

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in
Pianificazione dei trasporti

**PARAMETRIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ DINAMICHE
DEI CICLISTI IN UNA MICROSIMULAZIONE SU LARGA
SCALA DEL TRAFFICO: IL CASO DI BOLOGNA**

CANDIDATO

Gabriele Pieri

RELATORE

Chiar.mo Prof. Federico Rupi

CORRELATORI

Chiar.mo Prof. Joerg Schweizer

Dott. Ing. Cristian Poliziani

Anno Accademico 2020-2021

Sessione I – Luglio 2021

INDICE:

1	Introduzione	5
2	Stato dell'arte	6
2.1	Mirco-simulazione su larga scala.....	6
2.2	interazione ciclista automobile.....	7
2.3	GPS data e traffico ciclabile.....	8
2.4	Map Matching.....	9
2.5	Richiami teorici.....	11
2.5.1	Micro-simulazione: veicolo e conducente.....	11
3	Software	16
3.1	MATsim.....	16
3.2	TRANSIMS.....	17
3.3	VISSIM.....	17
3.4	Sumo.....	18
3.4.1	SUMOPy.....	18
3.4.2	La rete di trasporto su SUMO.....	21
4	Metodologia	23
5	Editing della rete	26
5.1	Individuazione degli errori.....	26
5.1.1	Import delle tracce GPS.....	26
5.1.2	Map Matching.....	28
5.1.3	Complete Bikenetwork.....	36
5.1.4	Problematiche relative al complete bikenetwork.....	39
5.1.5	Bike on pedestrian ways.....	40
5.2	Correzione degli errori nella rete.....	42
5.2.1	Inserimento di un arco nella rete.....	43
5.2.2	Controllo dei permessi di transito.....	44
5.2.3	Correzione di connettori errati.....	46

5.2.4	Allargamento delle corsie degli archi ciclabili	47
5.2.5	Modifica dei cicli semaforici	48
6	Calibrazione del modello	51
6.1	Definizione dell'area di studio	51
6.2	Inserimento degli archi contromano.....	53
6.2.1	Calibrazione dei parametri del map-matching.....	54
6.3	Generazione della domanda ciclabile.....	55
6.4	Import delle tracce GPS e filtro geometrico	55
6.5	Map matching e filtro post map matching	57
6.6	Parametrizzazione dinamica del ciclista	59
6.7	Parametro: velocità massima.....	60
6.8	Micro-simulazioni	61
6.9	Suddivisione del campione sulla base del genere ed età.....	66
6.10	Funzione obiettivo	69
6.10.1	Funzione obiettivo - Uomini under 40	70
6.10.2	Funzione obiettivo – Uomini over 40	71
6.10.3	Funzione obiettivo – Under 40 donne	71
6.10.4	Funzione obiettivo – Over 40 donne	72
6.10.5	Riassunto dei risultati.....	72
6.11	Simulazioni conclusive e risultati.....	73
6.11.1	Scenario 1.....	74
6.11.2	Scenario 2.....	75
6.11.3	Scenario 3.....	77
6.12	Statistica dei risultati	79
7	Risultati	81
7.1	Flusso totale sugli archi.....	81
7.2	Velocità media sugli archi.....	82
7.3	Densità media sugli archi	83
7.4	Tempi medi di attesa sugli archi	84

7.5	Profili di velocità.....	84
8	Conclusioni	88
9	Bibliografia	91

1 INTRODUZIONE

Dal punto di vista sociale la persistente congestione della rete stradale nelle ore di punta della zona urbana di Bologna, l'avvento della pandemia dovuta al virus COVID-19, che ha allontanato alcune persone dal trasporto pubblico locale e l'impatto di recenti crisi economiche che hanno reso insostenibile per parte della popolazione il costo di esercizio di un'automobile, stanno rendendo la bicicletta un mezzo di trasporto alternativo sempre più utilizzato.

In particolare, l'utilizzo della bicicletta presenta diversi fattori positivi:

- Non produce inquinamento acustico e atmosferico;
- Ha un basso costo di esercizio;
- Minore stress dovuto al traffico;
- Riduzione della congestione della rete stradale;
- Impatto positivo sulla salute nel medio-lungo termine.

A fronte degli elementi discussi, si è deciso di approfondire il comportamento dei ciclisti all'interno delle micro-simulazioni su larga scala, infatti al momento in letteratura tale argomento non è ancora stato affrontato e negli studi svolti fino ad ora, il ciclista è stato rappresentato come un'entità unica, a prescindere dal genere e dall'età, producendo in questo modo non trascurabili errori di rappresentazione della realtà.

In questo elaborato è stato utilizzato un modello di rete della città di Bologna sotto forma di *digital twin*, sviluppato da diversi anni da numerosi tesisti, tirocinanti e professori dell'Università di Bologna.

All'interno dell'elaborato inizialmente verrà analizzato lo stato dell'arte (Capitolo 2), in seguito verranno descritti i principali software utilizzati in ambito della micro-simulazione (Capitolo 3), con particolare focus sul software SUMOPy, utilizzato nel corso della trattazione.

Successivamente verrà descritta la metodologia utilizzata (Capitolo 4), per passare all'editing della rete (Capitolo 5) e alla creazione degli scenari e la calibrazione del modello (Capitolo 6), infine verranno mostrati i risultati (Capitolo 7) e discusse brevemente le conclusioni (Capitolo 8).

2 STATO DELL'ARTE

Negli ultimi anni, a causa della congestione stradale, l'inquinamento dell'aria, il cambiamento ciclabile, la scarsità di energia ed inattività fisica, sta aumentando l'importanza dei metodi di trasporto sostenibili, in particolare quello ciclabile.

Grazie ai dati delle tracce GPS, ottenibili facilmente mediante applicazioni presenti nello smartphone, è stato possibile ampliare notevolmente la ricerca in questo campo.

In particolare, la trattazione di questo studio è mirata a ricostruire all'interno di un micro-simulatore (SUMOPy) i viaggi registrati mediante tracce GPS del traffico ciclabile in assenza di altri mezzi di trasporto che compongono il traffico stradale, al fine di confrontare i tempi dei viaggi reali con quelli simulati.

Grazie a questo elaborato verrà attuata una classificazione dei ciclisti sulla base del genere e dell'età, ed in lavori successivi si potrà valutare come variano i tempi simulati dei ciclisti una volta inserita la domanda veicolare.

Il capitolo è stato diviso in quattro paragrafi, il primo riguarda le micro-simulazioni su larga scala, il secondo l'interazione ciclista-automobile, il terzo i campi di applicazione delle tracce GPS per la mobilità ciclabile, infine il quarto riguarda il map-matching.

2.1 MIRCO-SIMULAZIONE SU LARGA SCALA

In letteratura sono presenti numerose trattazioni riguardanti le micro-simulazioni su larga scala, ma focalizzando l'attenzione su quelle che comprendono il modo di trasporto bicicletta si trovano pochissimi esempi.

Nella città di Bologna, è stato costruito uno scenario che include autoveicoli, biciclette, scooter, autobus e pedoni, in cui è stata simulata un'ora di punta [10].

Va però segnalato che per quanto riguarda il modo bicicletta non è stata attuata alcuna parametrizzazione del ciclista sulla base del genere e dell'età, andando a considerare i ciclisti come un'entità unica.

A partire da queste considerazioni si è deciso, nel seguente elaborato di classificare i ciclisti sulla base del genere e dell'età, va rimarcato come tale argomento sia ad oggi ancora inesplorato in letteratura scientifica.

2.2 INTERAZIONE CICLISTA AUTOMOBILE

A causa delle recenti crisi economiche, della pandemia causata dal COVID-19, che ha allontanato molte persone dal trasporto pubblico locale e dei benefici fisici, l'utilizzo delle biciclette è aumentato negli ultimi anni, comportando un aumento delle interazioni tra auto-bici in area urbana.

In letteratura sono presenti numerosi studi che cercano di descrivere il fenomeno sotto diversi punti di vista, in maniera tale da aiutare i progettisti delle infrastrutture ad attuare scelte in funzione della sicurezza, ad esempio, osservando un caso studio in Svezia [4] si cerca di descrivere le interazioni nelle rotonde. I risultati mostrano che la probabilità di conflitto è influenzata in modo diverso a seconda dell'utente (ciclista o conducente) che arriva per primo nella zona di interazione e che questa dipende dalla velocità del veicolo e dalla vicinanza del ciclista.

Altri studi [5] descrivono l'interazione bici-automobile nelle sezioni di mezzera in caso di traffico misto, cercando di analizzare la distanza laterale di sorpasso e la percezione di comfort del ciclista, analizzando sei sezioni nella città di Ottawa, Canada. Dai risultati si è osservato che la distanza media dei ciclisti dal bordo strada è di 0.57 m. La distanza di sorpasso laterale è direttamente correlata con la velocità dell'automobile, la larghezza della corsia e la distanza della bicicletta dal bordo, mentre è inversamente correlata alla densità di traffico e la velocità della bicicletta, inoltre il 90% dei sorpassi eccede la distanza laterale di 1.23m.

I fattori che caratterizzano il comfort percepito dai ciclisti risultano essere la velocità delle automobili, la velocità del ciclista, la densità di traffico, la larghezza della corsia ed il numero di corsie.

In un'analisi su tre sezioni della rete di Bologna [6] è stata valutata l'interazione tra ciclisti e pedoni in caso di piste ciclabili in sede separata e di ciclisti e veicoli motorizzati in strada. Dai risultati emerge che il disturbo

causato dai pedoni è molto frequente ma associato ad una modesta riduzione di velocità, mentre i disturbi generati dal traffico stradale sono relativamente bassi ma comportano maggiori riduzioni di velocità del ciclista.

2.3 GPS DATA E TRAFFICO CICLABILE

Negli ultimi anni i metodi basati sulla tecnologia GPS sono aumentati in maniera esponenziale, includendo anche il campo del traffico ciclabile.

Rispetto ai sistemi manuali o automatici di rilevamento dei flussi ciclabili, la tecnologia GPS permette di collezionare in un breve periodo un numero molto elevato di dati riguardanti il traffico (big data), inoltre, tale tecnologia permette di avere informazioni non solo sulla singola sezione di rilevamento, ma sull'intero viaggio dell'utente, ottenendo importanti informazioni relative alle preferenze nella scelta dei percorsi da parte dei ciclisti.

La possibilità di poter ottenere le tracce GPS facilmente mediante un'applicazione su smartphone, contribuisce ad ampliare il numero di dati ottenuti.

In letteratura sono presenti numerosi studi che utilizzano tale tecnologia al fine di ottenere differenti scopi, nella città di Cracovia [6] è stata attuata una stima del traffico ciclabile di un bike-sharing (Wavelo) mediante tracce GPS, utilizzando un metodo di analisi a due fattori di varianza (ANOVA).

Nella città di Bologna sono stati effettuati numerosi studi mediante tale metodologia grazie alle iniziative lanciate dal comune di Bologna, come Bella Mossa (BM) ed European Cycling Challenge (ECC), al fine di incentivare la mobilità ciclabile. Tali iniziative hanno permesso ai cittadini di scaricare un'applicazione per smartphone su base volontaria con lo scopo di partecipare a dei concorsi, permettendo di registrare le tracce GPS dei viaggi effettuati.

Una prima applicazione ha riguardato la ricostruzione del profilo di velocità del ciclista [7] e mediante l'utilizzo di una dettagliata rete della città, importanti indicatori, come la velocità in movimento, il tempo medio di attesa nelle intersezioni ed il tempo di attesa per ogni manovra nelle intersezioni, sono stati ottenuti dal profilo di velocità, al fine di ottenere parametri utili ad analizzare la rete e calibrare i modelli di scelta del percorso.

I risultati hanno evidenziato che il tempo medio di attesa mediamente rappresenta il 15% di durata del viaggio totale, ma differisce notevolmente tra i ciclisti e il tipo di svolta, questo suggerisce che il comportamento dei ciclisti varia notevolmente sulla base dell'attitudine individuale (spericolato, corretto, attento).

Sempre nella città di Bologna è stata effettuata un'analisi della domanda di trasporto ciclabile al fine di quantificare le carenze della rete dal punto di vista ciclabile [8]. La metodologia utilizzata è basata su una combinazione di conteggio di traffico e l'ausilio di tracce GPS su cui è stato effettuato un map-matching sulla rete di Bologna.

A causa dell'aumento della congestione di numerose aree urbane, la strategia bici è diventata un'arma per mantenere accettabili i livelli di accessibilità di queste zone. Nella città di Minneapolis (USA) [9] è stato sviluppato un modello che utilizza le tracce GPS al fine di prevedere la velocità dei ciclisti lungo differenti tipologie di infrastrutture (strada, sede propria e traffico misto). Sono stati considerati differenti fattori che possono influenzare la velocità del ciclista, come le caratteristiche del viaggio, il genere, la presenza di una pista ciclabile.

2.4 MAP MATCHING

Risulta necessario un approfondimento teorico riguardante la tecnica del map-matching, largamente utilizzata nel corso della trattazione e necessaria per la generazione della domanda ciclabile.

Il map-matching consente di integrare un determinato record di coordinate GPS e i dati relativi alle mappe digitali della rete stradale, al fine di accoppiarli agli archi del grafo in maniera da riuscire a individuare la reale posizione spazio-temporale tenuta dai veicoli (biciclette) e ricostruire correttamente l'itinerario percorso.

La posizione occupata da un utente durante un viaggio è identificata da un punto di coordinate note (punto GPS), l'insieme dei punti rappresenta la traccia GPS, pertanto lo scopo è quello di ricostruire l'intero viaggio del ciclista sfruttando le informazioni a disposizione.

Il sistema GPS è soggetto a diverse tipologie di errore, pertanto non è possibile avere una corretta corrispondenza tra la mappa geo-referenziata dell'area di studio ed i punti di coordinate note, per tale motivo è necessario usufruire di algoritmi che riescano a ricostruire, nel modo migliore possibile, tale correlazione.

L'algoritmo utilizzato nel corso della trattazione è già presente all'interno del software SUMOPy, tale algoritmo è di tipo topologico-probabilistico, basato sulle ipotesi multiple, dove a ciascuna di esse si attribuisce uno score, il procedimento consiste nel mantenere in memoria un certo numero di possibili alternative, andando a scartare quelle con un punteggio peggiore, fino all'individuazione topologica dell'itinerario di minimo costo.

I costi attribuiti a ciascuna alternativa sono definiti sulla base del criterio della distanza geometrica euclidea del punto GPS dall'arco, delle caratteristiche di parallelismo dei percorsi e di accessibilità degli archi e di minor lunghezza del percorso seguito a partire dal nodo di partenza.

Il procedimento consiste nell'import delle tracce GPS all'interno del software, successivamente considerando un generico viaggio:

- A partire dal primo punto GPS, si procede alla determinazione di tutti i possibili archi di partenza dell'itinerario che si vuole ricostruire, per ciascun arco della rete si definisce un buffer, a discrezione del progettista, e si vanno ad individuare tutti gli archi per cui il punto analizzato ricade all'interno del relativo buffer.
- Una volta determinati i potenziali archi iniziali dell'itinerario si procede considerando il punto GPS successivo e, per ognuno, se ne determina l'appartenenza o meno all'arco, mediante il criterio della proiezione ortogonale e sulla base dell'area del buffer.

Si possono verificare più casi differenti:

- Se il punto analizzato può essere attribuito all'arco considerato: si definisce un nuovo itinerario composto dall'arco iniziale stesso e se ne calcola il costo;

- Se il punto GPS ricade al di fuori dell'arco iniziale si procede prendendo in analisi tutti gli archi successivi e, per ognuno, si calcola il costo dei possibili itinerari di cui fanno parte.

Tale procedimento viene ripetuto per tutti i potenziali itinerari, ovvero per tutti i possibili archi di partenza e per quelli che da essi si diramano (qualora il punto GPS ricada esternamente dall'arco iniziale) nel caso di passo iniziale e per tutti quelli via via consecutivi nel caso di passi seguenti, fino ad un numero massimo di itinerari tenuti in memoria, stabilito dall'utilizzatore del programma.

- Definiti i possibili itinerari, si procede alla loro classificazione sulla base del costo crescente. Il costo del generico itinerario viene calcolato come una combinazione di errore associato all'itinerario, dovuto essenzialmente a difetti geometrici, e costo dello stesso, data dal prodotto fra la lunghezza dell'itinerario fino al punto considerato (lunghezza cumulata) e il peso ad essa associato.

Infine, l'algoritmo prosegue l'analisi considerando tutti i punti GPS della traccia e, giunto al termine, sceglie l'itinerario di minimo costo fra quelli individuati.

In questo modo è possibile ricavare, a meno di errori di modellazione della rete, il percorso più simile possibile a quello seguito realmente dall'utente durante il suo spostamento per cui sono stati registrati i dati GPS.

2.5 RICHIAMI TEORICI

2.5.1 Micro-simulazione: veicolo e conducente

La micro-simulazione permette di rappresentare la dinamica del moto di diversi tipi di veicoli, tra i quali, automobili, autocarri, autobus e biciclette.

La modellazione del comportamento dei singoli utenti nella rete è un aspetto di fondamentale importanza nell'ambito della micro-simulazione.

Essa, infatti, permette di intervenire sul grado di reattività dei singoli utenti, andando ad influenzare il comportamento degli individui della popolazione virtuale (gap acceptance, distanza dal veicolo precedente, scelta

ed utilizzo delle corsie), permette inoltre di intervenire sul grado di conoscenza della rete.

Nella micro-simulazione, autista e veicolo costituiscono un unico modello chiamato Drive/Vehicle Unit (DVU) (Fig.1), caratterizzato da vari parametri:

- Massima accelerazione/decelerazione.
- Velocità massima.
- Lunghezza, larghezza e altezza del mezzo.
- Tipo di algoritmo per controllo del conducente-veicolo.
- Parametri dell'algoritmo di controllo (es. tempo di reazione del conducente, impazienza, ecc.).

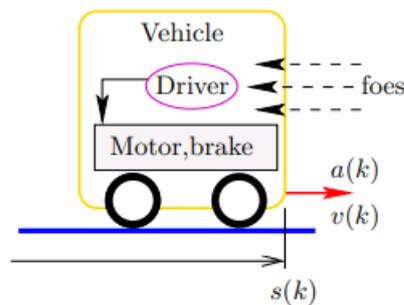


Figura 1 - modello DVU

Nell'ambito della micro-simulazione si fa avanzare ciascun veicolo o pedone istante per istante, con intervalli temporali costanti: nell'intervallo k il tempo di simulazione $t_k = K t_s$ dove t_s è un tempo di campionamento costante.

Come generalmente avviene nella realtà, nel modello DVU è il conducente che ha il controllo del veicolo e può decidere di accelerare, frenare e quali manovre compiere.

Il conducente individua potenziali ostacoli, stima la distanza fra essi ed il proprio veicolo e compie la decisione di frenare o accelerare.

La decisione viene presa in ogni istante k , pertanto la velocità v_k e la posizione del veicolo s_k variano con il tempo $t_k = K t_s$ (Fig.2).

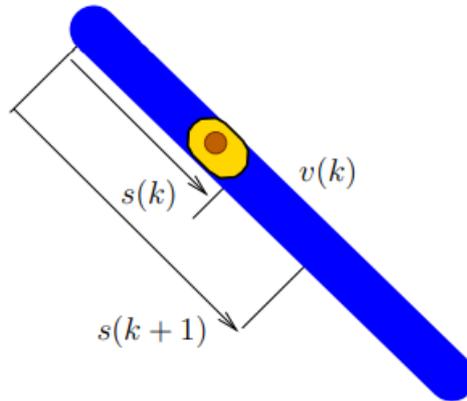


Figura 2 - Step nella simulazione di un veicolo

Esistono vari modelli che differiscono tra di loro sulla base della determinazione dell'accelerazione a_i .

Una volta determinata l'accelerazione dal modello di controllo del veicolo a_i , la velocità v_{ki} e la posizione del veicolo s_{ki} possono essere aggiornate per lo step $k \rightarrow k + 1$ (Fig.3).

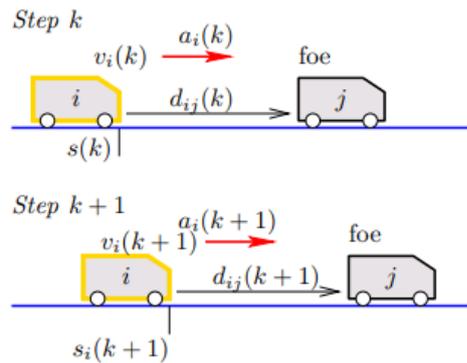


Figura 3 - Aggiornamento dello stato del veicolo

Il micro-simulatore ripete l'operazione per ogni istante discreto $t = K t_s$, dove $K = 1, \dots, n$ per ogni veicolo i della rete, si riporta di seguito (Fig.4) un diagramma dell'aggiornamento dello step.

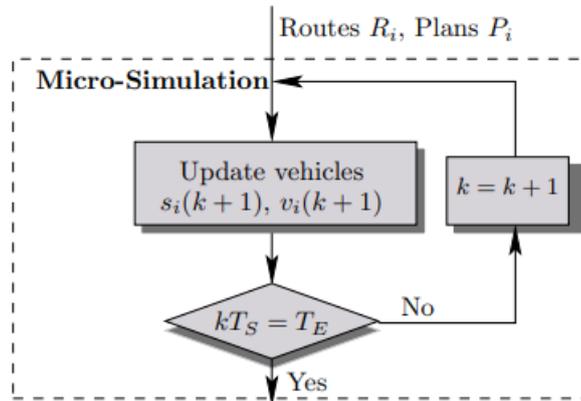


Figura 4 - Aggiornamento dello stato dei veicoli nella rete

In realtà il micro-simulatore esegue durante ogni iterazione anche una serie di processi ausiliari, come mostrato in Fig.5. Si elencano più importanti processi ausiliari:

- Update traffic lights: iterazione dei cicli semaforici
- Update train signalling: aggiornamento dei segnali ferroviari
- Update battery charges: aggiornamento del carico delle batterie dentro veicoli elettrici
- Update network load: aggiornamento del calcolo dei valori medi per arco (flussi, densità, velocità) e valori sui viaggi (durata del viaggio, etc.)
- Update emission models: aggiornamento dei valori di emissioni e consumo di carburante per arco e per viaggio.
- Update noise models: aggiornamento dei valori di rumore per arco.
- Custom update: permette di interagire ed intervenire nella simulazione in corso, ad esempio di cambiare cicli semaforici o itinerari dei veicoli in tempo reale.

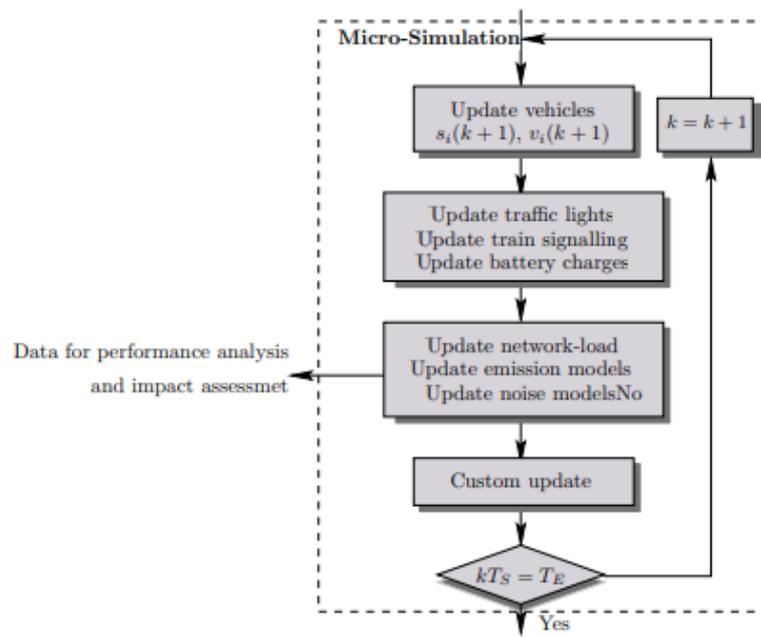


Figura 5 - Diagramma fiume della micro-simulazione con processi ausiliari

3 SOFTWARE

3.1 MATSIM

MATsim è un software open-source per attuare micro-simulazioni agent-based nell'ambito dei trasporti, ovvero dove ogni elemento della popolazione viene rappresentato come un oggetto software chiamato agente, il software è basato su un principio co-evolutivo, dove ogni agente cerca di ottimizzare le attività giornaliere programmate.

MATsim è tipicamente utilizzato per simulare un singolo giorno, anche se è possibile implementare delle applicazioni multi-days.

Il software richiede in input i seguenti dati:

- Rete stradale
- Dati della popolazione
- Mobility behaviour (es. diario giornaliero)
- Programmazione del trasporto pubblico
- Facilities
- Veicoli privati

MATsim è utilizzato in tutto il mondo per attuare modelli di trasporti sulla base del caso di studio, ad esempio, la pianificazione dei trasporti di interesse città o nazioni.

In letteratura MATsim trova applicazioni in diversi ambiti dei trasporti, tra cui la calibrazione comportamentale e l'analisi di una micro-simulazione su larga scala della città di Zurigo [1].

Il software trova applicazione anche nel campo dei trasporti pubblici, sempre nel caso di Zurigo [2], dove è stata progettata la rete di trasporto pubblico mediante micro-simulazioni agent-based.

Il programma è stato utilizzato per simulare il traffico di numerose città, come, Dakar (Senegal), Seoul (Corea del Sud), Poznan (Polonia) e Berlino (Germania).

Uno dei vantaggi di MATsim è quello di avere una velocità di esecuzione della simulazione molto elevata, la spiegazione di tale beneficio risiede nel fatto che il modello stradale è più semplice rispetto ad altri software, ad

esempio, sul software SUMO, viene considerata anche la distanza di sicurezza.

Una caratteristica di MATsim è che non è prevista interazione tra il flusso di vetture motorizzate con i mezzi del trasporto pubblico, ciclisti e pedoni, pertanto, questi vengono considerati in parallelo rispetto al traffico stradale.

3.2 TRANSIMS

TRANSIMS è un micro-simulatore activity-based, pertanto i viaggi degli utenti partono dall'analisi del diario giornaliero, su cui vengono riportate le attività svolte, gli orari, i modi di trasporto ed i percorsi scelti per realizzare lo spostamento tra le attività.

Il software si basa su 4 moduli principali:

- Population synthesizer: si occupa di creare la popolazione mediante i dati dei censimenti;
- Activity generator: crea le attività della popolazione sulla base di sondaggi;
- Route planner: crea gli itinerari sulla base delle attività;
- Micro-simulator: Esegue i piani di ogni viaggio all'interno della rete e sviluppa i risultati.

TRANSIMS differisce dagli altri software in quanto a previsione della domanda nei suoi concetti sottostanti e nella struttura, infatti, queste differenze riguardano principalmente una coerente e continua rappresentazione del tempo, una dettagliata rappresentazione delle persone e delle famiglie ed un routing dipendente dal tempo.

Le principali applicazioni attuate mediante il software risultano essere i casi studio di Portland e Dallas.

3.3 VISSIM

PTV VISSIM è un software di micro-simulazione sviluppato da Vision Traffic Suite di PTV.

VISSIM è il micro-simulatore più utilizzato a livello mondiale e non è open-source, esso permette di simulare complesse interazioni tra veicoli,

modella domanda, offerta e comportamenti e simula nuove forme di mobilità come il CAV ed il MaaS.

La peculiarità di questo software che lo contraddistingue dagli altri programmi è il modello ad oggetti componenti per l'interfaccia di programmazione, che permette agli utenti di sviluppare ed implementare le proprie applicazioni utilizzando diversi linguaggi di programmazione.

3.4 SUMO

Per lo svolgimento del seguente elaborato si è deciso di utilizzare il software di simulazione SUMO (Simulation of urban mobility), corredato dall'interfaccia grafica SUMOPy, sviluppata dal prof J. Schweizer (Università di Bologna – Alma Mater Studiorum).

SUMO è un software opensource che permette di effettuare micro-simulazioni, con la possibilità di rappresentare con un elevato grado di dettaglio le interazioni tra gli utenti e gli elementi della rete di trasporto.

Inoltre, il software presenta una serie di tools che permettono di esercitare le simulazioni, come il DUAROUTER e JTRROUTER che permettono la ricerca del percorso, ACTIVITYGEN per la generazione della domanda basata sulle attività, NETEDIT per la modifica, la visualizzazione e l'importazione della rete ed EMISSIONSMAP e EMISSIONSDRIVINGCYCLE per il calcolo delle emissioni.

3.4.1 SUMOPy

Le estensioni descritte nel paragrafo precedente possono essere utilizzate mediante l'interfaccia grafica di SUMOPy (Fig.1), la quale facilita l'uso del simulatore tramite la presenza di un ambiente scripting, consentendo operazioni come l'importazione delle reti di trasporto tramite Openstreetmap, la creazione di scenari, la generazione della domanda disaggregata, le simulazioni di traffico e la visualizzazione dei dati ottenuti (Fig.4).

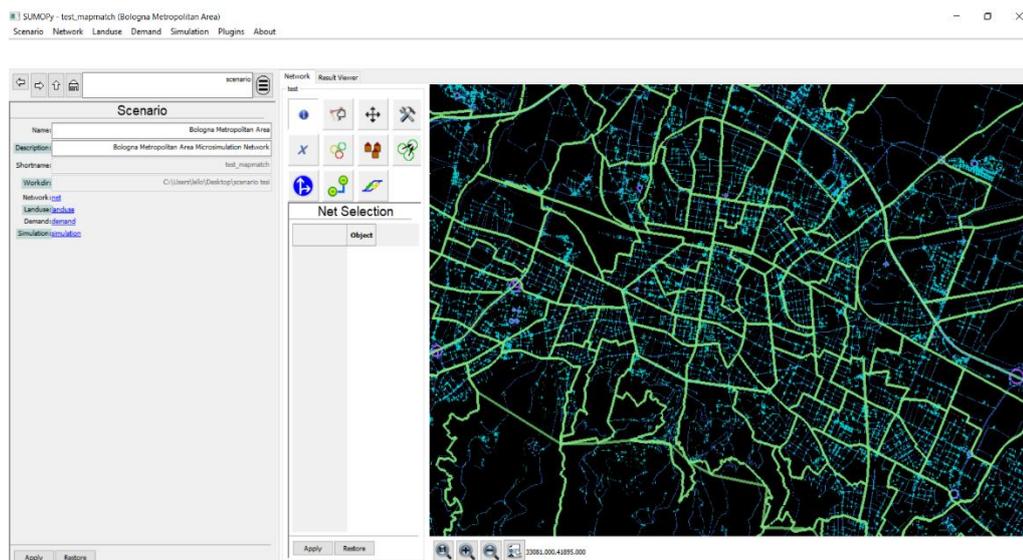


Figura 6 - Interfaccia grafica SUMOPy

Dalla figura si nota che sono presenti nel software le seguenti sezioni:

- **SCENARIO:** Permette la creazione di scenari o l'apertura di file scenario già esistenti;
- **NETWORK:** Racchiude tutte le informazioni relative alla rete (Fig.2), permette l'import della rete da Openstreetmap (OSM) in formato osm.xml o da SUMO in formato net.xml e permette il collegamento con NETEDIT (Fig.3) di SUMO per la modifica della rete;

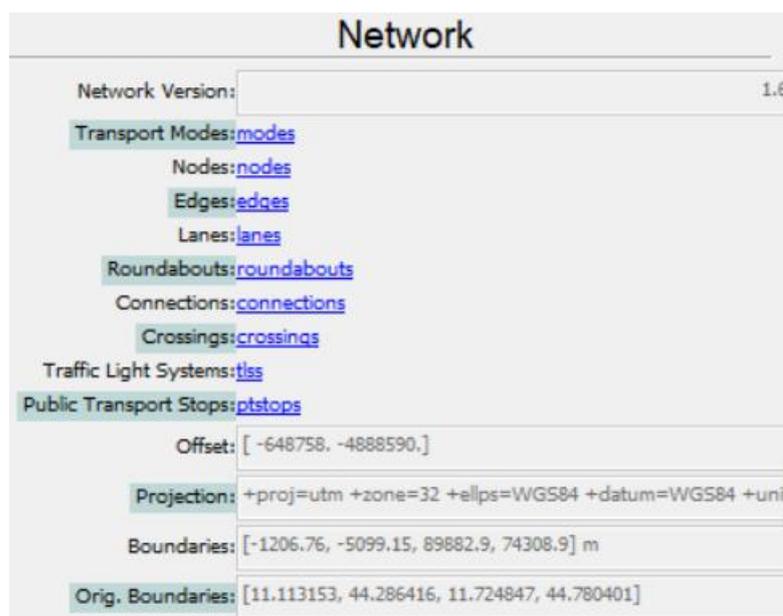


Figura 7 – Elementi della rete

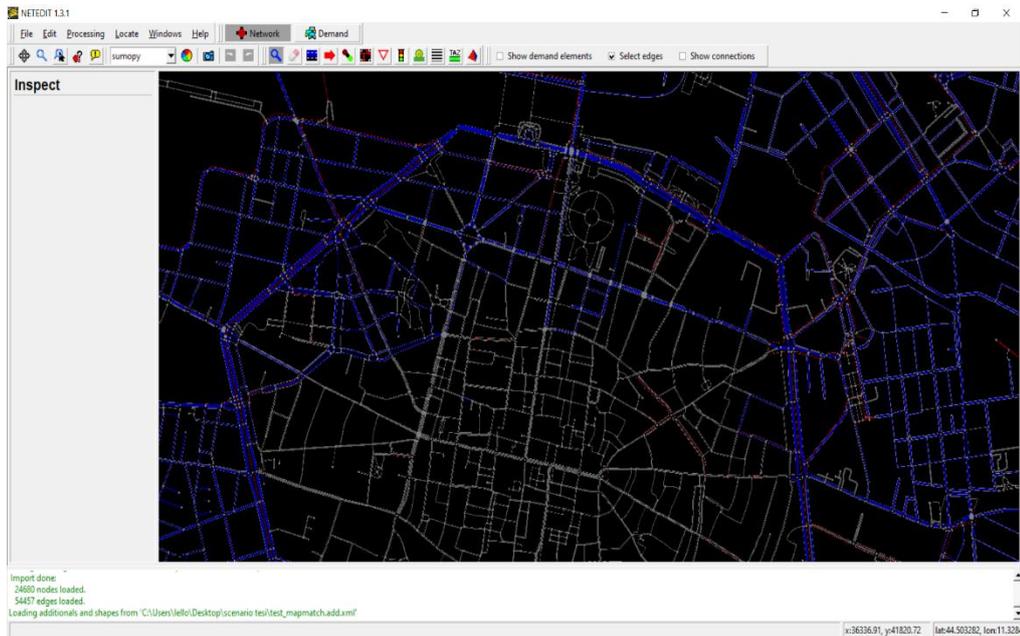


Figura 8 - Interfaccia Netedit

- **LANDUSE:** Gestisce il *landuse*, come la presenza di edifici, mappe, parcheggi e zone;
- **DEMAND:** Permette di creare la domanda di trasporto mediante il metodo dei conteggi dei flussi, il metodo dei flussi origine-destinazione (OD) e la domanda basata sulle attività. Inoltre, consente di esplorare i database relativi alla popolazione virtuale;
- **SIMULATION:** Permette di effettuare simulazioni (microscopiche, mesoscopiche e macroscopiche), mediante il collegamento al software SUMO e la visualizzazione dei risultati;
- **PLUGINS:** Consente l'import ed il controllo delle tracce GPS, la generazione della domanda ciclabile, il map matching delle tracce GPS e l'esecuzione di filtri geometrici e post map-matching al fine di scartare le tracce GPS non utili al caso studio.

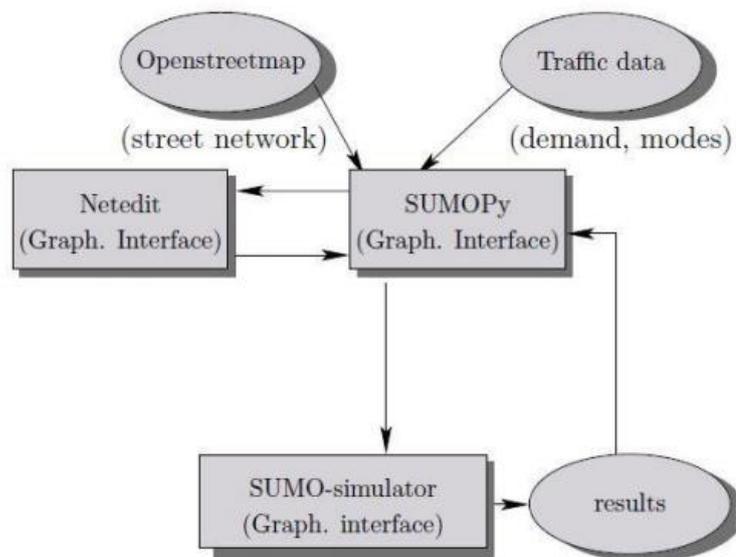


Figura 9 - Funzionamento SUMOPy

3.4.2 La rete di trasporto su SUMO

In generale, nell'ambito della micro-simulazione è necessario utilizzare un modello di rete con un elevato grado di dettaglio al fine di realizzare simulazioni il più realistiche possibili, classificando ogni arco in base alla propria funzione.

Inoltre, si introducono diversi parametri come l'accessibilità agli archi, la velocità massima consentita, larghezza delle corsie, ecc. Questi elementi devono essere modificati opportunamente al fine di rappresentare perfettamente le condizioni reali.

In analogia al modello di una rete di trasporto macroscopico, una rete di trasporto definita all'interno di un software di micro-simulazione, nel caso specifico SUMO, è costituita da un grafo in due dimensioni composto da archi orientati, formati da una o più corsie e da nodi, che rappresentano le intersezioni o i punti terminali degli archi. Per una micro-simulazione sono importanti i numerosi attributi che appartengono ad ogni elemento della rete.

Si vanno quindi ad elencare alcuni elementi fondamentali al fine dello svolgimento di una micro-simulazione, che compone il sistema domanda-offerta:

- **Nodo:** Gli attributi più significativi di un nodo sono le coordinate (x,y) del centro del nodo, che sono geo-referenziate, o vengono

proiettate su un sistema di coordinate locali e la tipologia di nodo (incrocio con diritto di precedenza, incrocio semaforizzato, incrocio con obbligo di stop, ecc.).

Il nodo, inoltre, è a sua volta composto da connettori, nel caso in cui il nodo faccia parte di un sistema semaforico, andrà a contenere anche informazioni relative alle fasi del ciclo semaforico;

- Arco: Gli attributi di un arco, oltre ai nodi di origine e destinazione, sono la lunghezza dell'arco e la priorità.

In particolare, in SUMO la priorità varia da 1 a 10, dove il valore 0 rappresenta la tipologia di arco con la priorità più bassa (es. sentieri in un parco), e priorità 10 significa la priorità più alta (es. autostrada).

- Corsia: Ogni arco è composto da una o più corsie, pertanto, le caratteristiche di un arco vengono determinate fundamentalmente dalle caratteristiche delle corsie che lo compongono.

Ogni corsia è caratterizzata dai seguenti attributi:

- Larghezza
 - Velocità massima consentita
 - Limiti di accesso per alcune tipologie veicolari.
- Connettori: Un connettore è un collegamento tra due corsie, una di ingresso ed una di uscita, gli attributi più significativi di un connettore sono:
 - Larghezza
 - Velocità massima consentita
 - Limiti di accesso per alcune tipologie veicolari.

4 METODOLOGIA

L'elaborato ha un duplice scopo, il primo è quello di andare ad attuare una parametrizzazione dinamica dei ciclisti sulla base del genere e dell'età, il secondo riguarda la ricostruzione, all'interno del micro-simulatore, dei viaggi reali effettuati dagli utenti, infatti è bene ricordare che la generazione della domanda ciclabile avviene a partire da tracce GPS, pertanto da viaggi realizzati da ciclisti reali. Dai risultati della micro-simulazione è possibile valutare la differenza tra il viaggio reale ed il corrispettivo simulato dall'iesimo ciclista.

In questo capitolo verranno brevemente descritte le principali operazioni effettuate nel corso della trattazione al fine di raggiungere tali scopi, anche grazie all'ausilio di un diagramma di flusso.

Il primo passo dello studio è stato quello di modificare la rete di Bologna sotto forma di digital twin, disponibile grazie al contributo del lavoro di professori, tirocinanti e tesisti, sul quale è stato svolto un accurato editing della rete (Capitolo 5) al fine di raggiungere un maggior grado di precisione nei risultati.

Sulla rete è stata definita l'area di studio ed è stato attuato l'import delle tracce GPS ed il map matching, indispensabili al fine della generazione della domanda ciclabile a partire dai viaggi reali.

Questo procedimento ha permesso la creazione dello *scenario TEST*, sul quale sono state attuate diverse simulazioni variando il *vehicle type* (Vtype) delle biciclette, al fine di attuare una parametrizzazione dinamica dei ciclisti in funzione del parametro v_{max} (velocità massima), che ha permesso di suddividere il comportamento degli utenti, sulla base del genere e dell'età, mediante il confronto tra le velocità medie dei viaggi reali e le velocità medie dei viaggi simulati, in particolare, si è fatto uso di una funzione obiettivo al fine di individuare il valore di v_{max} più rappresentativo del campione di riferimento (Capitolo 6).

Infine, sono stati creati tre scenari differenti, nei quali è stata caricata una domanda ciclabile reale, mediante il confronto dei flussi simulati ed i flussi reali, ricavati da rilievi manuali.

Nel primo scenario (Scenario 1), si è fatto uso di un unico Vtype avente una v_{max} ricavata mediante funzione obiettivo.

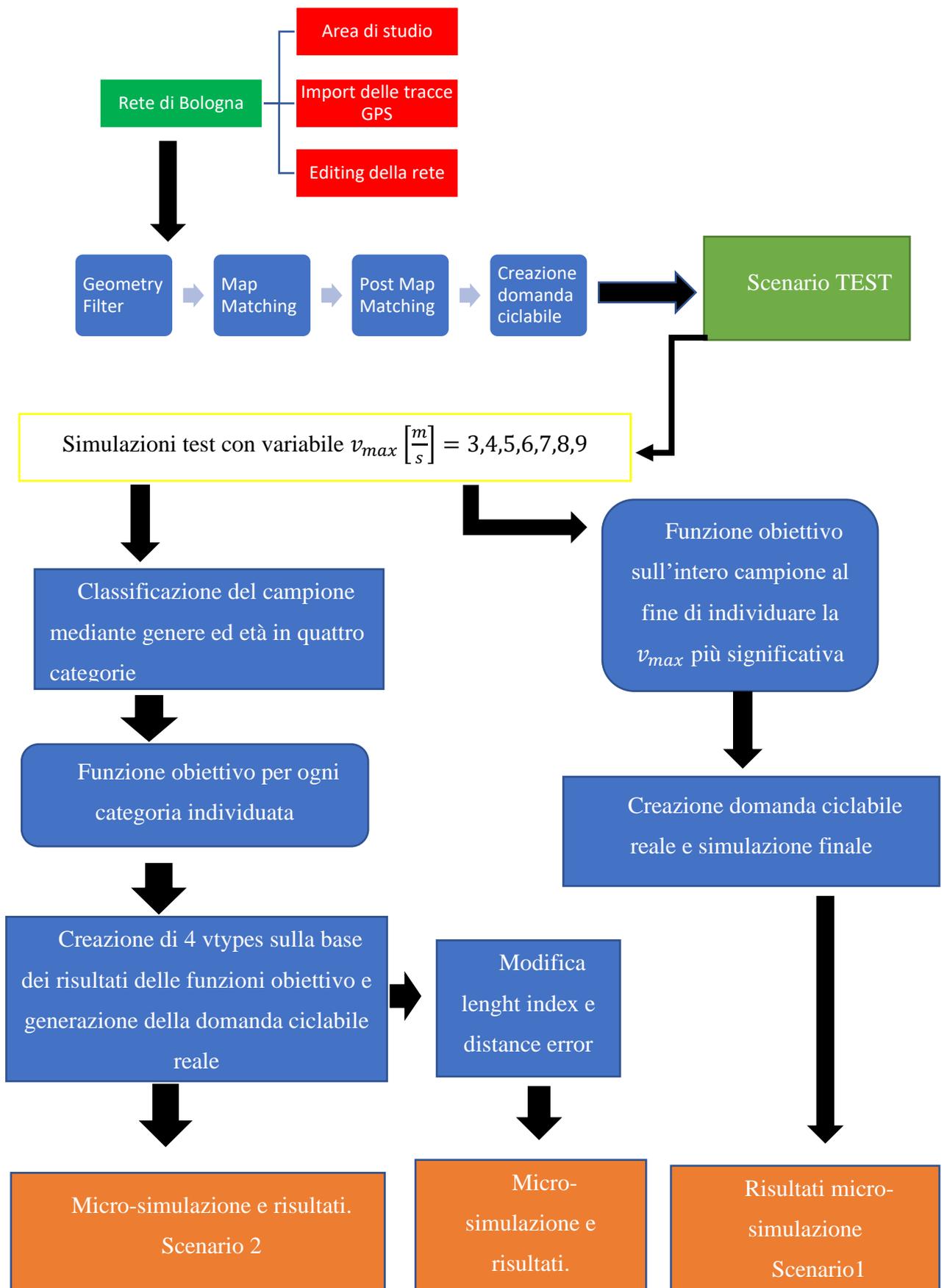
Nel secondo scenario (Scenario 2), sono stati utilizzati quattro Vtype differenti, sulla base della classificazione ottenuta dalla parametrizzazione dinamica dei ciclisti.

Nel terzo scenario (Scenario 3), è stata utilizzata la stessa classificazione dello scenario 2, ma sono state filtrate in maniera più stringente le tracce GPS utilizzate al fine delle simulazioni.

Infine, sono state effettuate le simulazioni finali per ognuno dei tre scenari, e sono stati analizzati e confrontati i risultati.

In particolare, nei risultati verranno valutate sia le grandezze generali, mediante il confronto dei tempi medi dei viaggi simulati con quelli reali, sia il confronto tra le singole tracce GPS simulate con quelle reali.

Nella pagina successiva si riporta il diagramma di flusso.



5 EDITING DELLA RETE

Nelle micro-simulazioni di traffico, il modello di offerta di trasporto rappresenta un elemento fondamentale, in quanto attuare simulazioni in un modello digitale il più possibile aderente alla realtà permette di avere dei risultati migliori e maggiormente affidabili.

Nel presente elaborato è utilizzato un modello dell'intera rete stradale della città di Bologna, inizialmente ricavata dal sito web OpenStreetMap (OSM) per la creazione dello scenario durante la prima fase, successivamente numerosi tesisti, tirocinanti e collaboratori hanno attuato modifiche e miglioramenti per rendere il modello il più realistico possibile.

Nel corso dello svolgimento dell'elaborato si è dedicato ampio spazio all'editing della rete al fine di apportare ulteriori migliorie, pertanto nel seguente capitolo verranno illustrate inizialmente le operazioni necessarie all'individuazione degli errori e successivamente le operazioni attuate per risolvere gli errori presenti nella rete.

5.1 INDIVIDUAZIONE DEGLI ERRORI

Per l'individuazione degli errori è stato necessario utilizzare delle tracce GPS ricavate in occasione dell'iniziativa Bella Mossa, promossa dal comune di Bologna al fine di incentivare la mobilità sostenibile.

Al fine di utilizzare le tracce GPS registrate è necessario introdurre il concetto di import delle tracce GPS nella rete.

5.1.1 Import delle tracce GPS

Al fine della trattazione è stato necessario effettuare l'import delle tracce GPS registrate durante l'iniziativa Bella Mossa (BM), in questo modo sarà possibile usare i dati raccolti all'interno del software SUMOPy.

BM si basa sulla raccolta di dati GPS per gli spostamenti ciclabili e non solo, infatti raccoglie dati GPS per spostamenti in autobus, treno, piedi, car-sharing, car-pooling, tramite applicazioni per smartphone.

Questi dati sono raccolti direttamente dagli utenti che partecipano alle iniziative dal momento in cui attivano la propria geolocalizzazione all'interno dell'applicazione.

Di seguito vengono riportati i passaggi effettuati sul programma SUMOPy per attuare l'import delle tracce GPS:

plugins-> Mapmatching -> Import -> BellaMossa .

In questo modo sarà possibile accedere all'interfaccia del Bellamossa Trace Importer, dove è possibile inserire i parametri desiderati per attuare l'import delle tracce.

Points File:	
User Info File:	
Trip Info File:	
Year Of Bellamossa:	2017
Select Mode:	bicycle
Min. Trip Distance:	100.0 m
Max. Trip Distance:	25000.0 m
Min. Trip Duration:	30.0 s
Max. Trip Duration:	999999.0 s
Min. Av. Trip Speed:	1.0 m/s
Max. Av. Trip Speed:	14.0 m/s
From Morning Hour:	7.0 h
To Morning Hour:	10.0 h
From Evening Hour:	12.0 h
To Evening Hour:	12.0 h
Weekdays:	Monday-Friday
Weekday:	all
Month:	<input type="checkbox"/>
Months:	October
Day:	<input type="checkbox"/>
Days:	1

Figura 10 - Import tracce GPS

Al fine di un corretto import delle tracce GPS è necessario utilizzare due file .csv uno facente riferimento agli utenti, ed uno relativo ai viaggi, da inserire rispettivamente nelle sezioni **User Info File** e **Trip Info File**.

Risulta possibile inserire nella sezione **Points File** i punti GPS che fanno riferimento ad un determinato periodo temporale compreso tra Maggio 2017 e Settembre 2017, inoltre è necessario fare particolare attenzione ad inserire come **Preferred Mode** la bicicletta per un corretto import dei punti GPS.

Effettuato correttamente l'import delle tracce GPS sarà possibile prendere visione e gestire il database corrispondente (Fig.11) direttamente sul software SUMOPy, andando a svolgere le seguenti operazioni:

plugins-> Mapmatching -> Browse -> Trips.

	ID GPS Trip	Sel.	timestamp [s]	GPS duration [s]	GPS distance [m]	Av. speed [m/s]	Max. speed [m/s]	Type	Purpose	Devices	D matched route
1	2908851	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863284	2905.000000	3259.576416	1.122057	9.687531	bicycle	unknown	unknown	1
2	2908886	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863547	351.000000	1359.729126	3.873872	6.541194	bicycle	unknown	unknown	2
3	2908901	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863673	1154.000000	4791.268066	4.151879	8.471125	bicycle	unknown	unknown	3
4	2908906	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863703	955.000000	3316.166016	3.472425	7.123724	bicycle	unknown	unknown	4
5	2908925	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863863	1107.000000	3425.394531	3.094304	10.602426	bicycle	unknown	unknown	5
6	2908947	<input checked="" type="checkbox"/>	1502863307	586.000000	4187.359375	7.145665	11.973993	bicycle	unknown	unknown	6
7	2908967	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864124	1526.000000	8441.734375	5.531936	8.794233	bicycle	unknown	unknown	7
8	2909011	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864344	299.000000	1328.316162	4.442529	5.640994	bicycle	unknown	unknown	-
9	2909024	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864447	1292.000000	5284.031250	4.089808	7.517685	bicycle	unknown	unknown	8
10	2909029	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864490	1505.000000	3836.138184	2.548929	6.528625	bicycle	unknown	unknown	9
11	2909088	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864722	645.000000	1047.424927	1.623915	5.246046	bicycle	unknown	unknown	10
12	2909097	<input checked="" type="checkbox"/>	1502864736	827.000000	3421.931641	4.137765	7.908233	bicycle	unknown	unknown	11
14	2909146	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865153	585.000000	1802.373413	3.080980	6.404721	bicycle	unknown	unknown	12
15	2909163	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865191	2008.000000	7164.890625	3.568173	8.753320	bicycle	unknown	unknown	13
16	2909190	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865406	1776.000000	2576.980957	1.451003	12.642020	bicycle	unknown	unknown	14
17	2909192	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865428	631.000000	1171.624146	1.856774	5.328372	bicycle	unknown	unknown	15
18	2909225	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865619	207.000000	772.304321	3.730939	7.602061	bicycle	unknown	unknown	16
20	2909236	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865700	827.000000	1962.959106	2.373590	6.754777	bicycle	unknown	unknown	17
21	2909252	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865263	467.000000	1646.082642	3.524802	8.604885	bicycle	unknown	unknown	18
23	2909280	<input checked="" type="checkbox"/>	1502866177	1398.000000	3129.083496	2.238257	6.871238	bicycle	unknown	unknown	19
24	2909286	<input checked="" type="checkbox"/>	1502866197	1474.000000	3151.927979	2.138350	8.618860	bicycle	unknown	unknown	20
25	2909320	<input checked="" type="checkbox"/>	1502866555	1709.000000	2994.734375	1.752331	9.346492	bicycle	unknown	unknown	21
26	2909403	<input checked="" type="checkbox"/>	1502867290	1163.000000	4762.848145	4.095312	11.134590	bicycle	unknown	unknown	22
27	2909410	<input checked="" type="checkbox"/>	1502867330	1146.000000	4747.059570	4.142286	7.990344	bicycle	unknown	unknown	23
28	2909415	<input checked="" type="checkbox"/>	1502867378	462.000000	1521.248047	3.292745	9.333288	bicycle	unknown	unknown	24
30	2909438	<input checked="" type="checkbox"/>	1502865496	1919.000000	3790.434326	1.975213	8.557304	bicycle	unknown	unknown	25

Figura 11 - Database tracce GPS

Nel database sono presenti numerose informazioni che saranno utili successivamente per valutare eventuali errori presenti nella rete.

Svolto con successo il processo di import delle tracce GPS è possibile procedere con il map-matching.

5.1.2 Map-matching

La tecnica del map-matching è stata utilizzata in questo elaborato per svolgere lavori differenti. Inizialmente, è servita come ulteriore verifica della rete, in quanto è stato possibile andare a correggere errori presenti all'interno

della rete. In un secondo momento, è risultata necessaria per la generazione della domanda ciclabile, come verrà spiegato in seguito.

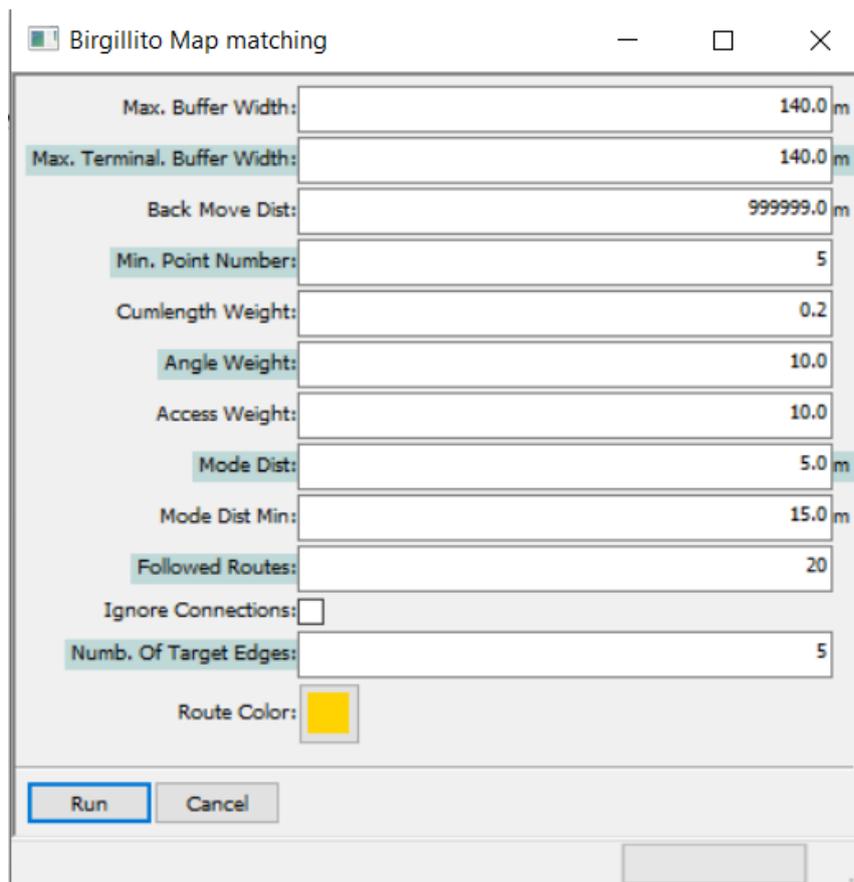
Dal punto di vista pratico è stato realizzato il map-matching di due campioni di tracce GPS ottenute dall'iniziativa BellaMossa (BM).

Il primo campione è costituito da 915 tracce GPS, mentre il secondo da 650 tracce GPS.

Al fine di utilizzare l'algoritmo per effettuare il map-matching sono state svolte le seguenti operazioni all'interno del software SUMOPy:

plugins -> mapmatching-> mapmatching -> match point to road network

A questo punto è possibile utilizzare i seguenti parametri (Fig. 12):



Parameter	Value
Max. Buffer Width:	140.0 m
Max. Terminal. Buffer Width:	140.0 m
Back Move Dist:	999999.0 m
Min. Point Number:	5
Cumlength Weight:	0.2
Angle Weight:	10.0
Access Weight:	10.0
Mode Dist:	5.0 m
Mode Dist Min:	15.0 m
Followed Routes:	20
Ignore Connections:	<input type="checkbox"/>
Numb. Of Target Edges:	5
Route Color:	Yellow

Figura 12 - Parametri Map Matching

Al fine di attuare correttamente l'operazione è necessario fare particolare attenzione alla voce **angle weight**, definita dal programma come: "Cost

function weight of angular coincidence”, in quanto variando tale valore possono esserci variazioni nel viaggio (GPS route).

In particolare, si riporta l’esempio della rotonda di Sant’Egidio, in cui si nota come nel caso di $\text{angle weight}=10$ si ha un viaggio (linea viola) che non corrisponde alla traccia GPS (punti in giallo), nonostante non siano presenti errori di rappresentazione della rete (Fig.13):

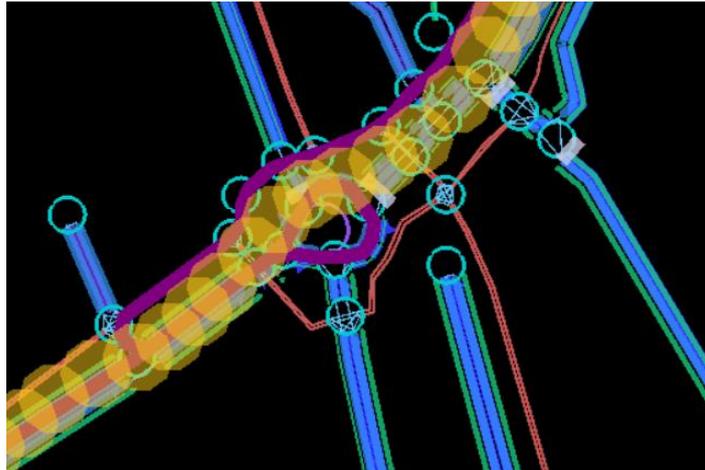


Figura 13 - Rotonda di Sant'Egidio $\text{angle weight}=10$

Andando a ripetere l’operazione del map matching, vista precedentemente, ma variando il valore dell’ $\text{angle weight}=100$ si risolve il problema senza andare a modificare la rete (Fig.14):

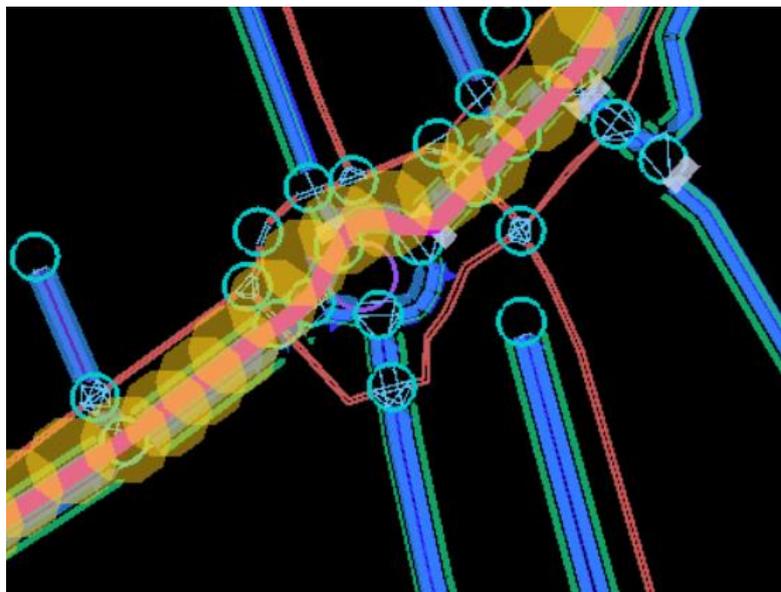


Figura 14 - Rotonda di Sant'Egidio $\text{angle weight}=100$

In questo caso si nota che il GPS route segue correttamente la traccia GPS.

Un'altra voce da tenere particolarmente in considerazione è *ignore connection*, spuntando la casella è possibile ignorare le connessioni, tale operazione è raccomandata nel caso di costruzione dei viaggi, mentre non è da spuntare nel caso in cui i viaggi, già costruiti, sono da utilizzare per simulazioni successive.

Come detto precedentemente, oltre a permettere la creazione della domanda, il map-matching consente di individuare errori presenti nella rete che possono contribuire a generare problematiche alla circolazione veicolare.

Gli errori che si possono riscontrare sono i seguenti:

- Correzione geometria delle rotonde;
- Completamento di alcune zone di bordo della rete: a causa dell'aumento delle dimensioni della rete virtuale di Bologna possono esserci zone in cui non sono presenti tutti gli archi e nodi;
- Eliminazione dei connettori errati;
- Eliminazione di corsie non esistenti nella realtà;
- Assenza di archi nella rete;
- Modifica della posizione di alcune piste ciclabili.

Al fine di individuare gli errori sopra descritti è possibile confrontare le tracce GPS (Fig.15) del campione analizzato con i corrispondenti viaggi creati (Fig.16), ed individuare le eventuali differenze mediante i parametri **length index [%]** e **distance error [m]**(Fig.17).

Il length index è il rapporto tra la distanza ottenuta collegando i singoli punti GPS della traccia e la distanza del viaggio corrispondente, mentre il distance error è la distanza media tra i punti GPS e l'arco di riferimento.



Figura 15 - Esempio di traccia GPS su SUMOPy

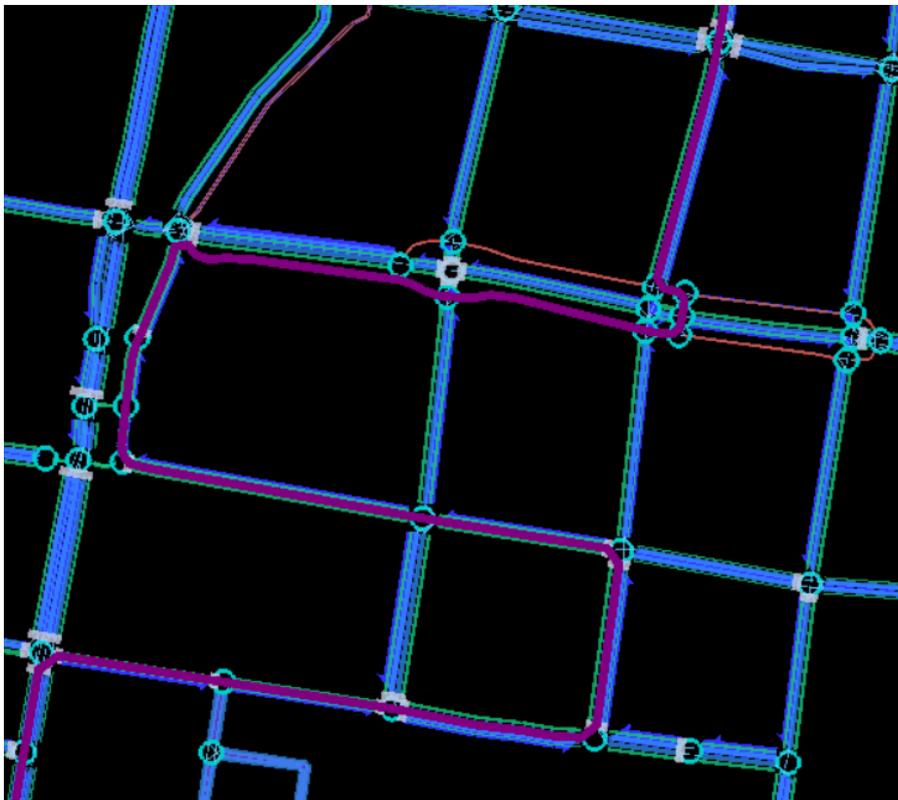


Figura 16 - Esempio di GPS route su SUMOPy

Length index [%]	Distance error [mm]
81.022324	25307.263672
87.079041	14591.218750
116.816872	8835.077148
87.201111	7779.074219
101.683647	10676.971680
101.693207	5439.482422
99.162712	5978.520996
-100.000000	-1000.000000
99.062134	5702.846191
123.221428	13781.085938
3667.286621	63376.207031
323.496643	9197.114258
126.282539	7389.020508
130.461685	6506.270508
88.704269	16696.927734
86.173592	41624.218750
108.511803	19810.189453
144.512466	18788.107422
105.321487	10110.838867
87.311867	6357.985352
88.858521	6531.971680
95.465073	10233.983398
93.564186	8343.580078
93.780792	5086.810059
109.610245	15143.199219
85.555656	11260.167969

Figura 17 - Length Index e Distance Error delle tracce GPS

Dal punto di vista operativo è necessario, mediante il software SUMOPy, effettuare le seguenti operazioni:

plugins-> Mapmatching -> Browse -> trips

A questo punto saremo di fronte ad un'interfaccia in cui sono presenti tutte le tracce GPS del campione, identificate dal loro ID GPS trip (Fig.18), dove è possibile valutare i valori length index e distance error di ogni traccia GPS (Fig.17).

In particolare, è necessario andare ad analizzare unicamente le tracce che presentano valori di length index non compresi tra il 90% ed il 110% e valori di distance error > 15m, in quanto indicano una differenza non trascurabile tra le tracce GPS ed i GPS routes, indicativa di possibili errori nella rete.

	ID GPS Trip
1	2908851
2	2908886
3	2908901
4	2908906
5	2908925
6	2908947
7	2908967
8	2909011
9	2909024
10	2909029
11	2909088
12	2909097
14	2909146
15	2909163
16	2909190
17	2909192
18	2909225
20	2909236
21	2909252
23	2909280
24	2909286
25	2909320
26	2909403
27	2909410
28	2909415
30	2909438

Figura 18 - ID GPS Trip delle tracce GPS

Successivamente sarà necessario analizzare singolarmente le tracce GPS che riscontrano tali problematiche al fine di valutare se effettivamente sono presenti errori.

È possibile che alcune tracce GPS con length index non compreso tra 90% e 110% e distance error > 15 non presentino errori di rete, di seguito si elencano i possibili motivi:

1. I punti iniziali e finali dei GPS routes negli archi rispettivamente iniziali e finali non sempre coincidono con il primo e l'ultimo punto GPS della traccia GPS, questo può comportare valori di length index superiori a 110% o inferiori al 90%, specialmente nelle tracce GPS di ridotta lunghezza (Fig.19).

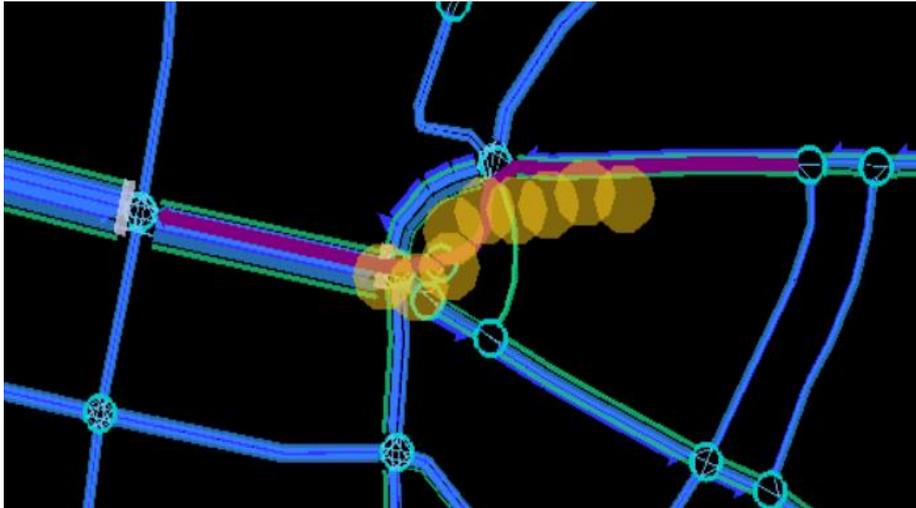


Figura 19 - Traccia GPS di ridotta lunghezza

2. Angle weight non corretto: In alcuni casi un valore di angle weight non idoneo alla singola traccia GPS può comportare una variazione del GPS routes, in questi casi sarà necessario variare il parametro ed effettuare nuovamente il map-matching della traccia GPS interessata;
3. Tracce GPS incoerenti: i punti GPS sono confusionari e non seguono un reale percorso (Fig.20);

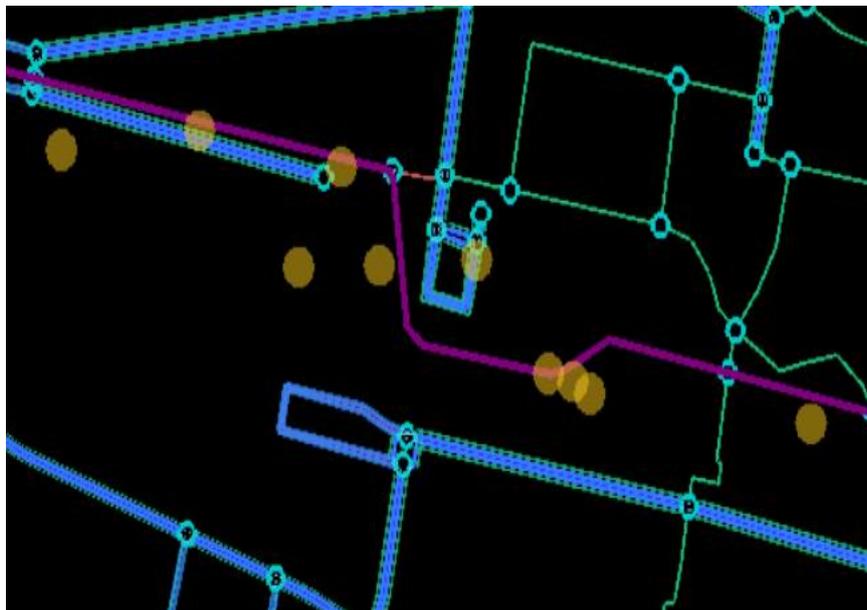


Figura 20 - Traccia GPS incoerente

- Utilizzo di archi contromano e archi pedonali: il software normalmente non permette l'utilizzo degli archi contromano e degli archi pedonali, particolarmente presenti nei parchi.

Si nota come il viaggio (linea viola) non segue lo stesso percorso della traccia GPS (punti gialli), come si nota in figura 21.

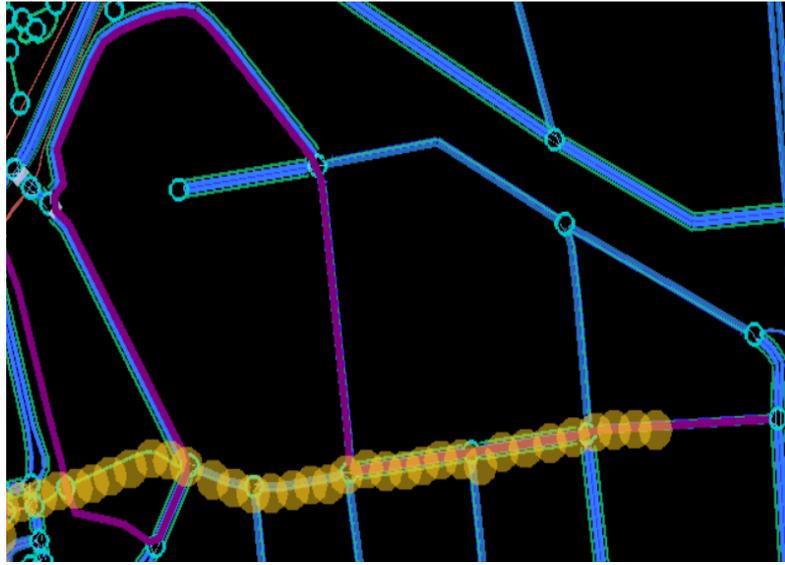


Figura 21 - Utilizzo di archi contromano

5.1.3 Complete Bikenetwork

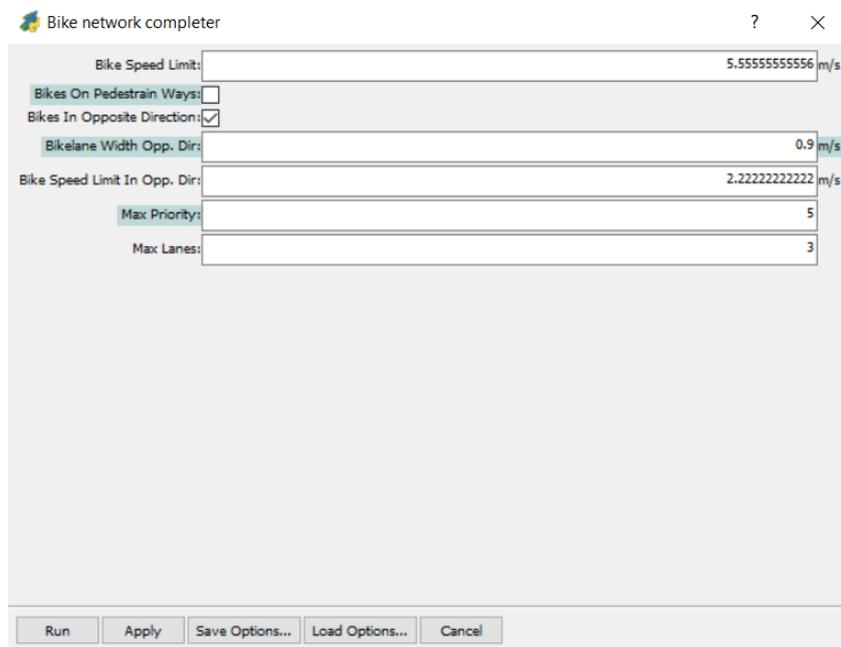
Analizzando le tracce GPS, al fine di attuare l'editing della rete, si è osservato che un elevato numero di ciclisti utilizzano gli archi contromano, non permettendo al software di ricreare in maniera corretta il viaggio di questi utenti, in quanto di norma non è permessa la percorrenza contromano degli archi, come visto nel paragrafo precedente.

Pertanto, al fine di riprodurre all'interno del programma il reale percorso effettuato dai ciclisti, è stato necessario attivare una funzione di nome **complete bikenetwork**, presente nel software, in grado di creare delle connessioni e archi aggiuntivi alla rete.

Dal punto di vista pratico è stata effettuata la seguente operazione nel software SUMOPy:

Network->tools->Complete Bikenetwork

Sono stati utilizzati i seguenti parametri (Fig.22):



The screenshot shows a dialog box titled "Bike network completer" with the following parameters:

Bike Speed Limit:	5.555555556 m/s
Bikes On Pedestrian Ways:	<input type="checkbox"/>
Bikes In Opposite Direction:	<input checked="" type="checkbox"/>
Bikelane Width Opp. Dir.:	0.9 m/s
Bike Speed Limit In Opp. Dir.:	2.222222222 m/s
Max Priority:	5
Max Lanes:	3

At the bottom of the dialog box, there are five buttons: Run, Apply, Save Options..., Load Options..., and Cancel.

Figura 22 - Parametri complete bikenetwork

È stato necessario spuntare la casella **Bike In Opposite Direction**, per consentire la generazione di connessioni nei nodi che permettessero l'utilizzo contromano della rete, inoltre è possibile impostare la velocità massima di percorrenza degli archi contromano generati dalla funzione (2,2 m/s).

Nel seguito si riporta l'esempio di via Avesella (Fig.23) su quanto detto precedentemente.

Nella prima immagine è possibile osservare che il viaggio dell'utente nel software (GPS routes, linea viola) non segue la traccia GPS (punti gialli), dunque il reale percorso effettuato dall'utente.

Attuando il processo descritto in questo paragrafo, si può notare come nella seconda immagine (Fig.24), invece, vi sia sovrapposizione tra il GPS route (linea arancione) e la traccia GPS (punti gialli), al fine di ottenere la corretta rappresentazione del comportamento dell'utente è necessario andare a ripetere il procedimento, di map-matching:

plugins -> mapmatching-> mapmatching -> match point to road network

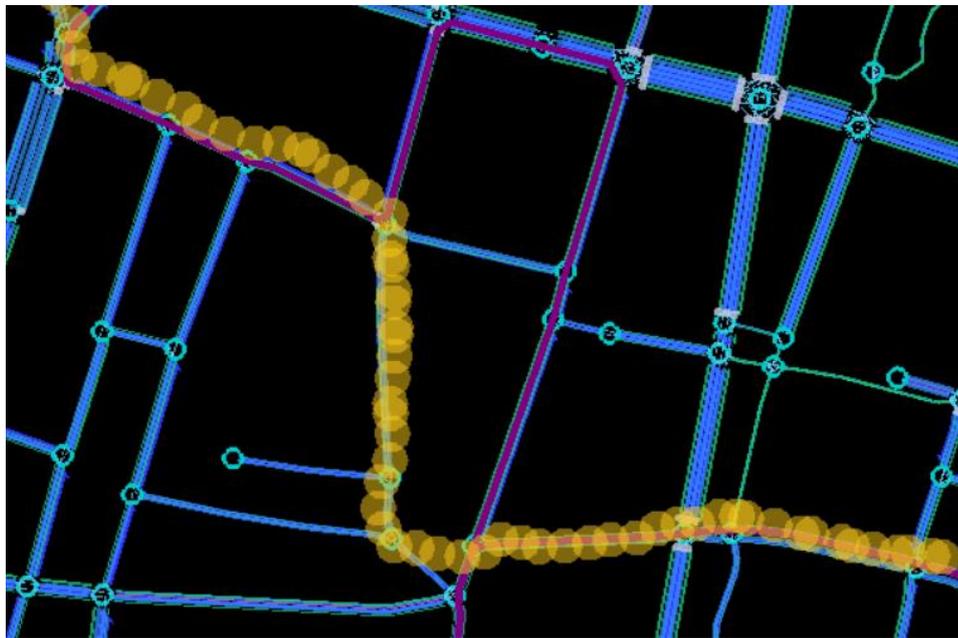


Figura 23 - Via Avesella

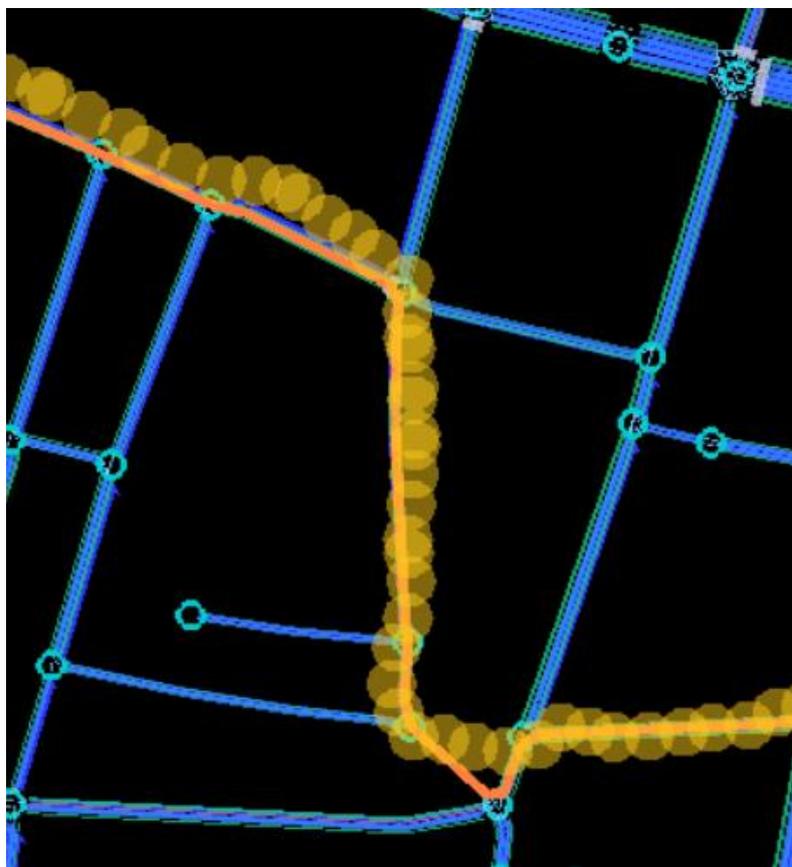


Figura 24 - Via Avesella complete bikenetwork

5.1.4 Problematiche relative al complete bikenetwork

Analizzando le tracce GPS con il metodo spiegato nel paragrafo precedente si sono osservate, in alcuni casi, delle problematiche legate alla mancata generazione di connessioni che permettono di percorrere contromano alcuni archi della rete.

Di seguito si riporta l'esempio di viale del Risorgimento (Fig.25).

Nella seguente immagine si osserva, tramite traccia GPS, che l'utente percorre contromano viale Risorgimento, ma il GPS route (linea viola) segue solo parzialmente la traccia (punti gialli):

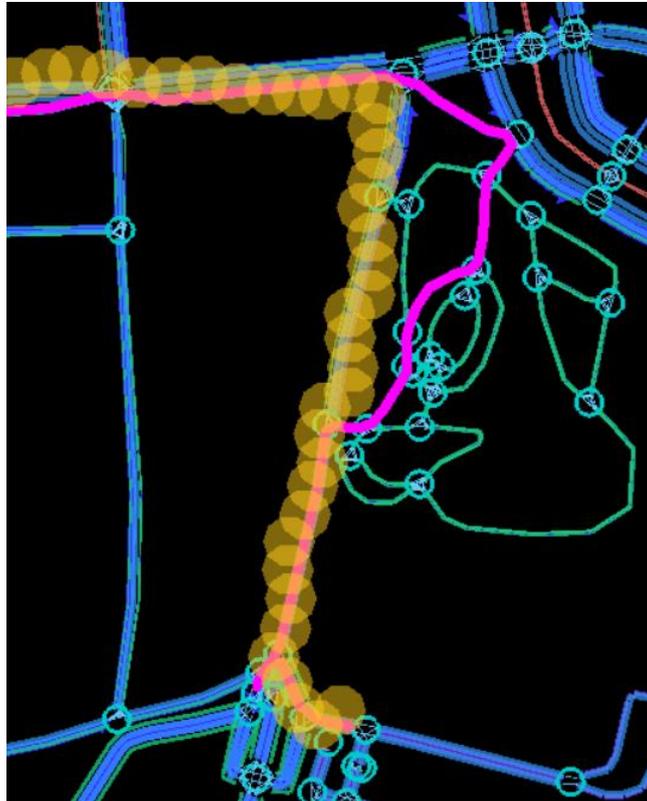


Figura 25 - Problematiche complete bikenetwork

La causa di tale errore risiede nel fatto che non sono state generate correttamente tutte le connessioni nei nodi, che permettono di percorrere contromano gli archi.

Un secondo errore riscontrato nell'utilizzo del **complete bikenetwork** risiede nell'alterazione dei cicli semaforici.

Al seguito degli errori sopra elencati si è deciso di non utilizzare questo comando, in quanto generava una serie di problematiche che non permettevano una corretta rappresentazione della realtà.

Nei capitoli successivi verrà spiegato come si è risolto il problema dei ciclisti che utilizzano gli archi contromano.

5.1.5 *Bike on pedestrian ways*

Il software SUMOPy normalmente non consente l'utilizzo degli archi pedonali da parte dei ciclisti, pertanto, al fine di riprodurre all'interno del programma il reale percorso effettuato dagli utenti, è stato necessario attivare una funzione, presente nel software, in grado di permettere l'accesso agli archi pedonali da parte dei ciclisti.

Tali archi sono presenti all'interno dei parchi, essendo tali zone più sicure e meno stressanti rispetto agli archi stradali, grazie alla mancanza del traffico veicolare, sono particolarmente utilizzate da parte dei ciclisti.

Questa operazione risulta fondamentale per la corretta generazione della domanda ciclabile a partire dalle tracce GPS, al fine di garantire una generazione dei viaggi realmente osservati nella realtà.

Dal punto di vista pratico è stata effettuata la seguente operazione:

Network->tools->Complete Bikenetwork

Sono stati utilizzati i seguenti parametri (Fig26):

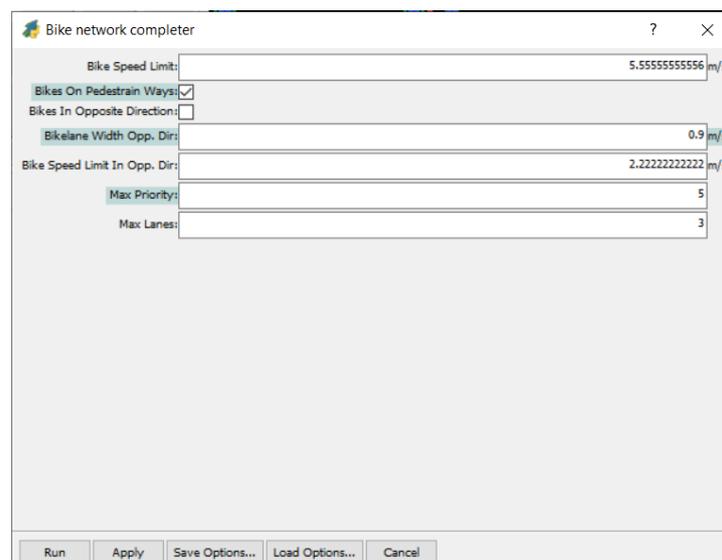


Figura 26 - Parametri bike on pedestrian ways

Nel seguito si riporta l'esempio del giardino Anna Maria Manzolini su quanto detto precedentemente.

Nella prima immagine (Fig.27) è possibile osservare che il viaggio dell'utente nel software (GPS route, linea viola) non segue la traccia GPS (punti gialli), dunque il reale percorso effettuato dall'utente.

Attuando il processo descritto in questo paragrafo, si può notare come nella seconda immagine (Fig.28) vi sia sovrapposizione tra il GPS route (linea arancione) e la traccia GPS (punti gialli), al fine di ottenere la corretta rappresentazione del comportamento dell'utente è necessario andare a ripetere il procedimento di map-matching:

plugins -> mapmatching-> mapmatching -> match point to road network

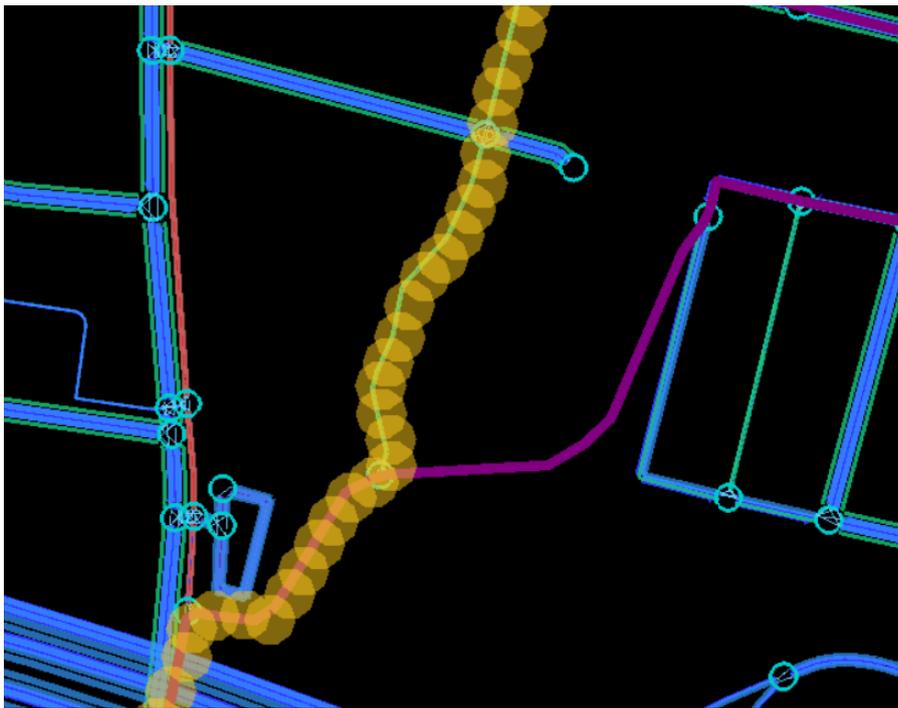


Figura 27 - Bike on pedestrian ways disattivo

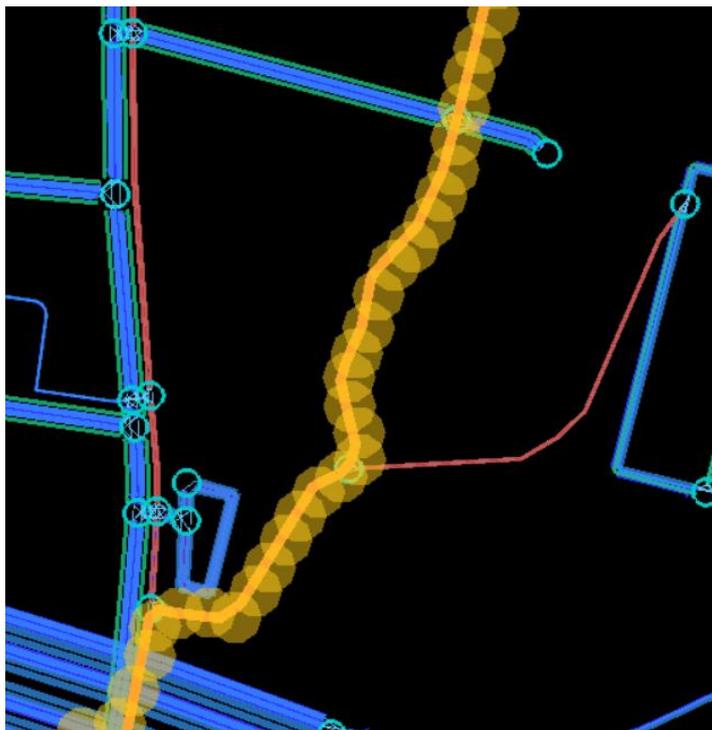


Figura 28 - Bike on pedestrian ways attivo

5.2 CORREZIONE DEGLI ERRORI NELLA RETE

Individuati gli errori nella rete mediante le tecniche descritte in questo capitolo, è necessario modificare la rete al fine di correggere tali problematiche, nel seguente paragrafo verranno descritte le operazioni effettuate al fine di correggere tali errori presenti nella rete.

L'editing della rete viene attuato mediante un programma, collegato al software SUMOPy, di nome NETEDIT.

È possibile utilizzare NETEDIT mediante la seguente procedura su SUMOPy:

Network-> Edit with sumo netdit/Edit with sumo netedit on map

Si nota che l'utilizzo di NETEDIT è possibile con le mappe dell'area di studio, nel caso queste siano state precedentemente collegate al programma, in questo modo è possibile confrontare la rete virtuale con quella reale in modo immediato, oppure è possibile l'utilizzo senza l'ausilio delle mappe, in

questo caso sarà necessaria una continua consultazione di **Google maps** e **Google street view**.

In seguito, verranno elencate le operazioni svolte al fine di apportare migliorie alla rete di Bologna.

5.2.1 Inserimento di un arco nella rete

Uno dei principali errori riscontrati nella fase di correzione della rete riguarda l'assenza di archi, tale problematica è facilmente individuabile in quanto si nota visivamente che la traccia GPS non segue un determinato arco (Fig.29).

Di seguito si riporta un esempio riguardante la zona di Villanova di Castenaso in cui mancavano diversi archi della rete.

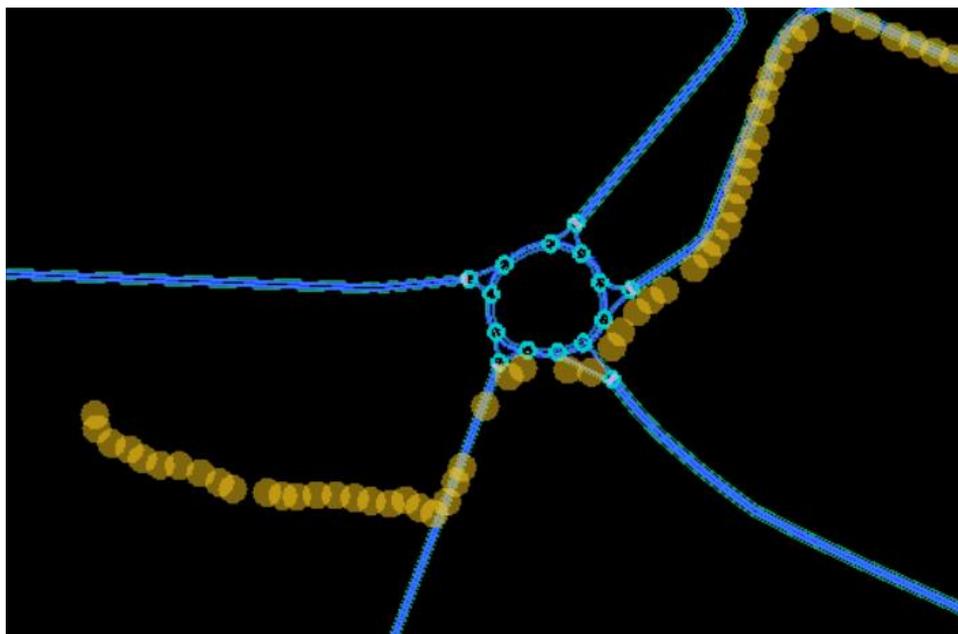


Figura 29 - Esempio di arco assente

Il procedimento da attuare al fine di risolvere tale problematica è il seguente:

aprire NETEDIT: Network-> Edit with sumo netedit on map.

Aprire NETEDIT con le mappe è vantaggioso in quanto è possibile individuare visivamente l'arco mancante e quindi "ricalcare" l'arco sul modello virtuale.

Successivamente è necessario andare a creare il nodo mancante all'interno dell'arco:

Utilizzare Inspect mode-> selezionare l'arco interessato mediante left click->right click sull'arco dove si vuole generare il nodo-> edge operation -> split edge here.

Generato il nodo mancante è possibile generare l'arco mancante:

Edge mode-> left click sul primo nodo-> left click nel punto di fine arco.

Successivamente è possibile aggiustare la geometria dell'arco utilizzando la **Move mode**, infatti cliccando con questo comando sugli archi si creano dei nodi geometrici che hanno la funzione di dare la reale forma all'arco.

Il risultato finale è il seguente (Fig.30):

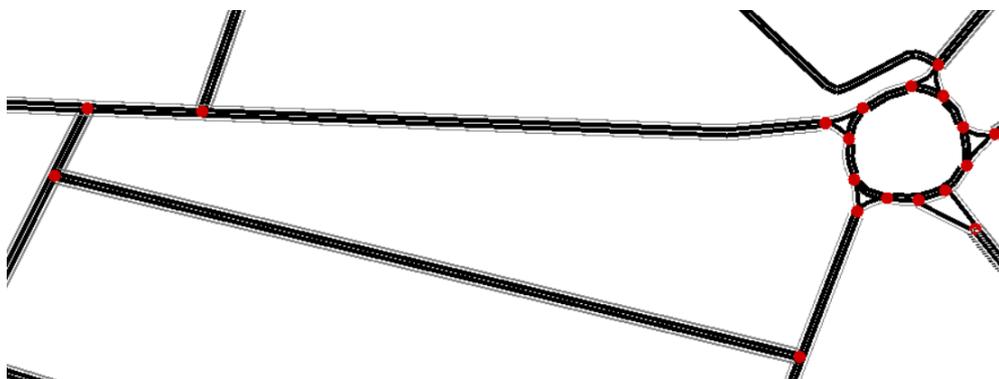


Figura 30 - Inserimento arco nella rete

5.2.2 Controllo dei permessi di transito

In alcuni archi era vietato l'accesso alla tipologia veicolare bicicletta, particolarmente importante al fine di questo studio, pertanto vi era una errata rappresentazione del viaggio da parte del software.

Al fine di correggere tale errore è stata attuata la seguente procedura:

NETEDIT: Network-> Edit with sumo netedit on map.

Utilizzare *Inspect mode*-> selezionare l'arco interessato mediante *left click*.

In questo modo è possibile accedere all'interfaccia delle caratteristiche dell'arco (Fig.31), successivamente è necessario selezionare *allow*, in questo modo si apre un'ulteriore interfaccia *edit allow vclasses* in cui è possibile consentire l'accesso ai veicoli desiderati (Fig.32).

Net: edge	
Internal attributes	
id	-34547166#0
from	19511_3689697297_3689764345
to	250763460
speed	lane specific
priority	4
numLanes	2
type	highway.residential
allow	icle rail_fast custom1 custom2
disallow	rail_urban rail rail_electric ship
shape	37423.80,41831.40
length	141.17
spreadType	right ▼
name	
width	lane specific
endOffset	0.00
shapeStart	37429.60,41839.40
shapeEnd	37315.90,41756.60
bidirectional	<input type="checkbox"/> false
distance	0.00

Figura 31 - Caratteristiche degli archi in NETEDIT

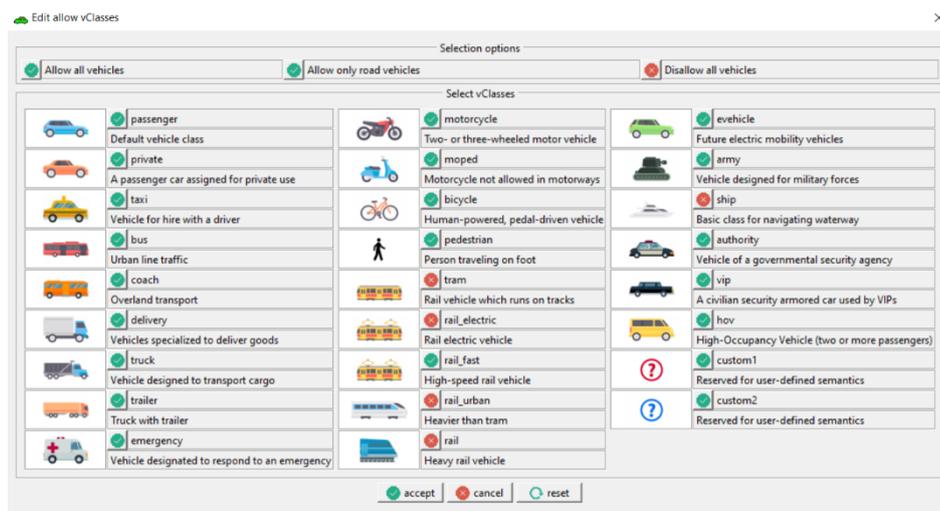


Figura 32 - Interfaccia Edit allow vclasses

5.2.3 Correzione di connettori errati

A seguito della creazione di archi e nodi della rete vengono generate automaticamente dal software le manovre di svolta, queste non sempre sono quelle che si osservano nella realtà, pertanto è necessario modificarle.

Al fine di attuare tale procedura si utilizza un comando di nome *Connection mode*, il programma in automatico esegue l'operazione *compute junctions* al termine della quale rende visibili i connettori, determinati con impostazioni di default.

Successivamente è possibile modificare, aggiungere o eliminare connettori cliccando prima sulla corsia origine del connettore e successivamente su quella di destinazione, tale operazione è facilitata da diverse colorazioni delle corsie oggetto di modifica (Fig.33), secondo la seguente classificazione:

- Azzurro: corsia selezionata origine connettori;
- Verde chiaro: corsia destinazione connettore esistente;
- Verde scuro: corsia destinazione connettore possibile;
- Giallo: corsia destinazione connettore impossibile per conflitto con altri connettori.

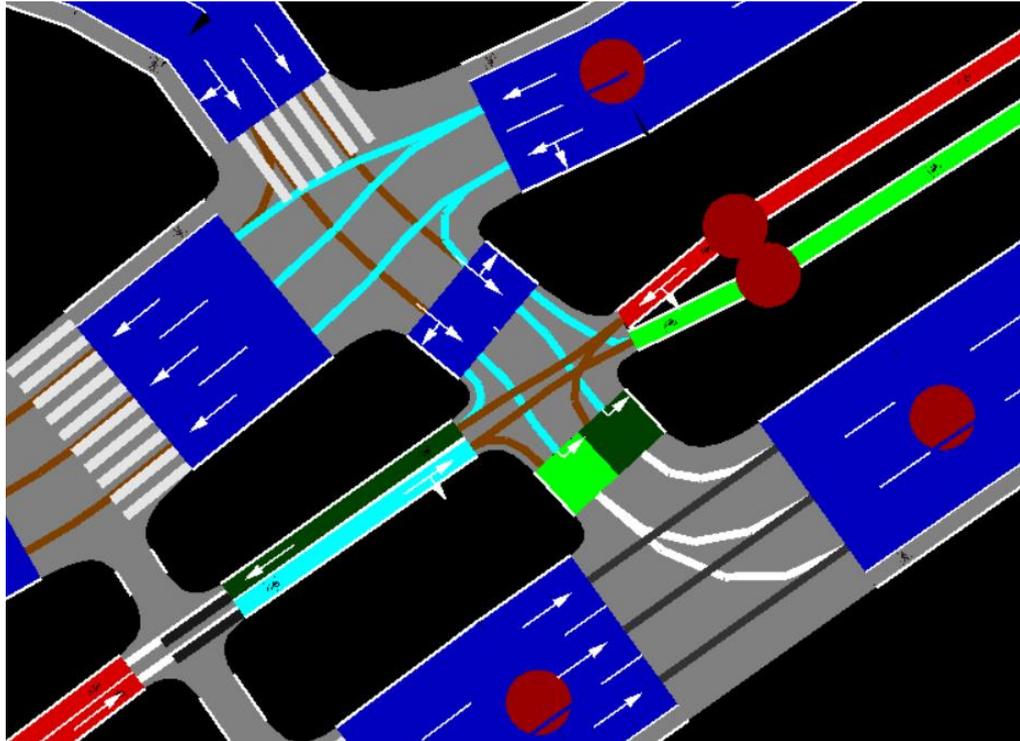


Figura 33 - Connettori su NETEDIT

5.2.4 Allargamento delle corsie degli archi ciclabili

Al fine di una corretta rappresentazione del comportamento degli utenti nell'utilizzare la rete, è stato necessario allargare le corsie degli archi ciclabili in alcune intersezioni semaforizzate.

La larghezza di default delle corsie degli archi ciclabili è di 0,8m, tale misura non permette, all'interno delle simulazioni, di effettuare i sorpassi o l'affiancamento dei ciclisti in attesa nelle intersezioni semaforizzate, andando a generare delle code irrealistiche.

Al fine di rappresentare in maniera maggiormente realistica il traffico ciclabile è stato necessario aumentare a 2m la larghezza delle corsie (Fig. 34).

Al fine di attuare tale procedura sono state effettuate le seguenti operazioni:

NETEDIT: Network-> Edit with sumo netedit

Selezionare la corsia da modificare-> modificare la larghezza della corsia nella voce "width".

Internal attributes	
id	378673012
from	cluster_1646701962_gneJ4069
to	cluster_gneJ4076_gneJ4078
speed	5.56
priority	1
numLanes	1
type	highway.cycleway
allow	bicycle
disallow	rail_fast ship custom1 custom2
shape	
length	16.73
spreadType	right
name	
width	2
endOffset	0.00
shapeStart	37056.30,42001.80
shapeEnd	37070.00,42011.40
bidirectional	<input type="checkbox"/> false
distance	0.00

Figura 34 - Allargamento corsia ciclabile

5.2.5 Modifica dei cicli semaforici

Mediante l'ausilio di simulazioni prova, è stato possibile identificare all'interno della rete di Bologna, delle intersezioni semaforizzate in cui vi era una rappresentazione dei cicli semaforici non realistica dal punto di vista del traffico ciclabile, infatti alcune fasi semaforiche riguardanti le corsie ciclabili avevano tempi di verde estremamente brevi che generavano lunghezze di coda elevate.

Gli impianti semaforici che presentavano tale problematica sono Porta Saragozza, Porta San Felice, Porta San Donato, Piazza 7 Novembre 1944 e Porta San vitale.

Oltre alla modifica della durata delle fasi semaforiche (Fig.35) è stato necessario anche modificare i connettori delle svolte permesse durante la fase

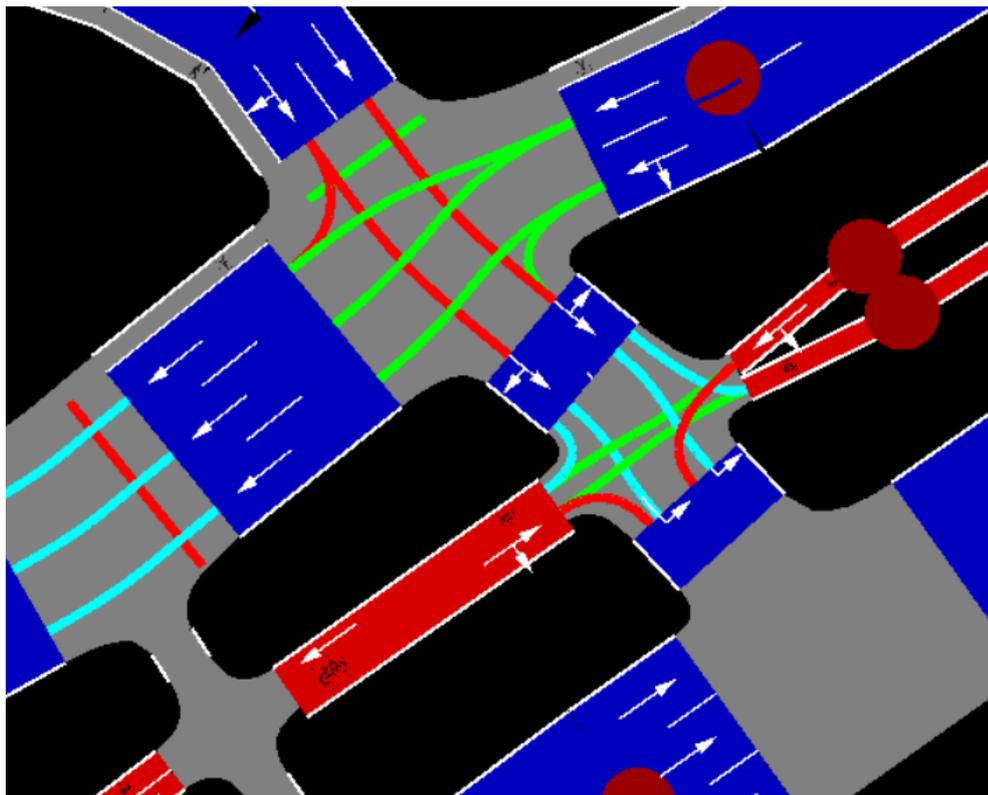


Figura 36 - Connettori nelle intersezioni semaforizzate

6 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Al fine di attuare le successive operazioni per raggiungere lo scopo dello studio, già descritto nel capitolo 4, è necessario procedere alla creazione di uno scenario test, sul quale verranno condotte le analisi e le simulazioni al fine di classificare i ciclisti sulla base del genere e dell'età.

Successivamente sarà necessario andare a generare tre differenti scenari al fine di calibrare il modello ed ottenere risultati più precisi.

Al fine della preparazione dello scenario TEST, l'idea è quella di andare a modificare la rete in maniera tale da far rientrare il maggior numero di tracce GPS facenti parte dell'area di studio, nel range ottimale dei parametri di **length index** (li) e **distance error** (de), successivamente descritti, in maniera tale da avere un maggior numero possibile di dati utilizzabili, così da ottenere risultati più attendibili.

Le operazioni eseguite a tale scopo sono le seguenti:

- Definizione dell'area di studio;
- Inserimento degli archi contromano;
- Calibrazione dei parametri del map-matching;
- Generazione della domanda ciclabile.

6.1 DEFINIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

La definizione dell'area di studio risulta un aspetto fondamentale per la trattazione in esame, in quanto sulla base di questa vengono fatte operazioni preliminari e viene inserita la domanda ciclabile.

Generalmente il cordone viene fatto coincidere con i confini amministrativi del territorio in esame, tuttavia è possibile osservare, mediante lavori precedentemente effettuati sulla rete di Bologna, che i flussi ciclabili diminuiscono allontanandosi dal centro città (Fig.37), inoltre le tracce GPS a disposizione oltre la superficie immaginaria delimitata dalla tangenziale di Bologna sono in numero esiguo rispetto a quelle riferite alla superficie interna ad essa, pertanto si è deciso di far coincidere il bordo dell'area di studio con un confine ideale rettangolare delimitato dalla tangenziale di Bologna a Nord, Est ed Ovest, mentre a sud da una linea virtuale che collega San Lazzaro di

Savena con Casalecchio di Reno, dando vita ad una superficie di circa 60km² (Fig.38).

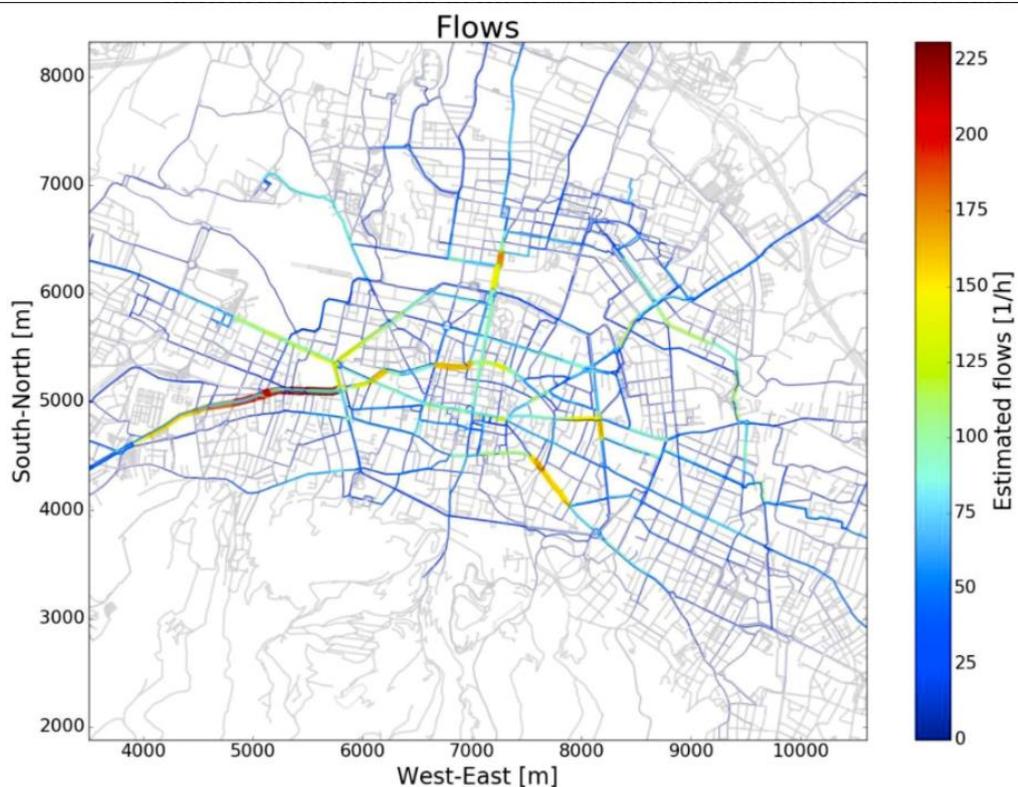


Figura 37 - Flussi ciclabili

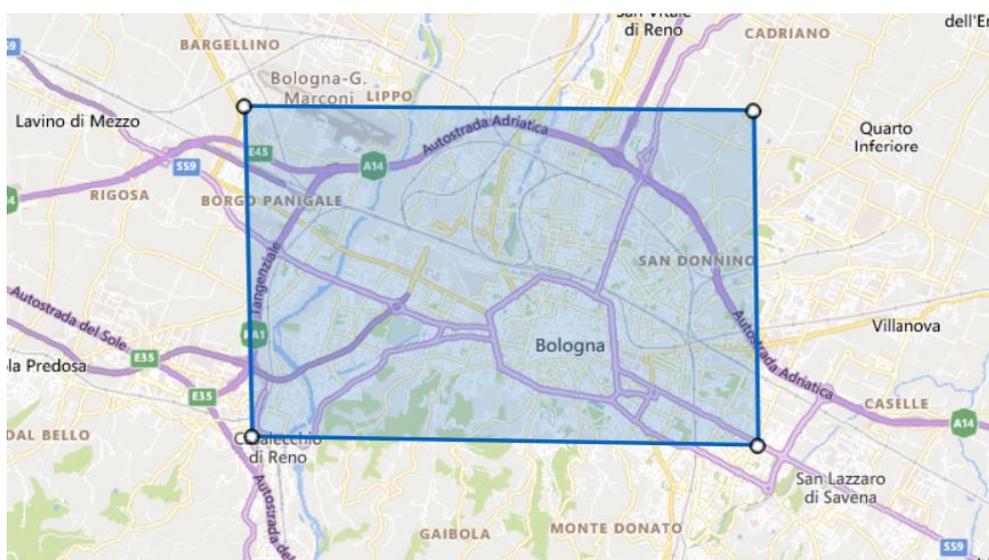


Figura 38 - Area di studio

6.2 INSERIMENTO DEGLI ARCHI CONTROMANO

Analizzando le tracce GPS durante la fase di editing della rete, è stato possibile osservare che un elevato numero di ciclisti utilizza gli archi contromano.

Come spiegato precedentemente nel capitolo 5, il programma non permette di riprodurre questo tipo di comportamento, in quanto va a violare le regole stradali imposte dai programmatori.

Al fine di riprodurre in modo più realistico possibile il comportamento reale degli utenti, si è deciso di inserire nella rete gli archi contromano delle strade con un flusso elevato, in maniera tale da riprodurre il reale viaggio realizzato dai ciclisti per un numero elevato di tracce GPS.

Nella pratica sono stati inseriti gli archi delle vie più trafficate di Bologna, avvalendosi anche dei dati sui flussi a disposizione osservati nella figura 37.

Gli archi contromano sono stati inseriti nelle seguenti vie:

- Via Nosadella;
- Viale Risorgimento;
- Via Galliera;
- Via Malpertuso;
- Via Rialto;
- Via Castellata;
- Via Frassinago;
- Via Zamboni;
- Via Nazario Sauro;
- Via San Vitale;
- Strada Maggiore;
- Via Avesella
- Via Polese;
- Via Guidotti;
- Via Giovanni Battista Morgagni;
- Via Oberdan.

Una volta inseriti mediante NETEDIT gli archi sopra elencati, è stato necessario effettuare l'import delle tracce GPS ed il Map-matching al fine della generazione della domanda ciclabile.

Nei seguenti paragrafi verrà spiegato come sono state effettuate tali operazioni e quali parametri sono stati utilizzati per lo scenario test.

6.2.1 Calibrazione dei parametri del map-matching

Come già visto nel capitolo 5, risulta di particolare importanza il processo di Map-matching, ed in particolare il parametro **angle weight**, infatti è possibile calibrare tale parametro in maniera tale da massimizzare il numero di tracce GPS aventi valori accettabili di **length index** (li) e **distance error** (de), permettendo di avere un campione attendibile più numeroso per le analisi successive.

Di seguito si riportano i valori utilizzati:

- 80 % < li < 115 %;
- de < 20m.

A livello applicativo, tali valori indicano che i viaggi simulati possono avere una lunghezza compresa tra l'80% ed il 115% del viaggio reale registrato mediante traccia GPS.

Dal punto di vista pratico la calibrazione del parametro angle weight è stata attuata svolgendo più volte il Map-matching di un campione di 2372 tracce GPS appartenenti all'area di studio, andando a variare i valori di angle weight utilizzati.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei risultati:

Angle Weight	Tracce GPS con valori ottimali di li e de (%)
10	67%
20	68%
30	73%
40	71%
50	65%

In seguito ai risultati ottenuti si è deciso di utilizzare per il Map-matching definitivo un valore di **angle weight** pari a 30.

6.3 GENERAZIONE DELLA DOMANDA CICLABILE

La generazione della domanda ciclabile si basa sulla ricostruzione dei percorsi seguiti dagli utenti reali, attuata a partire dalle tracce GPS registrate in occasione dell'iniziativa BellaMossa (BM).

Al fine della generazione della domanda ciclabile risulta fondamentale la tecnica del map-matching, già ampiamente descritta nei capitoli precedenti.

Al fine di attuare correttamente il map-matching bisogna filtrare le tracce GPS importate su tutta la rete, utilizzando solamente quelle relative all'area di studio.

I passaggi effettuati al fine della generazione della domanda ciclabile sono i seguenti:

- Import delle tracce GPS;
- Applicazione del Geometry filter;
- Map matching;
- Applicazione del post Map matching filter.

6.3.1 Import delle tracce GPS e filtro geometrico

Il primo passo per la generazione della domanda ciclabile riguarda l'import delle tracce GPS.

La metodologia dell'import delle tracce GPS è già stata ampiamente trattata nel corso del capitolo sull'editing della rete.

In particolare, al fine della trattazione sono state importate le tracce GPS relative al periodo compreso tra Aprile 2017 e Settembre 2017 nella fascia oraria tra le 7:00 e le 10:00 (Fig.39) dei giorni feriali, ottenendo un totale di circa 26100 tracce GPS.

Successivamente è stato necessario utilizzare un filtro geometrico che ha permesso di scartare tutte le tracce non facenti parte dell'area di studio considerata (Fig.40).

Al fine di utilizzare il filtro geometrico sono stati attuati i seguenti passaggi sul programma SUMOPy:

plugins-> mapmatching -> filter and select -> select traces by geometry.

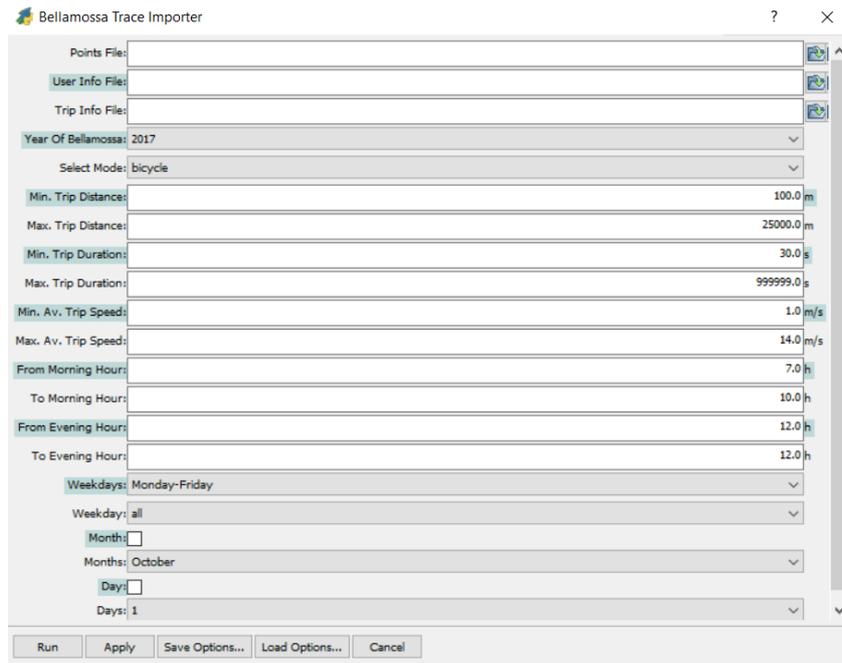


Figura 39 - Import delle tracce GPS

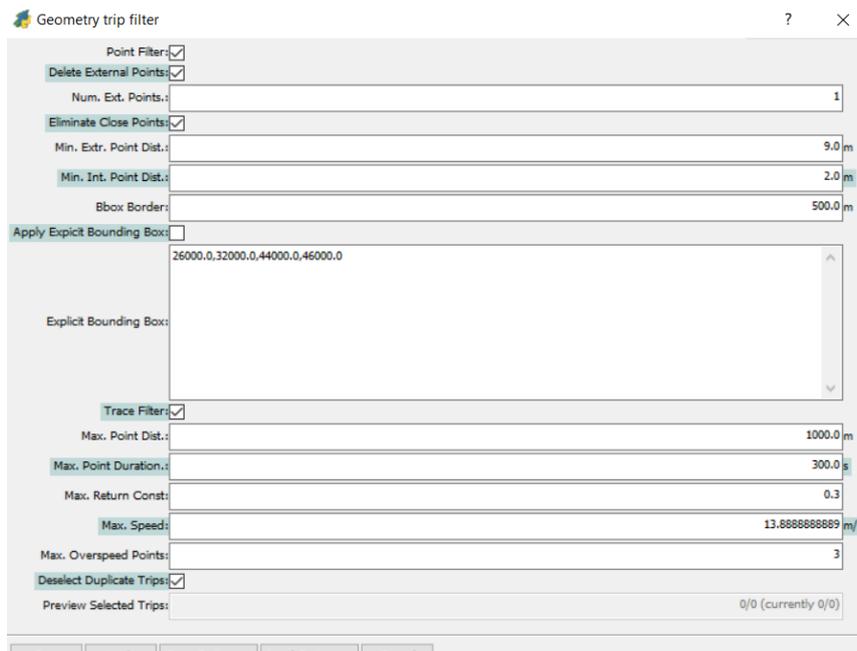


Figura 40 - Geometry Filter

Per quanto riguarda il geometry filter, sono stati eliminati il primo e l'ultimo punto delle tracce GPS tramite il comando **delete external points**, in quanto tali punti davano problemi con il map matching.

Utilizzando il comando **apply explicit bounding box** è possibile definire i vertici di un rettangolo (x_min, y_min, x_max, y_max.) che rappresenta l'area di studio, andando a scartare tutte le tracce al di fuori di esso.

Tale filtro è possibile utilizzarlo prima di attuare il map matching, così facendo è possibile risparmiare tempo computazionale dovuto al processo, scartando le tracce non facenti parte dell'area di studio.

6.3.2 Map matching e filtro post map-matching

Il passaggio successivo è quello relativo al map-matching, già ampiamente discusso nei paragrafi precedenti, realizzato mediante i parametri calcolati nel paragrafo 6.2.1.

A seguito del map-matching è possibile utilizzare un filtro denominato **post-match filter trips** (Fig.41), in grado di scartare le tracce non aventi valori di length index e distance error accettabili.

Si può applicare il filtro mediante i seguenti passaggi sul programma SUMOPy:

plugins-> mapmatching -> filter and select -> post-match filter trips.

Tramite il filtro è possibile indicare il range di length index [%] ed il massimo distance error [m], inoltre vengono scartate le tracce che presentano loop, che non sono connesse o che non hanno realizzato correttamente il processo di map-matching.

Viene inoltre indicato il periodo temporale di riferimento (7:00a.m.-10:00a.m.) dei giorni feriali (Monday-Friday).

Il filtro permette di deselezionare automaticamente tutte le tracce che non rispettano i parametri desiderati.

Post matchfilter

Min. Length Index:	80.0 %
Max. Length Index:	115.0 %
Max. Distance Err.:	20000.0 mm
Must Be Connected:	<input checked="" type="checkbox"/>
Must Be Loop-Free:	<input checked="" type="checkbox"/>
Must Have Shortest:	<input type="checkbox"/>
Must Be Matched:	<input checked="" type="checkbox"/>
Min. Av. Trip Speed:	1.0 m/s
Max. Av. Trip Speed:	14.0 m/s
From Morning Hour:	7 h
To Morning Hour:	10 h
From Evening Hour:	12.0 h
To Evening Hour:	12.0 h
Weekdays:	Monday-Friday
Weekday:	all
Month:	
Months:	October
Day:	
Days:	1
Preview Selected Trips:	0/0 (currently 0/0)

Run Apply Save Options... Load Options... Cancel

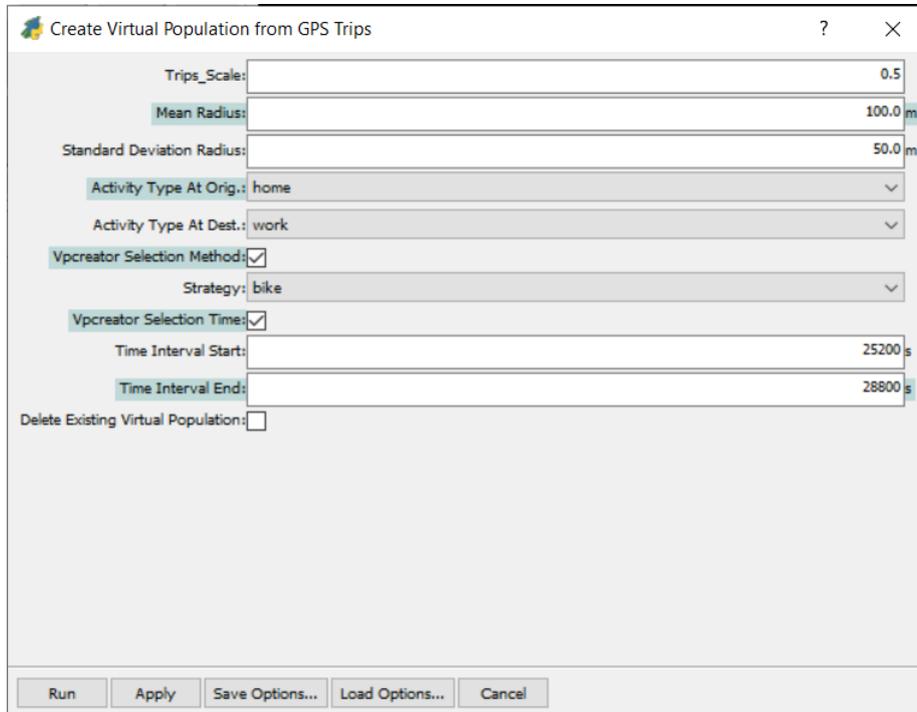
Figura 41 - Filtro post map matching

Al termine del processo di filtro post map matching il campione di tracce GPS ottenuto è di 14120.

Successivamente è possibile andare a creare la popolazione virtuale tramite le tracce rimanenti mediante i seguenti comandi:

plugins-> mapmatching -> demand generation -> virtual pop generation.

L'algoritmo VpCreator utilizzato è governato dai seguenti parametri (Fig.42):



Parameter	Value
Trips_Scale	0.5
Mean Radius	100.0 m
Standard Deviation Radius	50.0 m
Activity Type At Orig.	home
Activity Type At Dest.	work
Vpcreator Selection Method	<input checked="" type="checkbox"/>
Strategy	bike
Vpcreator Selection Time	<input checked="" type="checkbox"/>
Time Interval Start	25200 s
Time Interval End	28800 s
Delete Existing Virtual Population	<input type="checkbox"/>

Figura 42 - Parametri creazione della virtual population

In questa prima fase di creazione dello scenario TEST si è utilizzato un parametro moltiplicativo delle tracce GPS (Trips_scale) in maniera tale da non creare tempi di coda irrealistici nelle intersezioni semaforizzate.

6.4 PARAMETRIZZAZIONE DINAMICA DEL CICLISTA

Una volta terminata la fase di creazione della domanda ciclabile e della creazione dello scenario test, è stato possibile iniziare ad attuare le micro-simulazioni e le analisi necessarie al fine di attuare una suddivisione dei comportamenti dinamici dei ciclisti sulla base del genere e dell'età.

In particolare, in questo capitolo verranno descritte le metodologie utilizzate al fine di attuare tale suddivisione, si puntualizza che è stato possibile ricostruire il comportamento degli utenti reali all'interno del software SUMOPy, mediante l'utilizzo delle tracce GPS, che oltre a contenere informazioni relative al reale viaggio degli utenti, contengono

anche informazioni sui tempi dei viaggi reali, sull'età ed il genere dei ciclisti reali, grazie ai quali è stato possibile trovare il valore di velocità massima più significativo per ogni categoria individuata.

6.5 PARAMETRO: VELOCITÀ MASSIMA

Al fine di simulare all'interno del programma SUMOPy il comportamento degli utenti reali, sulla base del genere e dell'età, è stato necessario attuare numerose simulazioni andando a variare la variabile velocità massima v_{max} .

A livello pratico, tale procedimento è stato possibile andando ad effettuare all'interno del programma SUMOPy i seguenti passaggi:

Demand -> Browse -> vehicle types

Si aprirà un'interfaccia contenente tutte le tipologie veicolari (Vtypes), ognuna caratterizzata dai propri parametri (Fig.41).

Essendo la trattazione basata sulle biciclette, è stato necessario variare la voce **max speed[m/s]** all'interno della scheda dei parametri del mezzo **bicycle** (Fig.42).

Vehicle Types							
Lanechange Model:		SL2015					
Pedestrian Model:		striping					
Ped. Stripe Width:		0.35 m					
Ped. Slowdown:		0.2					
	Type name	Mode	Share in mode	Length [m]	Width [m]	Height [m]	Passengers
1	pedestrian	pedestrian	1.000000	0.250000	0.440000	1.719000	1
2	passenger1	passenger	1.000000	4.300000	1.800000	1.500000	1
3	bicycle	bicycle	1.000000	1.600000	0.900000	1.700000	1
4	vespa	moped	1.000000	1.500000	0.950000	1.700000	1
5	motorcycle	motorcycle	1.000000	1.500000	0.950000	1.700000	1
6	taxi1	taxi	1.000000	5.000000	1.800000	1.800000	1
7	bus	bus	0.500000	12.000000	2.500000	3.400000	1
8	bus_flexible	bus	0.500000	17.900000	2.500000	3.000000	1
9	tram1	tram	1.000000	22.000000	2.400000	3.200000	1
10	rail_urban1	rail_urban	1.000000	36.000000	3.000000	3.600000	1
11	van1	delivery	1.000000	5.000000	1.900000	2.500000	1
12	truck	truck	0.333333	8.000000	2.000000	3.500000	1
13	truck_semitrailer	truck	0.333333	10.000000	2.000000	4.500000	1
14	truck_trailer	truck	0.333333	12.000000	2.000000	3.500000	1
15	evehicle1	evehicle	1.000000	3.500000	1.600000	1.700000	1
16	PRT	custom1	1.000000	3.500000	1.600000	1.700000	1

Figura 43 - Vehicle types

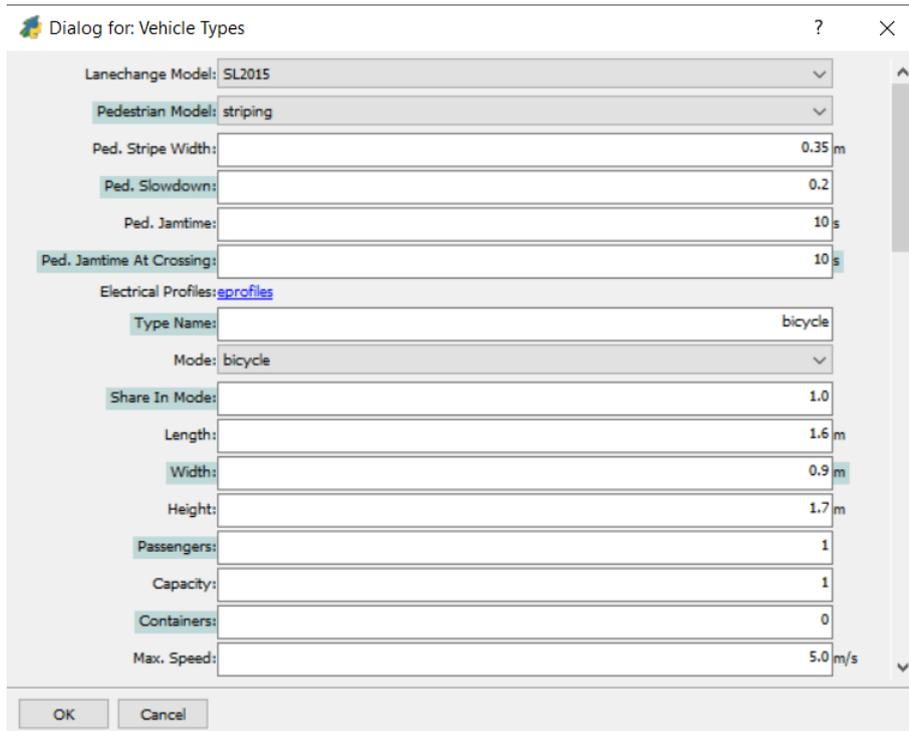


Figura 44 - Parametro max speed

È bene osservare che in questa prima fase non viene fatta distinzione tra gli utenti, pertanto tutta la popolazione virtuale avrà il medesimo comportamento, sulla base della v_{max} inserita nel vtype delle biciclette.

Dal punto di vista pratico, si ha che ogni ciclista simulato tenderà alla velocità massima impostata quando ne avrà l'occasione (assenza di intersezioni, traffico, ecc.).

Una volta inserito il valore della velocità massima desiderata è possibile procedere alla micro-simulazione, come spiegato nel paragrafo successivo sono state effettuate numerose simulazioni con valori di v_{max} differenti.

6.6 MICRO-SIMULAZIONI

Al fine di riprodurre il comportamento reale degli utenti all'interno del software è stato necessario effettuare numerose micro-simulazioni variando il parametro di velocità massima con valori compresi tra 3 m/s e 9 m/s:

$$v_{max} \left[\frac{m}{s} \right] = 3,4,5,6,7,8,9.$$

Di seguito si riportano i parametri utilizzati per l'esecuzione delle micro-simulazioni (Fig.45):

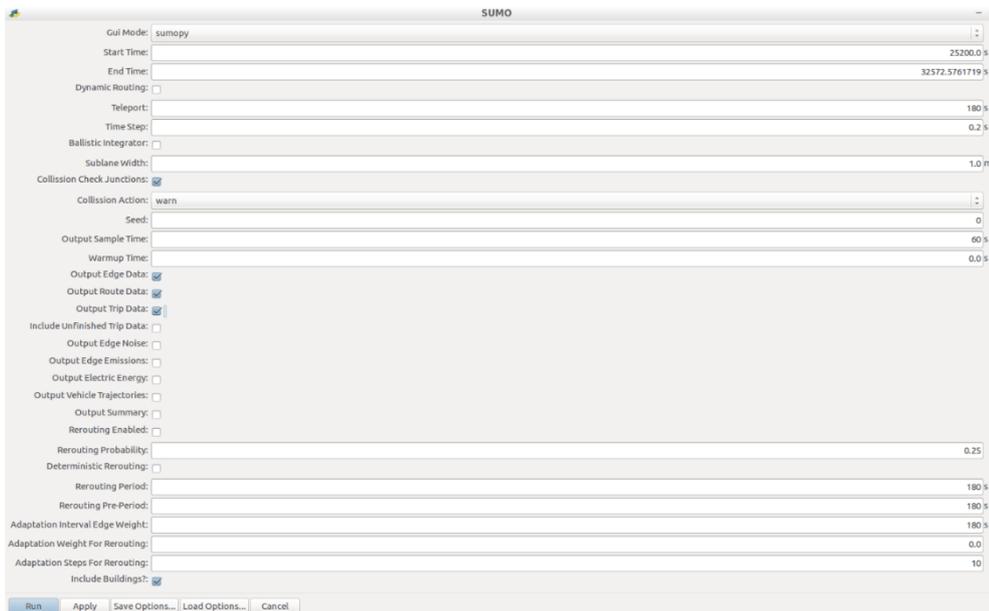


Figura 45 - Parametri simulazione

I risultati sono stati elaborati mediante il programma *libreoffice calc*, attraverso il quale è stato possibile individuare il tempo medio di viaggio simulato dalla popolazione virtuale ed il tempo medio di viaggio reale degli utenti, ricavato dalle tracce GPS.

A tal proposito, va sottolineato che la creazione della popolazione virtuale, all'interno del software, avviene mediante le tracce GPS a disposizione, pertanto saranno presenti unicamente viaggi effettuati realmente dagli utenti, di cui si conoscono le informazioni relative al tempo del viaggio reale, all'età e genere della persona, pertanto al momento della generazione della domanda ciclabile è stato associato ad ogni utente virtuale un utente reale.

Il tempo medio di viaggio simulato per ogni v_{max} sopra elencata è stato determinato attuando i seguenti passaggi su SUMOPy:

Simulation -> Results -> Browse -> Biketrip results

Il programma ci andrà a restituire un database contenente i risultati della simulazione, il programma ci offre la possibilità di esportare in formato .csv

il database, in maniera tale da poter essere analizzato ed elaborato su *libreoffice calc*.

In figura 46 si nota che ad ogni utente è stata associata la durata del tempo di viaggio all'interno della simulazione (Duration [s]), facendo la media di tali valori è possibile ottenere il **tempo medio di viaggio simulato**.

ID	ID trip	Duration [s]	Dep. time [s]	Arr. time [s]
2002	494	490	27892	28382
57	723	447	27838	28285
4524	733	668	26063	26731
484	912	446	27602	28048
6381	1268	600	27100	27700
6393	1726	391	28351	28742
1289	2047	685	27733	28418
1530	2139	651	28497	29148
510	4308	183	27429	27612
2598	680	1070	25913	26983
5474	899	866	26758	27624
6904	1485	1022	26998	28020
3253	1788	999	26860	27859
2668	3131	160	25668	25828
5511	4074	403	26787	27190
4078	1583	226	27489	27715
3816	3045	845	28694	29539
876	6033	1072	27915	28987
5322	6285	530	27960	28490
4914	6287	942	27275	28217
4186	6561	161	28042	28203
3742	6563	566	25553	26119
5492	1153	650	27364	28014
5466	959	1599	28172	29771
6972	1190	723	26932	27655
3117	1591	741	25662	26403
5069	2223	2210	29115	31325

Figura 46 - Biketripresults delle simulazioni contenenti i tempi di viaggio simulati

Il tempo medio di viaggio reale è possibile ricavarlo mediante i seguenti passaggi attuati all'interno del software SUMOPy:

Demand -> Browse->virtual population->plans -> bikerides

Il programma renderà disponibile un database, esportabile anch'esso in formato .csv in maniera tale da poter essere analizzato ed elaborato su *libreoffice calc* e contenente i tempi dei viaggi reali, mediante i quali è possibile calcolare il **tempo medio di viaggio reale**.

Come è possibile notare in figura 47, nella colonna Duration [s] sono disponibili i tempi reali di viaggio di ogni utente.

ID	ID plan	Start time [s]	Duration [s]	ID bike
	1	125712.0	399.0	1
	2	227706.0	491.0	2
	3	327295.0	465.0	3
	4	425466.0	1758.0	4
	5	526058.0	275.0	5
	6	625593.0	357.0	6
	7	727101.0	373.0	7
	8	826947.0	813.0	8
	9	928404.0	893.0	9
	10	1028399.0	1642.0	10
	11	1126779.0	1050.0	11
	12	1226400.0	1103.0	12
	13	1328931.0	447.0	13
	14	1425313.0	1149.0	14
	15	1528058.0	656.0	15
	16	1626633.0	817.0	16
	17	1725917.0	1717.0	17
	18	1827804.0	737.0	18
	19	1925865.0	697.0	19
	20	2027110.0	2044.0	20

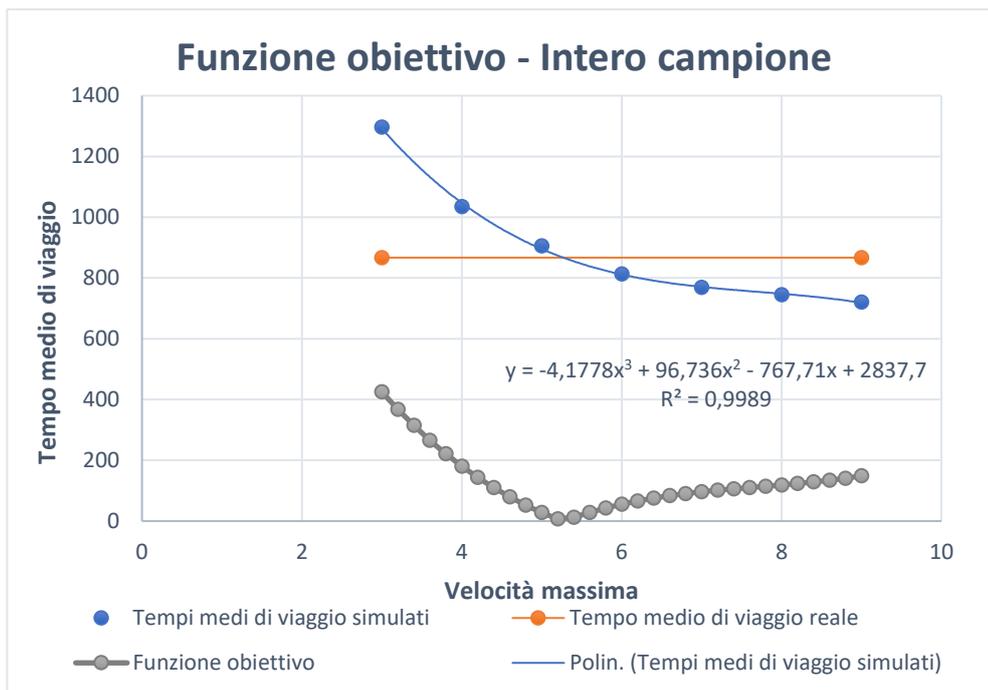
Figura 47 - Bikerides contenenti i tempi reali di viaggio

Successivamente è stato sufficiente andare a calcolare i tempi medi di viaggio simulati per ogni simulazione effettuata andando a variare i valori di velocità massima:

$$v_{max} \left[\frac{m}{s} \right] = 3,4,5,6,7,8,9.$$

Si nota che è possibile graficare i risultati ottenuti andando a porre in ascissa i valori di v_{max} utilizzati e nelle ordinate i tempi medi di viaggio simulati corrispondenti.

In una prima fase si è deciso di graficare l'intero campione, senza attuare la distinzione di genere ed età, al fine di valutare se fosse possibile effettivamente utilizzare una funzione obiettivo, in grado di minimizzare la differenza tra i tempi medi di viaggio simulati ed i tempi medi di viaggio reali (costanti) come è possibile notare nel seguente grafico:



Nel grafico si nota che è stata attuata un'interpolazione dei punti rappresentativi dei tempi medi di viaggio simulati.

In questo modo è possibile ricavare l'equazione della linea di tendenza, in maniera tale da poter effettuare la differenza tra la curva dell'interpolazione (I) e la retta costante rappresentativa del tempo medio di viaggio reale (R), ricavando la funzione obiettivo (B).

$$B = I - R$$

Si puntualizza che il punto di intersezione tra la curva blu ed arancione è il minimo della funzione obiettivo e chiaramente corrisponde ad un valore 0 nelle ordinate ed un valore di $v_{max} = 5,2 \frac{m}{s}$ nelle ascisse.

A livello pratico significa che inserendo all'interno del software SUMOPy un valore di $v_{max} = 5,2 \frac{m}{s}$ si ottiene un comportamento analogo, in quanto a tempi medi di viaggio, al caso reale.

6.7 SUDDIVISIONE DEL CAMPIONE SULLA BASE DEL GENERE E DELL' ETÀ

Una volta accertata l'efficacia della metodologia utilizzata mediante l'analisi effettuata sull'intero campione nel paragrafo precedente, è possibile procedere con la suddivisione del campione sulla base del genere e dell'età.

In prima fase è stato sufficiente suddividere il campione in uomini e donne.

Successivamente, è stato necessario capire in quale modo andare a suddividere il campione in base all'età.

A tal fine, si è deciso di suddividere i due campioni in fasce di età di 3 anni e per ognuna di queste, valutare quale valore di v_{max} comportasse una minore differenza tra i tempi medi di viaggio simulati ed i tempi medi di viaggio reali.

A livello pratico si sono utilizzate delle tabelle pivot su *libreoffice calc*, in grado di generare automaticamente i risultati, impostando i giusti parametri in input.

Si riporta un esempio di tabella pivot ricavata per la velocità massima $v_{max} = 4 \frac{m}{s}$, per il genere uomo:

Birth year	Tempi simulati [s]	Tempi reali [s]
1944-1946	964,9	828
1947-1949	1088,3	1103,2
1950-1952	1150,5	692,2
1953-1955	981,6	925,7
1956-1958	1049	675,4
1959-1961	1055	937,4
1962-1964	1072,2	797,4
1965-1967	1064,5	943,3
1968-1970	1050	864
1971-1973	1051,6	853,1
1974-1976	1066,5	857,7
1977-1979	1109,1	808,1
1980-1982	1006,1	890,4
1983-1985	1045	817,8
1986-1988	1004,7	729,5
1989-1991	1001,1	772
1992-1994	1126,2	829
1995-1997	1038,8	712,3
1998-2000	992,4	803,4
2001-2002	1315,5	1034
Totale Risultato	1048,7	819,9

Tabella 1 - Esempio tabella pivot

Dalla tabella si nota che il campione è stato suddiviso in fasce di età di 3 anni e che per ognuna di queste, sono stati calcolati i tempi medi di viaggio simulati (Tempi simulati [s]) ed i tempi medi di viaggio reali (Tempi reali [s]).

Si puntualizza che i risultati osservabili in tabella sono stati ricavati per tutte le velocità massime utilizzate durante le simulazioni e per entrambi i generi.

Infine, è stato sufficiente associare ad ogni fascia di età il valore di velocità massima (v_{max}) che meglio rappresentasse il tempo medio di viaggio reale.

Di seguito si riporta la tabella dei risultati per il genere uomo:

Birth year (Maschi)	v_{max} più simile [m/s]	Numerosità campione
1944-1946	5	15
1947-1949	4	25
1950-1952	6	11
1953-1955	4,5	155
1956-1958	7	68
1959-1961	4,5	105
1962-1964	6	168
1965-1967	5	158
1968-1970	5,5	186
1971-1973	5,5	192
1974-1976	5	312
1977-1979	7	283
1980-1982	6	302
1983-1985	6,5	420
1986-1988	9	322
1989-1991	6,5	330
1992-1994	6,5	352
1995-1997	8	392
1998-2000	8,5	12
2001-2002	8	2
		Totale=3810

Tabella 2 - Risultati suddivisione uomini

Dalla tabella si nota una tendenza del campione ad utilizzare valori di velocità massima superiore con il diminuire dell'età.

Sebbene sia possibile osservare alcuni risultati contro tendenza rispetto a quanto appena scritto, vale la pena osservare, ad esempio, che la fascia di età

1956-1958, sebbene abbia una $v_{max} = 7 \text{ m/s}$, presenta un campione formato da 68 ciclisti, pertanto risulta essere poco rappresentativo.

Mentre valutando l'andamento nel suo insieme, è possibile osservare che mediamente si ha un aumento significativo delle velocità massime a partire dall'anno 1977, essendo le tracce GPS riferite all'anno 2017, è stato deciso di suddividere il campione in under 40 ($età \leq 1977$) ed over 40 ($età > 1977$).

Inoltre, è possibile osservare che le velocità massime all'interno delle due suddivisioni ricavate, risultano essere molto simili tra loro, pertanto si è deciso di non attuare ulteriori suddivisioni.

Analogamente a quanto visto per il genere uomini, è stato attuato lo stesso procedimento per il genere donna.

Di seguito si riporta la tabella dei risultati per il genere donna:

Birth year (Femmine)	v_{max} più simile [m/s]	numerosità campione
1942-1944	1	1
1945-1947	3	1
1948-1950	3,5	6
1951-1953	5	9
1954-1956	5	33
1957-1959	4,5	126
1960-1962	3,5	123
1963-1965	4	98
1966-1968	4,5	105
1969-1971	4	176
1972-1974	4	216
1975-1977	5	153
1978-1980	4,5	208
1981-1983	6	268
1984-1986	5	293
1987-1989	5	409
1990-1992	5	405
1993-1995	5	408
1996-1998	5	197
1999-2001	7	10
2002-2004	7	1
2005-2006	3	1
		Totale=3247

Tabella 3 - Risultati suddivisione donne

Anche in questo caso si sono fatte le stesse considerazioni attuate precedentemente per il genere uomo, pertanto è stato suddiviso il campione in under 40 ($età \leq 1977$) ed over 40 ($età > 1977$).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva della divisione del campione appena ricavata:

Maschi	Femmine
Under 40 (15-40 anni)	Under 40 (11-40 anni)
Over 40 (41-73 anni)	Over 40 (41-75 anni)

Tabella 4 - Risultati classificazione del campione

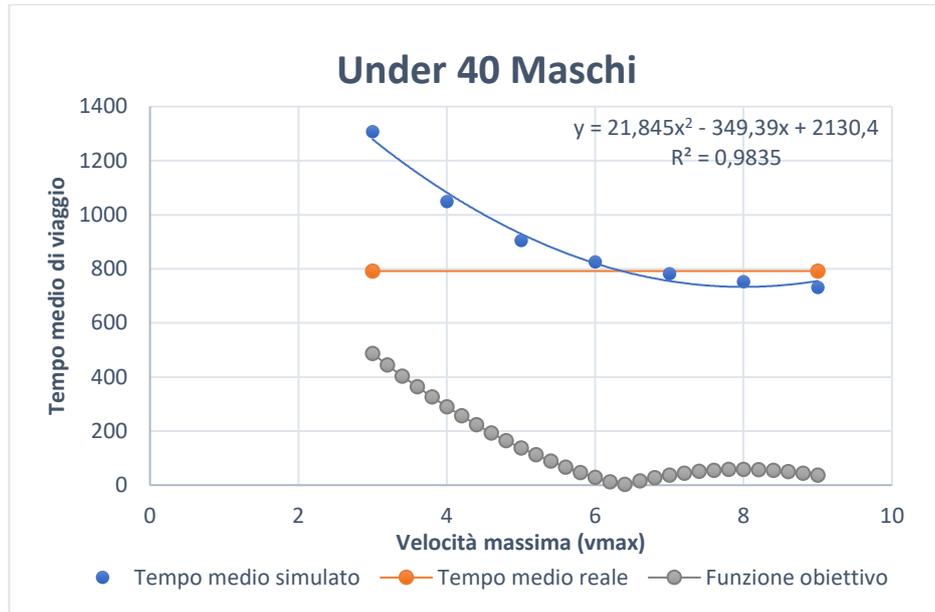
Terminata la suddivisione del campione, è possibile procedere alla costruzione della funzione obiettivo per le categorie individuate.

6.8 FUNZIONE OBIETTIVO

Come precedentemente visto all'interno di questo capitolo, al fine di individuare la v_{max} più rappresentativa del campione, si è fatto uso di una funzione obiettivo che permettesse di minimizzare la differenza tra i tempi medi di viaggio simulati ed i tempi medi di viaggio reali.

Di seguito, vengono elencati i risultati ottenuti attuando il procedimento appena descritto e già visto nel caso dell'intero campione, sulla base della classificazione consultabile in tabella 4.

6.8.1 Funzione obiettivo - Uomini under 40



Al fine della costruzione della funzione obiettivo (linea grigia) è stata effettuata un'interpolazione dei tempi medi di viaggio (punti blu), in maniera tale da massimizzare il coefficiente $R^2 = 0,98$, rappresentativo della bontà dell'interpolazione.

Attuando la sottrazione in valore assoluto tra la curva dell'interpolazione (I) ed il tempo medio di viaggio reale (R), si ricava la funzione obiettivo (B).

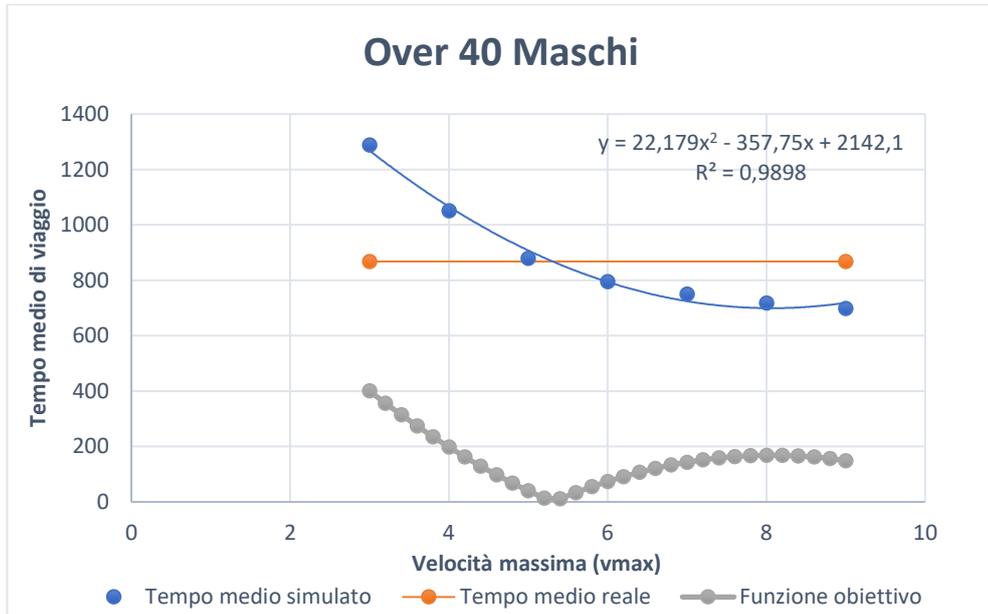
$$B = I - R$$

Dai risultati emerge che il minimo della funzione obiettivo risulta essere:

$$v_{max} = 6,2 \frac{m}{s}.$$

Andando a ripetere le operazioni appena descritte per questa categoria, si ricavano i grafici, ed i valori di velocità massima, per le restanti categorie nei paragrafi successivi.

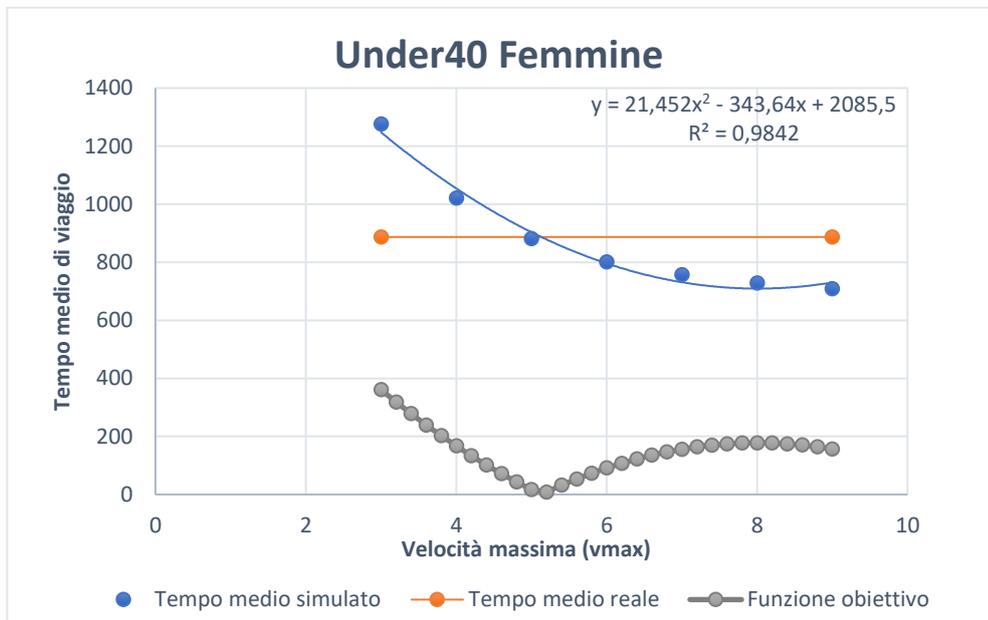
6.8.2 Funzione obiettivo – Uomini over 40



Dai risultati emerge che il valore di velocità massima ricavato per questa categoria risulta essere:

$$v_{max} = 5,4 \frac{m}{s}$$

6.8.3 Funzione obiettivo – Under 40 donne

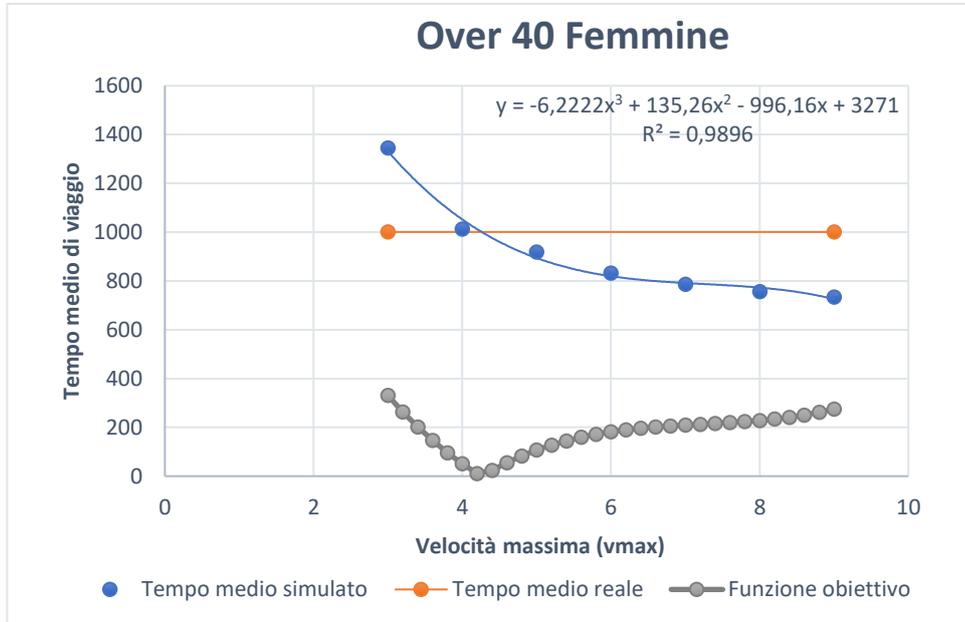


Dai risultati emerge che il valore di velocità massima ricavato per questa categoria risulta essere:

$$v_{max} = 5,2 \frac{m}{s}$$

Si nota, che si ricava lo stesso valore di velocità massima ricavato nel caso dell'intero campione.

6.8.4 Funzione obiettivo – Over 40 donne



Dai risultati emerge che il valore di velocità massima ricavato per questa categoria risulta essere:

$$v_{max} = 4,2 \frac{m}{s}.$$

6.8.5 Riassunto dei risultati

Di seguito si riporta una tabella (Tab.5) riassuntiva dei risultati appena conseguiti:

Categoria:	$v_{max} [m/s]$ ricavata:
Under 40 maschi	6,2
Over 40 maschi	5,4
Under 40 Femmine	5,2
Over 40 Femmine	4,2

Tabella 5 - Risultati conclusivi

6.9 SIMULAZIONI CONCLUSIVE E RISULTATI

In questo paragrafo verrà spiegata la creazione dei tre scenari (Scenario 1, Scenario 2, Scenario 3), già definiti nel capitolo riguardante la metodologia.

Tali scenari differiscono tra loro sulla base dei vehicle types (Vtypes) utilizzati e sulla base dei filtri post map-matching, mentre il modello di rete è invariato.

Al fine delle successive micro-simulazioni avvenute nei tre scenari, è stata creata una nuova popolazione virtuale per ogni scenario, che tenesse conto del flusso ciclabile reale, ottenuto mediante il confronto tra i flussi misurati ed i flussi determinati all'interno di una campagna di rilievi manuali tenutasi nel mese di Maggio 2017.

Quello che si è fatto, al fine di determinare la domanda ciclabile reale, è stato ricercare un coefficiente moltiplicativo che si potesse applicare ai flussi simulati dal software mediante analisi precedenti, al fine di ottenere una stima sufficientemente precisa della domanda ciclabile reale che è possibile osservare in un periodo temporale pari ad 1 ora, in un giorno feriale nel periodo di punta della mattina.

Tale coefficiente (Trip_Scale) è stato ricavato utilizzando la seguente relazione:

$$c = \frac{\sum_i (F_i \times P_i)}{(P_i^2)}$$

Dove F_i rappresenta il flusso medio orario misurato sulla i -esima sezione, mentre P_i indica i flussi simulati lungo l'arco coincidente con la sezione considerata.

In figura 48 si riporta l'esempio di generazione della domanda ciclabile per lo scenario 1.

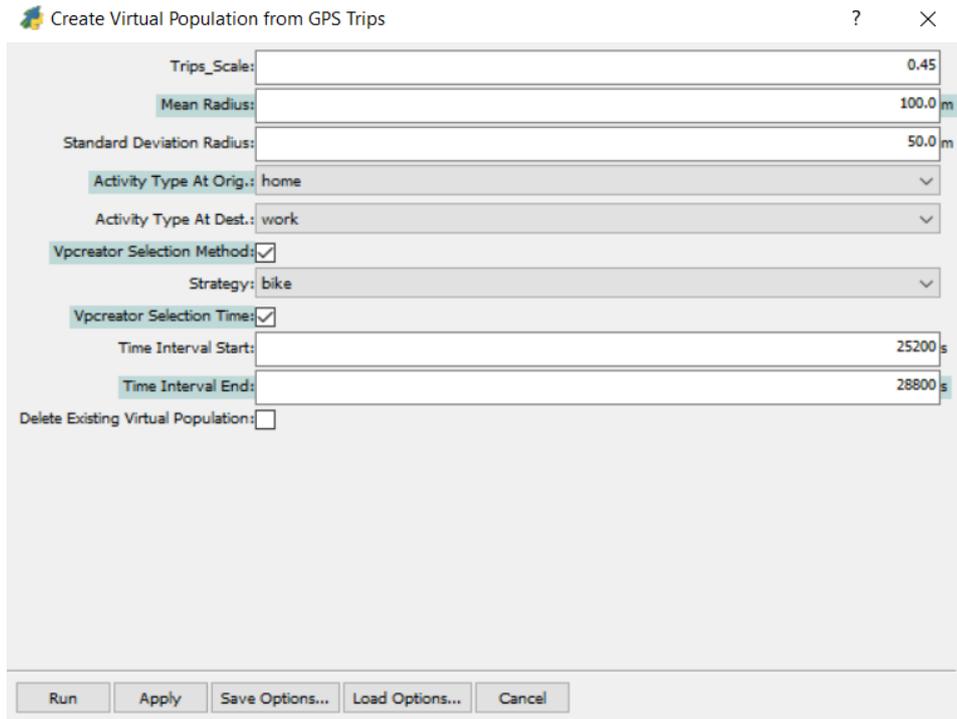


Figura 48 - Parametro $Trip_Scale$ e generazione domanda reale

6.9.1 Scenario 1

Inizialmente si è deciso di effettuare una micro-simulazione in cui il comportamento del ciclista fosse uguale per tutti (Vtype unico; $v_{max} = 5,2 \frac{m}{s}$), in maniera tale da valutare nelle successive simulazioni un eventuale miglioramento, andando ad applicare la classificazione dei ciclisti come da tabella 5.

Dai risultati emerge che il tempo medio di viaggio delle tracce GPS (t_{GPS}) ed il tempo medio di viaggio simulato (t_{sim}) sono molto simili, infatti:

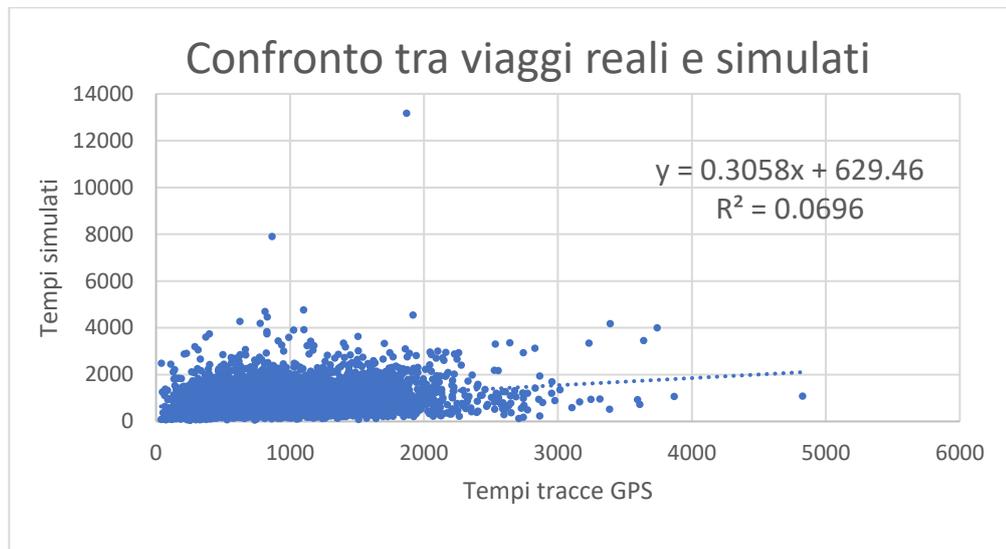
$$t_{GPS} = 871s$$

$$t_{sim} = 865s$$

La differenza temporale è dettata dal fatto che vi è un'aleatorietà di 5-15s tra due simulazioni uguali tra loro, in termini di tempo medio di viaggio simulato.

Come ampiamente spiegato, ad ogni ciclista virtuale è associata una traccia GPS di un ciclista reale, pertanto è possibile effettuare il confronto tra il tempo di viaggio dell'*i*-esimo ciclista della popolazione virtuale, con il corrispettivo tempo di viaggio effettuato dall' *i*-esimo ciclista reale.

Di seguito si riporta il grafico a dispersione dove ad ogni viaggio reale è associato il corrispettivo viaggio simulato:



Dai risultati emerge un coefficiente $R^2 = 0,07$ molto scadente, il motivo di tale valore è dovuto al fatto che in questa simulazione non è stata attuata alcuna differenziazione tra i comportamenti dei ciclisti, pertanto, sebbene il tempo medio dei viaggi simulati, risulta essere molto simile al tempo medio di viaggio reale, le tracce valutate singolarmente sono state riprodotte in maniera molto scarsa all'interno del software.

6.9.2 Scenario 2

Nella creazione dello scenario 2 è stata applicata la classificazione, attuata all'interno di questo elaborato, sulla base del genere e dell'età, consultabile in tabella 5.

Questo ha comportato alla creazione di quattro differenti vehicle type per i ciclisti (Vtype).

I Vtype differiscono tra loro sulla base della velocità massima.

In figura 49 è possibile notare che è stata introdotta all'interno del generatore della popolazione virtuale a partire delle tracce GPS la possibilità di impostare differenti Vtype per i maschi giovani (Young Males), per i maschi anziani (Old Males), per le femmine giovani (Young females) e per le femmine anziane (Old Females).

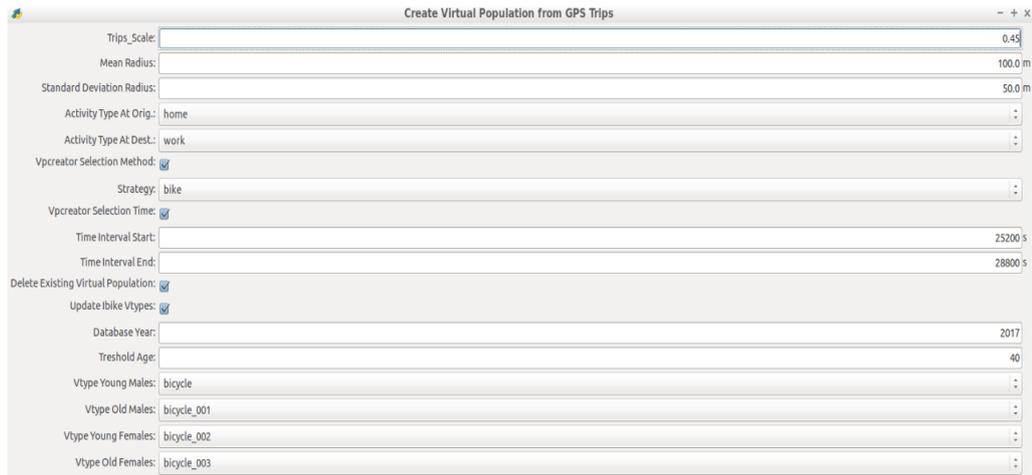


Figura 49 - Creazione domanda ciclabile reale con 4 Vtypes differenti

In seguito, è stata effettuata una micro-simulazione con la nuova domanda ciclabile, avente i parametri consultabili in figura 50.

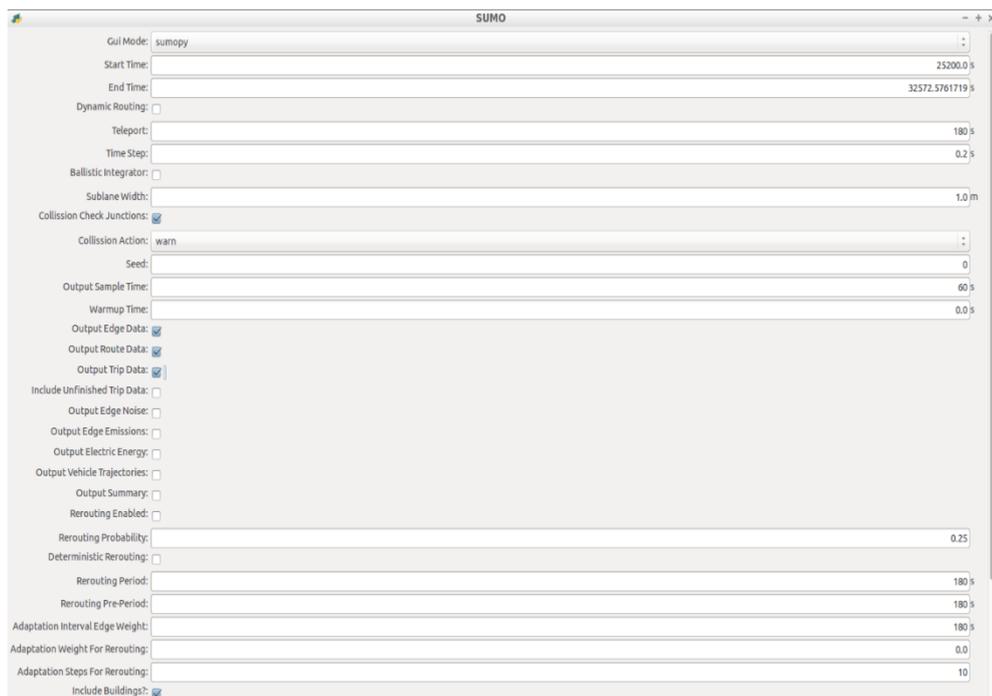


Figura 50 - Parametri microsimulazione

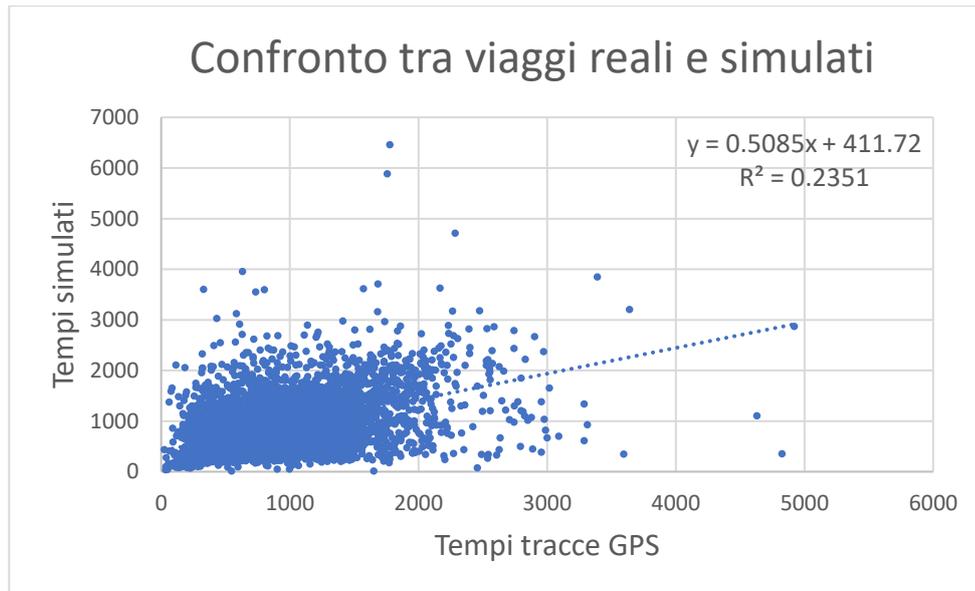
Dai risultati emerge che il tempo medio di viaggio delle tracce GPS (t_{GPS}) ed il tempo medio di viaggio simulato (t_{sim}) sono molto simili, infatti:

$$t_{GPS} = 871s$$

$$t_{sim} = 855s$$

Come ampiamente spiegato, ad ogni ciclista virtuale è associata una traccia GPS di un ciclista reale, pertanto è possibile effettuare il confronto tra il tempo di viaggio dell'i-esimo ciclista della popolazione virtuale, con il corrispettivo tempo di viaggio effettuato dal ciclista reale.

Di seguito si riporta il grafico a dispersione:



Da questa analisi emerge che vi è un netto miglioramento rispetto al caso visto precedentemente nello scenario 1, in cui era stata utilizzato un unico Vtype avente $v_{max} = 5,2 \frac{m}{s}$ per tutti i ciclisti, ricavato mediante funzione obiettivo.

Sebbene il coefficiente $R^2 = 0,24$, vada ad indicare un modello scarso, si ha un netto miglioramento rispetto al caso precedente $R^2 = 0,06$.

Tale miglioramento è sicuramente dovuto all'attribuzione ad ogni categoria del Vtype ricavato dalle analisi precedenti.

6.9.3 Scenario 3

Al seguito del miglioramento appena descritto si è deciso di variare i parametri del filtro post map matching.

Infatti, si è deciso di ridurre, sia il valore di distance error accettabile, sia la forchetta dei valori accettati di length index, come descritti di seguito:

- 90 % >li >106 %;
- de<10m.

Alla base di tale scelta vi è il fatto di andare a considerare quelle tracce che vanno maggiormente a rappresentare il viaggio reale del ciclista in termini di lunghezza del viaggio, a seguito del map-matching, in maniera tale da valutare se vi fosse un miglioramento nei risultati, specialmente nel coefficiente R^2 del modello.

I valori sopra elencati sono giustificati da approfondite analisi effettuate sulle tracce GPS in fase di editing della rete, infatti si è visto che tali parametri vanno a generare dei viaggi simulati in modo molto preciso in termini di percorso effettuato.

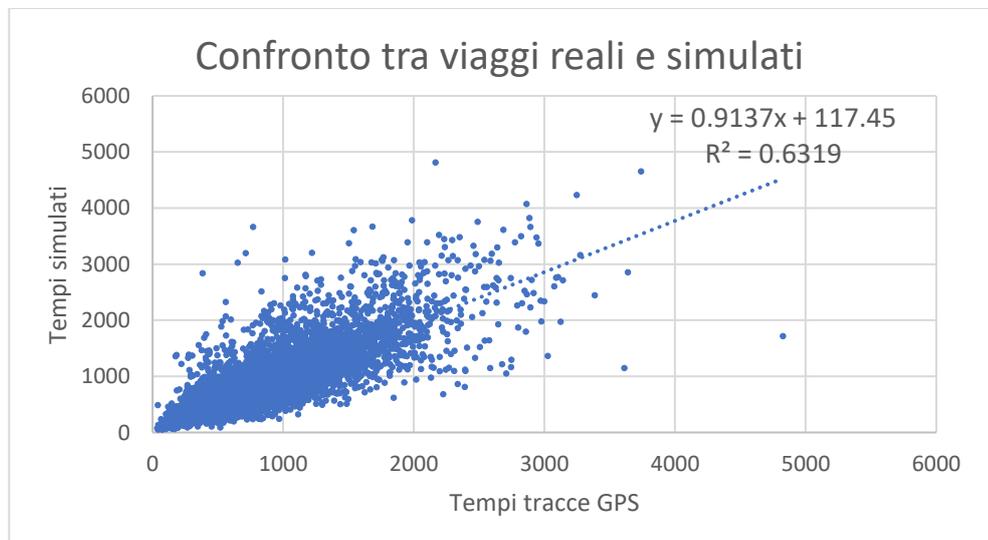
Anche in questo caso è stata ricreata la popolazione virtuale, in maniera tale da riprodurre la domanda reale, ed è stata attuata la medesima classificazione della popolazione virtuale vista nello scenario 2.

Dai risultati emerge che il tempo medio di viaggio delle tracce GPS (t_{GPS}) ed il tempo medio di viaggio simulato (t_{sim}) sono molto simili, infatti:

$$t_{GPS} = 875s$$

$$t_{sim} = 897s$$

Di seguito si riporta il confronto dei tempi delle tracce GPS coi corrispettivi tempi dei viaggi simulati:



Dai risultati emerge che in questo caso vi è un netto miglioramento del modello.

In generale, il valore $R^2 = 0,63$ si potrebbe considerare scarso, ma nel caso specifico bisogna considerare che il comportamento degli utenti reali e quindi della durata temporale del viaggio, è influenzata da fattori imprevedibili, che vanno ad aumentare le divergenze con il comportamento dei ciclisti all'interno del simulatore.

Per esempio, un ciclista reale può fermarsi per rispondere al telefono, guardare una vetrina ecc., oppure semplicemente nel caso reale il ciclista trova la lanterna semaforica posta sul verde, mentre il corrispettivo ciclista simulato sul rosso, generando una differenza temporale di viaggio notevole.

Per questo motivo, il coefficiente R^2 ricavato risulta soddisfacente.

Un altro parametro soddisfacente risulta essere il coefficiente angolare della retta di regressione, il quale essendo prossimo all'unità, più precisamente pari a 0,91, indica una buona corrispondenza tra le grandezze riportate sugli assi.

6.10 STATISTICA DEI RISULTATI

Di seguito viene riportata una tabella contenente i risultati di alcune statistiche effettuate sui casi studio precedentemente descritti, l'analisi è stata effettuata andando a confrontare i viaggi degli utenti reali con i corrispettivi viaggi simulati:

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Media differenze in valore assoluto [s]	417,6	326	231
Media errore relativo in valore assoluto (MER)	0,63	0,46	0,29
Varianza (MER)	1,73	0,74	0,15
Deviazione standard (MER)	1,32	0,86	0,39
Media errori relativi	-0,3	-0,15	-0,1
R^2 del modello	0,07	0,24	0,63

Dai risultati si nota che vi è un netto miglioramento per quanto riguarda lo scenario 3, il quale include nello studio delle tracce GPS aventi valori di

length index stringenti, permettendo una simulazione dei viaggi molto simile al caso reale.

7 RISULTATI

Una volta conclusa la calibrazione del modello, attraverso la quale è stato possibile osservare dei risultati soddisfacenti per quanto riguarda lo scenario 3, sono state realizzati dei plot al fine di valutare differenti risultati:

- Flusso totale sugli archi;
- Velocità media sugli archi;
- Densità media sugli archi;
- Tempi medi di attesa sugli archi.

I risultati riguardano la micro-simulazione di un'ora di punta del mattino di un generico giorno ferialo.

Lo scenario utilizzato è lo scenario 3.

7.1 FLUSSO TOTALE SUGLI ARCHI

Si riporta in figura 51 il flusso ciclabile totale sugli archi:

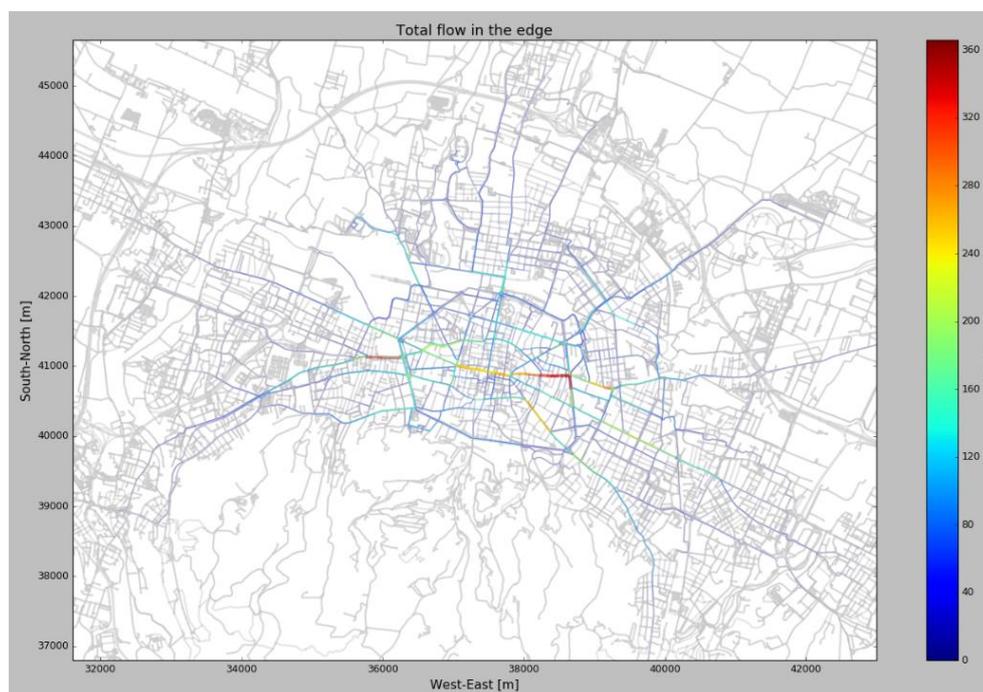


Figura 51 - Flussi ciclabili

I flussi più alti si riscontrano nel centro storico della città o in prossimità di esso, in particolare, i flussi maggiori sono in Strada Maggiore, in alcune zone dei viali, in via Riva di Reno, via Andrea Costa e via Sabotino dove il

flusso totale sugli archi arrivano a 250-360 unità, caratterizzate dai colori giallo, arancione e rosso.

Si nota, che tale risultato combacia con le considerazioni realizzate nella fase di determinazione dell'area di studio.

7.2 VELOCITÀ MEDIA SUGLI ARCHI

Si riporta in figura 52 la velocità media di percorrenza sugli archi:

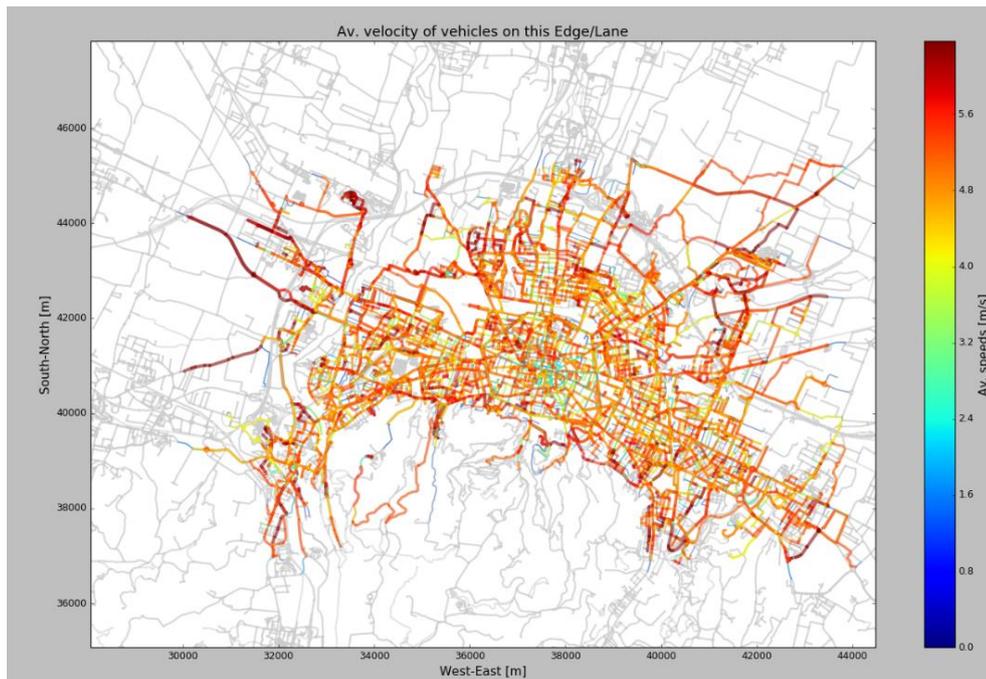


Figura 52 - Velocità media sugli archi

Si nota che all'interno delle antiche mura della città si riscontra una velocità media mediamente inferiore rispetto alla restante parte della città.

Infatti, in questa zona si presentano un numero elevato di archi celesti e verdi, indici di velocità media più basse (2-3 m/s).

Tale risultato potrebbe essere dettato dai maggiori flussi presenti nel centro della città, i quali comportano maggiori interferenze tra i ciclisti.

Va infatti precisato che avendo attuato la classificazione del comportamento degli utenti basandoci sulla velocità massima, abbiamo introdotto la possibilità, da parte dei ciclisti più veloci, di accordarsi a quelli più lenti, quando non vi è possibilità di sorpasso, comportando una riduzione delle velocità medie di percorrenza degli archi.

Allontanandosi dal centro città, dove i flussi e di conseguenza le interferenze sono minori, si hanno velocità medie più alte, caratterizzate dal colore rosso (5-6m/s).

7.3 DENSITÀ MEDIA SUGLI ARCHI

Si riporta in figura 53 la densità media di percorrenza sugli archi:

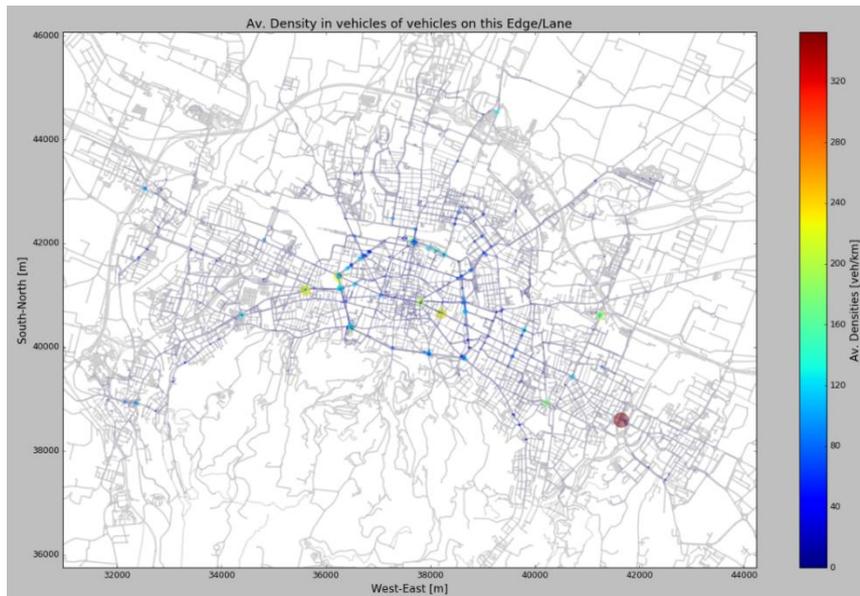


Figura 53 - Densità media sugli archi

Si ha una densità media maggiore in corrispondenza del centro storico della città, è facile osservare che in prossimità delle intersezioni semaforizzate vi è un aumento della densità media.

Tale fenomeno è facilmente osservabile in corrispondenza dei viali, i quali sono soggetti a numerose intersezioni semaforizzate, un esempio è il caso di porta San Felice, caratterizzata dal colore giallo, indicativo di una densità media di 200 veic/km, una tra le più alte osservabili in figura.

7.4 TEMPI MEDI DI ATTESA SUGLI ARCHI

Si riporta in figura 54 la densità media di percorrenza sugli archi:

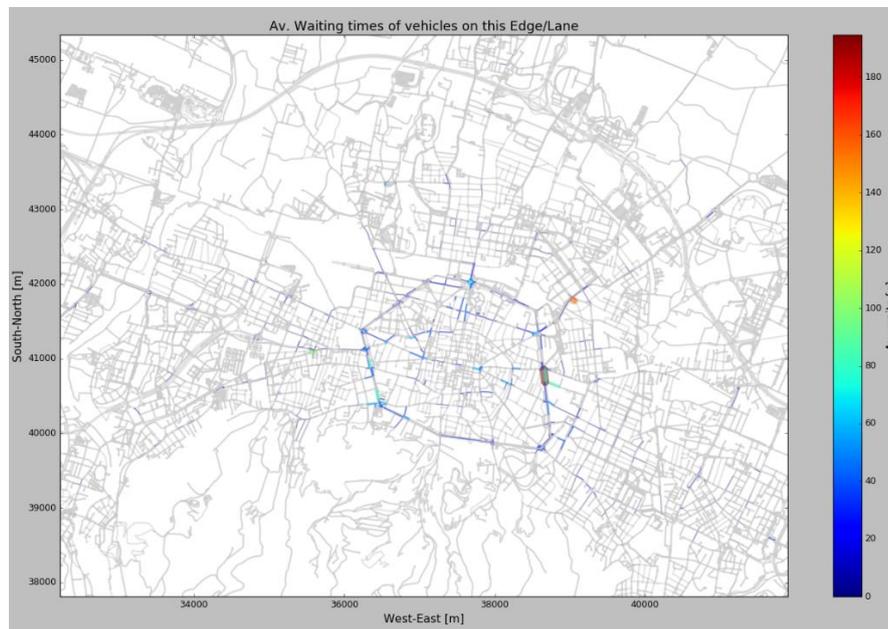


Figura 54 - Tempo medio di attesa sugli archi

Dai risultati emerge che i tempi medi di attesa più elevati sono in corrispondenza dei viali di Bologna, in particolare in prossimità delle intersezioni semaforizzate.

I tempi di attesa maggiori si riscontrano in porta San Felice, via Sabotino e nell'intersezione tra via Matteotti ed i viali di Bologna, con un tempo di attesa medio di 60-100s, mentre nell'intersezione tra viale Filopanti e viale Ercolani si ha il tempo medio di attesa più elevati (colorazione rossa) pari a 130s.

7.5 PROFILI DI VELOCITÀ

Come già ampiamente descritto all'interno dell'elaborato, la generazione della domanda ciclabile viene realizzata mediante la ricostruzione di viaggi reali identificati mediante tracce GPS, pertanto ad ogni viaggio simulato corrisponde un viaggio effettuato nella realtà.

Da queste considerazioni è possibile il confronto tra i profili di velocità (velocità-tempo) del viaggio simulato con quello reale, al fine di indentificare eventuali errori di rappresentazioni del software nell' ambito della micro-simulazione.

A tale scopo è stata individuata una traccia GPS ritenuta significativa, ovvero sufficientemente lunga e che transitasse per numerose intersezioni semaforizzate.

Come è possibile osservare in figura 55, la traccia GPS selezionata parte dal quartiere Murri ed arriva nel quartiere Saragozza, passando per i viali di Bologna, lungo Porta Santo Stefano, Porta Castiglione, Porta San Mamolo e Porta Saragozza.

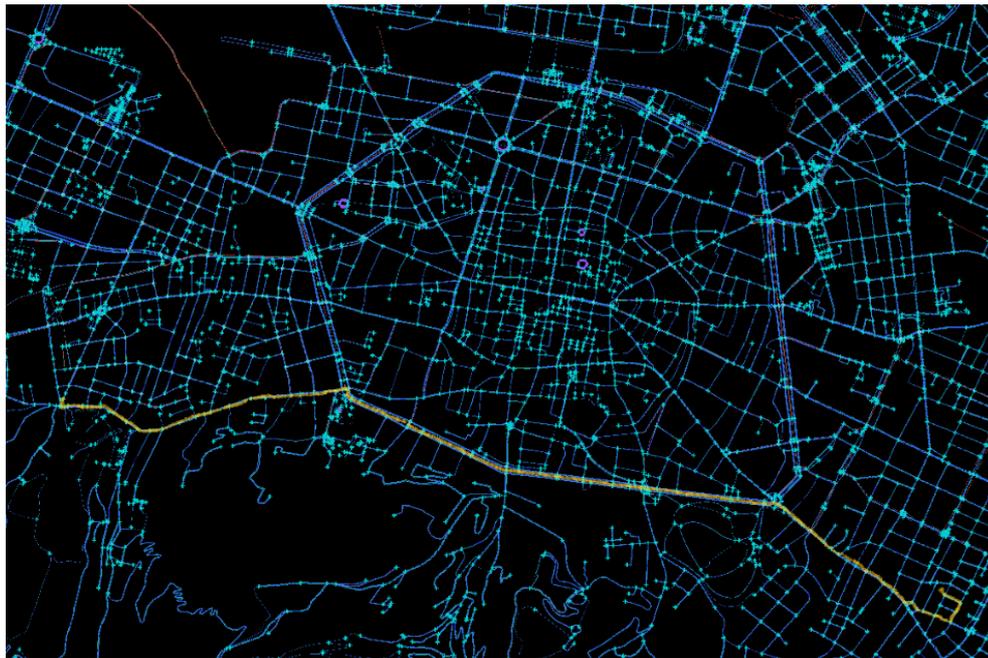


Figura 55 - Traccia GPS

Di seguito si riportano i profili di velocità della traccia GPS reale e di quella simulata:

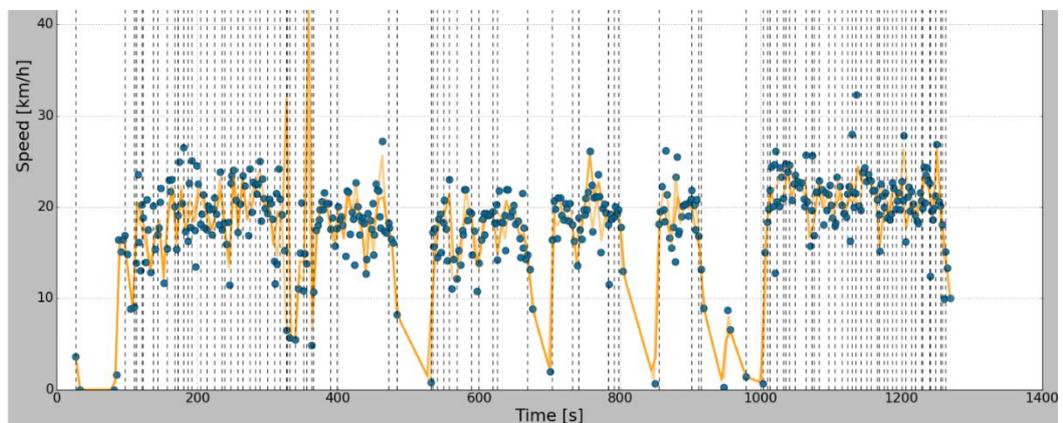


Figura 56 - Profilo di velocità traccia GPS reale

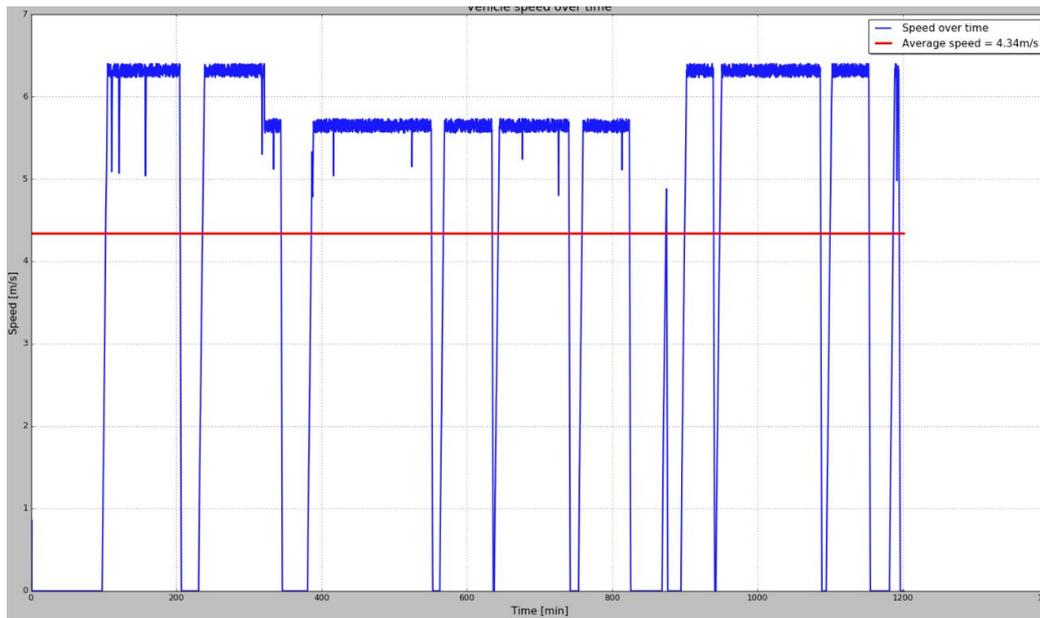


Figura 57 - Profilo di velocità traccia GPS simulata

Dal confronto tra i due profili di velocità si possono attuare numerose ed interessanti osservazioni.

La differenza temporale della durata dei viaggi è minima, entrambi i profili si arrestano a circa 1200s.

La traccia GPS si riferisce ad un ciclista maschio under 40, pertanto parametrizzato con una velocità massima di 6,2 m/s (circa 22 km/h), ovvero la velocità costante a cui tende il ciclista quando non incontra traffico, mentre nel profilo di velocità reale si nota che il ciclista non ha una velocità costante e questa varia continuamente, comunque oscillando attorno ai 20 km/h.

Pertanto, è possibile affermare che le velocità medie lungo gli archi sono comparabili, osservando i due profili.

Un altro aspetto confrontabile riguarda le intersezioni semaforizzate, osservando entrambi i profili di velocità è possibile notare che vi sono dei tempi di attesa, alcuni quasi sovrapponibili.

Mediante delle analisi effettuate sui profili di velocità, è stato possibile determinare quali intersezioni semaforizzate fossero causa dei tempi di attesa osservabili nelle immagini, così da confrontarne gli effetti sul profilo di velocità nei due casi.

Il profilo di velocità reale non presenta un tempo di attesa a 200s osservabile nel profilo simulato, dovuto al semaforo presente a Porta Santo

Stefano. Tale divergenza potrebbe risiedere nel fatto che il ciclista nel caso reale ha trovato la lanterna semaforica sul verde, mentre il ciclista simulato sul rosso.

Verso i 600 secondi è possibile osservare un tempo di attesa in entrambi i profili dovuto al semaforo di Porta Castiglione, tale comportamento è possibile osservarlo anche a 700s, a 900s ed a 1000s a causa dei semafori di Porta San Mamolo, di viale Aldini e di Porta Saragozza rispettivamente.

Dal confronto è possibile osservare che i tempi di attesa nelle intersezioni semaforizzate sono ad alta varianza, in quanto dipendono dalla forte aleatorietà dovuta al momento in cui il ciclista si presenta all'intersezione e quando la lanterna semaforica sarà posta sul verde.

Da queste osservazioni è possibile apprezzare maggiormente il coefficiente $R^2 = 0,63$ ottenuto dallo Scenario 3 nel corso della trattazione.

8 CONCLUSIONI

In conclusione, all'interno di questo elaborato è stata attuata una classificazione dei ciclisti sulla base del genere e dell'età, in maniera tale da rendere le micro-simulazioni su larga scala più realistiche ed affidabili.

Inoltre, è stato effettuato il confronto tra i singoli tempi di viaggio dei ciclisti reali, ottenuti mediante tracce GPS, ed i corrispondenti tempi dei viaggi simulati.

Nella prima fase, è stato necessario creare uno scenario *test* sul quale attuare diverse simulazioni, al fine di determinare i tempi medi di viaggio simulati, andando a variare il parametro dinamico *velocità massima*, il quale ha permesso di classificare il campione a disposizione sulla base del genere e dell'età.

Tale parametro, va ad indicare la velocità massima a cui tende il ciclista simulato in condizioni di deflusso libero.

Le micro-simulazioni, oltre a fornire informazioni relative ai tempi di viaggio, sia a livello di grandezze medie, sia relative alle singole tracce GPS simulate, hanno permesso la costruzione di una funzione obiettivo che andasse a minimizzare la differenza tra la curva dei tempi medi di viaggio simulati, con la linea costante relativa al tempo medio di viaggio reale.

Il minimo della funzione obiettivo va ad indicare il valore di velocità massima che meglio rappresenta il campione in esame.

Mediante approfondite analisi descritte nel capitolo 6, si è suddivisa la popolazione in maschi under 40, maschi over 40, femmine under 40 e femmine over 40.

Successivamente sono stati creati tre differenti scenari, utilizzando una domanda reale, ricavata dal confronto tra i flussi simulati ed i flussi rilevati in alcune sezioni della rete ciclabile di Bologna:

- Scenario 1: La domanda ciclabile è simulata mediante un unico vehicle type, avente velocità massima ricavata mediante funzione obiettivo;

- Scenario 2: La domanda ciclabile è suddivisa sulla base del genere e dell'età, mediante la classificazione scritta precedentemente. Ogni categoria ha un vehicle type con velocità massima ricavata mediante funzione obiettivo;
- Scenario 3: La suddivisione è la medesima dello scenario 2, ma le tracce GPS utilizzate hanno i parametri length index e distance error, indicativi della qualità della traccia GPS, più aderenti alla realtà.

Dai risultati emerge che nei tre differenti scenari si ha un tempo medio di viaggio simulato molto simile al tempo medio di viaggio reale, mentre andando a confrontare i tempi delle singole tracce GPS, con il rispettivo tempo simulato si hanno risultati molto differenti.

Nello scenario 1, il coefficiente $R^2 = 0,07$ relativo al modello, indica una pessima rappresentazione dei viaggi simulati, rispetto al caso reale.

Tale risultato è dovuto all'assenza della classificazione sulla base del genere e dell'età, pertanto un unico vehicle type per tutti i ciclisti non va a riprodurre correttamente la domanda ciclabile.

Nello scenario 2, si ottiene un coefficiente $R^2 = 0,24$ relativo al modello, il quale indica un netto miglioramento rispetto al caso 1, grazie alla classificazione effettuata, che ha permesso una migliore rappresentazione della domanda di trasporto dei ciclisti, anche se ancora non adeguata.

Nello scenario 3, si ottiene un coefficiente $R^2 = 0,63$, che in considerazione del comportamento spesso imprevedibile dei ciclisti, come spiegato nel capitolo 6, può essere considerato un discreto risultato.

Tale risultato è infatti dovuto ad una maggiore qualità delle tracce GPS utilizzate, pertanto è possibile concludere che utilizzando parametri di length index (li) e distance error (de) appropriati ($90 < li < 106$; $de < 12m$), ed attuando una classificazione dei ciclisti sulla base del parametro dinamico *velocità massima* è possibile raggiungere dei livelli di rappresentazione dei ciclisti sufficientemente simile alla realtà.

Va rimarcato come in letteratura scientifica ancora non vi siano lavori riguardanti la parametrizzazione del ciclista sulla base del genere e dell'età,

inoltre si sottolinea che tale elaborato è stato realizzato in assenza di traffico veicolare differente dalla bicicletta, ma grazie al lavoro svolto si sono poste delle basi solide su cui appoggiarsi in caso di implementazione di altre componenti veicolari all'interno di scenari futuri.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Gunnar Flötteröd · Yu Chen · Kai Nagel. Behavioral Calibration and Analysis of a Large-Scale Travel Microsimulation.
- [2] Patrick Manser, Henrik Becker, Sebastian Hörl, Kay W. Axhausen. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation.
- [3] M. J. Wierbos, V. L. Knoop, F. S. Hänseler & S. P. Hoogendoorn. A macroscopic flow model for mixed bicycle–car traffic.
- [4] AP Silvano, HN Koutsopoulos, X Ma. Analysis of vehicle-bicycle interactions at unsignalized crossings: A probabilistic approach and application.
- [5] Rupi, Bernardi. An analysis of bicycle travel speed and disturbances on off-street and on-street facilities.
- [6] S. Pogodzinska, M. Kiec, C. D’agostino. Bicycle Traffic Volume Estimation Based on GPS Data.
- [7] F Rupi, C Poliziani, J Schweizer. Analysing the dynamic performances of a bicycle network with a temporal analysis of GPS traces.
- [8] F Rupi, C Poliziani, J Schweizer. Data-driven bicycle network analysis based on traditional counting methods and GPS traces from smartphone.
- [9] A. El-Geneidy, K. Krizek, M. Iacono. Predicting bicycle travel speeds along different facilities using GPS data: a proof of concept model.
- [10] F Rupi, C Poliziani, J Schweizer, D. Morgano. Building a Large-Scale Micro-Simulation Transport Scenario Using Big Data.
- [12] M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, D. Krajzewicz. SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview, 2011
- [13] M. Balmer, K.W. Axhausen. Agent-Based Demand-Modeling Framework for Large-Scale Microsimulations, 2006
- [14] E. Cascetta. Transportation System Analysis: Models and Applications, Springer, New York, 2009
- [15] J. Schweizer, C. Poliziani. Dispense del Laboratorio di Infrastrutture Viarie e Trasporti. Università di Bologna, 2018

- [16] <https://www.google.it/maps>
- [17] <https://www.openstreetmap.org>
- [18] <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>