

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. PROGETTAZIONE FUNZIONALE ED ESERCIZIO

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA

RADDOPPIO PONTE S. PIETRO – BERGAMO - MONTELLO

Studio di trasporto

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

B G F 1 0 0 F 1 6 R G T S 0 0 0 3 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	M. Medda	03/2020	F.A. Marciàno	03/2020	M. Berlingieri	03/2020	 P. Rivoli 03/2020

File: BGF1-00-F-16-RG-TS0003-001-A

n. Elab.:

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	3
2	OBIETTIVO E METODOLOGIA DI ANALISI.....	5
2.1	Ambiti di intervento	5
2.2	Metodologia di analisi	8
3	CAMPAGNA DI INDAGINE	10
3.1	Posizione delle sezioni di conteggio.....	10
3.2	Risultati dell'indagine	12
4	IL MODELLO DI SIMULAZIONE	17
4.1	Matrice veicolare.....	17
5	RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE	19
6	ASSEGNAZIONE DEGLI SCENARI ATTUALE E FUTURO	23
6.1	Ambiti di intervento ad ovest di Bergamo	23
6.1.1	Flussogrammi e livelli di saturazione	23
6.1.2	Percorsi di costo minimo.....	29
6.2	Ambito di intervento ad est di Bergamo.....	34
6.2.1	Flussogrammi e livelli di saturazione	34
6.2.2	Percorsi di costo minimo.....	37
7	CONSIDERAZIONI FINALI.....	39
8	APPENDICE 1: METODOLOGIA DI RILIEVO.....	41
9	APPENDICE 2: GRAFO STRADALE.....	44
10	APPENDICE 3: PROCESSO DI CALIBRAZIONE	46
11	APPENDICE 4: ALGORITMO DI ASSEGNAZIONE.....	49

1 PREMESSA

Il documento illustra le ipotesi, l'approccio metodologico ed i principali risultati delle analisi finalizzate a valutare gli impatti sul traffico veicolare degli interventi progettati per le viabilità interferite dal progetto di raddoppio e dalla soppressione dei passaggi a livello (PL) della linea compresa tra le stazioni di Ponte San Pietro e Montello in provincia di Bergamo.

Nello specifico sono stati analizzati gli effetti relativi alla redistribuzione dei flussi di traffico sulle nuove viabilità e su quelle esistenti, conseguenti alla generazione di nuovi percorsi derivanti dalla soppressione di cinque passaggi a livello (PL) presenti sulla tratta di progetto.

L'analisi è stata eseguita impostando uno studio trasportistico di tipo macro su scala urbana, per apprezzare, a livello globale, le variazioni delle condizioni del deflusso veicolare come conseguenza della diversa distribuzione dei flussi di traffico tra la situazione attuale e lo scenario di progetto.

Dal punto di vista operativo si sono eseguite le seguenti attività:

- effettuazione delle indagini di campo per la ricostruzione della mobilità stradale negli ambiti di intervento ubicati in prossimità della città di Bergamo;
- simulazione macroscopica della mobilità stradale nell'area di intervento per gli scenari *pre* e *post*-intervento.

Le attività di verifica degli impatti degli interventi alla viabilità dell'area di progetto sono state effettuate mediante la simulazione e l'analisi delle **configurazioni infrastrutturali attuale e di progetto** a partire dal **modello regionale di simulazione** di Regione Lombardia, parte integrante del **Programma Regionale di Mobilità e Trasporti** (approvato da Regione Lombardia con D.C.R. n. 1245 il 20/9/2016) e dalla **matrice O/D dei veicoli commerciali e pesanti** presentata da Regione Lombardia nel 2018.

Il documento è articolato nella descrizione:

- degli **obiettivi** e della **metodologia** di analisi (capitolo 2);
- della **campagna di indagine** (capitolo 3);
- del **modello di simulazione**, con particolare riferimento alla matrice veicolare (capitolo 4);
- dei risultati della **calibrazione dello scenario attuale** del traffico stradale (capitolo 5);
- dei risultati dell'**assegnazione dei flussi** relativamente sia allo scenario attuale, sia a quello di progetto (capitolo 6);
- delle **considerazioni conclusive** relativamente agli ambiti d'intervento, tratte sulla base dei risultati ottenuti (capitolo 7).

Nella sezione relativa alle Appendici, il documento riporta il dettaglio:

Studio di trasporto

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
BGF1	00	F 16 RG	TS 0003 001	A	4 di 54

- della metodologia di indagine (Appendice 1);
- relativo al grafo stradale utilizzato e aggiornato ai fini delle simulazioni (Appendice 2);
- del processo di calibrazione (Appendice 3);
- dell'algoritmo di assegnazione (Appendice 4).

2 OBIETTIVO E METODOLOGIA DI ANALISI

L'analisi ha previsto l'esecuzione di uno studio di trasporto di tipo macro finalizzato a valutare gli impatti sul traffico veicolare derivanti dagli interventi progettati per le viabilità coinvolte dal progetto di raddoppio e di soppressione dei passaggi a livello (PL) della linea compresa tra Ponte San Pietro (BG) e Montello (BG).

Sono stati analizzati, nello specifico, gli effetti derivanti dalla redistribuzione dei flussi di traffico sulle nuove viabilità e su quelle esistenti, conseguenti alla generazione di nuovi percorsi derivanti dalla soppressione di cinque passaggi a livello (PL) presenti sulla tratta di progetto.

2.1 *Ambiti di intervento*

Il progetto di raddoppio della tratta ferroviaria Ponte S. Pietro-Bergamo Montello è suddiviso in due lotti funzionali:

- **Lotto 1**, da Bergamo (km 0+000 LS) alla stazione di Ponte S. Pietro e che prevede il raddoppio da Bergamo a Curno e sistemazione del PRG di Ponte S. Pietro;
- **Lotto 2**, da Bergamo (km 0+000 Ponte S. Pietro - LS coincidente con km 21+880 LS - Treviglio) a Montello (km 33+100 LS).

Con riferimento al Lotto 1, gli interventi stradali connessi al progetto di raddoppio sono:

- la soppressione di tre passaggi a livello (PL) evidenziati in Tabella 1 e ubicati lungo l'attuale linea tra Ponte San Pietro e Montello. Le opere sostitutive alla chiusura dei PL saranno esclusivamente destinate al transito pedoni e a ciclisti;
- la realizzazione di una viabilità di ricucitura con innesto sulla rotatoria esistente (Circonvallazione Leuceriano-Via Fermi) nell'area interessata dalla tratta ferroviaria Ponte San Pietro-Bergamo e di un sottovia alternativo nell'area di Montello, lungo la tratta Bergamo-Montello.

Con riferimento al Lotto 2, gli interventi stradali connessi al progetto di raddoppio prevedono la soppressione di due PL, evidenziati in Tabella 1, e la realizzazione di due sottovia carrabili come viabilità sostitutive a quelle passanti dai PL.

Tabella 1 - Interventi stradali lungo il tracciato della linea ferroviaria Ponte San Pietro – Bergamo – Montello

PFTE Raddoppio Ponte S. Pietro – Bergamo - Montello	OPERA
LOTTO 1: PONTE SAN PIETRO-BERGAMO	
Risoluzione passaggio a livello Km 5+182	Sottovia ciclopedonale in sostituzione al PL
Risoluzione passaggio a livello Km 4+241	Viabilità di ricucitura in sostituzione al PL
Risoluzione passaggio a livello Km 1+453	Sottovia ciclopedonale in sostituzione al PL
LOTTO 2: BERGAMO - MONTELLO	
Risoluzione passaggio a livello Km 7+580	Nuovo sottovia in sostituzione al PL
Risoluzione passaggio a livello Km 10+355	Nuovo sottovia in sostituzione al PL

Si precisa che per quanto riguarda il PL al km 7+580 ubicato nel Comune di Albano Sant’Alessandro, questo non è stato incluso nell’analisi e nel modello di simulazione macroscopica in quanto il relativo intervento di soppressione prevede la sostituzione del PL con un sottovia ubicato a ~100 metri ad est e in parallelo al passaggio esistente. L’intervento, pertanto, non produce una variazione della permeabilità del tessuto viabilistico esistente replicando di fatto la funzionalità di attraversamento del PL.

Sono stati individuati otto ambiti di intervento ricadenti in otto diverse zone secondo la zonizzazione del modello regionale assunto a riferimento (Mozzo, Curno, Treviolo, Bergamo 6, Bergamo 7, Montello, San Paolo d’Argon e Albano Sant’Alessandro)¹.

¹ Il modello regionale utilizzato prevede una zonizzazione comunale e per i principali comuni lombardi, tra cui Bergamo, sub comunale.

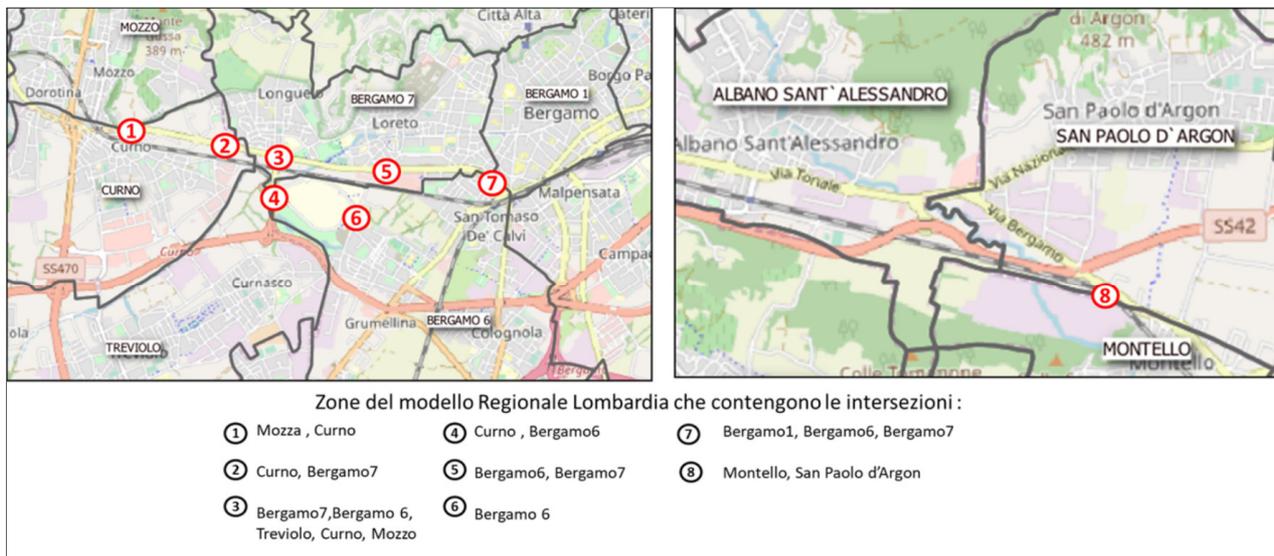


Figura 1 - Localizzazione degli ambiti di intervento

Nell'area compresa a ovest della città di Bergamo, lo **scenario di progetto** prevede la soppressione dei tre passaggi a livello che interessano gli **ambiti 1, 2 e 7**.

È prevista, inoltre, la realizzazione di una viabilità di ricucitura con innesto su una rotonda esistente lungo Circonvallazione Leuceriano - SS342 (**ambito 4**) e, a est di Bergamo, di un sottovia sostitutivo dell'attuale PL (Via Filzi-Via Bergamo) a Montello (**ambito 8**). Quest'ultimo si trova in prossimità del polo industriale del recupero e del riciclo dei rifiuti "Montello", che genera e attrae ~150 veicoli commerciali e pesanti (non equivalenti) al giorno².



Figura 2 - Interventi stradali – ambito 8 Montello (lotto 2)

² Fonte: matrice O/D dei veicoli commerciali e pesanti di Regione Lombardia, 2018

Ricadono, inoltre, nell'area di analisi e sono stati, quindi, oggetto di studio gli ulteriori **ambiti 3, 5 e 6**, strettamente connessi agli interventi di soppressione dei PL e in prossimità del polo ospedaliero Papa Giovanni XXIII di Bergamo.

Gli **otto ambiti** di intervento ricadono in un **territorio fortemente antropizzato**, che interessa 7 Comuni per un totale di 164.939 abitanti e una densità media di ~2.400 abitanti/kmq³, e caratterizzato da una **complessa rete viabilistica**.

2.2 Metodologia di analisi

Lo strumento utilizzato ai fini dell'analisi, in considerazione dell'ampiezza e della complessità dell'area di studio, è stato uno **studio di trasporto di tipo macroscopico**, allo scopo di evidenziare le modifiche della distribuzione dei flussi di traffico e le conseguenti variazioni delle prestazioni della rete stradale a livello globale, mettendo a confronto la situazione attuale con lo scenario di progetto.

Il modello ha acquisito come input la matrice veicolare dei passeggeri e delle merci di Regione Lombardia e il grafo stradale del modello regionale lombardo.

L'intera attività si è articolata nelle seguenti **tre fasi (A-C)**:

- A. la **predisposizione dei dati di input e del modello di simulazione macroscopico**. Parallelamente alla verifica e all'affinamento del grafo stradale, è stato realizzato il piano d'indagine del traffico nell'area d'intervento funzionale alla calibrazione del modello nella ricostruzione dello scenario attuale. È stata, inoltre, predisposta la matrice congiunta dei veicoli equivalenti passeggeri e commerciali/pesanti a partire dalla struttura già a disposizione e relativa all'intera Regione Lombardia;
- B. la **costruzione e la calibrazione dello scenario viabilistico attuale**, in considerazione dei dati acquisiti dalla campagna di indagine e degli input già a disposizione;
- C. l'**assegnazione degli scenari attuale e futuro di progetto** per la valutazione degli impatti indotti dagli interventi sul deflusso stradale nell'area di studio.

³ Fonte: ISTAT

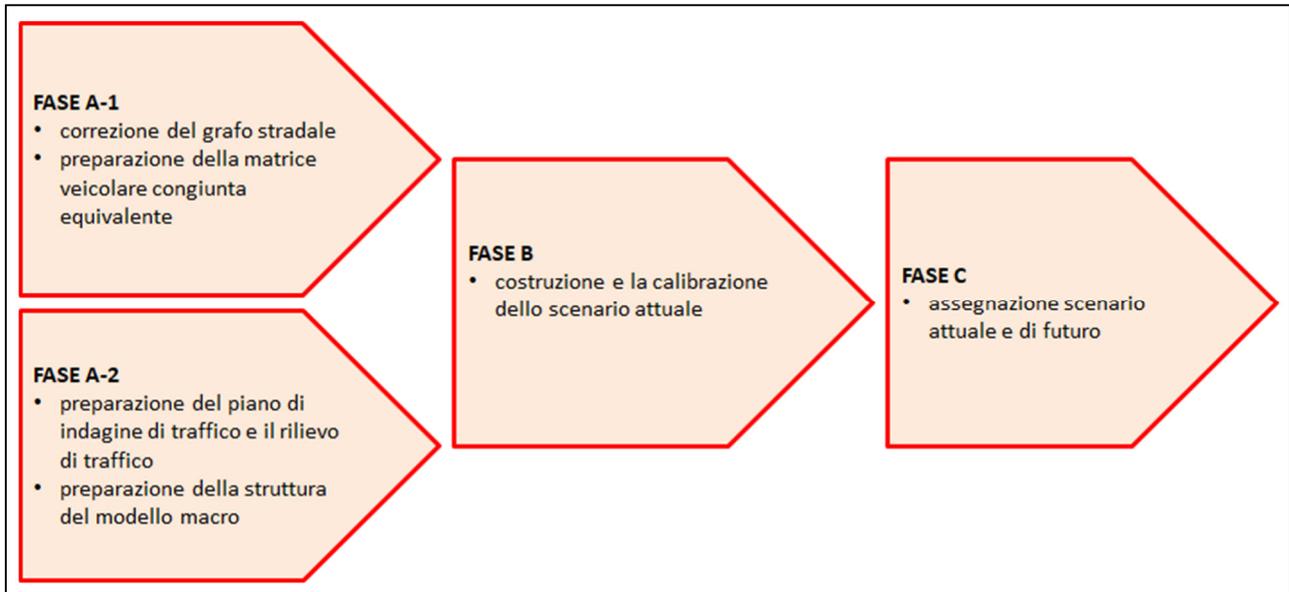


Figura 3 – Principali attività della metodologia di analisi adottata

3 CAMPAGNA DI INDAGINE

La campagna d'indagine ha riguardato il monitoraggio di **14 sezioni di conteggio bidirezionali**, di cui 13 posizionate nell'area ovest di Bergamo (numerate 1-16⁴) e una sezione (numero 17) posta in prossimità del sottopassaggio da realizzare e che collega la zona industriale di Montello con la viabilità oltre la linea ferroviaria.

3.1 Posizione delle sezioni di conteggio

Nella progettazione del piano di indagine, la scelta della **posizione delle sezioni di conteggio** ha tenuto conto dell'obiettivo dell'analisi ossia la **valutazione degli impatti sul traffico veicolare** prodotti dagli interventi progettati per le viabilità interferite dal progetto di raddoppio e dalla soppressione dei passaggi a livello (PL) della linea compresa tra Ponte San Pietro e Montello.

Allo scopo di ricostruire uno scenario completo e rappresentativo ai fini della modellizzazione di tipo macroscopico, otto sezioni sono state individuate nelle aree direttamente interessate dagli interventi (sezioni 4, 6-8, 11-13 e 17) e le restanti 6 (1, 3, 5, 10 e 14-15) sono state posizionate sulla rete in adduzione all'area direttamente coinvolta.

⁴ La numerazione delle sezioni di conteggio non è consecutiva a causa di variazioni apportate al piano di indagine.

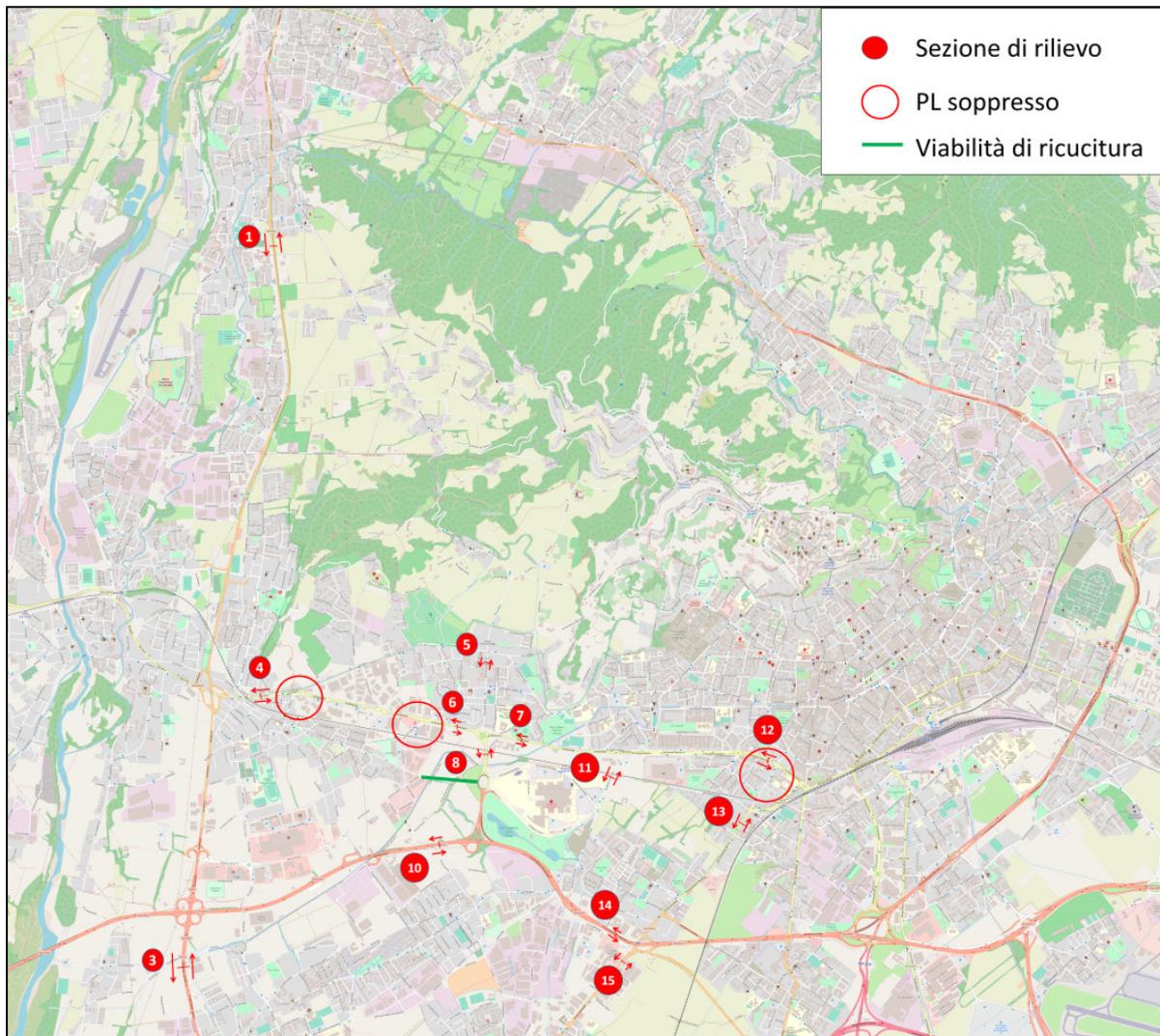


Figura 4 – Localizzazione delle sezioni di conteggio per l'area Curno-Bergamo ovest – 13 sezioni (1-16)

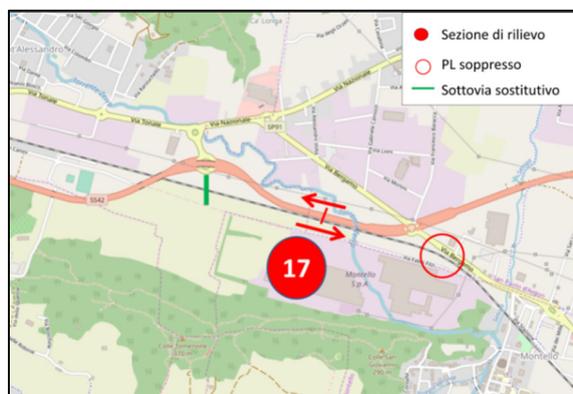


Figura 5 - Localizzazione delle sezioni di conteggio per l'area Bergamo-Montello – 1 sezione (17)

3.2 Risultati dell'indagine

Nelle figure seguenti sono riportati, con diverso ordinamento, i risultati aggregati delle indagini realizzate con strumentazione automatizzata e acquisiti secondo la metodologia descritta in Appendice 1.

Nella prima coppia di figure (6 e 7) l'ordine di presentazione del dato, aggregato a livello giornaliero, è per data di rilevazione, mentre nella seconda coppia (8 e 9) gli stessi dati sono rappresentati per giorno della settimana.

I dati raccolti evidenziano:

- un **carico veicolare pressoché costante nelle giornate feriali**, benché vi siano situazioni con un sensibile incremento nella giornata di venerdì. Le giornate del fine settimana vedono, invece, una riduzione della pressione veicolare, sensibile per il prefestivo e più marcata nel giorno festivo;
- la **dimensione del carico sulle sezioni**, in generale molto elevato, presenta diversi livelli di intensità in funzione della categoria della strada indagata.

In quest'ottica, è possibile riconoscere **tre classi di carico**.

La **prima**, di carico più intenso, raccoglie le sezioni S03, S10 e S14, con transiti giornalieri superiori alle 50.000 unità veicolari. Si tratta in particolare della ex SS 6671 e del tratto sud della ex SS 470dir con funzione di transito tangenziale all'ambito centrale e di raccordo con il sistema autostradale.

Sul fronte opposto, la **terza** classe, in cui si trovano le sezioni con transito inferiore o dell'ordine dei 20.000 veicoli al giorno, interessa le sezioni S05, S11 e S13 il cui ruolo, apparentemente secondario nell'ambito di questa indagine, rimane di alto livello in considerazione del carico comunque cospicuo che le relative tratte stradali sopportano.

Tra le due precedenti classi, si trova la **seconda** classe di carico, con transiti compresi tra i circa 25.000 e i 40.000 unità veicolari giornaliere.

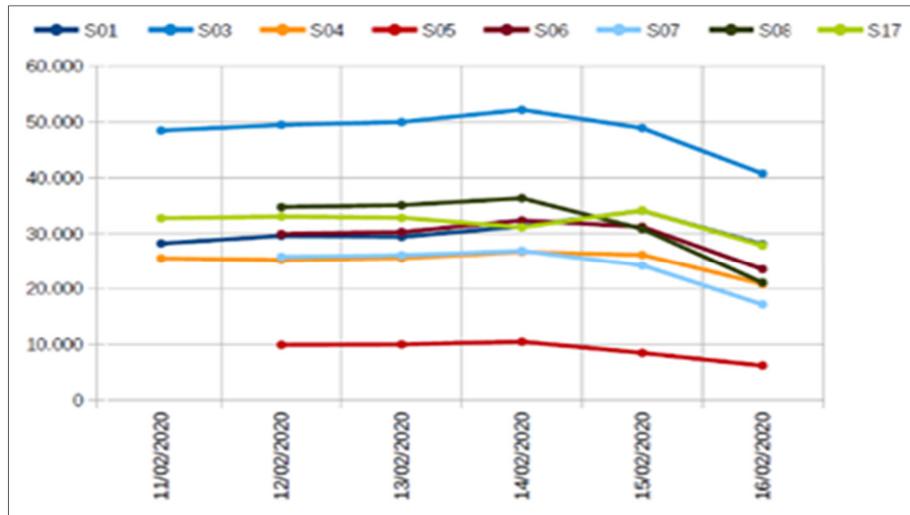


Figura 6 – Flussi giornalieri per data di rilevazione delle sezioni indagate nella prima settimana

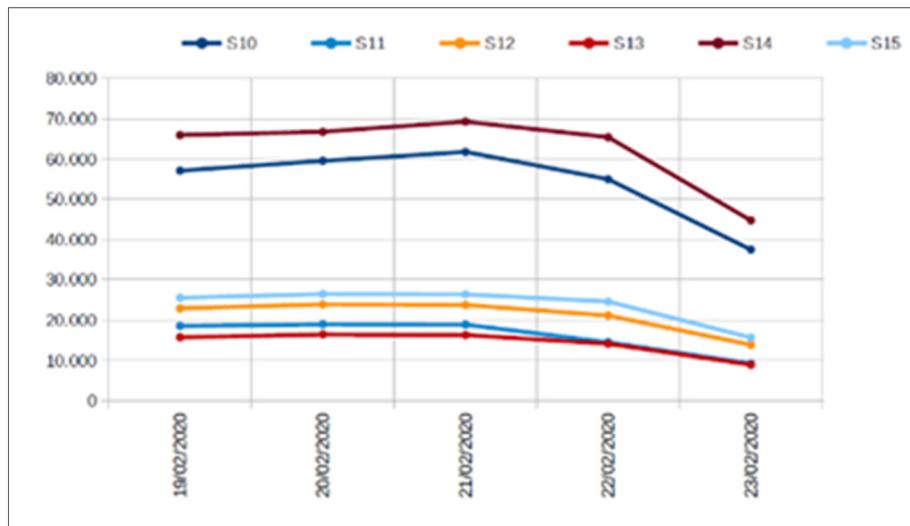


Figura 7 - Flussi giornalieri per data di rilevazione delle sezioni indagate nella seconda settimana

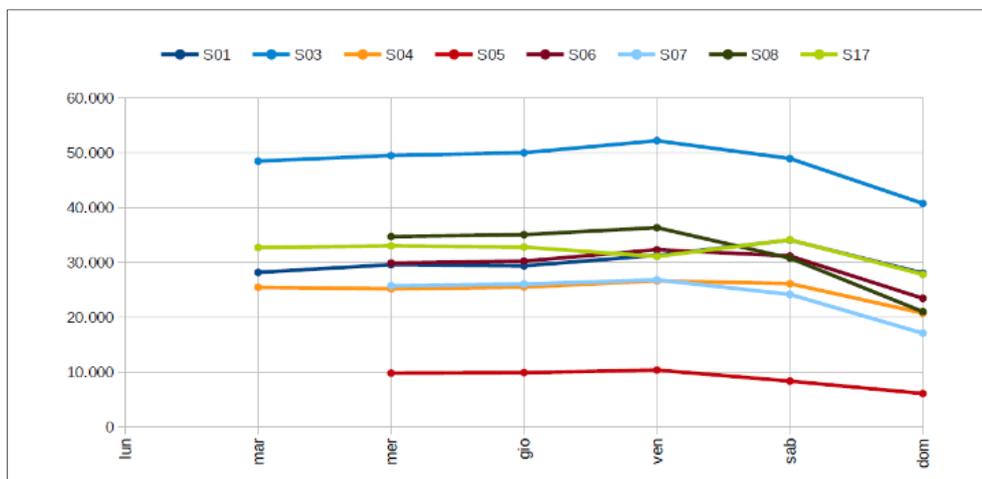


Figura 8 - Flussi giornalieri per giorno della settimana delle sezioni indagate nella prima settimana

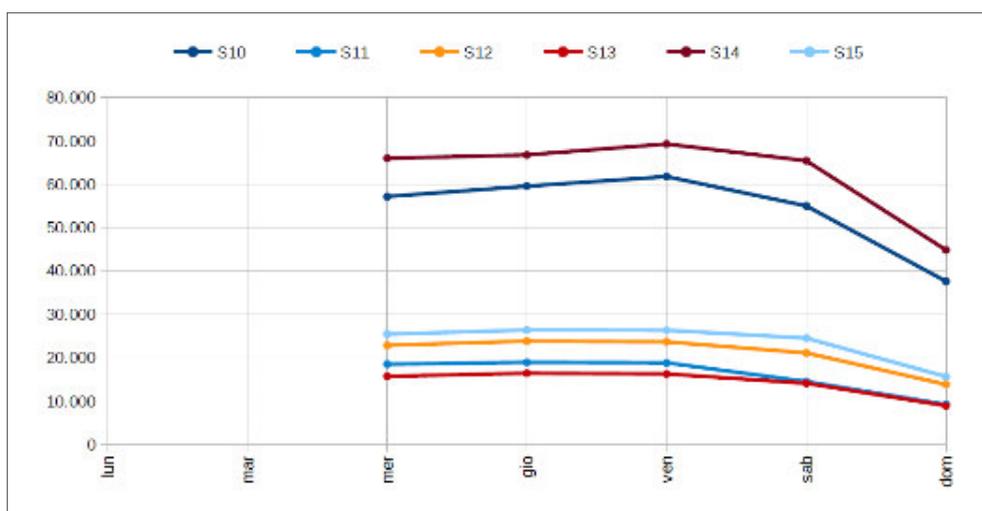


Figura 9 - Flussi giornalieri per giorno della settimana delle sezioni indagate nella seconda settimana

Per quanto riguarda i flussi di punta del traffico, la loro dimensione e il peso che assumono all'interno del traffico giornaliero, si nota un'elevata eterogeneità, con valori di punta che variano dai 500 ai 2.200 transiti orari per direzione di marcia. Altrettanto variabile è la distribuzione oraria del traffico, con situazioni che mostrano punte marcate e con simmetria mattina/sera e situazioni in cui tale punta è meno evidente rispetto al traffico medio orario.

Un'ultima analisi riguarda la composizione veicolare del traffico in transito (figure 10 e 11), attraverso la classificazione in cinque classi veicolari coerentemente con il modello regionale.

Tabella 2 - Classificazione delle classi veicolari in funzione della lunghezza

Classe veicolare
C1 – Lunghezza < 5 m
C2 – Lunghezza < 7.5 m
C3 – Lunghezza < 10.0 m
C4 – Lunghezza < 12.5 m
C5 – Lunghezza > 12.5 m

In fase esclusivamente di rilievo, alle cinque classi suddette si è aggiunta un'ulteriore, denominata C0, che raccoglie veicoli di lunghezze inferiori a 2 m (che possono essere rappresentative di veicoli a 2 ruote), occasionali disturbi di pedoni, ma possono anche essere conseguenza di alcune difficoltà di percezione dello strumento in situazioni particolari di forte accodamento, con veicoli molto vicini o transito fortemente rallentato.

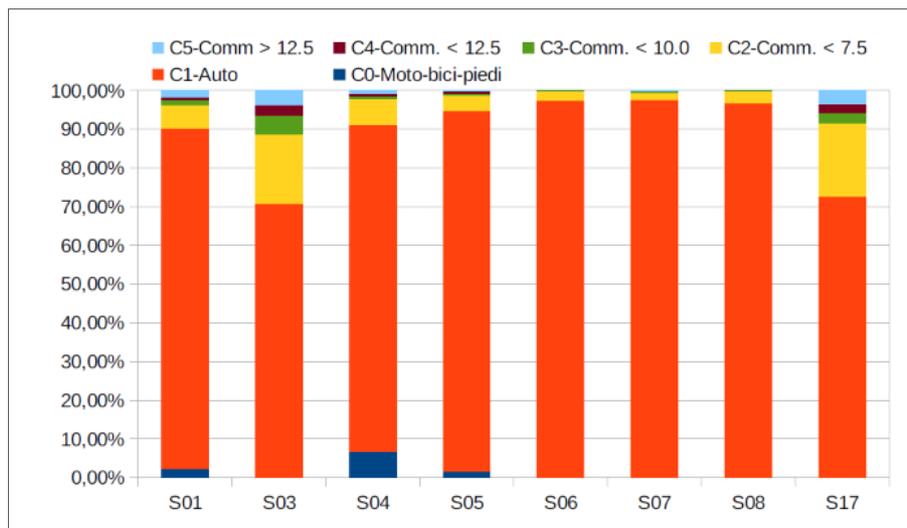


Figura 10 - Distribuzione delle componenti di traffico per sezione di indagine e relativa alle sole giornate feriali nelle sezioni indagate la prima settimana

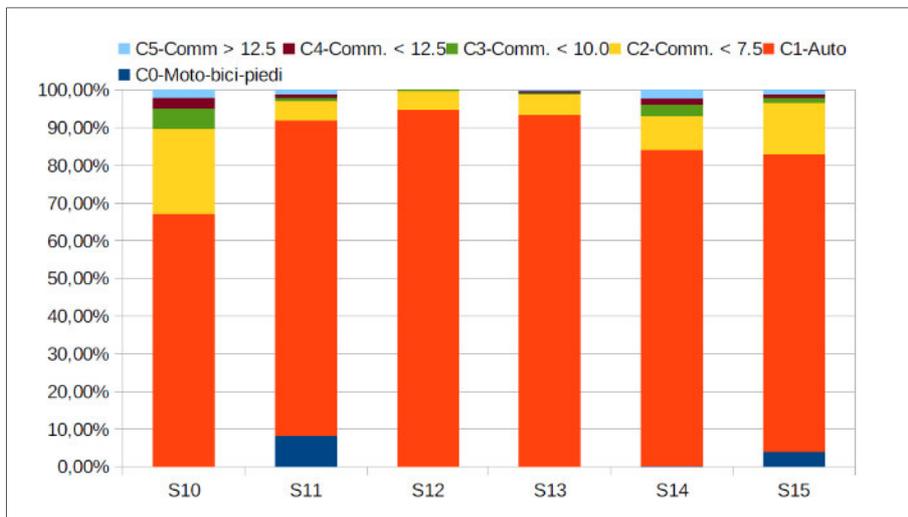


Figura 11 - Distribuzione delle componenti di traffico per sezione di indagine e relativa alle sole giornate feriali nelle sezioni indagate la seconda settimana

La variabilità nella composizione veicolare, maggiormente accentuata in corrispondenza di alcune sezioni, è stata opportunamente verificata e affinata nell'ambito dell'attività di calibrazione del modello.

La **calibrazione del modello** si è basata, in particolare, sui flussi relativi al **giorno medio settimanale** (i due mercoledì del periodo di rilievo, ossia il 13/02/2020 e il 19/02/2020), in coerenza con i conteggi inseriti nel modello regionale di Lombardia.

4 IL MODELLO DI SIMULAZIONE

La **fase A** delle attività di analisi ha previsto la preparazione del *data entry* aggiornato.

Ha riguardato, in particolare, l'aggiornamento del grafo stradale (Appendice 2) e la costruzione della matrice congiunta passeggeri e merci dei veicoli equivalenti.

4.1 Matrice veicolare

Nell'ambito della fase di preparazione A-1), è stata presa a riferimento la **matrice congiunta passeggeri e merci dei veicoli equivalenti** del modello regionale della Lombardia, derivante dalle analisi del PRMT e dalle attività sulla costruzione della matrice O/D dei veicoli commerciali e pesanti. Tale matrice, disaggregata per categoria veicolare, è stata quindi trasformata in matrice di veicoli equivalenti.

Per ottenere la **matrice dei veicoli equivalenti dei passeggeri** è stata utilizzata la stessa metodologia proposta nel PRMT Regione Lombardia, considerando come input la matrice degli spostamenti passeggeri suddivisa per modalità (auto come conducente, auto come passeggero, moto) e tenendo a riferimento ciascuna coppia O/D e ciascun motivo M:

$$VEICOLI_{O,D,M} = (SPOST_{O,D,M,COND} + SPOST_{O,D,M,PAX}) / \alpha_{AUTO,M} + SPOST_{O,D,M,MOTO} / 3$$

I valori del coefficiente di occupazione auto per ciascun motivo $\alpha_{AUTO,M}$ sono riportati in tabella.

Tabella 3 - Coefficienti di occupazione degli autoveicoli per motivo dello spostamento. Fonte PRMT Lombardia

MOTIVO SPOSTAMENTO	$\alpha_{AUTO,M}$
Lavoro	1,1
Studio	1,5
Occasionali	1,3
Affari	1,1
Ritorno a casa	1,2

Relativamente alla matrice dei veicoli pesanti, che è costituita dalle tre sotto-matrici delle tre tipologie di veicoli commerciali e pesanti (N1, N2 e N3), sono stati applicati i medesimi fattori di conversione del modello regionale delle merci per convertire la matrice **dei veicoli pesanti in veicoli equivalenti**.

$$VEICOLI_{O,D,M} = VEICOLI_{O,D,M} * \alpha_{AUTO,M}$$

Tabella 4 - Coefficienti di conversione dei veicoli pesanti. Fonte Modello Merci Lombardia

TIPOLOGIA VEICOLARE	$\alpha_{\text{AUTO,M}}$
N1 (5 m < lunghezza <= 7.5 m)	1,3
N2 (7.5m < lunghezza <= 12.5 m)	2
N3 (12.5m < lunghezza)	3

In seguito, le due matrici equivalenti sono state unite in un'unica matrice impiegata come matrice iniziale (c.d. *prior matrix*) nel processo di calibrazione dello scenario attuale.

Tabella 5 - Totale delle componenti della matrice O/D dell'intera Regione Lombardia

SOTTO-MATRICI	TOT VEICOLI EQUIVALENTI
Veicoli leggeri	8.968.365
N1	233.493
N2	108.613
N3	342.131
TOT	9.652.602

5 RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

Le attività di **fase B**, ossia di **calibrazione della matrice dei veicoli equivalenti** (leggeri e pesanti), sono state eseguite attraverso i **conteggi di traffico eseguiti durante la campagna di rilievo di febbraio 2020** e relativi alle viabilità interferite dagli interventi di progetto, nonché **ulteriori conteggi veicolari** rilevati nelle sezioni stradali extraurbane del territorio bergamasco considerati nell'ambito della costruzione del modello regionale⁵. Il dettaglio del processo di calibrazione è illustrato in Appendice 3.

Il processo di calibrazione con i conteggi ha richiesto 14 diverse simulazioni al fine di raggiungere i desiderati livelli di affidabilità e qualità relativamente ai due principali indicatori:

- **GEH**: è una formula empirica utilizzata per confrontare i due diversi valori di flussi simulato e misurato. In generale, più è basso il GEH migliore è il risultato. Valori di GEH inferiori al 5% sono da considerarsi come un ottimo risultato della calibrazione:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

dove C è il conteggio misurato e M è il volume assegnato.

L'indicatore GEH valutato sul flusso assegnato totale e risultante alla fine del processo di aggiornamento rispetto ai conteggi è riportato in tabella. Per i veicoli leggeri, che quantitativamente rappresenta la componente principale della matrice veicolare, quasi **il 70% delle sezioni ha un valore di GEH inferiore al 20%**, di cui il 24% minore al 5%.

Tabella 6 – Quota percentuale dei conteggi per gli intervalli di bontà della calibrazione / GEH

GEH	% Leggeri-pax-merci 2020	% Pesanti-pax-merci 2020
<5	24%	22%
<10	42%	37%
<15	58%	51%
<20	69%	58%
>=20	31%	42%

- **R²**: rappresenta per ciascuna sezione la relazione tra i flussi rilevati e quelli simulati rispetto alla relativa retta di regressione. Il processo di calibrazione si è concluso al raggiungimento del punto di ottimo, per cui il coefficiente si è attestato al **98%, in relazione alla totalità dei 59**

⁵ Forniti dalle Province e dai Concessionari stradali tramite LISPA e ARPA nel 2016.

conteggi, al 78%, limitatamente ai nuovi rilievi, e al 72%, in relazione ai nuovi rilievi delle sezioni ubicate lungo le arterie principali (SS470dir e SS671).

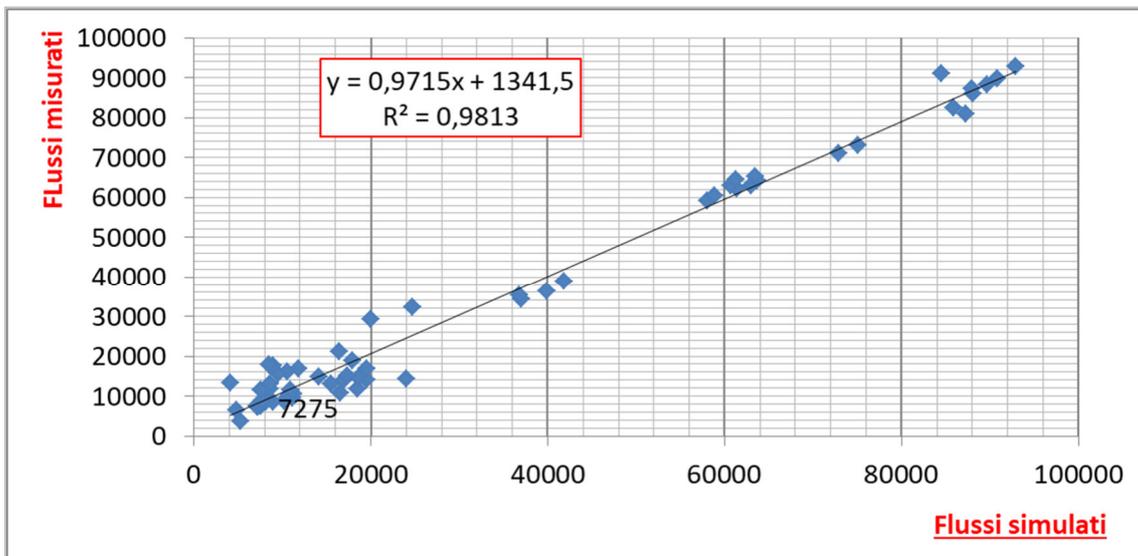


Figura 12 – R^2 relativo alla totalità dei conteggi (59 conteggi)

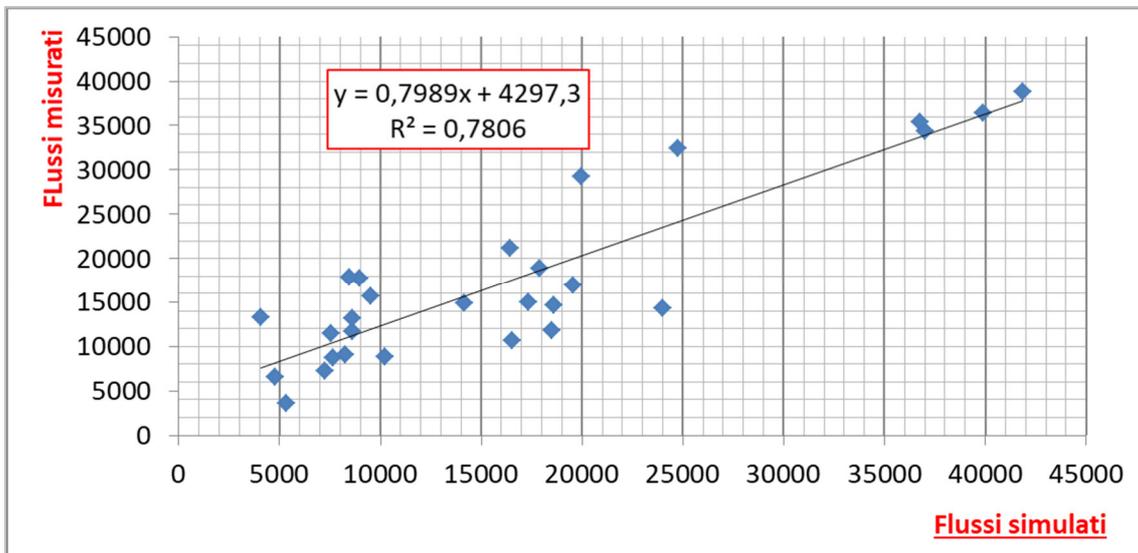


Figura 13 - R^2 relativo ai nuovi conteggi (28 conteggi)

La matrice O/D dei veicoli equivalenti dopo il processo di calibrazione è risultata pari a 9.948.873 veicoli nell’arco della giornata media ferialle, +3% rispetto alla matrice di partenza⁶, contribuendo al riallineamento delle singole componenti delle tipologie di veicoli.

Un’ulteriore verifica è stata dedicata al confronto di massima dei flussi assegnati nelle sezioni di conteggio con i dati resi disponibili dagli **studi di traffico** effettuati in prossimità del **centro commerciale Auchan** a Curno⁷ e all’ingresso dell’**Ospedale Papa Giovanni XXIII** a Bergamo⁸.

Relativamente al centro commerciale Auchan di Curno, l’indagine di traffico fa riferimento a dati di flusso orario della punta pomeridiana (17.30-18.30) delle giornate di sabato e venerdì nel mese di settembre 2015.

A partire da tali dati e con particolare riferimento al dato del flusso di accesso su Via Fermi (pari a 992 nell’ora di punta pomeridiana del venerdì, come da figura), si è rilevata un’ottima corrispondenza con il dato giornaliero simulato dal modello in corrispondenza della medesima sezione (scostamento di ~2%), in considerazione delle differenze tra i due studi e modelli utilizzati.



Figura 14 – Flussi dell’ora di punta pomeridiana di un venerdì ferialle di settembre 2015. Fonte: studio di traffico Auchan, 2016

Anche in relazione all’Ospedale Papa Giovanni XXIII, i dati degli accessi totali all’ospedale stimati in un giorno medio, forniti per i dipendenti con riferimento all’intero anno 2018 e per le restanti

⁶ Il 3% rappresenta un aumento contenuto dovuto ai nuovi conteggi rilevati nel 2020 e al processo di calibrazione congiunta delle matrici passeggeri e merci.

⁷ Progetto “Richiesta di permesso di costruire convenzionato per la realizzazione di due nuove rotonde” nel Comune di Curno, realizzato per Auchan, Eurocommercial Shopping Centres e BricoCenter, luglio 2016 (dati del 2015).

⁸ Dati inviati al Comune di Curno dall’ASST Papa Giovanni XXIII, 2019 (dati del 2017 e 2018).



**PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA
RADDOPPIO PONTE S. PIETRO – BERGAMO -
MONTELLO**

Studio di trasporto

COMMESSA BGF1	LOTTO 00	CODIFICA F 16 RG	DOCUMENTO TS 0003 001	REV. A	FOGLIO 22 di 54
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

categorie di utenza al 2017, sono coerenti con i flussi assegnati dal modello macroscopico sugli archi che rappresentano via Brambilla e via Failoni. È da considerare, inoltre, che il modello macroscopico simula la totalità dei flussi sull'arco e non soltanto gli accessi al polo ospedaliero.

6 ASSEGNAZIONE DEGLI SCENARI ATTUALE E FUTURO

La **fase C** è consistita nell’assegnazione della matrice calibrata dei veicoli equivalenti agli scenari di rete attuale e di progetto per verificare l’impatto degli interventi infrastrutturali connessi al progetto di raddoppio della linea ferroviaria Ponte S. Pietro-Bergamo-Montello. I dettagli relativi all’algoritmo di assegnazione utilizzato sono riportati in Appendice 4.

Le rappresentazioni propedeutiche all’analisi del confronto tra i due scenari di simulazione attuale e di progetto sono:

- **flussogrammi** giornalieri simulati;
- **flussogrammi dei Δ** tra flussi simulati di progetto e flussi attuali;
- **livelli di saturazione** nei due scenari, considerando 4 diverse classi caratterizzate da specifici intervalli del valore del rapporto flusso/capacità rappresentate secondo la tematizzazione seguente:



- **tempi di percorso di costo minimo**, relativi ai tempo di percorso su rete congestionata fra determinate coppie O/D, prima e dopo gli interventi di soppressione dei PL relativamente ai percorsi maggiormente significativi nell’area di progetto.

6.1 Ambiti di intervento ad ovest di Bergamo

Gli **ambiti di intervento ad ovest di Bergamo** (ambiti 1-7 di figura 1) e ricadenti nel c.d. Lotto 1 “Tratta Ponte S. Pietro-Bergamo” sono direttamente connessi alla soppressione dei passaggi al livello km 5+182, 4+241 e 1+453 e alla realizzazione della viabilità di ricucitura dalla rotonda esistente su Circonvallazione Leuceriano (SS342) e Via Enrico Fermi.

6.1.1 Flussogrammi e livelli di saturazione

Come evidenziato dalle rappresentazioni dei flussogrammi e dei livelli di saturazione, i **flussi di traffico di attraversamento nord-sud rispetto alla ferrovia** in seguito alla soppressione dei PL nell’area ad ovest di Bergamo risultano **maggiormente concentrati sui restanti archi della rete esistente**, con particolare riferimento agli assi **SS470dir** (a ovest) e **Via King** (più ad est). Inoltre, la

rotatoria in corrispondenza dell'ospedale Papa Giovanni XXIII e ubicata su Circonvallazione Leuceriano presenta **maggiori flussi** nello scenario di progetto rispetto all'attuale per effetto della nuova viabilità di connessione est-ovest tra la rotatoria stessa e Via Fermi. Secondo quanto evidenziato dal **modello di simulazione macroscopico**, tale nuova viabilità genera un nuovo asse di collegamento est-ovest nell'area, **utilizzata come una sorta di viabilità parallela** ai due assi principali SP342 e SS671. Nello scenario di progetto, infatti, la nuova viabilità aggiuntiva diventa parte del **percorso di costo minimo**, ossia di tempo minimo su rete congestionata, per un generico **attraversamento est-ovest** dell'area (figura 24), in luogo dell'attuale percorso minimo lungo la "storica" SP342 che attraversa i centri abitati.

Secondo quanto simulato dal modello, il nuovo percorso est-ovest realizzato grazie alla viabilità di connessione Circonv. Leuceriano - Via Fermi contribuirebbe al parziale alleggerimento o mantenimento dei livelli di flussi attuali sugli assi paralleli, nonostante la soppressione dei PL, riscontrabile sull'asse SP342 nel tratto Via Bergamo a Curno e sull'asse SS342 Circonv. Leuceriano a nord della rotatoria con l'ospedale.

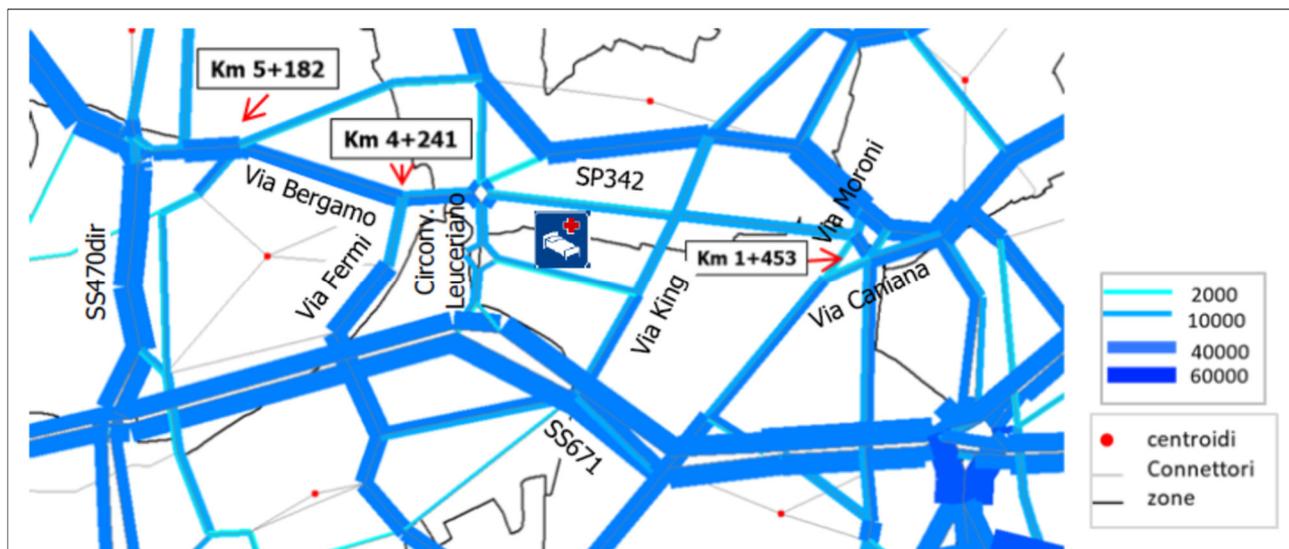


Figura 15 –Flussogramma dello scenario di rete attuale – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo

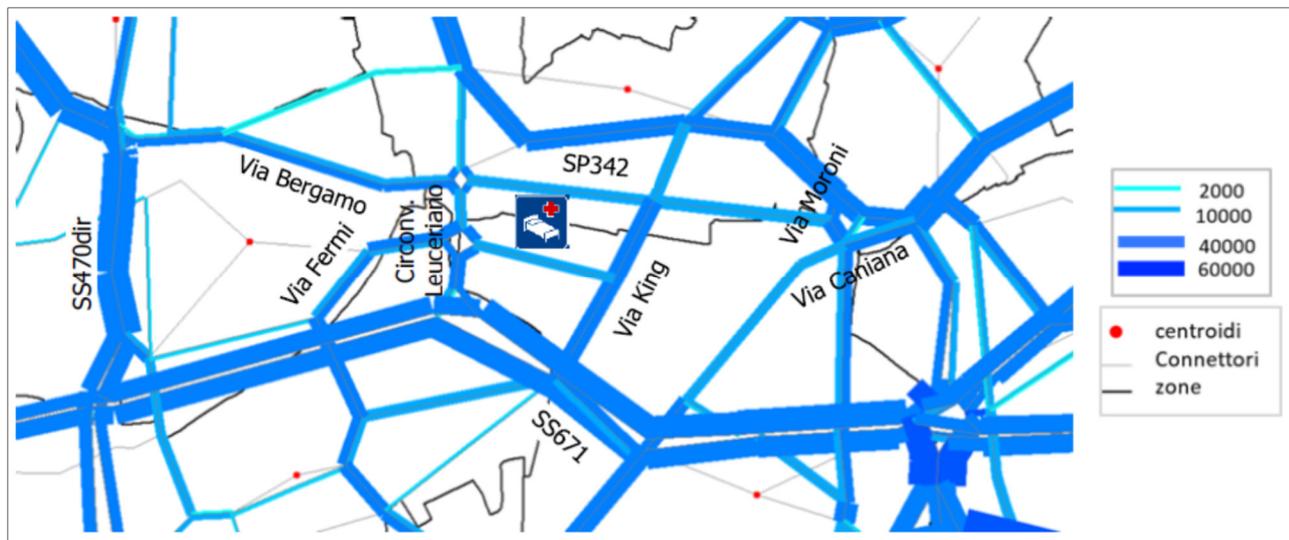


Figura 16 –Flussogramma dello scenario di rete futuro – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo

La rappresentazione dei Δ fra i valori di flusso di progetto e quelli simulati per lo scenario attuale evidenzia un incremento dei flussi di traffico (in rosso in figura), in relazione agli attraversamenti nord-sud, su SS470dir e Via King, nonché su Via San Bernardino a Bergamo. Incrementi di traffico si riscontrano anche per quanto riguarda la rotatoria di Circonvallazione Leuceriano e l'asse est-ovest a sud dell'area (SS671).

Il nuovo arco di connessione tra Circonvallazione Leuceriano e Via Fermi nello scenario di progetto risulta essere particolarmente carico in relazione agli spostamenti da e per il **centroide di Curno**, che è connesso alla rete reale attraverso il connettore visibile nel riquadro a lato.

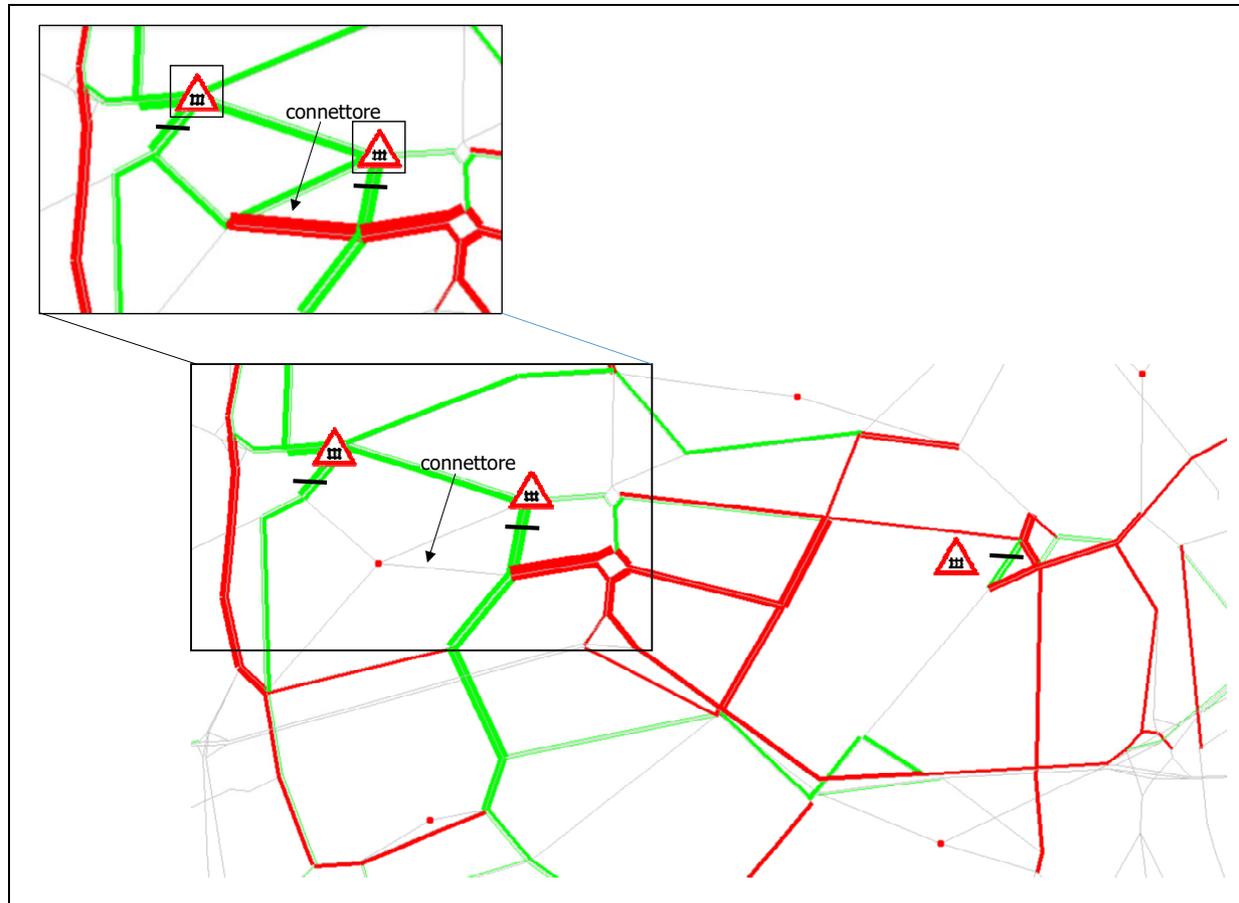


Figura 17 - Differenza tra flussi di progetto e flussi attuali (esclusi i connettori) con focus su area di Curno (compresi i connettori)

Tali effetti sono evidenti anche dalla rappresentazione dei livelli di saturazione, secondo cui si ha un **generalizzato aumento dei livelli di congestione** e con **circoscritti ma sensibili miglioramenti** derivanti dal nuovo arco di connessione est-ovest Circonv. Leuceriano-Via Fermi.

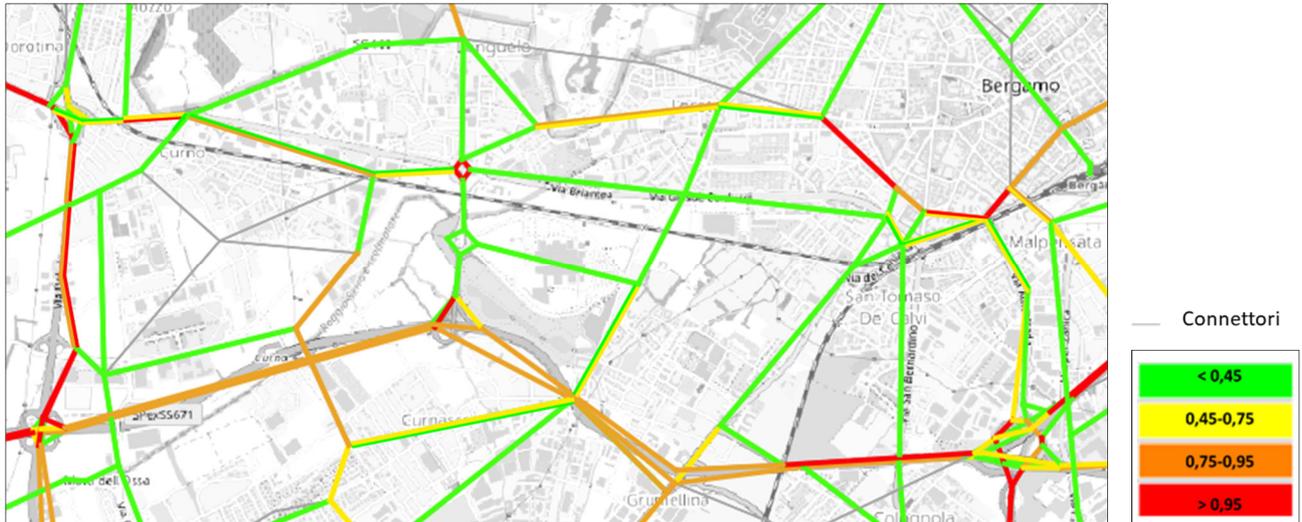


Figura 18 – I livelli di saturazione (F/C) dello scenario di rete attuale – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo

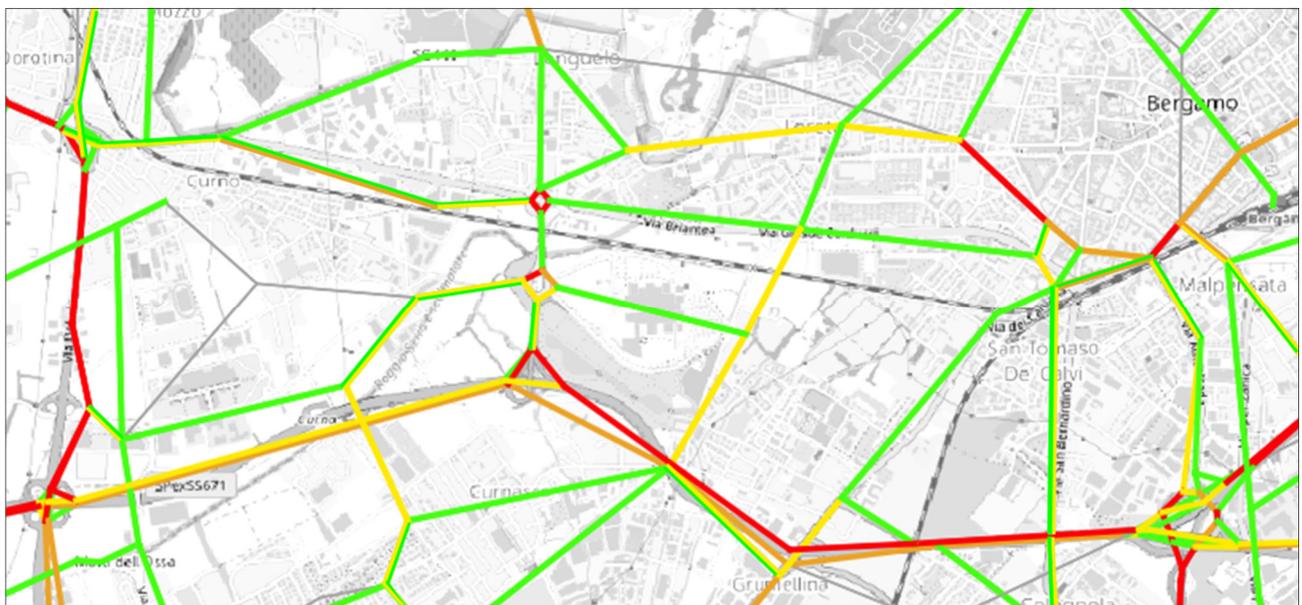


Figura 19 – I livelli di saturazione (F/C) dello scenario di rete futuro – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo

Analizzando gli impatti della soppressione del passaggio a livello in corrispondenza del km 1+453 (Via G. B. Moroni a Bergamo), il modello evidenzia maggiori flussi e il conseguente aumento dei livelli di saturazione della direzione nord-sud per la strada SP342 e la limitrofa Via dei Caniana e della stessa Via Moroni parte nord (figure precedenti).

Con particolare riferimento alla **rotatoria di Circonv. Leuceriano** e all'area dell'Ospedale, l'aumento dei flussi veicolari nello scenario di progetto comporta un aumento dei livelli di

saturazione degli archi Via Brambilla/Failoni, Via King, Circonv. Leuceriano a sud della rotatoria e la rotatoria stessa. Tale effetto è maggiormente evidente su Via King e l'asse della Circonvallazione, dove si passa da valori attuali del ~30% a valori di progetto di oltre 60% e punte prossime a 1.

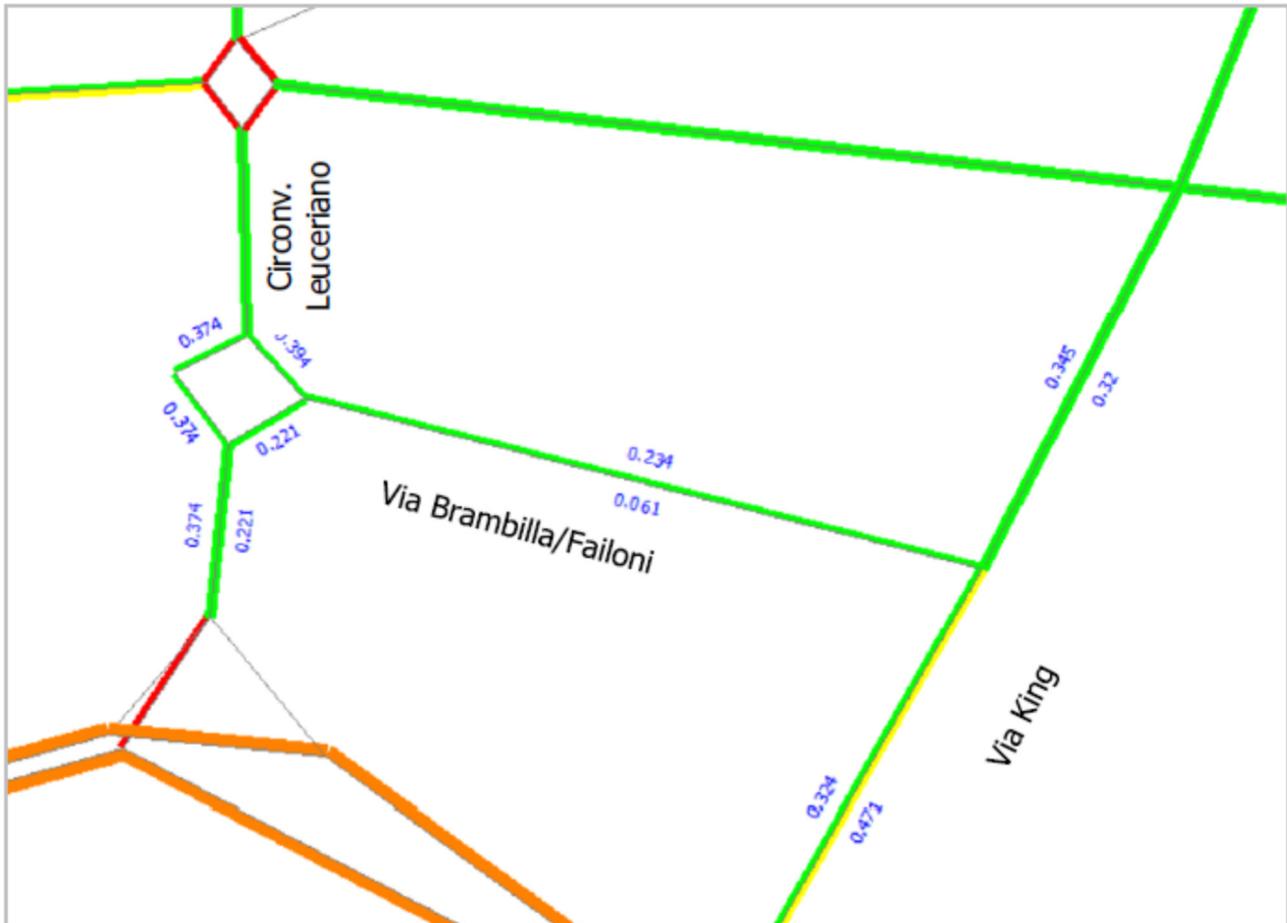


Figura 20 – I livelli di saturazione (F/C) dello scenario di rete attuale – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo – Focus sulla rotatoria centrale



Figura 21 – I livelli di saturazione (F/C) dello scenario di rete futuro – tratta Ponte S. Pietro-Bergamo – Focus sulla rotatoria centrale

6.1.2 Percorsi di costo minimo

L'analisi dei percorsi di minimo costo tra coppie O/D (figure seguenti) ha evidenziato un generale incremento dei tempi di percorrenza, ad eccezione di un limitato miglioramento dovuto al nuovo arco Circonv. Leuceriano-Via Fermi, relativamente all'area limitrofa all'intervento di riconnessione est-ovest della rete viabilistica.

Gli incrementi dei tempi di percorrenza su rete congestionata nello scenario di progetto sono in alcuni casi rilevanti del 30, 40 e anche 50%, che rappresentano comunque valori accettabili in considerazione dell'entità degli interventi. La sintesi è riportata in tabella.

Tabella 7 - sintesi dei tempi di percorrenze per i percorsi maggiormente significativi dell'area di intervento

FIGURA	ORIGINE	DESTINAZIONE	TEMPO ATTUALE [min]	TEMPO FUTURO [min]	Δ TEMPO [min]	Δ TEMPO [%]
22	centroide di Mozzo	centroide di Curno	5.95	7.15	+1.2	+20 %
23	centroide di Mozzo	centroide di Treviolo	7.29	9.44	+2.15	+30 %
24	centroide di Orio al Serio	centroide di Curno	18.01	17.29	-0.72	-4%
25	centroide di zona Bergamo 7 (via S.Martino della Pigrizia)	centroide di Curno	6.84	10.35	+3.51	+50%
26	centroide di zona Bergamo 1 (via Zambonate)	L'incrocio tra Via Giovanni Battista Moroni e Via Andrea Previtali	5.36	5.52	+0.16	+3%

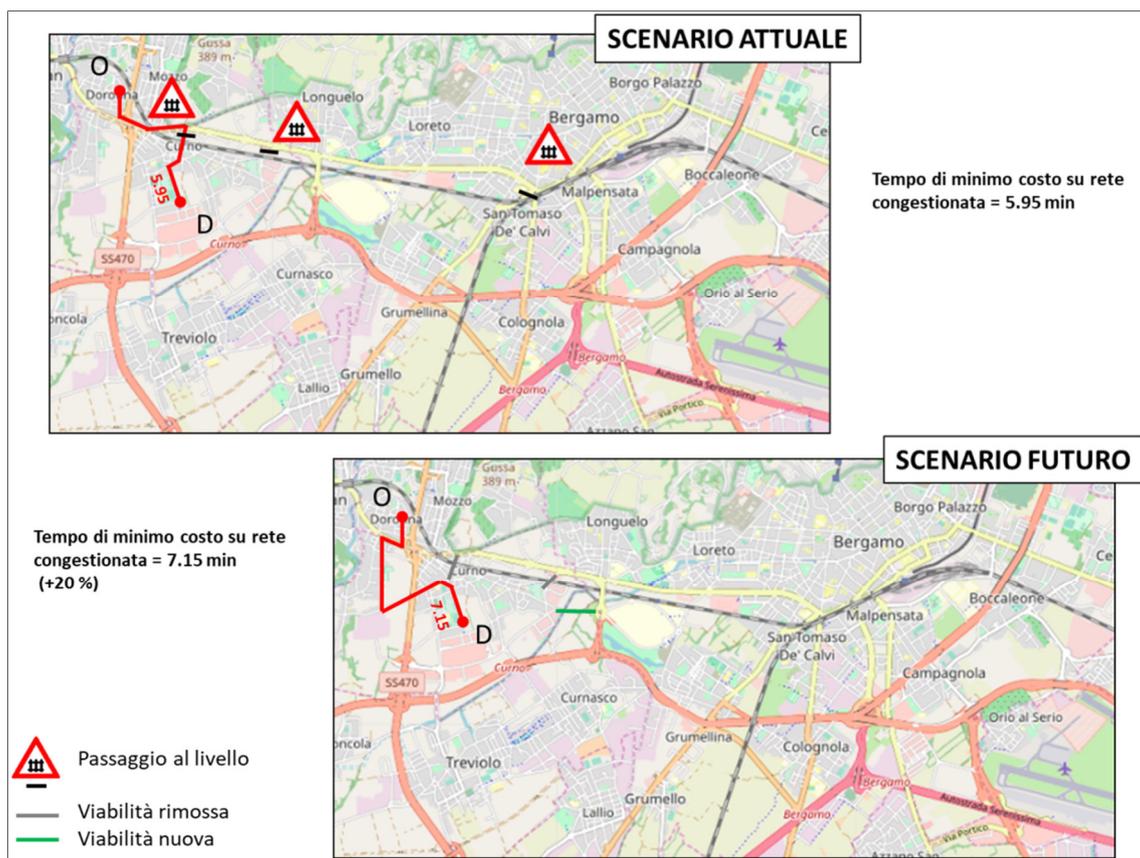


Figura 22 – Tempi minimi di percorso (alternativa 1) in corrispondenza dell'ambito di intervento 1

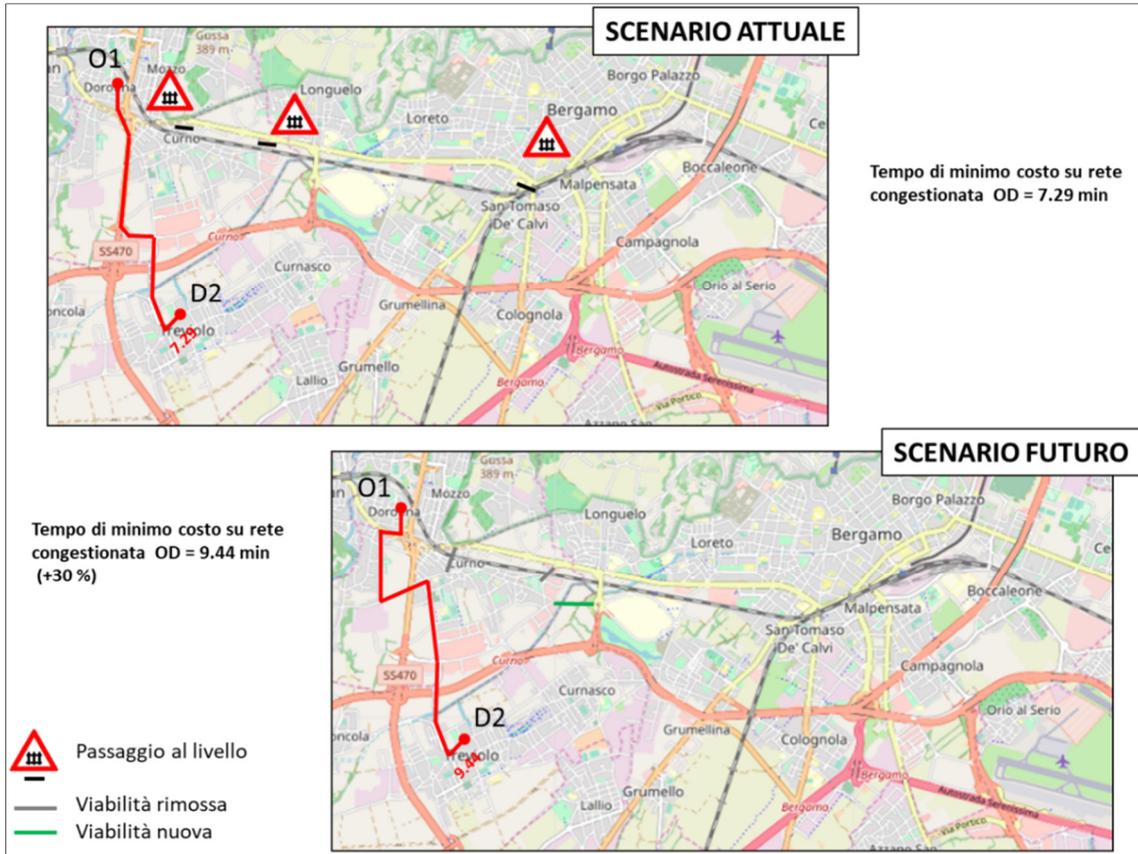


Figura 23 - Tempi minimi di percorso (alt. 2) in corrispondenza dell'ambito di intervento 1

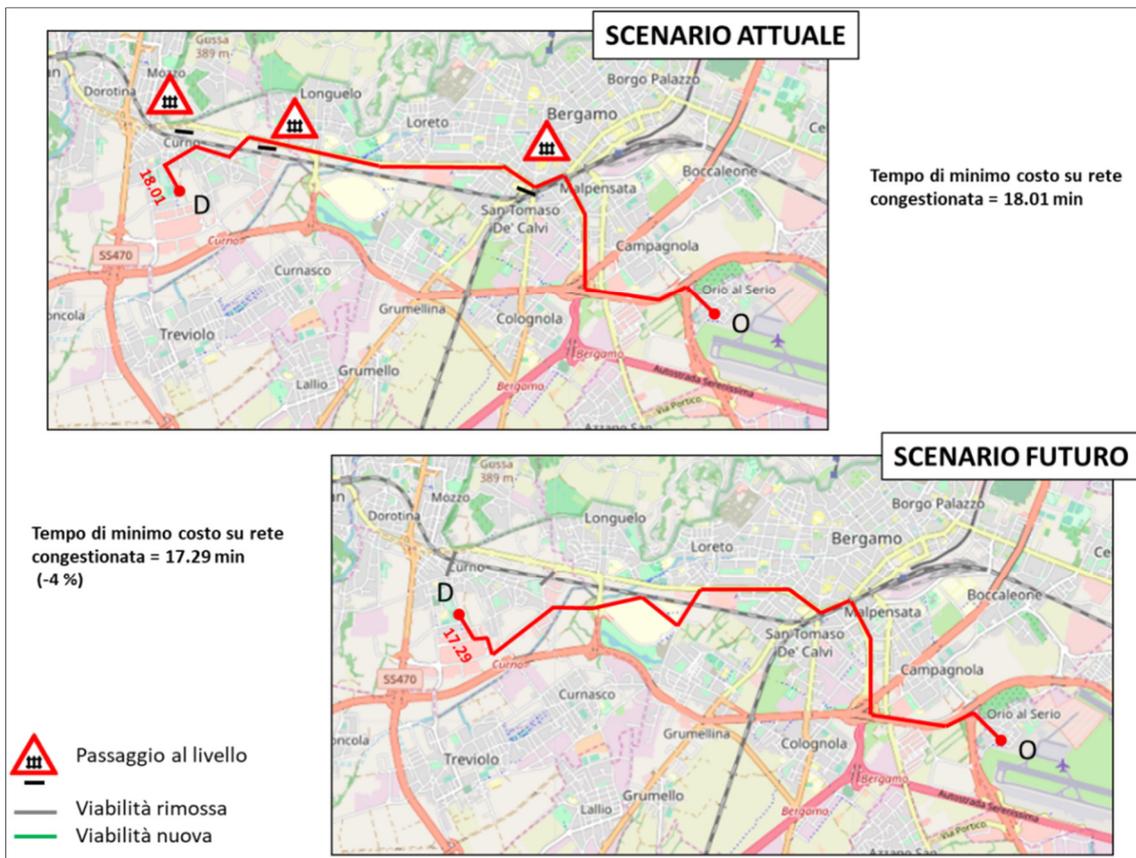


Figura 24 - Tempi minimi di percorso in corrispondenza di un attraversamento est-ovest

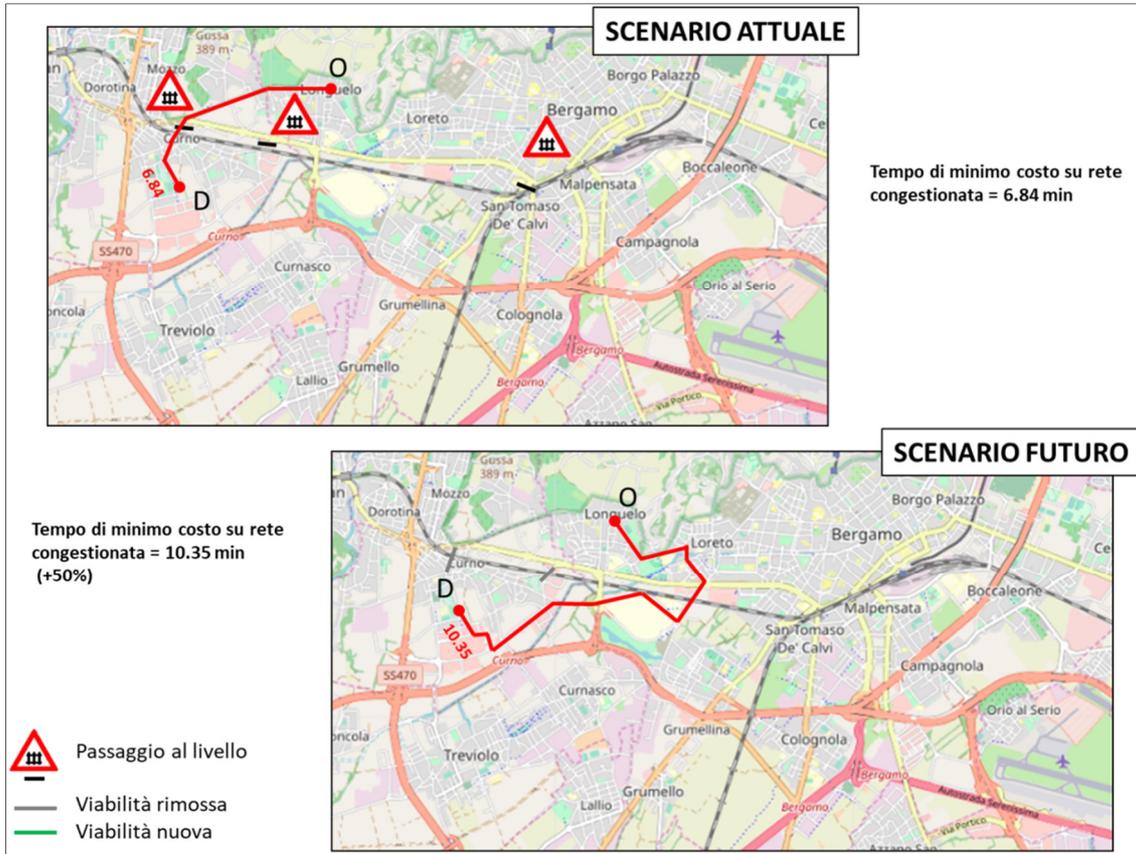


Figura 25 - Tempi minimi di percorso in corrispondenza degli ambiti 2, 3 e 4

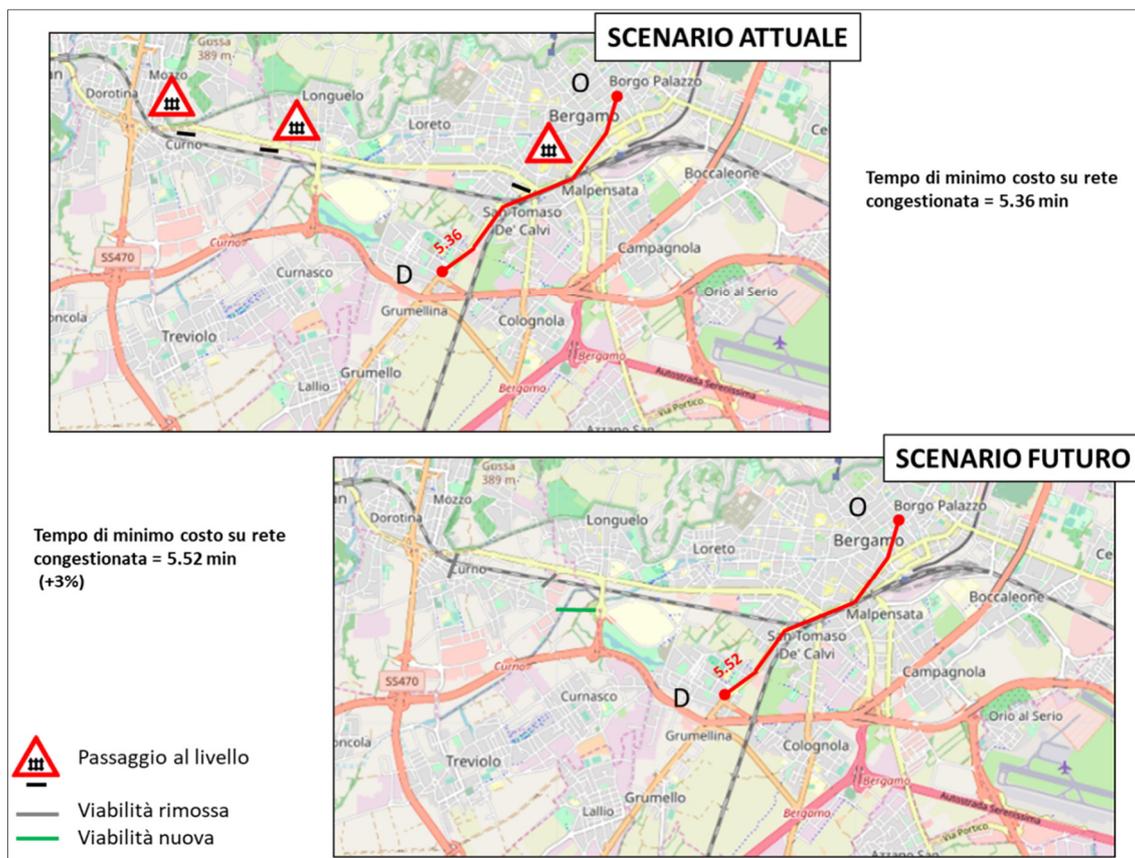


Figura 26 - Tempi minimi di percorso in corrispondenza dell'ambito di intervento 7

6.2 Ambito di intervento ad est di Bergamo

L'ambito di intervento ad est di Bergamo (ambito 8 di figura 1) e ricadente nel c.d. Lotto 2 "Tratta Bergamo-Montello" è connesso alla soppressione del passaggio a livello km 10+355 e alla realizzazione della nuova viabilità di ricucitura dalla rotonda esistente sulla SS42 "del Tonale e della Mendola" con il polo industriale di Montello.

6.2.1 Flussogrammi e livelli di saturazione

L'intervento di soppressione del passaggio a livello al km 10+355, che attualmente connette la zona relativa a Montello alle viabilità principali, e la conseguente realizzazione del sottopassaggio sostitutivo più ad ovest a partire dalla rotonda su SS42 **non comporta evidenti modifiche** al sistema di traffico viabilistico dell'area con trascurabili impatti su deflusso veicolare.

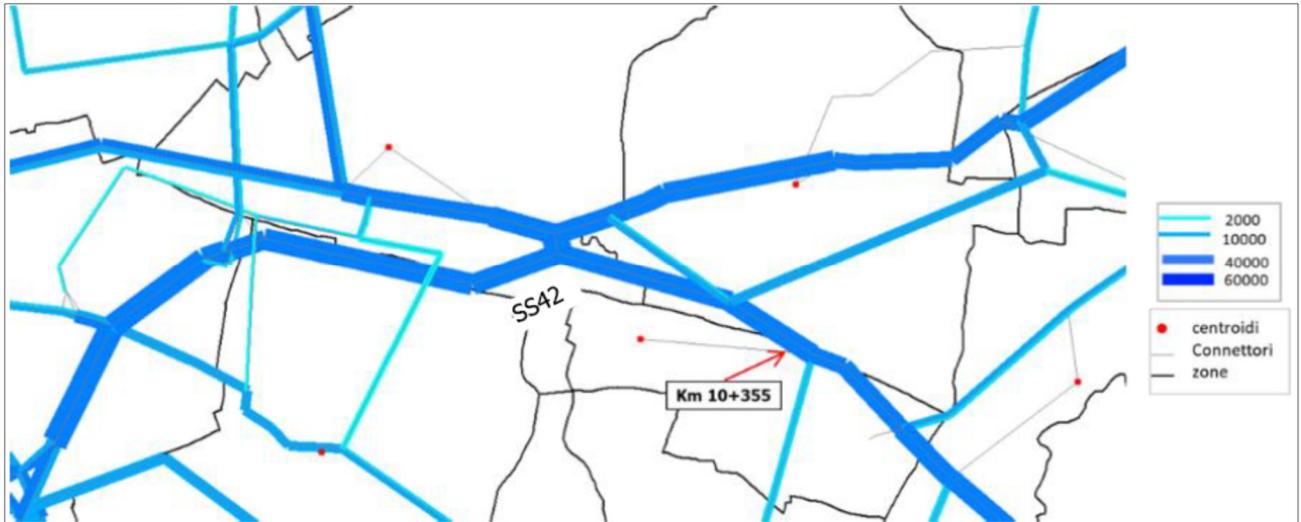


Figura 27 - Flussogramma dello scenario di rete attuale – tratta Bergamo-Montello



Figura 28 - Flussogramma dello scenario di progetto – tratta Bergamo-Montello

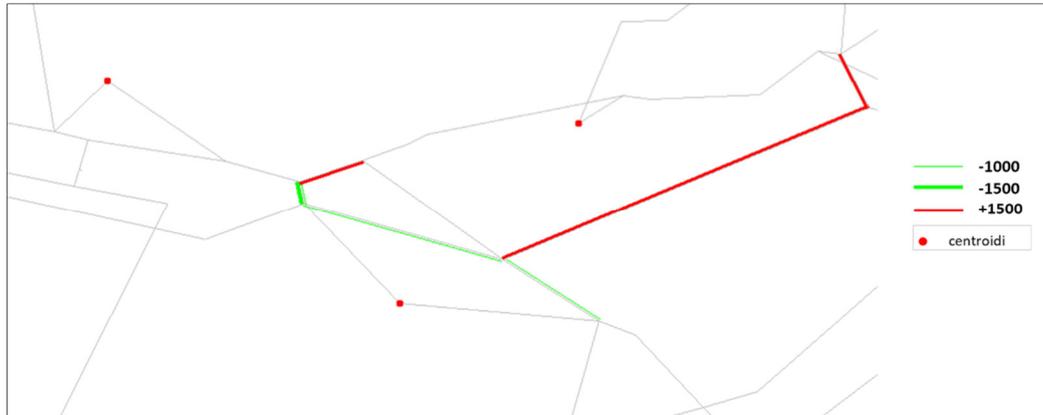


Figura 29 – Differenza tra flussi di progetto e flussi attuali – Tratta Bergamo-Montello

Un'analisi maggiormente approfondita dei livelli di saturazione evidenzia un **sostanziale mantenimento dei livelli di congestione**, eccetto per un circoscritto e limitato incremento per uno degli archi viabilistici dell'asse Via Tonale/Via Nazionale, che risulta di connessione al nuovo sottopasso e che rappresenta, inoltre, una delle viabilità principali dell'area.



Figura 30 - Livelli di saturazione (F/C) dello scenario di rete attuale – tratta Bergamo – Montello

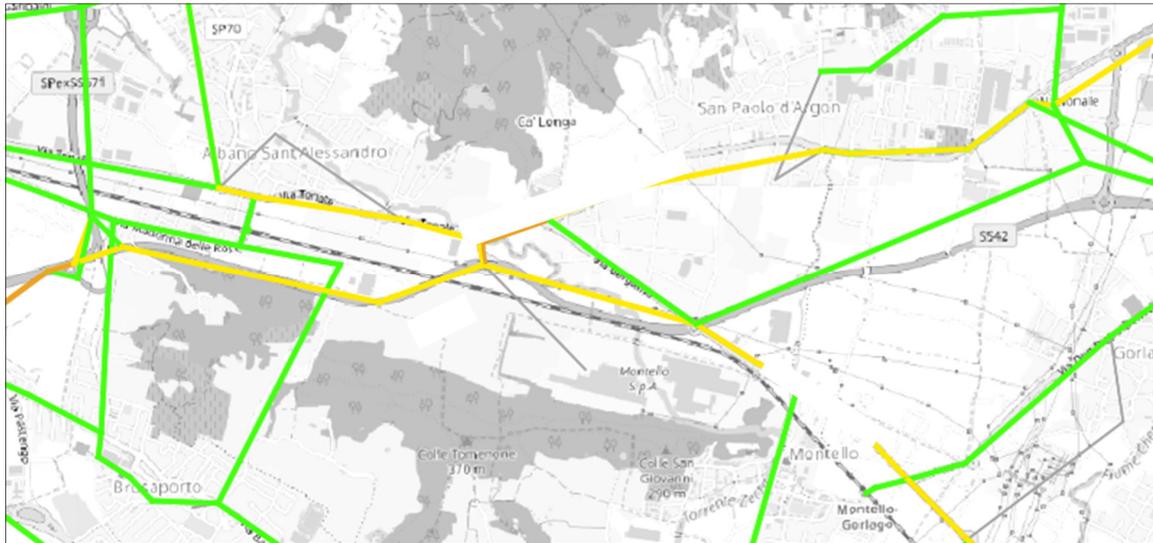


Figura 31 - Livelli di saturazione (F/C) dello scenario di progetto – tratta Bergamo-Montello

6.2.2 Percorsi di costo minimo

L'analisi dei percorsi di minimo costo tra coppie O/D (figura seguente) evidenzia un miglioramento dei tempi di percorrenza da e per Montello, in quanto il nuovo sottopasso è in grado di garantire una **migliore accessibilità** al polo produttivo attraverso la connessione diretta con le viabilità principali evitando l'utilizzo di Via Bergamo, già attualmente congestionata. Il **risparmio di tempo** sarebbe di ~30% rispetto ai tempi attuali su rete congestionata.

Tabella 8 - Sintesi dei tempi di percorrenze per i percorsi maggiormente significativi dell'area di intervento

ORIGINE	DESTINAZIONE	TEMPO ATTUALE [min]	TEMPO FUTURO [min]	Δ TEMPO [min]	Δ TEMPO [%]
centroide di San Paolo d'Argon	centroide di Montello	7.66	4.99	-2.67	-35%

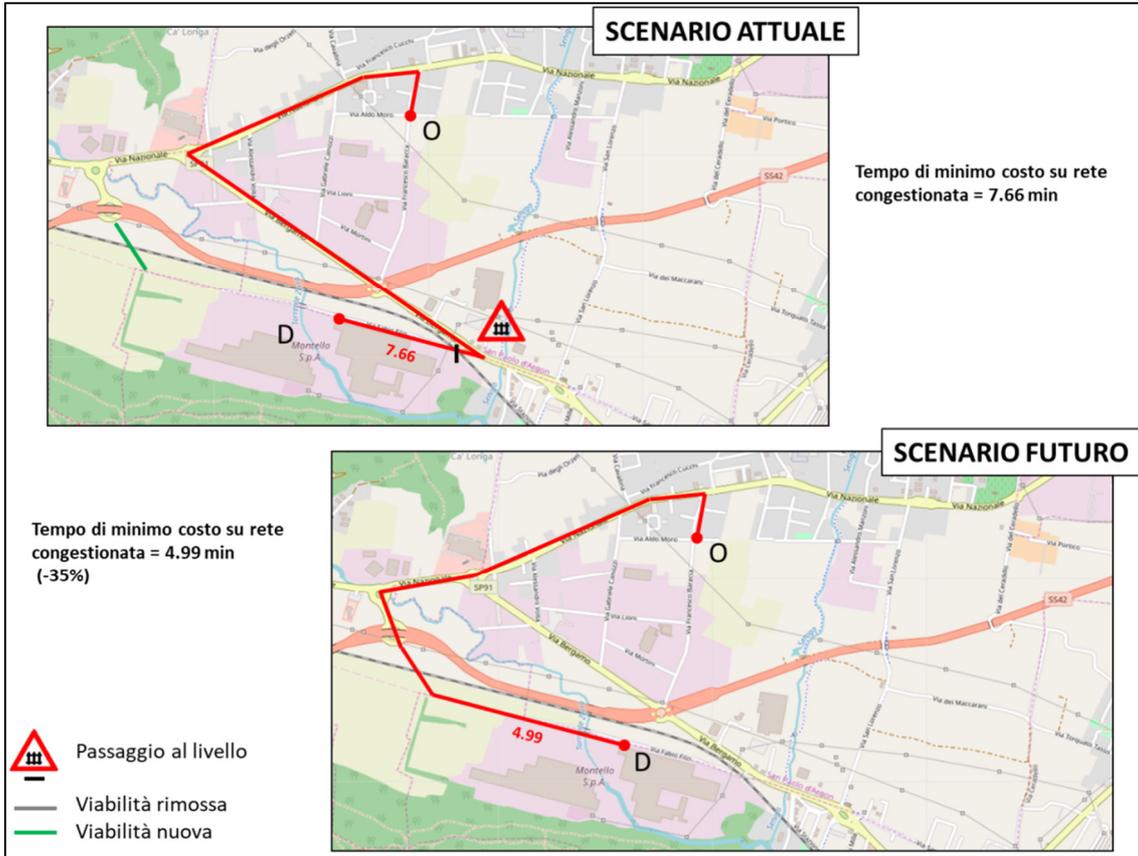


Figura 32 - Tempi minimi di percorso in corrispondenza dell'ambito di intervento 8

7 CONSIDERAZIONI FINALI

Secondo quanto evidenziato dal **modello di simulazione macroscopico**, i **sistemi viabilistici** a ovest e ad est di Bergamo, interessati dagli interventi di soppressione dei PL e dei nuovi collegamenti di riconnessione, **complessivamente risultano in grado di recepire la nuova configurazione** dei flussi veicolari, nonostante la perdita di alcuni punti di permeabilità nell'attraversamento nord-sud rispetto alla ferrovia. L'assegnazione della domanda veicolare sulla rete di progetto ha restituito dei nuovi percorsi che hanno comportato un incremento dei flussi di traffico soprattutto sulle viabilità alternative più prossime a quelle esistenti e passanti per i PL che verranno chiuse al traffico, come era logico aspettarsi. Pertanto, a livello complessivo, il sistema registra degli incrementi sia in termini di rapporto flusso/capacità (saturazione), sia di tempi di percorrenza, con situazioni che differiscono a seconda degli ambiti di intervento. Tuttavia, gli indicatori di performance di rete stimati rimangono su valori globalmente rappresentativi di una situazione di regolare funzionamento della rete stradale e di livelli di accettabilità della congestione.

Gli **otto ambiti** (figura 1) sono raggruppabili in **quattro macro-aree** di intervento, come rappresentato in figura.



Figura 33 – Raggruppamento degli ambiti di intervento per classe e tipologia di impatti sul traffico viabilistica nello scenario di progetto (quattro macro-aree)

La **sintesi degli impatti** degli interventi sul traffico veicolare nelle quattro macro-aree di cui sopra è riportata in tabella.

Tabella 9 - Sintesi degli impatti per macro-area di intervento

Macro-area	Incidenza su flussi o saturazione	Incidenza su tempo costo minimo
1	 Maggiore concentrazione dei flussi su SS470dir già congestionata	 +20% / +30% vs attuale a seconda dei percorsi
2-6	 Nord-sud: maggiore concentrazione dei flussi soprattutto su SS470dir e Via King Est-ovest: asse storico SS342 parzialmente alleggerito a ovest dell'ospedale grazie al nuovo arco che risulta essere molto efficace per le relazioni da e per Curno	 Marcato peggioramento nord-sud (+50%) Lieve miglioramento (-4%) est-ovest;
7	 Maggiore concentrazione dei flussi sulla viabilità urbana contigua	 Lieve peggioramento (+3%)
8	 Circoscritto e limitato aumento della saturazione sulle connessioni al nuovo sottopasso	 Miglioramenti per l'accessibilità al polo e all'abitato di Montello (-35%)

8 APPENDICE 1: METODOLOGIA DI RILIEVO

L'indagine è stata condotta utilizzando apparecchiature di rilievo automatizzato del traffico stradale.

Gli strumenti utilizzati operano con **tecnologia radar** e sono in grado di realizzare il conteggio su entrambi i sensi di marcia e di classificare i veicoli per tipologia di lunghezza del mezzo e per velocità di percorrenza.

Il **periodo complessivo di posa delle apparecchiature** è stato di circa due settimane, dal 10 al 24 febbraio 2020⁹, suddividendo le sezioni in due turni di rilievo, ciascuno di una settimana. L'indagine si è protratta per più giornate consecutive, così da coprire sia periodi feriali, sia giornate prefestive e festive.

Le procedure d'uso dello strumento prevedono un'installazione esterna alla piattaforma stradale, seguita da un test di funzionamento e da una analisi di calibrazione, tramite lettura *live* dei singoli passaggi. La lettura *live* permette di analizzare in tempo reale i dati registrati dallo strumento e compararli con il veicolo che effettivamente è transitato per la sezione, permettendo sia la verifica dell'avvenuta corretta rilevazione del passaggio da parte dello strumento sia l'acquisizione dei parametri di calibrazione dell'indice di riflessione misurato dagli apparecchi, così da ricondurlo ad una stima della lunghezza metrica del veicolo transitato.

Gli strumenti utilizzati sono modelli Icoms e Viacount, entrambi di dimensioni piuttosto contenute (26x37x23 cm), sufficientemente anonimi e pertanto poco percepibile dall'utente. L'apparecchio opera tramite emissione di microonde, delle quali viene analizzata la risposta doppler dovuta alla riflessione generata dalla presenza di veicoli. La rilevazione avviene a seguito dell'emissione di un fascio di onde con un angolo di 45° e l'installazione è effettuata a circa 1,5-2,0 m di altezza su pali o altri supporti già disponibili oppure appositamente installati e ancorati ai *guard rail* esistenti.

La **fase di post elaborazione** comprende, invece, il caricamento in un database relazionale dei dati acquisiti, durante il quale sono realizzati alcuni primi controlli sulla qualità e sulla copertura dei dati, verificando che non vi siano giornate con acquisizione solo parziale, così da non incorrere in errori grossolani in fase di interrogazione. Sui dati acquisiti è stata eseguita una elaborazione dell'attributo di lunghezza del mezzo, applicando i parametri correttivi registrati in calibrazione.

⁹ I dati raccolti nell'ambito della campagna di indagine sono stati soltanto marginalmente interessati dagli effetti dell'emergenza della diffusione del contagio da virus COVID-19, la cui situazione più critica è emersa in generale in Italia a partire da fine febbraio 2020.



Figura 34 - Visualizzazione esterna ed interna dell'apparecchiatura



Figura 35 - Schema di funzionamento dell'apparecchiatura.

Nella **prima settimana di rilievo** (dal 10 al 17 di febbraio) sono stati monitorati i flussi relativi alle sezioni 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 17 e nella **seconda settimana** (dal 18 al 24 febbraio) sono state monitorate le sezioni rimanenti, quali 10, 11, 12, 13, 14 e 15. I conteggi di traffico relativi ad ogni sezione sono stati rilevati per entrambe le direzioni di flusso e per l'intera giornata (24h) specificando la tipologia veicolare per classi di lunghezza in coerenza con il modello regionale.

Precedentemente all'avvio delle indagini sono state inviate le opportune **comunicazioni informative** e le **richieste per la realizzazione delle attività** ai soggetti interessati, quali:

- Provincia di Bergamo, Servizio Concessioni Stradali – Progettazione e Manutenzione;
- Comando di Polizia Locale di Bergamo;
- Comando di Polizia Locale di Curno;

Studio di trasporto

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
BGF1	00	F 16 RG	TS 0003 001	A	43 di 54

- Comando di Polizia Locale di Valbrembo;
- Comando di Polizia Locale di Paladina;
- Comando di Polizia Locale di San Paolo d'Argon;
- Unione Comunale dei Colli;
- Comando Stazione Carabinieri di Bergamo;
- Comando Stazione Carabinieri di Curno;
- Comando Stazione Carabinieri di Seriate;
- Compartimento Polizia Stradale Lombardia;
- Sezione Polizia Stradale Bergamo.

9 APPENDICE 2: GRAFO STRADALE

La **rete stradale**, già utilizzata nell'ambito delle analisi del PRMT di Regione Lombardia, è stata oggetto di **revisione e integrazione** in termini di modifiche:

- delle **infrastrutture stradali dell'area di progetto**, aggiungendo **83 nuovi archi stradali** e **63 nodi** non presenti nell'area di progetto e inserendo manovre realmente fattibili ma non consentite nel modello di partenza;
- degli **attributi del grafo stradale** dell'area bergamasca, con particolare riferimento alle caratteristiche degli archi che incidono nell'assegnazione, quali velocità e capacità (archi di tipo LT in figura).

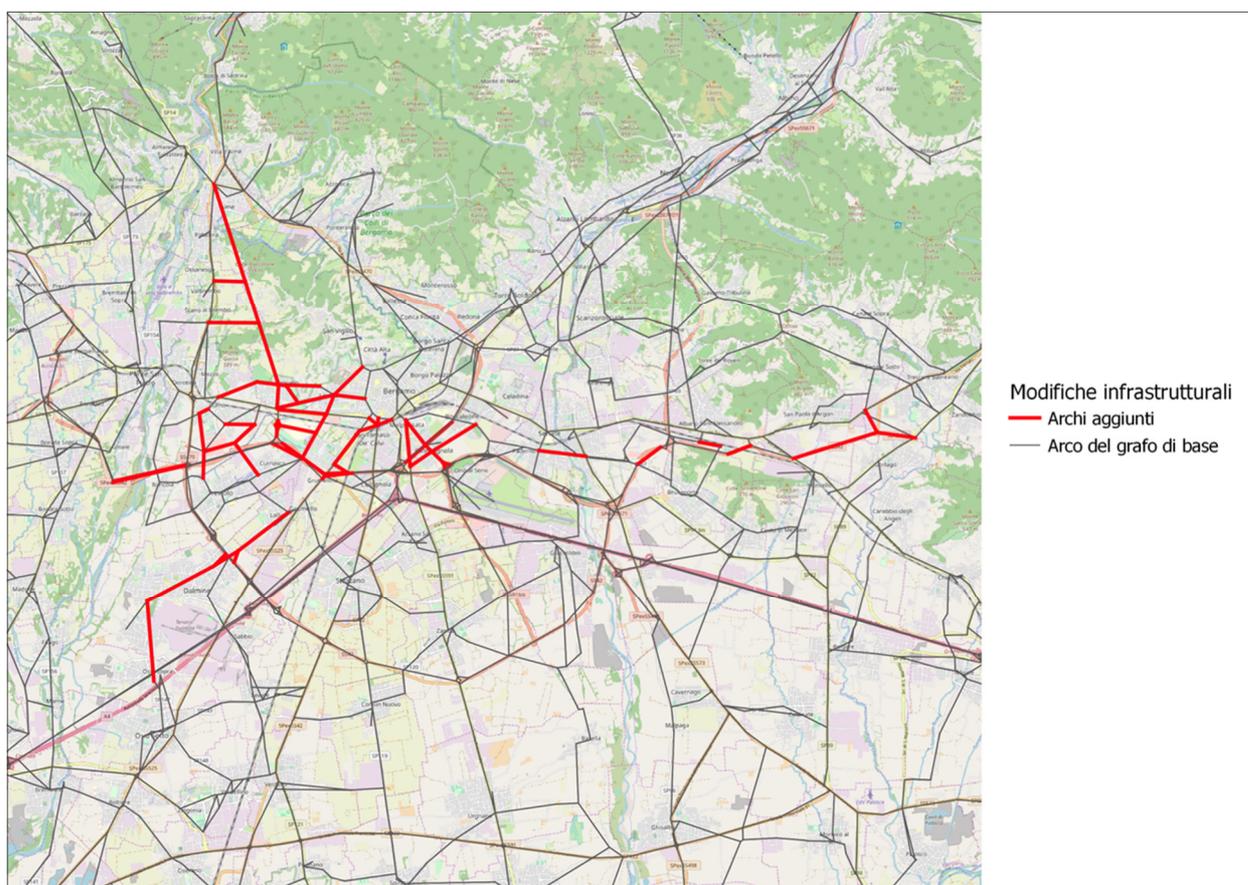


Figura 36 - Modifiche al grafo di rete del PRMT nell'area di intervento

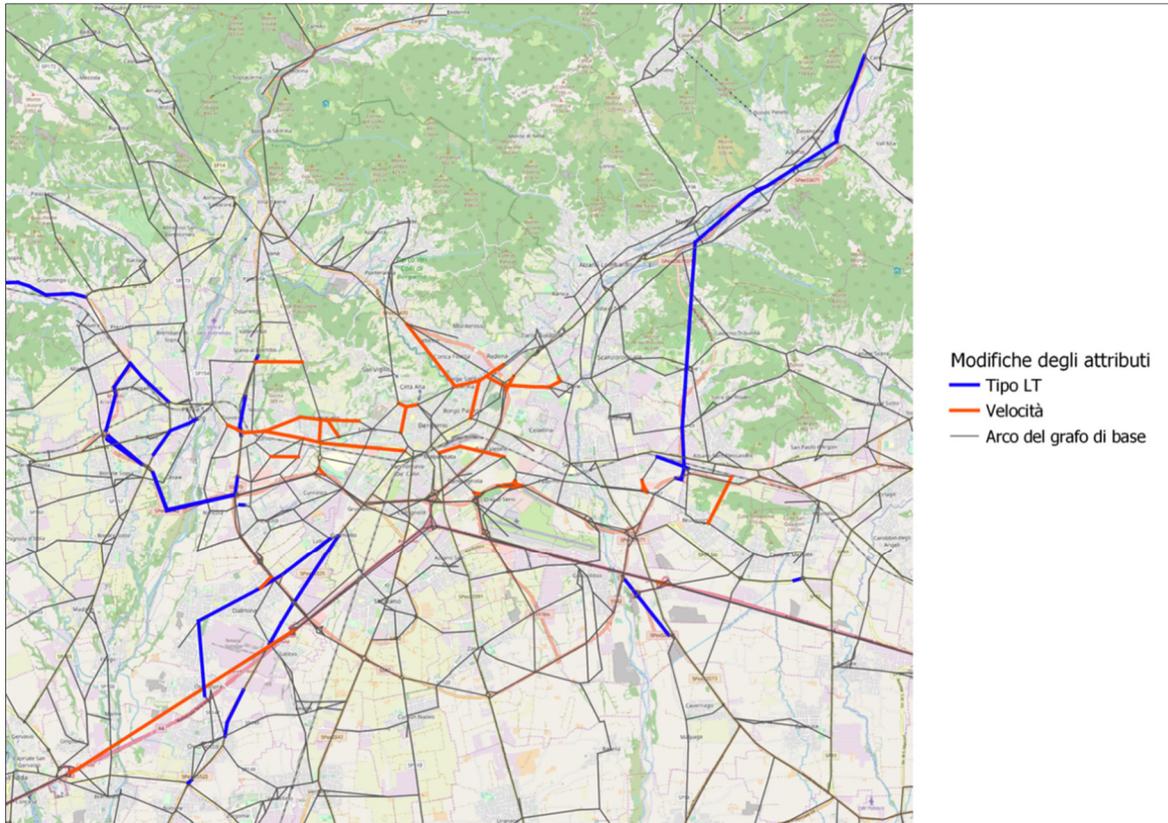


Figura 37 – Revisione degli attributi del grafo della rete

10 APPENDICE 3: PROCESSO DI CALIBRAZIONE

Per effettuare la calibrazione è stato utilizzato l'applicativo "Analyst drive" di CUBE. Tale metodo prevede l'assegnazione preliminare della matrice iniziale (c.d. *prior matrix*) alla rete stradale (c.d. *initial Highway Assignment*) grazie alla quale sono calcolati i percorsi di rete e le relative informazioni a corredo (*ICP Information*). Quindi, il software applica l'algoritmo di aggiornamento della *prior matrix* e, quando i flussi così assegnati (*O/D estimation*) tendono ai conteggi, l'algoritmo si arresta restituendo la matrice giornaliera aggiornata.

In termini matematici l'algoritmo di aggiornamento di *Analyst Drive* ricerca la soluzione del problema dei minimi quadrati generalizzati secondo la successiva funzione:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Min} & [b_c(AX-b)]^T [b_c(AX-b)] + \text{Simulated Volume} \\
 & \omega[X_c(X-X_0)]^T [X_c(X-X_0)] + \text{Prior matrix term} \\
 & \tau_I(TE_I-XE_I)^T (TE_I-XE_I) + \text{Trip end I term} \\
 & \tau_J(TE_J-XE_J)^T (TE_J-XE_J) + \text{Trip end J term} \\
 \text{subject to} & X_{lower} \leq X \leq X_{upper}
 \end{array}$$

dove

- **A** è la matrice delle proporzioni degli spostamenti;
- **X** è la matrice O/D da stimare;
- **X₀** è la matrice iniziale (prior matrix);
- **b** è il vettore dei conteggi;
- **b_c** è il livello di confidenza dei conteggi;
- **TE_I** e **XE_I** sono i valori dei trip ends simulati e rilevati per le zone in origine I;
- **TE_J** e **XE_J** sono i valori dei trip ends simulati e rilevati per le zone in destinazione J;
- **ω, τ_I, τ_J** sono fattori di pesatura.

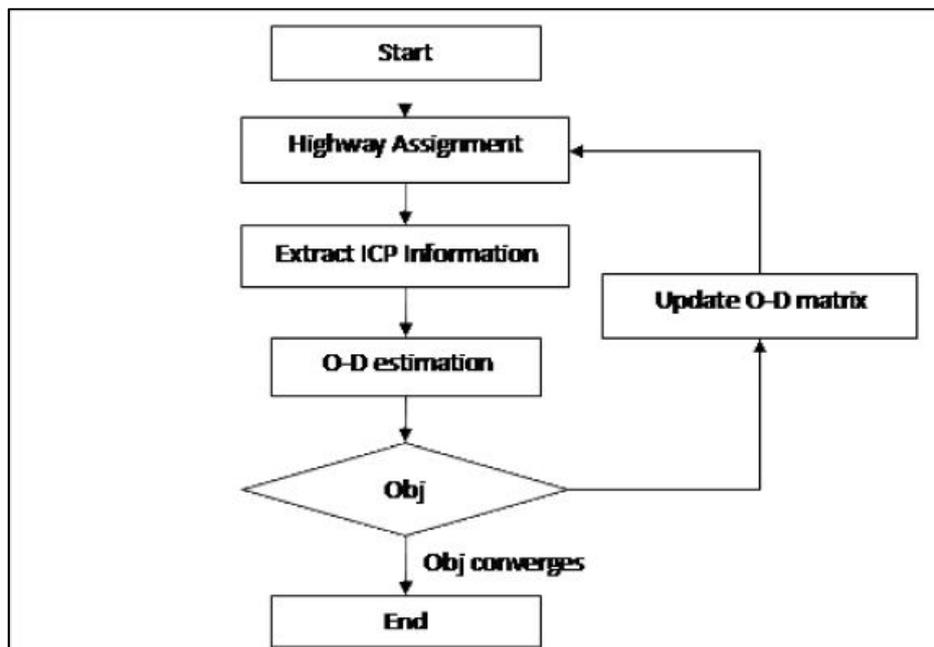


Figura 38 - Flow chart dello schema di funzionamento dell'applicativo Analyst Drive di Cube

Al fine di evitare distorsioni dovute ai rilievi maggiormente datati (relativi al 2016) rispetto a quelli nuovi (2020), nel processo di calibrazione della matrice sono stati definiti diversi livelli di confidenza.

La calibrazione è stata eseguita con i rilievi di traffico convertiti in veicoli equivalenti attraverso l'adozione dei medesimi fattori di equivalenza del modello regionale Lombardia.

Tabella 10 - I fattori di equivalenza delle classi veicolari

Classe veicolare (lunghezza)	Classe veicolare (modello)	Fattore di equivalenza
C0 – Altro (Moto-bici-piedi)	Moto	0.33
C1 – Auto	Auto	1
C2 – Comm. < 7.5	N1	1.3
C3 – Comm. < 10.0	N2	2
C4 – Comm. < 12.5	N2	2
C5 – Comm > 12.5	N3	3

La cartografia seguente mostra la posizione delle sezioni di conteggio considerati nel modello di calibrazione. In totale sono stati impiegati **59 conteggi mono-direzionali**, tra i quali **28 relativi ai nuovi rilievi effettuati nell'area di studio** (in verde in figura) e **31 adottati dal modello regionale** e posizionati in prossimità dell'area d'intervento (in rosso in figura).

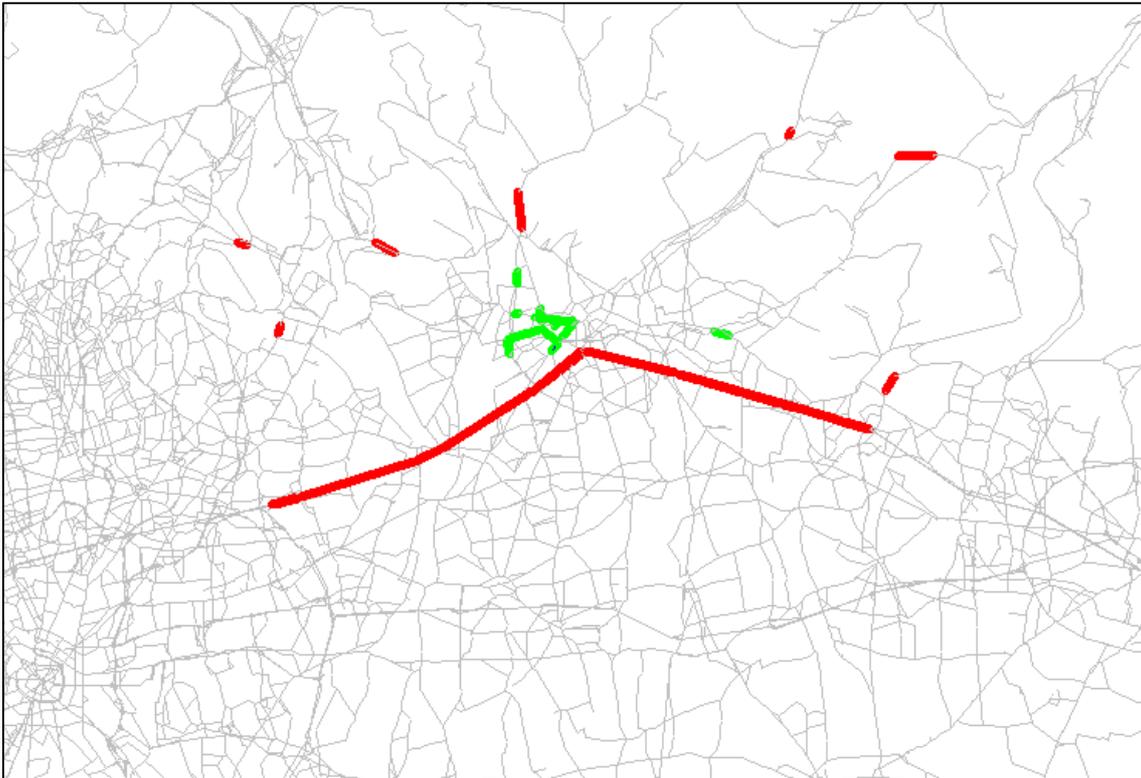


Figura 39 - Posizione delle sezioni di conteggio

11 APPENDICE 4: ALGORITMO DI ASSEGNAZIONE

La matrice giornaliera calibrata è stata assegnata alla rete stradale con un **algoritmo all'equilibrio**, in cui i flussi assegnati ad ogni iterazione sono moltiplicati per un peso (calcolato ad ogni iterazione in funzione di uno stimato fattore λ).

In particolare, l'algoritmo utilizzato è quello di Frank-Wolfe biconiugato dove il procedimento iterativo si arresta quando è raggiunto il primo dei valori di *cut-off* individuati.

Le funzioni di costo utilizzate per assegnare gli spostamenti alla rete stradale per ciascun motivo di spostamento sono di seguito riportati.

Tabella 11 - Le funzioni di costo adottate dall'algoritmo dell'assegnazione [€]

$COSTO_LAV=TIME*VOT_LAV+TOLL_AUTO *BETA_A+ COSTO_{ESERC_AUTO}$
$COSTO_STU=TIME*VOT_STU+TOLL_AUTO*BETA_A+ COSTO_{ESERC_AUTO}$
$COSTO_OCC=TIME*VOT_OCC+TOLL_AUTO*BETA_A+ COSTO_{ESERC_AUTO}$
$COSTO_AFF=TIME*VOT_AFF+TOLL_AUTO*BETA_A+ COSTO_{ESERC_AUTO}$
$COSTO_RIT=TIME*VOT_RIT+TOLL_AUTO*BETA_A+ COSTO_{ESERC_AUTO}$
$COSTO_N1=TIME*VOT_N1+LI.TOLL_N1*BETA_N1+ COSTO_{ESERC_N1}$
$COSTO_N2=TIME*VOT_N2+LI.TOLL_N2*BETA_N2+ COSTO_{ESERC_N2}$
$COSTO_N3=TIME*VOT_N3+LI.TOLL_N3*BETA_N3+ COSTO_{ESERC_N3}$

dove TIME è il tempo su rete congestionata espresso in ore, VOT è il Valore del tempo in €/ora, BETA è un parametro che esprime il peso del costo del pedaggio, TOLL è il pedaggio in €, $COSTO_{ESERC}$ è il costo di esercizio chilometrico, DISTANCE è la distanza in chilometri.

Tabella 12 - I parametri delle funzioni di costo dell'algoritmo dell'assegnazione

Tipo motivo/veicolo	VOT [Euro/ora]	BETA	Costo Esercizio [€/km]
LAVORO	12,00	0,70	0,25
STUDIO	6,00	0,70	0,25
OCCASIONALE	9,00	0,70	0,25
AFFARI	20,00	0,70	0,25
RITORNO A CASA	10,00	0,70	0,25
N1	22,00	1,5	0,40
N2	26,00	1,3	0,55
N3	36,00	1,0	0,85

Al fine di valutare il costo del pedaggio, a livello dell'intera Regione Lombardia, sono state classificate le autostrade in cinque differenti gruppi ad ognuno dei quali è stato attribuito un costo chilometrico di pedaggio per ciascuna delle tipologie veicolari. L'autostrada A4 rientra nel c.d. Gruppo 2. Per il calcolo del costo del pedaggio autostradale (TOLL) è stata utilizzata la seguente formula:

$$\text{TOLL} = \text{PEDAGGIO} * \text{DISTANCE}$$

Tabella 13 - La funzione del calcolo di pedaggio

Pedaggio [€/km]	Auto	N1	N2	N3
GRUPPO 2	0,092	0,094	0,122	0,219

Per simulare correttamente il traffico dei veicoli pesanti, è stato modellizzato l'impedimento del passaggio sulle strade comunali secondarie delle categorie veicolari N2 e N3. Sono stati inoltre esclusi dal processo di assegnazione gli archi di collegamento pedonale ed i connettori stazioni ferroviarie-rete stradale.

Per il calcolo dei tempi a rete carica (T_c) è stata utilizzata la seguente equazione di deflusso:

$$T_c = T_0 [1 + \alpha (V/C)^\beta]$$

dove T_0 è il tempo a flusso nullo, V è il valore del flusso e C la capacità dell'arco. Il valore dei parametri α e β dipende dalla tipologia di arco stradale (tabella 12).

Le velocità libere di deflusso dei veicoli commerciali N1 sono assunte pari a quelle dei veicoli privati, mentre quelle dei veicoli N2 e N3 sono determinate come riportato in tabella.

Tabella 14 – Le velocità dei veicoli pesanti

Fascia velocità (Km/h)	V_{N2}	V_{N3}
≥ 120	110	110
$120 \div 100$	100	80
< 100	$0,9 * V_{AUTO}$	$0,8 * V_{AUTO}$

La capacità giornaliera degli archi della rete stradale è stata ottenuta moltiplicando la capacità oraria fornita nel grafo stradale del PRMT per un coefficiente moltiplicativo pari a 12.

$$C_{DAY} = 12 \cdot C_{HOUR}$$

Nel caso dei connettori non si considera l'effetto della congestione.

In tabella 15 sono riportati i parametri α e β utilizzati per ciascuna tipologia di arco e in figura 40 le curve di deflusso ottenute in funzione delle velocità di ciascuna tipologia di arco.

Tabella 15 – Parametri α e β utilizzati nelle curve di deflusso (strade di interesse dell'area di progetto)

BPR	TIPO_LT,N,2,0	Descrizione	SPEED,N, 3,0	Alpha	Beta
BPR_1	1	Connettori	25	0	1
BPR_2	2	Autostrade	70	2	3,9
BPR_3	2	Autostrade	110	2	3,9
BPR_4	2	Autostrade	120	2	3,9
BPR_5	2	Autostrade	130	2	3,9
BPR_6	3	Statali principali	30	1,5	3,6
BPR_7	3	Statali principali	40	1,5	3,6
BPR_8	3	Statali principali	50	1,5	3,6
BPR_9	3	Statali principali	60	1,5	3,6
BPR_10	3	Statali principali	65	1,5	3,6
BPR_11	3	Statali principali	70	1,5	3,6
BPR_12	3	Statali principali	75	1,5	3,6
BPR_13	3	Statali principali	90	1,5	3,6
BPR_14	3	Statali principali	110	1,5	3,6
BPR_15	4	Statali secondarie	40	2	2,8
BPR_16	4	Statali secondarie	50	2	2,8
BPR_17	4	Statali secondarie	60	2	2,8
BPR_18	4	Statali secondarie	70	2	2,8
BPR_19	4	Statali secondarie	110	2	2,8
BPR_20	5	Provinciali principali	20	2,2	3
BPR_21	5	Provinciali principali	30	2,2	3
BPR_22	5	Provinciali principali	35	2,2	3
BPR_23	5	Provinciali principali	40	2,2	3
BPR_24	5	Provinciali principali	50	2,2	3
BPR_25	5	Provinciali principali	60	2,2	3
BPR_26	5	Provinciali principali	65	2,2	3
BPR_27	5	Provinciali principali	70	2,2	3
BPR_28	5	Provinciali principali	75	2,2	3
BPR_29	5	Provinciali principali	90	2,2	3
BPR_30	5	Provinciali principali	110	2,2	3
BPR_31	6	Provinciali secondarie	10	2,4	2,8
BPR_32	6	Provinciali secondarie	20	2,4	2,8
BPR_33	6	Provinciali secondarie	25	2,4	2,8

BPR	TIPO_LT,N,2,0	Descrizione	SPEED,N, 3,0	Alpha	Beta
BPR_34	6	Provinciali secondarie	30	2,4	2,8
BPR_35	6	Provinciali secondarie	40	2,4	2,8
BPR_36	6	Provinciali secondarie	50	2,4	2,8
BPR_37	6	Provinciali secondarie	60	2,4	2,8
BPR_38	6	Provinciali secondarie	65	2,4	2,8
BPR_39	6	Provinciali secondarie	70	2,4	2,8
BPR_40	7	Comunali principali	10	2,6	2,8
BPR_41	7	Comunali principali	20	2,6	2,8
BPR_42	7	Comunali principali	25	2,6	2,8
BPR_43	7	Comunali principali	30	2,6	2,8
BPR_44	7	Comunali principali	35	2,6	2,8
BPR_45	7	Comunali principali	40	2,6	2,8
BPR_46	7	Comunali principali	50	2,6	2,8
BPR_47	7	Comunali principali	55	2,6	2,8
BPR_48	7	Comunali principali	60	2,6	2,8
BPR_49	7	Comunali principali	70	2,6	2,8
BPR_50	8	Comunali secondarie	10	2,8	2,6
BPR_51	8	Comunali secondarie	20	2,8	2,6
BPR_52	8	Comunali secondarie	25	2,8	2,6
BPR_53	8	Comunali secondarie	30	2,8	2,6
BPR_54	8	Comunali secondarie	40	2,8	2,6
BPR_55	8	Comunali secondarie	50	2,8	2,6
BPR_56	8	Comunali secondarie	55	2,8	2,6
BPR_57	8	Comunali secondarie	60	2,8	2,6
BPR_58	8	Comunali secondarie	70	2,8	2,6
BPR_59	10	Svincoli	10	1,9	2,1
BPR_60	10	Svincoli	30	1,9	2,1
BPR_61	10	Svincoli	40	1,9	2,1
BPR_62	10	Svincoli	50	1,9	2,1
BPR_63	10	Svincoli	60	1,9	2,1
BPR_64	10	Svincoli	65	1,9	2,1
BPR_65	10	Svincoli	70	1,9	2,1
BPR_66	10	Svincoli	80	1,9	2,1
BPR_67	10	Svincoli	90	1,9	2,1

Studio di trasporto

COMMESSA BGF1	LOTTO 00	CODIFICA F 16 RG	DOCUMENTO TS 0003 001	REV. A	FOGLIO 53 di 54
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

BPR	TIPO_LT,N,2,0	Descrizione	SPEED,N, 3,0	Alpha	Beta
BPR_68	10	Svincoli	110	1,9	2,1
BPR_69	10	Svincoli	130	1,9	2,1
BPR_70	11	Superstrade	30	1,6	3,2
BPR_71	11	Superstrade	40	1,6	3,2
BPR_72	11	Superstrade	50	1,6	3,2
BPR_73	11	Superstrade	60	1,6	3,2
BPR_74	11	Superstrade	70	1,6	3,2
BPR_75	11	Superstrade	90	1,6	3,2
BPR_76	11	Superstrade	100	1,6	3,2
BPR_77	11	Superstrade	110	1,6	3,2
BPR_78	13	Attraversamenti di urbani di statali	10	1,8	2,8
BPR_79	13	Attraversamenti di urbani di statali	25	1,8	2,8
BPR_80	13	Attraversamenti di urbani di statali	40	1,8	2,8
BPR_81	13	Attraversamenti di urbani di statali	50	1,8	2,8
BPR_82	13	Attraversamenti di urbani di statali	60	1,8	2,8
BPR_83	13	Attraversamenti di urbani di statali	70	1,8	2,8
BPR_84	14	Archi di connessione tra stazioni e rete stradale	30	1,9	2,1

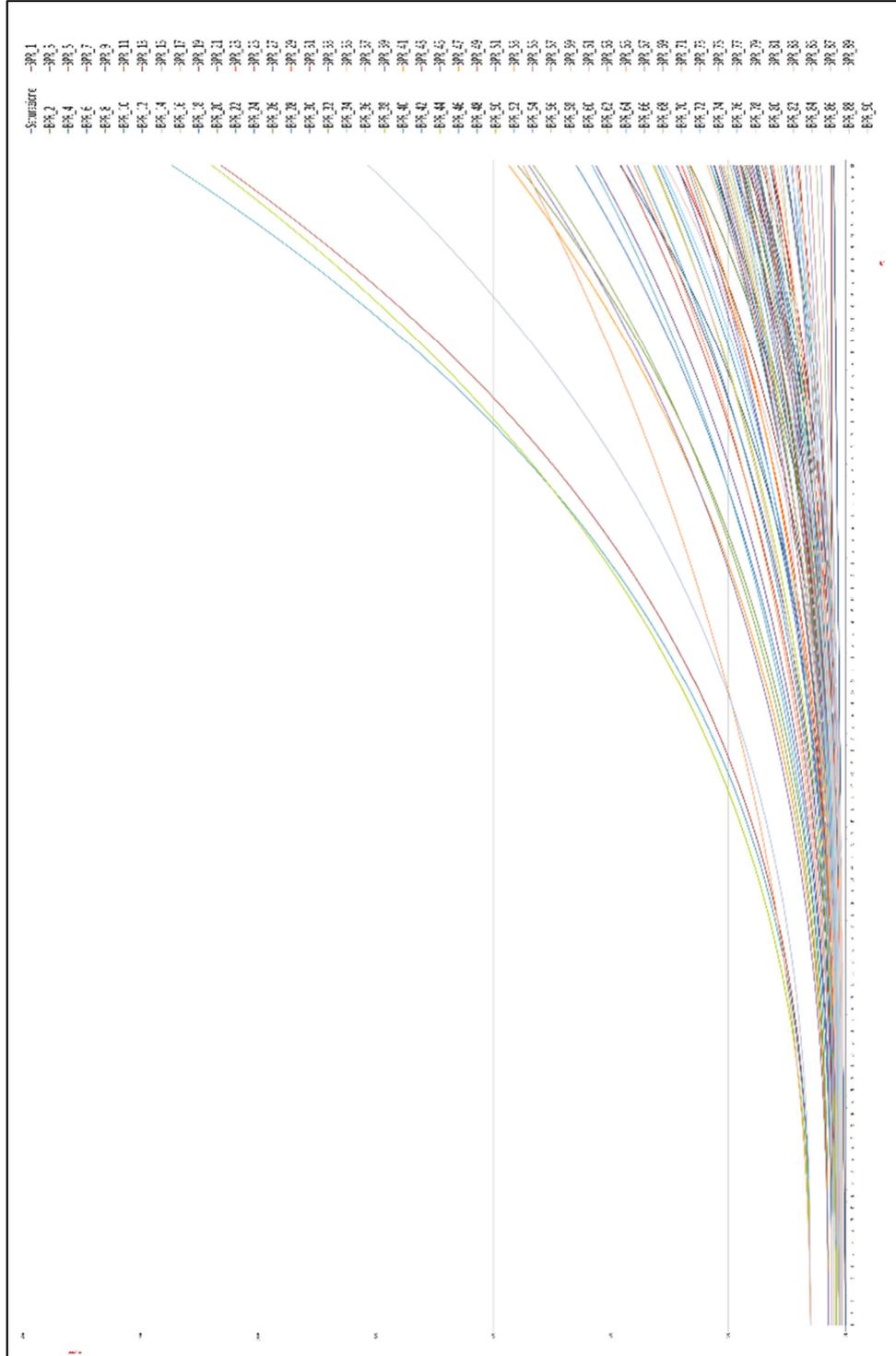


Figura 40 - Le curve di deflusso