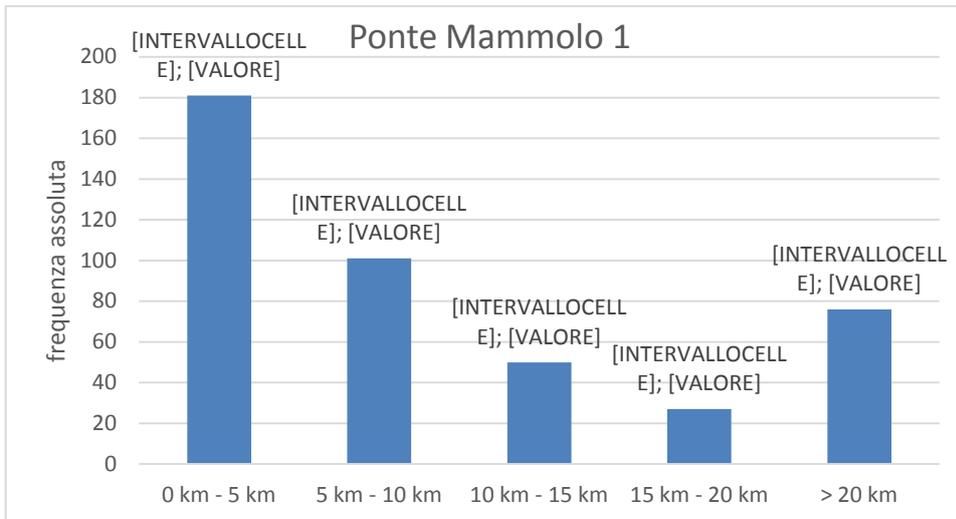


Figura 23. Distribuzione delle distanze di accesso all'area di parcheggio Ponte Mammolo 1 sull'intera giornata.



Media	13,8
Moda	3,5
Mediana	6,8
Dev. Standard	16,6

**Figura 24. Distribuzione delle distanze di accesso all'area di parcheggio Ponte Mammolo 1 nell'intervallo 06:00-11:00.**

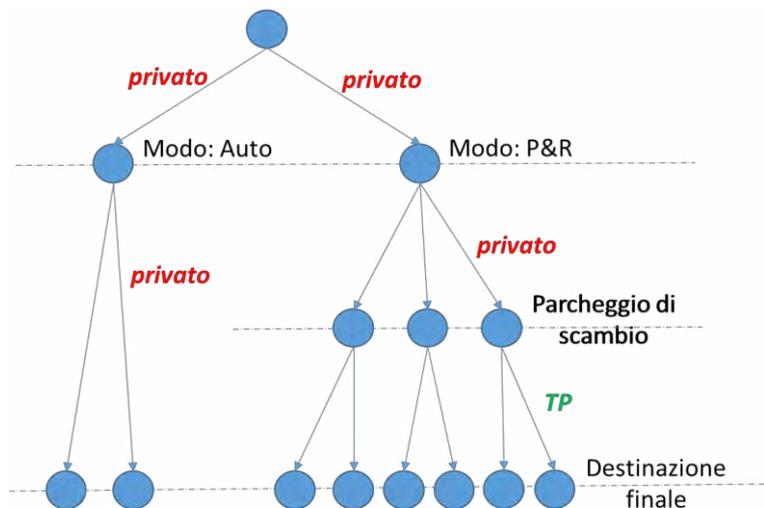
**Tabella 6. Valori medi del tempo di sosta, tempo di accesso e distanza di accesso per ogni area di parcheggio.**

Area di parcheggio	Valori medi nell'intervallo 06:00-11:00		
	t medio di sosta [ore]	t medio di accesso [minuti]	Distanza media di accesso [km]
Anagnina	6,3	31,1	12,4
Arco di Travertino	4,9	19,7	8,4
Auditorium	8,3	28,9	10,7
Battistini	8,9	27,7	7,3
Cipro	4,8	32,0	12,9
Elio Rufino	4,9	28,2	12,8
Magliana	9,0	17,6	6,1
La Giustiniana	4,6	10,0	5,3
La Storta	9,3	12,9	8,3
Laurentina	8,0	22,7	9,0
Montebello	7,7	23,8	16,5
Stazione Nomentana	5,4	15,6	4,3
Nuovo Salario	7,2	11,1	3,4
Palmiro Togliatti	4,6	27,5	14,6
Partigiani	5,0	49,9	17,2
Rebibbia	4,1	22,9	8,8
S.M. del Soccorso	8,6	17,4	7,3
Stazione S. Pietro	6,3	52,5	24,7
Saxa Rubra	7,2	28,1	25,4
Stazione Tiburtina	3,7	37,2	15,9
Trastevere	5,4	30,9	14,6
Villa Bonelli	2,1	16,3	6,3
Vitinia	4,3	17,0	11,1
Cinecittà	8,1	30,8	13,3
Monte Mario	2,1	23,3	6,4
Casal Bernocchi	4,9	13,8	6,0
Tor di Valle	5,0	13,2	6,3
Gemelli	3,0	49,4	27,1
Olgiate	5,6	14,6	9,2
Cesano	5,9	19,8	12,9
Ipogeo degli Ottavi	6,5	10,5	9,6
Fidene	3,5	19,2	13,3
Ostia Antica	8,9	14,5	4,3
Ostia Stella Polare	4,7	14,1	8,8
Stazione Trastevere	2,2	21,9	8,9
La Celsa	7,1	18,2	10,2
Labaro	9,0	20,9	10,8
Ostiense ad. Magliana	7,1	29,7	18,0
Ponte Mammolo 1	7,9	60,3	13,8
Ponte Mammolo 2	7,6	22,2	10,0

## 2.4 Modello multimodale per i veicoli elettrici: elementi teorici

Obiettivo del modello multimodale è quello di valutare l'eventuale incremento (o decremento) della quota di utenti che effettua l'interscambio tra modalità di trasporto privata elettrica e modalità di trasporto pubblico in funzione delle caratteristiche della rete di trasporto e di opportuni incentivi economici. In uno scenario futuro in cui il tasso di penetrazione dei veicoli elettrici sia di fatto superiore a quello dei veicoli tradizionali, si configura una situazione sulla rete di trasporto che vede sì la riduzione delle emissioni inquinanti ma non la riduzione delle vetture circolanti. In tale scenario, gli enti locali dovranno intervenire con opportune politiche di congestion pricing e contestuale miglioramento del sistema di trasporto collettivo al fine di limitare il superamento delle condizioni di sovrassaturazione della rete. Unitamente a questo, è possibile pensare ad opportuni incentivi quali sconti sulla tariffa del trasporto collettivo e sconti in bolletta per favorire lo stop dei veicoli elettrici presso i parcheggi di scambio ed il passaggio alla rete metropolitana o alla ferroviaria urbana.

Tutti questi elementi saranno colti all'interno del modello qui proposto seguendo una struttura ad albero (Figura 25) mirata a comprendere al meglio le scelte possibili che possono essere effettuate dall'utente: si parte dal nodo radice, l'origine dello spostamento, in cui l'utente deve dapprima scegliere tra la modalità Auto, i.e. raggiungere la destinazione con la propria autovettura elettrica, e la modalità Park & Ride, i.e. raggiungere il parcheggio di scambio con la propria autovettura elettrica per poi effettuare il cambio modale verso il sistema di trasporto pubblico.



**Figura 25. Rappresentazione dell'iter di spostamento dell'utente nel caso di utilizzo del solo mezzo privato o di scambio privato-pubblico presso i parcheggi di Park & Ride**

La fase iniziale del modello (Figura 26) prevede la scelta della modalità di trasporto per effettuare lo spostamento (Auto o Park & Ride). Si è stabilito in tale fase di lavorare utilizzando variabili aggregate per incrementare l'affidabilità dei dati derivanti da FCD all'interno del processo di calibrazione. In particolare si è scelto di determinare la relazione intercorrente tra quota di spostamenti di Park & Ride e variabili esplicative del fenomeno.

Ciò che si vuole determinare è dunque una relazione del tipo:

$$(G_0^{\text{Park}} / G_0) |_{Dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{per ogni } Dt \quad (1)$$

con

$G_0^{\text{Park}} / G_0$  la quota di spostamenti emessi dalla zona di origine e che effettua Park & Ride nell'intervallo di tempo  $Dt$ ;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  le variabili esplicative del fenomeno (variabili indipendenti), possono o meno essere riferite all'intervallo temporale  $\Delta t$  a seconda che esista o meno una variabilità temporale della singola  $x$ ;  $f$  funzione da calibrare.

Per calibrare la  $f$  è necessario dapprima definire le variabili  $x$ . Tra le variabili indipendenti ci si aspetta di trovare informazioni circa l'accessibilità ai parcheggi di scambio e le caratteristiche dell'offerta di trasporto pubblico, così come, per quanto detto in precedenza, dovranno far parte del modello variabili in grado di descrivere eventuali politiche di tariffazione in destinazione o incentivi per i veicoli elettrici. Le prime informazioni possono essere desunte da quelle che sono le attuali caratteristiche della rete (sia privata che di trasporto pubblico) e dunque conoscendo la quota di spostamenti  $G_0^{\text{Park}} / G_0$  tramite dato FCD, è possibile calibrare una funzione allo stato attuale per ogni  $\Delta t$ . La parte di incentivazione tariffaria per i veicoli elettrici verrà invece modellizzata a parte e poi inglobata all'interno della struttura (1). Questo in quanto allo stato attuale non si hanno a disposizione dati da monitoraggio di veicoli elettrici (dato il basso tasso di penetrazione), né tantomeno informazioni circa comportamenti multimodali dei veicoli elettrici su cui poter effettuare una successiva validazione della  $f$ .

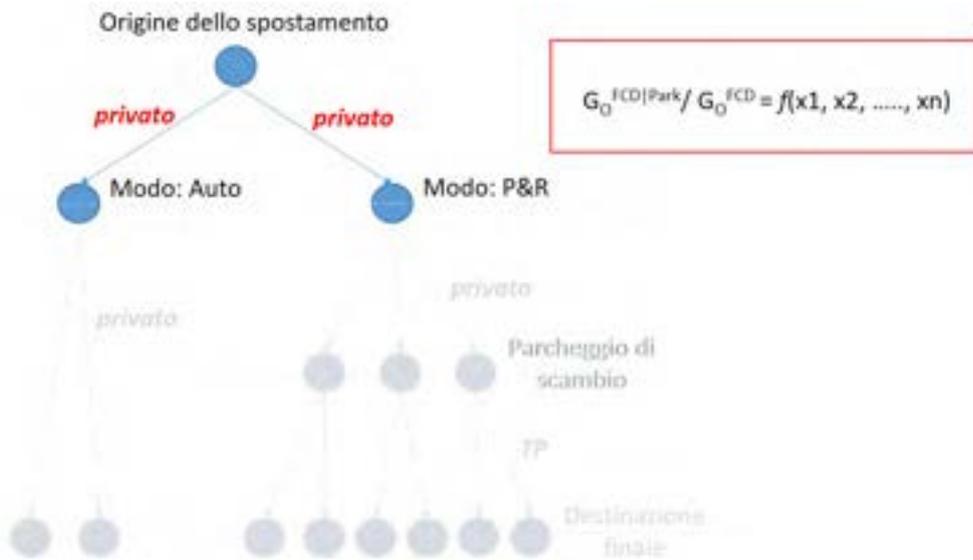


Figura 26. Prima fase modellistica: scelta tra privato e Park & Ride.

Si riportano di seguito le variabili indipendenti considerate e che dovranno essere in grado, successivamente alla calibrazione del modello, di fornire una stima della quota di Park & Ride per ogni origine e per ogni intervallo temporale. Queste sono state suddivise in variabili funzione sia delle origini che dell'intervallo temporale, variabili funzione delle sole origini e variabili funzione dei soli intervalli temporali.

Variabili indipendenti funzione sia dell'origine che dell'intervallo temporale:

$$x_1 = (\sum_{P \in O} t_{OP} f_{OP}) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) = (\sum_{P \in O} t_{OP} f_{OP}) / G_0^{\text{FCD}|\text{Park}} \text{ per ogni } o, \text{ per ogni } \Delta t \quad (2)$$

Con:

$t_{OP}$  = tempo medio di percorrenza origine-parcheggio tramite mezzo privato nell'intervallo  $\Delta t$  considerato, come desunto da dato FCD;

$f_{OP}$  = flusso FCD origine-parcheggio nell'intervallo  $\Delta t$  considerato;

$G_o^{FCD|Park}$  = numero di spostamenti FCD emessi dall'origine e che effettuano Park & Ride nell'intervallo Dt considerato

La prima variabile di input calcolata rappresenta un'impedenza sul trasporto privato, dunque un tempo medio di accesso ai parcheggi appartenenti al bacino dell'origine pesato per gli effettivi flussi origine (o) parcheggio (p).

L'ipotesi alla base è che all'aumentare dei tempi di accesso tramite mezzo privato ai parcheggi del bacino, ovvero ai parcheggi per cui esiste un flusso FCD non nullo in arrivo, la propensione ad effettuare Park & Ride diminuisca; oltretutto pesare i tempi origine-parcheggio per i flussi origine -parcheggio implica che i tempi in cui sono stati rilevati flussi FCD maggiori incidano in maniera più consistente sul risultato finale della variabile.

$$x2 = (\sum_{P \in O} t_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) = (\sum_{P \in O} t_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / G_o^{FCD|Park} \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (3)$$

Con:

$t_{P \rightarrow *}^{TP}$  = tempo medio di raggiungimento di tutte le destinazioni dell'area di studio tramite trasporto pubblico a partire dal parcheggio p nell'intervallo di tempo Dt;

La seconda variabile riportata rappresenta un'impedenza del trasporto pubblico come tempo medio di viaggio dai parcheggi del bacino di origine a tutte le destinazioni pesato per i flussi che accedono ai parcheggi del bacino di o.

L'ipotesi è che in caso di scarso collegamento del parcheggio con tutte le possibili destinazioni tramite rete di trasporto pubblico, l'utenza sarà portata a proseguire con il mezzo privato. Per di più tali tempi di collegamento da parcheggio a destinazione sono pesati per il flusso afferente a quel parcheggio per tener conto di una differente domanda ai parcheggi del bacino.

Viene definita una variabile analoga a x2, che qui sarà denominata x2\_bis e che a differenza della precedente inserisce, al posto del tempo medio di raggiungimento di tutte le destinazioni, il numero medio di cambi di mezzi di trasporto collettivo ( $m_{P \rightarrow *}^{TP}$ ) a partire dal parcheggio p nell'intervallo di tempo Dt:

$$x2\_bis = (\sum_{P \in O} m_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) = (\sum_{P \in O} m_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / G_o^{FCD|Park} \text{ per ogni o, per ogni Dt}$$

$$x3 = (\sum_D f_{OD} ((\sum_{P \in O} t_{PD}) / n_{P \in O})) / G_o^{FCD} \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (4)$$

con:

$f_{OD}$  = flusso FCD origine-destinazione nell'intervallo Dt considerato;

$t_{PD}$  = tempo di viaggio tramite sistema di trasporto collettivo parcheggio-destinazione nell'intervallo Dt considerato

$n_p$  = numero di parcheggi appartenenti all'origine o

$G_o^{FCD}$  = numero di spostamenti FCD emessi dall'origine nell'intervallo Dt considerato

La terza variabile riportata rappresenta sempre un'impedenza del trasporto pubblico ma in questo caso i tempi sul trasporto collettivo relativi all'accessibilità passiva della singola destinazione vengono ad essere pesati per i flussi veicolari che necessitano di raggiungere la destinazione. Dunque laddove c'è una maggiore domanda in destinazione, è richiesta una maggiore accessibilità del sistema di trasporto collettivo per far sì che l'opzione Park & Ride possa essere vantaggiosa.

Viene definita una variabile analoga a x3, che qui sarà denominata x3\_bis e che a differenza della precedente inserisce al posto del tempo parcheggio-destinazione, il numero medio di cambi di mezzi di trasporto collettivo ( $m_{PD}$ ) da p a d nell'intervallo di tempo Dt:

$$x3\_bis = (\sum_D f_{OD} ((\sum_{P \in O} m_{PD}) / n_{P \in O})) / G_o^{FCD} \text{ per ogni o, per ogni Dt}$$

$$x4 = \sum_D (t_{OD} - (\sum_{P \in O} (t_{OP} + t_{PD}) / n_{P \in O})) \text{ per ogni } o, \text{ per ogni } Dt \quad (5)$$

con:

$t_{OD}$  = tempo di viaggio origine-destinazione da FCD nell'intervallo Dt considerato

La variabile x4 rappresenta il beneficio temporale che l'utente può avere in seguito all'adozione della modalità Park & Ride qualora il tempo complessivo, somma della quota di accesso al parcheggio più il tempo con il trasporto collettivo sino a destinazione, sia inferiore al tempo richiesto per andare dall'origine alla destinazione con il mezzo di trasporto privato.

Chiaramente da questa variabile ci si aspetta principalmente valori negativi, dati i tempi aggiuntivi di attesa e trasbordo dovuti all'utilizzo dei mezzi pubblici.

$$x5 = (\sum_{P \in O} r_P) / n_{P \in O} \text{ per ogni } o, \text{ per ogni } Dt \quad (6)$$

con

$r_P$  = riempimento del parcheggio p nell'intervallo temporale Dt

la variabile x5 rappresenta il riempimento medio dei parcheggi appartenenti al bacino dell'origine o. Questa variabile ha una doppia valenza: per bassi valori di riempimento nei periodi antecedenti al periodo di punta l'utenza sarà invogliata alla modalità Park & Ride, mentre alti valori di riempimento nei periodi successivi al periodo di punta indicano un forte utilizzo dei parcheggi e scoraggiano l'utente ad effettuare Park & Ride per mancanza di stalli di sosta a disposizione.

Variabili indipendenti funzione solamente dell'origine e non dell'intervallo temporale

La variabile x6 è la prima dell'insieme delle variabili che sono funzione solamente delle origini e non degli intervalli temporali e rappresenta l'estensione geografica della zona di origine espressa in km<sup>2</sup> (Figura 27).



Figura 27. Estensione delle zone (x6).

La variabile x7 rappresenta la densità abitativa delle zone di origine in esame. Al numeratore del rapporto Popolazione/Area sono compresi solo gli utenti con età tra i 19 e i 70 anni, poiché potenziali utenti della modalità Park & Ride (patentati e occupati).

La distribuzione dei valori di x7 sul territorio provinciale è visibile nella seguente figura:

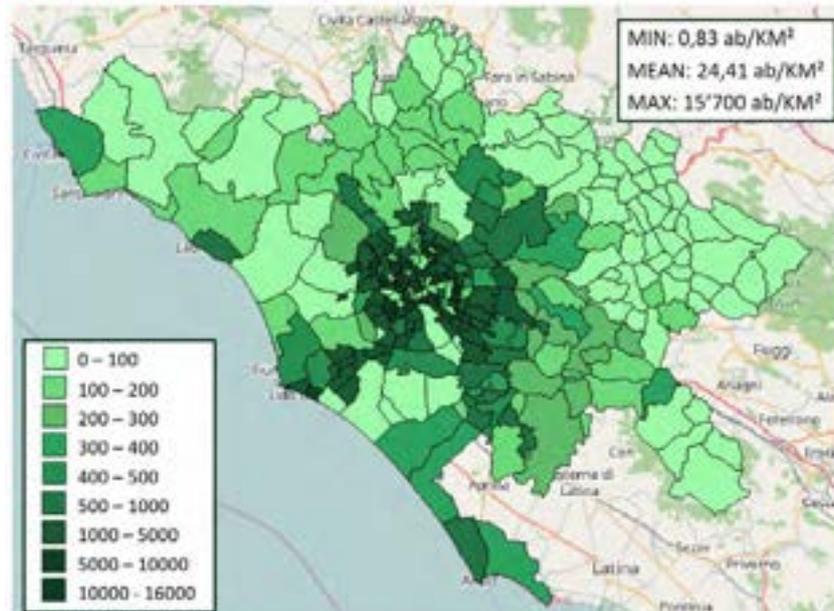


Figura 28. Densità abitativa (x7).

La variabile x8 (Figura 29) è una variabile binaria che vale 1 se l'origine è compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare, 0 altrimenti. L'ipotesi alla base è che, data la struttura prettamente radiocentrica degli spostamenti sistematici diretti a Roma nonché della rete metropolitana esistente, gli utenti che risiedono nelle aree periferiche (fuori il raccordo) e che sopportano distanze e tempi di spostamento più elevati, siano anche i più predisposti all'utilizzo della modalità Park & Ride.



Figura 29. Localizzazione delle zone (x8).

La variabile x9 (Figura 30) rappresenta il numero di stazioni ferroviarie urbane e di stazioni di metropolitana presenti nell'origine. Ci si aspetta che maggiore sia il numero di stazioni presenti nell'origine, più gli utenti

residenti abbiano una maggiore propensione ad effettuare il percorso origine - destinazione interamente con la modalità trasporto pubblico.

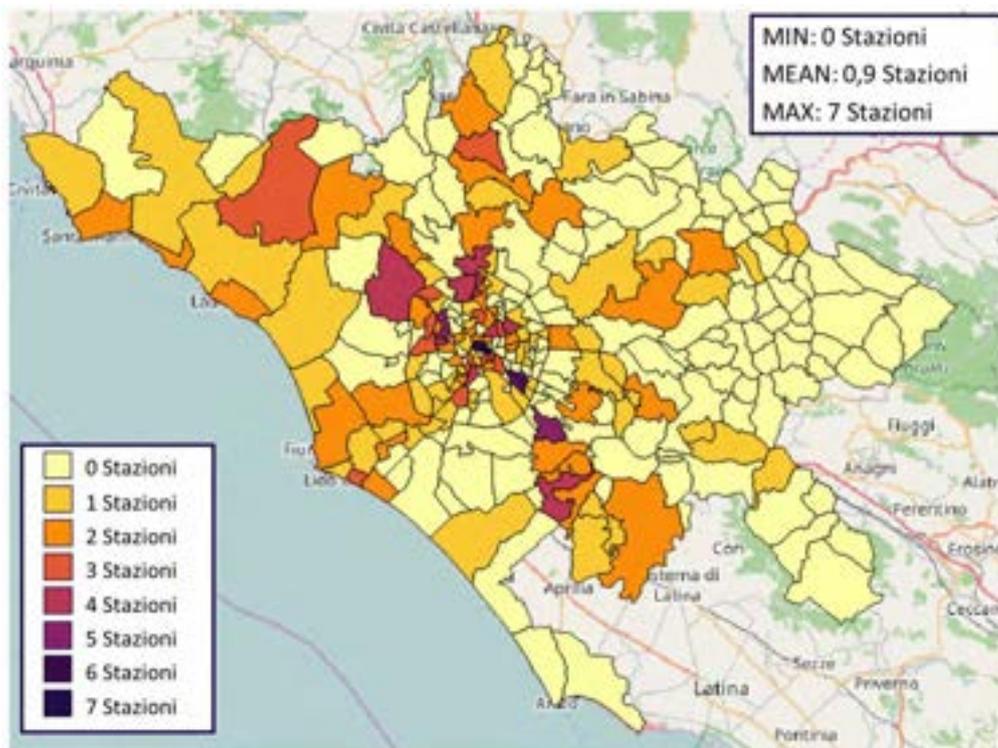


Figura 30. Numero stazioni metro/ferro (x9).

Variabili indipendenti funzione solamente dell'intervallo temporale e non dell'origine

L'ultima variabile considerata, x10, è una variabile binaria (dummy) ed è funzione solamente dell'intervallo temporale e non delle origini. Rappresenta infatti la distinzione tra periodo di punta (6:00 – 11:00) e periodo di morbida (4:00 – 6:00 e 11:00 – 24:00). Ci si aspetta infatti che gli utenti abituali della modalità Park & Ride siano quelli che la utilizzano per recarsi al posto di lavoro, per cui considerando i lavoratori full-time, la fascia di punta è stata identificata la mattina tra le ore 6:00 e le ore 11:00.

Non essendo nota a priori la forma funzionale del modello  $f$  in (1), né quale delle suddette variabili possa incidere maggiormente nell'incremento/decremento della quota di Park & Ride, si è deciso di adottare una specifica tecnica di Machine Learning (ML) per l'individuazione di  $f$ , denominata Random Forest.

Le tecniche ML sono tecniche non parametriche [8], ovvero non vincolate da una forma funzionale e libere da qualsiasi tipo di assunzione a priori di distribuzione statistica. L'idea alla base delle ML è quella di replicare il processo di apprendimento mirato all'esecuzione di un compito, riuscendo ad effettuare decisioni e predizioni basate sui dati che si hanno a disposizione.

Esistono diversi approcci pratici per l'applicazione di algoritmi di ML; tra i principali:

- Albero delle decisioni: utilizza un albero delle decisioni, ovvero un grafo ad albero, come modello predittivo per indicare delle decisioni e le loro possibili conseguenze;
- Reti neurali artificiali: tramite una rete neurale artificiale si possono utilizzare algoritmi di apprendimento ispirati alla struttura di una rete neurale biologica. Le strutture sono formate da gruppi di neuroni artificiali interconnessi tra loro, utilizzati per la computazione. Per reti neurali artificiali multi-strato si parla anche di apprendimento approfondito (deep learning), rivelatosi efficace per applicazioni di riconoscimento vocale e "computer vision";

- Algoritmi genetici: ricerca euristica che simula il processo di selezione naturale in cui una popolazione di individui (candidati come soluzione ad un problema di ottimizzazione) viene evoluta per il raggiungimento della soluzione migliore. Tramite un processo iterativo, le proprietà della popolazione vengono modificate e mutate; ad ogni iterazione (chiamata generazione) viene calcolata la loro idoneità alla soluzione sulla base della funzione obiettivo del problema. Gli individui più idonei vengono poi scelti per costituire la popolazione di partenza per l'iterazione successiva;
- Analisi dei gruppi (clustering): processo di raggruppamento di oggetti in modo che quelli inseriti nello stesso gruppo, chiamato appunto "cluster", siano più simili tra loro rispetto a quelli in altri gruppi. Questo risultato è ottenibile con molteplici algoritmi che differiscono tra loro nella nozione di cosa costituisce un "cluster" e come identificarli in maniera efficiente.

Nello specifico, verrà utilizzato un processo di apprendimento supervisionato denominato Random Forest in cui vengono presentati i dati di input e i risultati desiderati. Lo scopo è di apprendere una regola generale che colleghi i dati in ingresso con quelli in uscita.

Le Random Forest sono un metodo di apprendimento di insieme per la classificazione o la regressione che operano costruendo una moltitudine di alberi decisionali durante il periodo di addestramento e forniscono il risultato che è la modalità delle classi (nel caso della classificazione) o la previsione media (nel caso della regressione) dei singoli alberi.

Per fare un esempio esplicativo (*lectures from: <http://www.cs.ubc.ca/~nando/540-2013/lectures/l9.pdf>*), si considerino un insieme di punti su un piano cartesiano a cui ad ogni punto è associato un vettore di attributi, in questo caso una coppia  $(x_1, x_2)$  che rappresenta la posizione sul piano. Ogni punto può appartenere ad una di 4 classi distinte, Verde, Rosso, Giallo o Blu. Attraverso un albero decisionale è possibile classificare il dataset in maniera tale da riuscire a prevedere il colore di nuovi punti in funzione della loro posizione  $(x_1, x_2)$ .

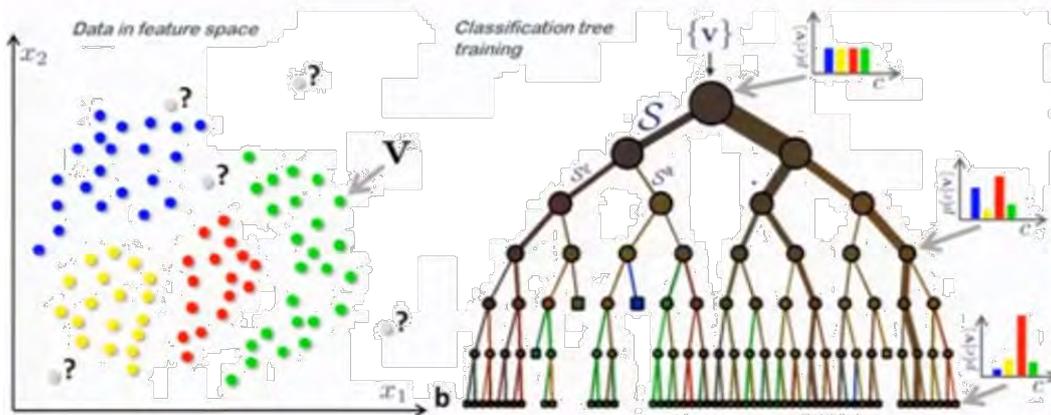


Figura 31. Esempio di classificazione tramite albero decisionale.

Il punto di partenza dell'albero decisionale (in questo caso Classification Tree, Figura 31) è la radice, ovvero l'insieme che comprende tutto il campione da analizzare in cui ogni classe ha probabilità  $p_{t(c|v)} = N_c/N_{tot}$  (la probabilità che il t-esimo albero scelga la classe c per l'elemento v). Ad ogni nodo a partire dalla radice l'algoritmo suddivide il campione in 2 sottoinsiemi  $S_t^L$  e  $S_t^D$  (tali che  $S_t = S_t^L \cup S_t^D$ ) in funzione di un attributo: ad esempio, posto un valore soglia di  $x_1^*$ , nel primo sottoinsieme ricadranno i punti con il valore di  $x_1 < x_1^*$  e nel secondo quelli con  $x_1 \geq x_1^*$ . La scissione di ogni insieme avviene in modo tale da massimizzare la probabilità  $p_{t(c|v)}$  per classificare correttamente l'elemento e con il numero minimo di iterazioni.

La Random Forest (Figura 32) si ottiene combinando più alberi decisionali paralleli e mediando la probabilità ottenuta da ogni albero. Ogni albero è addestrato su una parte dei dati e sulla restante è convalidato (cosiddette fasi di training e di test).

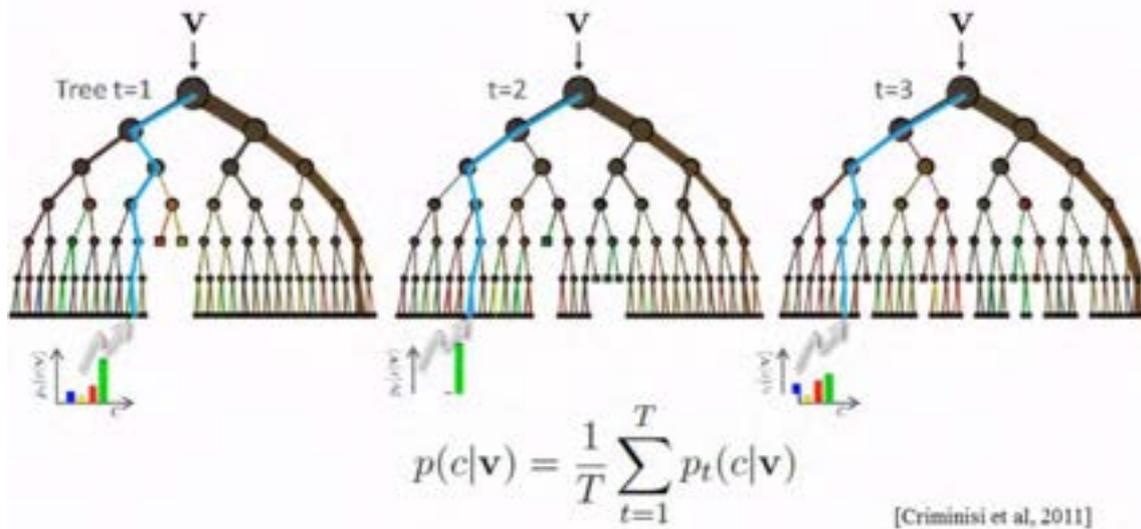
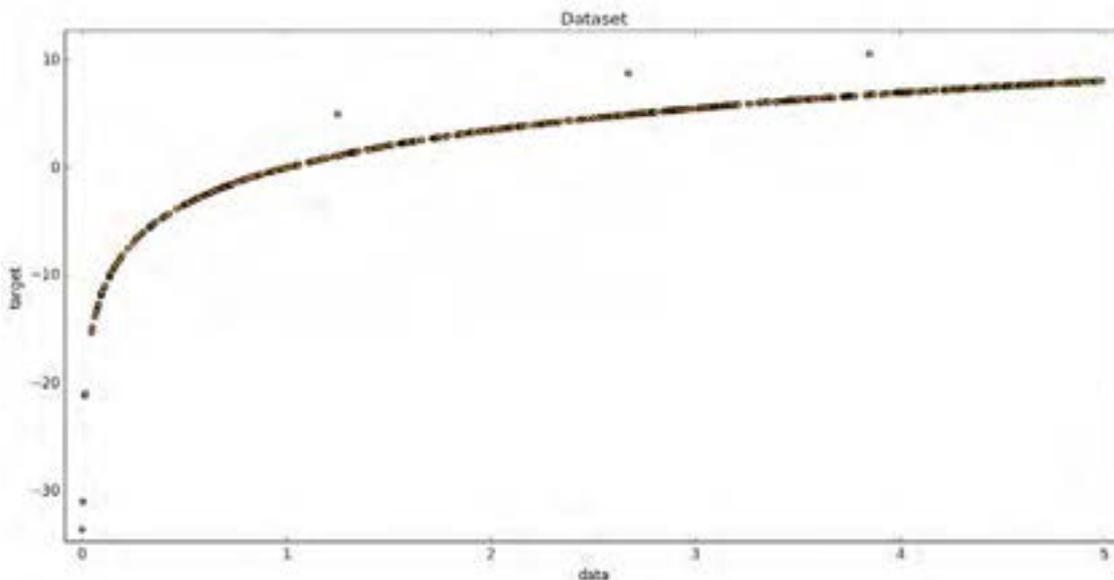


Figura 32. Random Forest.

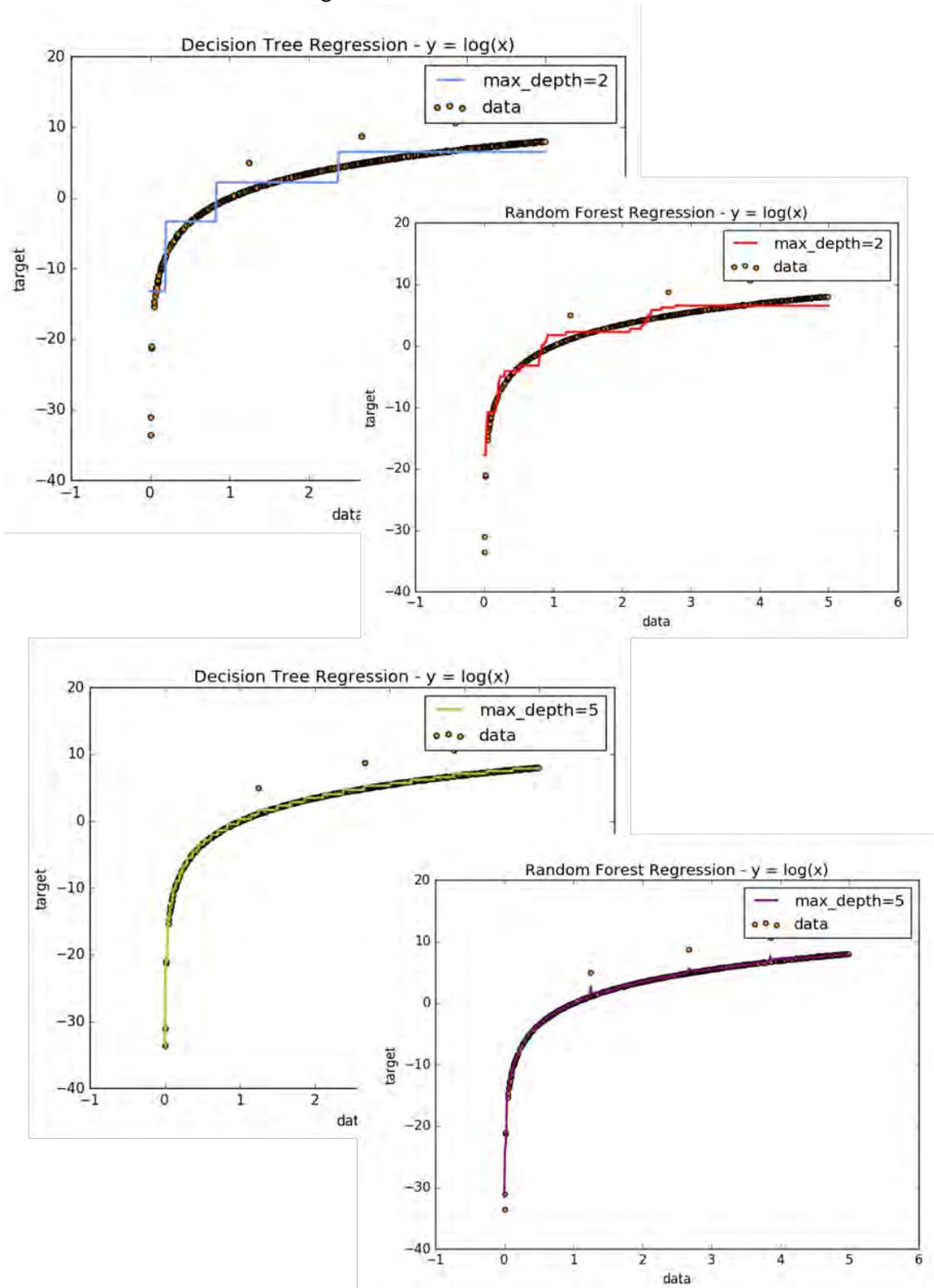
Al crescere del numero di alberi  $p_{(c|v)} \rightarrow p_{(c|v)^*}$  mentre al crescere della profondità degli alberi cresce la possibilità di andare in overfitting (eccessivo adattamento al campione).

Per evidenziare meglio la differenza tra Decision Tree e Random Forest è stata effettuata una comparazione dei 2 metodi a livello numerico (*source code*: <https://github.com/>). È stato creato un insieme di dati costituito da 500 coppie (x, y) il cui andamento può essere approssimato con una funzione  $y = \log(x)$ , ad eccezione di alcuni valori che possiamo considerare come “rumore” (Figura 33), e tale insieme di dati è stato sottoposto ad entrambe le tecniche al fine di stimare la risultante funzione.



**Figura 33. Dati per addestramento.**

I risultati ottenuti mostrano come l'albero decisionale definisca, a parità di parametri con la Random Forest (profondità dell'albero, "max\_depth"), una funzione a scalino, mentre la Random Forest meglio si adatta all'andamento dei dati (Figura 34). Incrementando il parametro di profondità, l'albero decisionale riesce ad adattarsi alla funzione pur mantenendo un trend a scalino, mentre la random forest presenta una funzione più definita ma con rischio di overfitting.



**Figura 34. Albero decisionale e random forest a confronto.**

Nel campo dell'ingegneria dei trasporti le tecniche degli alberi decisionali e delle RF vedono uno sviluppo in letteratura molto recente e dovuto all'incremento della disponibilità di dati di traffico ed al conseguente diffondersi di metodi data driven. Alcuni contributi in cui compare l'uso delle suddette tecniche ne vedono prevalentemente l'uso per la previsione dei tempi di percorrenza: [9] ha testato un Gradient Boosting Regression Tree (GBM) per la previsione dei tempi di percorrenza in ambito autostradale. [10] usa le RF per prevedere il flusso veicolare per diversi intervalli di previsione partendo da conteggi veicolari derivati da spire. [11] effettua previsioni di traffico nel breve periodo tramite RF utilizzando i dati di traffico e analizzandone dapprima la distribuzione tra periodi temporali di punta e non, addestrando quindi per i due periodi due differenti modelli. [12] ha utilizzato le RF per effettuare previsioni dei tempi di percorrenza a breve termine (6-30 minuti) basandosi su dati GPS relativi a solo l'1% dei veicoli circolanti (in ambiente di simulazione). Da questi dati ha ricavato alcune informazioni a livello aggregato che hanno poi alimentato la RF per le previsioni come il numero di veicoli in movimento e fermi nelle diverse aree e la velocità media lungo l'arco stradale.

Passando dalle previsioni dei tempi di percorrenza, all'uso delle RF per la previsione della domanda, i contributi in letteratura si riducono ulteriormente: [13] utilizza alberi decisionali e RF per riprodurre gli spostamenti individuali (a livello disaggregato) senza la necessità di riflettere i comportamenti individuali (metodologia adottata solitamente per modelli di domanda tour based o activity based). [14] utilizza RF per prevedere il numero di biciclette disponibili nelle stazioni di bike sharing. [15] utilizza RF e lo compara con metodi regressivi (autoregressive integrated moving Average, ARIMA, e support vector regression, SVR) per stimare la quota di domanda nel tempo e nello spazio relativa a quattro modalità di servizio di trasporto condiviso on-demand. Quest'ultimo caso, che risulta parzialmente analogo all'uso che si vuole fare in questo studio delle RF, determina che proprio le RF risultano la tecnica di ML migliore rispetto a quelle comparate per la previsione della domanda.

Una volta calibrata e validata la funzione  $f$  attraverso, da una parte le quote di Park & Ride desunte da dato FCD, dall'altra le variabili indipendenti precedentemente definite e calcolabili allo stato attuale, si ipotizza l'introduzione di una funzione aggiuntiva che lega l'eventuale aumento della quota di domanda di Park & Ride di veicoli elettrici a benefici economici a cui gli stessi possono essere soggetti tramite politiche di incentivazione nel medio/lungo periodo:

$$(G_o^{\text{Park}} / G_o) |_{Dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + l(\text{Beneficio } \text{€}) \quad (7)$$

Tale beneficio economico potrà derivare da eventuali sconti sul costo dell'abbonamento al sistema di trasporto collettivo, così come ad eventuali sconti sulla bolletta elettrica. In quest'ultimo caso di fatti, si ipotizza che i veicoli elettrici fermi nei parcheggi possano cedere parte della loro energia alla rete (schemi di Vehicle To Grid). Ciò deve ovviamente configurarsi in un pagamento di tale energia ceduta, o alternativamente in uno sconto sulla bolletta elettrica.

Per cui:

$$\text{Beneficio } \text{€} = g(\text{sconto costo TP; sconto sulla bolletta elettrica}) \quad (8)$$

Sconto sulla bolletta elettrica =  $e$ (distribuzione dei tempi di permanenza nei parcheggi del bacino della zona di origine, distribuzione delle distanze di accesso ai parcheggi del bacino della zona di origine)  $(9)$

La (9) evidenzia come il beneficio economico dovuto allo sconto sulla bolletta elettrica sia funzione di quanto i veicoli elettrici rimangano in sosta ai parcheggi e di quali siano le distanze percorse per accedere ai parcheggi stessi e per rientrare nel punto di origine. Si ricorda infatti che gli spostamenti di Park & Ride sono per loro natura prettamente spostamenti sistematici del tipo casa-lavoro. Dunque il singolo veicolo

elettrico, nell'ipotesi di ricarica notturna a casa, arriverà al parcheggio con un quantitativo di energia pari alla massima energia accumulata decurtata dell'energia necessaria a raggiungere il parcheggio stesso. Nel caso di schema Vehicle To Grid presso il parcheggio di scambio, al veicolo potrà essere prelevato un quantitativo di energia massima tale da assicurare un valore residuo necessario al rientro a casa, tenuto conto di un opportuno fattore di sicurezza.

A prescindere dal valore potenzialmente prelevabile di energia, il singolo utente sarà disposto a tale prelievo in funzione del quantitativo di sconto (ricavo) ottenibile.

Dunque la metodologia prevista per la valutazione dell'incremento  $I$  dovuto al beneficio sullo sconto in bolletta sarà:

- date le distanze medie di accesso (nonché di egresso) ai parcheggi del bacino dell'origine considerata:
  - a. si definisce una "forchetta" di energia prelevabile [kWh] nei parcheggi del bacino dell'origine nella fascia di punta mattutina (i parcheggi sono considerati a capacità e la (7) di conseguenza viene valutata per la sola  $Dt$  pari alla fascia di punta mattutina);
  - b. fissato il costo unitario dell'energia [€/kWh] e data l'energia prelevabile [kWh], si computa il beneficio economico complessivo ottenibile [€];
  - c. dato il beneficio economico ottenibile [€], si individua l'incremento potenziale di domanda ( $I$ ).

Mentre distanze medie di accesso, tempi medi di permanenza nei parcheggi sono tutte informazioni note da dato FCD (cfr. paragrafo 2.3), la curva che lega la variazione di domanda di veicoli elettrici che fanno Park & Ride al beneficio economico ottenibile non è nota né calibrabile in quanto il fenomeno non esiste allo stato attuale. Per superare tale limite, si opererà effettuando un'analogia con quella che è la variazione della domanda di energia (domestica o industriale) a variazioni dei costi dell'energia stessa.

## 2.5 Modello multimodale per i veicoli elettrici: calibrazione e validazione

Prima di avviare la calibrazione del modello (1) tramite Random Forest si è effettuata un'analisi delle singole variabili indipendenti e delle relazioni variabili dipendenti – variabili indipendenti al fine di effettuare un pre-filtraggio dei dati, eliminando eventuali outlier e fornendo un database quanto più pulito possibile al metodo di previsione.

Il database originario (dataset 1) era caratterizzato da 5540 righe (ogni riga comprende il valore della variabile dipendente – per ogni origine, per ognuna delle 20 ore considerate - e relative 12 variabili indipendenti). A questo si è operata una prima fase di filtraggio, come segue:

- Sono state eliminate le righe per cui  $G_o^{FCD}=0$ , in quanto ciò implica nessun flusso FCD monitorato in uscita dall'origine;
- Sono state eliminate le righe per cui  $G_o^{FCD|Park}=0$  in tutti e 20 gli intervalli temporali, in quanto ciò implica che non è stato monitorato alcun flusso in uscita dall'origine che fa Park & Ride;

Pervenendo al dataset 2 caratterizzato da 4488 righe.

Eliminando anche le righe per cui  $G_o^{FCD|Park}=0$  sul singolo intervallo orario, si perviene invece al dataset 3 caratterizzato da 2294 righe. Su quest'ultimo dataset, è stata effettuata un'analisi di correlazione tra le variabili (ad esclusione delle variabili binarie) tramite il calcolo del coefficiente di Pearson (Figura 35). Tale analisi mostra un'elevata correlazione tra le variabili x2 e x2 bis (ovvero le impedenze sul trasporto pubblico calcolate con i tempi nel primo caso e con i trasbordi nel secondo caso): ciò suggerisce l'alimentazione della Random Forest non con entrambe le variabili contemporaneamente.

	x1	x2	x2 bis	x3	x3 bis	x4	x5	x6	x7	x9
x1	1,00									
x2	-0,04	1,00								
x2 bis	0,03	0,82	1,00							
x3	0,26	0,07	0,14	1,00						
x3 bis	0,40	0,18	0,25	0,68	1,00					
x4	-0,48	-0,03	-0,07	-0,16	-0,33	1,00				
x5	0,06	-0,01	0,03	0,06	0,06	0,06	1,00			
x6	0,44	0,06	0,12	0,36	0,61	-0,23	0,04	1,00		
x7	-0,25	-0,11	-0,16	-0,36	-0,59	0,31	-0,06	-0,43	1,00	
x9	-0,07	-0,01	-0,04	-0,03	-0,07	0,20	-0,02	-0,03	0,23	1,00

Figura 35. Analisi di correlazione tra le variabili indipendenti nel dataset 3.

Le variabili x2 e x3 sono state comunque decurtate dal dataset da imputare alla Random Forest (così anche le loro analoghe x2 bis e x3 bis) in quanto le modalità di computo dei tempi di trasporto pubblico basate sugli open data non hanno permesso di calcolare i tempi di percorrenza per le relazioni in cui interveniva una zona esterna al Comune di Roma o in origine o in destinazione dello spostamento a causa della mancanza del dato esterno al Comune stesso. In prima battuta si è operato bloccando i tempi su trasporto pubblico in cui intervenivano relazioni con l'esterno ad una soglia di 4 ore (e per il numero di cambi pari a 5), considerata la massima durata temporale di uno spostamento (e massimo numero di cambi) con trasporto collettivo sul territorio provinciale, ma questo ha d'altra parte procurato uno schiacciamento dei valori degli indicatori attorno al valor medio e la mancanza di sensitività della quota di Park & Ride alle specifiche variabili indipendenti (Figura 36).

Si è invece deciso di mantenere per l'addestramento della Random Forest la variabile x4 che, pur contenendo i tempi su trasporto pubblico, presenta una maggiore variabilità legata alla differenza tra tali tempi ed i tempi su trasporto privato (Figura 37).

I tempi sul trasporto privato, ricavati da dato FCD, sembrano di fatti essere ben rappresentativi dei fenomeni in gioco: si noti ad esempio come la variabile x1 mostri un valor medio dell'impedenza legata alla fase di accesso ai parcheggi dell'ordine dei 20 minuti, perfettamente compatibile con quanto attiene al caso romano (Figura 38).

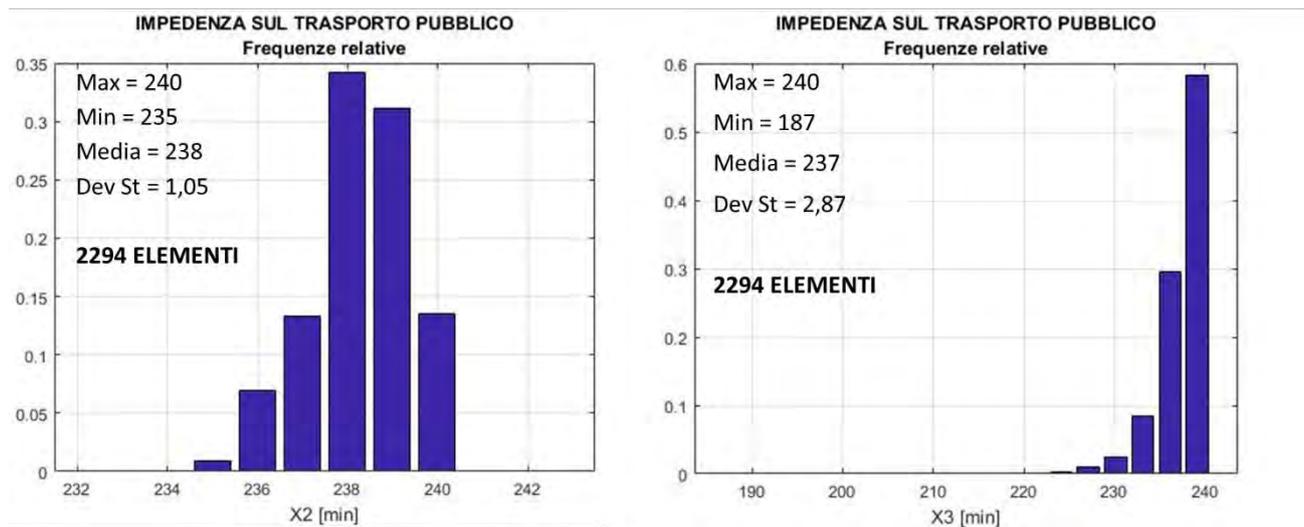


Figura 36. Distribuzione delle variabili x2 e x3 basate sui tempi del trasporto pubblico.

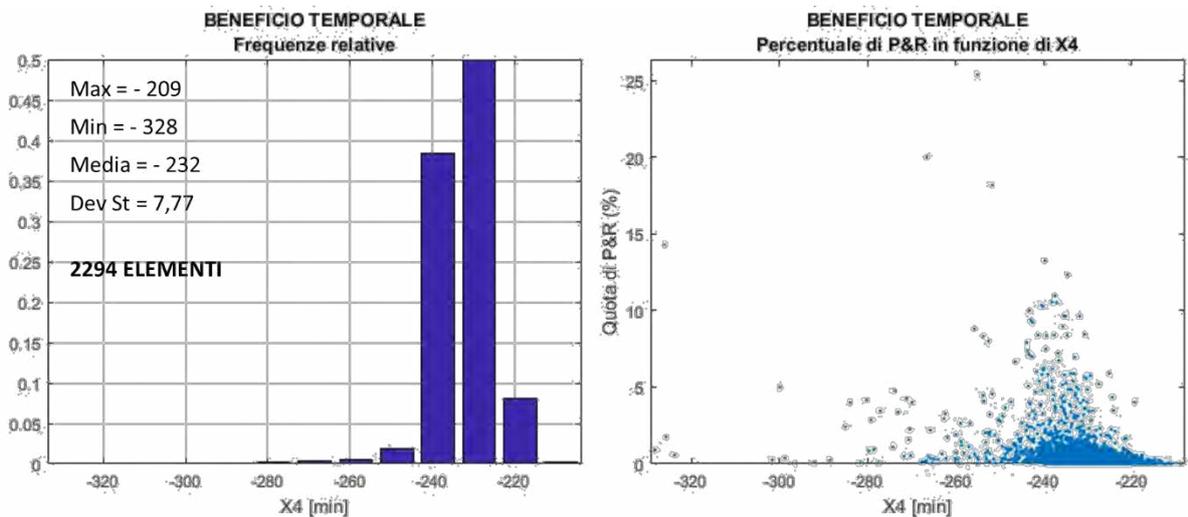


Figura 37. Distribuzione della variabile x4 e sua relazione con quota di Park & Ride da FCD.

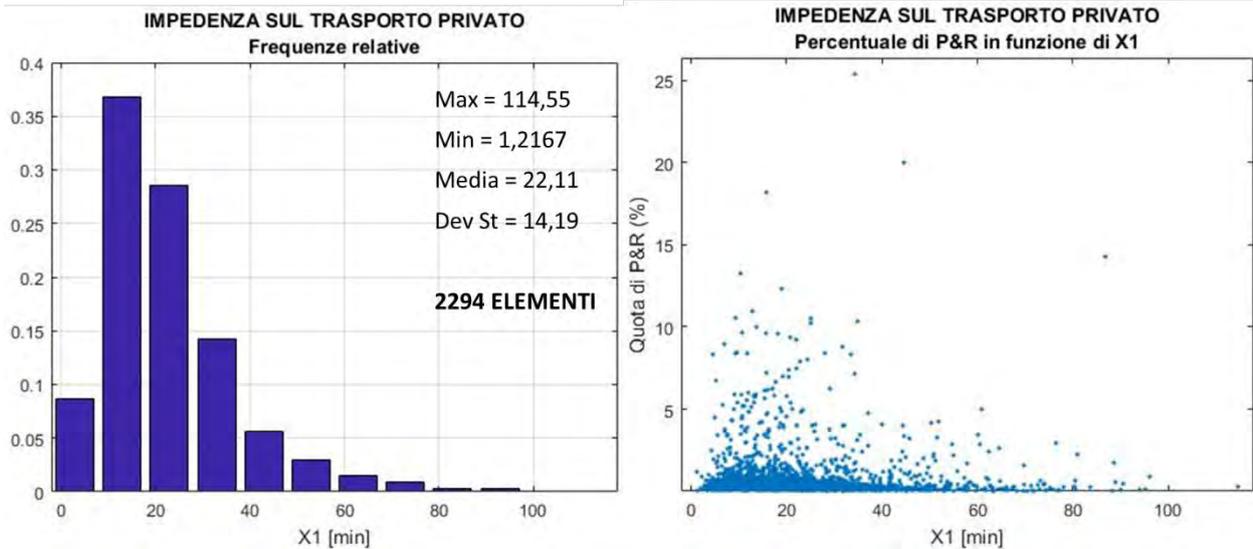


Figura 38. Distribuzione della variabile x1 e sua relazione con quota di Park & Ride da FCD.

L'ultima fase di filtraggio dei dati ha coinvolto l'eliminazione di specifici outlier sulle variabili x1, x4, x6, x7 in relazione al loro rapporto, non atteso o non in linea con quello di altre zone di origine ed intervallo temporale, con la quota di spostamenti di Park & Ride da FCD (Figura 39). In ultimo si è introdotta una soglia di quota di Park & Ride minima da passare in addestramento alla Random Forest pari allo 0,5%. Quote inferiori possono infatti essere risultato più di una scarsa attendibilità della rilevazione FCD che di una minore propensione alla modalità Park & Ride.

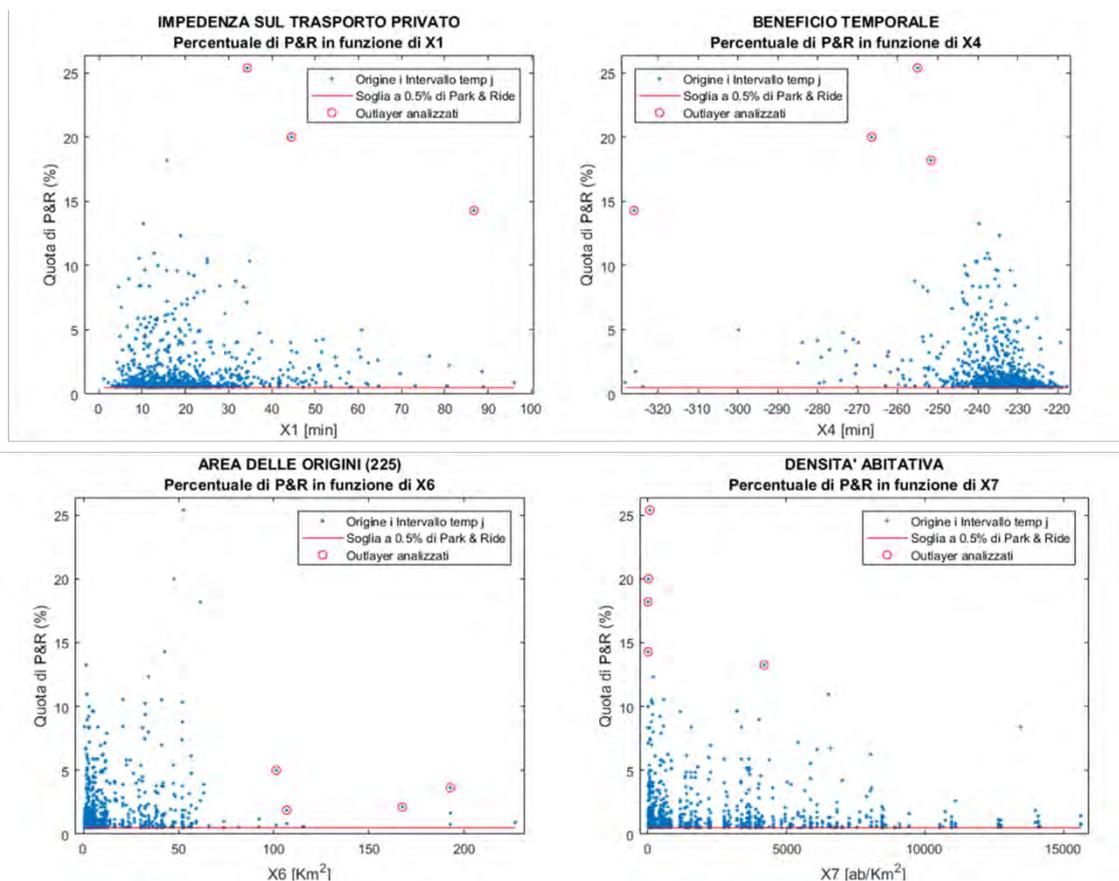


Figura 39. Outlayer e soglia quota minima Park & Ride per la calibrazione.

Il database finale a valle dell'eliminazione degli outlayer e della soglia dello 0,5% risulta pari a 832 righe per 8 variabili indipendenti. Le 832 righe (casi) sono stati divisi secondo il metodo della Cross Validation in un 70% utilizzato per adattare o "addestrare" il modello (training data set) e il restante 30% (validation data set) per valutarne la capacità predittiva. La Cross Validation è una tecnica frequentemente utilizzata per assicurarsi che un modello non produca un eccessivo livello di overfitting rispetto ai dati campionari sui quali è sviluppato. In condizioni ideali, il modello funzionerà ugualmente bene su entrambe le porzioni di dati. In caso contrario, è probabile la presenza di un livello di overfitting non trascurabile.

La Cross Validation è stata anche utilizzata per valutare la stabilità del modello previsionale finale, mantenendo le quote di training e validation fisse, ma estraendole di volta in volta in maniera casuale, così da addestrare ed allenare il modello con differenti tipi di dati campionari, e valutare sequenzialmente le previsioni prodotte al fine di determinare se il modello è eccessivamente sensibile ai dati utilizzati per la fase di training.

In Tabella 7 sono riportati i valori dei pesi relativi all'importanza delle singole variabili nel modello implementato: questi permettono di stabilire quali variabili indipendenti hanno maggiore potere predittivo. L'esame di questi pesi può indicare eventuali criticità del modello nel caso in cui le variabili tradizionalmente più importanti contribuiscano poco nella spiegazione del fenomeno. Tale caso potrebbe determinarsi qualora esista una inadeguata specificazione del modello o eventuali criticità sull'accuratezza dei dati utilizzati.

Nel caso in questione risulta il riempimento dei parcheggi, dunque la relazione tra domanda ed offerta di sosta, la variabile esplicativa fondamentale nel regolare la quota di spostamenti di Park & Ride; seguono le variabili funzione dell'offerta di trasporto, ovvero l'accessibilità dei parcheggi tramite mezzo privato (X1) ed il beneficio temporale tra uso della sola modalità privata o tramite scambio privato-pubblico (X4). Nel caso di quest'ultima (X4) c'è da sottolineare come essa dipenda a sua volta dai tempi sul pubblico che, a causa della mancanza negli open data delle informazioni relative all'ambito provinciale, non riesce comunque ad assolvere al pieno il suo potere predittivo. Infine troviamo variabili relative al territorio ed al livello insediativo (X7 ed X6). Di minore peso risultano il numero di stazioni metro/ferro presenti in ogni zona. Infine il minor apporto è dato dalle dummy X8 e X10, potenzialmente per la struttura stessa (binaria) delle variabili.

**Tabella 7. Peso delle singole variabili indipendenti nella spiegazione del fenomeno.**

Variabile	X1	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
<b>Denominazione variabile</b>	<i>Impedenza trasporto privato</i>	<i>Beneficio Temporale</i>	<i>Riempimento parcheggi</i>	<i>Estensione zone</i>	<i>Densità abitativa</i>	<i>Dentro/fuori GRA</i>	<i>Numero stazioni metro/ferro</i>	<i>Punta/morbida</i>
<b>Pesi</b>	0,1566	0,1533	0,3516	0,1234	0,1492	0,0083	0,0509	0,0067

Le variabili più influenti (X5, X1, X4, X7, X6) sono effettivamente intuitivamente coerenti con ciò che ci si poteva aspettare. È di fatti ragionevole che non ci possa essere incremento della domanda di sosta se i parcheggi lavorano a capacità o se la fase di accesso ha un'impedenza elevata. Anche la dimensione e la popolazione che risiede nelle singole zone incide sul flusso in accesso ai parcheggi. Differente è la situazione per la variabile X9 (numero stazioni metro/ferro) dove ci si aspettava che maggiore fosse il numero delle stazioni più ci fosse una tendenza all'uso del trasporto collettivo, anche come unica modalità di trasporto. Se di fatti si confrontano i pesi ottenuti dalla Random Forest con i pesi ottenuti utilizzando un approccio diverso (ad esempio una regressione multivariata, seppur con tutti i suoi limiti legati al legame di tipo lineare che viene cercato tra variabile dipendente e variabili indipendenti), la variabile predominante rimane comunque il grado di riempimento, ma, escludendo le dummy, il ruolo successivo principale è

affidato proprio al numero delle stazioni; X1, X4 e X7 seguono nello stesso ordine di rilevanza specificato dalla RF.

In Figura 40 sono riportati i test statistici a valle del processo di training e test/validation che comparano i risultati stimati rispetto ai dati osservati, mostrando una buona rispondenza del modello.

```

-----
TRAIN: | TEST:
MAX Y: 25.373 | MAX Y: 14.286
MEDIA Y: 1.78209512648 | MEDIA Y: 1.70588300395
MIN Y: 0.5 | MIN Y: 0.50018
-----
RMSE: 0.859871950789
-----
MSE: 0.739379771753
-----
MAE: 0.459740066667
-----
MAPE: 30.9498236089 %
-----
MEDIAN ABSOLUTE ERROR: 0.162093125
-----
R^2 TEST :: 0.78608872827
-----
R^2 TRAIN :: 0.902807844449
-----

```

**Figura 40. Test statistici a valle del processo di training e validation.**

Di seguito si riporta un'analisi della capacità di risposta del modello a variazioni puntuali del tempo di accesso ai parcheggi di Park & Ride. La variazione del tempo di accesso, che potrebbe rappresentare un incremento/decremento della congestione nel bacino in cui sono contenuti i parcheggi di interesse di una specifica zona può incidere sul valore della variabile X1 in primis, ed in misura minore sulla variabile X4. Si è deciso di operare attraverso una variazione puntuale della variabile trasportistica suddetta, piuttosto che sistematica sulle variabili indipendenti, per aver modo di controllare maggiormente la risposta del modello. A tal fine sono state selezionate alcune zone dell'area di studio che superassero il 5% di domanda di Park & Ride, come stimata da FCD, e che avessero una buona rispondenza tra domanda misurata e domanda stimata da modello (differenza <0,5%). Le zone selezionate sono in particolare Tor Sapienza, Ostia Antica ed Ottavia.

Nel caso di Tor Sapienza sono state effettuate tre prove andando di volta in volta a ridurre il tempo di accesso del singolo parcheggio tra i tre parcheggi afferenti all'origine:

1. riduzione del 26% del parcheggio ID16: da circa 14 minuti a 10 minuti (prova 1, Figura 41);
2. riduzione del 10% del parcheggio ID37: da circa 22 minuti a 20 minuti (prova 2, Figura 42);
3. riduzione del 10% del parcheggio ID39: da circa 9 minuti a 8 minuti (prova 3, Figura 43).

Nel caso di Ostia Antica sono state effettuate quattro prove andando di volta in volta a ridurre il tempo di accesso del singolo parcheggio tra i quattro parcheggi afferenti all'origine:

1. riduzione del 15% del parcheggio ID7: da circa 35 minuti a 30 minuti (prova 1, Figura 44);
2. riduzione del 26% del parcheggio ID26: da circa 14 minuti a 10 minuti (prova 2, Figura 44);
3. riduzione del 13% del parcheggio ID33: da circa 6 minuti a 5 minuti (prova 3, Figura 45).
4. riduzione del 8% del parcheggio ID34: da circa 11 minuti a 10 minuti (prova 4, Figura 45).

Infine nel caso di Ottavia è stata effettuata un'unica prova andando in questo caso ad incrementare (+120%) il tempo di accesso dell'unico parcheggio afferente all'origine (ID31) da circa 7 minuti a 15 minuti (prova 1, Figura 46).

```

O49T1  7c  Tor Sapienza  Prova 1

Quale origine? 49
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 10.7517
X4 = -247.7946
#####
I parcheggi dell'origine 49 sono 3: (16 37 39)
(1) Tempo O49 P16 = 13.58 minuti (Flusso rilevato = 2 veicoli)
(2) Tempo O49 P37 = 22.3 minuti (Flusso rilevato = 1 veicoli)
(3) Tempo O49 P39 = 8.84 minuti (Flusso rilevato = 5 veicoli)
#####
Quale vuoi modificare? 1
Nuovo valore? 10
#####
Nuova X1 = 10.155
Nuova X4 = -246.6013
#####
    
```

Figura 41. Tor Sapienza – prova 1 riduzione tempo origine-parcheggio P16.

```

O49T1  7c  Tor Sapienza  Prova 2

Quale origine? 49
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 10.7517
X4 = -247.7946
#####
I parcheggi dell'origine 49 sono 3: (16 37 39)
(1) Tempo O49 P16 = 13.58 minuti (Flusso rilevato = 2 veicoli)
(2) Tempo O49 P37 = 22.3 minuti (Flusso rilevato = 1 veicoli)
(3) Tempo O49 P39 = 8.84 minuti (Flusso rilevato = 5 veicoli)
#####
Quale vuoi modificare? 2
Nuovo valore? 20
#####
Nuova X1 = 10.56
Nuova X4 = -247.0279
#####
    
```

Figura 42. Tor Sapienza – prova 2 riduzione tempo origine-parcheggio P37

<b>O49T1</b>	<b>7c</b>	<b>Tor Sapienza</b>	<b>Prova 3</b>
--------------	-----------	---------------------	----------------

```

Quale origine? 49
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 10.7517
X4 = -247.7946
#####
I parcheggi dell'origine 49 sono 3: (16 37 39)
(1) Tempo O49 P16 = 13.58 minuti (Flusso rilevato = 2 veicoli)
(2) Tempo O49 P37 = 22.3 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
(3) Tempo O49 P39 = 8.84 minuti (Flusso rilevato = 9 veicoli)
#####
Quale vuoi modificare? 3
Nuovo valore? 8
#####
Nuova X1 = 10.1217
Nuova X4 = -247.5146
#####
  
```

Figura 43. Tor Sapienza – prova 3 riduzione tempo origine-parcheggio P39

<b>O105T1</b>	<b>13e</b>	<b>Ostia Antica</b>	<b>Prova 1</b>
---------------	------------	---------------------	----------------

```

Quale origine? 105
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 13.0743
X4 = -249.2334
#####
I parcheggi dell'origine 105 sono 4: (7 26 33 34)
(1) Tempo O105 P7 = 35.46 minuti (Flusso rilevato = 3 veicoli)
(2) Tempo O105 P26 = 14 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
(3) Tempo O105 P33 = 5.76 minuti (Flusso rilevato = 9 veicoli)
(4) Tempo O105 P34 = 10.82 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
#####
Quale vuoi modificare? 1
Nuovo valore? 30
#####
Nuova X1 = 11.9043
Nuova X4 = -247.8434
#####
  
```

<b>O105T1</b>	<b>13e</b>	<b>Ostia Antica</b>	<b>Prova 2</b>
---------------	------------	---------------------	----------------

```

Quale origine? 105
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 13.0743
X4 = -249.2334
#####
I parcheggi dell'origine 105 sono 4: (7 26 33 34)
(1) Tempo O105 P7 = 35.46 minuti (Flusso rilevato = 3 veicoli)
(2) Tempo O105 P26 = 14 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
(3) Tempo O105 P33 = 5.76 minuti (Flusso rilevato = 9 veicoli)
(4) Tempo O105 P34 = 10.82 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
#####
Quale vuoi modificare? 2
Nuovo valore? 19
#####
Nuova X1 = 12.7884
Nuova X4 = -248.2334
#####
  
```

Figura 44. Ostia Antica – prova 1 e prova 2 riduzione tempo origine-parcheggio P7, P26

<b>O105T1</b>	<b>13e</b>	<b>Ostia Antica</b>	<b>Prova 3</b>
---------------	------------	---------------------	----------------

```

Quale origine? 105
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 13.0743
X4 = -249.2334
#####
I parcheggi dell'origine 105 sono 4: (7 26 33 34)
(1) Tempo O105 P7 = 35.46 minuti (Flusso rilevato = 3 veicoli)
(2) Tempo O105 P26 = 14 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
(3) Tempo O105 P33 = 5.76 minuti (Flusso rilevato = 9 veicoli)
(4) Tempo O105 P34 = 10.82 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
#####
Quale vuoi modificare? 3
Nuovo valore? 8
#####
Nuova X1 = 12.5047
Nuova X4 = -249.0634
#####
  
```

<b>O105T1</b>	<b>13e</b>	<b>Ostia Antica</b>	<b>Prova 4</b>
---------------	------------	---------------------	----------------

```

Quale origine? 105
Quale intervallo temporale? 1
#####
X1 = 13.0743
X4 = -249.2334
#####
I parcheggi dell'origine 105 sono 4: (7 26 33 34)
(1) Tempo O105 P7 = 35.46 minuti (Flusso rilevato = 3 veicoli)
(2) Tempo O105 P26 = 14 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
(3) Tempo O105 P33 = 5.76 minuti (Flusso rilevato = 9 veicoli)
(4) Tempo O105 P34 = 10.82 minuti (Flusso rilevato = 1 veicolo)
#####
Quale vuoi modificare? 4
Nuovo valore? 10
#####
Nuova X1 = 13.0187
Nuova X4 = -249.0284
#####
  
```

Figura 45. Ostia Antica – prova 3 e prova 4 riduzione tempo origine-parcheggio P33, P34

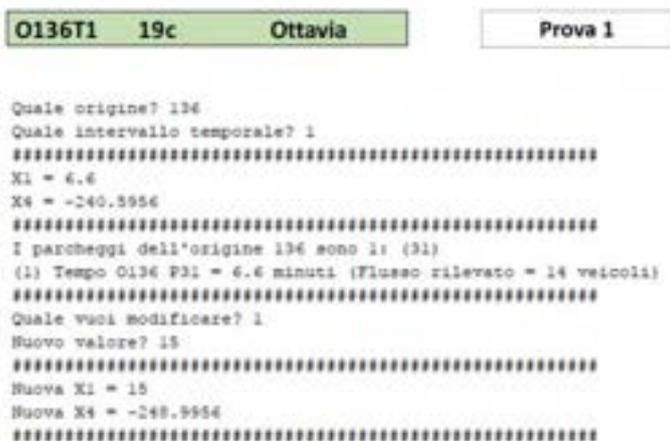


Figura 46. Ottavia –riduzione tempo origine-parcheggio P31

Tabella 8. Risultati test modello al variare del tempo di accesso ai parcheggi.

<b>Tor Sapienza</b>									
<i>stato attuale</i>	%P&R_FCD	5,19%							
	%P&R_modello	5,05%							
	% P&R	variazione tempo di accesso	FCD	X1_rif	X4_rif	X1_new	X4_new	DX1	DX4
<i>prova 1</i>	5,87%	-26%	2	10,75	-247,79	10,16	-246,6	-5,5%	-0,5%
<i>prova 2</i>	5,52%	-10%	1	10,75	-247,79	10,56	-247,03	-1,8%	-0,3%
<i>prova 3</i>	5,68%	-10%	9	10,75	-247,79	10,12	-247,51	-5,9%	-0,1%
<b>Ostia Antica</b>									
<i>Stato attuale</i>	%P&R_FCD	5,81%							
	%P&R_modello	5,53%							
	% P&R	variazione tempo di accesso	FCD	X1_rif	X4_rif	X1_new	X4_new	DX1	DX4
<i>prova 1</i>	5,53%	-15%	3	13,07	-249,23	11,9	-247,87	-9,0%	-0,5%
<i>prova 2</i>	5,53%	-26%	1	13,07	-249,23	12,79	-248,23	-2,1%	-0,4%
<i>prova 3</i>	5,61%	-13%	9	13,07	-249,23	12,59	-249,04	-3,7%	-0,1%
<i>prova 4</i>	5,53%	-8%	1	13,07	-249,23	13,02	-249,03	-0,4%	-0,1%
<b>Ottavia</b>									
<i>Stato attuale</i>	%P&R_FCD	5,26%							
	%P&R_modello	4,87%							
	% P&R	variazione tempo di accesso	FCD	X1_rif	X4_rif	X1_new	X4_new	DX1	DX4
<i>prova 1</i>	3,92%	+120%	14	6,6	-240,59	15	-248,99	127,3%	3,5%

I risultati ottenuti mostrano una elevata rispondenza dell'output del modello al fenomeno rappresentato (Tabella 8). Nel caso di Tor Sapienza, rispetto alla quota di Park & Ride stimata inizialmente da modello (5,05%), si ottiene un incremento dovuto alla riduzione dei tempi di accesso dell'ordine di 0,5-0,9 punti percentuali: ciò è evidentemente funzione non solo della riduzione del tempo di accesso ma anche della domanda che richiede di utilizzare il singolo parcheggio su cui si va ad agire.

Per Ostia Antica le variazioni introdotte ai tempi di accesso non sono tali da apportare modifiche sostanziali alla quota iniziale di Park & Ride stimata (5,53%), da cui si nota anche una certa resistenza del modello che è sicuramente preferibile ad una sua eccessiva elasticità.

Infine, per il caso di Ottavia, l'incremento in questo caso del tempo di accesso all'unico parcheggio, determina una riduzione della quota di Park & Ride di 0,9 punti percentuali rispetto al valore iniziale da modello (4,87%). Si ricorda che in tal caso, i tempi medi di accesso al parcheggio da parte degli utenti sono stati portati da circa 7 minuti a 15 minuti, dunque l'incremento temporale è sicuramente sensibile per uno spostamento in ambito urbano e per la sola fase di accesso al parcheggio (fase iniziale dello spostamento).

E' da sottolineare come questi primi risultati applicativi al caso romano vadano sicuramente nella direzione corretta rispetto a quello che è il reale comportamento degli utenti sulla rete. Certamente dovranno seguire approfondimenti di natura sistematica sulla sensitività delle variabili indipendenti con il fine di valutare il grado di elasticità del modello alle singole variabili ed agli attributi che le compongono.

### 3 Conclusioni

Il presente studio si colloca all'interno del progetto "D.7 Mobilità elettrica sostenibile" il cui obiettivo è lo sviluppo di un simulatore in grado di rappresentare e valutare scenari di elettrificazione della mobilità urbana.

In particolare la ricerca si è orientata allo sviluppo di modelli atti a rappresentare comportamenti di scelta multimodale che possano essere implementati all'interno del simulatore stesso con il fine di valutare la quota di domanda privata "dirottabile" verso il trasporto collettivo, nel caso di adozione di opportune politiche in grado di fermare i veicoli elettrici presso i parcheggi di scambio (o parcheggi di Park & Ride) dotati di colonnine di ricarica. In uno scenario di medio-lungo periodo, si prevede di fatti che con l'aumento dei veicoli elettrici possano verificarsi delle concentrazioni di domanda di energia con conseguenti problematiche relative a cali di tensione e perdite nella rete di distribuzione. Lato mobilità, ci si aspetta invece un sicuro decremento delle emissioni veicolari e dell'impatto acustico, ma non un decremento delle problematiche di congestione a causa del mantenimento del numero di veicoli circolanti (siano essi elettrici o meno). Per intervenire su entrambi i fronti (riduzione della congestione e redistribuzione della domanda di energia) possono essere adottate opportune politiche di limitazione degli accessi nelle aree centrali/più congestionate della città e operare tramite l'incremento della multi modalità con il passaggio dei veicoli elettrici verso i sistemi di trasporto collettivo.

Per questo si è calibrato e validato un modello in grado in primis di calcolare le variazioni di domanda di Park & Ride al variare del livello di servizio fornito dall'offerta di trasporto, dell'interazione tra domanda di spostamento ed offerta stessa, delle caratteristiche territoriali ed insediative dell'area di studio, con riferimento ad un caso applicativo di elevate dimensioni ed elevata complessità (Roma). Il modello si configura come un modello di natura aggregata: l'output è la quota di domanda di Park & Ride emessa da ciascuna zona dell'area di studio per ogni intervallo temporale nell'arco della giornata ferial media. Il modello è stato calibrato secondo un approccio data driven, dove le singole variabili derivano da elaborazioni di dati FCD (lato mobilità privata) e open data (lato mobilità su trasporto collettivo), nonché vengono utilizzati dati di natura statistica (popolazione, estensione delle zone etc.). Il metodo utilizzato per la calibrazione e la validazione del modello appartiene alle tecniche di Machine Learning ed in particolare si configura come una Random Forest. Al modello precedentemente calibrato è stata ipotizzata l'aggiunta di una opportuna funzione in grado di legare l'eventuale aumento della quota di domanda di Park & Ride di

veicoli elettrici a benefici economici a cui gli stessi possono essere soggetti tramite politiche di incentivazione nel medio/lungo periodo. Tali benefici potranno derivare da eventuali sconti sul costo dell'abbonamento al sistema di trasporto collettivo, così come ad eventuali sconti sulla bolletta elettrica. In quest'ultimo caso di fatti, si ipotizza che i veicoli elettrici fermi nei parcheggi possano cedere parte della loro energia alla rete (schemi di Vehicle To Grid). Ciò deve ovviamente configurarsi in un pagamento di tale energia ceduta, o alternativamente in uno sconto sulla bolletta elettrica.

Il modello è stato sottoposto a diversi test per la valutazione della rispondenza dell'uscita a variazioni controllate degli attributi che compongono le variabili indipendenti, mostrando risultati che vanno sicuramente nella direzione corretta rispetto a quello che è il reale comportamento degli utenti sulla rete.

La successiva fase di sviluppo del progetto prevede:

- Un approfondimento di natura sistematica sulla sensitività del modello con il fine di valutare il grado di elasticità del modello alle singole variabili ed agli attributi che le compongono;
- L'implementazione nel modello di ulteriori variabili esplicative tramite utilizzo di ulteriori fonti di dati: in tal caso si fa riferimento alla possibilità di utilizzare dati da assegnazione su modello di rete ed in particolare tempi su trasporto pubblico per le connessioni con l'esterno. In questo modo sarà possibile implementare le variabili X2, X2 bis, X3 e X3 bis rimaste escluse dal processo di calibrazione, così come ricalcolare in maniera più efficace la variabile X4;
- La possibilità di alimentare il modello tramite nuove e più recenti banche dati FCD (FCD OctoTelematics 2016 o 2017) con tasso di penetrazione più elevato;
- La validazione della curva teorica incremento multi modalità – beneficio economico da sconto in bolletta utilizzando un'analogia con quella che è la variazione della domanda di energia (domestica o industriale) alle variazioni dei costi dell'energia stessa;
- L'implementazione del modello nel simulatore e la definizione delle "leve" di interfaccia front-users.

L'ultimo punto prevede l'integrazione del modello multimodale di natura aggregata con modelli ad agenti (modello disaggregato) in grado di simulare i pattern di mobilità sulla rete ed i comportamenti di ricarica. Verrà quindi costruito un processo di integrazione tra le due strutture modellistiche per l'implementazione di scenari futuri che rivestano variazioni dei comportamenti di mobilità dei veicoli elettrici. La struttura modellistica complessiva, comprensiva dei processi di integrazione, verrà implementata a livello di simulatore urbano. Ciò comporterà il suo inserimento all'interno del motore di simulazione, l'integrazione con il back end del simulatore per la gestione dati in ingresso ed uscita, nonché l'integrazione con il front end del simulatore per la visualizzazione su mappa di risultati e grafici. Al termine dell'implementazione, saranno valutati differenti scenari di politiche trasportistiche volte alla multi modalità per la redistribuzione della domanda di energia, il contenimento dei picchi e la stabilizzazione della rete.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. C. Liberto, G. Valenti, S. Orchi, M. Lelli, M. Nigro, M. Ferrara, "The Impact of Electric Mobility Scenarios in Large Urban Areas", submitted to IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems
2. C. Liberto, G. Valenti, M. Lelli, M. Ferrara, M. Nigro, "Evaluation of the impact of e-Mobility in Large Urban Areas", 5th IEEE International Conference on Models And Technologies For Intelligent Transportation Systems, Naples, Italy, 26-28 June 2017.
3. C. Liberto, R. Ragona, G. Valenti, "Traffic prediction in metropolitan freeways", Proceedings of the 7th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS), Kunming, China, ASCE, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.
4. G. Fusco, C. Colombaroni, N. Isaenko, "Comparative analysis of implicit models for real-time short-term traffic predictions", IET Intelligent Transport Systems, vol. 10 (4), pp. 270-278, 2016.
5. M. Nigro, S. Peruzzi, C. Liberto, G. Valenti, "Urban-scale macroscopic fundamental diagram: an application to the real case study of Rome", Advances in Transportation Studies an international Journal, Section B42, 2017.
6. Biazzo, B. Monechi, V. Loreto, F. Tria, "Measuring the quality of public transports in cities", (2017), Authorea, <https://www.authorea.com/users/92108/articles/199720-measuring-the-quality-of-public-transports-in-cities>
7. Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile, Università Roma Tre, "Definizione di una Metodologia per lo Studio e la Verifica dei Parcheggi di Scambio", (2004), ATAC SpA - Agenzia per la Mobilità del Comune di Roma
8. T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, "The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction", Springer, Stanford, California, 2008
9. Zhang, Y., Haghani, A. "A gradient boosting method to improve travel time prediction" (2015) Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 58, pp. 308-324
10. Kažic, B., Mladenic, D., Košmerlj, A. "Traffic flow prediction from loop counter sensor data using machine learning methods" (2015) VEHTS 2015 - Proceedings of the 1st International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, pp. 119-127
11. Zarei, N., Ghayour, M.A., Hashemi, S. "Road traffic prediction using context-aware random forest based on volatility nature of traffic flows" (2013) Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 7802 LNAI (PART 1), pp. 196-205
12. Hamner, B. "Predicting travel times with context-dependent random forests by modeling local and aggregate traffic flow" (2010) Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM, art. no. 5693451, pp. 1357-1359
13. Ghasri, M., Hossein Rashidi, T., Waller, S.T. "Developing a disaggregate travel demand system of models using data mining techniques" (2017) Transportation Research Part A: Policy and Practice, 105, pp. 138-153.
14. H. I. Ashqar, M. Elhenawy, M. H. Almannaa, A. Ghanem, H. A. Rakha, L. House, "Modeling Bike Availability in a Bike-Sharing System Using Machine Learning" 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017 – Proceedings, 8 August 2017, Article number 8005700, Pages 374-378
15. Liu, J., Cui, E., Hu, H., Chen, X., Chen, X.M., Chen, F. "Short-term forecasting of emerging on-demand ride services" (2017) 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS 2017 - Proceedings, pp. 489-495.