

Ricerca di Sistema elettrico



Caratterizzazione della domanda FCD e Modellazione di
scenari di shift modale (LA3.25)

Prof. Ernesto Cipriani, Dott. Andrea Gemma, Dott.ssa Livia Mannini

LA 3.25 Caratterizzazione della domanda FCD e Modellazione di scenari di shift modale

E. Cipriani, A. Gemma, L. Mannini, Università "Roma Tre" – Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica e delle Tecnologie Aeronautiche, Università RomaTre

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 3.25

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Fernando, Ortenzi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Ernesto Cipriani, Università degli Studi Roma Tre

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: dell'Accordo di collaborazione "83", Responsabili Scientifici per ENEA Carlo Liberto, per Roma Tre Ernesto Cipriani. Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte Roma Servizi per la Mobilità che ha reso disponibile i dati utilizzati

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	13
6	Sintesi delle attività svolte	14
7	Dettaglio delle attività svolte.....	15
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	18
9	Pubblicazioni scientifiche	19
10	Eventi di disseminazione	20

Indice delle figure

Figura 1. Catena modellistica implementata17

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Parametri della catena modellistica 12

1 Risultati attesi

Nell'ambito della presente linea di attività (LA 3.25), è stata progettata e sviluppata una catena modellistica finalizzata alla ricostruzione della domanda di mobilità privata e alla calibrazione di un modello per la stima dello shift modale. Entrambi i risultati sono stati integrati all'interno della "Piattaforma per la Sostenibilità e per la Transizione Energetica della Mobilità Urbana".

La linea di attività è stata strutturata in due sotto-attività principali:

- Caratterizzazione della domanda FCD: Questa attività si è basata sull'analisi delle traiettorie ricostruite nella linea di attività "Profilazione dei Floating Car Data" (FCD). L'obiettivo era realizzare una catena modellistica capace di caratterizzare la domanda di trasporto privato, segmentandola per motivo e stimando i fattori di espansione all'universo della domanda a partire dal campione FCD. La segmentazione della domanda è stata effettuata attraverso l'identificazione della localizzazione della residenza, di un eventuale luogo di lavoro e la classificazione di altri punti di interesse, basata sulla frequenza di visita. Questo ha consentito di distinguere le traiettorie per motivazioni di spostamento quali casa, lavoro o altre ragioni. Successivamente, sono state ricostruite le catene di spostamento come sequenze di traiettorie intervallate da soste di diversa durata, garantendo che origine e fine di ogni sequenza coincidessero nello stesso luogo. Considerando che il campione FCD rappresenta solo una parte del parco veicoli circolante, è stato necessario stimare i fattori di espansione per estendere i risultati all'intero universo di veicoli. Questa espansione è stata ottenuta confrontando i dati delle traiettorie con altre fonti, come i conteggi delle spire virtuali e fisiche.
- Modellazione di scenari di shift modali: Questa attività si è focalizzata sulla progettazione analitica di un modello di shift modale che tenesse conto delle diverse modalità di trasporto simulate nel progetto (trasporto privato e trasporto pubblico). Il modello di shift modale è stato progettato per considerare sia le prestazioni di tutte le modalità di trasporto disponibili, infine, la calibrazione del modello è avvenuta confrontando le scelte effettuate dagli utenti, ricostruite dalle traiettorie monitorate, con le alternative modali simulate.

I risultati attesi per ciascuna sotto-attività sono stati i seguenti:

- Identificazione dei punti di maggiore interesse per ciascun veicolo, inclusi la residenza principale, il luogo di lavoro e altri punti di interesse;
- Segmentazione della domanda per motivi di spostamento (casa, lavoro, altro);
- Ricostruzione delle catene di spostamento, distinguendo tra catene home-based e work-based;
- Calcolo dei fattori di espansione per estendere i risultati all'universo dei veicoli circolanti;
- Sviluppo di una formulazione analitica per stimare la ripartizione modale, basata su variabili di facile definizione e applicabile a contesti alternativi o futuri.

I prodotti attesi derivanti da queste attività includevano:

- Moduli per la caratterizzazione della domanda e la ricostruzione delle catene di spostamento;
- Moduli per il calcolo del fattore di espansione e delle ripartizioni modali;

- Formulazioni analitiche e relativi codici di calcolo, integrabili nella piattaforma del progetto.

Questi risultati forniscono strumenti metodologici e analitici utili per comprendere e gestire la domanda di mobilità, favorendo la transizione verso un sistema di trasporto più sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico.

2 Risultati ottenuti

Nell'ambito di questa linea di attività, i risultati hanno rispettato pienamente i risultati attesi, contribuendo come preventivato al progetto complessivo. La catena modellistica per la ricostruzione della domanda di mobilità privata ha permesso di identificare i principali punti di interesse per ciascun veicolo, come residenza, luogo di lavoro e altri luoghi frequentati. Questa analisi ha reso possibile classificare le traiettorie, calcolate nell'attività 3.24, in base ai motivi di spostamento permettendo una segmentazione della domanda e la ricostruzione delle catene di spostamento. L'integrazione delle traiettorie monitorate con altre fonti di dati, come i conteggi delle spire fisiche e virtuali, ha consentito di calcolare i fattori di espansione necessari per estendere i risultati dell'analisi FCD a tutto il parco veicoli circolante. Infine, il confronto tra le catene di spostamento ricostruite con la domanda simulata ha permesso la calibrazione di un modello di shift modale come presente nei risultati attesi.

Oltre ai risultati attesi, nell'ambito di questa attività sono state effettuate procedure aggiuntive atte ad arricchire il contenuto informativo della piattaforma di seguito riportate:

- Shortest Path Dinamico: Tra i diversi moduli di calcolo sviluppati per questa LA è stato anche implementato un algoritmo per il calcolo dinamico dei percorsi minimi. Questo algoritmo, unitamente con le informazioni GPS, ha permesso di ricostruire i percorsi reali effettuati dai veicoli FCD monitorati, migliorando sostanzialmente la procedura di calcolo del fattore di espansione;
- Calcolo delle velocità dinamiche: Attraverso una procedura di associazione dei dati GPS al grafo stradale è stato possibile calcolare, per ogni arco monitorato, la velocità media per ogni fascia oraria. Questa informazione ha permesso di migliorare le stime del calcolo dei cammini minimi dinamici;
- Soste Brevi: Con l'obiettivo di alimentare i modelli di charging behavior è stata implementata una procedura per l'identificazione ed eliminazione delle soste brevi con successiva aggregazione delle traiettorie corrispondenti;
- Modulo per l'applicazione dello shift modale: Il modello analitico di shift modale è stato ingegnerizzato all'interno della piattaforma e applicato a quattro scenari di mobilità relativi ad incrementi progressivi delle performance del trasporto pubblico.

I moduli sviluppati sono stati integrati nella "Piattaforma per la Sostenibilità e per la Transizione Energetica della Mobilità Urbana".

I moduli e modelli sviluppati, unitamente ai modelli sviluppati da ENEA, possono permettere di prevedere l'impatto di politiche di incentivazione verso modalità di trasporto più sostenibili permette di ottimizzare l'utilizzo delle risorse energetiche e di favorire una maggiore efficienza del sistema, offrendo un valore aggiunto per il sistema elettrico nazionale, consentendo una pianificazione più accurata delle infrastrutture energetiche e una gestione ottimizzata della domanda.

3 Prodotti attesi

Le attività sviluppate prevedevano lo sviluppo dei seguenti prodotti:

- Modulo per l'identificazione della casa, del luogo di lavoro e dei punti di interesse per ciascun veicolo;
- Modulo di ricostruzione delle catene di spostamento;
- Modulo per l'analisi statistica delle catene di spostamento;
- Modulo per il calcolo dei cammini minimi richiesto per la stima del fattore di espansione;
- Modulo per il calcolo del fattore di espansione;
- Ricostruzione della domanda attraverso l'espansione numerica;
- Formulazione analitica e modulo di calcolo per la stima dello shift modale;

Ciascuno dei moduli doveva essere sviluppato in Python e il relativo codice di calcolo integrabile con il database e nella piattaforma del progetto.

4 Prodotti sviluppati

I risultati ottenuti nell'ambito di questa LA sono stati realizzati per mezzo della produzione di molteplici moduli software integrati in un unico script di esecuzione e contestualmente integrati con i risultati dell'attività 3.24 precedentemente sviluppata.

Tutti i moduli sono stati sviluppati in Python 3.9, che garantisce la retrocompatibilità con le versioni successive. Si è inoltre fatto ausilio delle seguenti librerie *open*, la cui descrizione è riportata all'interno del file *requirements.txt* utilizzabile per l'auto installazione delle stesse:

```
psycpg[binary]>=3.1.8
psycpg2-binary>=2.9.9
dataclasses>=0.6
shapely>=2.0.1
osmnx>=1.3.0
networkx>=3.0
pandas>=2.0.3
scikit-learn>=1.4.0
portion>=2.4.2
matplotlib>=3.10.0
seaborn>=0.13.2
sqlalchemy>=2.0.37
```

I prodotti realizzati sono stati implementati integrandoli all'interno di un'unica libreria Python e non prevedono l'utilizzo di procedure di accesso da parte dell'utente.

La libreria Python è stata strutturata come segue:

- **Struttura della libreria:**
 - par: modulo padre della libreria con la configurazione generale;
 - par.prt: modulo figlio con i modelli di calcolo per il trasporto privato;
 - par.prt.spp: modulo figlio con il modello di calcolo per lo shortest path dinamico punto-punto e multi-origine multi-destinazione con le strutture necessarie per la memorizzazione dei grafi e dei percorsi;
- **Descrizione del modulo par:**
 - **Config:** Classe per la gestione dei file di configurazione e delle variabili di ambiente da file o DB;
 - **logger.py:** File di configurazione del logger;
 - **settings.py:** File di configurazione della catena modellistica;
 - **dbconfig_{SERVER_NAME}.py:** Configurazione del database in funzione del SERVER_NAME di esecuzione;
- **Descrizione del modulo par.prt:**
 - **FCD:** Classe per l'elaborazione e gestione dei dati FCD;
 - **Factor:** Classe per l'elaborazione e gestione del fattore di espansione;
 - **HomeChain:** Classe per l'elaborazione e gestione delle catene di spostamento;

- **HomeChain30:** Classe per l'elaborazione e gestione delle catene di spostamento con 30 minuti di pausa breve;
- **HomeChain60:** Classe per l'elaborazione e gestione delle catene di spostamento con 60 minuti di pausa breve;
- **Indicators:** Classe per l'elaborazione e gestione degli indicatori di mobilità;
- **Info:** Classe per l'elaborazione e gestione delle informazioni del dataset;
- **Loop:** Classe per l'elaborazione e gestione delle spire di conteggio;
- **MapMatching:** Classe per l'elaborazione e gestione della procedura di map matching;
- **ModelShift:** Classe per l'elaborazione e gestione del modello di shift modale;
- **Network:** Classe per l'elaborazione e gestione della rete stradale;
- **StayPoint:** Classe per l'elaborazione e gestione dei punti di sosta;
- **Trip:** Classe per l'elaborazione e gestione delle traiettorie;
- **Trip30:** Classe per l'elaborazione e gestione delle traiettorie con 30 minuti di pausa breve;
- **Trip60:** Classe per l'elaborazione e gestione delle traiettorie con 60 minuti di pausa breve;
- **TripLeg:** Classe per l'elaborazione e gestione delle sub-tratte dei Trips;
- **Vehicle:** Classe per l'elaborazione e gestione dei veicoli;
- **Zones:** Classe per l'elaborazione e gestione delle zone di traffico;
- **Descrizione del modulo par.prt.spp:**
 - **SPP:** Classe per l'elaborazione del Dynamic Shortest Path Problem;
 - **Graph:** Classe per la memorizzazione del grafo;
 - **Link:** Classe per la memorizzazione dei link;
 - **Node:** Classe per la memorizzazione dei nodi;
 - **Turn:** Classe per la memorizzazione delle manovre proibite;
 - **Path:** Classe per la memorizzazione di un percorso;
 - **PathForrest:** Classe per la memorizzazione dei percorsi come foresta di alberi di percorsi;
 - **PathList:** Classe per la gestione dei percorsi in una lista;
 - **PathMatrix:** Classe per la memorizzazione dei percorsi come matrice di percorsi;
 - **PathResults:** Classe astratta per la memorizzazione dei percorsi;
 - **PathTree:** Classe per la memorizzazione dei percorsi come albero di percorsi;

Tutte le classi che necessitano di una persistenza all'interno del geo-database di ENEA, oltre ad esporre metodi e proprietà necessarie al calcolo espongono anche le funzioni di I/O verso il database.

La catena modellistica di importazione ed elaborazione dei dati è stata integrata nello script Python *avvia_analisi.py*, già precedentemente sviluppata per l'attività 3.24, implementando i seguenti moduli di calcolo:

- Modulo per l'identificazione della casa, del luogo di lavoro e dei punti di interesse per ciascun veicolo;
- Modulo di ricostruzione delle catene di spostamento;
- Modulo per il calcolo delle catene di spostamento;
- Modulo per il calcolo dei cammini minimi richiesto per la stima del fattore di espansione;
- Modulo per il calcolo del fattore di espansione e ricostruzione della domanda attraverso l'espansione numerica;
- Modulo per l'implementazione della formulazione analitica e modulo di calcolo per la stima dello shift modale;

Oltre ai moduli previsti dal progetto sono stati sviluppati e integrati i seguenti moduli:

- Modulo per la memorizzazione dei grafi dinamici con manovre proibite;
- Modulo per il calcolo del Dynamic Shortest Path;
- Modulo per l'aggregazione delle traiettorie attraverso l'eliminazione delle soste brevi inferiori a 30 minuti;
- Modulo per l'aggregazione delle traiettorie attraverso l'eliminazione delle soste brevi inferiori a 60 minuti;
- Modulo per il calcolo delle catene di spostamento con l'eliminazione delle soste brevi inferiori a 30 minuti;
- Modulo per il calcolo delle catene di spostamento con l'eliminazione delle soste brevi inferiori a 60 minuti;
- Modulo per l'aggregazione dei conteggi sulle spire;
- Modulo per il calcolo degli indicatori di mobilità;
- Modulo per l'applicazione del modello di shift modale a scenari di incremento delle performance del trasporto pubblico;
- Modulo per l'associazione dei dati FCD alla rete stradale;
- Modulo per il calcolo delle velocità dinamiche su rete derivanti da dati FCD;

Tutto il codice prodotto per la realizzazione di questi moduli è stato memorizzato su uno specifico server messo a disposizione dell'ENEA e secondo le procedure concordate.

Pertanto, i prodotti sviluppati sono coerenti e in linea con i prodotti attesi.

La catena modellistica è stata implementata prevedendo la possibilità di definire tutti i parametri utilizzati dai modelli. I parametri di default possono essere definiti usando le variabili d'ambiente o attraverso la tabella nel DB di ENEA *gen.config* o tramite file il file di configurazione *setting.py*.

Di seguito i parametri usati nella procedura:

Parametro	Valore	Descrizione
COUNTS_BUFFER_ANALYSIS	500	Area di analisi nell'intorno delle spire per il calcolo dei conteggi FCD [metri]
COUNTS_BUFFER_NETWORK	800	Area del grafo preso in considerazione nell'intorno delle spire per il calcolo dei conteggi FCD [metri]
FACTORS_ITERATIONS	200	Numero di iterazione per il calcolo dei fattori di espansione
LOG	true	Abilitazione del log

LOG_CONSOLE_ENABLED	true	Abilitazione del log sulla console
LOG_CONSOLE_FORMAT	%(asctime)s - %(module)s - %(message)s	Formato del log della console
LOG_CONSOLE_LEVEL	DEBUG	Livello di log della console
LOG_FILE_ENABLED	true	Abilitazione del log sul file
LOG_FILE_FILENAME	log.txt	Nome del file di log
LOG_FILE_FORMAT	%(asctime)s - %(module)s - %(message)s	Formato del log su file
LOG_FILE_LEVEL	DEBUG	Livello di log su file
LOG_LEVEL	INFO	Livello generale di log
LOG_NAME	par	nome del log
SRID_CALC	6875	Codice EPSG del sistema di riferimento geografico usato per i calcoli
SRID_DATA	6875	Codice EPSG del sistema di riferimento geografico usato per la memorizzazione
STAYPOINTS_HOME_MAX_DIST	200	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione della HOME
STAYPOINTS_HOME_MIN_SAMPLES	1	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione della HOME
STAYPOINTS_HOME_PERC_TPARK_MIN	0.1	Percentuale nel range 0-1 del tempo di parcheggio nella HOME per essere identificata come tale
STAYPOINTS_HOME_VRT_MAX_DIST	400	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione della HOME virtuale
STAYPOINTS_HOME_VRT_MIN_SAMPLES	2	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione della HOME virtuale
STAYPOINTS_MIN_VIRTUAL_DISTANCE	1000	Distanza percorsa dal bordo dell'area di studio per la definizione dello stay point virtuale
STAYPOINTS_N_POINTS_FOR_ANOMALOUS_STAYPOINT	180	Numero di punti per l'identificazione di uno stay point anomalo
STAYPOINTS_OTHER_MAX_DIST	200	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di uno stay point other
STAYPOINTS_OTHER_MIN_SAMPLES	1	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di uno stay point other
STAYPOINTS_OTHER_VRT_MAX_DIST	400	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di uno stay point other
STAYPOINTS_OTHER_VRT_MIN_SAMPLES	2	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di uno staypoint other
STAYPOINTS_RECURRENT_PERC_N_DAYS	0.142857143	Numero di giorni percentuale nel range [0,1] per l'identificazione di uno stay point ricorrente
STAYPOINTS_WORK_DOWS	(1,2,3,4,5)	Giorni lavorativo [0: domenica, ..., 6: sabato]
STAYPOINTS_WORK_MAX_DIST	200	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di WORK
STAYPOINTS_WORK_MIN_DAYS_PER_WEEK	2	Numero di giorni settimanali in cui un veicolo deve entrare nello staypoint per essere identificato come WORK
STAYPOINTS_WORK_MIN_PERC_WORKDAYS	0.285714286	Numero di giorni percentuale nel range [0,1] per l'identificazione di WORK
STAYPOINTS_WORK_MIN_SAMPLES	1	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di WORK
STAYPOINTS_WORK_MIN_WEEKS	0.5	Percentuale nel range 0-1 delle settimane in cui un veicolo deve recarsi un uno staypoint per essere classificato come WORK
STAYPOINTS_WORK_TMEAN	10800	Tempo medio di permanenza per essere identificato uno staypoint come WORK
STAYPOINTS_WORK_VRT_MAX_DIST	400	Parametro dist per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di WORK virtuale
STAYPOINTS_WORK_VRT_MIN_SAMPLES	2	Parametro min_sample per il calcolo del DBSCAN nell'identificazione di WORK virtuale

TRIPS_MAX_DISTANCE_OVERRIDE_POSITION_FIRST_POINT	200	Distanza tra un fine traiettoria e l'inizio della successiva che consente. Sotto questo limite il punto di ripartenza viene aggregato al punto di arrivo della traiettoria precedente per dare coerenza allo staypoint di arrivo con quello di partenza
TRIPS_MAX_V3	69.44444444	Velocità in m/s per escludere un punto dalla ricostruzione delle traiettorie
TRIPS_MIN_LENGTH	100	Lunghezza minima di una traiettoria
TRIPS_MIN_TIME	1	Tempo minimo di una traiettoria
TRIPS_SIGNAL_BREAK_DT	300	Intervallo di tempo per l'identificazione di una interruzione di segnale tra 2 FCD
TRIPS_SIGNAL_BREAK_MAX_DT	900	Intervallo di tempo di interruzione di segnale per identificare una sosta
TRIPS_SIGNAL_BREAK_V	0.555555556	Velocità in m/s massima sotto la quale si identifica una sosta in caso di interruzione di segnale
TRIPS_SIGNAL_CONT_DT	600	Tempo in secondi oltre il quale si identifica una sosta in caso assenza di movimento continua
TRIPS_SIGNAL_CONT_V	0.138888889	Velocità in m/s per identificare l'assenza di movimento
TRIPS_STOP_D_DS	50	Buffer in metri in destinazione per identificare il fine viaggio nel caso in cui il veicolo rimanga fermo (es: attesa per liberazione parcheggio).
TRIPS_STOP_O_DS	50	Buffer in metri in origine per identificare l'inizio del viaggio nel caso in cui il veicolo rimanga fermo (es: attesa di un passeggero)
TZ_DATA	GMT	Fuso orario usato nei dati

Tabella 1 – Parametri della catena modellistica

Considerando la possibilità di memorizzare tutti i parametri necessari all'interno del DB, del file settings.py e delle variabili d'ambiente, l'esecuzione della catena modellistica richiede esclusivamente l'esecuzione dello script *avvia_analisi.py* con la seguente sintassi:

- `python3 avvia_analisi.py` all'interno della cartella `~/rds/sw/`

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti rispetto alle attività e ai risultati previsti.

6 Sintesi delle attività svolte

È stato sviluppato un software per implementare una catena modellistica integrata in uno script Python, utilizzato come prototipo per il progetto finale. La catena modellistica, illustrata in Figura 1, è costituita dai moduli sviluppati nell'attività 3.24 e dai seguenti moduli:

1. **Map Matching**: Associa i dati GPS alla rete stradale, calcolando velocità medie orarie per arco stradale
2. **Analisi Spaziale della Sistemicità**: Identifica punti di interesse come HOME, WORK o OTHER
3. **Soste Brevi**: Ricostruisce le traiettorie in base alla durata delle soste
4. **Ricostruzione Catene**: Definisce catene home-based
5. **Route Matching**: Ricostruisce percorsi effettivi dai dati FCD
6. **Espansione**: Estende i dati FCD all'intero parco veicolare
7. **Ripartizione Modale**: Stima la ripartizione d'uso del trasporto pubblico e privato in funzione dei tempi
8. **Shift Modale**: Valuta variazioni modali tra scenari

I risultati sono stati archiviati nel geo-database sviluppato da ENEA e i codici depositati sui loro server.

7 Dettaglio delle attività svolte

La linea di attività ha richiesto di sviluppare un software in grado di implementare le funzionalità necessarie per la realizzazione della catena modellistica con l'obiettivo di raggiungere i risultati attesi. Il software è stato integrato all'interno di uno script Python che ne garantisce la corretta esecuzione e che rappresenta una base prototipale per l'integrazione all'interno del progetto finale.

La Figura 1 illustra la catena modellistica completa, comprensiva dei moduli implementati nella LA 3.24. I risultati principali ottenuti nella precedente LA 3.24 includono i moduli di "Ricostruzione delle Traiettorie" e di "Aggregazione", che hanno consentito di calcolare i seguenti dati:

- Traiettorie (Trips);
- Performance FCD tra coppie OD (Skim FCD);
- Numero di spostamenti FCD tra coppie OD (OD FCD);
- Sotto-tratte delle traiettorie (Trip Legs).

Questi dati sono stati utilizzati per alimentare i modelli sviluppati nella presente LA 3.25 la cui catena modellistica si basa sull'applicazione sequenziale dei seguenti moduli:

1. Map Matching: Utilizzando le informazioni GPS dei dati FCD, gli istanti temporali e una rappresentazione geografica della rete stradale, questo modulo associa ciascun campione FCD all'arco stradale più probabile, calcolando anche la velocità media per ciascuna fascia oraria. Il risultato è rappresentato dall'insieme di archi più probabili su cui transita il veicolo associato all'FCD.
2. Analisi Spaziale della Sistematicità: Sfruttando le soste ricavate dalle traiettorie (Trips), il modulo applica algoritmi di clustering per individuare i punti di interesse (Stay Points) di ciascun veicolo. Analizzando tempi di sosta e frequenza, i punti vengono classificati come HOME, WORK o OTHER, consentendo di segmentare i viaggi in base al motivo dello spostamento. L'analisi del risultato ha mostrato una buona corrispondenza tra le HOME e la popolazione residente e tra i WORK e gli addetti. Il fattore di espansione tra HOME e veicoli è stato valutato pari a 116,2 veicoli (180,2 abitanti) per ogni HOME calcolata.
3. Soste Brevi: Le traiettorie vengono aggregate in base alla durata della sosta: soste inferiori a 30 o 60 minuti generano rispettivamente Trips 30 e Trips 60.
4. Ricostruzione Catene: Partendo dalla classificazione di HOME e dalle informazioni sui Trips, il modulo ricostruisce le catene home-based, ovvero sequenze di traiettorie che iniziano e terminano presso la HOME. Le catene sono riadattate per escludere le soste brevi, in particolare presso HOME e WORK, fornendo input per modelli sul comportamento di ricarica dei veicoli elettrici. I risultati mostrano che più del 53.5% delle catene mattutine sono destinate al lavoro e che quasi il 36% delle catene risultano essere complesse (con più di una sosta intermedia).
5. Route Matching: Integrando i dati del modulo SPP (Shortest Path Procedure), il percorso effettivo realizzato dal veicolo viene ricostruito a partire dai punti GPS, spesso discontinui (frequenza di circa 1/60 Hz). Questo modulo consente di calcolare il transito su spire di conteggio e di associare i trips alle spire attraversate. I percorsi espliciti

calcolati non rappresentano un output della procedura per motivi di efficienza occupazionale della memoria del DB.

6. Espansione: Confrontando i dati FCD con i conteggi reali, il modulo calcola un fattore di espansione medio per ciascuna zona, applicabile ai veicoli con HOME in quella zona, estendendo così le informazioni del campione FCD all'intero parco veicolare. La procedura ha permesso di calcolare un fattore medio di espansione da trips a flussi pari a 218 restituendo un $R^2 = 0.96$ nel confronto conteggi di spire e flussi FCD.
7. Ripartizione Modale: Questo modulo stima la ripartizione tra trasporto pubblico e privato per ogni coppia OD, sfruttando dati sulle performance dei due modi di trasporto. Le performance del trasporto privato vengono estratte dalle skim calcolate dalla LA 3.24 e quelle del trasporto pubblico sono ottenute da una procedura data-driven sviluppata da ENEA che si basa sui dati GTFS. Il modello calibrato è un modello Logit binomiale che restituisce una ripartizione media del 69.5% a favore del trasporto privato.
8. Shift Modale: Confrontando le skim di un nuovo scenario con quelle dello scenario base, il modello calcola lo shift modale, stimando variazioni nell'uso di trasporto privato e pubblico in base alle modifiche nelle performance di ciascun modo. Il modello è stato applicato a 4 scenari di mobilità in cui si è ipotizzata un incremento delle performance del trasporto pubblico del 5%, 10%, 15% e 20% mostrando un incremento complessivo della domanda del TPL rispettivamente del 5.6%, 8.9%, 12.4% e 16.1%.

Le procedure si concludono con il salvataggio degli output di ciascun modulo all'interno del geo-database, garantendo l'integrazione dei risultati per successive elaborazioni. Si rimanda alla documentazione delle tabelle del database prodotto da ENEA per maggiori dettagli.

La catena modellistica è stata applicata al territorio di Roma grazie alla collaborazione di Roma Servizi per la Mobilità che ha messo a disposizione i dati necessari.

Per la descrizione delle procedure si rimanda all'allegato del presente report.

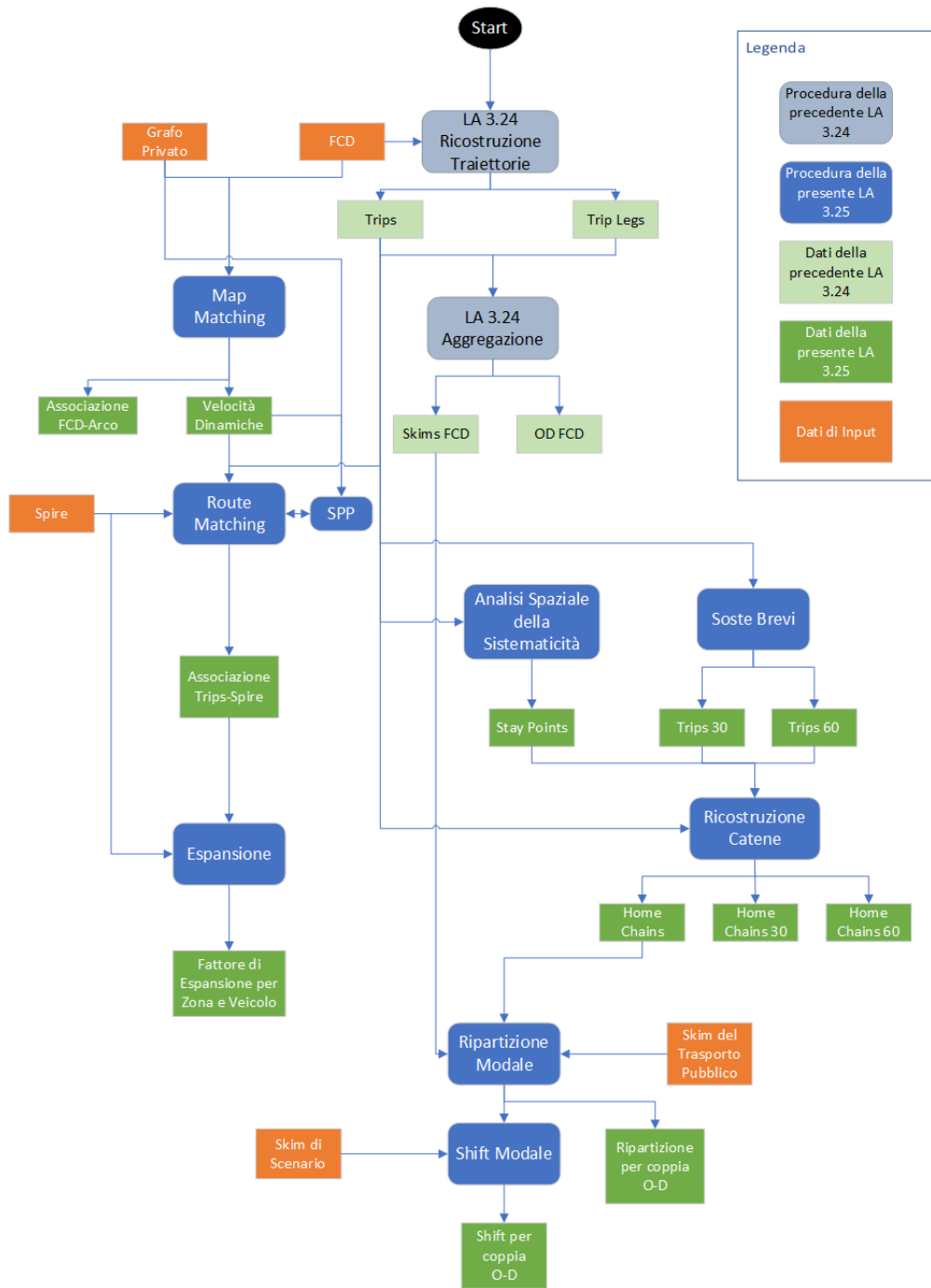


Figura 1. Catena modellistica implementata

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Lo svolgimento di questa Linea di Attività (LA) è stato portato a termine senza la necessità di ricorrere a consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

Durante lo sviluppo di questa Linea di Attività (LA) non sono state pubblicate ricerche scientifiche, ma il lavoro svolto si è contraddistinto per un'elevata innovazione, soprattutto dal punto di vista metodologico e applicativo. Tra i risultati ottenuti, il modello di espansione dei dati FCD rappresenta un contributo particolarmente rilevante, anche in considerazione dell'importanza crescente dei Big Data nel panorama attuale.

Lo studio preliminare dello stato dell'arte ha evidenziato come l'approccio adottato sia sufficientemente innovativo da poter essere valorizzato attraverso una pubblicazione internazionale. Prima di procedere con la stesura di un articolo scientifico, però, si è deciso di approfondire ulteriormente lo stato dell'arte e di consolidare la metodologia tramite una campagna di simulazione e validazione. Questo passaggio sarà fondamentale per individuare e risolvere eventuali criticità non emerse durante le attività svolte, rafforzando così l'affidabilità e la solidità dei risultati raggiunti.

Nell'ambito delle riviste scientifiche internazionali del settore, si ritiene che *"Transportation Research Part C. Emerging Technologies"* rappresenti la scelta più adeguata per la sottomissione di questa ricerca.

10 Eventi di disseminazione

Non sono stati svolti eventi di disseminazione.