



CONSIGLIO SUPERIORE
DEI LAVORI PUBBLICI



Accordo tra il CSLLPP e il Consorzio ReLUIS,
attuativo dei DM 578/2020 - DM 204/2022 - DM 304/2024
Sperimentazione delle linee guida per la classificazione
e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza
e il monitoraggio dei ponti esistenti

Task 5.7 Resilienza della rete di trasporto
Coordinatore: Antonio D'Andrea

Analisi di resilienza della rete stradale

B. Barabino, G.N. Bifulco, N. Berloco, G. Cantisani, S. Coropulis,
A. D'Andrea, L. Di Costanzo, G. Maternini, V. Ranieri, R. Ventura

Prefazione di
Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

Documento esplicativo

COLLANA DI VOLUMI TECNICI

ReLUIS  **BRIDGE**

Bridge Risk, Investigation, Diagnostics,
Governance and Experimentation



Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale

WP5: Temi/Progetti speciali
Task 5.7 Resilienza della rete di trasporto
Coordinatore: Antonio D'Andrea

Analisi di resilienza della rete stradale

B. Barabino, G.N. Bifulco, N. Berloco, G. Cantisani, S. Coropulis,
A. D'Andrea, L. Di Costanzo, G. Maternini, V. Ranieri, R. Ventura

Prefazione di Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

COLLANA DI VOLUMI TECNICI

ReLUI  **BRIDGE**

Bridge Risk, Investigation, Diagnostics,
Governance and Experimentation

Ledizioni 

L'opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons

“Attribuzione – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale (CC-BY-SA 4.0)”

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.it>.



I diritti d'autore sull'opera appartengono a *ReLUIS*

Le citazioni di altre opere sono riportate ai sensi degli art. 2, 21 e 33 Cost., 11 e 13 Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea, nonché dell'art. 70 della l. 633/1941.

B. Barabino, G.N. Bifulco, N. Berloco, G. Cantisani, S. Coropulis, A. D'Andrea, L. Di Costanzo, G. Maternini, V. Ranieri, R. Ventura (a cura di), *Analisi di resilienza della rete stradale*

Autori

B. Barabino, G.N. Bifulco, N. Berloco, G. Cantisani, S. Coropulis, A. D'Andrea, L. Di Costanzo, G. Maternini, V. Ranieri, R. Ventura

Finito di stampare nel mese di Dicembre 2025 presso Rotomail SpA - Vignate (MI)

ISBN cartaceo: 9791256007127

ISBN versione ePub: 9791256007134

ISBN PDF Open Access: 9791256007141

DOI: 10.57580/RELUIS.ARRT

Il PDF Open Access è scaricabile da DOAB (Directory Open Access Books) dal sito www.ledizioni.it o dal sito www.reluis.it



Sommario

1	Introduzione	1
2	Struttura dello studio	5
	F1: Modellazione dell'Offerta di Trasporto	5
	F2: Modellazione della Domanda di Trasporto	6
	F3: Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	6
	F4: Raccomandazioni e Disposizioni per l'adeguamento della rete durante l'interruzione	7
3	F1: Modellazione dell'Offerta di Trasporto	9
	3.1 F1.A1 Identificazione e delimitazione dell'area di studio	9
	3.2 F1.A2 Zonizzazione dell'area di studio	10
	3.2.1 Criteri per la zonizzazione	10
	3.2.2 Utilizzo di zonizzazioni basate su matrici di traffico esistenti	11
	3.3 F1.A3 Modellazione della rete stradale	11
	3.3.1 Estrazione dei dati da OpenStreetMap (OSM)	12
	3.3.2 Importazione dei dati in PTV VISUM	13
	3.3.3 Assegnazione degli attributi ai nodi ed agli archi	14
4	F2: Modellazione della Domanda di Trasporto	19
	4.1 F2.A1 Modellazione della domanda di passeggeri (autovetture)	19
	4.2 F2.A2 Modellazione della domanda di merci (veicoli pesanti)	21
5	F3: Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	23
	5.1 F3.A1 Assegnazione della domanda alla rete	23
	5.1.1 Assegnazione su reti congestionate	23

5.1.2	Assegnazione di equilibrio	25
5.2	F3.A2 Valutazione dei KPI e della resilienza della rete	29
5.2.1	Approccio Connectivity-based	29
5.2.2	Approccio Level of Service-based	30
5.2.3	Confronto tra approcci e scenari	30
5.3	F3.A3 Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento	31
5.3.1	Impatto socioeconomico	31
5.3.2	Interventi prioritari di gestione	32
5.3.3	Interventi prioritari di manutenzione	32
6	F4: Raccomandazioni e Disposizioni per l'adeguamento della rete durante l'interruzione	33
7	Esplorazione della robustezza di rete con modellazione esplicita dell'incertezza	37
7.1	Generazione degli scenari di perturbazione	37
7.2	Definizione della perdita di funzionalità	38
7.3	Schema operativo	39
7.4	Indicatori di prestazione	40
7.5	Analisi statistica e dimensionalità dei risultati	40
8	Casi studio	41
8.1	Caso di Studio 1: rete primaria (A21, presso Cremona)	41
8.1.1	Delimitazione area di studio	42
8.1.2	Zonizzazione area di studio	42
8.1.3	Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti	44
8.1.4	Approccio basato su matrici O/D di Regione Lombardia	47
8.1.5	Approccio basato su dati TomTom	56
8.2	Caso di Studio 2: opera minore (lungo la SP50dir, presso Gavirate - VA)	62
8.2.1	Contesto di studio	62
8.2.2	Delimitazione area di studio	63
8.2.3	Zonizzazione area di studio	64
8.2.4	Costruzione del grafo rappresentativo della rete di trasporti	65
8.2.5	Modellazione della domanda passeggeri	66

8.2.6	Modellazione della domanda merci	67
8.2.7	Flussi di traffico passeggeri e merci osservati	68
8.2.8	Assegnazione della domanda di trasporti	69
8.2.9	Valutazione dei KPI sulla rete modellata	78
8.2.10	Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità d'intervento	80
8.3	Caso di Studio 3: rete secondaria lungo la SP29 presso Corchiano (VT)	80
8.3.1	Delimitazione area di studio	81
8.3.2	Zonizzazione dell'area di studio	87
8.3.3	Modellazione della rete stradale	88
8.3.4	Modellazione della domanda di trasporto	90
8.3.5	Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	97
8.4	Caso di Studio 4: rete primaria lungo la diramazione della A1 verso Roma Sud, presso San Cesareo (RM)	100
8.4.1	Delimitazione area di studio	100
8.4.2	Zonizzazione dell'area di studio	103
8.4.3	Modellazione della rete stradale	103
8.4.4	Modellazione della domanda di trasporto	104
8.4.5	Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	112
8.5	Caso di Studio 5: rete primaria urbana (Tangenziale di Napoli)	118
8.5.1	Delimitazione area di studio	119
8.5.2	Zonizzazione area di studio	120
8.5.3	Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti	121
8.5.4	Approccio ibrido: matrici O/D: PUMS e basate su FCD	122
8.6	Caso di Studio 6: rete primaria lungo la A2 (presso Salerno)	138
8.6.1	Delimitazione area di studio	139
8.6.2	Zonizzazione area di studio	139
8.6.3	Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti	140
8.6.4	Approccio ibrido: conteggi e dati FCD	142
8.6.5	Valutazione dei KPI sulla rete modellata	146
8.7	Caso di Studio 7: rete secondaria lungo la SP83, presso Baragiano (PZ)	154
8.7.1	Delimitazione area di studio	156

8.7.2	Zonizzazione dell'area di studio	163
8.7.3	Modellazione della rete stradale	164
8.7.4	Modellazione della domanda di trasporto	164
8.7.5	Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	168
8.8	Caso di Studio 8: rete secondaria lungo la SP123 presso Troia (FG)	170
8.8.1	Delimitazione area di studio	172
8.8.2	Zonizzazione dell'area di studio	185
8.8.3	Modellazione della rete stradale	186
8.8.4	Modellazione della domanda di trasporto	191
8.8.5	Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza	194
	Lista degli acronimi e delle variabili	196
	Riferimenti bibliografici	198

Prefazione

La gestione del patrimonio dei ponti esistenti rappresenta oggi una delle attività più complesse e strategiche per il sistema delle infrastrutture a livello internazionale e italiano. La vetustà più o meno diffusa delle opere associata all'evoluzione delle condizioni di carico da traffico o delle condizioni ambientali accresce l'attenzione ai temi della sicurezza, della resilienza e della sostenibilità delle opere. L'introduzione di un quadro normativo specifico per le opere esistenti impone un approfondimento delle modalità di conoscenza, valutazione e gestione di tali infrastrutture.

In questo contesto si colloca l'attività di monitoraggio delle applicazioni e di ricerca sviluppata nell'ambito dell'Accordo tra il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP) e il Consorzio ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e strutturale), a supporto della sperimentazione delle *Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti* che nel 2020 sono state prima emanate dallo stesso CSLPP e successivamente adottate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con apposito Decreto Ministeriale. La presente collana di volumi raccoglie in modo organico i principali risultati di tale attività, con l'obiettivo di fornire una base tecnico-scientifica quanto più solida, condivisa e operativamente utilizzabile per l'applicazione e l'evoluzione delle Linee Guida.

L'impianto complessivo della collana riflette l'approccio multilivello introdotto dalle Linee Guida, che distingue in modo chiaro tra la conoscenza, la classificazione semplificata del rischio, la valutazione della sicurezza, le attività di sorveglianza e monitoraggio, e gli strumenti di supporto alle decisioni. Ciascun volume affronta le diverse tematiche secondo una logica integrata, che combina:

- ⊙ osservazioni sul patrimonio reale e analisi dei casi studio;
- ⊙ sperimentazione su materiali, componenti ed elementi strutturali;
- ⊙ sviluppo e validazione di modelli analitici e numerici;
- ⊙ analisi critica delle procedure normative esistenti;
- ⊙ proposte di miglioramento e integrazione in chiave pre-normativa;

con peso differente in funzione delle finalità del volume. Infatti, circa un terzo dei volumi contengono indicazioni per un'efficace applicazione delle linee guida (e.g. indagini, diagnostica, monitoraggio, sistemi in cemento armato precompresso, selle Gerber), un terzo contengono approfondimenti tecnico-scientifici utili per proposte di aggiornamento e affinamento delle stesse (e.g. valutazioni delle classi di attenzione, valutazione formale della sicurezza, etc.) e un terzo contengono una selezione di informazioni, prevalentemente ma non esclusivamente di carattere sperimentale e modellistico, utile ad approfondimenti

specifici degli addetti ai lavori su tematiche strutturali (e.g. problematiche di durabilità, dispositivi di appoggio, impalcati metallici, etc.)

Un tratto distintivo della collana è rappresentato dall'ampio ricorso alla sperimentazione, condotta sia in laboratorio sia su strutture reali, con riferimento a tipologie e componenti particolarmente critici del patrimonio infrastrutturale nazionale: travi e impalcati in calcestruzzo armato precompresso, solette da ponte, pile di sezione circolare e pali, selle Gerber, dispositivi di appoggio, etc.. I risultati sperimentali costituiscono la base per una lettura critica delle formulazioni normative attualmente in uso e per la definizione di criteri di verifica più coerenti con il comportamento sperimentale delle strutture. Particolare attenzione è stata dedicata alla riduzione dell'incertezza conoscitiva, tema trasversale a tutte le fasi del processo decisionale. Le attività di ricerca hanno infatti esplorato in modo sistematico il ruolo delle indagini diagnostiche, della calibrazione dei modelli, del monitoraggio strumentale e satellitare, nonché delle prove di carico, come strumenti complementari per una valutazione più realistica e affidabile della sicurezza delle opere esistenti. Un ulteriore elemento qualificante è l'attenzione posta alla digitalizzazione dei processi di gestione, attraverso l'integrazione tra modellazione informativa (BIM), sistemi GIS, archivi nazionali e tecnologie di monitoraggio avanzato. L'adozione di strumenti digitali interoperabili è interpretata come leva fondamentale per garantire la tracciabilità delle informazioni, la coerenza delle valutazioni e valorizzare l'utilità nel tempo dei sistemi di gestione delle infrastrutture.

Nel loro insieme, i volumi si propongono come strumenti di accompagnamento e supporto alla applicazione delle *Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti*, fornendo chiarimenti interpretativi, esempi applicativi, criteri operativi e, laddove ritenuto utile, proposte di aggiornamento e integrazione fondate su evidenze scientifiche e sperimentali. Inoltre, la collana si rivolge agli enti proprietari e gestori di ponti, agli uffici tecnici delle amministrazioni locali e centrali, ai professionisti e ai tecnici del settore, ai quali intende offrire un riferimento aggiornato per affrontare in modo organico e consapevole le attività connesse alla gestione del patrimonio infrastrutturale esistente. Infine, la collana costituisce una base di conoscenza condivisa per la comunità scientifica e tecnica, utile a favorire un dialogo continuo tra ricerca, pratica professionale e sviluppo normativo. In questo senso, la collana assume anche un valore pre-normativo, a beneficio del legislatore tecnico, degli enti di normazione e di tutti i soggetti coinvolti nel governo della sicurezza delle infrastrutture.

Questo volume è dedicato allo sviluppo di metodologie operative per l'analisi delle reti di trasporto, con particolare riferimento al ruolo che i ponti e le opere d'arte svolgono nel garantire la continuità funzionale del sistema infrastrutturale e la mobilità di persone e merci.

Allo scopo di valutare la robustezza funzionale della rete intesa come capacità di mantenere prestazioni globali adeguate anche a fronte della perdita di funzionalità di singoli elementi infrastrutturali quali i ponti, nel volume si mostra una metodologia strutturata in quattro fasi operative:

- ◎ modellazione dell'offerta di trasporto, attraverso la definizione della rete infrastrutturale e della sua rappresentazione modellistica;

- ⊙ modellazione della domanda di trasporto, sia passeggeri sia merci, mediante matrici origine-destinazione e dati osservati;
- ⊙ modellazione dell'interazione domanda-offerta e valutazione della resilienza della rete mediante indicatori prestazionali;
- ⊙ definizione di raccomandazioni operative per la gestione della rete in condizioni di interruzione.

Particolare rilievo è attribuito all'integrazione tra modellazione trasportistica tradizionale e analisi di rischio infrastrutturale, consentendo di valutare non solo la sicurezza del singolo ponte, ma anche la sua rilevanza strategica all'interno del sistema di mobilità. Questo approccio consente di supportare in modo oggettivo la definizione delle priorità di intervento e delle strategie di gestione.

Il volume affronta inoltre il tema della modellazione dell'incertezza, introducendo approcci probabilistici per la valutazione della perdita di funzionalità della rete in presenza di scenari di danno diffuso, come quelli associati a eventi naturali estremi. Questo consente di passare da valutazioni deterministiche a valutazioni statistiche dell'impatto sul sistema di trasporto.

Un contributo di particolare valore applicativo è rappresentato dall'analisi dell'impatto socioeconomico delle interruzioni infrastrutturali, che consente di quantificare le conseguenze in termini di accessibilità territoriale, tempi di percorrenza, costi di trasporto e continuità dei servizi essenziali. Tale aspetto risulta fondamentale per orientare le scelte degli enti gestori in un'ottica di gestione del rischio basata su priorità oggettive.

Il volume è supportato da casi studio reali, applicati a reti di diversa scala – da infrastrutture primarie autostradali a reti secondarie locali – che dimostrano la flessibilità e l'adattabilità della metodologia proposta rispetto a diversi livelli di disponibilità dei dati e differenti contesti territoriali.

Edoardo Cosenza – Mauro Dolce

La collana **ReLUI S BRIDGE** raccoglie studi e contributi tecnico-scientifici dedicati alla valutazione della sicurezza, alla gestione e alla manutenzione dei ponti esistenti.

I volumi sono suddivisi in tre tipologie:

- ⊙ Documento Divulgativo (**D**) contenente contributi tecnico-scientifici per l'applicazione delle Linee Guida;
- ⊙ Documento Esplicativo (**E**) contenente approfondimenti tecnico-scientifici per l'aggiornamento e affinamento delle Linee Guida;
- ⊙ Rapporto Tecnico-Scientifico (**R**) contenente contributi specialistici sperimentali e modellistici su tematiche strutturali specifiche

Seguono i titoli dei volumi.

- D – Tecniche di indagine e diagnostica (Bilotta A.)
- D – Calibrazione del modello – Identificazione dinamica e prove statiche (Bilotta A.)
- D – Monitoraggio strumentale dei ponti (Bilotta A.)
- D – Sperimentazione su casi reali per la conoscenza dei ponti esistenti (Bilotta A.)
- D – Sperimentazione, analisi e interventi sulle selle Gerber nei ponti esistenti (di Prisco M.)
- D – La tecnologia del precompresso nei ponti esistenti (Pecce M. R.)
- D – Indagini e valutazione dell'efficienza della precompressione negli impalcati da ponte (Pecce M. R.)
- D – Approcci di modellazione e analisi dei ponti in c.a.p. (Pecce M. R.)
- E – Modellazione informativa dei ponti esistenti (Asprone D.)
- E – Censimento delle opere, schede difetti e di ispezione (Bilotta A.)
- E – Analisi di resilienza della rete stradale (D'Andrea A.)
- E – Valutazione della Classe di Attenzione associata al rischio idraulico e manuale operativo a supporto del Livello 3 (Giugni M.)
- E – Revisione di aspetti legati alla valutazione formale della sicurezza di ponti esistenti (Iervolino I.)
- E – Analisi critica e possibile miglioramento della classificazione dei ponti esistenti (Occhiuzzi A.)
- E – Valutazione delle Classi di Attenzione associate al rischio strutturale-fondazionale e al rischio sismico (Pecce M. R.)
- E – Valutazione della Classe di Attenzione associata al rischio frane (Urcioli G., Sappa G.)
- R – Ponti in acciaio: sperimentazione e modellazione (Landolfo R.)
- R – Effetti del degrado nei ponti esistenti in c.a. e c.a.p. (Lignola G. P.)
- R – Procedure di prova di carico a supporto delle verifiche di sicurezza dei ponti esistenti (Losanno D.)
- R – Dispositivi di appoggio: sperimentazione e modellazione (Masi A.)
- R – Prove sperimentali e modellazione del comportamento a taglio di solette da ponte in calcestruzzo armato (Occhiuzzi A.)
- R – Prove sperimentali e modellazione del comportamento a taglio di elementi in calcestruzzo armato a sezione circolare (Occhiuzzi A.)
- R – Sperimentazioni su travi in calcestruzzo armato precompresso (Pecce M. R.)
- R – Monitoraggio dei ponti esistenti mediante dati satellitari (Prota A.)

1

Introduzione

La resilienza delle infrastrutture e delle reti stradali è un tema sempre più importante nella pianificazione e nella gestione dei sistemi di trasporto, anche in relazione alla crescente vetustà delle opere d'arte delle reti stradali che, accompagnata dal massiccio incremento dei carichi veicolari, spesso non previsti all'epoca di costruzione, e dal mutamento delle condizioni climatiche ed ambientali, offre un evidente quadro di criticità.

A fronte di ciò, gli sforzi di ricerca si sono concentrati, in generale, sull'integrazione di tecnologie avanzate per il monitoraggio e il miglioramento del comportamento meccanico dei manufatti, come sensori e materiali innovativi. Sono stati sviluppati approcci che combinano l'ingegneria tradizionale con strumenti di modellazione e di analisi dei dati, al fine di verificarne la vulnerabilità e pianificare interventi preventivi. Le conseguenze che tali attività di monitoraggio e manutenzione possono avere sulla rete stradale possono essere rilevanti e richiedono un approfondimento tecnico/scientifico integrato, in relazione agli aspetti trasportistici e infrastrutturali. Esistono molteplici metodologie e approcci modellistici che possono essere utilizzati a tale scopo, tra cui occorre verificare quelli che meglio si adattano alle reti di interesse nazionale.

In accordo con il Livello 5 delle Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza e il Monitoraggio dei Ponti Esistenti, questo studio si occupa della resilienza delle reti di trasporto, anche per fornire indicazioni utili sulla priorità degli interventi di gestione e manutenzione dei manufatti esistenti.

Infatti, che i manufatti siano considerati di significativa importanza o meno, quando si debba considerare la loro parziale o totale messa fuori servizio all'interno della rete stradale, improvvisa o programmata, è utile svolgere analisi di resilienza del ramo della rete stradale e/o del sistema di trasporto di cui quel ramo è parte, valutando la rilevanza trasportistica, analizzando l'interazione tra la struttura e la rete stradale di appartenenza e le conseguenze dell'interruzione dell'esercizio del manufatto sul contesto socioeconomico in cui esso è inserito.

Va precisato che il termine resilienza viene in genere usato per descrivere la capacità di un sistema di trasporto di assorbire un evento di degrado, cioè la perdita (totale o parziale) della funzionalità di una o più delle sue infrastrutture, di adattarsi a tale condizione degradata e di recuperare prestazioni accettabili. Essa prevede quindi anche la valutazione della capacità di adattamento dinamico del sistema. Nel seguito, il termine resilienza sarà invece utilizzato convenzionalmente con un significato ristretto alla sola analisi di robu-

stezza funzionale del sistema di trasporto, cioè alla capacità della rete di assorbire eventi di degrado delle infrastrutture componenti senza cambiare in modo sostanziale il livello di connettività o il livello di servizio che nel suo complesso è in grado di offrire.

Obiettivo dello studio è delineare una metodologia operativa, da rendere disponibile ai tecnici, agli enti proprietari e ai concessionari, per individuare le possibili alternative in grado di garantire il funzionamento del sistema di trasporto e per quantificare le conseguenze di una riduzione totale o parziale della funzionalità di una o più infrastrutture stradali. Lo studio è corredato di possibili applicazioni dell'analisi di resilienza a diverse tratte sperimentali, tra quelle di competenza dei diversi enti gestori, individuate dal CSL-LPP in tutto il territorio nazionale, ai sensi del Decreto del Ministero delle Infrastrutture n. 578 del 17.12.2020.

Le applicazioni hanno confermato la validità della sequenza di fasi individuata nella metodologia proposta, evidenziandone al contempo la flessibilità e l'adattabilità a contesti territoriali e operativi diversi. In particolare, è emerso come il metodo possa essere modulato in funzione di vari fattori: la scala territoriale di riferimento, la disponibilità e la qualità dei dati, la configurazione della rete di trasporto e l'effettiva percorribilità dei suoi rami da parte delle diverse componenti del traffico. In generale, la metodologia si può infatti declinare in due diversi approcci:

- il primo, più generale, è applicabile a una porzione di rete relativamente estesa e connessa, per la quale si disponga di un ampio insieme di dati, come matrici origine/destinazione (O/D) già elaborate, rilievi di traffico in diversi punti e altre informazioni di supporto. In tali condizioni è possibile impiegare le procedure analitiche classiche della modellazione delle reti di trasporto, che consentono di simulare in modo coerente i flussi di traffico e di analizzare gli effetti di interventi o modifiche infrastrutturali con elevato grado di attendibilità;
- il secondo approccio, più di dettaglio, è destinato a contesti in cui si operi su una rete di dimensioni più ridotte e con disponibilità limitata di dati (assenza di matrici O/D, rilievi di traffico parziali o assenti). In tali casi, l'applicazione di metodologie di modellazione complesse risulta spesso problematica o economicamente non sostenibile. Si ricorre dunque a un approccio più semplificato, che consente comunque di ottenere stime ragionevoli dei flussi e delle prestazioni della rete, senza la necessità di onerosi rilievi o sofisticati strumenti di simulazione. L'efficacia di questo approccio dipende tuttavia dal fatto che la rete di trasporto sia sufficientemente semplice e che gli effetti di redistribuzione dei flussi siano facilmente prevedibili (ad esempio in presenza di percorsi alternativi obbligati o di opzioni di instradamento limitate), anche senza un'esplicita modellazione su rete.

Tra i due approcci ben si possono trovare intersezioni e contaminazioni. Il loro ragionevole coordinamento garantisce anche l'effettiva praticabilità del metodo, considerata anche la grande diversità di conoscenza della materia e di capacità operativa dei vari soggetti istituzionali destinatari delle presenti Linee Guida (Comuni, Provincie, Regioni, Società concessionarie, Agenzie).

Un ulteriore livello di analisi merita altresì attenzione. Esso si attaglia ai casi in cui non si voglia procedere con un approccio what-if, cioè con la stima di cosa accada al realizzarsi della perdita totale o parziale di funzionalità di una determinata e ben individuata infrastruttura o tratta stradale, identificata a seguito di analisi di rischio o di analisi multirischio. Ovvero si scelga di inserire esplicitamente nella valutazione dell'effetto su rete la modellazione dell'incertezza del danno. In tale approccio si assume che l'incertezza sia modellata a livello dell'intera rete e non solo di singola infrastruttura e che, infine, possa essere modellata in maniera più o meno informata. In caso di massima incertezza, tutti i rami della rete di trasporto possono essere caratterizzati da una probabilità uniformemente distribuita di perdita di funzionalità (minima informazione e massima incertezza). In altri casi, meno estremi, gli archi della rete (o eventualmente un sottoinsieme di essi) sono caratterizzati da una probabilità di perdita di funzionalità con una distribuzione nota, risultante da un'analisi combinata della probabilità di realizzarsi degli eventi scatenanti (su area vasta) e della fragilità dei rami infrastrutturali della rete. Il funzionamento del sistema di trasporto viene valutato considerando tutte le combinazioni di perdita di funzionalità dei rami della rete, generate in base alle rispettive probabilità di avvenire. Ciò consente di identificare la distribuzione statistica dell'impatto, espresso in termini di livello complessivo di servizio della rete e misurato, nei casi più semplici, tramite un valore medio.

A questo tema, volto a investigare la resilienza della rete in condizioni di incertezza sul degrado funzionale delle sue infrastrutture determinato, ad esempio, da eventi naturali estremi (sismici, idrografici, geologici, ecc.), sono dedicate una sezione specifica del documento e un'appendice esplicativa. L'approccio può anche essere utilizzato a livello strategico per valutazioni di resilienza in condizioni di massima incertezza, preliminari all'esecuzione delle analisi multirischio d'identificazione delle infrastrutture critiche.

2

Struttura dello studio

Come illustrato nel diagramma a blocchi in Figura 21, la struttura dello studio si articola in **quattro Fasi (F)**: le prime tre di natura metodologica e la quarta di carattere applicativo.

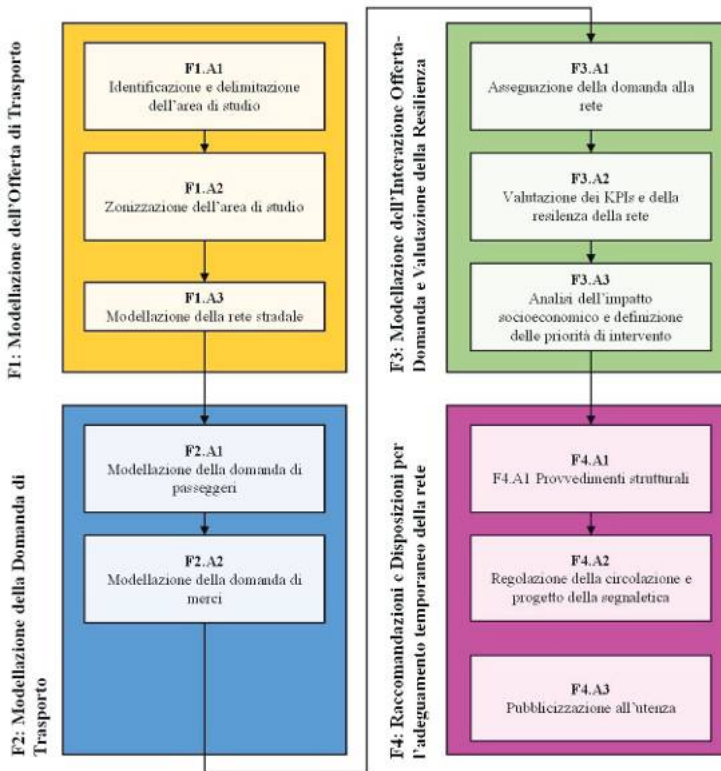


Figura 2.1 Diagramma a blocchi relativo alla struttura dello studio.

Ciascuna fase è brevemente introdotta nel seguito e descritta in modo più dettagliato nel relativo capitolo.

F1: Modellazione dell'Offerta di Trasporto

L'obiettivo della Fase F1 è identificare, delimitare e zonizzare l'area di interesse, nonché modellare la rete stradale in essa compresa. L'obiettivo è costruire un modello capace di

analizzare l'impatto di una possibile interruzione su un manufatto (ponte e/o viadotto) di rilevanza strategica per la rete. F1 si articola in tre attività principali.

- **F1.A1 Identificazione e delimitazione dell'area di studio:** Definire l'area geografica in cui si manifestano gli effetti di un'interruzione della funzionalità del manufatto. La scelta del raggio di estensione dell'area è specifica del caso di studio e tiene conto di criteri quali la distribuzione dei flussi di traffico, la presenza di alternative di percorso e l'accessibilità dell'area circostante.
- **F1.A2 Zonizzazione dell'area di studio:** Suddividere l'area in zone di traffico basandosi su criteri speditivi. La zonizzazione può anche tenere conto delle matrici di traffico eventualmente disponibili e associate a diverse granularità spaziali (domanda passeggeri e merci).
- **F1.A3 Modellazione della rete stradale:** Modellare l'intera rete stradale nell'area di studio, includendo sia il modo di trasporto "autovettura" sia quello "veicolo pesante". In particolare, all'interno della modellazione, gli archi sono classificati in base alla loro transitabilità per veicoli pesanti, così da consentire simulazioni differenziate in base al tipo di veicolo e alle restrizioni infrastrutturali.

F2: Modellazione della Domanda di Trasporto

L'obiettivo della Fase F2 è costruire una rappresentazione modellistica della domanda di trasporto nell'area di studio, considerando sia la domanda passeggeri che merci, per valutare i flussi di traffico che potrebbero essere influenzati da un'interruzione del manufatto. F2 si articola in due attività principali:

- **F2.A1 Modellazione della domanda di passeggeri:** Creare un modello di domanda passeggeri o acquisire matrici O/D esistenti, facendo riferimento a dati disponibili e già strutturati, integrati, se necessario, da rilevazioni mirate su sezioni significative per il caso da esaminare.
- **F2.A2 Modellazione della domanda di merci:** Creare un modello per la domanda di trasporto merci o acquisire matrici O/D esistenti, utilizzando quelle disponibili come riferimento per rappresentare la domanda merci, integrandole, se necessario, con rilevazioni mirate su sezioni significative per il caso da esaminare.

F3: Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

L'obiettivo della Fase F3 è simulare l'interazione tra offerta e domanda per l'area di studio e valutare la resilienza del sistema di trasporto, misurando i principali *Key Performance Indicators* (KPIs) – (e.g., tempo di percorrenza, lunghezza dei percorsi, velocità media) sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni degradate, in seguito a interruzioni. F3 si articola in tre attività principali:

- **F3.A1 Assegnazione della domanda alla rete:** Eseguire l’assegnazione della domanda alla rete stradale per simulare l’operatività della rete sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni di funzionamento degradato, utilizzando il metodo dell’*User Equilibrium*. Questa procedura consente di valutare il comportamento della rete e l’impatto dell’interruzione sulla connettività e sul livello di servizio.
- **F3.A2 Valutazione dei KPIs e della resilienza della rete:** Calcolare i principali KPIs in condizioni operative normali e degradate. Utilizzare due approcci metodologici per la valutazione della resilienza:
 - **Connectivity-based (rete scarica):** Si concentra sulla connettività tra le coppie origine/destinazione, verificando la percorribilità delle varie componenti di traffico reindirizzate a causa dell’interruzione. Non si considerano né la domanda di traffico né le capacità degli archi.
 - **Level of Service-based (rete carica):** Considera la domanda effettiva e la capacità degli archi. Si applica in aggiunta al primo quando l’incremento di traffico sui rami della rete interessata è tale da lasciar prevedere una variazione del livello di servizio e la possibilità di congestione localizzata o estesa.

Questi approcci permettono di valutare la fruibilità della rete e la sua capacità di mantenere un adeguato livello di servizio in condizioni critiche.

- **F3.A3 Analisi dell’impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento:** Valutare le conseguenze socioeconomiche dell’interruzione del manufatto e identificare gli interventi prioritari di manutenzione e gestione per rafforzare la resilienza della rete e ridurre l’impatto sulle comunità.

F4: Raccomandazioni e Disposizioni per l’adeguamento della rete durante l’interruzione

Obiettivi della Fase 4 sono l’elaborazione di Raccomandazioni Operative per l’Ente gestore e per gli Organi di Vigilanza per l’esercizio resiliente della rete durante l’interruzione e l’organica elencazione delle Disposizioni relative alla regolazione del traffico sulla rete, inclusi il progetto della segnaletica e la pubblicizzazione verso l’utenza. La Fase 4 si articola, pertanto, in tre attività principali:

- **F4.A1 Provvedimenti strutturali:** Indicare gli interventi di modifica fisica di intersezioni o punti singolari, atti a consentire importanti guadagni in termini di connettività e/o fluidità. Eseguirne l’Analisi Benefici/Costi sulla base di una sommaria previsione delle tempistiche di esecuzione e delle modalità di affidamento e realizzazione dei lavori.
- **F4.A2 Regolazione della circolazione e progetto della segnaletica:** Stabilire il Piano della circolazione con le eventuali variazioni ai divieti di transito e l’istituzione di sensi unici temporanei. Redigere il Progetto della segnaletica orizzontale e verticale nelle condizioni variate.
- **F4.A3 Pubblicizzazione all’utenza:** Predisporre schemi, mappe e applicazioni interatti-

ve per indicare alle diverse categorie di utenza i migliori percorsi alternativi per servire le coppie origine/destinazione interessate dalle modifiche alla circolazione. Stabilire il programma di pubblicizzazione sugli organi di comunicazione a stampa, a video e telematici.

3

F1: Modellazione dell'Offerta di Trasporto

3.1 F1.A1 Identificazione e delimitazione dell'area di studio

Nella fase preliminare di identificazione e delimitazione dell'area di studio, è necessario circoscrivere la regione geografica interessata dall'interruzione infrastrutturale, come nel caso di un manufatto, per garantire che le fasi successive di modellazione rappresentino accuratamente il contesto e gli impatti potenziali dell'interruzione. Dal punto di vista teorico, l'area di studio rappresenta l'ambito territoriale in cui si ipotizza che si esauriscano la maggior parte degli effetti prodotti dall'interruzione del manufatto. Si distingue fra un'area di piano (quella in cui si interviene direttamente) e un'area più ampia dell'area di piano (quella in cui si esauriscono gli effetti della 'realizzazione' dell'intervento). Dal punto di vista pratico, sebbene in questa fase i dati di traffico dettagliati e i tempi di percorrenza non siano ancora disponibili, è possibile delineare l'area di studio mediante un'analisi basata su fattori strutturali e qualitativi. Di seguito vengono descritti i passaggi chiave:

1. **Valutazione della rete infrastrutturale e della connessione con le aree adiacenti:** Inizialmente, si procede con un'analisi qualitativa della rete, che comporta l'identificazione delle principali strade, snodi e infrastrutture direttamente collegate al manufatto. Questo passaggio fornisce una visione generale del contesto e delle aree che, pur non essendo ancora quantificabili nei volumi di traffico, sono suscettibili di impatti. La valutazione può basarsi su mappe stradali e cartografia, strumenti GIS e informazioni disponibili sui percorsi e sui collegamenti locali e regionali.
2. **Definizione dei criteri per la delimitazione dell'area di studio:** Nonostante l'assenza di dati quantitativi specifici sul traffico, alcuni criteri possono aiutare a delimitare efficacemente l'area di studio:
 - **Topologia della rete stradale e infrastrutturale:** Considerare la configurazione della rete, inclusa la presenza di arterie principali, nodi di raccordo e altre infrastrutture strategiche collegate al manufatto. Questa valutazione aiuta a individuare i segmenti di rete che potrebbero assorbire flussi deviati e, pertanto, devono rientrare nell'area di studio.
 - **Disponibilità e qualità delle alternative di percorso:** Identificare percorsi alternativi principali che potrebbero fungere da deviazioni in caso di interruzione del manufatto. Anche se il volume di traffico su questi percorsi non è ancora noto, l'area

di studio deve includere queste vie per valutare adeguatamente l'impatto dell'interruzione sulla rete complessiva.

- **Accessibilità e collegamenti con aree urbane e rurali limitrofe:** Considerare la connessione tra la zona interessata dall'interruzione e le aree urbane, suburbane e rurali limitrofe, poiché saranno le aree che potenzialmente subiranno ripercussioni in termini di accessibilità e tempi di spostamento.
3. **Determinazione del raggio geografico:** Sulla base dei criteri stabiliti, si definisce un raggio preliminare di estensione per l'area di studio. Questo raggio non deve necessariamente essere uniforme e può variare in base alla densità della rete e alla presenza di vie alternative. Questo approccio garantisce che tutte le tratte significative potenzialmente impattate siano incluse, offrendo un quadro completo delle possibili ripercussioni.
 4. **Revisione e aggiustamento dell'area di studio:** Al termine di questa fase, è importante verificare che l'area selezionata sia adeguatamente rappresentativa, includendo tutte le vie di collegamento e i nodi che potrebbero essere impattati. Si può effettuare una revisione basata su mappe di percorribilità e sulle configurazioni della rete, per garantire che nessuna sezione significativa venga esclusa.

3.2 F1.A2 Zonizzazione dell'area di studio

La zonizzazione dell'area di studio è un passaggio preliminare fondamentale nella costruzione del modello di traffico, poiché definisce le unità territoriali (zone di traffico) dalle quali e verso le quali si muovono i flussi di domanda. L'obiettivo della zonizzazione è semplificare la descrizione del fenomeno modellato, considerando che, nel mondo reale, gli spostamenti all'interno dell'area di interesse possono iniziare e terminare in qualsiasi punto. Questa suddivisione è propedeutica alla successiva definizione delle matrici origine-destinazione (O/D), che verrà affrontata in F2. Infatti, la zonizzazione influenza la generazione (o attrazione) degli spostamenti, la loro distribuzione e l'assegnazione alla rete.

3.2.1 Criteri per la zonizzazione

La zonizzazione dell'area di studio si basa su una serie di criteri che assicurano la coerenza tra le zone di traffico e la struttura della rete di trasporto rappresentata nel grafo. Tra questi:

1. **Differenziazione tra zone interne ed esterne:** È fondamentale distinguere tra zone interne, ovvero quelle comprese all'interno dell'area di piano, e zone esterne, comprese all'interno dell'area di studio, che rappresentano aree limitrofe o più lontane che esercitano influenza sui flussi di traffico verso e dall'area studiata. Le zone interne richiedono una suddivisione più dettagliata, così da rappresentare accuratamente i movimenti interni, mentre le zone esterne possono essere più ampie e aggregate, poiché il loro impatto si concentra principalmente sugli ingressi e sulle uscite dell'area. La zonizzazione non si estende, ovviamente, oltre il confine dell'area di studio, dove le interazioni con l'area di piano sono fisse e costanti.

2. **Granularità e scala della zonizzazione:** La suddivisione spaziale deve essere calibrata per rappresentare con precisione la domanda di traffico, senza frammentare eccessivamente l'area di studio. Nelle aree con elevata densità di traffico, come i centri urbani, è preferibile una suddivisione più dettagliata, mentre nelle zone periferiche o rurali una zonizzazione meno granulare può essere sufficiente.
3. **Configurazione della rete di trasporto:** La zonizzazione deve rispettare la topologia e la configurazione della rete stradale, assicurando che ogni zona di traffico abbia accesso a uno o più nodi reali della rete. Questa connessione diretta facilita l'assegnazione dei flussi nei calcoli successivi, rendendo i movimenti più fedeli alla realtà.
4. **Tipologia dei flussi (passeggeri e merci):** La zonizzazione deve considerare la diversa granularità richiesta dai flussi di traffico passeggeri rispetto a quella richiesta dai flussi di merci. In generale, la mobilità passeggeri richiede una rappresentazione più dettagliata rispetto a quella delle merci, per la quale è possibile adottare accorpamenti, soprattutto in aree meno densamente trafficate o meno rilevanti per la logistica.
5. **Criteri di praticità nella costruzione delle zone:** Poiché la zonizzazione preliminare si basa su criteri speditivi, è importante mantenere un numero ragionevole di zone che rifletta la complessità dell'area senza complicare eccessivamente la struttura del modello.

Questa metodologia consente di adattare la zonizzazione alle caratteristiche del territorio e alle specificità dei flussi di traffico, rendendo la costruzione delle matrici O/D più fedele alla realtà e migliorando la precisione della simulazione.

3.2.2 Utilizzo di zonizzazioni basate su matrici di traffico esistenti

Nel caso in cui il territorio sia già coperto da matrici O/D ufficiali, elaborate da enti regionali o nazionali, è necessario che la zonizzazione dell'area di studio si allinei a tali suddivisioni per garantire compatibilità e coerenza del modello. Considerando, ad esempio, il caso della **Regione Lombardia, la zonizzazione per i flussi passeggeri si basa su zone comunali, con una maggiore articolazione nelle grandi città, ulteriormente suddivise in sezioni urbane.** Questa granularità consente di distinguere le diverse aree di città densamente popolate, garantendo un'analisi dettagliata della domanda in contesti complessi. Per il traffico merci, la Regione Lombardia adotta invece una zonizzazione più ampia con l'accorpamento di alcuni comuni.

3.3 F1.A3 Modellazione della rete stradale

La modellazione della rete stradale si basa sulla teoria dei grafi.

Come noto, un **grafo** è una struttura matematica utilizzata per rappresentare una rete di oggetti connessi tra loro. I componenti principali di un grafo sono i **nodi** e gli **archi**. Nel contesto della rete stradale, i **nodi** rappresentano solitamente le intersezioni, le variazioni di sezione stradale, gli estremi dei tratti stradali, mentre gli **archi** corrispondono ai segmenti di strada che collegano i nodi. I nodi e gli archi sono associati a diverse proprietà, come la tipologia, la velocità a deflusso libero, il limite legale di velocità, la capacità, le per-

dite di tempo e il tipo di sistema di trasporto ammesso, che definiscono le caratteristiche della rete stradale e influiscono sul comportamento del traffico.

La modellazione della rete stradale prevede tre fasi: (i) Estrazione dei dati da OpenStreetMap (OSM), (ii) importazione dei dati nel software di modellazione PTV VISUM, (iii) assegnazione degli attributi ai nodi ed agli archi. Il contenuto di queste tre fasi è brevemente descritto nel seguito.

3.3.1 Estrazione dei dati da OpenStreetMap (OSM)

Il tradizionale approccio di modellazione prevedrebbe la costruzione manuale del grafo della rete stradale, inserendo singolarmente ciascun nodo e arco. Tuttavia, in queste linee guida, per ridurre notevolmente i tempi e i costi necessari alla modellazione, si è deciso di proporre un approccio più speditivo: la costruzione del grafo tramite l'estrazione dei dati da OpenStreetMap (OSM), una piattaforma open source che offre informazioni dettagliate sulla rete viaria globale. Questa scelta consente di ridurre significativamente i tempi di modellazione rispetto al metodo manuale. La metodologia di estrazione dei dati da OSM prevede i passaggi descritti di seguito:

1. **Selezione dell'area di interesse:** L'area di interesse, delimitata in base ai confini geografici stabiliti al punto F1.A1, rappresenta il territorio su cui si concentrerà la modellazione della rete stradale. Questo passaggio è fondamentale per circoscrivere l'estrazione dei dati al solo ambito di studio. L'approccio consente di ottimizzare il processo, riducendo il volume complessivo di dati e migliorando l'efficienza delle fasi successive di elaborazione e analisi.
2. **Estrazione dei dati con Overpass Turbo:** L'estrazione dei dati avviene tramite **Overpass Turbo**, uno strumento che consente di eseguire query avanzate sui dati di OSM. Le query sono strutturate per recuperare specificamente i dati relativi ai tratti stradali, alle intersezioni e ad altri elementi infrastrutturali, limitando i risultati all'area geografica di interesse e agli attributi rilevanti. I dati vengono quindi estratti nel formato "**osm**", che include dettagli relativi a nodi e archi della rete viaria. Per eseguire correttamente l'estrazione, si utilizza il linguaggio di query *Overpass QL*. Un esempio di sintassi per estrarre tutte le strade all'interno di un'area delimitata è rappresentato nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 Algoritmo in linguaggio Overpass QL per l'esecuzione di una query sul database di Overpass Turbo.

```
/*Query Overpass QL utilizzando un bounding box per recuperare tutte le strade (ways) nell'area del bounding box.*/
```

```
way(45.8095,8.6021,45.8755,8.7473)["highway"];
```

```
/*added by auto repair*/
```

```
(._>);
```

```
/*end of auto repair*/
```

```
out body;
```

La query di estrazione dei dati è progettata per utilizzare una delimitazione geografica, nota come *bounding box*, definita da quattro coordinate geografiche che identificano i vertici di un riquadro. Queste coordinate devono essere inserite in ordine orario seguendo una sequenza precisa: vertice basso (latitudine minima), vertice sinistro (longitudine minima), vertice alto (latitudine massima) e vertice destro (longitudine massima). L'uso di questa delimitazione assicura che l'estrazione dei dati sia limitata esclusivamente all'area di interesse definita, consentendo una selezione precisa delle informazioni rilevanti e una riduzione del volume complessivo dei dati.

Per estrarre i tratti stradali, la query utilizza il comando *way*, che seleziona tutti gli elementi di tipo "*highway*" nell'area specificata. In questo contesto, il termine ["*highway*"] non si riferisce soltanto alle autostrade o alle strade principali, ma indica l'intero insieme delle infrastrutture stradali. Tale comando permette quindi di omettere tutte le altre informazioni presenti nel database OSM, come la rete ferroviaria, i canali, le linee di trasporto pubblico, le aree verdi, e molti altri elementi che non appartengono alla rete viaria. Infatti, il comando ["*highway*"] include ogni tipologia di strada e percorso, e copre tutte le categorie viarie rilevanti per la viabilità, come *motorway* (autostrade), *trunk* (strade principali a lunga percorrenza), *primary*, *secondary* e *tertiary* (strade a importanza decrescente), *residential* (strade residenziali), *service* (strade di servizio), *footway* (percorsi pedonali) e *cycleway* (piste ciclabili).

La query prevede anche la selezione dei nodi e degli archi associati alle strade individuate. Con il comando "(._>);", la selezione si estende ai nodi di inizio, fine e intersezione di ciascun tratto stradale, garantendo che tutti gli elementi necessari per una rappresentazione completa della rete viaria siano inclusi. Questo approccio risulta essenziale per ottenere una modellazione dettagliata, in cui siano presenti i punti di collegamento tra i vari tratti stradali.

L'output finale della query viene ottenuto tramite il comando "*out body*", che esporta i dati in una struttura ottimizzata. Questo formato di esportazione offre una visualizzazione chiara della rete, includendo tutti i nodi e le connessioni (archi) necessari per rappresentare con precisione la viabilità dell'area.

3.3.2 Importazione dei dati in PTV VISUM

Una volta estratti e filtrati, i dati da OSM vengono caricati in **PTV VISUM** (o altro software per la simulazione dei sistemi di trasporto, quale Caliper Transcad o altri), un software avanzato per l'analisi e la simulazione della rete stradale, seguendo questi passaggi:

1. **Importazione in PTV VISUM:** I dati estratti da OpenStreetMap (OSM), salvati nel formato "osm", vengono importati in VISUM tramite una funzionalità integrata nel software, che consente di convertire i dati grezzi in un grafo della rete stradale direttamente all'interno dell'ambiente di modellazione. Questa funzionalità di importazione è progettata per leggere i dati OSM e mappare automaticamente i nodi e gli archi della rete stradale, creando un modello digitale che rappresenta la topologia della rete viaria.

Il processo di importazione identifica e associa ogni tratto stradale (arco) e ogni punto di intersezione e/o cambio di sezione stradale (nodo) a partire dai dati di OSM, in modo che la struttura della rete stradale venga ricreata in VISUM in modo dettagliato. Questo consente di ottenere una rappresentazione accurata della rete, che include tutte le strade, le intersezioni e le connessioni rilevanti, senza la necessità di costruire manualmente il modello da zero. In questo modo, la funzionalità di importazione di VISUM permette di risparmiare tempo e risorse, garantendo una base per tutte le successive simulazioni e ottimizzazioni del traffico.

2. **Verifica dei dati:** Dopo aver completato l'importazione dei dati da OSM in VISUM, è essenziale eseguire una verifica approfondita per garantire l'accuratezza e la completezza del modello. Questo controllo permette di identificare e correggere eventuali incongruenze o errori nei dati. La verifica dei dati si concentra su diversi aspetti fondamentali per assicurare che la rete stradale sia correttamente rappresentata all'interno del sistema di modellazione. **In primo luogo, è necessario controllare che tutti i nodi siano correttamente associati ai rispettivi archi, senza errori di connettività che potrebbero influire sul funzionamento della simulazione del traffico. È importante anche verificare che ogni strada sia correttamente classificata e che i dati relativi alla tipologia di strada (e.g., autostrada, strade principale, strada residenziale) siano correttamente attribuiti, per evitare errori nelle successive analisi.** Inoltre, devono essere controllati i parametri relativi alla geometria della rete, come la lunghezza e la geometria dei tratti stradali, per garantire che siano rappresentati con la dovuta correttezza. Il controllo deve includere anche una revisione delle intersezioni e dei punti di connessione tra i vari tratti stradali, per evitare la creazione di "nodi isolati" o strade che non si connettono correttamente (i.e., generando archi *appesi*), che potrebbero compromettere la validità dei risultati delle simulazioni. Eventuali errori di topologia, come la presenza di connessioni non valide, devono essere identificati e corretti prima di procedere con l'analisi. Infine, oltre alla verifica della struttura della rete, è fondamentale confrontare i dati importati con altre fonti di riferimento per assicurarsi che la rappresentazione della rete stradale sia il più fedele possibile alla realtà. Questo può includere la consultazione di mappe ufficiali o altre fonti geospaziali.

3.3.3 Assegnazione degli attributi ai nodi ed agli archi

Dopo l'importazione dei dati da OSM a VISUM, vengono assegnati degli attributi sia ai nodi che agli archi, che sono essenziali per la modellazione della rete stradale e per le analisi successive. Questi attributi riflettono vari aspetti della rete viaria, come il tipo di strada, le caratteristiche del traffico ammesso e la geometria della rete.

Gli **attributi dei nodi**, importati da OSM, riguardano principalmente gli aspetti funzionali e geografici di ogni punto di intersezione o di origine/arrivo di un arco stradale. I principali attributi dei nodi sono elencati e descritti nella seguente Tabella 3.2:

Tabella 3.2 Principali attributi dei nodi che si considerano nella modellazione della rete stradale.

Attributo	Descrizione
Identificazione	Rappresenta il codice univoco che consente l'identificazione del nodo all'interno del modello di rete. Si tratta di un codice identificativo numerico che consente di distinguere ogni nodo dagli altri, L'attributo è essenziale per gestire la rete in modo efficiente, specialmente quando si desidera manipolare, aggiornare o analizzare singole porzioni della rete.
Localizzazione	Rappresenta le coordinate geografiche associate a ciascun nodo nel sistema di riferimento scelto (es. WGS84). Queste coordinate determinano la posizione precisa di ogni nodo, essenziale per la costruzione e l'analisi della rete.
Tipo di controllo intersezione	Rappresenta il tipo di regolazione del traffico applicata al nodo, specificando se l'intersezione è semaforizzata o non semaforizzata. Questo attributo è fondamentale per modellare la gestione dei flussi di traffico in prossimità delle intersezioni.
Manovre di svolta	Rappresenta le manovre di svolta consentite in corrispondenza del nodo di intersezione. Questo attributo indica quali svolte sono possibili differenziando per i diversi sistemi di trasporto e contribuisce alla definizione dei percorsi e dei flussi di traffico nella rete.
Impedenza	Rappresenta il valore associato al tempo perso (o ritardo) in corrispondenza di specifici nodi, dovuto a fattori come semafori o configurazioni complesse. Questo parametro è importante per simulare i ritardi nei flussi di traffico al nodo.

Gli **attributi degli archi**, anch'essi importati da OSM, riguardano principalmente la loro funzione all'interno della rete e il comportamento del traffico. I principali attributi degli archi sono elencati e descritti nella Tabella 3.3.

Tabella 3.3 Principali attributi degli archi che si considerano nella modellazione della rete stradale.

Attributo	Descrizione
Id arco	Rappresenta il codice univoco che consente l'identificazione dell'arco all'interno del modello di rete. Si tratta di un codice identificativo numerico che consente di distinguere ogni arco dagli altri, anche quando condividono caratteristiche simili come tipo di strada, lunghezza o velocità. L'attributo è essenziale per gestire la rete in modo efficiente, specialmente quando si desidera manipolare, aggiornare o analizzare singoli tratti della rete.
Nodo iniziale	Rappresenta il punto di partenza di un arco nella rete. Ogni arco è collegato a un nodo iniziale, che definisce l'inizio del tratto stradale. Ogni nodo è identificato da un codice univoco che consente di differenziare i punti di partenza all'interno della rete.
Nodo finale	Rappresenta il punto di arrivo di un arco nella rete. Ogni arco è collegato a un nodo finale, che definisce la fine del tratto stradale. Anche il nodo finale è identificato da un codice univoco che permette di tracciare e differenziare i punti di arrivo nella rete.

Attributo	Descrizione
Distanza	Rappresenta la lunghezza dell'arco espressa come valore numerico in chilometri. Specificatamente, questo attributo rappresenta la distanza euclidea tra il nodo iniziale e il nodo finale dell'arco, e serve come base per la simulazione del traffico e per calcolare il tempo di percorrenza. Il valore è ricavato automaticamente dai dati OSM, ma può essere verificato e corretto manualmente per garantire la coerenza con la realtà. La lunghezza influisce direttamente sul calcolo delle distanze tra i nodi della rete.
Tipologia	L'attributo tipologia definisce la funzione e le caratteristiche dell'arco stradale, determinando la classe funzionale dell'infrastruttura viaria. In OSM, le strade vengono classificate in diverse categorie, tra cui: Autostrade (motorways): strade a lunga percorrenza, ad alta capacità e con punti di accesso limitati. Strade principali (primary roads): strade che collegano città e aree metropolitane. Strade secondarie (secondary roads): strade che servono zone urbane e suburbane. Strade locali (tertiary roads): strade che collegano aree residenziali e rurali. Strade di accesso (residential roads): strade in aree residenziali, con accesso limitato e bassa capacità. OSM fornisce queste informazioni per ciascun tratto stradale, e tali categorie influenzano direttamente la velocità, la capacità e la tipologia di traffico su ciascun arco. Questa classificazione è essenziale per modellare il comportamento del traffico, poiché diverse tipologie di strada hanno impatti diversi sulla capacità e sul flusso del traffico.
Numero di corsie	Il numero di corsie per senso di marcia è un valore intero che rappresenta il numero di corsie disponibili su ciascun tratto stradale, per ogni direzione. Questo valore incide direttamente sulla capacità della strada, poiché un numero maggiore di corsie per senso di marcia aumenta la capacità della strada, consentendo a un numero maggiore di veicoli di circolare contemporaneamente. Il numero di corsie per ogni arco viene ricavato dai dati OSM, ma può essere verificato e corretto manualmente per garantire la coerenza con la realtà.
Velocità a flusso libero	La velocità a flusso libero (VFL) è la velocità massima che un veicolo può raggiungere su un tratto stradale in assenza di congestione, ovvero quando il traffico non è influenzato da nessuna forma di rallentamento. Questa velocità è determinata in base alla tipologia della strada, come ad esempio autostrade, strade principali o locali, e viene estratta direttamente da OSM. I valori di VFL possono variare per strade a doppio senso di marcia, poiché la velocità potrebbe essere diversa nei due sensi di percorrenza.
Limite legale di velocità	Il limite legale di velocità è il valore che indica la velocità massima consentita per i veicoli su un determinato arco stradale. Questo valore è estratto dai dati OSM e, come la VDL, può variare in base alla tipologia della strada e alle normative locali. È fondamentale per la simulazione del traffico, in quanto influenza il comportamento dei veicoli, le velocità medie e i flussi di traffico. La corretta definizione del limite legale è essenziale per una modellazione accurata delle condizioni di traffico.

Attributo	Descrizione
Capacità	La capacità oraria rappresenta il numero massimo di veicoli che può transitare in un'ora su un dato arco stradale senza congestioni o interferenze in tratti successivi della rete. Questo attributo è derivato dalla tipologia dell'infrastruttura stradale, dal numero di corsie e dalle caratteristiche del traffico. La capacità è un parametro cruciale per le simulazioni di traffico, poiché influisce direttamente sulle previsioni di congestionamento e sui tempi di percorrenza.
Sistemi di trasporto ammessi	Questo attributo definisce i tipi di veicoli ammessi su ciascun arco stradale. Ai fini della modellazione del traffico, si considera che gli archi possano essere percorsi esclusivamente da auto e veicoli pesanti. La presenza di veicoli pesanti è particolarmente rilevante per la simulazione, poiché questi veicoli influenzano la capacità e la velocità del traffico in modo diverso rispetto alle auto leggere, riducendo la capacità della strada e la velocità media di percorrenza. Il sistema di trasporto ammesso è estratto dai dati di OSM, che specificano la tipologia di veicoli autorizzati su ciascun tratto della rete stradale. Inoltre, il tipo di trasporto ammesso tiene conto della direzione di percorrenza dell'arco, che viene determinata dai nodi di origine e destinazione. Se l'arco è unidirezionale, il traffico è consentito solo in una direzione, mentre per gli archi bidirezionali il traffico è permesso in entrambe le direzioni. Questa distinzione è fondamentale per la simulazione, poiché influisce sul calcolo dei flussi di traffico, sulla capacità della strada e sul comportamento del traffico. La corretta definizione della direzione di percorrenza è essenziale per garantire una simulazione accurata dei flussi di traffico.

Gli attributi importati da OSM sono successivamente verificati e, se necessario, corretti manualmente in VISUM per garantire la coerenza con la realtà e l'accuratezza del modello di rete. La verifica manuale consente di risolvere eventuali incongruenze o errori nei dati, come la presenza di velocità o limiti non correttamente assegnati agli archi.

4

F2: Modellazione della Domanda di Trasporto

4.1 F2.A1 Modellazione della domanda di passeggeri (autovetture)

La modellazione della domanda passeggeri è un processo essenziale per la pianificazione dei trasporti, finalizzato a rappresentare gli spostamenti all'interno di un determinato territorio. Questa attività supporta le decisioni relative alla gestione e allo sviluppo delle infrastrutture di trasporto, fornendo una visione quantitativa della domanda di mobilità e delle modalità di trasporto utilizzate.

Nel contesto della valutazione della resilienza delle reti di trasporto stradale, la modellazione della domanda riveste un ruolo fondamentale nel fornire informazioni sui flussi di traffico e sugli effetti di eventuali interruzioni o danneggiamenti alle infrastrutture, come i manufatti. La comprensione dei modelli di spostamento è infatti cruciale per prevedere l'impatto di eventi che possano compromettere la funzionalità della rete, supportando così una gestione efficiente e tempestiva delle emergenze e delle attività di manutenzione.

Come noto, un modello di domanda nel settore dei trasporti è uno strumento matematico che descrive il comportamento dei passeggeri nel territorio, tenendo conto di fattori quali la distribuzione della popolazione, le caratteristiche socioeconomiche, le infrastrutture di trasporto disponibili e i pattern di mobilità. Questi modelli possono prevedere i flussi di passeggeri tra diverse zone in funzione di variabili quali la distanza, il costo e le preferenze individuali per il tipo di trasporto.

In letteratura esistono diversi approcci per la costruzione dei modelli di domanda, tra i quali il ben noto **Modello a quattro stadi**, che si compone di quattro fasi principali: generazione della domanda, distribuzione della domanda, scelta modale ed assegnazione del traffico sulla rete.

Indipendentemente dal tipo di modello scelto, la **matrice Origine/Destinazione (O/D)** è uno strumento fondamentale per la descrizione della domanda, poiché rappresenta i flussi di traffico tra diverse zone del territorio. Le righe della matrice rappresentano le zone di origine; le colonne quelle di destinazione. Ogni cella della matrice indica il numero di spostamenti (o viaggi) effettuati tra due zone specifiche. La matrice può essere specificata per modalità di trasporto (es., auto, mezzi pesanti), fascia oraria (es. ora di punta e ora di morbida) e motivo dello spostamento (es., spostamento per lavoro, studio, tempo libero). La matrice consente di analizzare la domanda di trasporto in un territorio e fornisce informazioni dettagliate su come i passeggeri si muovono da un punto all'altro del territorio stesso.

Qualora siano disponibili **matrici O/D ufficiali** (fornite da enti nazionali, regionali o locali), queste possono essere efficacemente utilizzate per rappresentare la domanda di passeggeri, risparmiando tempo e risorse altrimenti richieste per la calibrazione di un modello di domanda. Le matrici O/D esistenti sono spesso il risultato di studi complessi sulla mobilità e offrono dati già strutturati, che consentono di ottenere una panoramica della domanda di trasporto senza dover raccogliere nuovi dati.

Un esempio di **matrice O/D ufficiale** è quello fornito dalla Regione Lombardia, stimato utilizzando i dati delle indagini sulla mobilità passeggeri condotte nel 2016, proiettati al 2020¹ in base alla crescita prevista della mobilità nella regione (Regione Lombardia, 2024). La matrice O/D si riferisce a un giorno feriale medio (nel periodo febbraio/maggio) e include 1525 zone, di cui 1450 interne alla Lombardia.

Le zone interne alla Regione sono definite principalmente a livello di comune, ma, nei comuni più piccoli o periferici, le zone sono aggregate in unità geografiche più ampie. Al contrario, i comuni più grandi (come le città) sono suddivisi in più zone, per ottenere una rappresentazione più dettagliata dei flussi di mobilità all'interno di aree urbane densamente popolate. Per le zone esterne alla Lombardia, le aree di riferimento sono le province delle regioni confinanti, le altre regioni italiane o, in alcuni casi, gli stati esteri.

La matrice O/D della Regione Lombardia fornisce informazioni dettagliate sui flussi di passeggeri tra le diverse zone geografiche, suddivisi per 24 fasce orarie, 5 motivi degli spostamenti (i.e., lavoro, studio, tempo libero, affari, e rientri a casa) e 8 modalità di trasporto (i.e., auto come conducente, auto come passeggero, trasporto pubblico su gomma, trasporto pubblico su ferro, moto, bicicletta, pedone e altri mezzi). Rispetto ad altre fonti ufficiali, come il censimento ISTAT, la matrice O/D della Regione Lombardia è più completa, poiché include tutte le principali modalità di viaggio e i principali motivi di spostamento, offrendo una rappresentazione dettagliata e accurata delle dinamiche di mobilità.

Inoltre, i recenti sviluppi tecnologici hanno introdotto **metodi innovativi** per la costruzione di matrici O/D, come l'analisi dei dati provenienti da **sistemi di navigazione mobili basati su GPS**, e.g., TomTom MOVE (TomTom, 2024). Questi strumenti rappresentano un'importante evoluzione, poiché consentono di analizzare la domanda di trasporto in modo rapido e con un'elevata flessibilità sia temporale, permettendo di selezionare periodi specifici di interesse (ad esempio, ore di punta, giorni feriali o festivi), sia spaziale, adattandosi a diverse scale geografiche.

Il principale vantaggio di questi sistemi risiede nella loro capacità di fornire informazioni aggiornate e dettagliate sulla mobilità, eliminando la necessità di costosi e lunghi rilievi diretti. Tuttavia, il loro utilizzo presenta alcune limitazioni. Il tasso di penetrazione ridotto, ossia la proporzione di utenti che utilizzano dispositivi compatibili con il sistema di raccolta dei dati, può influire sulla rappresentatività del campione. Pertanto, per ottenere stime affidabili dell'intero universo di mobilità, è spesso necessario ricorrere a metodi di espansione statistica.

1 La proiezione non tiene conto della situazione pandemica verificatasi nel 2020; pertanto, sebbene la proiezione sia riferita al 2020, di fatto è come utilizzare i dati in assenza di pandemia.

In aggiunta alle matrici O/D, la modellazione della domanda può essere ulteriormente arricchita mediante l'integrazione di **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di **sezioni significative** individuate lungo alcuni segmenti chiave del grafo stradale. Questi flussi di traffico possono derivare da diverse fonti, tra cui rilievi manuali condotti sul campo, oppure conteggi automatici registrati da stazioni di monitoraggio permanenti o temporanee (e.g., spire induttive, radar, o sensori LIDAR).

La disponibilità di dati sul flusso di traffico osservato consente di **calibrare il modello** con maggiore precisione, confrontando i valori simulati con quelli osservati e regolando i parametri del modello per minimizzare gli scarti. Tale processo di calibrazione è essenziale per garantire che il modello sia il più possibile aderente alla realtà, migliorandone l'affidabilità e l'accuratezza nella previsione del comportamento della rete stradale in diverse condizioni operative o scenari ipotetici, come quelli di chiusura di un'infrastruttura chiave. Inoltre, questi dati possono essere utilizzati per validare il modello, rafforzando la fiducia nei risultati.

4.2 F2.A2 Modellazione della domanda di merci (veicoli pesanti)

Similmente alla domanda passeggeri, la modellazione di quella delle merci è un aspetto cruciale per la pianificazione dei trasporti, poiché consente di rappresentare i flussi di merci all'interno di un territorio e di analizzare le necessità di infrastrutture adeguate. Questo processo è fondamentale per valutare l'impatto delle attività commerciali sul sistema di trasporto, prevedendo i volumi di carico e i flussi tra le diverse zone. La domanda di trasporto merci può variare in base a diversi fattori, come la tipologia di merce, le esigenze dei vari settori produttivi, la rete infrastrutturale disponibile e i canali di distribuzione. La modellazione della domanda merci si concentra principalmente su veicoli commerciali, pesanti e specializzati, che operano principalmente su strada, ma può includere anche i movimenti intermodali che combinano diverse modalità di trasporto.

Come nel caso della domanda passeggeri, anche per la domanda merci è possibile utilizzare **matrici O/D ufficiali** già disponibili. Queste matrici, fornite da enti regionali o nazionali, offrono una panoramica dettagliata dei flussi di merci, permettendo di risparmiare tempo e risorse nella fase di raccolta e analisi dei dati. Tali matrici vengono frequentemente aggiornate per riflettere le modifiche nei flussi di merci e nei comportamenti di trasporto. L'utilizzo di matrici O/D ufficiali consente anche di beneficiare di dati provenienti da studi settoriali, interviste a stakeholder, indagini sul traffico e altre fonti affidabili.

Un esempio di **matrice O/D** per il trasporto merci è quella fornita dalla **Regione Lombardia** per l'anno 2020² (Regione Lombardia, 2024). La matrice è stata sviluppata attraverso un approccio modellistico che ha tenuto conto delle fonti dati disponibili, degli studi di settore e delle indagini/interviste con i principali stakeholder del mondo del trasporto commerciale e delle merci su strada. Questo modello considera diversi tipi di veicoli com-

² La proiezione non tiene conto della situazione pandemica verificatasi nel 2020; pertanto, sebbene la proiezione sia riferita al 2020, di fatto è come utilizzare i dati in assenza di pandemia.

merciali, suddivisi in base alla loro massa massima, come stabilito dall'art. 47 del Codice della Strada (D.Lgs. n. 285/1992 e s.m.):

- **N1:** veicoli destinati al trasporto di merci, con una massa massima non superiore a 3,5 tonnellate.
- **N2:** veicoli destinati al trasporto di merci, con una massa massima superiore a 3,5 tonnellate ma non superiore a 12 tonnellate.
- **N3:** veicoli destinati al trasporto di merci, con una massa massima superiore a 12 tonnellate.

La matrice O/D 2020 per i veicoli commerciali e pesanti considera diverse componenti di traffico, tra cui i flussi interni alla Lombardia, gli scambi tra zone e gli attraversamenti da e verso altre regioni o stati. La matrice comprende 437 zone interne alla Lombardia, risultato di accorpamenti di comuni e, nei casi di comuni più grandi, della suddivisione in zone più piccole. Per le zone esterne, sono considerate 69 zone, che rappresentano le province confinanti, altre regioni italiane, i territori elvetici e altri stati esteri. Inoltre, sono inclusi 20 cancelli intermodali, che comprendono terminal intermodali strada-ferrovia, aeroporti cargo, porti marittimi e idroviari.

Complessivamente, la matrice O/D 2020 per il trasporto merci della Regione Lombardia si riferisce a un totale di 526 zone, coprendo ampiamente l'intero territorio regionale e le aree di scambio interregionale ed internazionale. Questo permette una visione chiara e dettagliata dei flussi di merci, facilitando la pianificazione delle infrastrutture e l'ottimizzazione delle risorse per la gestione dei trasporti.

Analogamente a quanto già introdotto per la domanda di passeggeri, in aggiunta alle matrici O/D, la modellazione della domanda di merci può essere ulteriormente arricchita tramite l'integrazione di **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di sezioni significative individuate lungo alcuni segmenti chiave del grafo stradale.

5

F3: Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

5.1 F3.A1 Assegnazione della domanda alla rete

L'assegnazione della domanda alla rete stradale è un passo fondamentale nella simulazione delle condizioni operative di una rete di trasporto, utile per analizzare sia le condizioni normali sia quelle degradate. Tale assegnazione fornisce un quadro completo dell'impatto della congestione, delle interruzioni o dei cambiamenti nelle infrastrutture, come la chiusura di un manufatto stradale, sul livello di servizio di una rete.

In un modello di assegnazione, una volta noti i flussi di domanda tra le origini e le destinazioni, è necessario modellizzare le scelte di percorso degli utenti per effettuare i propri spostamenti sulla rete. La **probabilità di scelta di un percorso** da parte dell'utente, tra quelli alternativi per lui disponibili sulla coppia origine/destinazione, dipende principalmente dai **costi generalizzati di viaggio**, che può integrare diverse componenti economiche, tra le quali, ad esempio:

1. Il valore economico del tempo impiegato per gli spostamenti.
2. Il costo del consumo di carburante.
3. Il costo di consumo degli pneumatici.
4. Il valore della carenza di comfort durante il viaggio.
5. I costi relativi ai pedaggi e alle tariffe.

La scelta del percorso può essere di tipo **deterministico o probabilistico** e la rete può essere congestionata o no.

5.1.1 Assegnazione su reti congestionate

Il fenomeno della congestione è la dipendenza dei tempi di percorrenza degli archi della rete dal flusso di veicoli che li attraversa. Una rete non congestionata è invece quella in cui nessun arco è interessato dal fenomeno della congestione e, quindi, uno qualsiasi di essi ha un tempo di percorrenza costante qualunque sia il livello di flusso che lo interessa. Il fenomeno della congestione è, dunque, un concetto diverso da quello di livello di saturazione, che rappresenta il valore del rapporto tra il flusso del ramo e la sua capacità (cioè il flusso massimo transitabile). In altri termini, un ramo può essere congestionato (cioè caratterizzato da congestione) e al tempo stesso presentare un grado di saturazione molto basso. Le reti stradali sono sempre congestionate e, in tal senso, non è possibile adottare approcci

di assegnazione a rete non congestionata. È anche il caso di considerare che, in presenza di chiusure totali o parziali di archi della rete, i flussi di traffico tendono ineluttabilmente a concentrarsi sui percorsi e sui rami residui e, di conseguenza, a innalzare il grado di saturazione di alcuni di essi. In considerazione della forma che assumono le funzioni di congestione dei rami, come sarà evidente in seguito, l'aspettativa di un incremento della saturazione dei rami, a maggior ragione, obbliga a considerare necessario ricorrere a modelli di assegnazione congestionati. Le funzioni di congestione dei rami della rete rappresentano matematicamente il fenomeno di dipendenza dei costi (generalizzati) di percorrenza dai flussi. Detto f_a il flusso di un qualsiasi ramo a della rete, e c_a il suo costo generalizzato di percorrenza, vale la relazione matematica che esprime il fenomeno di congestione, per il quale:

$$c_a = c(f_a)$$

Il tipico andamento di una funzione di congestione è illustrato nella Figura 5.1.

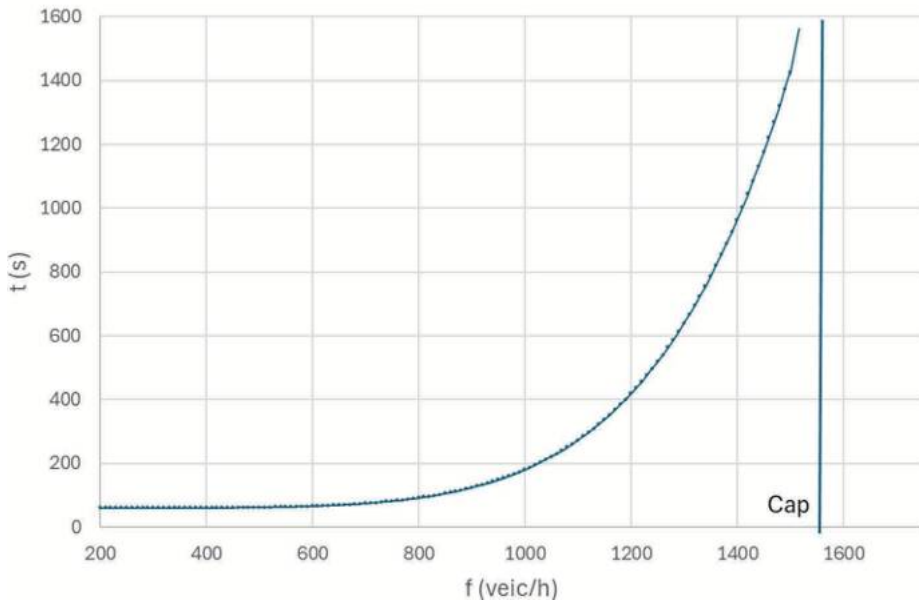


Figura 5.1 Rappresentazione grafica della funzione di congestione.

Un caso più generale è quello di funzione di congestione, per la quale il costo generalizzato di un arco non dipende solo dal flusso sul ramo stesso, ma anche da quello su altri rami della rete (la matrice jacobiana dei costi generalizzati di arco non è diagonale). Un tipico esempio di tale caso è quando, a un'intersezione non semaforizzata al termine di un arco, si considera che il tempo di attesa per impegnare e superare l'incrocio non dipende solo dall'accesso considerato, ma anche dalle correnti di tutti gli altri accessi dell'intersezione, a cui occorre dare precedenza. In ogni caso, esprimendo il costo generalizzato di tutti gli

archi della rete con un vettore (vettore dei costi, con un numero di componenti pari al numero di archi della rete) e i flussi degli archi di rete con un altro vettore, anch'esso con componenti pari al numero di archi della rete, vale la relazione che segue, che esprime il modello di congestione per l'intera rete:

$$c = c(f)$$

Il costo dei rami determina il costo dei percorsi su rete e, in condizioni di funzionamento stazionario del sistema di trasporto, è possibile adottare un approccio additivo, per cui il costo (generalizzato) di percorso è pari alla somma dei costi (generalizzati) degli archi che lo compongono, con al massimo un'ulteriore componente costante (non congestionata) propria del percorso. Adottando direttamente una notazione vettoriale, è possibile scrivere:

$$\forall i=(o,d) \quad w_i = \Delta_i^T c + w_{0,i} \quad \text{con } c = c(f)$$

dove:

- w_i è il vettore dei costi generalizzati di percorso, con tante componenti quanti sono i percorsi di rete sulla i -esima coppia origine/destinazione considerata
- $w_{0,i}$ è il vettore dei costi generalizzati propri di percorso (parte non additiva), con tante componenti quanti sono i percorsi di rete sulla i -esima coppia origine/destinazione considerata
- Δ_i la matrice di incidenza archi-percorsi relativa ai percorsi della i -esima coppia o/d , con numero di righe pari al numero di archi della rete e numero di colonne pari al numero di percorsi disponibili sulla i -esima coppia o/d ; esprime valori unitari o nulli a seconda se un arco (riga) compone o meno un percorso (colonna)

5.1.2 Assegnazione di equilibrio

Le scelte di viaggio degli utenti di un sistema di trasporto sono tali che la probabilità di scegliere un percorso tra quelli disponibili per una coppia generica origine/destinazione dipende dai costi generalizzati dei percorsi stessi. Percorsi con costi generalizzati inferiori tendono a essere preferiti rispetto a quelli con costi più elevati. Il meccanismo formale di scelta è generalmente descritto con gli strumenti della teoria delle scelte discrete, in cui l'utilità sistematica delle alternative di scelta (i percorsi) è espressa come l'opposto dei costi generalizzati. In termini formali, avendo introdotto con p_i il vettore di probabilità di scelta dei percorsi della generica coppia o/d :

$$\forall i = (o,d) \quad p_i = p(-w_i) = p(-\Delta_i^T c - w_{0,i}) \quad \text{con } c = c(f)$$

Il vettore dei flussi di percorso, cioè dei viaggiatori che nell'unità di tempo scelgono i percorsi disponibili per la i -esima coppia o/d , è calcolabile con la relazione matematica che coinvolge le probabilità di scelta e le stime di domanda di trasporto:

$$\forall i = (o,d) \quad h_i = d_i p_i = d_i p(-\Delta_i^T c - w_{0,i}) \quad \text{con } c = c(f)$$

dove:

- h_i è il vettore dei flussi di percorso, con tante componenti quanti sono i percorsi di rete sulla i -esima coppia origine/destinazione
- d_i è il valore di domanda di trasporto sulla i -esima coppia o/d; si noti che la domanda è stata considerata costante rispetto ai costi su rete e che, quindi, è stata adottata, per motivi di semplicità applicativa, in questa trattazione l'ipotesi di *domanda rigida*.

La conoscenza dei flussi di percorso consente, mediante l'applicazione di un modello di propagazione del flusso, di calcolare i flussi sugli archi della rete, che sono, ovviamente, il contributo dei diversi flussi di percorso ai rami che li compongono. In ipotesi di stazionarietà del sistema di trasporto, il modello di propagazione del flusso si può scrivere come:

$$f = \sum_i \Delta_i h_i = \sum_i d_i \Delta_i p(-\Delta_i^T c - w_{0,i}) \quad \text{con } c = c(f)$$

Si noti che il vettore dei costi di ramo che compare nella prima delle equazioni precedenti è lo stesso che compare nella seconda equazione, e che lo stesso vale per il vettore dei flussi di arco. Tale condizione esprime matematicamente il concetto di equilibrio della rete e corrisponde al fenomeno per cui le scelte di percorso su rete dipendono dai costi di percorso e quindi dai costi degli archi che li compongono, ma tali scelte determinano la distribuzione dei flussi e quindi, in ultimo, attraverso il meccanismo della congestione, influenzano i costi stessi che utilizzano per la scelta, in un meccanismo che deve trovare un suo equilibrio. Per evidenziare tale condizione, si contraddistinguono i vettori con un asterisco. Il risultato dell'assegnazione è quello di trovare la coppia (c, f) che rende coerenti le due equazioni che esprimono il problema di equilibrio:

$$f^* = \sum_i \Delta_i h_i = \sum_i d_i \Delta_i p(-\Delta_i^T c^* - w_{0,i}) \quad \text{con } c^* = c(f^*)$$

Il problema dell'equilibrio può anche essere rappresentato come mostrato nella Figura 5.2.

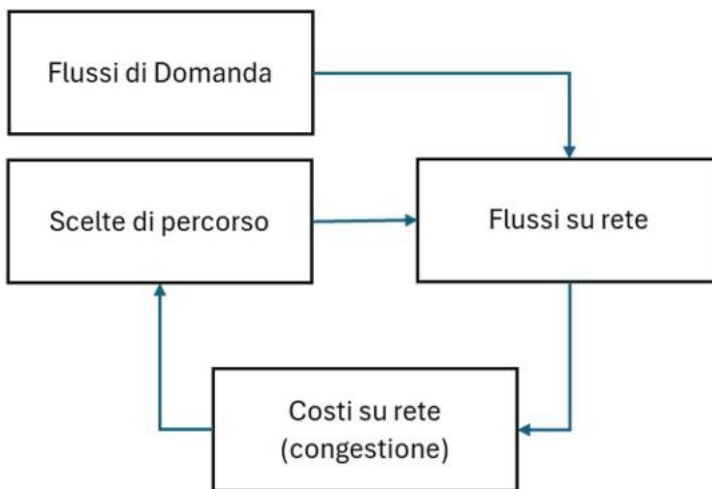


Figura 5.2 Relazione circolare tra la scelta del percorso, i flussi e i costi (ipotesi di domanda rigida).

Un caso importante è quello in cui il modello di assegnazione sia basato su modelli di rete e su dati di domanda che prevedono esplicitamente la presenza nel sistema di diverse categorie di utenti o di diverse categorie di veicoli, di cui s'intende tenere esplicitamente traccia durante l'assegnazione, ad esempio perché non sono in condizione di utilizzare gli stessi elementi della rete e/o hanno penalità di viaggio aggiuntive nella percorrenza di alcuni archi. Tali condizioni si realizzano tipicamente per i mezzi pesanti utilizzati per il trasporto della domanda merci. Il modello di assegnazione e il problema dell'equilibrio si complicano leggermente dal punto di vista della rappresentazione analitica, nel cui dettaglio matematico si ritiene opportuno non entrare. Basti fissare alcune regole che assicurano, tra l'altro, che la soluzione del problema dell'equilibrio esista e sia unica:

- diverse categorie di utenti o di veicoli sono rappresentate con diverse matrici di domanda
- le matrici di incidenza archi-percorso sono specializzate per categoria di utenza/veicolo, nel senso che i percorsi a disposizione di ognuna delle categorie potrebbero essere diversi;
- i flussi di ramo sono specializzati per categoria (di utenti/veicoli), nel senso che è possibile contabilizzare separatamente il flusso di ognuna delle categorie su ogni ramo, ma occorre definire anche un flusso complessivo che è la somma pesata dei flussi delle singole categorie, con i pesi che sono in genere i coefficienti di equivalenza in termini di auto di ognuna delle categorie considerate;
- i costi dei rami sono differenziati per categoria di utenti/veicoli, con una parte non dipendente dal fenomeno della congestione che può essere differente per ogni categoria di veicoli/utenti e una parte congestionata uguale per tutte, ma differentemente “pesata” da ognuna, e che dipende dal flusso complessivo di tutte le categorie.

Risoluzione dell'assegnazione

L'assegnazione di equilibrio a rete congestionata (a domanda rigida) può realizzarsi in ipotesi di approccio probabilistico o deterministico al modello di scelta del percorso, determinando così, in modo diverso, le probabilità (o percentuali) di scelta dei percorsi ($p_i = p(-w_i)$). Le assegnazioni deterministiche e probabilistiche possono essere affrontate ricorrendo alle due corrispondenti versioni del principio di Wardrop, inizialmente concepito per il caso deterministico.

Nello stato di equilibrio deterministico, il traffico in una rete congestionata si distribuisce in modo tale che tutti i viaggiatori tra una coppia origine-destinazione sostengano un costo uguale e minimo.

Nello stato di equilibrio probabilistico, il traffico in una rete congestionata si distribuisce in modo tale che ciascun viaggiatore tra una coppia origine-destinazione si trova sul percorso con il minimo costo da lui percepito e quindi nessun viaggiatore può ridurre il proprio percepito cambiando percorso.”

In linea di principio, l'approccio probabilistico è più generale e consente di considerare la dispersione dei comportamenti di scelta del percorso all'interno della popolazione di

viaggiatori, così come di incorporare aspetti di incertezza modellistica; esso non è inoltre più complesso in termini di algoritmi che occorre implementare per la sua soluzione. L'approccio deterministico, per il quale nell'Appendice 1 è illustrato un esempio applicativo semplificato con soluzione analitica e soluzione numerica con algoritmo incrementale, dà risultati equivalenti a quelli del probabilistico nel caso di reti con elevati e uniformi livelli di saturazione. Similmente, i risultati si equivalgono nel caso in cui le reti e la domanda di trasporto che le carica siano fortemente simmetriche e, in ultimo, nel caso in cui per ogni coppia o/d sia disponibile un unico percorso (scelte di percorso banalizzate).

Vanno sempre evitati gli approcci basati sulla mera applicazione di algoritmi di minimo percorso, perché, da soli, risultano inadeguati a gestire reti congestionate. Fa eccezione il caso di coppie o/d con un solo percorso, per le quali l'uso di un modello di scelta del percorso non è di fatto rilevante.

La soluzione del problema dell'assegnazione avviene tramite algoritmi diversi a seconda dell'approccio adottato. Tali algoritmi sono in generale contenuti in pacchetti software che includono anche funzionalità di gestione delle reti, di caratterizzazione degli archi e di caricamento e manipolazione delle matrici di domanda o/d. Inoltre, consentono l'assegnazione di categorie diverse di utenti o di tipologie diverse di veicoli. Gli algoritmi contenuti in questi pacchetti software risolvono il problema dell'assegnazione evitando, in genere, l'enumerazione esplicita dei percorsi e agendo direttamente sulla rete. Infine, i pacchetti software sono in genere dotati di un linguaggio di scripting che consente di inserire le funzionalità che essi mettono a disposizione all'interno di routine che consentono l'utilizzo dell'assegnazione in contesti di uso più generale.

I pacchetti software più diffusi nella pratica trasportistica – e tutti adeguati agli scopi trattati in questo studio – sono: PTV Visum molto diffuso in Italia e nel resto di Europa; Caliper TransCAD, molto diffuso negli Stati Uniti; Bentley Openpaths, con un utilizzo in crescita e con qualche difficoltà di adattamento alle applicazioni discusse in questo studio; OmniTRANS, non testato per gli utilizzi di questo studio. È il caso di notare che questi software devono essere utilizzati da professionisti specializzati e in modo consapevole delle implicazioni modellistiche connesse, nonché con le necessarie competenze per interpretare e verificare la correttezza dei risultati.

In particolare, tutte le applicazioni riportate in questo studio sono state realizzate con l'uso del software PTV Visum, che consente di modellare i flussi di traffico in diversi scenari e offre strumenti avanzati per ottimizzare e calibrare i modelli sulla base di dati reali raccolte sul campo. Infatti, PTV Visum consente anche di incorporare dati empirici, utilizzando rilievi di traffico sui principali segmenti della rete, per garantire la validità e l'affidabilità delle simulazioni. Questa metodologia si rivela particolarmente utile per le analisi di scenario, ad esempio la chiusura di un manufatto, in cui l'algoritmo consente di simulare gli effetti sulla rete stradale, evidenziando come i flussi di traffico si riorganizzano in risposta a modifiche strutturali. Inoltre, Visum consente di analizzare percorsi alternativi e di valutare l'impatto sui tempi di viaggio e sulla capacità della rete, supportando così le decisioni strategiche per la gestione e la manutenzione del sistema di trasporto.

5.2 F3.A2 Valutazione dei KPI e della resilienza della rete

Nel contesto della valutazione della resilienza della rete stradale in caso di chiusura di un manufatto, si utilizzano due approcci metodologici distinti. Il primo approccio, chiamato **Connectivity-based**, si concentra sulla struttura della rete, ignorando i dati relativi alla domanda e alle capacità degli archi, e analizza esclusivamente la connettività tra le coppie origine-destinazione (OD). Il secondo approccio, **Level of Service-based**, tiene conto della capacità degli archi e della domanda effettiva, analizzando i livelli di servizio della rete in condizioni operative realistiche, che riflettono gli effetti della congestione e delle capacità effettive di traffico.

Per entrambi gli approcci, vengono calcolati e confrontati alcuni **Key Performance Indicators** (KPIs) fondamentali, che includono il tempo medio e totale di percorrenza, la lunghezza media e totale dei percorsi, e la velocità media degli spostamenti. Tali indicatori vengono esaminati in due scenari principali: il manufatto aperto e il manufatto (parzialmente o totalmente) chiuso, per offrire una visione complessiva degli effetti su scala aggregata (intera rete) e disaggregata (singole coppie OD).

5.2.1 Approccio Connectivity-based

In questo approccio si valuta la resilienza strutturale della rete, ossia la sua capacità di mantenere la connettività tra le varie zone, indipendentemente dalle condizioni operative del **traffico**. La rete viene trattata come “scarica”, ignorando la domanda e le capacità degli archi, e si analizza soltanto la connettività tra le zone.

I KPIs calcolati in questo caso includono:

- **Tempo medio di percorrenza (t)**: misura il tempo teorico di spostamento dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero, basandosi esclusivamente sulle caratteristiche geometriche della rete.
- **Lunghezza media dei percorsi (l)**: rappresenta la distanza media percorsa dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero.
- **Velocità media (v)**: calcolata come il rapporto tra lunghezza e tempo di percorrenza in rete scarica, riflette le caratteristiche strutturali della rete senza considerare la congestione o la domanda.

L'analisi dei risultati si concentra sulla **variazione percentuale di ciascun KPI** tra gli scenari di manufatto aperto e chiuso. A livello aggregato, si ottiene una misura della **perdita complessiva di connettività della rete**, mentre a livello disaggregato si individuano coppie OD isolate o percorsi significativamente alterati. Questo approccio aiuta a identificare le zone più penalizzate dalla chiusura del manufatto in termini di accessibilità pura. L'approccio non richiede conoscenza della domanda di trasporto, ma non consente risposte esaurienti. La connettività, ad esempio, potrebbe essere mantenuta, ma i tempi di percorrenza su rete risultare di molto incrementati sia a causa di lunghi detour che a causa di

lunghi fenomeni di attesa, questi ultimi impossibili da valutare in mancanza di un'analisi che coinvolga l'utilizzo della domanda di trasporto.

5.2.2 Approccio Level of Service-based

Questo approccio, invece, si concentra sulla **resilienza operativa della rete, considerando come la domanda e le capacità influenzino i livelli di servizio durante la chiusura del manufatto**. In questo caso, la rete viene trattata come "carica", tenendo conto della distribuzione del traffico reale e degli effetti della congestione.

I KPI analizzati includono:

- **Tempo medio di percorrenza (\bar{t}):** misura il tempo effettivo di spostamento dalla zona di origine o alla zona di destinazione d , includendo gli effetti della congestione.
- **Lunghezza media dei percorsi (\bar{l}):** rappresenta la distanza media percorsa dalla zona di origine o alla zona di destinazione d , includendo eventuali deviazioni dovute alla congestione.
- **Velocità media (\bar{v}):** calcolata come rapporto tra lunghezza dello spostamento e tempo di percorrenza a rete carica, riflette il livello di servizio effettivo offerto dalla rete in condizioni di traffico.

Anche in questo caso, i risultati vengono analizzati sia a livello aggregato sia a livello disaggregato. L'analisi aggregata fornisce un'indicazione dell'impatto complessivo della chiusura del manufatto sulla qualità del servizio, mentre l'analisi disaggregata consente di identificare aree critiche in cui la congestione peggiora in modo più significativo.

5.2.3 Confronto tra approcci e scenari

Il confronto tra i due approcci consente una valutazione integrata della resilienza della rete. L'approccio **Connectivity-based** valuta la **resilienza strutturale**, concentrandosi sull'accessibilità della rete, mentre l'approccio **Level of Service-based** analizza la **resilienza operativa**, osservando gli effetti sulla qualità del servizio e sulla capacità di assorbire la domanda in condizioni degradate.

I risultati per entrambi gli approcci vengono confrontati tra gli **scenari di manufatto aperto e parzialmente aperto e/o chiuso**, calcolando le **variazioni percentuali per ciascun KPI**, sia a livello globale (intera rete) che locale (singole coppie OD). Ad esempio, l'analisi aggregata consente di valutare l'incremento del tempo totale di percorrenza a livello di rete e la riduzione della velocità media complessiva, mentre l'analisi disaggregata aiuta a individuare le coppie OD più penalizzate in termini di tempi di percorrenza o lunghezze dei percorsi, nonché a localizzare le deviazioni critiche che contribuiscono alla congestione.

Le analisi vengono eseguite utilizzando il software PTV Visum, o altro software equivalente che supporti la generazione di *skim matrices* per ciascun approccio, sia quello a rete scarica sia quello a rete carica. Ogni skim matrix contiene i valori medi di tempo, lunghezza e velocità per ciascuna coppia OD, e i valori totali per la rete aggregata vengono calcolati moltiplicando le skim matrices per la matrice della domanda. Le **variazioni percentuali** tra

gli scenari di manufatto aperto, parzialmente aperto e/o chiuso vengono calcolate in base ai valori medi (singole coppie OD) e ai valori totali (intera rete), fornendo una panoramica completa degli impatti.

5.3 F3.A3 Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

5.3.1 Impatto socioeconomico

L'analisi dell'impatto socioeconomico si concentra sulla valutazione delle conseguenze derivanti dall'interruzione (parziale e/o totale) del manufatto, esaminando gli effetti sulla comunità, sui costi operativi, sull'efficienza del sistema di trasporto e sugli impatti ambientali e sociali (Ventura et al., 2022; De Aloe et al., 2023). Diversi indicatori monetari vengono utilizzati per quantificare l'impatto complessivo (COM, 2014; MIT, 2017):

1. **Incremento dei costi legati ai tempi di viaggio:** La chiusura parziale e/o totale del manufatto allunga i percorsi e aumenta i tempi di viaggio. L'incremento del tempo viene moltiplicato per il valore marginale monetario del tempo di viaggio, che dipende dalla motivazione del viaggio (e.g., sistematica, non sistematica), fornendo una stima del costo sociale derivante dalla perdita di tempo.
2. **Incremento dei costi operativi/gestionali dei veicoli:** L'aumento delle percorrenze dovute alle deviazioni imposte dalla chiusura del manufatto comporta costi aggiuntivi per i veicoli, come il maggior consumo di carburante e l'aumento dell'usura dei mezzi. La variazione di distanza per ciascun percorso viene moltiplicata per il costo operativo marginale, che dipende dalla tipologia del veicolo (ad es. autovettura, mezzo pesante), fornendo una stima del costo monetario derivante dall'aumento delle percorrenze.
3. **Incremento dei costi legati all'incidentalità stradale:** L'alterazione dei percorsi e l'intensificazione del traffico possono aumentare il rischio di incidenti. La maggiore incidentalità è monetizzata moltiplicando la variazione della distanza percorsa per il relativo costo marginale degli incidenti, che include danni a persone e beni, nonché la perdita di produttività.
4. **Incremento delle emissioni inquinanti:** A causa dei percorsi più lunghi e dell'eventuale aumento del traffico, si verifica un incremento delle emissioni di inquinanti atmosferici (come ossidi di azoto e particolato). Le maggiori emissioni inquinanti sono monetizzate moltiplicando la variazione della distanza percorsa per il relativo costo marginale, che riflette i danni alla salute derivanti da tali emissioni.
5. **Incremento delle emissioni di CO₂:** L'aumento della distanza percorsa e dei tempi di viaggio porta a un incremento delle emissioni di CO₂, con impatti sul cambiamento climatico. Le maggiori emissioni di CO₂ vengono monetizzate moltiplicando la variazione della distanza percorsa per il relativo costo marginale, che riflette i danni derivanti dai cambiamenti climatici.
6. **Incremento delle emissioni acustiche:** L'aumento del traffico e della durata dei viaggi può portare a un incremento delle emissioni acustiche, con effetti negativi sulla salute e

sul benessere delle persone che vivono lungo le strade. Questi effetti negativi vengono monetizzati moltiplicando la variazione della distanza percorsa per il relativo costo marginale.

Questi indicatori economici vengono sommati per ottenere una stima complessiva dei costi socioeconomici derivanti dall'interruzione (parziale e/o totale) del manufatto. Tale valutazione consente di quantificare l'impatto diretto ed esterno dell'interruzione sulle diverse categorie di utenti della rete stradale e sull'ambiente, fornendo un quadro conoscitivo utile alla definizione delle priorità di intervento.

In questa prospettiva, è fondamentale individuare e pianificare possibili azioni di mitigazione volte a ridurre l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione del manufatto. Tali interventi possono riguardare sia la gestione del traffico sul manufatto sia la manutenzione e il ripristino dello stesso e sono brevemente descritti nei paragrafi seguenti.

5.3.2 Interventi prioritari di gestione

Un aspetto cruciale è rappresentato dalla **gestione attiva del traffico**, che può essere ottimizzata mediante l'impiego di **tecnologie ITS (Intelligent Transport Systems)**. Questi sistemi contribuiscono a mitigare i rischi legati al sovraccarico del manufatto in tempo reale, grazie al monitoraggio continuativo dei flussi veicolari e alla regolazione dinamica della circolazione. Tecnologie avanzate, come i sistemi di gestione predittiva del rischio, consentono inoltre di indirizzare i flussi di traffico in risposta a variazioni improvvise delle condizioni operative, ottimizzando l'utilizzo delle infrastrutture e riducendo il rischio di congestioni o di danni strutturali (e.g., Ventura et al., 2024). Tali interventi, di natura prevalentemente preventiva, rivestono un ruolo strategico, poiché possono contribuire a prolungare la vita utile del manufatto e, in alcuni casi, a evitare o posticipare l'interruzione stessa. L'adozione tempestiva di soluzioni tecnologiche per la gestione del traffico, infatti, consente di contenere gli effetti del degrado strutturale e di mantenere livelli di sicurezza e funzionalità adeguati della rete.

5.3.3 Interventi prioritari di manutenzione

Per quanto riguarda gli **interventi di manutenzione**, l'analisi socioeconomica consente di individuare le aree più critiche della rete e di orientare le risorse verso le azioni in grado di ridurre i danni economici nel lungo periodo. In particolare, la manutenzione e il ripristino delle infrastrutture esistenti — come il manufatto stesso o le vie alternative — dovrebbero essere considerati prioritari per migliorare l'accessibilità e contenere la congestione. Parallelamente, può risultare opportuno **potenziare le infrastrutture complementari** che supportano il traffico deviato, come altre strade o manufatti, al fine di garantire una maggiore capacità di assorbimento del traffico aggiuntivo e una maggiore resilienza complessiva della rete.

6

F4: Raccomandazioni e Disposizioni per l'adeguamento della rete durante l'interruzione

Le analisi condotte e le priorità individuate nelle fasi precedenti costituiscono la base conoscitiva per la definizione delle raccomandazioni e delle disposizioni operative volte a garantire la continuità e la sicurezza della rete durante l'interruzione del manufatto. Dai risultati delle valutazioni socioeconomiche e dalle strategie di gestione e manutenzione emergono, infatti, le indicazioni pratiche necessarie per pianificare efficacemente gli interventi descritti nella successiva Fase 4.

La Fase F4 rappresenta il momento operativo in cui le conoscenze acquisite vengono tradotte in azioni concrete, attraverso provvedimenti strutturali, regolazioni della circolazione e la progettazione della segnaletica, al fine di assicurare la massima resilienza della rete durante l'interruzione.

Obiettivi specifici della Fase 4 sono l'elaborazione di Raccomandazioni Operative per l'Ente gestore e per gli Organi di Vigilanza per l'esercizio resiliente della rete durante l'interruzione e l'organica elencazione delle Disposizioni relative alla regolazione del traffico sulla rete, inclusi il progetto della segnaletica e la pubblicizzazione verso l'utenza. La Fase 4 si articola, pertanto, in tre attività principali:

- **F4.A1 Provvedimenti strutturali:** Indicare gli interventi di modificazione fisica di intersezioni o punti singolari atti a consentire importanti guadagni in termini di connettività e/o di fluidità. Eseguirne l'Analisi Benefici/Costi sulla base di una sommaria previsione delle tempistiche di esecuzione e delle modalità di affidamento e realizzazione dei lavori.
- **F4.A2 Regolazione della circolazione e progetto della segnaletica:** Stabilire il Piano della circolazione con le eventuali variazioni ai divieti di transito e l'istituzione di sensi unici temporanei. Redigere il Progetto della segnaletica orizzontale e verticale nelle condizioni variate.
- **F4.A3 Pubblicizzazione all'utenza:** Predisporre schemi, mappe e applicazioni interattive per indicare alle diverse categorie di utenza i migliori percorsi alternativi per servire le coppie origine/destinazione interessate dalle modifiche alla circolazione. Stabilire il programma di pubblicizzazione sugli organi di comunicazione a stampa, a video e telematici.

La Fase F4 è intrinsecamente sperimentale, in quanto le previsioni che, grazie agli approfondimenti delle fasi precedenti, sia stato possibile maturare a priori dovranno essere pun-

tualmente verificate nella pratica, al fine di apportare rapidamente le più opportune correzioni e integrazioni a tutti i provvedimenti assunti o programmati.

Al fine di saggiare l'applicabilità della metodologia proposta e di esprimere concrete raccomandazioni e disposizioni, sono stati selezionati **otto casi di studio rappresentativi**, scelti tra quelli identificati dalla Commissione di indirizzo presso il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP): quattro opere sulla rete primaria e quattro sulla rete secondaria, individuate geograficamente nella Figura 61 e così enumerate:

Caso di Studio 1 – Rete primaria lungo la A21, presso Cremona;

Caso di Studio 2 – Rete secondaria lungo la SP50dir, presso Gavirate (VA);

Caso di Studio 3 – Rete secondaria lungo la SP29, presso Corchiano (VT);

Caso di Studio 4 – Rete primaria, diramazione della A1 verso Roma Sud, presso San Cesario (RM);

Caso di Studio 5 – Rete primaria della città di Napoli;

Caso di Studio 6 – Rete primaria lungo la A2, presso Salerno;

Caso di Studio 7 – Rete secondaria lungo la SP83, presso Baragiano (PZ);

Caso di Studio 8 – Rete secondaria lungo la SP123 presso Troia (FG).

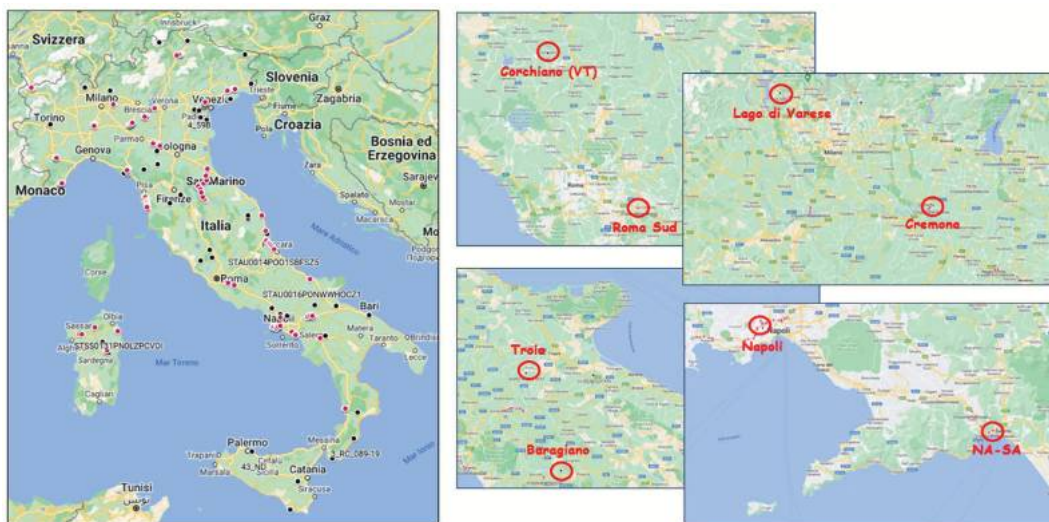


Figura 6.1 Casi rappresentativi oggetto di studio.

Gli otto casi di studio saranno descritti nel dettaglio nel capitolo 8, evidenziando le caratteristiche specifiche delle opere e i criteri utilizzati per l'analisi della resilienza, adottando il livello di approfondimento più adeguato a ciascuna delle fasi metodologiche individuate e descritte nel presente documento.

Per tutti i casi di studio individuati, si è valutato il caso della completa chiusura dell'opera al traffico di ogni genere. È evidente che questa è solo una delle tante graduazioni di

degrado della funzionalità regolare. Per molte necessità, quali le manutenzioni non particolarmente invasive o urgenti, le rovine parziali, ecc., potrebbe essere sufficiente parzializzare l'utilizzo riducendo la sezione dedicata al traffico o deviando su altri percorsi solo alcune componenti, ad esempio i mezzi più pesanti. Tali eventualità "minori" possono essere considerate come sottoinsiemi della condizione di completa esclusione dal servizio di tutta l'opera, qui approfondita. Pertanto, tali casi potranno essere affrontati applicando una metodologia analoga: la rete modificata comprenderà le corsie ancora attive, da sfruttare, a seconda delle convenienze, in uno o in entrambi i sensi di marcia. Un primo esempio di analisi degli effetti di una chiusura parziale di un manufatto è presentato nel Caso di Studio 1 – Rete primaria lungo la A21, presso Cremona.

Su un altro versante logico si pone il caso di una rete infrastrutturale in cui la localizzazione della interruzione non è stata determinata a priori ma, piuttosto, si intende modellizzare esplicitamente l'incertezza circa la localizzazione e l'intensità del degrado che può avvenire, potenzialmente, su qualsiasi ramo della rete considerata seppure, ove noto, con diverse probabilità di accadimento a seconda della posizione del ramo o della sua tipologia o della classe di appartenenza a una rete gerarchizzata. Tale degrado può avvenire, nella modellazione, anche su più archi della rete contemporaneamente. Il metodo è applicabile nel caso in cui si voglia valutare l'effetto in termini di resilienza della rete di un evento sismico rispetto al quale i rami infrastrutturali della rete hanno una distribuzione probabilistica delle suscettibilità e l'intensità e localizzazione dell'evento sismico è a sua volta un evento aleatorio, oppure nel caso in cui si voglia trattare l'incertezza connessa con l'accadere di eventi meteorici estremi e con la, anche essa incerta, distribuzione degli effetti conseguenti, espressi in termini di capacità residua della viabilità, o ancora si voglia modellare esplicitamente l'incertezza legata all'accadimento di eventi di inondazione e alla probabilità di sommersione di archi o tratti di rete. Infine, è possibile trattare casi in cui l'incertezza non è definita né configurata attraverso un modello corrispondente a un fenomeno naturale (o anche antropico), ma è utilizzata per evidenziare la fragilità intrinseca del sistema di trasporto ed è quindi uniformemente distribuita sulla rete, eventualmente con diverse intensità di danno a seconda dell'appartenenza a diversi cluster gerarchici, con una distribuzione di tipo congiunto o statisticamente indipendente per ogni arco della rete considerato. Sebbene tali accadimenti non siano esplicitamente richiamati nelle attività del "Task 5.7 Resilienza della rete di trasporto", è evidente l'interesse di tale approccio nel contesto trattato da questo studio e a tale problematica è dedicato il capitolo 7, che adotta un metodo di esplorazione dell'incertezza, utile in sede di programmazione strategica di lungo termine.



Esplorazione della robustezza di rete con modellazione esplicita dell'incertezza

L'approccio di esplorazione della robustezza di rete con modellazione esplicita dell'incertezza si riferisce alla possibile insorgenza di eventi che possono innescarsi in modo distribuito e secondo leggi probabilistiche note (o imposte per opportunità di analisi) in qualsiasi punto della rete, e non in corrispondenza di un'infrastruttura identificata a priori. Tali evenienze possono realizzarsi su larga scala a seguito di fenomeni sia naturali sia antropici, che possono compromettere in modo diffuso e non prevedibile a priori la funzionalità complessiva della rete infrastrutturale, determinando un calo delle prestazioni o della connettività del sistema di trasporto. La realizzazione di tali eventi e la conseguente distribuzione del degrado sulle infrastrutture componenti la rete non sono fissate in modo deterministico e preliminare all'analisi, quanto piuttosto modellate tramite leggi di probabilità che tengono conto dell'incertezza nel processo di simulazione degli impatti.

A differenza degli approcci convenzionali, che si concentrano sulla chiusura parziale o totale di un singolo elemento del grafo infrastrutturale, l'obiettivo di questa analisi è valutare gli effetti derivanti da perturbazioni estese che hanno una probabilità di interessare simultaneamente una o più componenti della rete, non definite a priori in modo deterministico.

Ad esempio, per eventi di origine naturale, come terremoti o alluvioni, un approccio deterministico non è adeguato, poiché tali fenomeni presentano un'elevata componente di aleatorietà. Essi devono pertanto essere modellati mediante un approccio probabilistico che tenga conto sia della probabilità di accadimento, tipicamente territorialmente distribuita, sia dell'intensità dell'evento, che infine della probabilità che esso determini una certa distribuzione del degrado delle prestazioni infrastrutturali.

Per ottenere una rappresentazione esaustiva e realistica del comportamento della rete in seguito a tali perturbazioni, è quindi necessario adottare un **approccio stocastico** allo studio della degradazione funzionale del sistema di trasporto che tenga esplicitamente conto dell'incertezza.

7.1 Generazione degli scenari di perturbazione

Il primo passo per l'applicazione dell'approccio consiste nella generazione di un numero elevato di realizzazioni di scenari di degrado delle infrastrutture della rete sottoposte a test. Le realizzazioni avvengono in modo aleatorio, in accordo con la modellazione dell'in-

certezza che si intende rappresentare. Ne risulta un numero (N) elevato di configurazioni della rete di trasporto, ciascuna rappresentativa dell'impatto d'un evento complesso in termini di perdita di funzionalità degli archi della rete. La numerosità è tale da coprire efficacemente, ancorché campionariamente, il numero di configurazioni possibili e, quindi, dipende anche dalla dimensione della rete o, meglio, dal numero di rami infrastrutturali la cui suscettibilità al danno si intende considerare. Le tecniche di realizzazione e di campionamento aleatorio impiegate, se efficienti, possono ridurre il numero di scenari da generare. Ognuna delle N configurazioni costituisce uno **scenario ipotetico** in cui la rete assume un livello di efficienza residua determinato aleatoriamente in accordo con l'incertezza da modellare. In pratica, l'identificazione delle configurazioni di rete può essere ottenuta anche mediante la realizzazione di combinazioni basate sullo stato di ciascun arco della rete, con opportune ipotesi sulla distribuzione di ciascuno di tali stati e sull'indipendenza o sulla correlazione tra essi.

7.2 Definizione della perdita di funzionalità

La perdita di funzionalità degli archi infrastrutturali della rete è descritta mediante curve di vulnerabilità funzionale, che rappresentano probabilisticamente la perdita di funzionalità trasportistica.

Tali curve, rappresentate a titolo d'esempio in Figura 7.1, dovrebbero essere identificate a partire dall'individuazione della probabilità di superamento di un determinato stato limite di danno, a cui corrisponde una perdita di funzionalità associata, in funzione dell'intensità di un evento esterno (ad esempio, la magnitudo di un sisma).

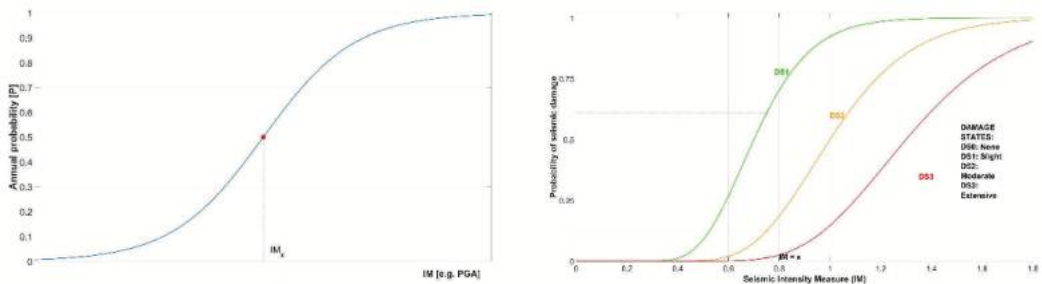


Figura 7.1 Rappresentazione delle curve di rischio (sinistra) e di vulnerabilità funzionale (destra).

In ambito trasportistico, le curve di fragilità consentono di stimare il rischio associato a ponti, viadotti, gallerie e tratti stradali o ferroviari, fornendo uno strumento quantitativo utile alla pianificazione degli interventi di mitigazione e alla gestione della resilienza della rete. Nel caso di un evento sismico, esse permettono di valutare la probabilità di danni parziali o totali agli elementi strutturali critici, in funzione della magnitudo dell'evento e delle caratteristiche locali del sito.

Le curve di vulnerabilità funzionale devono essere definite da esperti di dominio, sulla base di dati empirici e in riferimento alle diverse tipologie di elementi presenti nell'area di

studio. In Figura 7.1 è rappresentato, nel grafico a sinistra, la curva di rischio associata ad uno specifico evento mentre a destra è associata la curva di vulnerabilità funzionale.

Partendo dalle due curve in Figura 7.1 è possibile definire una **Funzione di Distribuzione Cumulativa (CDF)**, che consente quindi di calcolare, per ciascun arco della rete una probabilità di perdita di capacità, come in Figura 7.2.

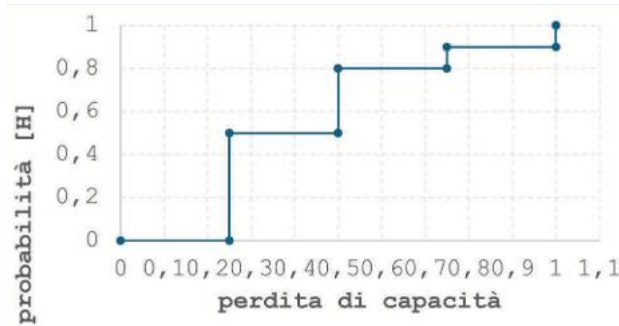


Figura 7.2 Cumulative Density Function (sostitutivo della curva di fragilità) della perdita di capacità.

La formulazione matematica, che permette la definizione della CDF in Figura 7.2 è di seguito riportata:

$$H(p) = \sum_{\pi=0}^P \int_{m=-\infty}^{+\infty} P(\pi | \mu) g(\mu) d\mu$$

con

- $H(p)$ rappresenta la probabilità che la perdita funzionale sia non superiore a p .
- $P(\pi | \mu)$ rappresenta la probabilità della perdita di funzionalità, ovvero la probabilità che la perdita funzionale assuma il valore π condizionata al fatto che l'evento scatenante abbia intensità μ .
- $g(\mu)$ rappresenta la probabilità che l'evento scatenante abbia intensità compresa in un intorno infinitesimo di μ .

7.3 Schema operativo

Le principali fasi operative del processo di analisi riprendono parzialmente le fasi indicate in Figura 2.1 e sono di seguito elencate:

1. **Definizione del modello di offerta**, comprendente la struttura della rete e le caratteristiche funzionali degli archi.
2. **Definizione delle matrici Origine/Destinazione (O/D)** rappresentative della domanda di mobilità.
3. **Generazione di N scenari perturbati**, tramite metodo Montecarlo.
4. **Assegnazione delle matrici O/D a ciascuno scenario** mediante un modello di traffico appropriato.

5. **Calcolo degli indicatori di prestazione della rete** e confronto tra gli scenari perturbati e quello di riferimento (non perturbato).

7.4 Indicatori di prestazione

Gli indicatori più rappresentativi del comportamento della rete sono:

- **Tempo medio di percorrenza** (t_{od}^0): misura il tempo teorico di spostamento dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero, basandosi esclusivamente sulle caratteristiche geometriche della rete.
- **Lunghezza media dei percorsi** (l_{od}^0): rappresenta la distanza media percorsa dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero.
- **Tempo totale su rete**: esprime il tempo di viaggio complessivo di tutti gli utenti, calcolato come:

$$T_{tot} = \sum_a t_a * q_a$$

dove t_a è il tempo di viaggio sull'arco a e q_a è il relativo flusso. Tale indicatore può essere analizzato in termini assoluti o come variazione rispetto allo scenario non perturbato.

- **Tempo medio su rete**: rappresenta il tempo medio di viaggio per utente, espresso come:

$$T_{med} = \sum_a t_a * q_a / \sum_a q_a$$

7.5 Analisi statistica e dimensionalità dei risultati

La dimensionalità delle matrici di indicatori dipende dal grado di dettaglio temporale adottato per le matrici O/D:

- Nel caso di **matrici O/D di punta**, gli indicatori di **tempo medio di percorrenza** e **lunghezza media dei percorsi** presentano una struttura tridimensionale (*origine, destinazione, scenario*), mentre il **tempo su rete** è rappresentabile in forma bidimensionale.
- L'utilizzo di **matrici O/D orarie** (analisi dinamica *within-day*) comporta l'aggiunta di una dimensione temporale.
- Considerando anche la **variabilità day-to-day**, la dimensionalità massima può raggiungere 5 dimensioni (*origine, destinazione, fascia oraria, giorno dell'anno, scenario*).

Per una comprensione più approfondita del comportamento della rete di trasporto a seguito delle perturbazioni simulate, è pertanto necessario adottare un **approccio di analisi statistica**, che consenta di interpretare in modo efficace la distribuzione e la variabilità degli indicatori rispetto ai diversi scenari generati.

Nell'Appendice 1 al presente documento viene sviluppata, a titolo di esempio, l'analisi esplorativa della robustezza delle reti con compromissioni distribuite, ampliando il punto di vista rispetto al caso di studio n.5, con riferimento al territorio dell'area napoletana.

8

Casi studio

8.1 Caso di Studio 1: rete primaria (A21, presso Cremona)

Il primo caso di studio riguarda un'opera infrastrutturale maggiore: il **sovrappasso della linea ferroviaria Cremona-Mantova, situato lungo l'autostrada A21 Piacenza-Brescia (km 194+200), nei pressi del casello autostradale di Cremona** (Figura 8.1). In corrispondenza del sito, la sezione stradale è costituita da due carreggiate separate da un ampio spartitraffico erboso, ognuna delle quali dispone di tre corsie (due ordinarie e una di emergenza). Il sovrappasso è costituito da due ponti distinti, uno per ciascuna carreggiata. Entrambi presentano una struttura a tre campate con luci di circa 15 metri ciascuna (Figura 8.2). Questa infrastruttura assume particolare rilievo sia per l'elevato volume di traffico che vi transita, sia per il suo ruolo strategico nella rete viaria, non solo a livello nazionale ma anche europeo. L'autostrada A21, infatti, fa parte della strada europea E70, un'importante dorsale Ovest-Est che attraversa dieci nazioni europee, collegando La Coruña (Spagna) a Poti (Georgia) (UNECE, 2022).

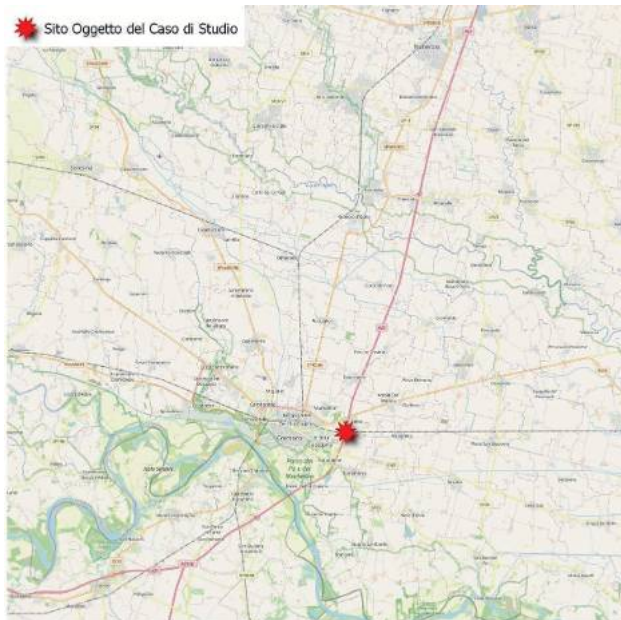


Figura 8.1 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 1.



Figura 8.2 Rappresentazione fotografica del sito considerato nel Caso di Studio 1 (fonte: Google Street View).

8.1.1 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A1**, è stata identificata l'**area di studio**, che si estende per circa 15-20 km attorno al sito. La delimitazione dell'area è stata effettuata tenendo conto della configurazione della rete stradale, della presenza di percorsi alternativi al segmento oggetto di potenziale interruzione e dell'accessibilità ai principali centri urbani.

Dal punto di vista sociodemografico, l'area di studio comprende principalmente la parte centrale della Provincia di Cremona, ma si estende fino al margine meridionale della Provincia di Brescia, al margine occidentale della Provincia di Mantova e ai margini settentrionali delle Province di Piacenza e Parma. I principali centri urbani inclusi sono la città di Cremona e, in senso orario partendo da nord, gli abitati di Verolanuova (BS), Ponteviso (BS), Ostiano (CR), Vescovato (CR), Castelvetro Piacentino (PC), Casalbuttano (CR) e Robecco d'Oglio (CR). A questi si aggiungono numerosi abitati minori, distribuiti in maniera relativamente densa su tutto il territorio.

Dal punto di vista orografico, l'area di studio è caratterizzata da un territorio completamente pianeggiante, essendo interamente situata nella Pianura Padana. I principali ostacoli al movimento di persone e merci sono di natura fluviale: primariamente il fiume Po, il maggiore corso d'acqua italiano, che separa la Provincia di Cremona da quelle di emiliane di Piacenza e Parma, e secondariamente il fiume Oglio, che segna il confine tra la Provincia di Cremona e quelle di Brescia e Mantova.

8.1.2 Zonizzazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A2**, l'**area di studio è stata zonizzata in unità territoriali**. Poiché il territorio è già coperto da matrici O/D ufficiali fornite da Regione Lombardia (passeggeri e merci), la zonizzazione è stata allineata a queste suddivisioni per garantire la compatibilità e la coerenza del modello. In particolare, la zonizzazione della matrice merci proposta da Regione Lombardia, basata su aggregazioni di comuni, è stata scelta come base per la modellazione sia dei flussi passeggeri sia di quelli delle merci.

Sebbene la zonizzazione per i flussi passeggeri fornita dalla Regione Lombardia presenti un livello di disaggregazione maggiore (essendo basata su zone comunali), l'adozione di un'unica zonizzazione aggregata è stata motivata da diverse ragioni che garantiscono comunque la validità e l'attendibilità dei risultati:

- ⊙ Coerenza e compatibilità metodologica: Allineare la zonizzazione dei flussi passeggeri a quella delle merci assicura una struttura territoriale uniforme, favorendo l'integrazione e la coerenza tra le due analisi.
- ⊙ Facilitazione del confronto tra i risultati: L'utilizzo di una zonizzazione univoca consente di mettere a confronto i risultati delle assegnazioni passeggeri e merci in maniera diretta, migliorando la leggibilità delle interazioni tra i due tipi di flussi.
- ⊙ Efficienza operativa e computazionale: Una zonizzazione aggregata riduce la complessità computazionale, rendendo il modello più gestibile e leggero, soprattutto in considerazione dell'ampiezza dell'area di studio e del numero di zone coinvolte.

Complessivamente, la zonizzazione ha prodotto 16 zone interne e 3 zone esterne, elencate nella Tabella 8.1 e rappresentate cartograficamente in Figura 8.3.

Tabella 8.1 Elenco delle zone (interne ed esterne) considerate nel Caso di Studio 1.

ID Zona	Descrizione Zona	Tipo Zona
337	CREMONA 1-CREMONA 3-CREMONA 4	INTERNA
338	CREMONA 2-CREMONA 5	INTERNA
339	CROTTA D'ADDA-SPINADESCO	INTERNA
341	ACQUANEGRA CREMONESE-CAPPELLA CANTONE-GRUMELLO CREMONESE ED UNITI-SESTO ED UNITI	INTERNA
342	CASALBUTTANO ED UNITI-CASTELVERDE	INTERNA
344	BORDOLANO-CORTE DE' CORTESI CON CIGNONE-AZZANELLO-CASTELVISCONTI	INTERNA
345	CORTE DE' FRATI-OLMENETA-PERSICO DOSIMO-POZZAGLIO ED UNITI-ROBECCO D'OGGIO	INTERNA
346	GADESCO PIEVE DELMONA-GRONTARDO-SCANDOLARA RIPA D'OGGIO	INTERNA
347	GABBIONETA BINANUOVA-OSTIANO-PESCAROLO ED UNITI	INTERNA
348	PESSINA CREMONESE-VOLONGO-CAPPELLA DE' PICENARDI-DEROVERE-PIEVE SAN GIACOMO	INTERNA
349	CICOGNOLO-MALAGNINO-SOSPIRO-VESCOVATO	INTERNA
350	BONEMERSE-GERRE DE' CAPRIOLI-PIEVE D'OLMI-STAGNO LOMBARDO	INTERNA
351	MOTTA BALUFFI0SAN DANIELE PO0TORRICELLA DEL PIZZO	INTERNA
356	CELLA DATI0CINGIA DE' BOTTI-SAN MARTINO DEL LAGO-SCANDOLARA RAVARA	INTERNA
415	ALFIANELLO0CIGOLE0SAN GERVASIO BRESCIANO	INTERNA
417	BASSANO BRESCIANO-PONTEVICO-VEROLANUOVA-VEROLAVECCHIA	INTERNA
1470	PROVINCIA DI PIACENZA	ESTERNA
1471	PROVINCIA DI PARMA	ESTERNA
5000	PROVINCIA DI BRESCIA	ESTERNA

Le zone interne corrispondono alle singole suddivisioni della matrice merci proposta da Regione Lombardia, garantendo coerenza con i dati ufficiali. È importante sottolineare che l'asimmetria in direzione nord-sud della zonizzazione interna rispetto alla posizione del sito oggetto del caso di studio è dovuta alla vicinanza di quest'ultimo al confine con la Regione Emilia-Romagna. Infatti, nelle matrici O/D fornite da Regione Lombardia, il territorio emiliano-romagnolo è trattato come zona esterna.

Le zone esterne sono state definite mediante un'aggregazione di livello provinciale (per le province di Parma e Piacenza) o sub-provinciale (per la provincia di Brescia). Questa configurazione è stata motivata con l'obiettivo di rappresentare adeguatamente i principali flussi di attraversamento in direzione nord-sud che interessano il tronco autostradale lungo il quale si trova il sovrappasso oggetto del caso di studio. Tale scelta consente di catturare in modo efficace i flussi di traffico interregionali, assicurando al contempo una modellazione coerente e funzionale alla specifica analisi di resilienza.

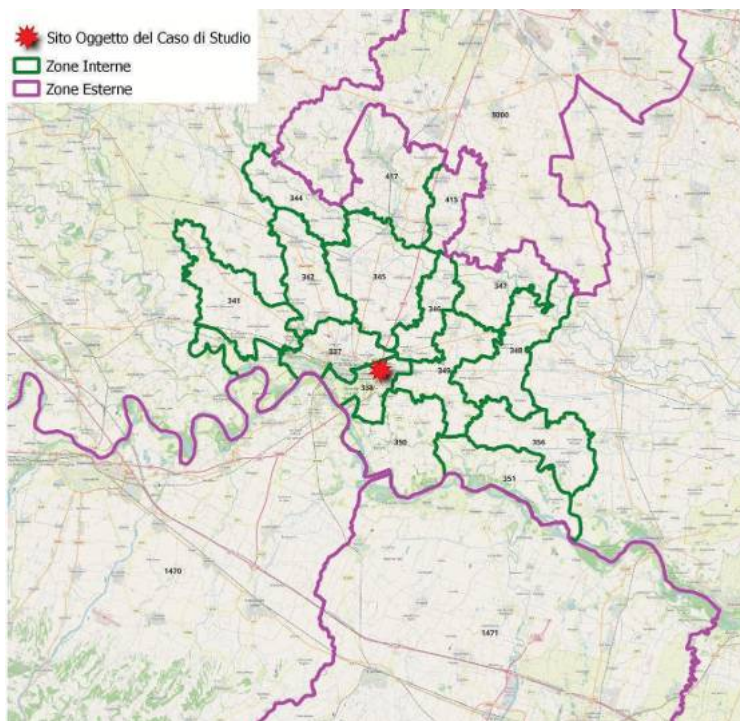


Figura 8.3 Individuazione planimetrica delle zone (interne ed esterne) considerate nel Caso di Studio 1.

8.1.3 Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti

In accordo con quanto indicato in **F1.A3**, la rete stradale è stata modellata mediante la **costruzione di un grafo**. Come descritto nella sezione metodologica, il processo si è articolato in tre fasi principali: (i) estrazione dei dati da OSM, (ii) importazione dei dati nel software di modellazione PTV VISUM e (iii) impostazione degli attributi dei nodi e degli

archi. Particolare attenzione è stata dedicata alla **verifica dell'attributo relativo ai sistemi di trasporto ammessi su ogni arco**, al fine di garantire coerenza con la realtà in merito alla **percorribilità dei tronchi stradali da parte dei mezzi pesanti**. La modellazione ha prodotto un grafo composto da circa 12.750 nodi e 31.850 archi, di cui un estratto è riportato in Appendice 1.

Il grafo risultante è rappresentato cartograficamente in Figura 8.4. Dall'analisi emerge che la rete stradale primaria è dominata **dall'autostrada A21 Piacenza-Brescia, in particolare dal tratto compreso tra i caselli di Pontevico (BS) a nord e Castelvetro Piacentino (PC) a sud**, che costituisce la maggiore direttrice nord-sud nell'area di studio.

La rete principale si sviluppa invece a raggiera attorno alla città di Cremona e comprende, procedendo in senso orario da nord:

- ⊙ l'ex statale SS45bis, che collega Cremona a Brescia;
- ⊙ il ramo nord-orientale della SS10 (Padana Inferiore), che connette Cremona a Mantova;
- ⊙ il ramo sud-occidentale della SS10, che collega Cremona a Piacenza;
- ⊙ la SP234, che unisce Cremona a Pavia;
- ⊙ la SP415, che collega Cremona a Milano;
- ⊙ l'ex statale SS498, che congiunge Cremona a Bergamo.

A questa rete si aggiunge una fitta rete secondaria e locale, con tracciati prevalentemente orientati lungo le direzioni nord-sud ed est-ovest.

Al fine di facilitare la comprensione dei risultati delle successive analisi di resilienza della rete stradale in caso di chiusura totale o parziale del manufatto oggetto del caso studio, è opportuno focalizzarsi sui punti di attraversamento del fiume Po, che rappresenta, come già detto in precedenza, il principale ostacolo al movimento di persone e merci nell'area di studio. Tali attraversamenti sono limitati a tre punti:

- ⊙ tramite rete autostradale, sull'autostrada A21 nei pressi dei comuni di Cremona e Castelvetro Piacentino (PC);
- ⊙ tramite rete primaria, sulla SS10, anch'essa nei pressi di Cremona e Castelvetro Piacentino (PC);
- ⊙ tramite rete secondaria, sulla SP33, che collega i comuni di San Daniele Po (CR) e Roccabianca (PR).

Questa configurazione evidenzia, già da un punto di vista qualitativo, che una chiusura del sovrappasso lungo l'autostrada A21 potrebbe risultare particolarmente critica. Tale scenario comporterebbe infatti il necessario reindirizzamento dei flussi di traffico lungo le altre due alternative disponibili, ossia la SS10 e la SP33, che rappresenterebbero dei passaggi obbligati per tutto il traffico di attraversamento nord-sud, sia per i passeggeri sia per le merci. La limitata disponibilità di opzioni per attraversare il fiume Po aumenta significativamente il rischio di congestionamento delle strade primarie e secondarie e potrebbe comportare un impatto negativo sia sulla fluidità del traffico locale sia sui collegamenti interregionali.

In particolare, l'autostrada A21 svolge un ruolo fondamentale nella connessione tra le regioni settentrionali e meridionali dell'area di studio, grazie alla sua capacità di supportare elevati volumi di traffico pesante e leggero. La chiusura di questa arteria strategica non solo redistribuirebbe il traffico su infrastrutture meno adeguate a sostenere flussi intensi, ma aggraverebbe anche i tempi di percorrenza e i costi operativi associati al trasporto. Inoltre, il passaggio su infrastrutture come la SP33, più adatte a flussi locali che a traffico di attraversamento, rischierebbe di compromettere ulteriormente la resilienza complessiva della rete.

Queste considerazioni sottolineano l'importanza di approfondire l'analisi quantitativa della resilienza, per identificare gli impatti specifici e valutare le possibili soluzioni per mitigare le criticità emerse.



Figura 8.4 Rappresentazione cartografica del grafo modellato per il Caso di Studio 1 (software PTV Visum), con indicazione dei nomi delle strade appartenenti alla rete primaria e principale.

In accordo con quanto indicato nella sezione metodologica, la modellazione della domanda (F2) può essere sviluppata seguendo approcci differenti: da un lato metodi tradizionali, basati sull'utilizzo delle matrici O/D ufficiali, dall'altro soluzioni più innovative che sfruttano i dati provenienti da sistemi di navigazione. La scelta dell'approccio adottato influisce direttamente sugli esiti delle fasi successive (F3 e F4). Per evidenziare le differenze tra le due opzioni, nel seguito l'applicazione delle fasi F2, F3 e F4 viene presentata attraverso due differenti approcci: il primo si basa sulle matrici O/D fornite da Regione Lombardia, mentre il secondo utilizza i dati provenienti da TomTom.

8.1.4 Approccio basato su matrici O/D di Regione Lombardia

Modellazione della domanda passeggeri

In accordo con quanto indicato in **F2.A1**, la **domanda di passeggeri** è stata modellata attingendo dalla **matrice O/D passeggeri** (proiezione al 2020) fornita da **Regione Lombardia** (Regione Lombardia, 2024). Per garantire un approccio conservativo, è stata presa in esame la domanda relativa all'ora di massimo flusso (ora di punta) di un giorno feriale medio, individuata, attraverso un'analisi preliminare dei dati, nell'intervallo compreso tra le 7:00 e le 7:59. A fini semplificativi, l'analisi si è focalizzata esclusivamente sul flusso delle autovetture, modalità di trasporto largamente predominante per gli spostamenti dei passeggeri. Pertanto, sono stati considerati gli spostamenti effettuati **come conducente di auto**, includendo tutti i motivi di spostamento senza distinzioni. Trattandosi di autovetture, è stato applicato un coefficiente di omogeneizzazione unitario.

La matrice O/D risultante, riferita alle 16 zone interne e alle 3 zone esterne dell'area di studio, è riportata in Appendice 1.

Modellazione della domanda merci

Similmente, in accordo con quanto indicato in **F2.A2**, la **domanda merci** è stata modellata utilizzando la **matrice O/D merci** (proiezione al 2020) fornita da **Regione Lombardia** (Regione Lombardia, 2024). Per garantire un'analisi conservativa, è stata considerata la domanda riferita all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio. Nell'analisi sono stati inclusi tutti i tipi di veicoli classificati nelle categorie N1, N2 e N3, secondo l'art. 47 del Codice della Strada (D.Lgs. n. 285/1992 e s.m.). Per assicurare la comparabilità dei dati con quelli relativi alla domanda passeggeri, i flussi sono stati convertiti in veicoli equivalenti (alle autovetture), applicando coefficienti di omogeneizzazione pari a 1.5 per i veicoli della categoria N1, 2.5 per quelli della categoria N2 e 5 per quelli della categoria N3. Questi coefficienti, ispirati a quelli proposti da ANAS, riflettono il diverso impatto di ciascuna tipologia di veicolo sul traffico stradale in termini di dimensioni, peso, occupazione della carreggiata ed esternalità ambientali.

La matrice O/D risultante, riferita alle 16 zone interne e alle 3 zone esterne dell'area di studio, è riportata in Appendice 1.

Flussi di traffico passeggeri e merci osservati

In aggiunta alle matrici O/D, la modellazione della domanda è stata ulteriormente arricchita tramite l'integrazione di **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di sezioni significative, individuate lungo segmenti chiave del grafo stradale (Figura 8.5). I flussi, riportati in Appendice 1, sono stati forniti dagli Enti Gestori e fanno riferimento all'ora di punta di un giorno feriale medio. Per garantire la confrontabilità e l'aderenza al modello, i dati sono stati omogeneizzati applicando i coefficienti proposti da ANAS (Tabella 8.2).

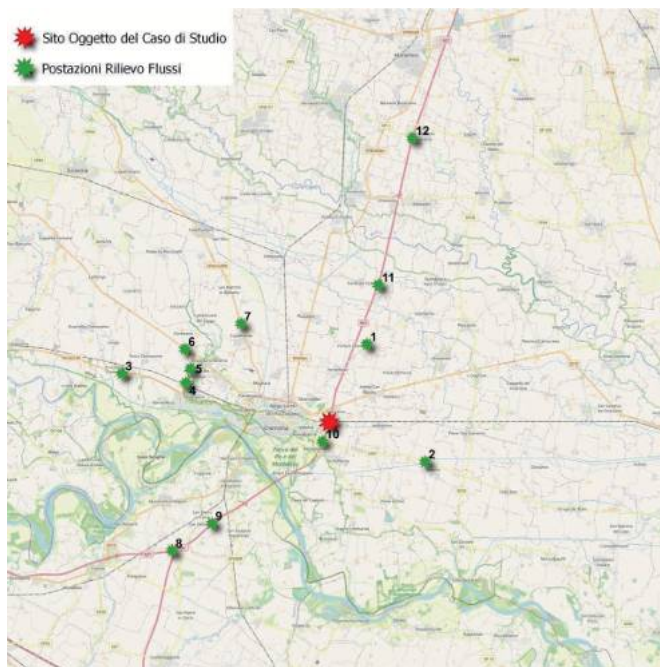


Figura 8.5 Individuazione planimetrica delle postazioni per il rilievo dei flussi di traffico, relative al Caso di Studio 1.

Tabella 8.2 Coefficienti adottati per l'omogeneizzazione dei flussi di traffico osservati in corrispondenza di sezioni significative.

Classe di lunghezza	Classificazione veicoli	Lunghezza (limite inferiore) [m]	Coefficiente di omogeneizzazione
1	motociclo	0	0 ¹
2	autovettura	2	1
3	veicolo commerciale leggero	5	1.5
4	veicolo commerciale pesante	7.5	2.5
5	autobus	10	5
6	autoarticolato	12.5	5
7	autotreno	16.5	4
8	veicolo eccezionale	19	5

Assegnazione della domanda di trasporto passeggeri e merci alla rete

Come descritto nell'azione F3.A1, l'assegnazione della domanda alla rete stradale rappresenta un passaggio cruciale per simulare l'operatività della rete sia in condizioni normali che degradate. Tra le varie metodologie deterministiche per l'assegnazione su reti congestionate

¹ Nonostante ANAS proponga un coefficiente pari a 0.3 per i motocicli, in questa analisi tale valore è stato impostato a zero, perché i motocicli sono stati esclusi dall'analisi.

analizzate nella sezione metodologica, per questo caso di studio si è optato per l'applicazione del **metodo incrementale**. La scelta è stata motivata dai risultati delle prove effettuate, che hanno evidenziato come questa metodologia rappresenti un buon compromesso tra la qualità della soluzione trovata e la necessità di contenere il carico computazionale richiesto.

Ogni assegnazione è stata eseguita utilizzando 12 iterazioni, il numero massimo consentito dal software PTV Visum. Le iterazioni sono state distribuite sulla base di coefficienti di frazionamento della domanda predefiniti, con valori pari a:

$$p_n = [0.12, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08]$$

Questo schema permette di distribuire progressivamente i flussi sulla rete, tenendo conto dell'evoluzione della congestione.

Complessivamente, sono state eseguite **tre assegnazioni distinte**: una relativa allo scenario di base e due associate a diverse ipotesi di rete degradata.

L'assegnazione per lo **scenario di base**, ossia quello corrispondente al **manufatto completamente operativo**, è stata utilizzata per analizzare lo stato attuale della rete e calibrare il modello di simulazione confrontandolo con i flussi di traffico osservati in corrispondenza di sezioni chiave. Dopo un numero significativo di iterazioni di **calibrazione**, i flussogrammi derivanti dall'assegnazione sono stati riportati in Figura 8.6 e Figura 8.7, per il traffico passeggeri e merci rispettivamente.

Inoltre, nell'Appendice 1 è presentato un confronto dettagliato tra i flussi di traffico assegnati dal modello e quelli effettivamente rilevati sul campo. Gli scarti rilevati sono di entità relativamente contenuta, attestando la solidità del modello simulativo finale calibrato. A supporto ulteriore della validità del modello, la Tabella 8.3 riporta **indicatori statistici di errore**, tra cui MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) e CoV (Coefficient of Variation). I valori di questi indicatori risultano **relativamente bassi**, confermando l'elevata accuratezza del modello simulativo.

Questa accuratezza garantisce che il modello possa essere utilizzato con fiducia per la valutazione di scenari ipotetici di rete degradata, fornendo risultati attendibili sia per l'analisi delle condizioni operative che per la pianificazione di interventi di mitigazione.

Tabella 8.3 Metriche di errore (differenza tra flussi assegnati ed osservati) per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 1. I dati si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio.

	Passeggeri	Merci
Mean Absolute Error (MAE)	18.20	13.99
Root Mean Squared Error (RMSE)	31.83	23.31
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	0.0312	0.0300
Coefficient of Variation (CoV)	0.0492	0.0436

Le assegnazioni in condizioni di **rete degradata** sono utili per valutare l'importanza strategica del sovrappasso oggetto di studio. A tale scopo sono state formulate due ipotesi di interruzione.

La prima riguarda la completa chiusura del manufatto (i.e., **scenario di manufatto completamente chiuso**), con conseguente non transitabilità in entrambe le carreggiate. Dato che il

sovrappasso si trova lungo un tronco autostradale, questa condizione implica la chiusura totale della tratta compresa tra i caselli di Cremona e Castelvetro Piacentino (PC), all'interno della quale il manufatto risulta inaccessibile. I flussogrammi derivanti dall'assegnazione sono stati riportati dalla Figura 8.8 alla Figura 8.9, sia per il traffico passeggeri che per il traffico merci.

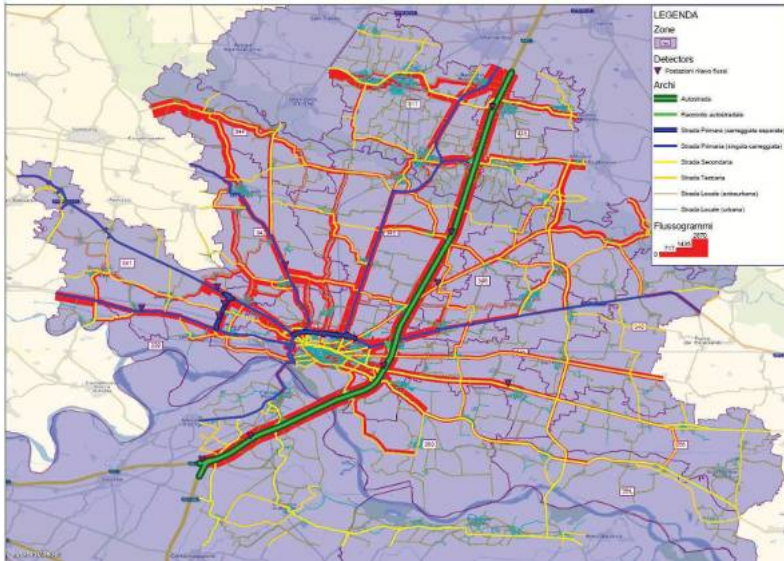


Figura 8.6 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno ferialo medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

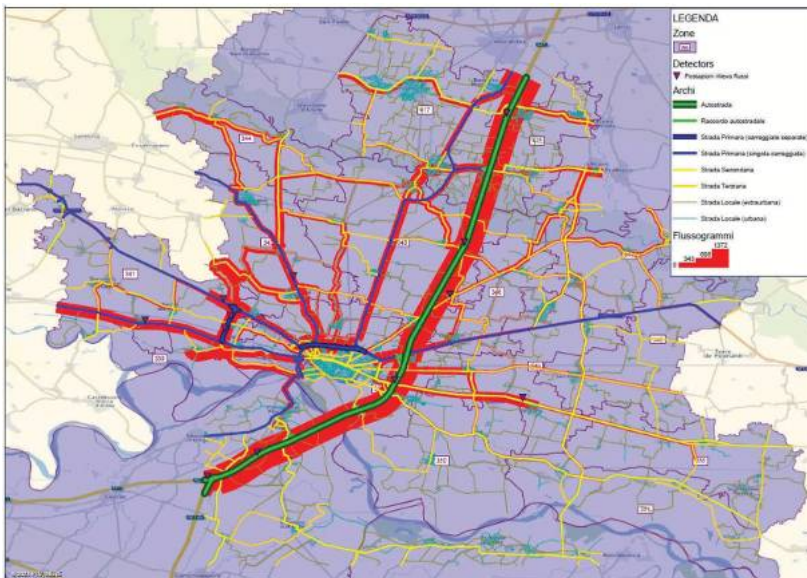


Figura 8.7 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno ferialo medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].



Figura 8.8 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di manufatto completamente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

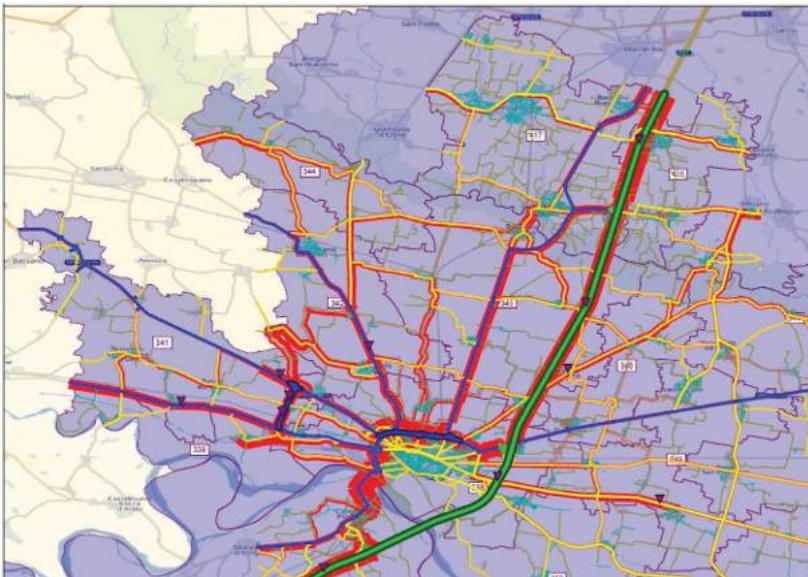


Figura 8.9 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di manufatto completamente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

L'analisi dei flussogrammi evidenzia chiaramente, anche da un punto di vista qualitativo, che la chiusura completa del manufatto sull'A21 produce un impatto significativo sulla viabilità ordinaria, costringendo il traffico di attraversamento a deviare lungo la SS10.

Concentrandosi sul flusso di traffico proveniente da Brescia e diretto a Piacenza, questo flusso sarebbe obbligato a uscire dall'A21 al casello di Cremona, imboccare la SS10, e ad aggirare la città percorrendo il tratto di SS10 classificato come "Tangenziale di Cremona". Successivamente, i veicoli attraverserebbero il fiume Po, transitando nel centro abitato di Castelvetro Piacentino (PC), prima di rientrare sull'A21 in corrispondenza del casello di Castelvetro.

Un percorso analogo sarebbe seguito dal flusso di traffico inverso, ossia proveniente da Piacenza e diretto verso Brescia, che subirebbe le stesse deviazioni lungo la rete stradale ordinaria. Tale redistribuzione dei flussi veicolari comporta un significativo incremento della pressione sulle infrastrutture della zona, aggravando le condizioni di traffico e potenzialmente generando problemi di congestione, in particolare nei tratti urbani e nelle aree densamente abitate.

La seconda ipotesi, meno radicale, prevede la chiusura parziale del sovrappasso, con l'interdizione al traffico di una sola carreggiata (i.e., **scenario di manufatto parzialmente chiuso**). Per esempio, si considera la chiusura della carreggiata ovest, in direzione da Brescia verso Piacenza. In questo scenario, il traffico può essere deviato dalla carreggiata chiusa a quella opposta attraverso l'attivazione di varchi presenti in prossimità del manufatto. Tali varchi fanno parte delle dotazioni esistenti e sono progettati per essere utilizzati in situazioni di emergenza o necessità. Pertanto, in caso di chiusura di una carreggiata, sarebbe possibile attivare rapidamente tali varchi per consentire il passaggio dei veicoli, garantendo la circolazione a doppio senso di marcia lungo la carreggiata rimasta transitabile. Tale configurazione consente la circolazione a doppio senso di marcia sulla carreggiata est, per un tratto di circa 1900 metri. Per garantire la sicurezza, si ipotizza l'applicazione di limiti di velocità ridotti: 30 km/h nei pressi dei varchi di scambio e 50 km/h lungo il tratto con doppio senso di circolazione.

I flussogrammi derivanti dall'assegnazione sono stati riportati in Figura 8.10 e Figura 8.11, per il traffico passeggeri e merci rispettivamente.

L'analisi dei flussogrammi evidenzia chiaramente che, anche in termini qualitativi, la chiusura parziale del manufatto sull'A21 ha un impatto significativamente meno severo sulla viabilità locale rispetto alla chiusura totale. In questo scenario, il traffico di attraversamento viene mantenuto sulla rete autostradale, evitando deviazioni lungo la SS10 e garantendo la continuità del transito, seppur con alcune limitazioni operative (i.e., ridotta velocità legale e ad una minore capacità di deflusso). Tale configurazione consente di evitare il sovraccarico della viabilità secondaria, preservando la funzionalità dell'arteria autostradale e contenendo i disagi per l'utenza.

Tuttavia, l'utilizzo di una sola carreggiata per entrambe le direzioni di marcia può determinare un incremento della densità del traffico e tempi di percorrenza superiori rispetto alle condizioni normali di esercizio. Per tale ragione, si rendono necessarie ulteriori analisi quantitative, descritte nei paragrafi successivi, per valutare nel dettaglio l'impatto dello scenario considerato.

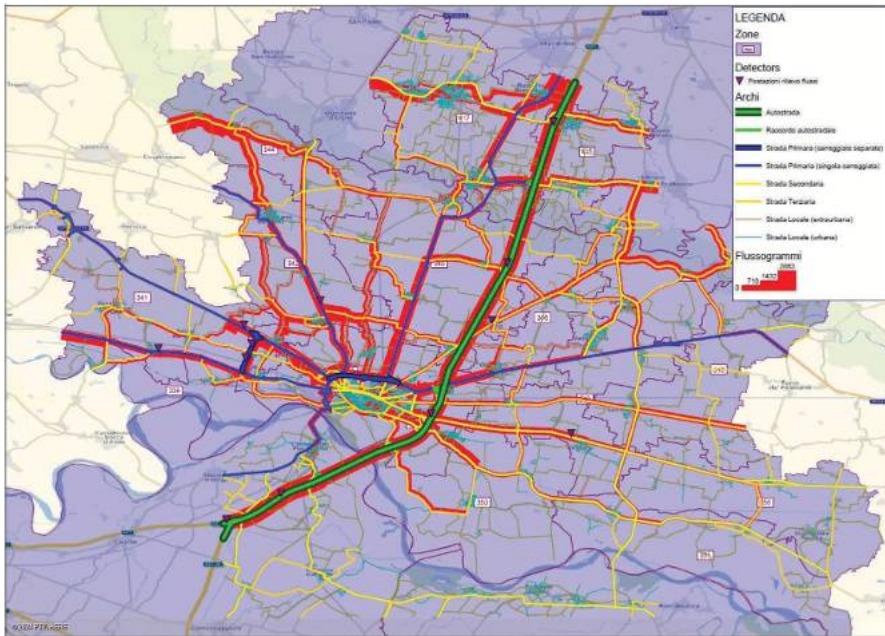


Figura 8.10 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di manufatto parzialmente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

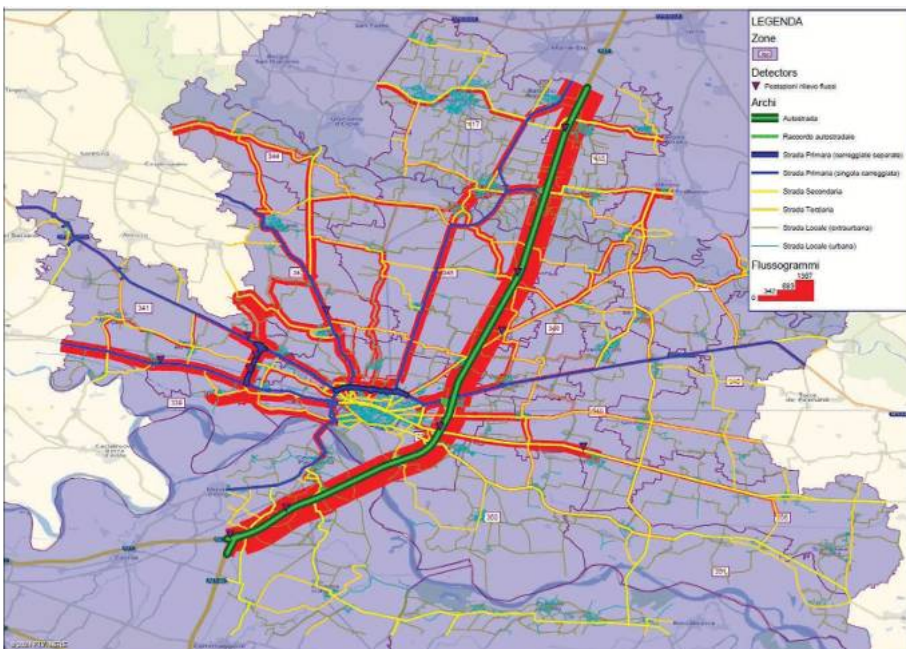


Figura 8.11 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di manufatto parzialmente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

Valutazione dei KPI sulla rete modellata

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A2**, per effettuare una valutazione quantitativa della resilienza della rete sono stati calcolati diversi **Key Performance Indicators (KPIs)** fondamentali, quali il tempo di percorrenza, la lunghezza dei percorsi e la velocità media degli spostamenti. Questi indicatori sono stati determinati sia in condizioni di rete scarica, adottando un approccio basato sulla connettività (**Connectivity-based**), sia in condizioni di rete carica, utilizzando un approccio basato sul livello di servizio (**Level of Service-based**).

Per analizzare l'impatto delle condizioni degradate, è stata calcolata la **variazione percentuale** dei KPIs tra lo scenario di base, in cui il manufatto è pienamente operativo, e gli scenari degradati, che prevedono la chiusura totale o parziale del manufatto.

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla completa chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1, fornendo una visione approfondita delle differenze nei parametri prestazionali della rete. Da un punto di vista globale, osservando le variazioni totali, i risultati evidenziano come la chiusura del manufatto impatti significativamente sui tempi di percorrenza e sulle velocità degli spostamenti, con un incremento dei tempi di viaggio e una conseguente diminuzione delle velocità. Questo effetto è dovuto principalmente alla ridotta velocità di percorrenza del tragitto alternativo, che sostituisce la viabilità autostradale, costringendo i veicoli a muoversi lungo strade meno scorrevoli. Inoltre, la variazione dei tempi e delle velocità è più marcata in condizioni di rete carica rispetto a quelle di rete scarica. Questa differenza suggerisce la possibilità di fenomeni di congestione del traffico, che derivano dalla deviazione dei flussi dalla rete autostradale verso la rete ordinaria, la quale presenta una capacità inferiore rispetto all'autostrada.

Un'ulteriore distinzione emerge quando si considerano i flussi di traffico tra passeggeri e merci. Infatti, le variazioni dei tempi e delle velocità risultano essere più accentuate per i veicoli merci rispetto ai passeggeri. Questo è dovuto al fatto che le autovetture, seppur costrette ad affrontare il percorso alternativo, hanno una maggiore capacità di adattarsi alle condizioni del traffico. Possono infatti evitare i tratti più congestionati, cercando soluzioni alternative, come il passaggio attraverso la rete urbana di Cremona anziché seguire la tangenziale. Al contrario, i veicoli pesanti, che devono seguire percorsi più rigidi e obbligati, sono meno flessibili nel trovare soluzioni alternative, aumentando così il loro tempo di percorrenza e il rischio di congestione.

La variazione della lunghezza del viaggio, invece, appare meno pronunciata, un aspetto che si spiega con il fatto che il percorso alternativo tra i caselli di Cremona e Castelvetro Piacentino risulta approssimativamente parallelo al tracciato autostradale dell'A21, con una differenza relativamente marginale in termini di distanza.

Analizzando in modo più dettagliato le variazioni riferite alle specifiche coppie origine/destinazione (OD), emerge che le relazioni più penalizzate sono quelle tra le zone esterne (flussi di attraversamento nord-sud, ossia da Piacenza e Parma verso Brescia, e viceversa) e quelle tra le zone esterne meridionali (Piacenza e Parma) e le zone interne dell'hinterland cremonese. L'impatto su queste coppie di flusso è immediatamente comprensibile nel caso

delle prime, in quanto la chiusura dell'A21, principale arteria di attraversamento, obbliga a deviazioni sulla viabilità ordinaria. Meno evidente, a prima vista, è l'impatto sulle coppie di flusso che coinvolgono l'hinterland cremonese. Tuttavia, l'analisi della rete stradale suggerisce che questo impatto è dovuto alla combinazione di due effetti: innanzitutto, la scomparsa di un collegamento rapido, autostradale, tra la città di Cremona e le province meridionali attraverso l'A21, e in secondo luogo, il peggioramento dei collegamenti attraverso la viabilità ordinaria, che si verifica a causa della congestione provocata dalla deviazione dell'intero flusso di traffico dalla A21 alla SS10. Quest'ultima, in particolare, è aggravata dal bisogno di aggirare il centro urbano di Cremona, con conseguenti ritardi e rallentamenti nel traffico che interessano la viabilità locale.

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla parziale chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1, offrendo ancora una panoramica approfondita delle differenze nei parametri prestazionali della rete.

In questo caso, le variazioni in termini di tempo di percorrenza, velocità e lunghezza dei percorsi sono decisamente inferiori, con una differenza di circa un ordine di grandezza, rispetto allo scenario di completa chiusura del manufatto. Questo dato conferma in modo quantitativo che la chiusura parziale del manufatto sull'A21 ha un impatto significativamente meno severo sulla viabilità rispetto alla chiusura totale. In particolare, l'utilizzo di una sola carreggiata per entrambe le direzioni di marcia non sembra provocare una congestione significativa dell'A21. Di conseguenza, l'impatto sulla viabilità ordinaria, che avrebbe potuto essere causato dalla deviazione dei flussi di traffico verso strade alternative, risulta essere trascurabile.

Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A3**, per analizzare l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione, sia parziale che totale, del manufatto, sono stati quantificati diversi **indicatori monetari**. Questi includono l'incremento dei costi associati ai tempi di viaggio, l'aumento dei costi operativi e l'incremento delle esternalità, come incidentalità stradale, emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ ed emissioni acustiche. Le analisi sono state condotte seguendo le formulazioni proposte da Ventura et al. (2022) e De Aloe et al. (2023) nel contesto delle analisi costi-benefici, utilizzando i valori marginali riportati in Tabella 8.4. I valori di riferimento, forniti dal MIT (2017), sono stati aggiornati al 2024 per tenere conto dell'inflazione, utilizzando i dati ISTAT.

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla completa chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1 (da Tabella A1-33 a Tabella A1-44). Dall'analisi emerge chiaramente che l'impatto maggiore è associato all'incremento dei costi legati ai tempi di viaggio, un effetto che risulta particolarmente accentuato per i veicoli merci rispetto a quelli dei passeggeri. Questo risultato è in linea con l'analisi dei KPI descritta nel paragrafo precedente, che ha evidenziato come la chiusura del manufatto abbia un impatto significativo sui tempi di percorrenza e sulle velocità, soprattutto per il traffico merci.

Tabella 8.4 Valori marginali utilizzati per la quantificazione degli indicatori monetari di impatto socioeconomico.

Parametro	Valore
Valore marginale del tempo [€/((veh equivalente*h))]	9.200
Costo operativo marginale [€/((veh equivalente*km))]	0.343
Costo marginale degli incidenti stradali [€/((veh equivalente*km))]	0.008
Costo marginale delle emissioni inquinanti [€/((veh equivalente*km))]	0.008
Costo marginale delle emissioni di CO ₂ [€/gCO ₂]	0.0001149
Emissioni marginali di CO ₂ [gCO ₂ /((veh equivalente*km))]	265
Costo marginale delle emissioni acustiche [€/((veh equivalente*km))]	0.012

Meno rilevanti, invece, risultano essere le variazioni dei costi operativi e delle esternalità. Anche questo risultato è coerente con le evidenze precedenti. Infatti, le variazioni delle esternalità sono strettamente legate alla lunghezza dei percorsi, che nel paragrafo precedente è stata dimostrata essere meno significativa rispetto alle variazioni di tempi e velocità. Complessivamente, l'analisi socioeconomica conferma l'importanza di mitigare gli impatti sulla viabilità, soprattutto per le categorie più sensibili come i veicoli merci, al fine di ridurre i costi derivanti da tempi di viaggio prolungati.

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla parziale chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1.

In questo contesto, le variazioni dei costi legati ai tempi di viaggio, dei costi operativi e delle esternalità si rivelano trascurabili. Questo risultato è in linea con quanto emerso nel paragrafo precedente, dove è stato evidenziato che le variazioni nei parametri prestazionali della rete, come tempo di percorrenza, velocità e lunghezza dei percorsi, sono nettamente inferiori, con differenze di circa un ordine di grandezza rispetto allo scenario di completa chiusura del manufatto.

La trascurabilità delle variazioni di costi operativi e delle esternalità è coerente con la stabilità della rete autostradale, che continua a funzionare seppur con capacità ridotta. In particolare, l'assenza di significative deviazioni del traffico verso la viabilità ordinaria evita fenomeni di congestione e limita gli impatti negativi sulle esternalità, come emissioni inquinanti e incidentalità stradale. Di conseguenza, l'adozione di una soluzione con carreggiata unica, anche se comporta lievi limitazioni operative, consente di minimizzare l'impatto socioeconomico complessivo dell'interruzione parziale, garantendo livelli di servizio adeguati sia per i veicoli merci che per quelli passeggeri.

8.1.5 Approccio basato su dati TomTom

Modellazione della domanda

In accordo con quanto indicato in **F2.A1**, la **domanda** è stata modellata anche con un approccio più "innovativo", attingendo dai **dati TomTom** (servizio *tomtom.move*). Come

nel caso precedente, è stata presa in esame la domanda relativa all'ora di massimo flusso (ora di punta 7:00-7:59) di un giorno feriale medio.

Per il caso di TomTom la distinzione tra flusso passeggeri e flusso merci non è possibile, per mancanza di penetrazione del dato. Questa limitazione obbliga ad analizzare una sola matrice OD unendo i dati delle autovetture e dei mezzi pesanti attraverso appositi coefficienti di omogenizzazione.

La matrice O/D risultante, riferita alle 16 zone interne e alle 3 zone esterne dell'area di studio, è riportata in Appendice 1.

La matrice espressa in Appendice 1 (Tabella A1-57) viene poi espansa all'universo usando un tasso di penetrazione medio calcolato sulle coppie origine-destinazione. Questo tasso può essere ricavato confrontando la matrice di TomTom con quella derivata dalla procedura di assegnazione e calibrazione di cui al paragrafo 8.1.4. In particolare, è possibile adottare la seguente espressione:

$$TP = \mu \left(\frac{V_{\{RLcal\}}^{\{OD\}}}{V_{\{TomTom\}}^{\{OD\}}} \right)$$

Dove:

- ↘ TP : tasso di penetrazione;
- ⊙ $V_{\{RLcal\}}^{\{OD\}}$: volume di traffico ottenuto dalla procedura di assegnazione e calibrazione di cui al paragrafo 8.1.4.4 per la generica coppia origine-destinazione;
- ⊙ $V_{\{TomTom\}}^{\{OD\}}$: volume di flusso di traffico fornito da TomTom per la generica coppia origine-destinazione.
- ↘ μ : media aritmetica tra tutte le coppie origine-destinazione del rapporto .

Nel calcolo del tasso di penetrazione sono state escluse le coppie origine-destinazione in cui il valore di flusso di traffico nell'ora di punta di TomTom risultasse superiore a quello della matrice calibrata. Infatti, la matrice di TomTom per definizione è parziale, mentre la seconda rappresenta tutti i veicoli in transito tra le coppie.

Per il caso in esame, risulta . La matrice OD, espansa usando il tasso di penetrazione pari a 10,57%, è rappresentata in Appendice 1.

Assegnazione della domanda di trasporto passeggeri e merci alla rete

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo 8.1.4, si è proceduto all'assegnazione della domanda proveniente dai dati TomTom. I passaggi adottati sono quelli descritti in **F3.A1**. Anche in questo caso si è adottato il **metodo incrementale**, scelto come compromesso tra costo computazionale e qualità della soluzione.

Ogni assegnazione è stata eseguita utilizzando 12 iterazioni, il numero massimo consentito dal software PTV Visum. Le iterazioni sono state distribuite sulla base di coefficienti di frazionamento della domanda predefiniti, con valori pari a:

$$p_n = [0.12, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08, 0.08]$$

Anche in questo caso sono state eseguite tre assegnazioni: una relativa allo scenario di base, una relativa allo scenario con manufatto completamente chiuso al traffico, ed una con manufatto parzialmente chiuso.

L'assegnazione per lo **scenario di base**, ossia quello corrispondente al **manufatto completamente operativo**, è stata utilizzata per analizzare lo stato attuale della rete e calibrare il modello di simulazione confrontandolo con i flussi di traffico osservati in corrispondenza di sezioni chiave. Dopo un numero significativo di iterazioni di **calibrazione**, i flussogrammi derivanti dall'assegnazione sono stati riportati in Figura 8.12.

Poiché dai dati TomTom non è possibile distinguere il traffico merci da quello passeggeri, in questa assegnazione essi sono stati omogeneizzati e sommati tra di loro.

Il confronto tra i flussi di traffico assegnati e quelli misurati sul campo, riportato in dettaglio in Appendice 1, mostra che anche utilizzando questa seconda fonte dati per la modellazione della domanda gli scarti rilevati sono relativamente contenuti. A supporto sono stati calcolati, in Tabella 8.5, **gli indicatori statistici di errore**, tra cui MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) e CoV (Coefficient of Variation). I valori degli indicatori, pur risultando superiori rispetto a quelli calcolati con il modello basato sui dati di Regione Lombardia, rimangono limitati, indicando l'adeguatezza del modello basato sulla domanda derivata dai dati TomTom.

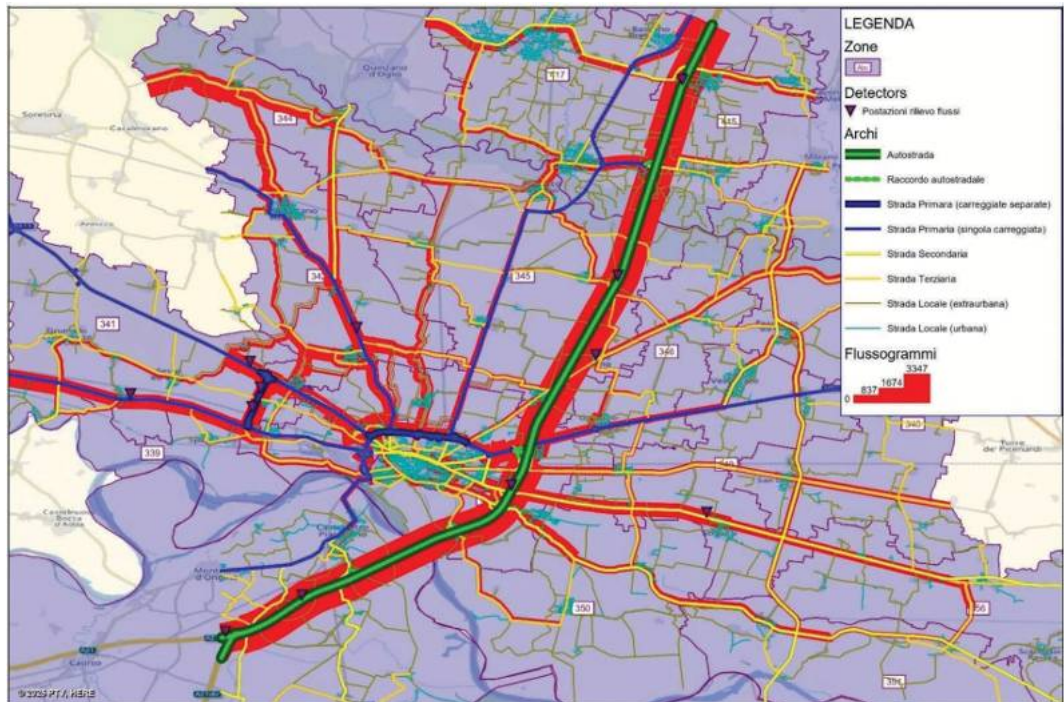


Figura 8.12 Risultati dell'assegnazione dei flussi dei veicoli secondo dati TomTom per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

Tabella 8.5 Metriche di errore (differenza tra flussi assegnati ed osservati) per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 1. I dati si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio.

Mean Absolute Error (MAE)	25.18
Root Mean Squared Error (RMSE)	48.34
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	0.0232
Coefficient of Variation (CoV)	0.0409

Successivamente, analogamente al paragrafo 8.1.4, si procede ad assegnare i flussi alla rete degradata. Il flussogramma rappresentato in Figura 8.13 riporta i risultati relativi allo **scenario di manufatto completamente chiuso**.

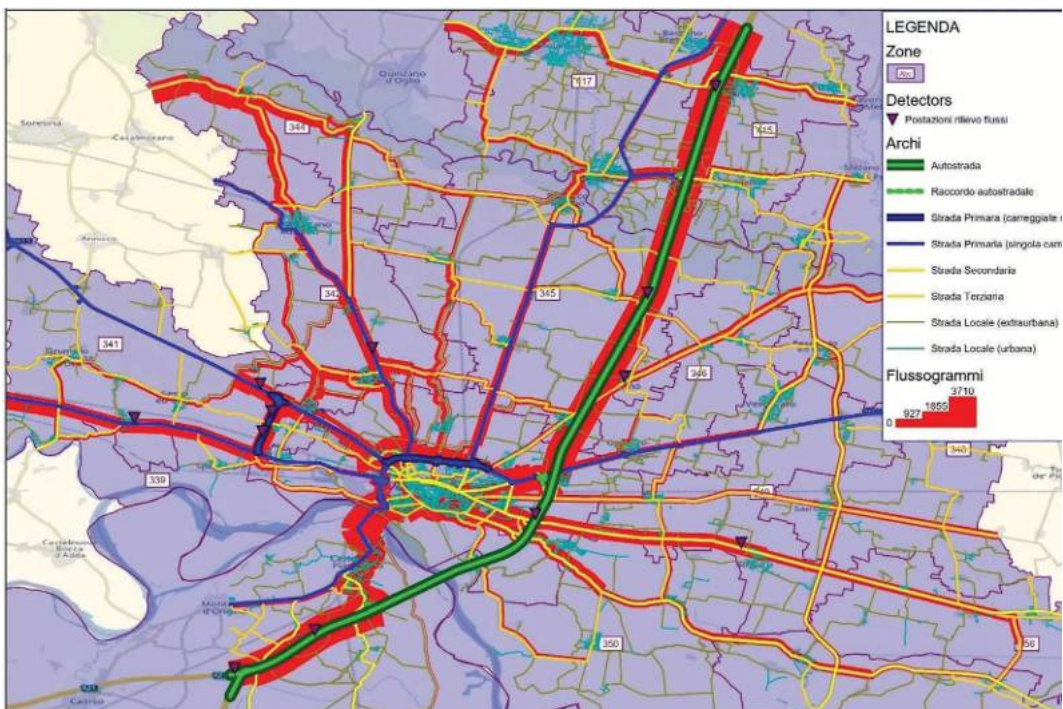


Figura 8.13 Risultati dell'assegnazione dei flussi dei veicoli secondo dati TomTom per lo scenario di manufatto completamente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

Le conclusioni che emergono da un'analisi qualitativa dei flussogrammi risultano coerenti con quelle ottenute utilizzando i dati di Regione Lombardia. Si tratta di un risultato positivo, poiché supporta la validità di una metodologia alternativa per l'analisi della domanda e la sua assegnazione, potenzialmente applicabile anche a territori esterni alla Regione Lombardia.

Infine, i flussogrammi relativi allo scenario di **manufatto parzialmente chiuso** sono rappresentati in Figura 8.14.

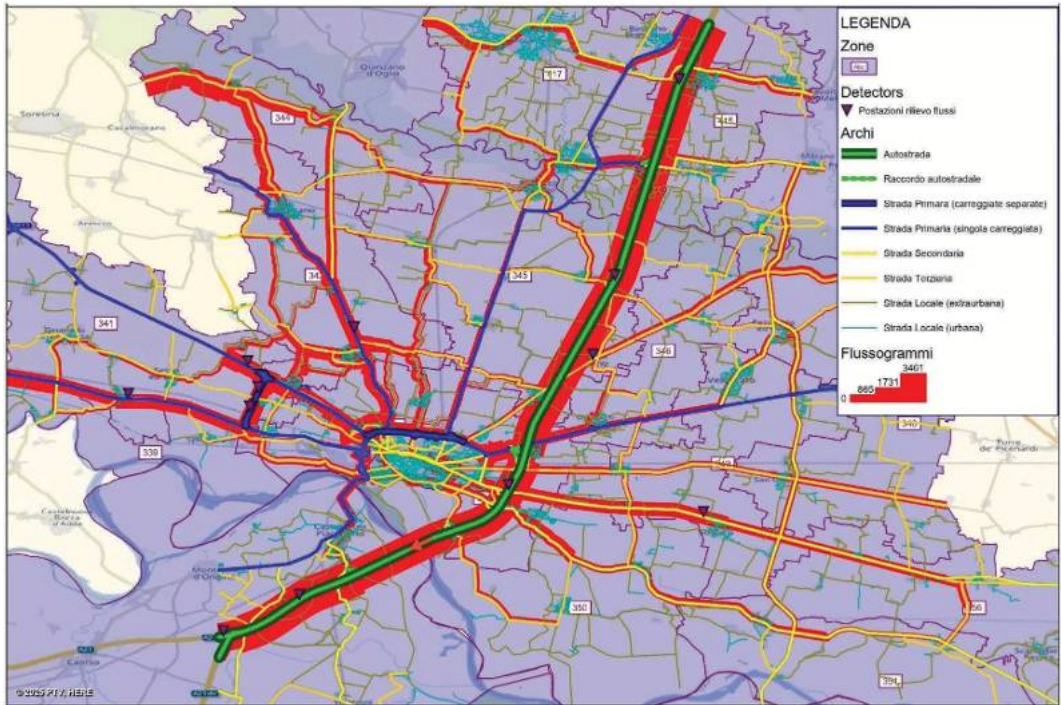


Figura 8.14 Risultati dell'assegnazione dei flussi dei veicoli secondo dati TomTom per lo scenario di manufatto parzialmente chiuso, relativi al Caso di Studio 1. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno ferialo medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

Valutazione dei KPI sulla rete modellata

Analogamente a quanto fatto per l'approccio basato sui dati di Regione Lombardia, sono stati estratti e valutati i principali **Key Performance Indicators (KPIs)**, ossia il tempo di percorrenza, la lunghezza dei percorsi e la velocità media degli spostamenti. Questi indicatori sono stati determinati sia in condizioni di rete scarica, adottando un approccio basato sulla connettività (**Connectivity-based**), sia in condizioni di rete carica, utilizzando un approccio basato sul livello di servizio (**Level of Service-based**). Si sono poi analizzate le differenze percentuali tra lo scenario base e quelli di manufatto parzialmente chiuso e completamente chiuso.

In prima analisi si osserva che **le tendenze generali rilevate con i dati TomTom sono coerenti con quelle ottenute utilizzando i dati di Regione Lombardia**. In linea con quanto descritto nel paragrafo 8.1.4, le velocità medie e i tempi di spostamento risultano maggiormente penalizzati nell'ipotesi di chiusura totale del manufatto, mentre nel caso di chiusura parziale l'impatto è meno importante. Inoltre, i peggioramenti sono più marcati negli scenari di rete carica rispetto a quelli di rete scarica.

A conferma dell'affidabilità dei dati GPS di TomTom, si segnala che **gli ordini di grandezza dei KPI sono analoghi a quelli ottenuti con i dati di Regione Lombardia**, rafforzando così la validità di entrambi i dataset. I dati TomTom risultano tuttavia leggermente sottodimensionati, a causa della limitata penetrazione nella specifica area di studio. In particolare, **si registra una sottostima di circa il 10% nei tempi complessivi di percorrenza e di circa il 30% nelle distanze complessive**.

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla chiusura totale del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1, offrendo ancora una panoramica approfondita delle differenze nei parametri prestazionali della rete.

Concentrandosi invece sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla parziale chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1, offrendo ancora una panoramica approfondita delle differenze nei parametri prestazionali della rete.

Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

Come nel caso precedente, si è proceduto con la **valutazione economica** secondo gli indicatori rappresentati in Tabella 8.4.

In Appendice 1 sono presentati gli impatti socioeconomici per lo scenario di manufatto completamente chiuso e per lo scenario di manufatto parzialmente chiuso.

Dal **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla chiusura completa** emerge che gli indicatori legati ai tempi di spostamento sono quelli che presentano il maggiore impatto economico, mentre le perdite dovute alla variazione delle distanze risultano più contenute.

Nel **confronto tra scenario aperto e scenario con chiusura parziale** è interessante osservare la presenza di alcuni guadagni negli indicatori legati alle distanze. Tali guadagni derivano dal fatto che il peggioramento generale tra le coppie OD non è sufficiente a compensare il miglioramento registrato in alcune coppie OD (e.g., Casalbuttano–Azzanello (zone 342–344) e Piacenza–Parma (zone 1470–1471)). In condizioni di normale funzionalità autostradale, il tragitto a minor costo generalizzato per queste coppie coincide con quello più veloce (che include l'autostrada A21), ma non con il più breve. Nel caso di chiusura parziale, parte della domanda non utilizza l'autostrada, riducendo così la lunghezza complessiva del percorso. Di conseguenza, i costi operativi e le esternalità legate alla lunghezza dei percorsi mostrano complessivamente un guadagno.

È inoltre interessante notare che, anche in questo caso, **le perdite e i guadagni socioeconomici risultano coerenti con i risultati ottenuti utilizzando le matrici di Regione Lombardia, confermando la validità dell'approccio basato su dati TomTom**.

Alla luce dei risultati dell'analisi dell'impatto socioeconomico, si può concludere che il manufatto oggetto di studio riveste un **ruolo cruciale per il mantenimento della funzionalità del sistema di trasporto stradale** nell'area di interesse. Di conseguenza, **gli interventi di gestione e manutenzione** devono essere considerati prioritari, con l'obiettivo di evitare

in ogni modo la chiusura totale del manufatto al traffico. Per garantire la continuità operativa della rete stradale e ridurre al minimo gli impatti socioeconomici, eventuali lavori di manutenzione che dovessero rendersi necessari nel corso della vita utile del manufatto dovrebbero essere pianificati in modo da **consentire il deflusso parziale del traffico su una sola carreggiata**. Questa configurazione, come dimostrato dai risultati, ha un impatto socioeconomico trascurabile sull'area di studio. Inoltre, una gestione attenta delle tempistiche e delle modalità di intervento permetterebbe di preservare livelli di servizio adeguati per i flussi veicolari, minimizzando i disagi sia per i veicoli merci sia per quelli passeggeri.

8.2 Caso di Studio 2: opera minore (lungo la SP50dir, presso Gavirate - VA)

8.2.1 Contesto di studio

Il secondo caso di studio riguarda un'opera **infrastrutturale minore: il ponte sul fiume Bardello situato lungo la SP50dir nel comune di Gavirate, in provincia di Varese** (Figura 8.15). Questo ponte, pur non presentando particolari peculiarità strutturali o funzionali, rappresenta un esempio significativo per valutare l'applicabilità della metodologia proposta anche in contesti di rilevanza locale.

In corrispondenza del sito la sezione stradale è costituita da singola carreggiata con una corsia di marcia per direzione (Figura 8.16). L'infrastruttura è rilevante per il traffico locale tra i comuni di Gavirate e Besozzo, permettendo di attraversare il fiume immissario nel lago di Varese (Bardello). A 1,2 km verso Sud è raggiungibile un secondo ponte che funge da alternativa permettendo anch'esso l'attraversamento del fiume Bardello.

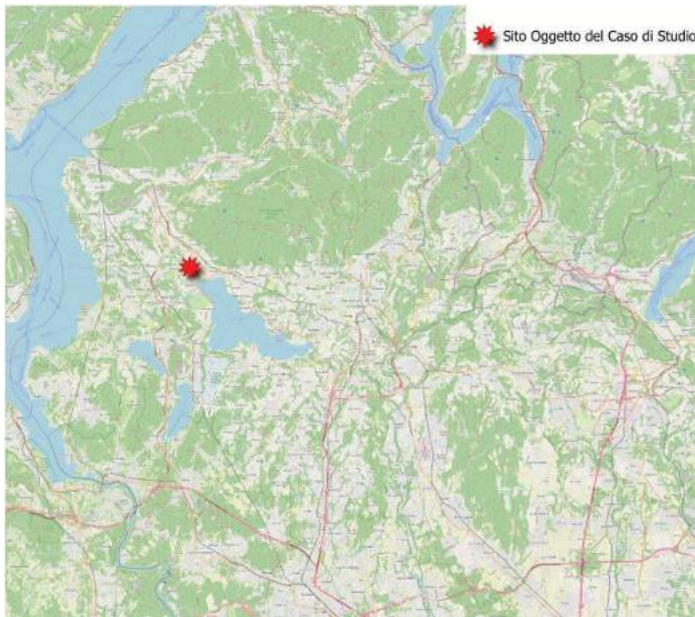


Figura 8.15 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 2.



Figura 8.16 Rappresentazione fotografica del sito considerato nel Caso di Studio 2 (fonte: Google Street View).

8.2.2 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A1**, è stata identificata l'**area di studio**, che come indicato in Figura 8.17, comprende un territorio di raggio di circa 15-20 km attorno al sito. La delimitazione dell'area è stata effettuata tenendo conto della configurazione della rete stradale, della presenza di percorsi alternativi al segmento oggetto di potenziale interruzione e dell'accessibilità ai principali centri urbani.

Dal punto di vista sociodemografico l'area di studio comprende la zona Nord della provincia di Varese e termina in corrispondenza dei relativi confini amministrativi, che vengono di seguito descritti in senso orario. A nord-est è delimitata dal limite amministrativo di Verbano-Cusio-Ossola, a nord-ovest confina con la Svizzera, a sud-ovest con la provincia di Como. L'area di studio termina nello sviluppo verso sud prima del limite amministrativo provinciale, in corrispondenza della cerchia di comuni di Somma Lombardo, Casorate Sempione, Besnate, Premezzo, Oggiona. A sud-est invece confina con la provincia di Novara.

Dal punto di vista orografico l'area di studio è molto variegata: nella zona nord l'area è costituita da montagne e vallate, che tendono a spianare scendendo di latitudine. Nella zona del centrale l'area è prevalentemente collinare o prealpina, e più a sud inizia la Pianura Padana.

Il territorio è ricco di fiumi e laghi. Il lago Maggiore delimita l'area di studio a nord-est, mentre il lago di Lugano delimita a nord-ovest. Altri laghi interni all'area di studio sono: il lago di Varese, lago di Manate, lago di Comabbio, lago di Gira ed il lago di Ganna. I fiumi principali che attraversano l'area sono il Ticino, l'Olona e il Tresa. Di secondaria importanza il Margorabbia, il Bardello e il Naviglio Grande. Il ponte oggetto del caso di studi si trova proprio sul Bardello che, lungo solo 7 km, è emissario del lago di Varese e sfocia nel lago Maggiore nel comune di Besozzo

8.2.3 Zonizzazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A2**, l'area di studio è stata zonizzata in unità territoriali. Come nel caso di studio 1, si è adottata la zonizzazione di Regione Lombardia e le zone passeggeri sono state uniformate con quelle merci per garantire la compatibilità e la coerenza del modello, nonché facilitare il confronto tra i risultati.

Complessivamente la zonizzazione ha prodotto **23 zone interne**. In questo caso specifico, poiché l'opera insiste su una tratta di viabilità secondaria, si è deciso di non modellare alcuna zona esterna, in quanto si ipotizza trascurabile l'impatto che il traffico di lunga percorrenza ha sul ponte. Le zone vengono elencate in Tabella 8.6 e cartografate in Figura 8.17.

Tabella 8.6 Elenco delle zone considerate nel Caso di Studio 2.

ID Zona	Descrizione zona
173	VARESE 1-VARESE 2-VARESE 3
174	VARESE 4-VARESE 5
175	ARCISATE-BISUSCHIO-INDUNO OLONA
181	AZZATE-BUGUGGIATE-GAZZADA - SCHIANNO
183	ALBIZZATE-CASTRONNO-JERAGO CON ORAGO-OGGIONA CON SANTO STEFANO-SOLBIATE ARNO
184	BESNATE-BRUNELLO-CAVARIA CON PREMEZZO-SUMIRAGO
186	BEDERO VALCUVIA-BRISAGO - VALTRAVAGLIA-CADEGLIANO - VICONAGO-CASSANO VALCUVIA-CREMENAGA-CUGLIATE - FABIASCO-FERRERA DI VARESE-GRANTOLA-LAVENNA PONTE TRESA-MESENZANA-MONTEGRINO VALTRAVAGLIA-VALGANNA-CUNARDO - MASCIAGO PRIMO-MARCHIROLO - MARZIO
188	AZZIO-BRINZIO-CASALZUIGNO-CASTELLO CABIAGLIO-CUVIO-ORINO-RANCIO VALCUVIA-CUVEGLIO - DUNO
192	BREZZO DI BEDERO-CASTELVECCANA-PORTO VALTRAVAGLIA
194	GERMIGNAGA-LUINO-AGRA - CURIGLIA CON MONTEVIASCO - DUMENZA-MACCAGNO CON PINO E VEDDASCA - TRONZANO LAGO MAGGIORE
195	LAVENO MOMBELLO-LEGGIUNO-MONVALLE
196	BRENTA-CARAVATE-CITTIGLIO-SANGIANO
197	BESOZZO-COCQUIO - TREVISAGO-GEMONIO
198	BARASSO-CASCIAGO-COMERIO-GAVIRATE-LUVINATE
199	BREBBIA-ISPRA-RANCO
200	ANGERA-TAINO-CADREZZATE - OSMATE
201	BARDELLO-BREGANO-MALGESSO
202	BIANDRONNO-CAZZAGO BRABBIA-TRAVEDONA - MONATE
203	COMABBIO-MERCALLO-TERNATE
204	BODIO LOMNAGO-CASALE LITTA-GALLIATE LOMBARDO-INARZO-VARANO BORGHI
205	CROSIO DELLA VALLE-DAVERIO-MORNAGO
206	GOLASECCA-SESTO CALENDE-VERGIATE
207	ARSAGO SEPRIO-CASORATE SEMPIONE-SOMMA LOMBARDO

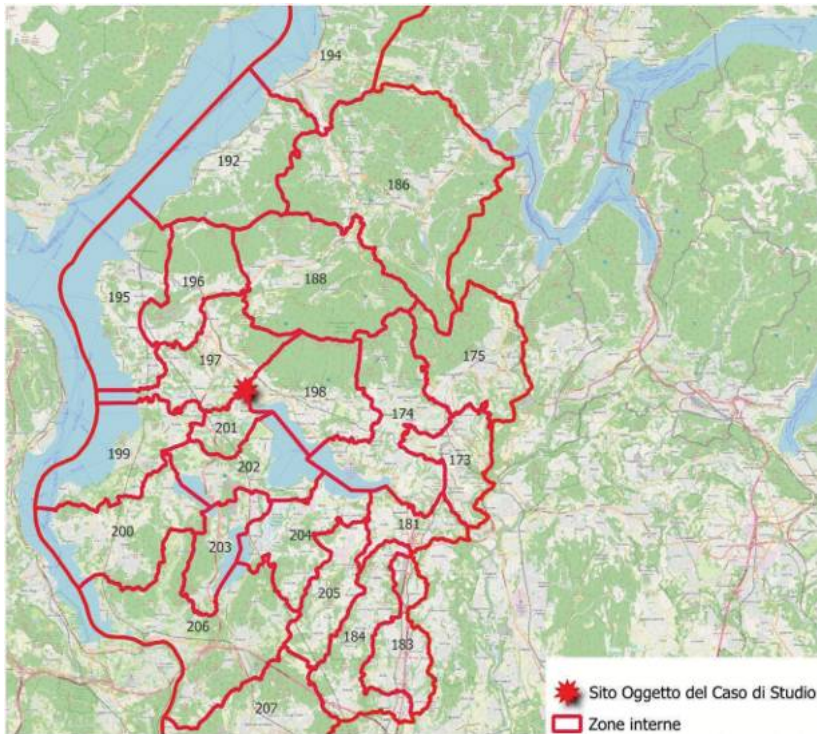


Figura 8.17 Individuazione planimetrica delle zone considerate nel caso di Studio 2.

8.2.4 Costruzione del grafo rappresentativo della rete di trasporti

In accordo con quanto indicato in **F1.A3**, la rete stradale è stata modellata attraverso la **costruzione di un grafo**. Il processo è articolato nelle tre fasi già descritte per il caso di studio 1, ossia: (i) estrazione dei dati da OSM; (ii) importazione dei dati nel software di modellazione PTV VISUM; (iii) impostazione degli attributi dei nodi e degli archi. Particolare attenzione è stata prestata alla correzione delle caratteristiche degli archi, tra le quali la velocità operativa, al fine di ottenere un grafo il più possibile rappresentativo della situazione attuale.

Il grafo risultante è rappresentato cartograficamente in Figura 8.18.

Analizzando la **rete stradale primaria** è possibile notare che le autostrade presenti nell'area di studio sono in corrispondenza del cordone e comprendono:

- ⊙ A8 – Autostrada dei laghi che collega Varese con Milano.
- ⊙ A60 – Tangenziale Sud di Varese
- ⊙ A8/A26 Dir. (E62) che collega Gattico-Gallarate fa parte della strada europea E62 che collega Nantes-Cholet (Francia), Losanna (Svizzera) e passando da Milano raggiunge Genova (Italia).

L'area è inoltre attraversata, in direzione prevalente nord-sud, da strade statali che terminano al confine con la Svizzera e costituiscono la rete stradale primaria:

- ⊙ SS692 collega la provincia di Novara con quella di Varese e termina nella SS394 che collega la città di Varese con il confine svizzero costeggiando il lago Maggiore.
- ⊙ SS233 Varese - Lavena Ponte Tresa (confine svizzero)
- ⊙ SS342 Varese - provincia di Como
- ⊙ SS344 Varese – Porto Ceresio (confine svizzero)
- ⊙ SS707 Gazzada -Varese (prolungamento della A8 autostrada dei Laghi)

Altre strade che appartengono alla rete primaria sono le seguenti provinciali, che si sviluppano sempre in direzione nord-sud:

- ⊙ SP1: Buguggiate-Cittiglio
- ⊙ SP69: Sesto Calende-Luino

La **rete stradale secondaria** che si aggiunge a quella primaria risulta ricca e con tracciati in direzione prevalentemente est-ovest. Nella zona nord dell'area di studio, dove il territorio è in maggior parte montuoso, la rete secondaria è meno sviluppata.

Il **ponte oggetto dello studio** si colloca sulla **SP 50dir**, che fa parte della viabilità secondaria e si sviluppa in direzione est-ovest da Ispra a Gavirate e permette l'attraversamento del fiume Bardello. Trattandosi di fiume di modesta sezione, sono presenti ponti alternativi nelle immediate vicinanze del primo ponte, ossia:

- ⊙ Un ponte lungo viale Ticino (SP50), circa 1km a sud.
- ⊙ Un ponte sull'SS629, circa 2 km a nord.

La configurazione mostra che **le alternative per l'attraversamento dell'ostacolo sono a breve distanza tra loro**; di conseguenza, ci si aspetta che l'impatto della chiusura del ponte sulla performance della rete stradale locale sia limitato.

È probabile che la viabilità venga redistribuita principalmente sul ponte lungo la SP50, che consente l'accesso alla rete viaria principale (SP1).

Comunque, sarà necessario analizzare più approfonditamente la rete per comprendere se gli eventuali effetti della chiusura riguardino solo le coppie origine/destinazione dell'area ristretta o se possano influenzare un bacino d'utenza più ampio.

A differenza di quanto fatto per il caso di studio 1, i dati provenienti da TomTom non sono stati acquisiti per il caso di studio 2, in un'ottica di parsimonia nell'impiego delle risorse economiche, considerando la minore rilevanza dell'opera in esame.

Di conseguenza, **l'applicazione delle fasi F2, F3 e F4 è presentata esclusivamente sulla base delle matrici O/D fornite da Regione Lombardia.**

8.2.5 Modellazione della domanda passeggeri

In accordo con quanto indicato in F2.A1, la **domanda di passeggeri** è stata modellata attingendo dalla **matrice O/D passeggeri** (proiezione al 2020) fornita da **Regione Lombardia**



Figura 8.18 Rappresentazione cartografica del grafo modellato per il Caso di Studio 2 (software PTV Visum), con indicazione dei nomi delle strade appartenenti alla rete primaria e principale.

(Regione Lombardia, 2024). Per garantire un approccio conservativo, è stata presa in esame la domanda relativa all'ora di massimo flusso (ora di punta) di un giorno feriale medio, individuata, attraverso un'analisi preliminare dei dati, nell'intervallo compreso tra le 7:00 e le 7:59. A fini semplificativi sono stati estratti come modalità di trasporto solo gli spostamenti effettuati come **conducente d'auto**, includendo tutti i motivi di spostamento. Trattandosi di autovetture, è stato applicato un coefficiente di omogeneizzazione unitario. In Appendice 1 è riportata la matrice O/D risultante.

8.2.6 Modellazione della domanda merci

Similmente, in accordo con quanto indicato in F2.A2, la **domanda merci** è stata modellata utilizzando la **matrice O/D merci** (proiezione al 2020) fornita da **Regione Lombardia** (Regione Lombardia, 2024). Per garantire un'analisi conservativa, è stata considerata la domanda riferita all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio. Nell'analisi sono stati inclusi tutti i tipi di veicoli classificati nelle categorie N1, N2 e N3, secondo l'art. 47 del Codice della Strada (D.Lgs. n. 285/1992 e s.m.). Per assicurare la comparabilità dei dati con quelli relativi alla domanda passeggeri, i flussi sono stati convertiti in veicoli equivalenti (alle autovetture), applicando coefficienti di omogeneizzazione pari a 1.5 per i veicoli del-

la categoria N1, 2,5 per quelli della categoria N2 e 5 per quelli della categoria N3. Questi coefficienti, ispirati a quelli proposti da ANAS, riflettono il diverso impatto di ciascuna tipologia di veicolo sul traffico stradale in termini di dimensioni, peso, occupazione della carreggiata ed esternalità ambientali.

Poiché nell'area di studio il traffico merci, secondo i dati di Regione Lombardia, risulta poco intenso (con valori spesso nulli tra le coppie O/D), si è deciso di adottare un valore unitario per le coppie origine-destinazione con flussi inferiori a 0,1.

Questa scelta, orientata al miglioramento delle prestazioni modellistiche, ha l'obiettivo di aumentare l'adattabilità della matrice O/D alla rete esistente e ai dati rilevati sulle sezioni stradali, e quindi, in ultima istanza, facilitare la convergenza del processo di calibrazione previsto in F3.A1.

La matrice O/D risultante, riferita alle 23 zone interne dell'area di studio, è riportata in Appendice 1.

8.2.7 Flussi di traffico passeggeri e merci osservati

In aggiunta alle matrici O/D, la modellazione della domanda è stata ulteriormente arricchita tramite l'integrazione di **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di sezioni significative, individuate lungo segmenti chiave del grafo stradale (Figura 8.19).

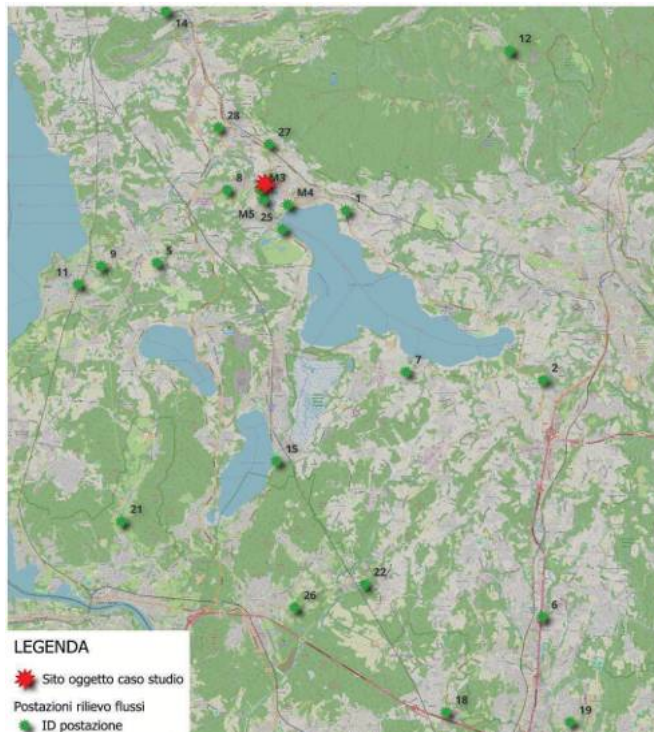


Figura 8.19 Individuazione planimetrica delle postazioni per il rilievo dei flussi di traffico, relative al Caso di Studio 2.

I dati sono stati reperiti in parte attraverso il database della Provincia di Varese (Provincia di Varese, 2025) ed in parte tramite rilievi manuali in loco nella zona limitrofa al ponte.

Per garantire la confrontabilità e l'aderenza al modello, i dati sono stati omogeneizzati applicando i coefficienti proposti da ANAS (Tabella 8.2).

8.2.8 Assegnazione della domanda di trasporti

Come descritto in **F3.A1** l'assegnazione della domanda alla rete stradale rappresenta un passaggio cruciale per la simulazione dell'operatività della rete sia in condizioni normali che degradate. Anche in questo secondo caso di studio si è adottato il **metodo incrementale**

Ogni assegnazione è stata eseguita utilizzando 12 iterazioni, il numero massimo consentito dal software PTV Visum. Le iterazioni sono state distribuite sulla base di coefficienti di frazionamento della domanda predefiniti, con valori pari a:

Questo schema permette di distribuire progressivamente i flussi sulla rete, tenendo conto dell'evoluzione della congestione.

Sono state eseguite **due assegnazioni**: una relativa allo **scenario di base** e una relativa allo **scenario di rete degradata con il ponte completamente chiuso** al traffico.

L'assegnazione per lo scenario di base è stata adottata anche per la calibrazione del modello, confrontando i flussi previsti con i dati reali di traffico nelle sezioni note. Dopo **dieci iterazioni di calibrazione** sono stati ottenuti i risultati da Figura 8.20 a Figura 8.23.

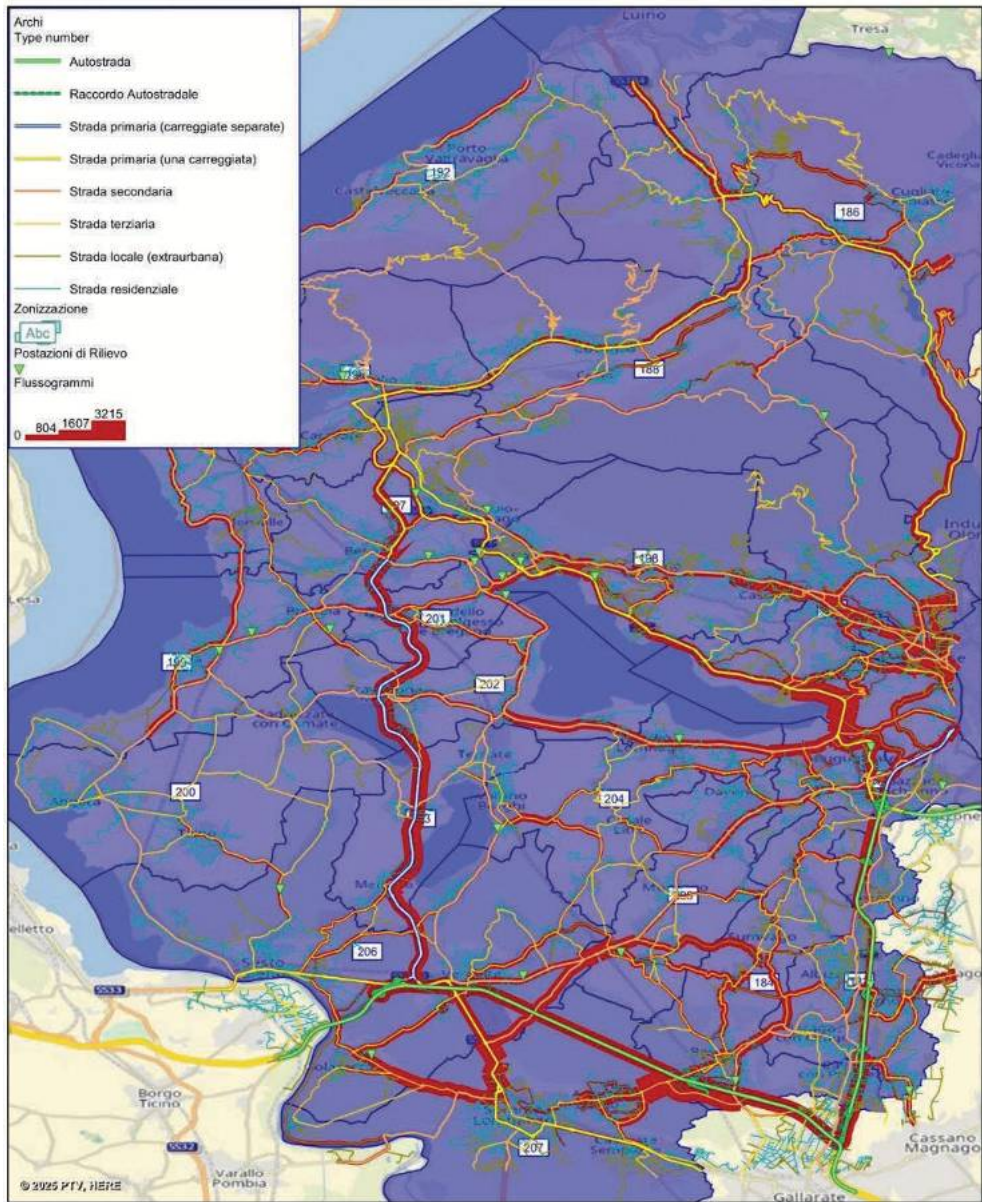


Figura 8.20 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 2. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

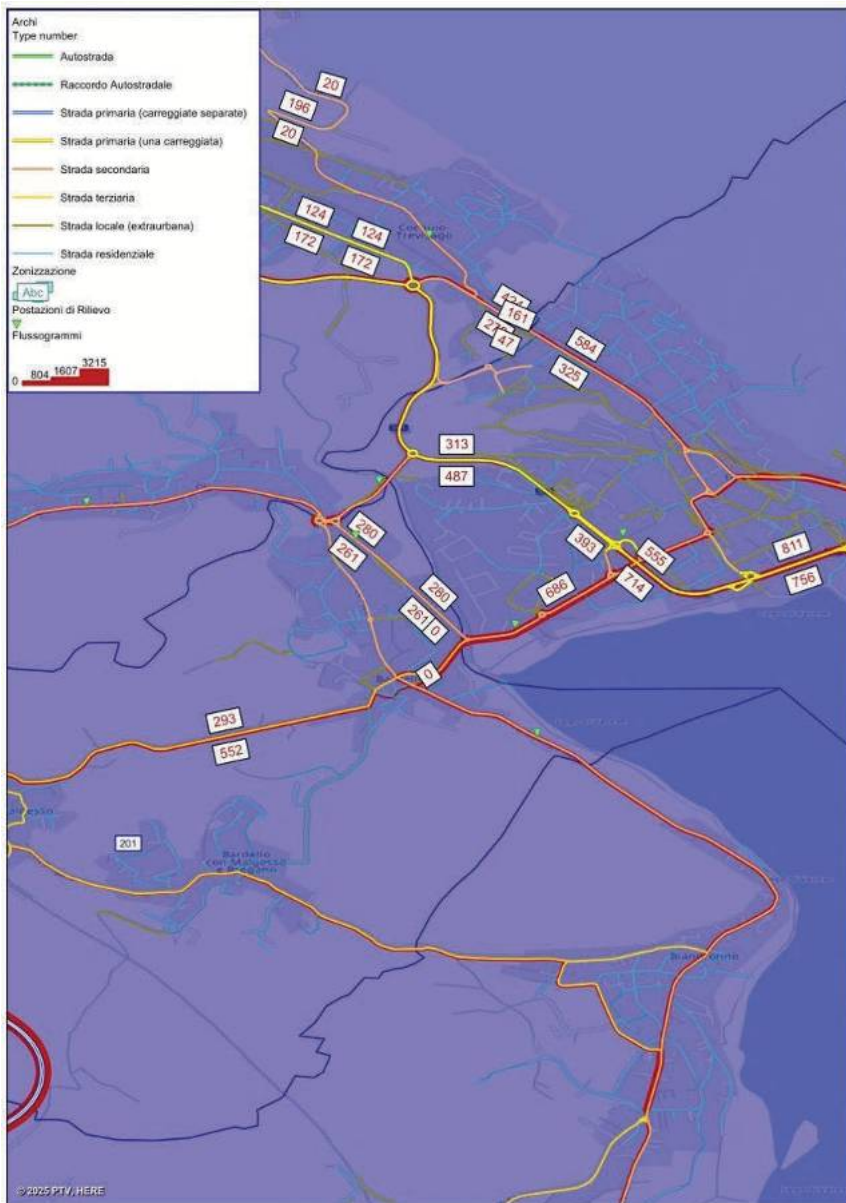


Figura 8.21 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 2. Dettaglio relativo all'area circostante il ponte. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno ferialo medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

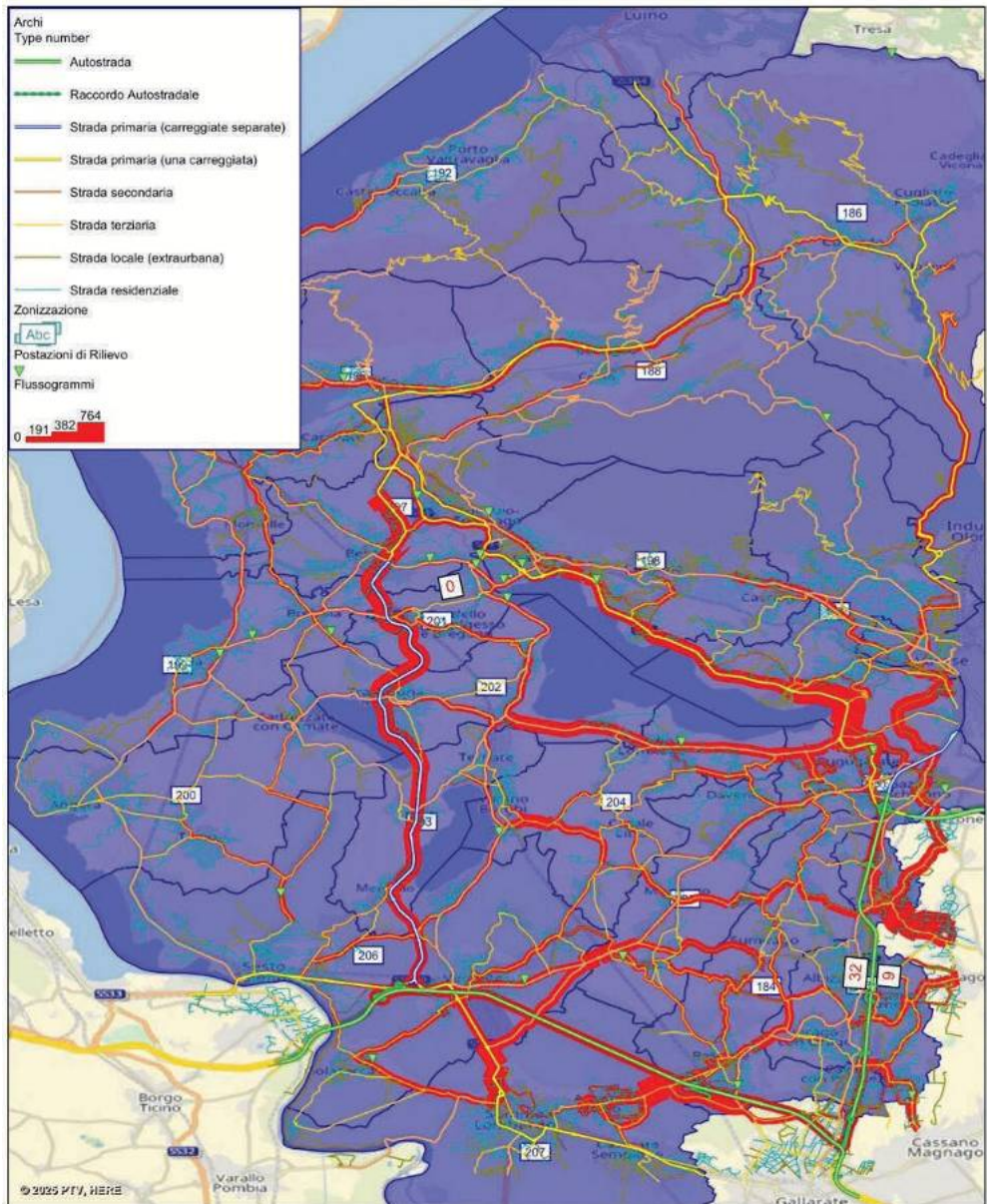


Figura 8.22 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 2. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

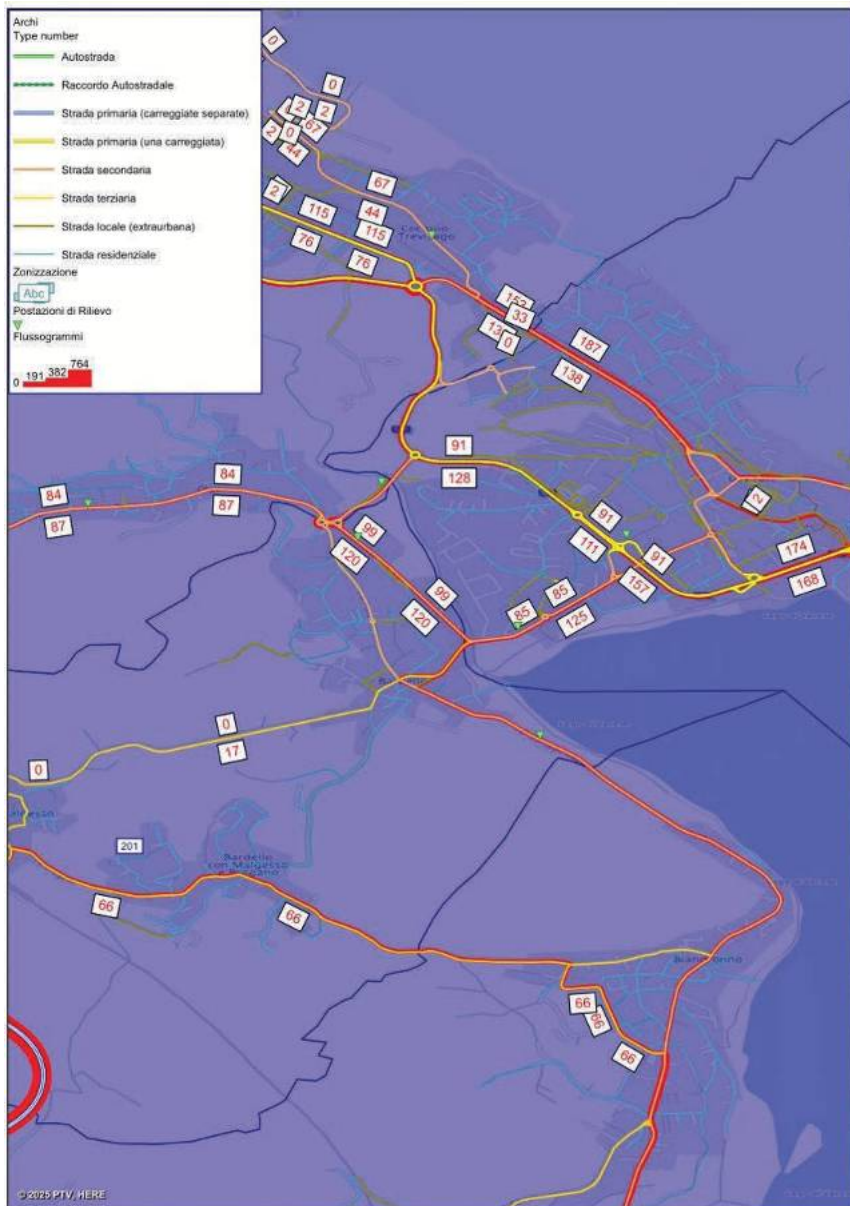


Figura 8.23 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di manufatto chiuso, relativi al Caso di Studio 2. Dettaglio relativo all'area circostante il ponte. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

Come nel caso di studio 1, è stato eseguito un confronto diretto tra i flussi di traffico assegnati dal modello e quelli effettivamente rilevati sul campo e calcolate le metriche di errore MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) e CoV (Coefficient of Variation).

Come si può notare in Tabella 8.7 i valori delle metriche di errore rimangono contenuti sia per i passeggeri che per le merci. Ciò supporta la coerenza del modello rispetto allo scenario attuale, ma anche la sua applicabilità negli scenari simulati.

Tabella 8.7 Metriche di errore (differenza tra flussi assegnati ed osservati) per lo scenario di manufatto aperto, relativi al Caso di Studio 2. I dati si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio.

	Passeggeri	Merci
MAE	89.68	23.15
RMSE	128.79	37.74
MAPE	18.97%	19.50%
CoV	0.2710	0.3054

È interessante osservare come l'errore assoluto mantenga un ordine di grandezza comparabile a quello riscontrato nel caso di studio 1. Tuttavia, l'errore relativo risulta più elevato, verosimilmente a causa della maggiore variabilità percentuale introdotta da flussi di traffico complessivamente più bassi sulla rete stradale.

Successivamente, per valutare l'importanza strategica del manufatto oggetto di studio, è stata effettuata un'assegnazione con **rete degradata** con l'ipotesi di **chiusura totale del ponte**.

Da Figura 8.24 a Figura 8.27 sono riportati i flussogrammi derivanti dall'assegnazione per il traffico passeggeri e per il traffico merci, rispettivamente.

L'analisi qualitativa dei flussogrammi non evidenzia variazioni rilevanti nei valori dei flussi di traffico nello scenario degradato.

Tuttavia, concentrandosi sull'area limitrofa al ponte, si osserva una redistribuzione dei flussi sulla rete secondaria adiacente. In particolare, si registra un incremento del traffico sul ponte immediatamente a sud (SP50 – viale Ticino), che funge da principale via alternativa. Tale incremento comporta un peggioramento delle condizioni di circolazione, con ritardi e perdite di tempo rilevanti presso le intersezioni prossime al ponte.

Al contrario, l'altro ponte alternativo mostra variazioni di flusso trascurabili, verosimilmente perché il percorso associato è percepito come meno competitivo in termini di tempi di percorrenza o accessibilità.

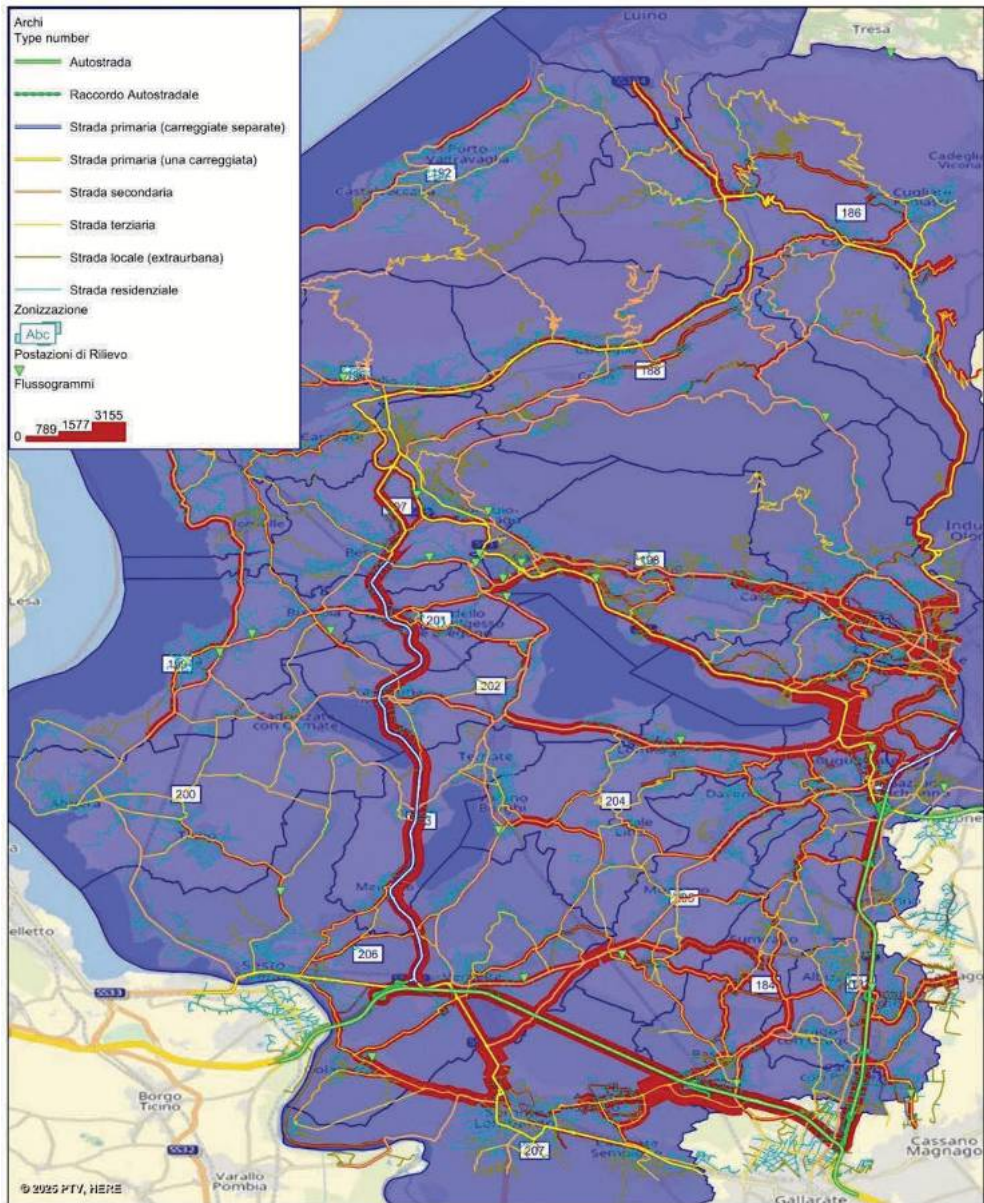


Figura 8.24 Risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di chiusura, relativi al Caso di Studio 2. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

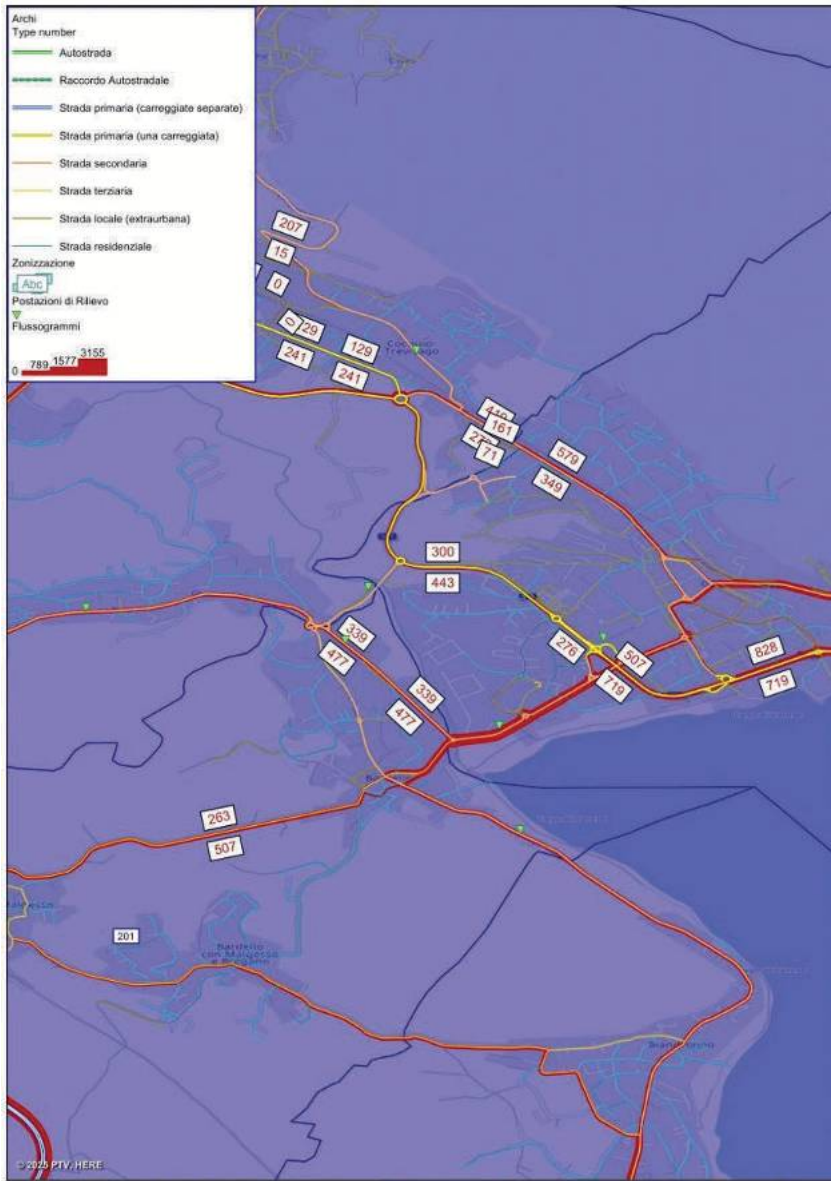


Figura 8.25 Zoom su area del ponte in risultati dell'assegnazione dei flussi passeggeri per lo scenario di chiusura, relativi al Caso di Studio 2. Dettaglio relativo all'area circostante il ponte. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno ferialo medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

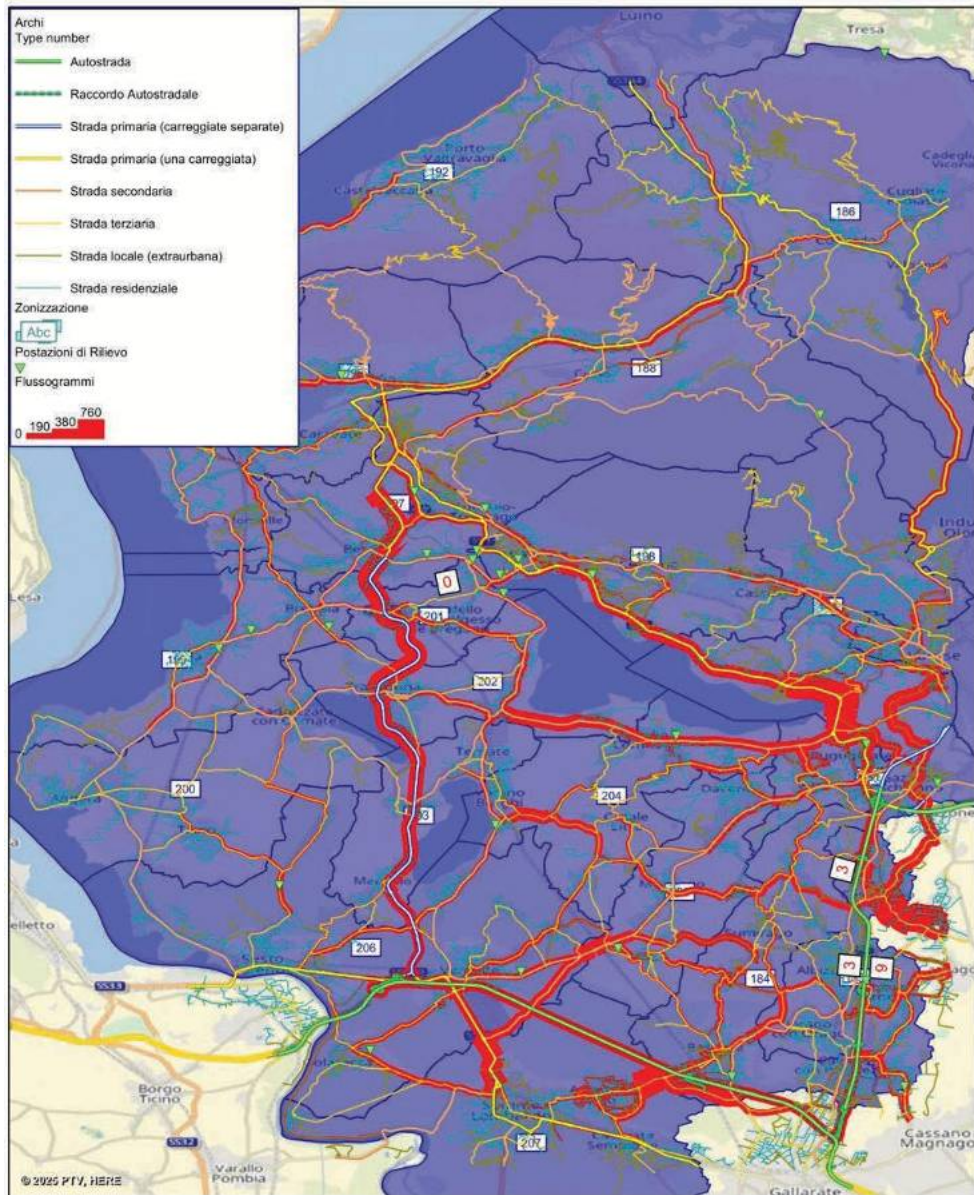


Figura 8.26 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di chiusura, relativi al Caso di Studio 2. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

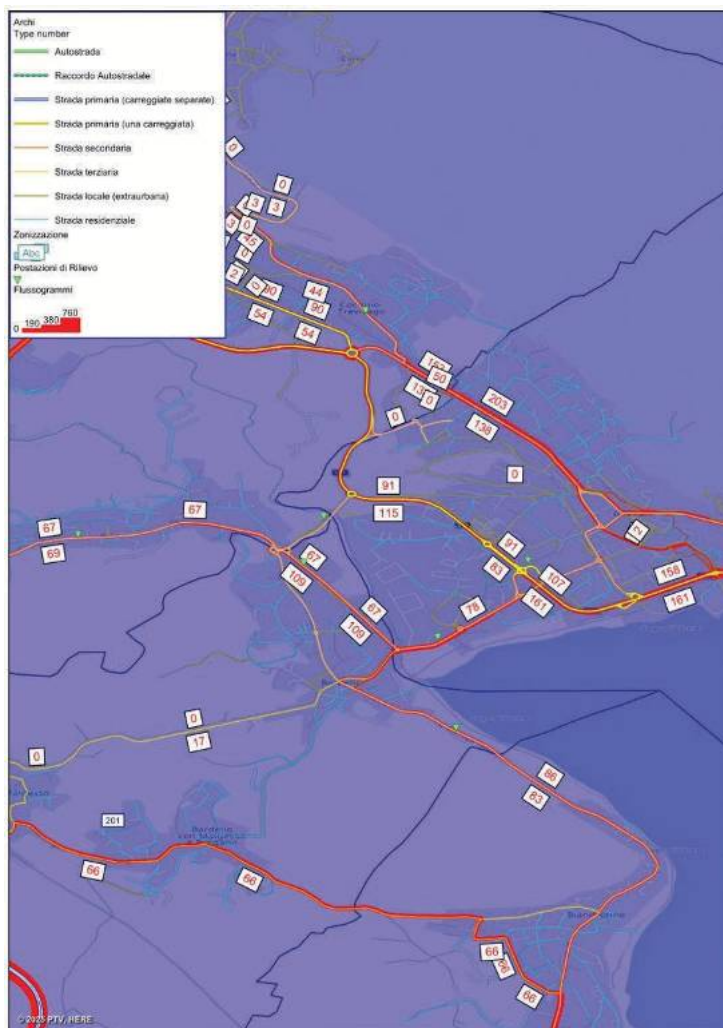


Figura 8.27 Risultati dell'assegnazione dei flussi merci per lo scenario di chiusura, relativi al Caso di Studio 2. Dettaglio relativo all'area circostante il ponte. I flussi si riferiscono all'ora di punta (7:00-7:59) di un giorno feriale medio e sono espressi in [veicoli equivalenti/h].

8.2.9 Valutazione dei KPI sulla rete modellata

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A2**, come già fatto per il caso di studio 1, sono stati calcolati diversi **Key Performance Indicators (KPIs)** fondamentali, quali il tempo di percorrenza, la lunghezza dei percorsi e la velocità media degli spostamenti. Questi indicatori sono stati determinati sia in condizioni di rete scarica, adottando un approccio basato sulla connettività (**Connectivity-based**), sia in condizioni di rete carica, utilizzando un approccio basato sul livello di servizio (**Level of Service-based**).

Per analizzare l'impatto delle condizioni degradate, è stata calcolata la **variazione percentuale** dei KPIs tra lo scenario di base, in cui il manufatto è pienamente operativo, e lo scenario degradato, che prevede la chiusura totale del manufatto.

In Appendice 1 sono riportate in dettaglio le variazioni relative ai flussi passeggeri e ai flussi merci.

Nel caso di **rete scarica**, le **variazioni dei KPI risultano mediamente meno pronunciate** rispetto agli scenari con rete carica. I **tempi totali di spostamento** dal punto di vista dei passeggeri peggiorano in direzione nord-sud, in particolare tra le coppie localizzate a sud del lago di Varese (181, 204, 205) e quelle a nord del punto di chiusura del ponte (196, 181). Un comportamento analogo si osserva per la **velocità media**, che tende a diminuire. Questo effetto è attribuibile alla chiusura del ponte sulla SP50dir, che penalizza l'utilizzo della SP1var, normalmente impiegata per evitare l'attraversamento dei centri abitati di Trevisago e Gavirate.

Le distanze totali percorse aumentano invece tra le zone 174–175 (a est del lago di Varese) e le zone 198–199–200–201 (a ovest del lago), con un peggioramento generalizzato anche per le zone adiacenti al punto di chiusura (197–201), sia in origine che in destinazione.

Alcuni miglioramenti nei tempi e nelle distanze totali si osservano nelle zone periferiche al cordone (207 e 183), dovuti alla riorganizzazione dei percorsi che, in alcuni casi, favorisce collegamenti più brevi tra zone interne (es. 174 e 199–201–202) e le zone esterne.

Le aree pianeggianti, mediamente più popolate, generano un volume maggiore di scambi passeggeri e commerciali. Poiché i tempi e le distanze totali di spostamento sono proporzionali ai flussi, l'impatto delle zone 207, 183, 184, 205, 204, 173 e 206 sulle matrici aggregate risulta più marcato.

Dal punto di vista delle distanze totali, i risultati relativi al traffico merci sono in larga parte sovrapponibili a quelli del traffico passeggeri, in quanto la rete non presenta estese aree soggette a divieti per mezzi pesanti (HGV – Heavy Goods Vehicles).

Nel caso di **rete carica**, le **variazioni risultano più marcate**, con peggioramenti coerenti tra tempi di spostamento totali e velocità medie. In particolare, si rilevano impatti significativi:

- ⊙ in direzione est-ovest tra le zone 174–175 e 198–199–200–201;
- ⊙ nelle tre zone adiacenti al ponte chiuso (197, 198, 201);
- ⊙ in direzione nord-sud tra le zone 207–206 e 196–188–202, soprattutto in termini di velocità media.

Permangono alcuni miglioramenti anche nello scenario a rete carica, attribuibili alla redistribuzione non lineare dei flussi al cordone (207, 183, 173).

Tali andamenti si confermano anche per il traffico merci.

Complessivamente, i peggioramenti osservati nello scenario del caso di studio 2 risultano di entità contenuta e notevolmente inferiori rispetto a quelli del caso di studio 1, confermando la natura locale degli impatti associati alla chiusura del ponte analizzato.

8.2.10 Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità d'intervento

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A3**, per analizzare l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione, sia parziale che totale, del manufatto, sono stati quantificati diversi **indicatori monetari**. Questi includono l'incremento dei costi associati ai tempi di viaggio, l'aumento dei costi operativi e l'incremento delle esternalità, come incidentalità stradale, emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ ed emissioni acustiche. Come per il caso studio 1, le analisi sono state condotte seguendo le formulazioni proposte da Ventura et al. (2022) e De Aloe et al. (2023) nel contesto delle analisi Costi-Benefici, utilizzando i valori marginali riportati in Tabella 8.4. I valori di riferimento, forniti dal MIT (2017), sono stati aggiornati al 2024 per tenere conto dell'inflazione, utilizzando i dati ISTAT

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati in Appendice 1.

Nel complesso, l'impatto della chiusura del ponte sull'area di studio non comporta un danno economico rilevante. Ciò è dovuto al fatto che sia i flussi locali, sia quelli di attraversamento a lunga percorrenza nell'intorno del ponte risultano limitati. Di conseguenza, l'effetto socio-economico della chiusura è pressoché trascurabile, sia per il traffico passeggeri che per quello merci.

Tale evidenza è giustificata dalla collocazione del ponte su una **rete viaria secondaria**, in un contesto in cui **esistono alternative di attraversamento del fiume Bardello a breve distanza**. Inoltre, poiché i volumi di traffico, anche nelle ore di punta, non risultano elevati, le vie alternative si dimostrano sufficientemente capaci di assorbire la domanda, garantendo buone prestazioni complessive della rete.

Questo dimostra che il ponte non è strategico per il territorio, e la sua chiusura non genera perdite ingenti per la performance della rete.

Tuttavia, per ridurre ulteriormente le poco ingenti perdite nei comuni confinanti all'area di chiusura, si consiglia di pianificare eventuali chiusure negli orari di morbida, per evitare blocchi stradali e perditempo nelle intersezioni in prossimità del ponte.

8.3 Caso di Studio 3: rete secondaria lungo la SP29 presso Corchiano (VT)

Il terzo caso di studio analizza un'opera d'arte sulla rete stradale minore: un ponte sulle Forre di Corchiano, situato lungo la SP29 nel comune di Corchiano, in provincia di Viterbo (Figura 8.28). Il ponte oggetto di intervento e per il quale, nel presente esempio applicativo, si ipotizza la completa esclusione dal servizio, è alle Coordinate Latitudine 42.34368 e Longitudine 12.356697, presenta una carreggiata bidirezionale a due corsie totali (Figura 8.29) ed è elemento cruciale di collegamento tra le due parti del paese che sono disposte a Nord e a Sud delle Forre, nonché percorso ordinario di collegamento intercomunale tra le aree di Civita Castellana e Vignanello/Vasanello.



Figura 8.28 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 3.



Figura 8.29 Rappresentazione prospettica del sito considerato nel Caso di Studio 3 (fonte: Google Street View).

8.3.1 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in F1.A1, è stata identificata l'area di studio, che si estende per circa 15-20 km attorno al sito (Figura 8.30). La delimitazione dell'area è stata effettuata

tenendo conto della configurazione della rete stradale, della presenza di percorsi alternativi al segmento oggetto di potenziale interruzione e dell'accessibilità ai principali centri urbani.

Dal punto di vista sociodemografico, l'area vasta attorno al sito comprende il capoluogo Viterbo e i paesi nel quadrante Sud-Est della sua provincia, includendo il tratto dell'autostrada A1 che costituisce il collegamento con la viabilità principale per le relazioni di traffico a lunga percorrenza. I principali centri urbani di interesse per le interazioni di traffico sono, oltre al capoluogo provinciale, i paesi di Vitorchiano, Soriano nel Cimino, Orte, Nepi, Capranica e Vetralla, nonché, in un circondario di maggiore prossimità, Vignanello, Vasanello, Gallese, Civita Castellana e Fabrica di Roma. A questi centri abitati si aggiungono numerosi insediamenti industriali volti alla produzione di ceramiche, che generano un traffico di mezzi di grande dimensione e portata, nonché attività agricole di una certa rilevanza.

Dal punto di vista orografico, l'area di studio è caratterizzata da un territorio collinare con importanti incisioni superate da opere di scavalco a volte di luce non modesta.

In accordo con quanto indicato in **F1.A1**, l'area di studio è stata circoscritta curando di rappresentare l'ambito territoriale dove si ipotizza si esauriscano la maggior parte degli effetti prodotti dall'interruzione del manufatto. Dal punto di vista pratico, anche prescindendo dai dati di traffico dettagliati e dai tempi di percorrenza, è possibile delineare l'area di studio attraverso un'analisi basata su fattori strutturali e qualitativi:

1. **Valutazione della rete infrastrutturale e della connessione con aree adiacenti:** L'analisi qualitativa della rete ha permesso di identificare le principali strade, snodi, e infrastrutture grazie alla semplice osservazione delle carte stradali.



Figura 8.30 Rappresentazione planimetrica dell'area di studio e della rete infrastrutturale (fonte: Open Street Map).



Figura 8.32 Localizzazione di dettaglio del manufatto.

- ◎ Disponibilità e qualità delle alternative di percorso: I percorsi alternativi che principalmente potrebbero fungere da deviazioni in seguito all'interruzione del manufatto e che devono essere sottoposti a verifica di percorribilità, soprattutto da parte dei mezzi di maggiori dimensioni, sono deducibili dall'analisi topologica eseguita. Se si considera il traffico di attraversamento di Corchiano, quello che presumibilmente tende a raggiungere la SP25a Variante di Canepine (Figura 8.33), le alternative possono essere così elencate, in ordine di allungamento di percorso:



Figura 8.33 Deviazione del traffico di attraversamento di Corchiano.

- reindirizzamento in loco, a partire dall'ultimo incrocio antecedente il ponte interrotto, percorrendo la diramazione Ovest della SP29 e la SP71 per poi riprendere

il percorso normale con la SP72 e la SP28 (frecche rosse in figura); idem per la relazione di traffico inversa. Considerate le difficoltà delle particolari geometrie di due degli incroci presenti su questo percorso, può essere esaminata, soprattutto per la direzione Sud-Nord, anche un'alternativa di rientro nel centro abitato di Corchiano per utilizzare il tratto urbano della SP73 (alternativa individuata in blu in Figura 8.34).

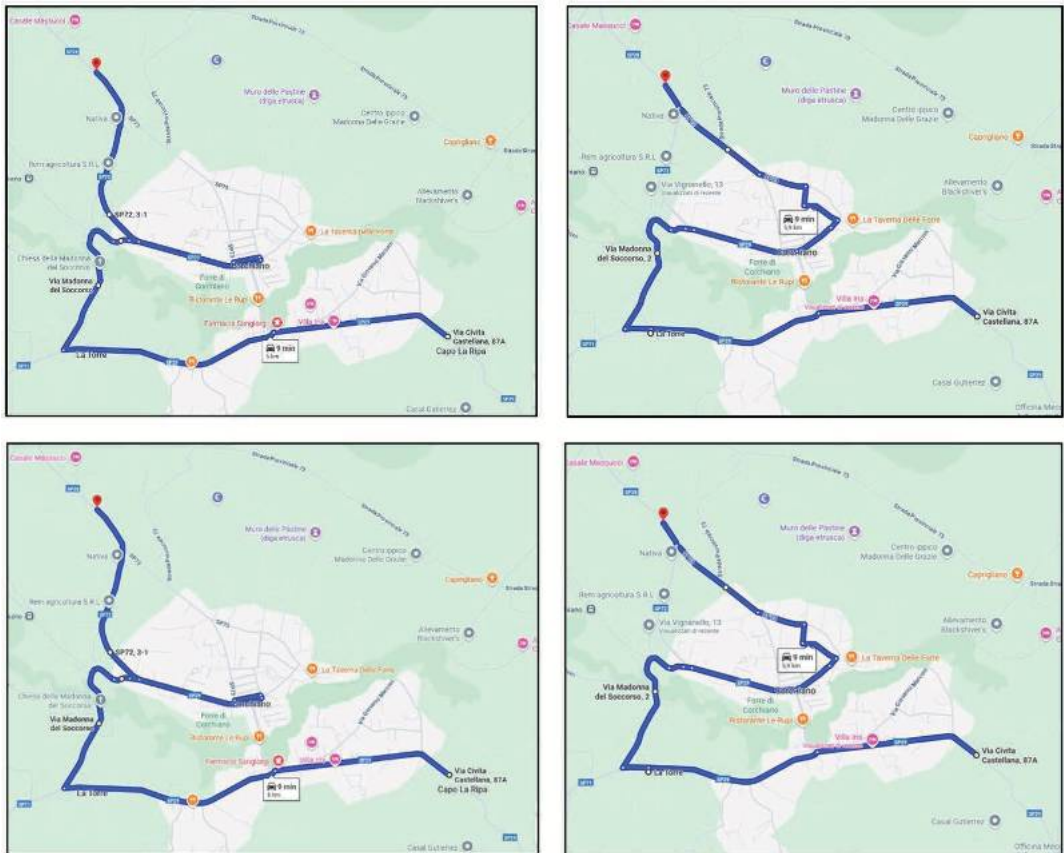


Figura 8.34 Alternative di reindirizzamento in loco.

- b) reindirizzamento su un altro dei percorsi SE-NW tra quelli precedentemente individuati; a un primo esame, non appare utilizzabile alcun percorso a Est di Corchiano, ma solamente quelli che attraversano l'abitato di Fabricia di Roma per proseguire verso la SP26 oppure verso la SP65, con tempi di percorrenza stimati non molto differenti dai percorsi delle due deviazioni "locali" prima esaminate se si adotta come riferimento la SP25a Variante di Canepine, strada sulla quale il flusso è fluido e veloce, tanto da rendere ininfluenza il punto di ingresso (Figura 8.35).

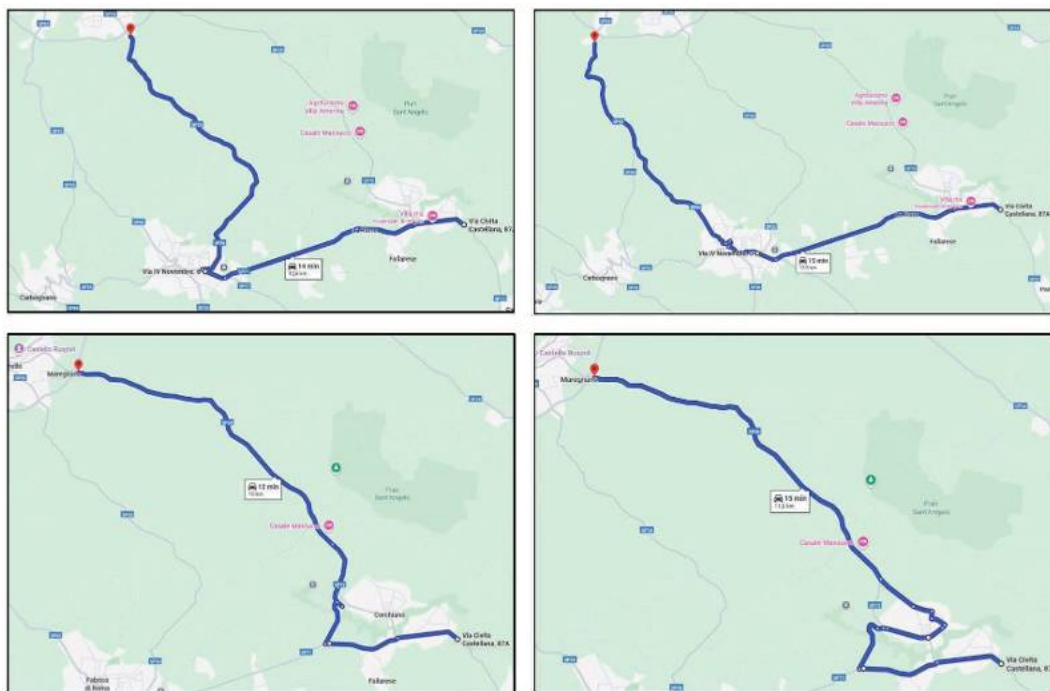


Figura 8.35 Alternative di reindirizzamento su altri percorsi.

- ⊙ Accessibilità e collegamenti con aree urbane e rurali limitrofe: Quando si considera la connessione tra la zona interessata dall'interruzione e le aree urbane, suburbane e rurali vicine, che potenzialmente subiranno le più importanti ripercussioni in termini di accessibilità e tempi di spostamento, sono da valutare senz'altro i percorsi "locali" già individuati al punto precedente, ma, tenuto conto delle probabili difficoltà di iscrizione dei veicoli di grandi dimensioni, non si individuano per questi ultimi delle alternative più celeri rispetto al lungo percorso che comporta di utilizzare la Variante di Canepine come elemento di passaggio verso la SP28 per raggiungere, quando si proviene da Sud, l'abitato di Corchiano posto a Nord delle Forre o le aree rurali vicini.
3. **Determinazione del raggio geografico:** Sulla base dei criteri stabiliti nel metodo per la fase F1.A1, è possibile concludere la definizione dei criteri per la delimitazione dell'area di studio affermando che il raggio di estensione dell'area di studio. Quello che garantisce che tutte le tratte significative potenzialmente impattate siano incluse, offrendo un quadro completo delle possibili ripercussioni, è di circa 14 km in direzione SE-NW e 7 km in direzione SW-NE, come evidenziato in Figura 8.36. Le provinciali interne al perimetro in rosso sono oggetto di valutazione per la numerosità e le caratteristiche dimensionali del traffico.

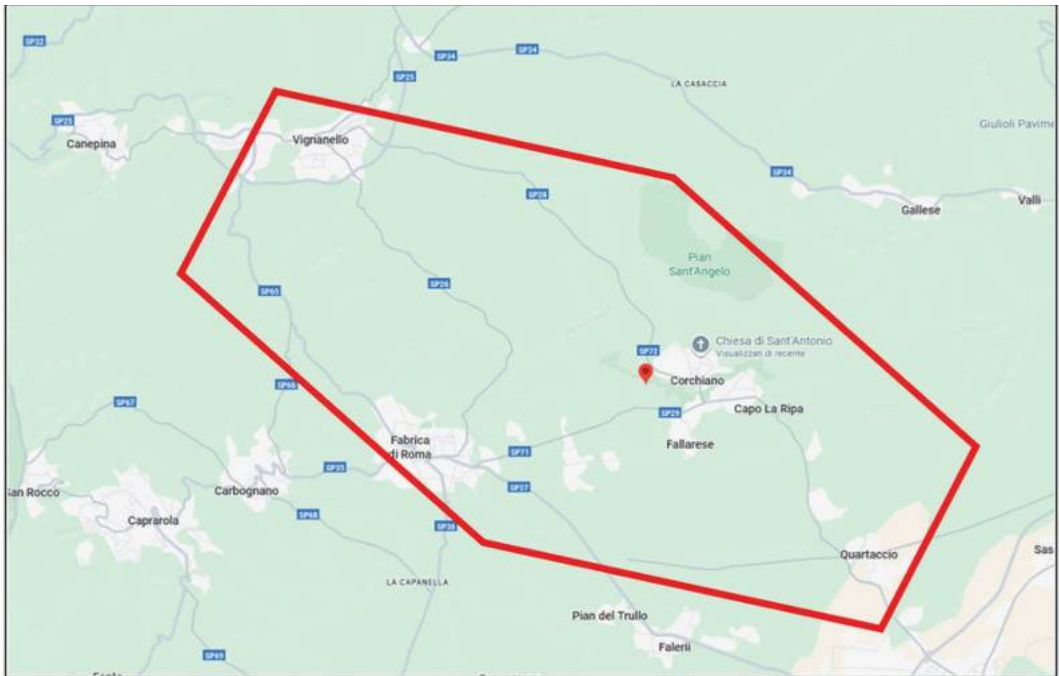


Figura 8.36 Determinazione del raggio geografico.

4. **Revisione e aggiustamento dell'area di studio:** Al termine della fase **F1.A1** è prevista la verifica che l'area selezionata sia adeguatamente rappresentativa, che includa tutte le vie di collegamento e i nodi che potrebbero essere impattati. Nel presente esempio, si è provveduto alla verifica effettuando un primo sopralluogo conoscitivo e percorrendo tutte le vie individuate di interesse nel precedente esame. Il sopralluogo ha confermato la delimitazione così eseguita.

8.3.2 Zonizzazione dell'area di studio

La zonizzazione dell'area di studio è un passaggio preliminare per la costruzione del modello di traffico, poiché definisce le unità territoriali (zone di traffico) dalle quali e verso le quali si muovono i flussi di domanda. L'obiettivo della zonizzazione è semplificare la descrizione del fenomeno modellato, considerando che, nel mondo reale, gli spostamenti all'interno dall'area di interesse possono iniziare e terminare in un qualunque punto della stessa. Questa suddivisione è propedeutica alla successiva definizione delle matrici origine-destinazione (O/D).

Nel presente caso di studio, il primo sopralluogo ha evidenziato un traffico assolutamente modesto. A prima vista, anche sommando tutto il traffico che interessa la SP28 a quello di uno qualsiasi dei rami alternativi individuati, il flusso comunque modesto e il livello di servizio sicuramente elevato. Pertanto, non si è ritenuto necessario procedere

alla modellazione con matrici O-D e, di conseguenza, neanche alla zonizzazione, che della costruzione delle matrici O-D è passaggio propedeutico.

Al fine di confermare la correttezza di tale assunzione, sono da effettuarsi rilievi di traffico sugli assi viari che dovranno garantire la connettività e la fluidità al maggior traffico su di essi convogliato. Inoltre, appaiono essenziali le verifiche sulla inscrivibilità geometrica dei mezzi nei punti più costretti e angusti, che il primo sopralluogo ha mostrato essere presenti su tutti i percorsi sostitutivi ipotizzati.

8.3.3 Modellazione della rete stradale

Per quanto accennato in precedenza rispetto alla relativa semplicità della rete stradale di interesse, non si procede alla sua modellazione mediante costruzione di un grafo, né all'utilizzo di software quali VISUM o altri, e si provvede, come previsto in F1.A3, alla sola classificazione delle intersezioni e degli archi critici rispetto alla transitabilità per i veicoli pesanti, così da permettere analisi differenziate in funzione del tipo di veicolo e delle restrizioni infrastrutturali.

Riguardo ai percorsi alternativi individuati, appaiono particolarmente critici i seguenti elementi, per alcuni dei quali potrebbe valutarsi una modifica del regime di circolazione o una rettifica strutturale, provvisoria o definitiva:

- tortuosità e ampiezza della piattaforma stradale sul ramo della SP71 tra la SP29 e la SP72 (Figura 8.37); larghezza del piano viabile pavimentato inferiore a 6 metri e raggio di curvatura minimo inferiore a 20 m.



Figura 8.37 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 1 di 4.

- Intersezioni tra la strada provinciale 71 con la SP72 (Figura 8.38): raggi di curvatura modesti e inutilizzabilità di alcuni rami nell'attuale regolamentazione segnaletica.



Figura 8.38 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 2 di 4.

- Strettoia della SP65 tra il Palazzo del Comune di Fabrica di Roma e la Villa Comunale (Figura 8.39).



Figura 8.39 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 3 di 4.

- Raggi di curvatura inferiori a 10 metri nell'incrocio tra SP26 e SP27 nell'abitato di Fabrica di Roma (Figura 8.40).



Figura 8.40 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 4 di 4.

8.3.4 Modellazione della domanda di trasporto

La fase 2 si distingue in modellazione della domanda di traffico passeggeri (F2.A1) e merci (F2.A2), anche in relazione alla disponibilità di banche dati o di notizie socio-economiche che permettano una validazione incrociata dei dati raccolti. Nel presente esempio, la questione fondamentale è in realtà relativa all'inscrivibilità dei veicoli di maggiore dimensione negli angusti spazi disponibili in alcuni punti critici della rete.

Pertanto, si procede a modellare la domanda di trasporto distinguendo i veicoli essenzialmente per dimensione (larghezza e lunghezza), associando gli autobus ai mezzi commerciali pesanti e i mezzi commerciali leggeri alle autovetture.

Tra le alternative indicate nella metodologia, la modellazione può essere eseguita ricorrendo ai **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di **sezioni significative** individuate lungo alcuni segmenti chiave della rete compresa nella zona precedentemente delimitata e confrontando i dati sperimentali ottenuti con quelli ricavati da **sistemi di navigazione mobili basati su GPS**, e in particolare da TomTom MOVE (TomTom, 2024), benché la proporzione di utenti che utilizzano dispositivi compatibili con il sistema di raccolta dati sia risultata piuttosto bassa.

Per avere una stima del numero di veicoli leggeri e pesanti che transitano sul ponte di Corchiano, grazie alla collaborazione dell'Amministrazione Comunale è stata posizionata una videocamera (Figura 8.41) con la quale sono stati registrati i passaggi sul ponte in entrambe le direzioni in giorno feriali per sei ore, dalle 11:10 alle 17:05, classificando i veicoli in primo luogo in base al numero di assi, come riportato sinteticamente in Tabella 8.8 (medie orarie).

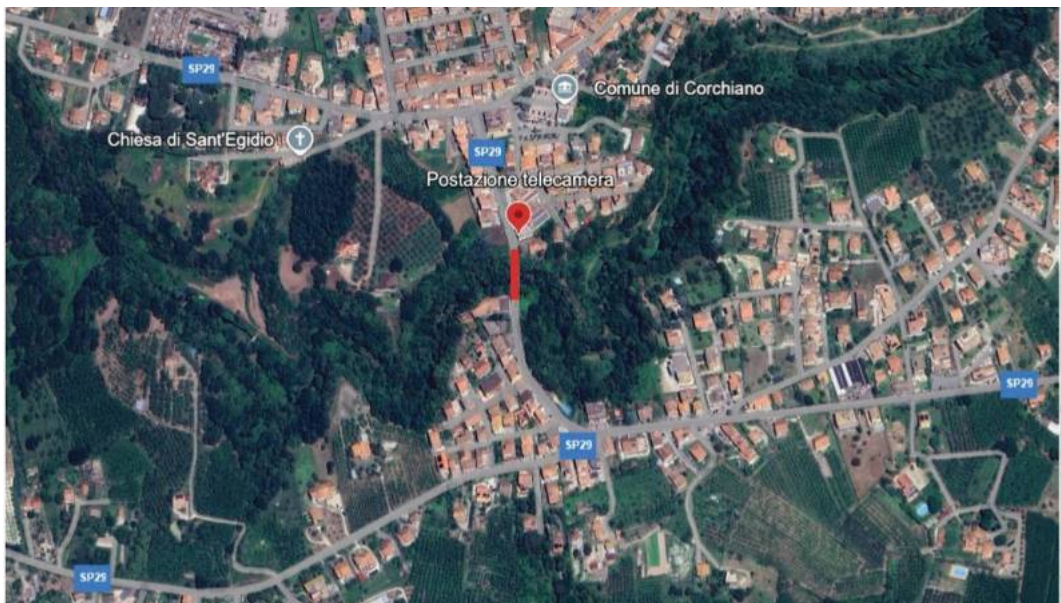


Figura 8.41 Localizzazione postazioni per il rilevamento del traffico nei pressi del manufatto.

Tabella 8.8 Flussi di traffico rilevati differenziati per numero di assi nei pressi del manufatto.

Strada Provinciale SP29			
DIR. NORD verso Corchiano-centro		DIR. SUD verso Civita Castellana	
LEGGERI	309,2	LEGGERI	261,3
2 ASSI	16,0	2 ASSI	14,7
3 ASSI	0,5	3 ASSI	1,0
4 ASSI	0,2	4 ASSI	0,2
5 ASSI	2,0	5 ASSI	1,0
TOTALE	327,8	TOTALE	278,2

I veicoli più lunghi e pesanti, a 5 assi, erano principalmente autoarticolati destinati al trasporto di merci e di conglomerato bituminoso, questi ultimi presumibilmente provenienti dal vicino impianto di Sassacci. I veicoli a 2 assi sono stati ulteriormente classificati in base alla tipologia, come risulta nella Tabella 8.9.

Tabella 8.9 Dettaglio flussi di traffico a due assi nei pressi del manufatto.

Strada Provinciale SP29		
VEICOLI A DUE ASSI PER TIPOLOGIA	DIR. NORD	DIR. SUD
AUTOCARRO CON CASSONE O GRU	5,2	4,5
AUTOCARRO FURGONATO	3,7	3,0
FURGONE	4,3	3,8
AUTOBUS COTRAL	1,8	2,2
NAVETTA TPL	0,7	1,0
CAMPER	0,3	0,2
TOTALE	16,0	14,7

L'indagine è stata integrata analizzando i percorsi del trasporto pubblico e constatando che tutti i mezzi Cotral proseguono per Fabrica di Roma, il che richiederà semplicemente di spostare la fermata anticipandola rispetto al ponte e di garantire in loco il collegamento pedonale tra le due parti del paese di Corchiano affinché gli utenti possano raggiungerla senza grandi allungamenti di percorso.

L'indagine è stata altresì integrata dai rilievi eseguiti sulla SP29 al km 2+500 (Figura 8.42), poco oltre la località Capo La Ripa, al fine di determinare quanti veicoli pesanti provenienti da sud, cioè da Civita Castellana o dalla zona di Quartaccio, giunti al bivio a sud di Corchiano, proseguono sul ponte da mantenere e quanti, invece, proseguono in direzione di Fabrica di Roma imboccando la diramazione Ovest della SP29. Sono state analogamente registrate le scelte di percorso prescelte dai veicoli pesanti provenienti da Nord che attraversano il ponte.

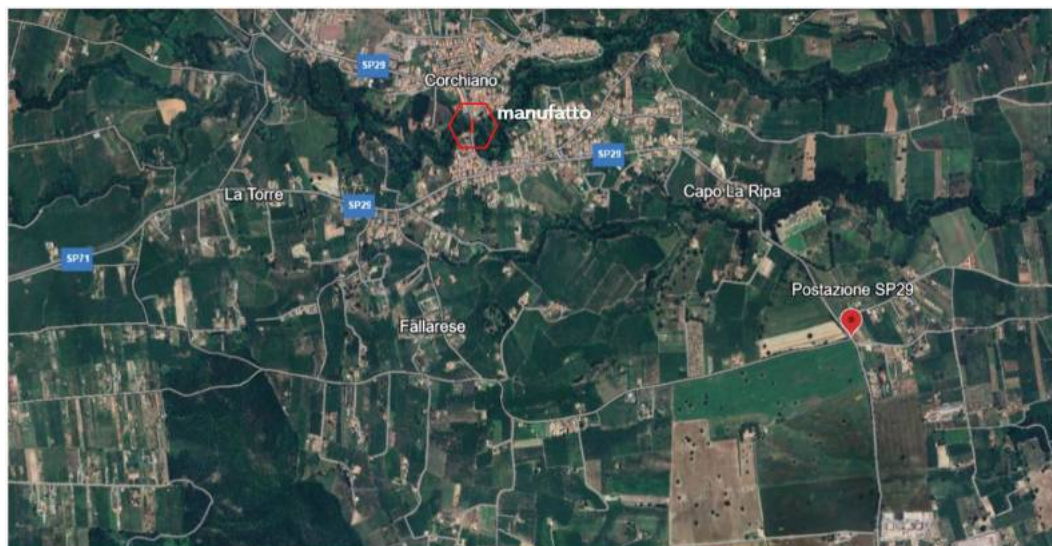


Figura 8.42 Localizzazione postazioni per il rilevamento del traffico lungo la SP29.

Questo rilievo, i cui dati sono mostrati nella Tabella 8.10, è stato eseguito in sovrapposizione temporale a quello sul ponte di Corchiano, dalle ore 11:34 alle 13:20 dello stesso giorno, in modo da poter riconoscere i singoli transiti e individuare puntualmente la direzione scelta da ciascun veicolo pesante.

Tabella 8.10 Flussi di traffico rilevati differenziati per numero di assi lungo la SP29.

DIR. NORD provenienti da Quartaccio/Civita Castellana	
N° ASSI	N° VEICOLI
2 ASSI	24
3 ASSI	2
4 ASSI	0
5 ASSI	4
TOTALE	30
di cui 18 passano sul ponte di Corchiano	

DIR. SUD verso Quartaccio/Civita Castellana	
N° ASSI	N° VEICOLI
2 ASSI	20
3 ASSI	1
4 ASSI	0
5 ASSI	4
TOTALE	25
di cui 18 passano sul ponte di Corchiano	

I risultati indicano che tutti i veicoli pesanti a 5 assi provenienti dalla SP29 hanno attraversato la struttura in esame. Ciò lascia presumere che il traffico pesante diretto da Sud (aree industriali di Quartaccio, Sassaccio o Civita Castellana) verso destinazioni oltre Fabbrica di Roma possa già all'oggi ragionevolmente preferire la SP27 invece di utilizzare la SP29 (Figura 8.43). Pertanto, si conferma che la SP27 è da ricomprendere nell'area di studio per

valutare il traffico attuale e stimare le perturbazioni in essa generabili dall'assorbimento del traffico impedito di attraversare il ponte che la impegnerà presumibilmente sin da Quartaccio, scegliendola come ovvia alternativa alla SP29.



Figura 8.43 Percorso ad uso prevalente da parte dei mezzi pesanti.

Una seconda campagna di osservazione è stata condotta sulla SP65 nel centro di Fabbrica di Roma, in corrispondenza del "ponticello" che collega il Municipio alla villa comunale. Il punto è di particolare criticità a causa della locale limitatezza della sede stradale e dell'assenza di visibilità reciproca tra i veicoli provenienti dagli opposti sensi di marcia. È necessario, pertanto, stimare il numero di veicoli pesanti in transito e valutare i possibili provvedimenti.

I rilievi sono stati effettuati per circa 2 ore, dalle 14:55 alle 16:42. L'elaborazione dei video registrato ha restituito un traffico orario tra 140 e 180 veicoli per ciascuna direzione, con una percentuale di mezzi pesanti di circa il 7%.



Figura 8.44 Localizzazione postazione per il rilevamento del traffico lungo la SP65.

La distribuzione dei mezzi pesanti è riportata in Tabella 8.11.

Tabella 8.11 Flussi di traffico rilevati differenziati per numero di assi lungo la SP65.

DIR. NORD verso Vallerano		DIR. SUD verso centro di Fabrica	
N° ASSI	N° VEICOLI	N° ASSI	N° VEICOLI
2 ASSI	17	2 ASSI	14
3 ASSI	1	3 ASSI	1
4 ASSI	0	4 ASSI	0
5 ASSI	1	5 ASSI	0
TOTALE	19	TOTALE	15

Di grande interesse è l'osservazione del passaggio del veicolo a 5 assi, l'unico transitato durante il periodo, proveniente dal centro di Fabrica e diretto verso Nord. Un'autovettura proveniente dal senso di marcia opposto si è trovata a incrociare tale mezzo e ha effettuato una manovra di marcia indietro, liberando completamente la carreggiata per il passaggio del mezzo pesante. Con ogni evidenza, la situazione descritta non è infrequente, tanto che gli utenti abituali hanno consolidato un *modus operandi* che appare condiviso, benché siano assenti segnali o altro genere di ausili.



Figura 8.45 Analisi della percorribilità dei mezzi pesanti all'interno del centro abitato.

Che il transito attraverso il paese sia possibile anche per mezzi di dimensioni molto grandi è confermato da due fotografie presenti nell'archivio di Google Maps (Figura 8.45), relative a un auto-articolato osservabile prima a Sud (coordinate 42.32350209488279, 12.32913929690259) e poi a Nord di Fabrica di Roma (coordinate 42.3429861219623, 12.286883644085451).

Al fine di completare la conoscenza del traffico che interessa le arterie nella zona delimitata, il 15 e il 27 novembre sono stati rilevati per due ore i passaggi sulla SP27, via Falerina, alle coordinate 42.303528, 12.359658 e sulla SP26 alle coordinate 42.346615731212836, 12.31540672828909 (Figura 8.46), con i risultati orari di seguito esposti in Tabella 8.12.



Figura 8.46 Localizzazione postazioni per il rilevamento del traffico lungo la SP27 e la SP26.

Tabella 8.12 Flussi di traffico rilevati differenziati per numero di assi lungo la SP26 e la SP27.

Strada Provinciale SP26				Strada Provinciale SP27			
DIR. NORD verso Fabrica di Roma		DIR. SUD verso Civita Castellana		DIR. NORD verso Vignanello		DIR. SUD verso Fabrica di Roma	
LEGGERI	76	LEGGERI	55	LEGGERI	31,3	LEGGERI	30,7
2 ASSI	1	2 ASSI	0,5	2 ASSI	2,7	2 ASSI	3,3
3 ASSI	1	3 ASSI	1	3 ASSI	0,7	3 ASSI	0,0
4 ASSI	0	4 ASSI	0	4 ASSI	0,0	4 ASSI	0,0
5 ASSI	0,5	5 ASSI	0,5	5 ASSI	0,0	5 ASSI	0,0
TOTALE	78,5	TOTALE	57	TOTALE	34,7	TOTALE	34

I dati rilevati in loco sono stati infine confrontati con quelli ricavati da sistemi di navigazione mobili basati su GPS, e in particolare da TomTom MOVE (TomTom, 2024), estraendoli dalla banca dati non nella consueta modalità, ma ricavando con un artificio i transiti nelle sezioni mostrate in Figura 8.47, individuate dalle coordinate:

42.370677524013196, 12.287716718424258

42.37365780508978, 12.26093754396639

42.33954960726449, 12.307523735722985

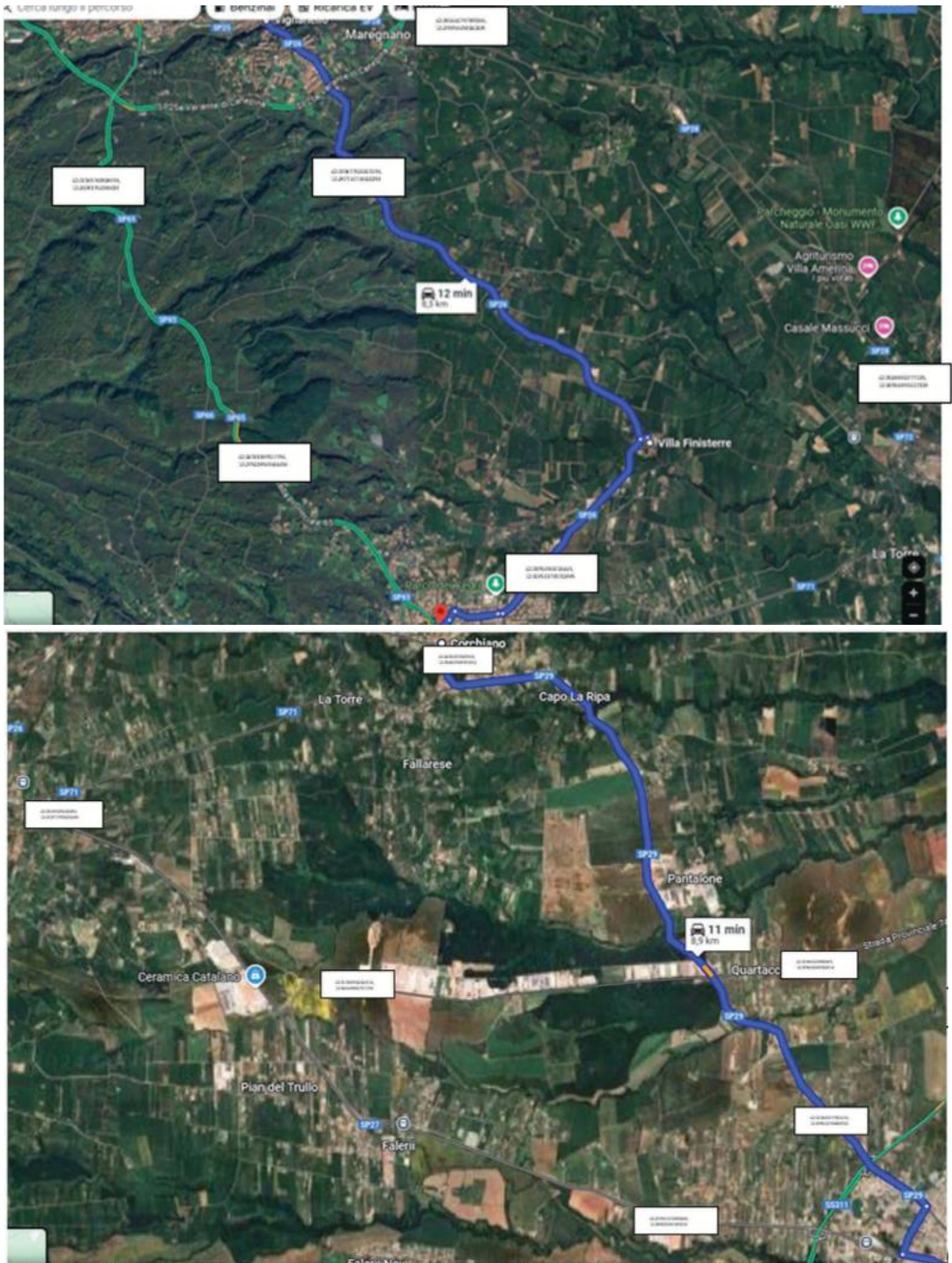


Figura 8.47 Punti della rete stradale per cui sono stati estratti dati di traffico da sistemi di navigazione mobili basati su GPS.

42.34903389517796, 12.275428569464456
 42.381646797355266, 12.295956458340205
 42.35488832777135, 12.345846894127328
 42.34394370369315, 12.356809385397654
 42.31884249883669, 12.395648265334916
 42.310345277821476, 12.395542750003722
 42.317305902448716, 12.344448061571796
 42.33139325430659, 12.312977955201688
 42.297581272658086, 12.385325987459076

In molte di queste sezioni il numero di passaggi ricavati da TomTom MOVE sono risultati talmente bassi da non avere una affidabilità sufficiente. Il risultato, apparentemente negativo, conferma invece la correttezza dell'approccio adottato, in quanto sulla rete non sussiste il pericolo di congestione per l'incremento di traffico su alcuni rami, mentre è decisiva la configurazione geometrica dei singoli elementi riguardo alla transitabilità da parte dei mezzi di maggiori dimensioni.

8.3.5 Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

L'obiettivo della fase 3 è simulare l'interazione tra offerta e domanda per l'area di studio e valutare la resilienza del sistema di trasporto, misurando i principali *Key Performance Indicators* (KPIs) – (e.g., tempo di percorrenza, lunghezza dei percorsi, velocità media) sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni degradate, in seguito a interruzioni.

Per carichi di traffico significativi, la fase 3 richiede l'impiego di algoritmi di assegnazione e di ricerca dell'equilibrio della rete. Nelle condizioni osservate per l'ambito di Corchiano, ci si può concentrare sulla verifica della connettività tra coppie origine-destinazione verificando la percorribilità da parte delle varie componenti di traffico reindirizzate a causa dell'interruzione. Non si mettono a confronto la domanda di traffico e le capacità degli archi, in quanto si è constatata, con le rilevazioni speditiva effettuate in vari punti notevoli della rete, la modestia del numero dei movimenti. Il traffico sugli archi rimarrebbe modesto anche quando tutti i transiti sul ponte interrotto dovessero essere deviati su un unico e solo percorso tra i possibili. Non si procede, pertanto all'analisi dei livelli di servizio, ponendo tuttavia particolare attenzione a quei punti singolari nei quali la difficoltà delle manovre per i mezzi pesanti potrebbe portare a rallentamenti o attese importanti per gli altri veicoli sopraggiungenti.

A tal proposito, l'attività prosegue con la fase F3.F3 (Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento), identificando nel miglior grado possibile allo stadio di conoscenza acquisito gli interventi prioritari di manutenzione e di gestione suscettibili di rafforzare la resistenza della rete e ridurre l'impatto sulle comunità.

Nel caso allo studio, gli interventi di manutenzione dovranno consistere essenzialmente nella rettifica o nella riorganizzazione di alcuni rami delle intersezioni critiche, anche con interventi di carattere strutturale, benché di non grande impegno economico o temporale e senza la necessità di realizzare nuovi tronchi o bretelle. Gli interventi gestionali consisteranno essenzialmente in una possibile differente regolazione della circolazione, attivando ad esempio i percorsi a senso unico. Il complesso delle modifiche ipotizzate nel presente esempio è sinteticamente descritto nel seguito (da Figura 8.48 a Figura 8.50).

Per i mezzi leggeri, la deviazione in loco lungo la SP71 della chiesa della Madonna del Soccorso appare una soluzione abbastanza valida purché si provveda a una corretta informazione e alla limitazione della velocità nei punti di scarsa visibilità, ma soprattutto si modifichi e riorganizzi l'intersezione con la SP72 (Figura 8.48). Con tali interventi il percorso appare utilizzabile anche a doppio senso di circolazione.



Figura 8.48 Interventi prioritari di manutenzione e di gestione – 1 di 3.

Diverse sono le soluzioni per il traffico pesante, che potrà utilizzare l'alternativa emersa nella fase di analisi e modellazione della rete stradale, consistente nella sostituzione della SP28 con la SP26 e la SP65. Per la percorrenza del lungo tratto extraurbano della SP65 da parte dei mezzi pesanti non si evidenziano problemi. La criticità maggiore per i mezzi pesanti si presenta però nell'obbligato attraversamento dell'abitato di Fabrica di Roma, del quale sono state ampiamente descritte le particolarità. Appare evidentemente improponibile affidarsi all'attuale "autogestione" del senso unico alternato sotto il ponticello del Municipio. Il maggior numero di mezzi pesanti ivi transitanti a seguito della chiusura del ponte di Corchiano va regolato, come minimo, mediante l'installazione di un semaforo che consenta il transito a senso unico alternato, ma è anche possibile studiare una modifica della circolazione all'interno dell'area centrale del paese mediante l'istituzione di sensi unici, lasciando la strettoia del ponticello al traffico diretto verso Sud e, per il traffico diretto verso Nord, liberando il percorso alternativo mostrato nella Figura 8.49, sia eliminando gli stalli di sosta, sia modificando le intersezioni per semplificare le manovre nei punti critici.



Figura 8.49 Interventi prioritari di manutenzione e di gestione – 2 di 3.

In alternativa, l'analisi della rete evidenzia la possibilità di ricorrere a una modificazione della circolazione a più ampia scala. La SP26 ha una larghezza di piattaforma più contenuta rispetto alla SP65 e se ne potrebbe studiare una trasformazione temporanea a senso unico (limitatamente al traffico pesante), assegnandole la relazione Sud→Nord fino a Vignanello e alla SP26 quella Nord→Sud. Anche in questo caso, le maggiori criticità si incontrano nell'abitato di Fabrica di Roma per permettere ai mezzi di imboccare la SP26. A tal fine, si può facilitare la svolta a destra dalla SP27 alla via di Vignanello (Figura 8.50 in sinistra), oppure trasformata la via Petrarca in "camionale", ovviamente a senso unico (Figura 8.50 in destra).



Figura 8.50 Interventi prioritari di manutenzione e di gestione – 3 di 3.

La fattibilità delle diverse soluzioni descritte va valutata con più mirate misurazioni in loco e condivisa con i rappresentanti della comunità locale. Il processo si concluderà con lo sviluppo del piano di comunicazione, del progetto di dettaglio della segnaletica e con la progettazione degli eventuali interventi strutturali sugli elementi della rete, da eseguirsi con la stessa impresa affidataria del lavoro sul ponte ovvero con appalti separati, per i quali occorre concordare con tutti gli interessati quale sia la più razionale ed efficiente stazione appaltante.

8.4 Caso di Studio 4: rete primaria lungo la diramazione della A1 verso Roma Sud, presso San Cesareo (RM)

Il quarto caso di studio (Figura 8.51) si riferisce a un'opera d'arte sulla rete primaria autostradale: un ponte presso il casello di San Cesareo sulla diramazione Roma Sud dell'Autostrada A1, Latitudine 41.818992 Longitudine 12.768784, con carreggiate separate a due corsie più corsia di emergenza. Posto in corrispondenza del casello di San Cesareo, è presente anche una corsia di uscita nella carreggiata verso Roma (Figura 8.52).



Figura 8.51 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 4.

8.4.1 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in F1.A1, va identificata l'area di studio. Nel presente esempio, l'interruzione dell'opera si suppone totale, al fine di esaminare la peggiore eventualità possibile, rimanendo assodato che nei casi di arterie a doppia carreggiata la chiusura di una sola delle due comporta di norma l'utilizzo dell'altra per accogliere il traffico di entrambi i sensi con la più opportuna assegnazione delle corsie ed eventuale ridisegno temporaneo della segnaletica. Si ipotizza, inoltre, che la non utilizzabilità riguardi solamente l'opera d'arte, ma non la strada SP216 sottopassante.



Figura 8.52 Rappresentazioni prospettiche del sito considerato nel Caso di Studio 4 (fonte: Google Street View).

L'area di studio è stata circoscritta curando di rappresentare l'ambito territoriale dove si ipotizza si esauriscano la maggior parte degli effetti prodotti dall'interruzione del manufatto. Dal punto di vista pratico, anche prescindendo dai dati di traffico dettagliati e dai tempi di percorrenza, è possibile delineare l'area di studio attraverso un'analisi basata su fattori strutturali e qualitativi.

Infatti, un rapido esame della rete delle strade principali e secondarie della zona permette di eseguire la valutazione della rete infrastrutturale nelle aree più prossime all'interruzione ed evidenzia chiaramente la sua insufficienza a fronteggiare la chiusura completa del ramo di autostrada e ad assorbire il traffico che lo impegna. Pertanto, l'area di studio deve comprendere almeno un'alternativa di percorso sulla rete maggiore, l'unica in grado di assorbire il consistente traffico che interessa la diramazione della A1, particolarmente in alcuni giorni e orari. Ne consegue la delimitazione esposta in Figura 8.53, che si estende dal casello di Valmontone al Grande Raccordo Anulare, includendo ovviamente l'intersezione tra la A1 e la A24.

La prioritaria rilevanza della considerazione ora esposta anticipa e semplifica la considerazione dei tre criteri indicato nel metodo per la fase di delimitazione dell'area di studio:

- **Topologia della rete stradale e infrastrutturale**, chiaramente leggibile nella Figura 8.53.
- **Disponibilità e qualità delle alternative di percorso.**
- Per i percorsi di lungo raggio, tipicamente autostradali, l'alternativa è la sostituzione del tronco di avvicinamento a Roma costituito dalla diramazione interrotta (E821) con

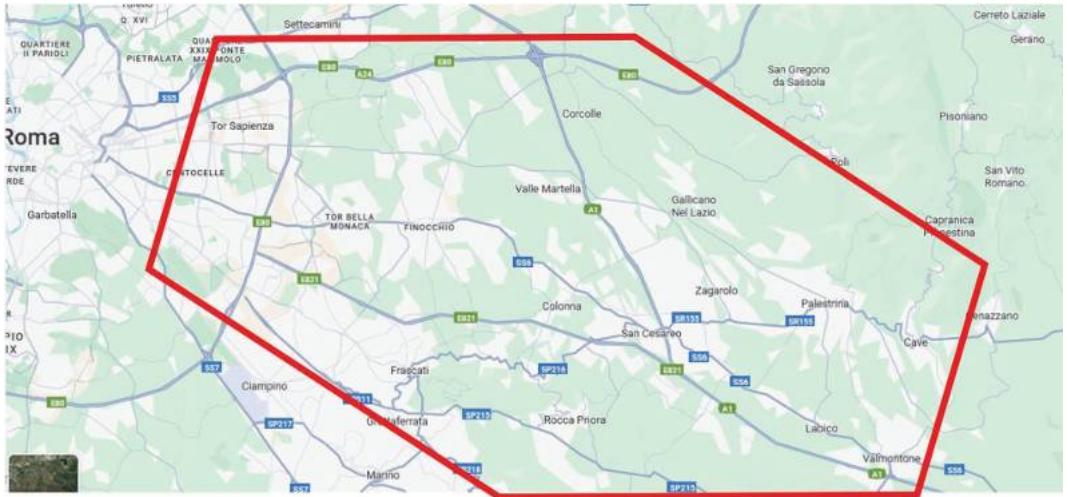


Figura 8.53 Rappresentazione planimetrica dell'area di studio e della rete infrastrutturale (fonte: Open Street Map).

il tronco dell'A24 interno al GRA e poi con il tratto di GRA fino all'uscita utile per l'origine/destinazione del singolo viaggio.

- **Accessibilità e collegamenti con aree urbane e rurali limitrofe.**
- Il traffico di corto raggio, diretto o proveniente dai comuni prossimi a San Cesario, ha molto minore importanza rispetto a quello da e verso Roma, sia per quantità di mezzi, sia per entità dell'allungamento di percorso, e si può in questa fase trascurare lo studio della sua redistribuzione sulla rete locale, la cui complessità e livello di interconnessione sono mostrati nella Figura 8.54.

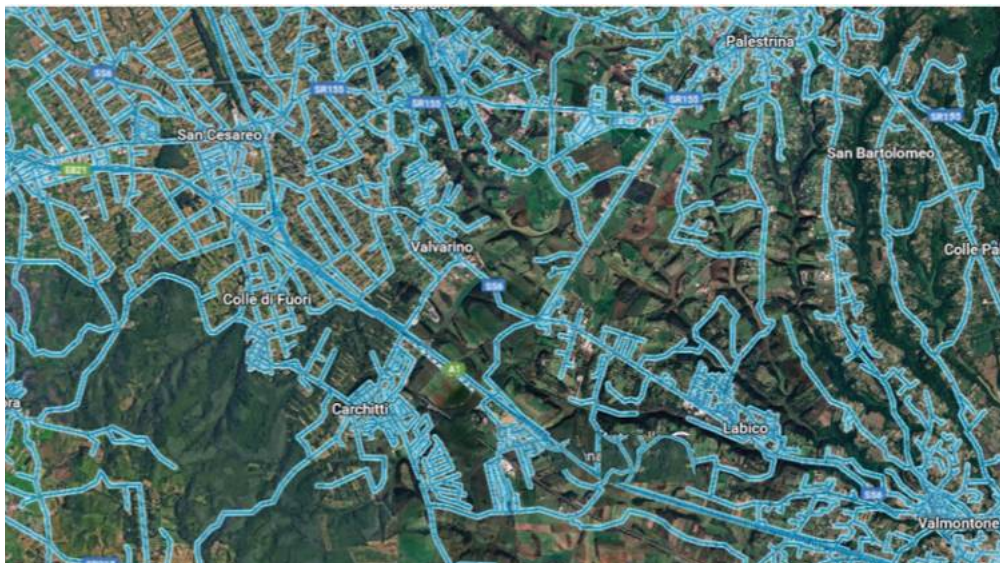


Figura 8.54 Evidenziazione della rete stradale del territorio di pertinenza.

Ciò anche in considerazione dell'assenza di matrici O-D di dettaglio per i centri urbani e le zone rurali della zona. È scontato, ma anche inevitabile, il peggioramento dei livelli di servizio sulle dorsali della rete locale, principalmente la SS6 Casilina. Rispetto a tale traffico locale, la chiusura dell'opera d'arte comporta in dettaglio l'inutilizzabilità del casello di San Cesareo per i veicoli provenienti da Sud, che dovranno anticipare l'uscita al casello di Valmontone e proseguire sulla SS6, costeggiando l'autostrada sul lato Nord, oppure sulla SP600 e SP215 sul lato Sud. Percorso inverso in caso di inizio del viaggio nelle aree limitrofe al casello di San Cesareo e destinazioni che necessitano di utilizzare la A1 verso Sud. Nulla invece cambierebbe (e non vi sarebbero ritardi) per i veicoli diretti a Roma, o provenienti da Roma, che fossero interessati alle manovre di ingresso o uscita al casello di San Cesareo, attesa la configurazione dello svincolo (Figura 8.55).



Figura 8.55 Configurazione dello svincolo San Cesareo.

8.4.2 Zonizzazione dell'area di studio

La zonizzazione dell'area di studio è il passaggio preliminare per la costruzione del modello di traffico, poiché definisce le unità territoriali (zone di traffico) dalle quali e verso le quali si muovono i flussi di domanda. L'obiettivo della zonizzazione è semplificare la descrizione del fenomeno modellato, considerando che, nel mondo reale, gli spostamenti all'interno dall'area di interesse possono iniziare e terminare in un qualunque punto della stessa. Per la già accennata indisponibilità delle matrici origine-destinazione (O/D) tale fase non è gestita nel presente esempio.

8.4.3 Modellazione della rete stradale

Per quanto accennato in precedenza rispetto alla relativa semplicità della rete autostradale di interesse, non si procede alla sua modellazione mediante costruzione di un grafo, né all'utilizzo di software quali VISUM o altri.

Il percorso alternativo già ipotizzato ha una dotazione di tre corsie per ciascuna carreggiata sul GRA e sulla A1. Sul tratto della A24 tra l'interconnessione con la A1 e il GRA sono presenti 4 corsie per senso di marcia, suddivise in due carreggiate; la centrale è per il traffico passante e la laterale funge anche da scambiatore per gli svincoli intermedi; tra le due carreggiate si possono effettuare scambi con corsie dedicate. Sul tratto della A24 che va dal GRA all'interconnessione la configurazione è simile fino alla barriera di Roma Est, per poi ridursi a sole due corsie nel tratto rimanente fino all'interconnessione con la A1.

Appare utile constatare che i tempi di percorrenza a flusso libero su tale percorso alternativo sono maggiori di soli 9 minuti rispetto al percorso ordinario per un ipotetico utente che, ad esempio partendo da Roma, entri nel GRA a Sud dell'imbocco della diramazione E821, e sono ancor meno peggiorati per chi entri nel GRA dalla Casilina, quasi uguali per chi entri dalla Prenestina. Viceversa, qualora si scegliesse di utilizzare la E821 fino al casello di San Cesareo e poi proseguire sulla viabilità ordinaria, il perditempo raddoppierebbe (Figura 8.56).

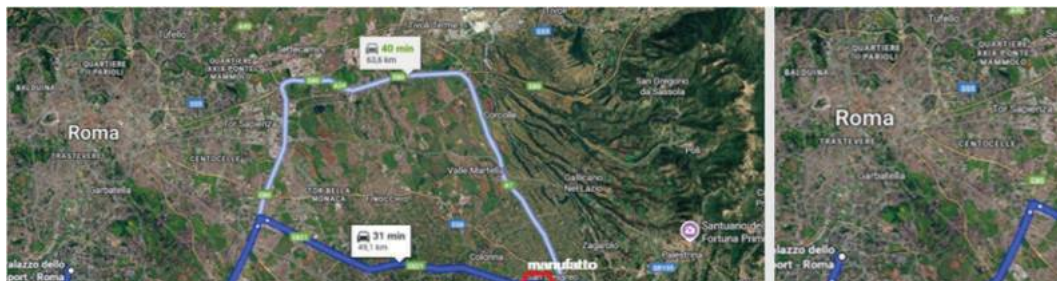


Figura 8.56 Alternative di percorso con relativi tempi di percorrenza.

8.4.4 Modellazione della domanda di trasporto

La fase 2 si distingue in modellazione della domanda di traffico passeggeri (F2.A1) e merci (F2.A2), anche in relazione alla disponibilità di dati, che nel caso specifico sono stati forniti dai gestori della A1 e della A24.

Per quanto riguarda il nodo della diramazione verso Roma Sud i dati dei transiti sui tre rami autostradali che vi convergono sono stati forniti da Autostrade per l'Italia per il periodo 1° maggio – 31 luglio 2024 (Tabella 8.13) e possono essere visualizzati in modo sintetico grazie ai grafici esposti nelle pagine che seguono (dalla Figura 8.58 alla Figura 8.63), nei quali i veicoli sono suddivisi in cinque classi:

- ⊙ Classe 10: veicoli a 2 assi con altezza inferiore o uguale a 1,3 m all'asse anteriore;
- ⊙ Classe 20: veicoli a 2 assi con altezza superiore a 1,3 m all'asse anteriore;
- ⊙ Classe 30: veicoli a 3 assi;
- ⊙ Classe 40: veicoli a 4 assi;
- ⊙ Classe 50: veicoli a 5 assi.

La granularità dei dati forniti da Autostrade per l'Italia è giornaliera e risulta facilmente osservabile la periodicità settimanale degli spostamenti in entrata e in uscita dalla città assieme alla riduzione domenicale del traffico commerciale.

Si può notare, inoltre, che non è disponibile il traffico sul tratto che va dalla vera e propria diramazione per Roma Sud fino al casello di San Cesareo, ma solamente quello tra i primi due caselli del tronco diretto verso Roma Sud e il GRA (San Cesareo e Monte Porzio Catone).

Emergono, pertanto, due elementi da accertare:

- la rilevanza del traffico in entrata/uscita dal casello di San Cesareo;
- la coerenza dei dati forniti dai tre rami di autostrada.

Riguardo al primo interrogativo, se si isola la parte di rete autostradale interna alla terna di rami per i quali sono stati forniti i dati, è possibile completare il quadro della domanda valutando approssimativamente l'entità delle entrate e delle uscite al casello di San Cesareo. A tal fine si è calcolata la differenza tra il flusso globalmente entrante nel dominio dalle "porte" individuate in figura con il tratto spesso di colore rosso e quello globalmente uscente dallo stesso dominio. Il dominio considerato non è chiuso, in quanto esistono una sorgente e un pozzo: il casello di San Cesareo evidenziato dal cerchio giallo (Figura 8.57). La differenza tra i flussi complessivi è risultata minima, indicando che l'effetto del traffico di tale casello può essere trascurato.



Figura 8.57 Nodo della diramazione verso Roma Sud (in rosso) con casello di San Cesareo (in giallo).

Tabella 8.13 Dati di traffico forniti da Autostrade per l'Italia differenziati per direzione e classe dei veicoli.

	Classe 10	Classe 20	Classe 30	Classe 40	Classe 50
Totale flusso entrante	7.844.809	896.991	135.941	106.302	840.001
Totale flusso uscente	7.861.843	896.196	136.151	106.332	839.283
differenza percentuale	-0,22	0,09	-0,15	-0,03	0,09

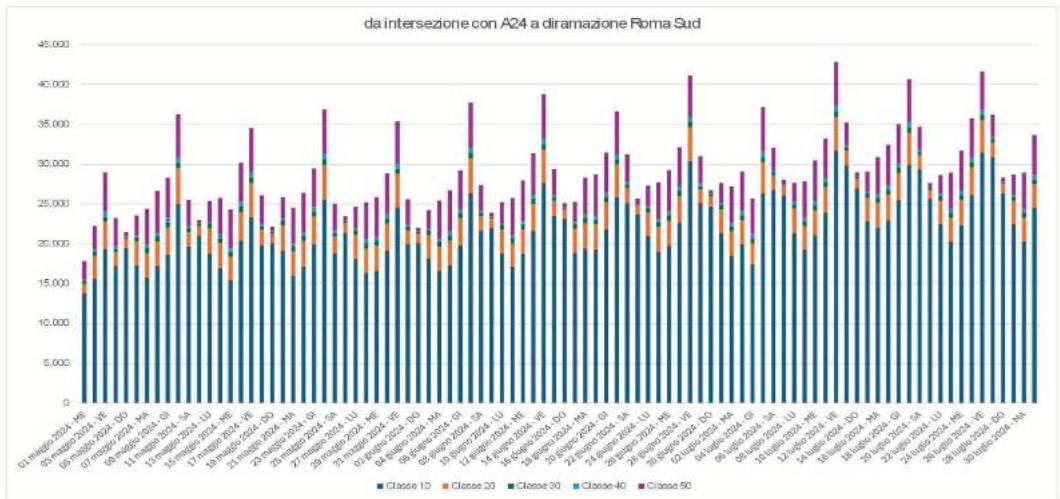


Figura 8.58 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra l’intersezione con la A24 e la diramazione Roma Sud, in direzione Sud, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

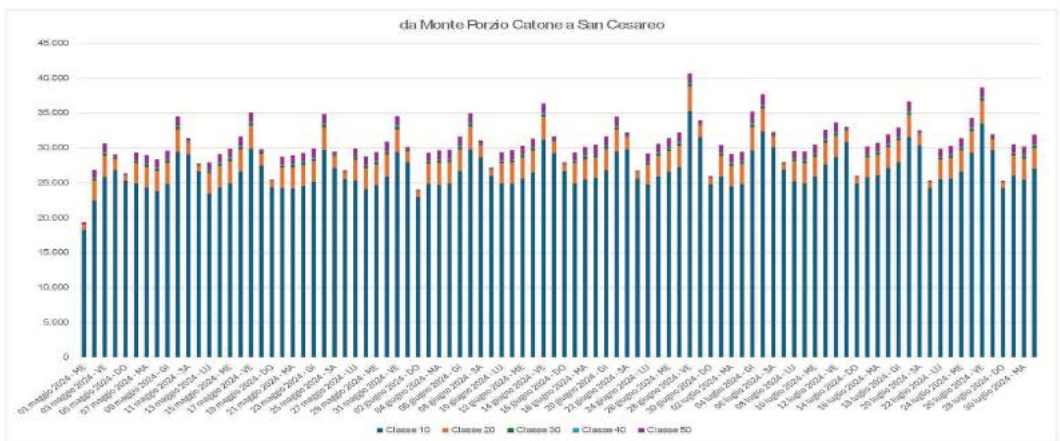


Figura 8.59 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra Monte Porzio Catone e San Cesario, in direzione Sud, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

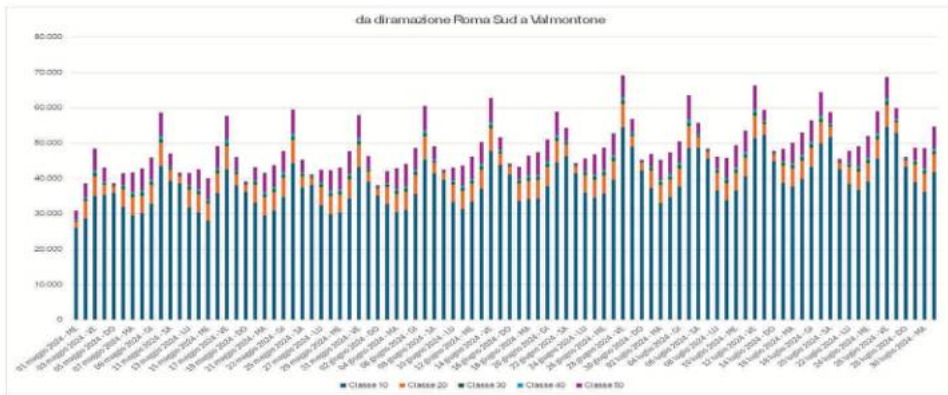


Figura 8.60 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra la diramazione Roma Sud e Valmontone, in direzione Sud, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

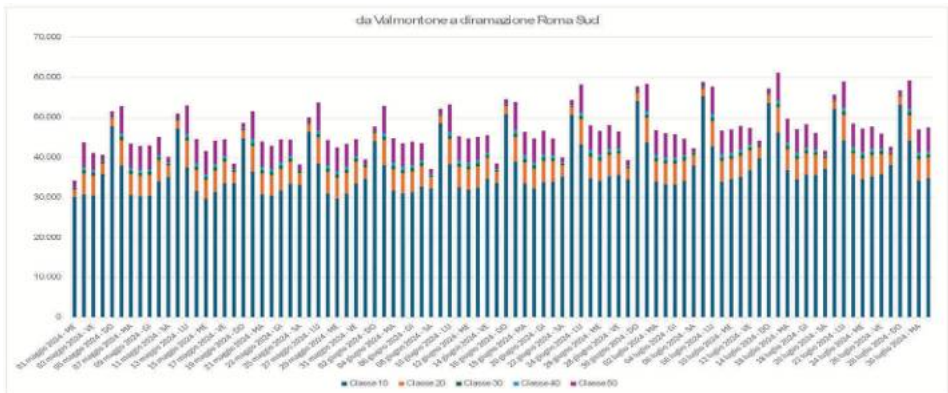


Figura 8.61 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra Valmontone e la diramazione Roma Sud, in direzione Nord, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

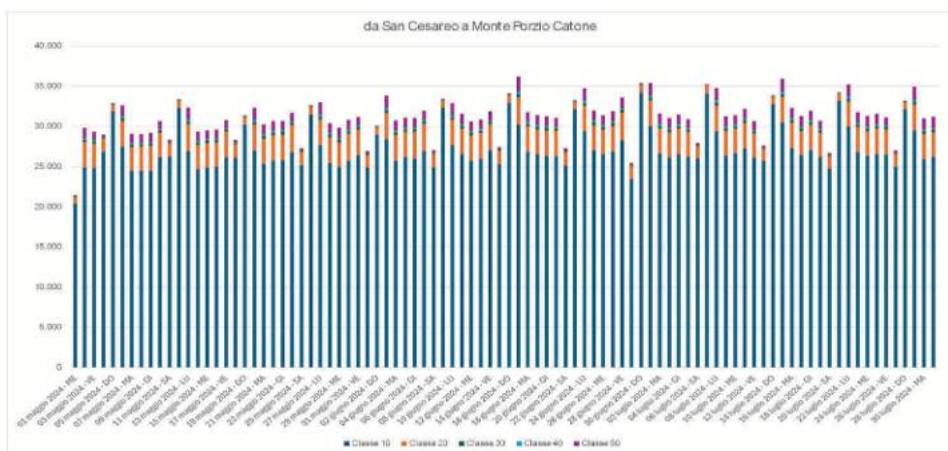


Figura 8.62 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra San Cesareo e Monte Porzio Catone, in direzione Nord, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

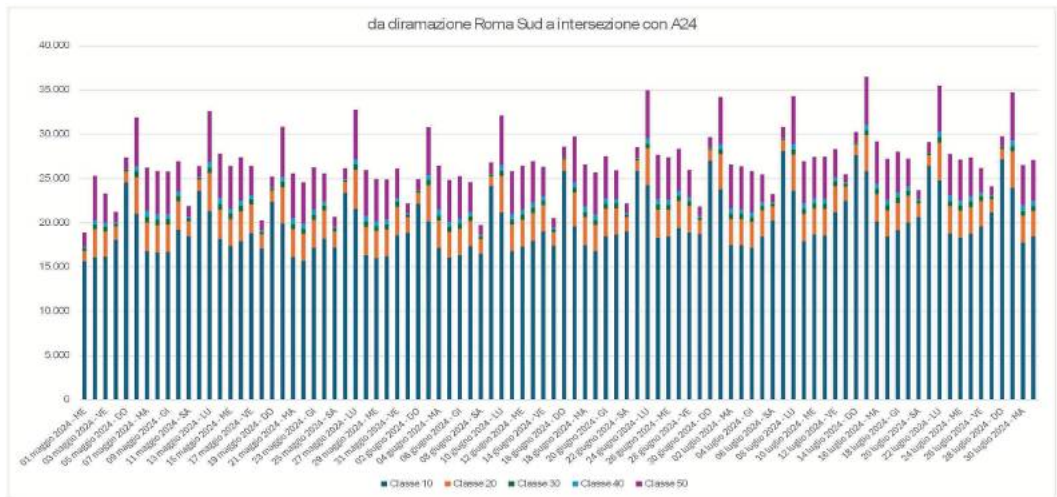


Figura 8.63 Flussogrammi relativi al tronco compreso fra la diramazione Roma Sud e l’intersezione con la A24, in direzione Nord, relativi al periodo 1° maggio-31 luglio 2024.

Riguardo al secondo interrogativo, si è osservato che la somma dei flussi rilevati sui tronchi orientati verso Sud / Sud-Est della E821 e della A1 (per la precisione il tronco proveniente da Roma Sud e quello della bretella proveniente dall’intersezione con la A24) non coincide con il traffico rilevato sul tronco della A1 che va verso Valmontone (cfr. la sottostante sintesi grafica per un giorno tipico – traffico in migliaia di veicoli). Il bilancio dei flussi trova coerenza se si ipotizza un traffico di scambio tra il ramo della A1 proveniente da Nord e la E821 proveniente da Roma Sud, che nel giorno dell’esempio può essere stimato in circa 5.000 veicoli (Figura 8.64). Il quantitativo non è di poca rilevanza e indica che, per molte coppie O/D tra i quadranti meridionali della città di Roma e le destinazioni a Nord o a Est della capitale raggiungibili con la A1, può essere reputato vantaggioso allungare il percorso dei non pochi chilometri della E821 pur di evitare l’arco orientale del GRA, spesso congestionato.

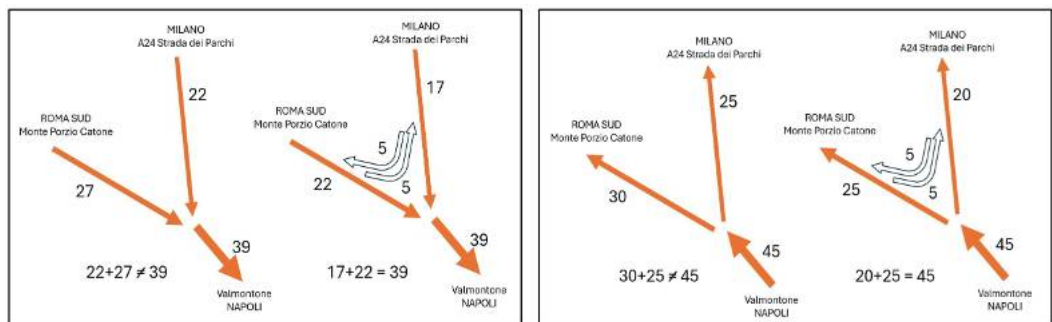


Figura 8.64 Ipotesi di bilanciamento dei flussi di traffico - Nodo diramazione Roma Sud.

Per il giorno di massimo traffico nel periodo considerato, il 15 luglio per la direzione Nord e il 28 giugno per la direzione Sud, i grafici sono aggiornati in Figura 8.65.

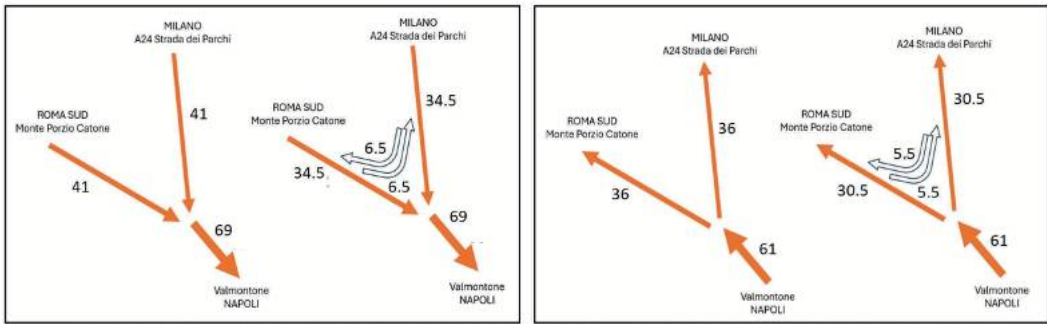


Figura 8.65 Ipotesi di bilanciamento dei flussi di traffico nel giorno di picco del traffico - Nodo diramazione Roma Sud.

Completata così l'analisi dei dati di Società Autostrade, si possono analizzare quelli messi a disposizione da Strada dei Parchi.

Per il tratto compreso tra il GRA e l'interconnessione con la A1, i passaggi sono suddivisi in cinque classi secondo il sistema ANAS "Assi-Sagoma" mostrato in Figura 8.66: Sistema di classificazione dei veicoli.. Sono stati forniti solamente i totali rilevati nel periodo compreso tra il 1° maggio e il 31 luglio 2024 (Tabella 8.14.), facendo notare che i dati sono di semplice interpretazione per la tratta elementare compresa tra la barriera di Roma Est e l'interconnessione con la A1 e la tratta elementare compresa tra la Interconnessione A1 e l'uscita di Tivoli, mentre relativamente al tratto GRA - Roma Est l'elaborazione è più complessa in quanto, non disponendo di stazioni su tutta la tratta e stante la conformazione dell'infrastruttura, viene eseguito un censimento annuale del traffico e un'elaborazione sulla base di modelli matematici.

Purtroppo, non è stato fornito nessun riferimento alla variabilità settimanale, giornaliera od oraria del traffico, ma solamente il complessivo su tre mesi. Se si calcola la media giornaliera, si ottengono valori di circa 31.000 passaggi per ciascuna direzione. Assumendo un moltiplicatore 1,5 (similare a quanto osservato per lo stesso periodo sui dati di Autostrade per l'Italia), si stimano circa 45.000 passaggi nel giorno di maggior traffico.

Sono state fornite anche alcune elaborazioni su dati del 2023 per le tre partizioni del tratto compreso tra la barriera di Roma Est, i caselli di Ponte di Nona e Settecamini, e il GRA, suddivisi per mesi e distinti in due categorie (traffico leggero e pesante). In alcuni mesi si osservano, però, rilevantissimi scostamenti dalle medie, spiegabili forse con deviazioni temporanee del traffico dovute a chiusura di alcune corsie per lavori. D'altro canto, si osserva anche la ripetizione esatta della stessa serie di numeri per due tratte consecutive, come se lo svincolo che le separa non comportasse nessuna minima variazione del traffico tra l'una e l'altra. Tali evidenti problematicità, lasciano pensare che queste informazioni possano essere utili solamente per valutare un ordine di grandezza dei transiti. Per il mese di luglio, che è stato in precedenza preso a riferimento per i tronchi di Autostrade per l'Italia, le anomalie osservate sembrano meno gravi e quindi, applicando lo stesso coefficiente di maggiorazione di 1,5 per la giornata più trafficata rispetto alla media mensile, può ricavarsi la seguente Tabella 8.15, nella quale è anche riportato il valore di 45.000 veicoli circa precedentemente stimato per il tratto tra l'interconnessione con la A1 e la barriera di Roma Est.

Tabella 8.14 Flussi di traffico messi a disposizione da Strada dei Parchi tra il GRA e l'interconnessione con la A1, differenziati per verso di percorrenza in sinistra a) ed in destra b) e classe dei veicoli.

Livello di sintesi	giornaliera	Tratta elementare	ROMA EST - ALL. A1/A24	
Periodo	da 01 Maggio 2024 a 31 Luglio 2024	Verso percorrenza	Sinistra	
Tipo rete	CHIUSA	Sintesi per	Tratta elementare	
Rete	RETE 1	Numero Giorni	92	
Autostrada	24 - ROMA - L'AQUILA			

Classe	Lunghezza (Km)	Volumi	Km percorsi	%
104 - A24 ROMA-TORANO, ROMA EST - ALL. A1/A24				
Classe A	19,261	2.472.364	45.018.700,891	87,95
Classe B	19,261	233.437	4.204.725,537	8,21
Classe 3	19,261	28.553	506.033,786	0,99
Classe 4	19,261	10.514	186.474,925	0,36
Classe 5	19,261	71.322	1.272.552,413	2,49
Classe ES	19,261	0	0,000	0,00
Classe NC	19,261	0	0,000	0,00
Totale parziale 104 - A24 ROMA-TORANO, ROMA EST - ALL. A1/A24		2.816.190	51.188.487,55	100,00
Totale			51.188.487,552	100,00

a)

Livello di sintesi	mensile	Tratta elementare	ROMA EST - ALL. A1/A24	
Periodo	da Maggio 2024 a Luglio 2024	Verso percorrenza	Destra	
Tipo rete	CHIUSA	Sintesi per	Tratta elementare	
Rete	RETE 1	Numero Giorni	92	
Autostrada	24 - ROMA - L'AQUILA			

Classe	Lunghezza (Km)	Volumi	Km percorsi	%
104 - A24 ROMA-TORANO, ROMA EST - ALL. A1/A24				
Classe A	19,261	2.580.576	46.945.730,691	88,43
Classe B	19,261	226.471	4.072.166,575	7,67
Classe 3	19,261	32.649	582.785,807	1,10
Classe 4	19,261	12.066	215.950,547	0,41
Classe 5	19,261	70.920	1.271.212,700	2,39
Classe ES	19,261	1	17,000	0,00
Classe NC	19,261	2	35,504	0,00
Totale parziale 104 - A24 ROMA-TORANO, ROMA EST - ALL. A1/A24		2.922.685	53.087.898,82	100,00
Totale			53.087.898,824	100,00

b)

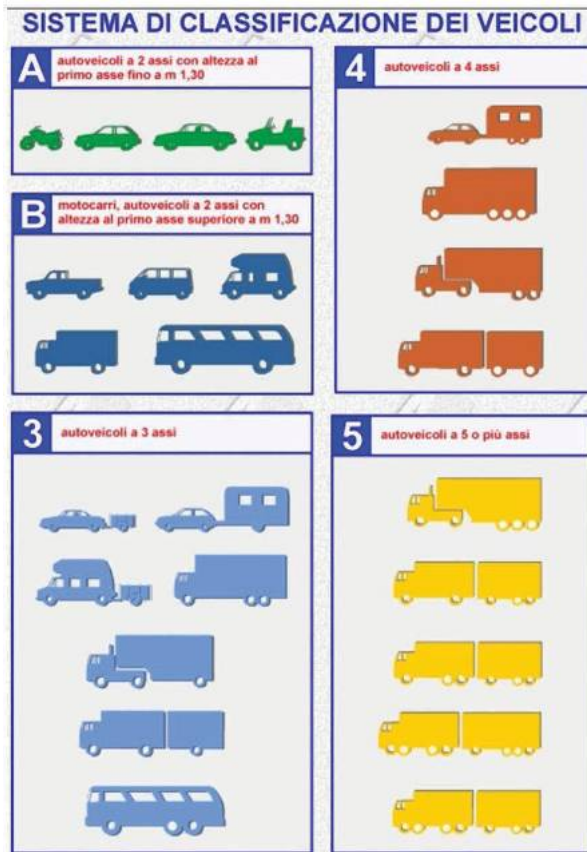


Figura 8.66 Sistema di classificazione dei veicoli.

Si osserva un traffico in deciso aumento verso la capitale (Figura 8.67), che prima dell'intersezione con il GRA si suddivide più o meno equamente tra la carreggiata centrale, diretta verso il Verano, e la carreggiata complanare, che convoglia i veicoli verso il GRA per entrambe le direzioni Nord e Sud.

Tabella 8.15 elaborazioni dati del 2023 per le tre partizioni del tratto compreso tra la barriera di Roma Est, i caselli di Ponte di Nona e Settecamini e il GRA, differenziati per carreggiata (centrale e complanare) e direzione di marcia.

< totale	GRA	111360	Settecamini	79174	Ponte di Nona	53756	Roma Est	45000	interconnessione A1
< complanare		54556		41376		25210			
< centrale		56805		37798		28546			
complanare >		39672		22111		20099			
centrale >		38994		36822		36822			
totale >	78666	58933	56921	45000					

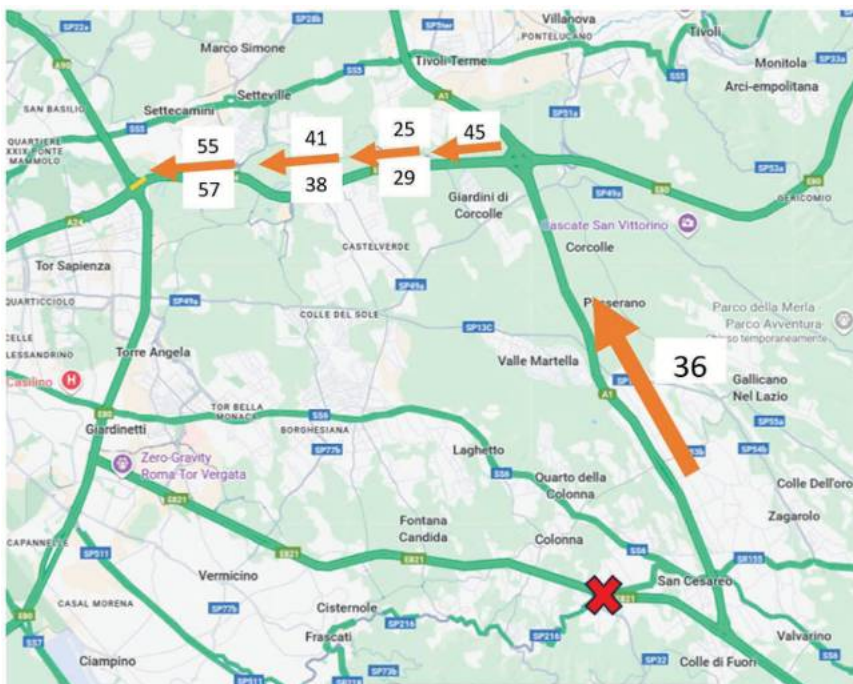


Figura 8.67 Incremento del traffico verso il GRA.

8.4.5 Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

L'obiettivo della Fase 3 è simulare l'interazione tra offerta e domanda per l'area di studio e valutare la resilienza del sistema di trasporto, misurando i principali *Key Performance Indicators* (KPIs) – (e.g., tempo di percorrenza, lunghezza dei percorsi, velocità media) sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni degradate in seguito a interruzioni.

Per i motivi precedentemente accennati non si procede alla valutazione quantitativa dei *Key Performance Indicators* (KPIs) per la rete locale, ma solo per la rete autostradale, rispetto alla quale l'analisi è relativamente semplice, poiché, come si è detto, i percorsi alternativi sono di fatto obbligati, tanto che si può addirittura parlare di un solo percorso alternativo, formato da tre tratti: la A1 tra l'incrocio con la diramazione per Roma Sud e l'incrocio con la A24 (Figura 8.68), il tronco dell'A24 interno al GRA e poi da un arco di GRA "personalizzato", fino all'uscita più adeguata all'origine/destinazione del singolo viaggio (Figura 8.69).

Per valutare i *Key Performance Indicators* (KPIs) sulla A1 in direzione Nord, al traffico già insistente sul tratto della A1 compreso tra la diramazione per Roma Sud e lo svincolo con la A24 si deve sommare quello che ordinariamente imbecca la diramazione verso Roma Sud. In sostanza, tutto il traffico proveniente da Sud deve proseguire sulla A1, che nel tratto di interesse non cambia la sua sezione. Pertanto, le condizioni di esercizio della circolazione si manterranno simili fino all'interconnessione con la A24, mentre all'attualità si osserva una decisa contrazione dei flussi.



Figura 8.68 Schema funzionale della rete autostradale facente parte del percorso alternativo.



Figura 8.69 Nodo fra A24 e il GRA facente parte del percorso alternativo con valutazione indicativa dei carichi di traffico in ora di punta (fonte Google).

Analoga considerazione vale per il tratto della A24 da percorrere per raggiungere il GRA, ma si deve tenere conto della conformazione con carreggiate complanari dedicate agli svincoli intermedi. A tal proposito, si è già osservato che i dati disponibili non consentono di eseguire una vera analisi sui livelli di servizio e sulla loro modificazione a seguito dell'aumento di traffico. Tuttavia, è possibile affermare, qualitativamente, che il carico sulla complanare in direzione Roma sarà decisamente notevole, soprattutto nelle prime ore del mattino, e orientativamente stimabile nella somma dei circa 30.500 veicoli giornalieri rediretti a causa della

interruzione, più i 54.500 che già entrano nel GRA, per un totale di 85.000 veicoli nel giorno più carico. Allo stato attuale si registra regolarmente congestione per confluire nel GRA (cfr. in Figura 8.69 la previsione di traffico tipico alle ore 9 del lunedì o del mercoledì). Non potrà che aversi un considerevole aumento della congestione. Si noti che la configurazione dello svincolo con il GRA prevede una rampa diretta verso Nord e una semidiretta verso Sud che hanno un tratto iniziale in comune. Pertanto, se una delle due direzioni sul GRA è saturata, la congestione si riverbera su entrambi i flussi fino al momento della separazione.

È probabile che una certa parte del traffico deviato a seguito dell'interruzione, una volta istradato sulla A24, si diriga direttamente verso Roma fruendo del tronco urbano di quella autostrada, affidando alla rete urbana la funzione di distribuzione verso Nord e verso Sud affidata al GRA in condizioni ordinarie. Questo comporterebbe un minor aggravio sullo svincolo del GRA, poiché può essere impegnata la carreggiata centrale passante, ma comporta anche un aumento delle code alle uscite di via Palmiro Togliatti e di via dei Fiorentini, code sempre presenti nelle ore di punta, nonché alla confluenza semaforizzata nella tangenziale Est di Roma.

Decisamente più complessa è la valutazione dei *Key Performance Indicators* (KPIs) sul GRA, seppur qualitativa, sia per l'assenza di una precisa conoscenza sulla distribuzione delle origini/destinazioni del traffico che sarà rediretto, sia per la già evidente criticità del livello di servizio sul GRA, frequentemente in congestione in molti periodi della giornata per eccesso di flussi o per incidenti (Figura 8.70).

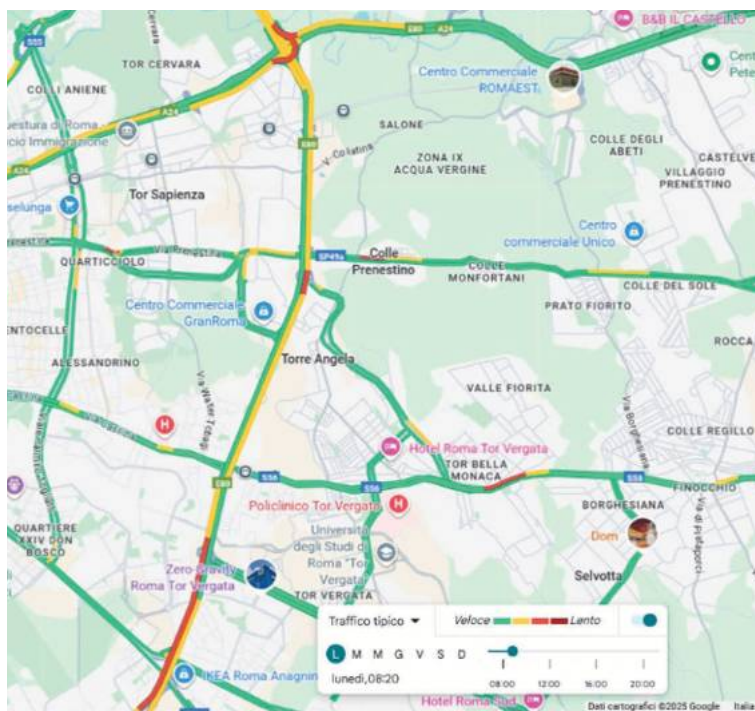


Figura 8.70 Tronco del GRA facente parte del percorso alternativo con valutazione indicativa dei carichi di traffico (fonte Google).

Prendendo ora in esame la relazione inversa, dal GRA a Valmontone, si possono fare considerazioni analoghe. Si tratta del traffico che a causa dell'interruzione del manufatto sarà rediretto lungo il tratto sud-est del GRA fino alla A24, per poi proseguire verso Sud all'intersezione tra la A1 e la A24. Per questa relazione di traffico, sulla A24 sono disponibili le due corsie della complanare; più limitativa appare l'unica corsia della rampa diretta che permette di imboccare la A24 dal GRA, ma le maggiori preoccupazioni per i livelli di servizio riguardano, tuttavia, proprio il GRA, che, come pocanzi detto, anche per questa direzione è sovraccarico per varie ore del giorno.

Le considerazioni finora svolte rispetto alla resilienza della rete indicano come:

- a) il percorso alternativo è praticamente obbligato;
- b) molta parte del percorso è già allo stato attuale a livelli di servizio molto degradati;
- c) il maggior carico di traffico non è affatto modesto e può comportare code molto lunghe e ritardi di entità non prevedibile, ma comunque notevole.

Ciò detto, appare molto opportuno valutare se interventi strutturali sulla rete, ancorché temporanei, possano essere ragionevolmente realizzabili.

A tal proposito, l'analisi dello svincolo di San Cesareo lascia spazio a qualche ipotesi progettuale. Si è già osservato che i rami verso Roma, di ingresso e di uscita, non sono disturbati dall'interruzione del manufatto, mentre quelli verso l'interconnessione con la A1 non possono essere utilizzati. L'ipotesi da verificare consiste nell'impiego di tutto o parte dei rami lato Roma per realizzare una deviazione locale che consenta di sopperire alla mancanza del manufatto.

Una prima soluzione (Figura 8.71) per il traffico diretto verso la A1 consiste nel costruire una breve rampa aggiuntiva che dalla corsia di decelerazione per l'uscita di San Cesareo consenta di raggiungere la via di Colonna, da trasformare in senso unico per il tratto coinvolto, e poi di utilizzare la viabilità locale (via Maremmana e via dello Sviluppo) fino all'intersezione tra via dello Sviluppo e via delle Scienze, così da rientrare infine in autostrada senza dover affrontare dislivelli significativi.



Figura 8.71 Ipotesi schematica di interventi strutturali sulla rete stradale – 1 di 5.

Molto più efficiente per la fluidità della circolazione potrebbe essere la soluzione mostrata nella Figura 8.72, che evita la problematica svolta a sinistra alla fine di via di Colonna, ma richiede qualche occupazione temporanea di aree private, la demolizione di qualche edificio e un dislivello iniziale non di banale superamento.



Figura 8.72 Ipotesi schematica di interventi strutturali sulla rete stradale – 2 di 5.

Per il traffico diretto verso Roma si può analogamente ottenere lo scavalcamento del manufatto interrotto uscendo dall'autostrada nel punto in cui la quota è pari a quella della via Maurizio Iaconelli, percorrendola tutta fino alla via Maresmmana, dove si può subito imboccare la diramazione che porta al casello e poi alla rampa di ingresso verso Roma (Figura 8.73).



Figura 8.73 Ipotesi schematica di interventi strutturali sulla rete stradale – 3 di 5.

Anche in questo caso, l'eventuale trasformazione in senso unico della via Iaconelli non inibisce l'accessibilità alle abitazioni e alle attività commerciali, industriali e artigianali del luogo, poiché la rete locale è ridondante.

Inoltre, può essere valutata l'opportunità di distinguere tra traffico leggero e pesante, consentendo l'utilizzo delle ipotizzate deviazioni solo al traffico leggero, in modo da massimizzare la capacità di smaltimento dei flussi e aumentare la velocità nei punti critici (curve di piccolo raggio e punti di conflitto).

Le soluzioni ora illustrate evidenziano una questione finora non esaminata: se l'interruzione dell'opera, supposta interessante entrambe le carreggiate autostradali, comporti o

meno la chiusura della sottostante via Maremmana. Nelle precedenti considerazioni la via Maremmana si è considerata implicitamente in esercizio e si è conseguentemente trascurato ogni riflesso sulla viabilità locale.

L'interruzione della Maremmana comporta un grave nocumento alla mobilità tra le zone poste a Nord e quelle poste a Sud dell'autostrada. Le altre opere di scavalco o di sottoattraversamento sono tutte, per un raggio di 2 km, con sezione di 4 metri o addirittura inferiore e mettono in comunicazione strade minori o addirittura agricole. Pertanto, una sostituzione efficace del sottopasso della Maremmana potrebbe attuarsi solamente utilizzando per l'attraversamento il sottopasso dello svincolo di San Cesareo, ad esempio realizzando un'ulteriore opera provvisoria, indicata in verde nella Figura 8.74.

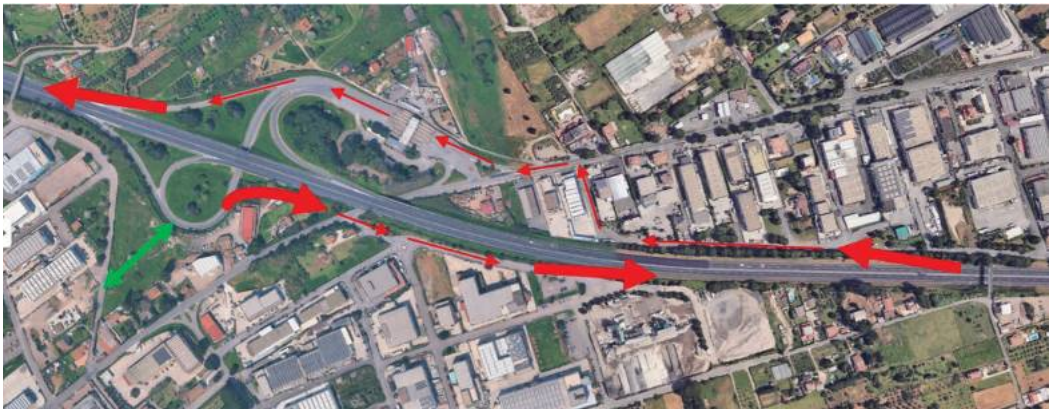


Figura 8.74 Ipotesi schematica di interventi strutturali sulla rete stradale – 4 di 5.

Come ulteriore perfezionamento della soluzione "locale" si potrebbe infine riflettere sulla opportunità di cessare deliberatamente la continuità della Maremmana al fine di sopprimere tutte le interferenze delle intersezioni dei flussi che la percorrono con quelli deviati dalle corsie autostradali. I due punti di conflitto sono effettivamente molto importanti e comporterebbero ritardi sensibilissimi. Evitarli permetterebbe di avere velocità lungo la deviazione di 30-40 km/h e notevole capacità di smaltimento. Il traffico di scambio tra le zone a Nord e a Sud dell'autostrada dovrebbe, in tal caso, trovare soluzione utilizzando i due sottopassi indicati nella Figura 8.75, che sono gli unici di dimensioni sufficienti e collegati a una rete stradale connessa e non a fondo cieco (via Frascati Colonna a Ovest e via Colle di Fuori a Est).

La fattibilità delle diverse soluzioni descritte va valutata con più mirate valutazioni in loco e condivisa con i rappresentanti della comunità locale per far emergere problematiche non direttamente ricavabili dalla semplice osservazione della rete stradale e del territorio. Il processo si concluderà con lo sviluppo del piano di comunicazione, del progetto di dettaglio della segnaletica e con la progettazione degli eventuali interventi strutturali sugli elementi della rete, da eseguirsi con la stessa impresa affidataria del lavoro sul viadotto ovvero con appalti separati, per i quali occorre concordare con tutti gli interessati quale sia la più razionale ed efficiente stazione appaltante.



Figura 8.75 Ipotesi schematica di interventi strutturali sulla rete stradale – 5 di 5.

Per quanto riguarda la comunicazione all'ampia comunità degli utenti dell'autostrada, il piano di comunicazione potrà giovare dei pannelli a messaggio variabile, nei quali sarà possibile indicare anche dove ottenere indicazioni dettagliate sulle alternative. In particolare, appare opportuno creare un sito internet dal nome estremamente breve e di facile memorizzazione, in modo da permetterne una semplice e rapida digitazione sugli apparecchi informatici di uso corrente.

8.5 Caso di Studio 5: rete primaria urbana (Tangenziale di Napoli)

Il quindi caso di studio riguardano le opere presenti lungo la **Tangenziale di Napoli**. Le opere di interesse potenziale sono 48, di cui 41 nel tratto tra lo svincolo di Fuorigrotta e l'uscita di Capodichino. Da questo secondo insieme sono state selezionate quattro opere, sottoposte ad indagine. Esse sono rappresentate in Figura 8.76.

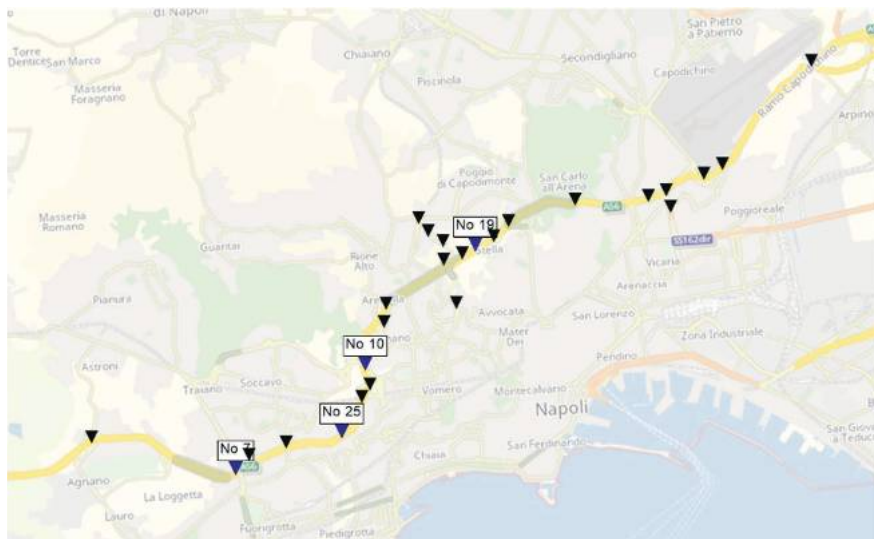


Figura 8.76 Individuazione planimetrica delle opere selezionate per il Caso di Studio 5.

La tangenziale è caratterizzata da una sezione trasversale continua, con tre corsie per senso di marcia, e tutte le opere si trovano lungo di essa. L'infrastruttura è un asse viario strategico per la mobilità dell'area urbana di Napoli e i suoi volumi di traffico sono elevati soprattutto nelle fasce orarie di punta (mattino e sera), ma anche in quelle di morbida.

Con riferimento agli archivi nella Tabella 8.16 sono riportate alcune informazioni relative alle opere in esame.

Tabella 8.16 Riferimenti alle opere selezionate per il Caso Studio 5.

Concessionario	ID opera	Codice IOP	Nome	Progressiva km		S [ag/g]
				Iniziale	Finale	
Tangenziale di Napoli	7	STAU0A56PNZBT9RCNB	Cavalcavia di svincolo Agnano	7+337	7+396	0.1670
Tangenziale di Napoli S.p.A.	10	STAU0056POJAZ4LH5E	01.01.0067.0.0 - Viadotto Arena Sant'Antonio	12+877	13+533	0.1670
Tangenziale di Napoli S.p.A.	19	STAU0A56PNBW7RFN9O	Cavalcavia di svincolo Arenella	15+501	15+501	0.1670
Tangenziale di Napoli S.p.A.	25	STAU0A56PNID5OOSJ9	Semiviadotto del Lupo	11+602	11+671	0.168

8.5.1 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A1**, è stata identificata l'**area di studio**, che si estende per una superficie di 122 km². La delimitazione dell'area è stata effettuata tenendo conto della configurazione della rete stradale, della presenza di percorsi alternativi al segmento oggetto di potenziale interruzione e dell'accessibilità ai principali centri urbani. Inoltre, essa coincide, per la parte di zone interne, alla delimitazione delle zone del PUMS della Città Metropolitana di Napoli

Dal punto di vista sociodemografico, l'area di studio coincide con il comune di Napoli. Il territorio comunale presenta una **morfologia complessa e varia**, dovuta all'origine **vulcanica** e alla presenza di rilievi collinari che si alternano a zone pianeggianti e costiere. L'area napoletana fa parte del **complesso vulcanico dei Campi Flegrei** e si trova a breve distanza dal **Vesuvio**. Il centro urbano di Napoli non è pianeggiante: è costruito su un insieme di **colline tufacee**, che raggiungono altezze modeste ma conferiscono al paesaggio un profilo movimentato. Tra le principali colline ci sono:

- **Collina di Posillipo** (circa 150 m s.l.m.), che si protende verso il mare e offre un panorama sul golfo;

- ⊙ **Collina del Vomero** (fino a 250 m s.l.m.), una delle più elevate, oggi densamente urbanizzata;
- ⊙ **Collina di Capodimonte e dei Camaldoli** (circa 450 m s.l.m.), le più alte del territorio comunale.
- ⊙ La parte pianeggiante della città si estende soprattutto:
- ⊙ lungo il **lungomare** e il **centro storico** (area del porto, via Toledo, piazza Municipio),
- ⊙ verso la **piana di Poggioreale** e la **piana del Sebeto**, residuo di un antico corso d'acqua.

8.5.2 Zonizzazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A2**, l'area di studio è stata zonizzata in unità territoriali. Poiché il territorio è già coperto da matrici O/D ufficiali fornite dall'Area Metropolitana (passeggeri dell'ora di punta del mattino), la zonizzazione è stata allineata a tale suddivisione per garantire la compatibilità e la coerenza del modello.

Complessivamente, la zonizzazione ha prodotto 142 zone interne e 26 zone esterne al cordone rappresentate cartograficamente in Figura 8.77. Le sezioni al cordone rappresentano le arterie di scambio di spostamenti tra Napoli e la sua area metropolitana



Figura 8.77 Individuazione planimetrica delle zone considerate nel Caso di Studio 5 (in nero le sezioni al cordone).

8.5.3 Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti

In accordo con quanto indicato in **F1.A3**, la rete stradale è stata modellata mediante la **costruzione di un grafo**. Come descritto nella sezione metodologica, il processo si è articolato in tre fasi principali: (i) estrazione dei dati dalla rete Multinet², (ii) importazione dei dati nel software di modellazione PTV VISUM e (iii) impostazione degli attributi dei nodi e degli archi. Particolare attenzione è stata dedicata alla **verifica dell'attributo relativo ai sistemi di trasporto ammessi su ogni arco**, al fine di garantire coerenza con la realtà in merito alla **percorribilità dei tronchi stradali da parte dei mezzi pesanti**. La modellazione ha prodotto un grafo composto da circa 14.480 nodi e 33.090 archi.

Il grafo risultante è rappresentato cartograficamente in Figura 8.78. Dall'analisi della figura emerge una certa capillarità della rete infrastrutturale che copre, in maniera omogenea tutte le zone del Comune. che la rete principale è caratterizzata dai tratti Autostradali, dalla Tangenziale e dal Raccordo di Soccavo per le sue arterie extraurbane di scorrimento mentre al centro della città le arterie di maggior rilievo sono quelle del lungomare (via Caracciolo, riviera di Chiaia, via Acton, etc..)



Figura 8.78 Rappresentazione cartografica del grafo modellato per il Caso di Studio 5 (software PTV Visum).

² La rete multinet è un altro database di reti stradali. MultiNet fornisce mappe complete che includono dettagli elevati a livello di strada e interconnessioni delle reti stradali. A livello di definizione funzionale degli archi, essa è assimilabile a quella OSM ma con denominazioni diverse e contenuto informativo verificato. L'accesso a tale risorsa non è gratuito, ma consente di risparmiare risorse in fase di validazione dei risultati della importazione del grafo.

La rete principale si sviluppa principalmente nella direzione Est-Ovest e Nord-Est e di essa fanno parte:

- ⊙ Raccordo di Soccavo
- ⊙ Tangenziale di Napoli
- ⊙ Lungomare di Napoli (via Acton, via A.Dohrn, via Caracciolo, etc.)
- ⊙ via G. Cesare nel quartiere Fuorigrotta;

Nel caso della rete primaria, data l'area di studio, le direttrici autostradali rientrano nella rete primaria, ma sono principalmente utilizzate per simulare l'adduzione di spostamenti interregionali o interprovinciali. A questa rete si aggiunge una fitta rete secondaria e locale, che consente di ottenere un grafo fortemente magliato e connesso.

A valle di quest'ultima considerazione e del posizionamento delle opere, è facile dedurre che un'analisi qualitativa non è realizzabile in questo caso e che, pertanto, si deve procedere con una valutazione quantitativa della resilienza per identificare gli impatti specifici e valutare le possibili soluzioni per mitigare le criticità emerse.

In accordo con quanto indicato nella sezione metodologica, la modellazione della domanda (F2) può essere sviluppata seguendo approcci differenti: da un lato, metodi tradizionali basati sull'utilizzo delle matrici O/D ufficiali; dall'altro, soluzioni più innovative che sfruttano i dati provenienti da sistemi di navigazione. La scelta dell'approccio adottato influisce direttamente sugli esiti delle fasi successive (F3 e F4). Nel caso in esame si è adottato un approccio ibrido e unico, utilizzando congiuntamente una fonte ufficiale (matrice OD di punta del PUMS dell'area metropolitana) e matrici OD campionate con *Floating Car Data*. L'utilizzo di questa tecnica ha permesso di estendere le considerazioni sulla resilienza non solo all'ora di punta bensì all'intera giornata di 24 ore.

8.5.4 Approccio ibrido: matrici O/D: PUMS e basate su FCD

Modellazione della domanda

Il punto di partenza della modellizzazione della domanda è stato la matrice OD del PUMS dell'Area metropolitana. Essa fornisce, per un'area di studio più ampia, coincidente non con il comune ma con l'Area metropolitana di Napoli (ex provincia), la matrice origine-destinazione del trasporto privato del giorno feriale medio con riferimento alla sola ora di punta (coincidente con l'intervallo 08:00 – 09:00). Come riportato in precedenza, le sezioni interne della zonizzazione utilizzata per il Caso Studio 5 sono coincidenti con alcune delle zone di traffico del PUMS per cui è stato possibile ricavare, con riferimento ad esse, un rapporto per ciascuna relazione OD il cui numero di spostamenti nelle matrici OD PUMS fosse maggiore di zero.

I valori non vengono riportati in Figura 8.79 dato che il loro numero è sopra i diecimila, per cui si è deciso di riportare la loro distribuzione.

Analizzando la precedente figura si verifica che i valori si dispongono secondo una distribuzione di tipo Log-normale i cui parametri vengono riportati in Tabella 8.17.

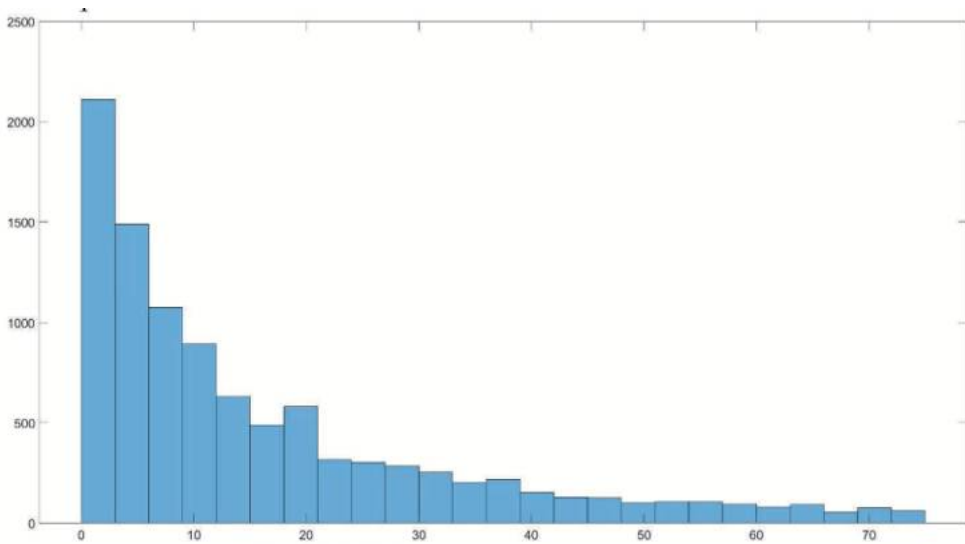


Figura 8.79 Distribuzione del rapporto tra spostamenti PUMS e FCD.

Il valore medio di 19,87 equivale a un *penetration rate* della tecnologia TomTom pari a poco più del 5%. Quindi, utilizzando i parametri della distribuzione log-normale è stata creata, per ciascuna fascia oraria, una matrice di coefficienti che permettesse l'*espansione* del campione FCD all'intero universo degli spostamenti con veicoli. Alla creazione di ciascuna matrice è stato imposto che il valore medio e la varianza di quest'ultima fosse nell'intorno dei valori 19,87 e 1800. Dato l'elevato numero di zone (168) non si riportano le matrici O/D ottenute in relazione dato che queste ultime sarebbero di difficile lettura ma si rimanda all'Appendice 2.

Parametro	Valore
μ	2.13496
σ	1.31047
Media	19.87
Varianza	1800

Tabella 8.17 Parametri della distribuzione log-normale del rapporto tra spostamenti PUMS e FCD/TomTom.

Assegnazione della domanda

Come descritto nell'azione **F3.A1**, l'assegnazione della domanda alla rete stradale rappresenta un passaggio cruciale per simulare l'operatività della rete sia in condizioni normali sia in condizioni degradate. L'assegnazione è stata di equilibrio a rete congestionata, con scelta del percorso basata sulla probabilità. Complessivamente sono state eseguite **120 assegnazioni distinte**: 24 (una per ogni fascia oraria giornaliera) relative allo scenario base di rete non degradata, e 96 con riferimento alle condizioni di rete degradata. Queste ultime riguardano 24 assegnazioni per ciascuna delle quattro opere, di cui si è ipotizzata la chiusura.

Valutazione dei KPI sulla rete modellata

I livelli di domanda della matrice O/D sono estremamente variabili durante l'arco della giornata, per cui durante le ore notturne l'approccio valuterà maggiormente la connettività

della rete (approccio **Connectivity-based**), dato che il livello di saturazione di quest'ultima è pressoché nullo e le valutazioni a rete carica o scarica condurrebbero a risultati del tutto paragonabili. Al contrario, durante le ore di punta verrà valutato il livello di servizio dell'area (approccio **Level of Service-based**). In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A2**, per effettuare una valutazione quantitativa della resilienza della rete sono stati calcolati diversi **Key Performance Indicators (KPIs)** fondamentali, tra cui il tempo di percorrenza, la lunghezza dei percorsi e la velocità media degli spostamenti. Per analizzare l'impatto delle condizioni degradate, è stata calcolata la **variazione percentuale** dei KPIs tra lo scenario di base (**scenario BAU – Business As Usual**), in cui il manufatto è pienamente operativo, e gli scenari degradati, che prevedono la chiusura totale del manufatto. I risultati verranno presentati graficamente mediante l'utilizzo di boxplot ovvero un grafico statistico che illustra la distribuzione del parametro attraverso l'utilizzo di 5 metriche: valore minimo, primo quartile (Q1), mediana (Q2), terzo quartile (Q3) e valore massimo. Infine, i parametri verranno valutati sia con riferimento all'intera rete in esame, sia alle sole relazioni O/D che, nello scenario non degradato, utilizzano le opere analizzate.

Le analisi condotte evidenziano come la magnitudo dei risultati dipende dal considerare i parametri con riferimento alla globalità dell'area di studio o dal focalizzarsi solo sulle relazioni O/D che, in condizioni non perturbate, utilizzano l'opera. Difatti, con riferimento all'intera area di studio, gli effetti potrebbero portare ad una visione distorta a causa del possibile basso numero di coppie OD impattate dall'opera in esame. Con riferimento ai 4 manufatti analizzati, la percentuale media, rispetto al totale, di relazioni OD impattate è: i) il 13,3% per l'opera 10; ii) il 15,47% per l'opera 19; iii) il 9,54% per l'opera 25 e iv) il 3,19% per l'opera 7.

Indicatori a seguito della completa chiusura del manufatto

Le analisi, quindi, sono state condotte con riferimento ai parametri *tempo di percorrenza* e *lunghezza media dei percorsi*, sia per l'intera rete sia per le sole relazioni O/D interessate dalla chiusura. Le distribuzioni statistiche sono riportate dalla Figura 8.80 alla Figura 8.85 da cui si evince come l'opera che ha il maggiore impatto sulla mobilità dell'area di studio è l'opera 19 che presenta un impatto considerevole anche considerando l'intera rete globalmente dato che presenta un valore mediano di variazione del tempo di percorrenza pari a 27% sull'intera rete e del 66% per le sole coppie O/D impattate.

Discorso opposto per l'opera 7 che, con riferimento all'intera area di studio ha un impatto, per entrambi gli attributi marginale (in singola cifra con valori mediani prossimi all'unità) ma che, se si considerano le coppie O/D impattate, mostrano valori mediani più alti che raggiungono un ragguardevole 52% per il tempo di percorrenza ed un valore del 12% per la lunghezza dei percorsi.

Infine, le opere 10 e 25 presentano, in entrambi i casi, intera rete e solo o/d impattate, valori minori di variazione della lunghezza media dei percorsi, ma un aumento più considerevole dei tempi di viaggio.

Gli aspetti di analisi dei risultati comuni a tutte e quattro le opere suggeriscono che le deviazioni sono di modesta entità, ma che, lungo il nuovo percorso deviato, si sviluppano fenomeni di congestione del traffico locale derivanti dai flussi della tangenziale che si riversano sulla rete ordinaria, caratterizzata da una capacità inferiore.

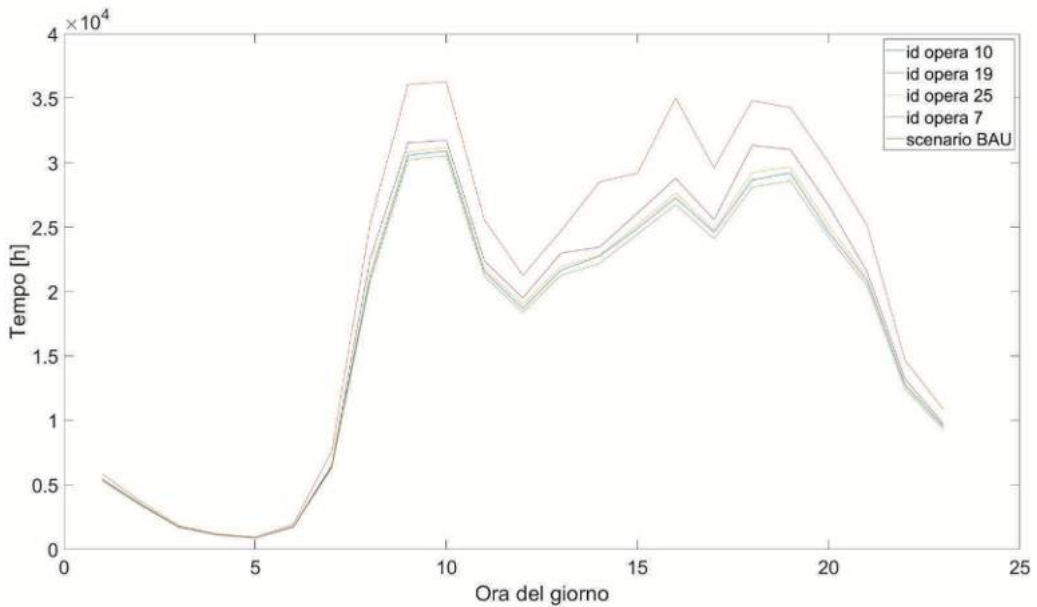


Figura 8.80 Chiusura totale: andamento giornaliero del totale su rete in ciascuno scenario.

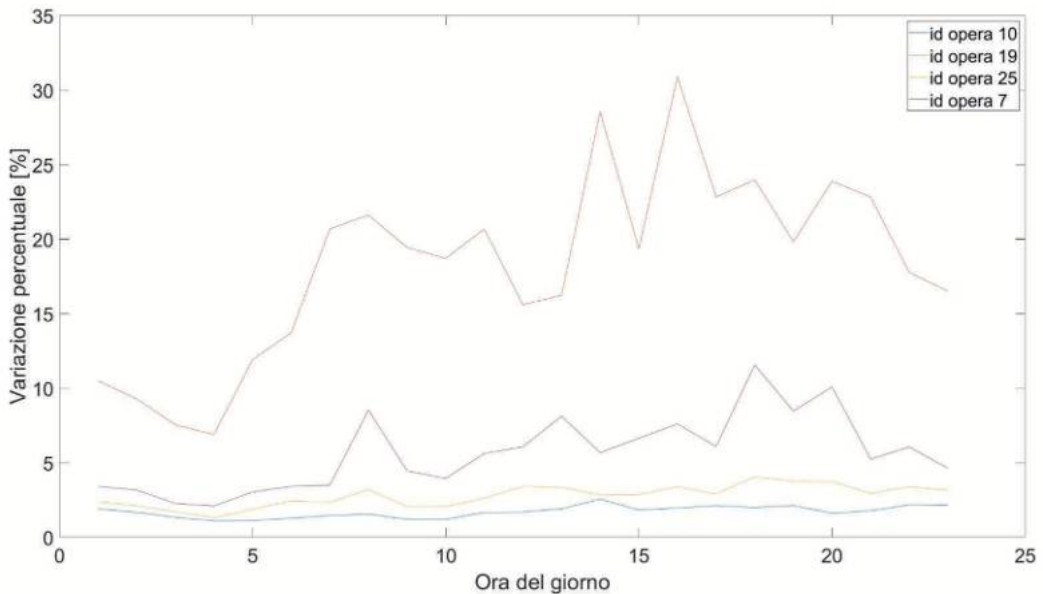


Figura 8.81 Chiusura totale: andamento giornaliero della variazione percentuale del tempo di viaggio totale rispetto allo scenario non perturbato.

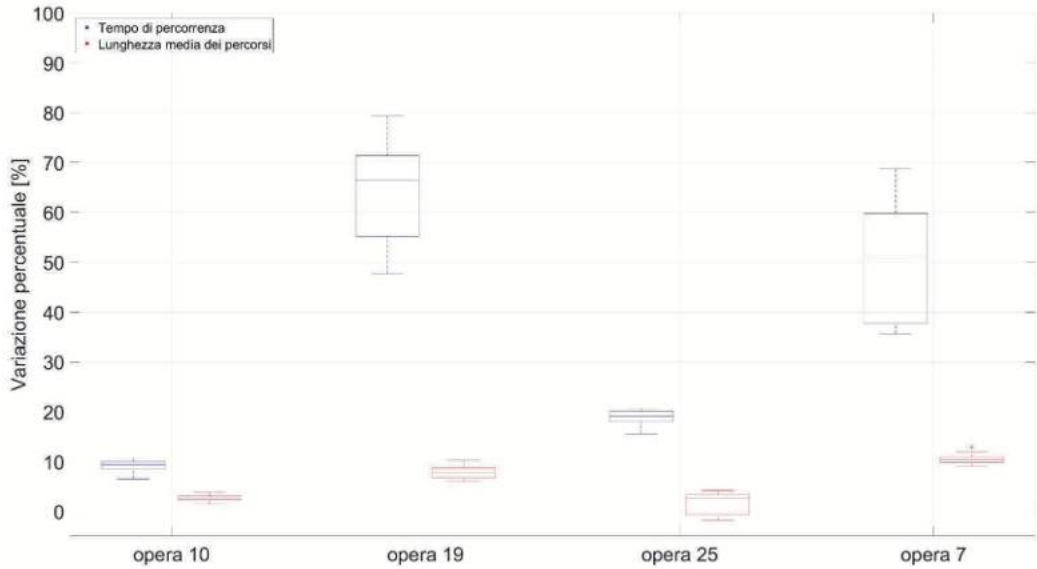


Figura 8.82 Chiusura totale: distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per le relazioni OD interessate dall'opera.

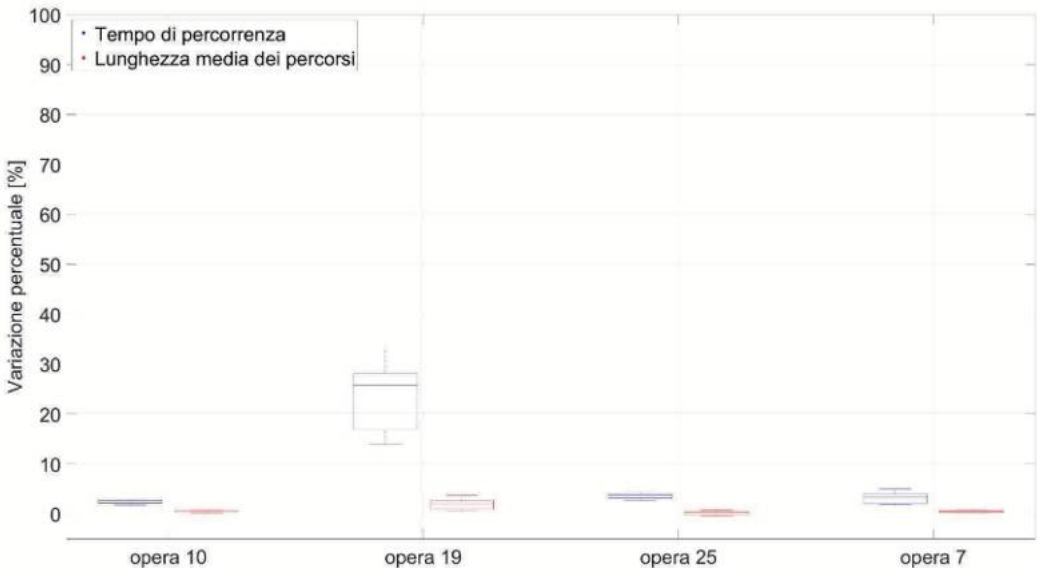


Figura 8.83 Chiusura totale: distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per l'intera area di studio.

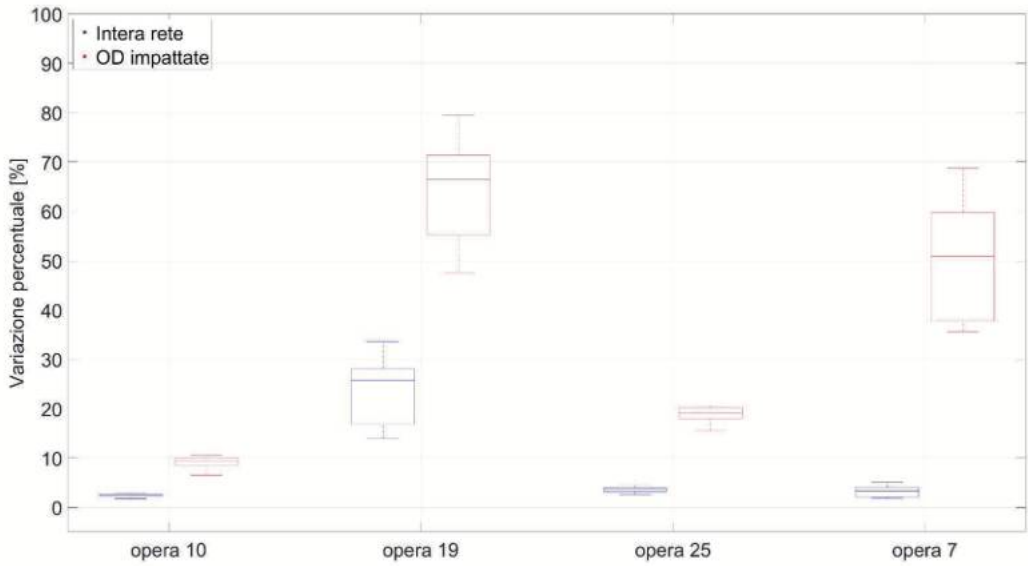


Figura 8.84 Chiusura totale: distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro tempo di percorrenza: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

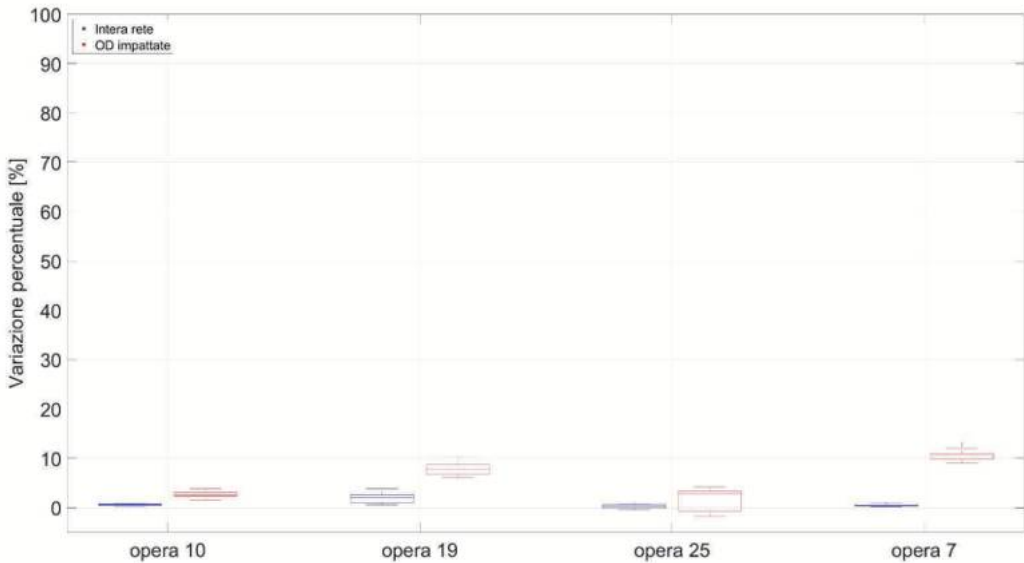


Figura 8.85 Chiusura totale: distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro lunghezza media dei percorsi: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A3**, per analizzare l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione, sia parziale sia totale, del manufatto, sono stati quantificati diversi **indicatori monetari**. Questi includono l'aumento dei costi associati ai tempi di viaggio, l'aumento dei costi operativi e l'aumento delle esternalità, come incidentalità stradali, emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ e emissioni acustiche. Le analisi sono state condotte seguendo le formulazioni proposte da Ventura et al. (2022) e De Aloe et al. (2023) nel contesto delle analisi costi-benefici, utilizzando i valori marginali riportati in Tabella 8.18.

I valori di riferimento forniti dal MIT (2017) sono stati attualizzati al 2024 per tenere conto dell'inflazione, utilizzando i dati ISTAT.

Tabella 8.18 Valori marginali utilizzati per la quantificazione degli indicatori monetari di impatto socioeconomico.

Parametro	Valore
Valore marginale del tempo [€/veh equivalente*h]	9.200
Costo operativo marginale [€/veh equivalente*km]	0.343
Costo marginale degli incidenti stradali [€/veh equivalente*km]	0.008
Costo marginale delle emissioni inquinanti [€/veh equivalente*km]	0.008
Costo marginale delle emissioni di CO ₂ [€/gCO ₂]	0.0001149
Emissioni marginali di CO ₂ [gCO ₂ /(veh equivalente*km)]	265
Costo marginale delle emissioni acustiche [€/veh equivalente*km]	0.012

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla completa chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono riportati in forma grafica e con riferimento all'andamento giornaliero di ciascun costo.

Dall'analisi emerge chiaramente che l'impatto maggiore è associato all'aumento dei costi legati ai tempi di viaggio, un effetto particolarmente accentuato per l'opera 19 (cfr. dalla Figura 8.86 alla Figura 8.90). Questo risultato è in linea con l'analisi dei KPI descritta nel paragrafo precedente, che ha evidenziato come la chiusura del manufatto abbia un impatto significativo sui tempi di percorrenza e sulle velocità, soprattutto sul traffico merci.

Meno rilevanti, invece, risultano le variazioni dei costi operativi e delle esternalità. Anche questo risultato è coerente con le evidenze precedenti. Infatti, le variazioni delle esternalità sono strettamente legate alla lunghezza dei percorsi, come dimostrato nel paragrafo precedente, che è risultata meno significativa rispetto alle variazioni di tempi e velocità. Complessivamente, l'analisi socioeconomica conferma l'importanza di mitigare gli impatti sulla viabilità.

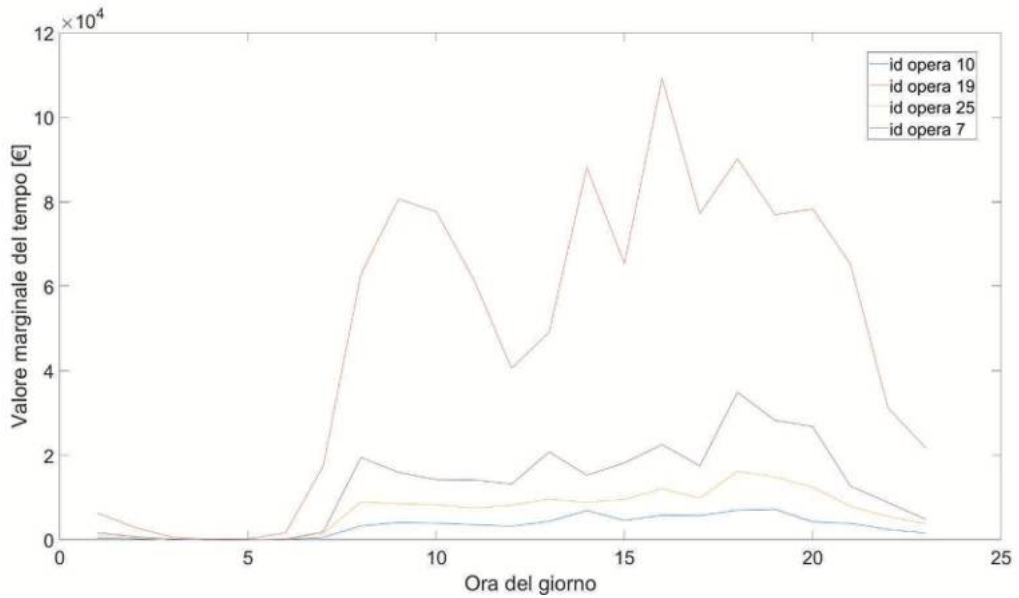


Figura 8.86 Chiusura totale: andamento giornaliero del costo associato al tempo con riferimento all'intera area di studio.

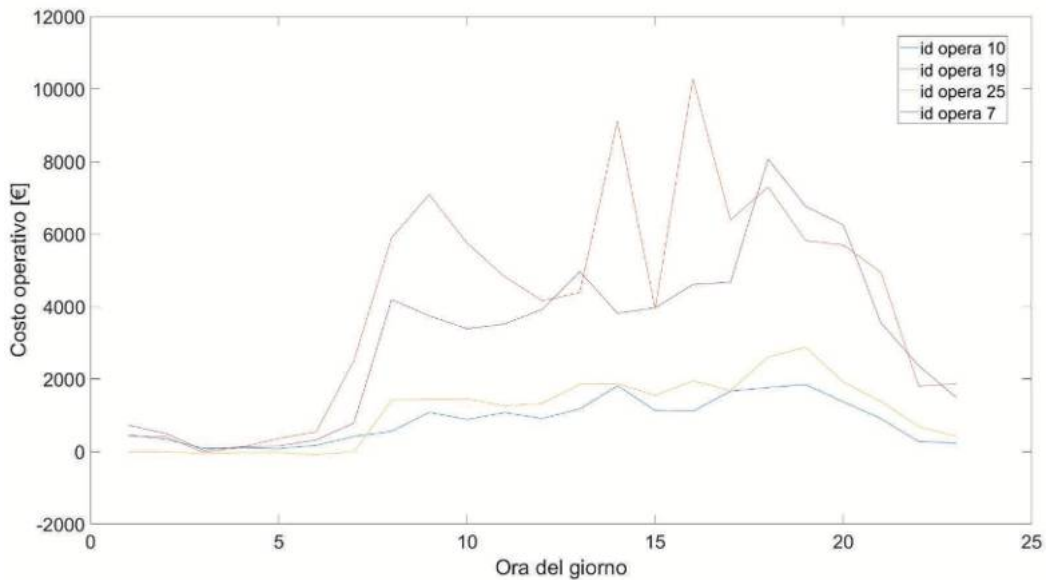


Figura 8.87 Chiusura totale: andamento giornaliero del costo operativo con riferimento all'intera area di studio.

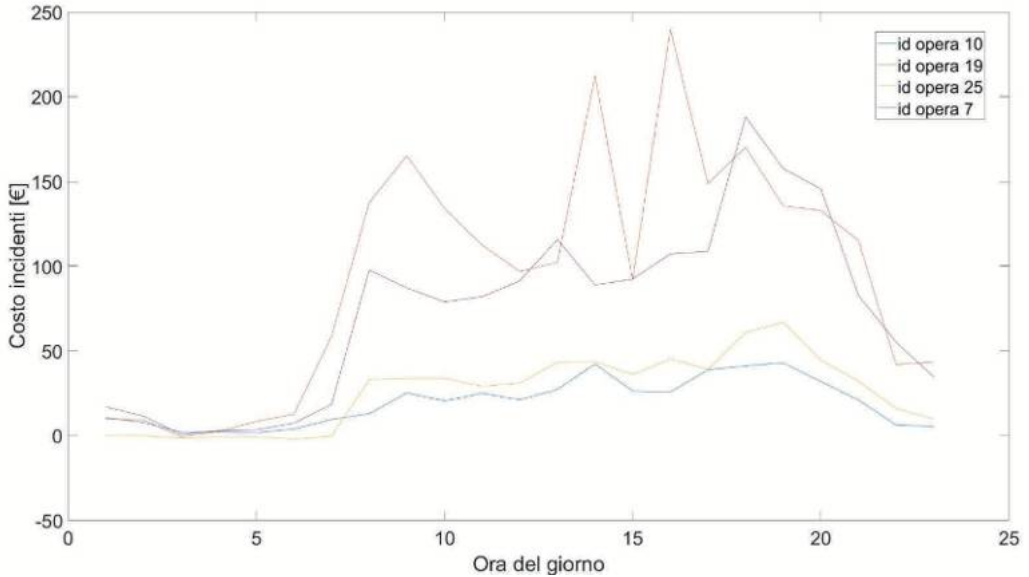


Figura 8.88 Chiusura totale: andamento giornaliero del costo marginale dovuto agli incidenti con riferimento all'intera area di studio.

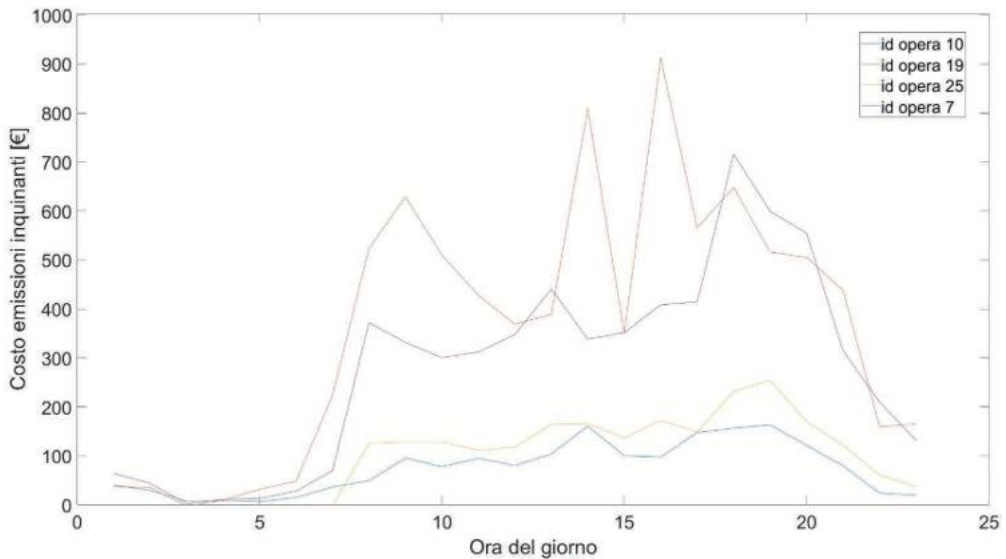


Figura 8.89 Chiusura totale: andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni inquinanti con riferimento all'intera area di studio.

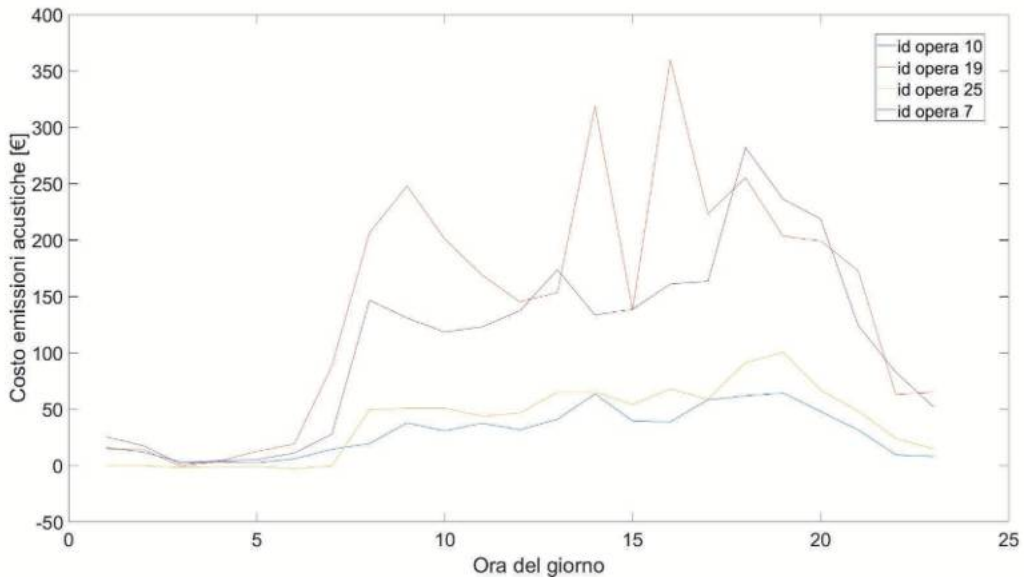


Figura 8.90 Chiusura totale: andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni acustiche con riferimento all'intera area di studio.

Indicatori a seguito della chiusura parziale del manufatto

Le analisi, quindi, sono state condotte con riferimento ai parametri *tempo di percorrenza* e *lunghezza media dei percorsi*, sia per l'intera rete sia per le sole relazioni O/D interessate dall'intervento. Le distribuzioni statistiche sono riportate da Figura 8.91 a Figura 8.96 da cui si evince che l'opera che ha il maggiore impatto relativo sulla mobilità dell'area di studio è ancora l'opera 19. Nel caso di chiusura parziale, l'opera 25 ha un impatto simile a quello dell'opera 19, come non avveniva in caso di chiusura parziale. In caso di chiusura parziale, le opere 7 e 10 non dimostrano impatti significativi sulla mobilità.

Queste considerazioni danno riferimento ad una scala *interna* di valutazione dato che il valore massimale di variazione riscontrato, con riferimento alle coppie OD interessate, non è pari a 5,5% per il parametro tempo di percorrenza. Questo è dovuto alla diminuzione della capacità (da 3 a 2 corsie), che comporta una congestione localizzata sul tratto in tangenziale, ma non a un sostanziale cambio di percorso da parte degli utenti.

Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A3**, per analizzare l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione, sia parziale sia totale, del manufatto, sono stati quantificati di

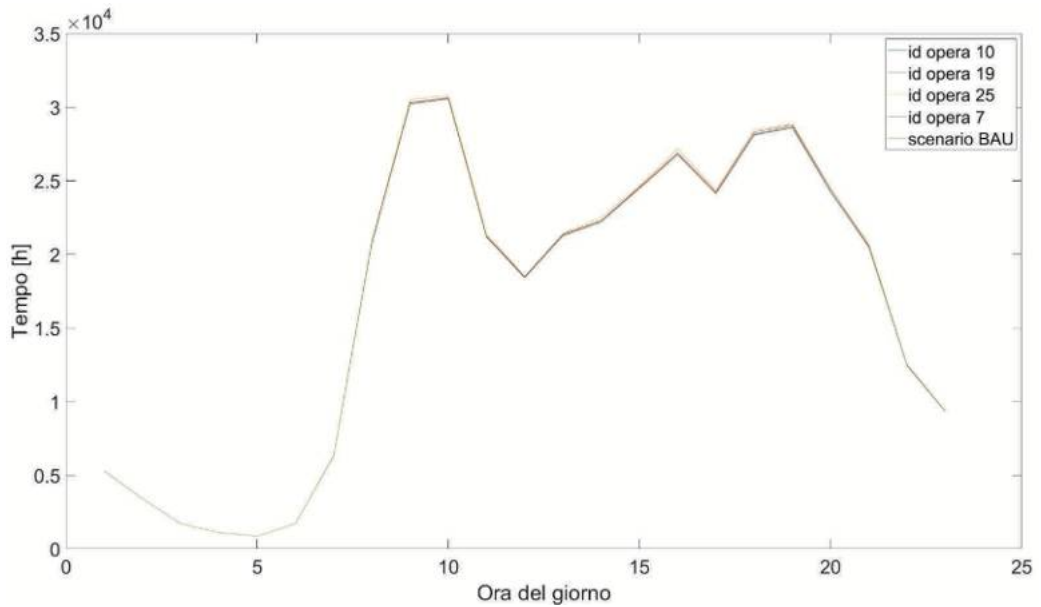


Figura 8.91 Chiusura parziale: andamento giornaliero del tempo totale su rete in ciascuno scenario.

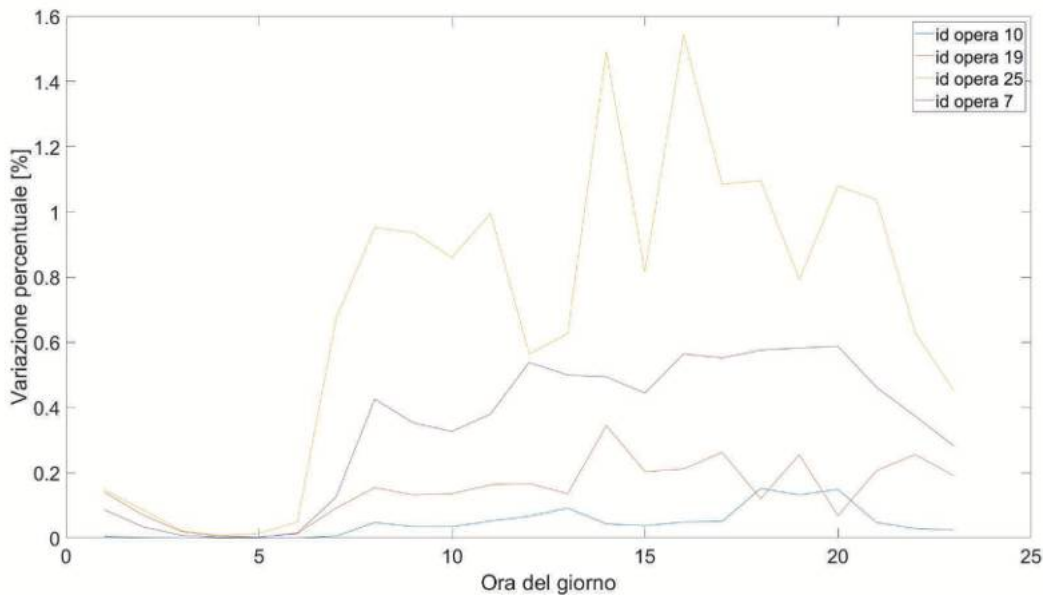


Figura 8.92 Chiusura parziale: andamento giornaliero della variazione percentuale del tempo totale su rete rispetto allo scenario non perturbato.

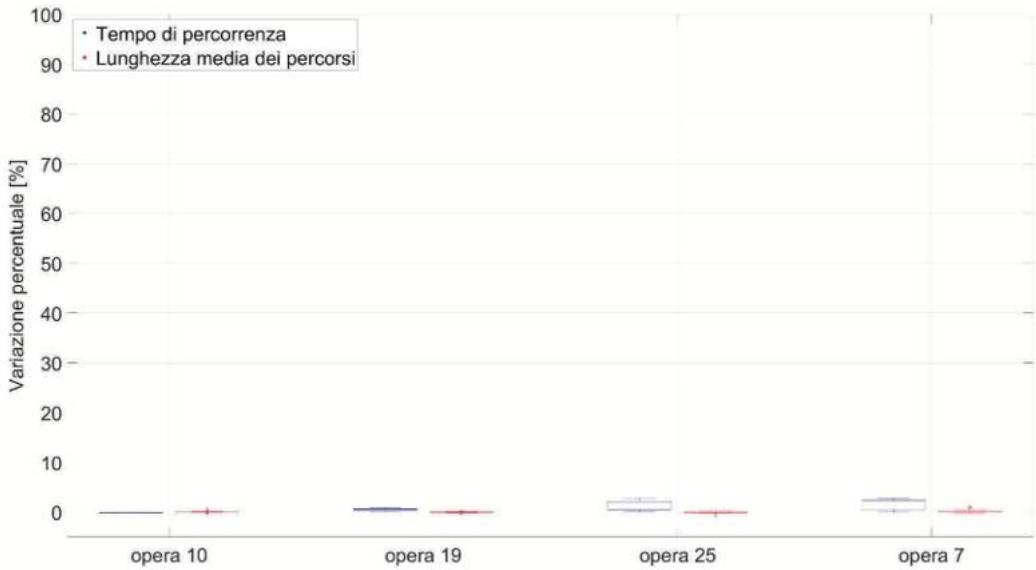


Figura 8.93 Chiusura parziale: distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per le relazioni OD interessate dall'opera.

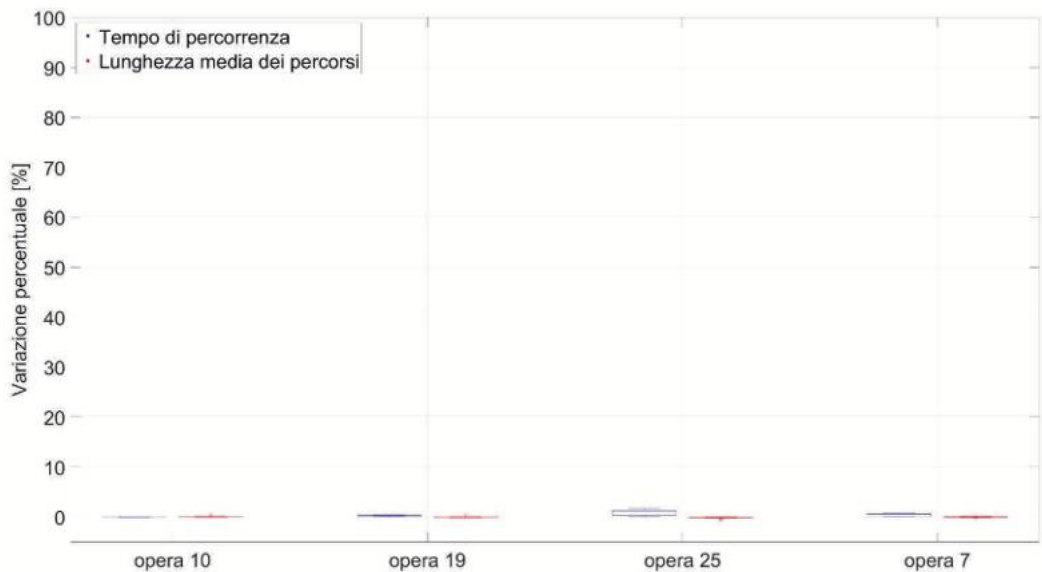


Figura 8.94 Chiusura parziale: distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per l'intera area di studio.

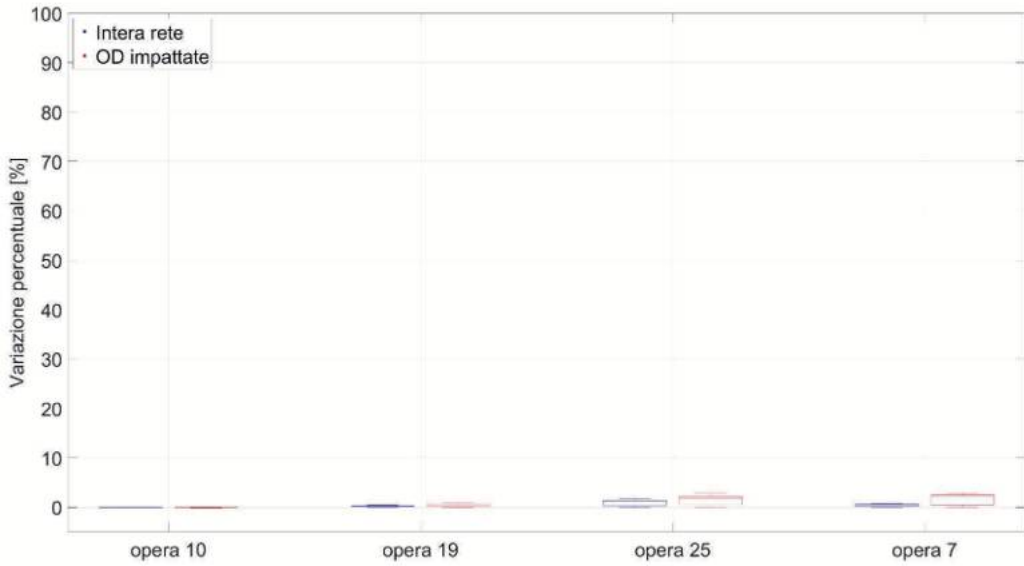


Figura 8.95 Chiusura parziale: distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro tempo di percorrenza: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

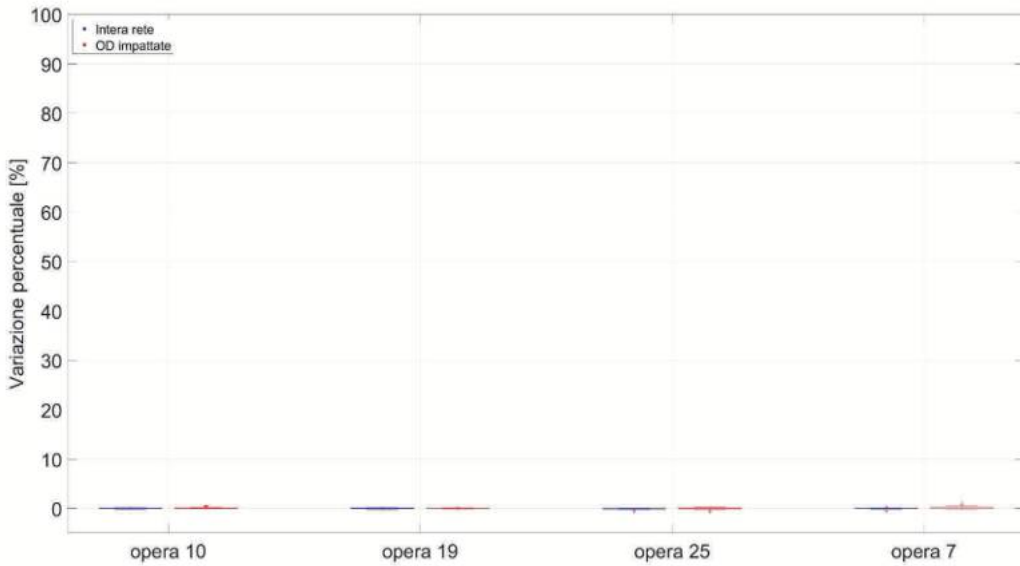


Figura 8.96 Chiusura parziale: distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro lunghezza media dei percorsi: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

versi **indicatori monetari**. Questi includono l'aumento dei costi associati ai tempi di viaggio, l'aumento dei costi operativi e l'aumento delle esternalità, come incidentalità stradali, emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ e emissioni acustiche.

Le analisi sono state condotte seguendo le formulazioni proposte da Ventura et al. (2022) e De Aloe et al. (2023) nel contesto delle analisi costi-benefici, utilizzando i valori marginali già riportati in Tabella 8.18, e di seguito indicati come Tabella 8.19.

I valori di riferimento, forniti dal MIT (2017), sono stati attualizzati al 2024 per tenere conto dell'inflazione, utilizzando i dati ISTAT.

Tabella 8.19 Valori marginali utilizzati per la quantificazione degli indicatori monetari di impatto socioeconomico.

Parametro	Valore
Valore marginale del tempo [€/(<i>veh equivalente</i> *h)]	9.200
Costo operativo marginale [€/(<i>veh equivalente</i> *km)]	0.343
Costo marginale degli incidenti stradali [€/(<i>veh equivalente</i> *km)]	0.008
Costo marginale delle emissioni inquinanti [€/(<i>veh equivalente</i> *km)]	0.008
Costo marginale delle emissioni di CO ₂ [€/gCO ₂]	0.0001149
Emissioni marginali di CO ₂ [gCO ₂ /(<i>veh equivalente</i> *km)]	265
Costo marginale delle emissioni acustiche [€/(<i>veh equivalente</i> *km)]	0.012

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla chiusura parziale del manufatto**, i risultati ottenuti sono riportati in forma grafica e con riferimento all'andamento giornaliero di ciascun costo.

Dall'analisi emerge chiaramente che l'impatto maggiore è associato all'aumento dei costi legati ai tempi di viaggio, un effetto particolarmente accentuato per l'opera 19 (cfr. dalla Figura 8.97 alla Figura 8.101). Questo risultato è in linea con l'analisi dei KPI descritta nel paragrafo precedente, che ha evidenziato come la chiusura del manufatto abbia un impatto significativo sui tempi di percorrenza e sulle velocità, soprattutto sul traffico merci.

Del tutto irrilevanti, invece, risultano le variazioni dei costi operativi e delle esternalità. Anche questo risultato è coerente con le evidenze precedenti. Infatti, le variazioni delle esternalità sono strettamente legate alla lunghezza dei percorsi, come dimostrato nel paragrafo precedente, che è risultata meno significativa rispetto alle variazioni di tempi e velocità. Complessivamente, l'analisi socioeconomica conferma l'importanza di mitigare gli impatti sulla viabilità.

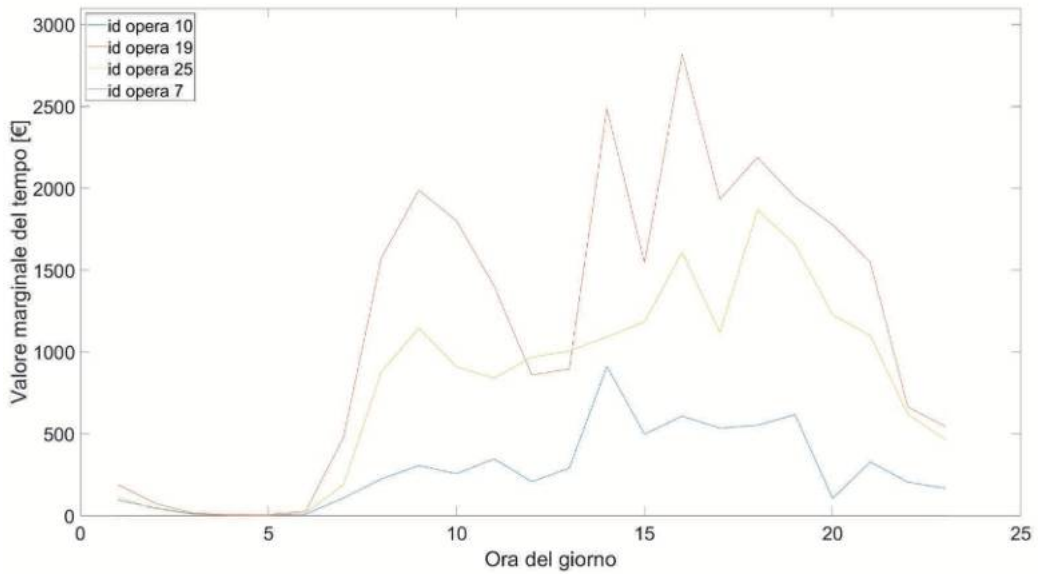


Figura 8.97 Chiusura parziale: andamento giornaliero del costo associato al tempo con riferimento all'intera area di studio.

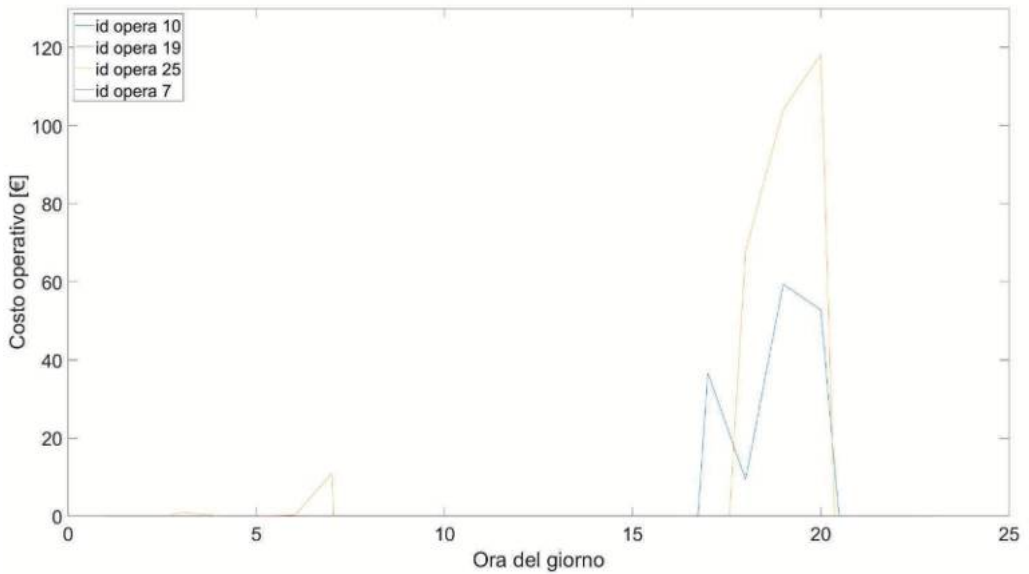


Figura 8.98 Chiusura parziale: andamento giornaliero del costo operativo con riferimento all'intera area di studio.

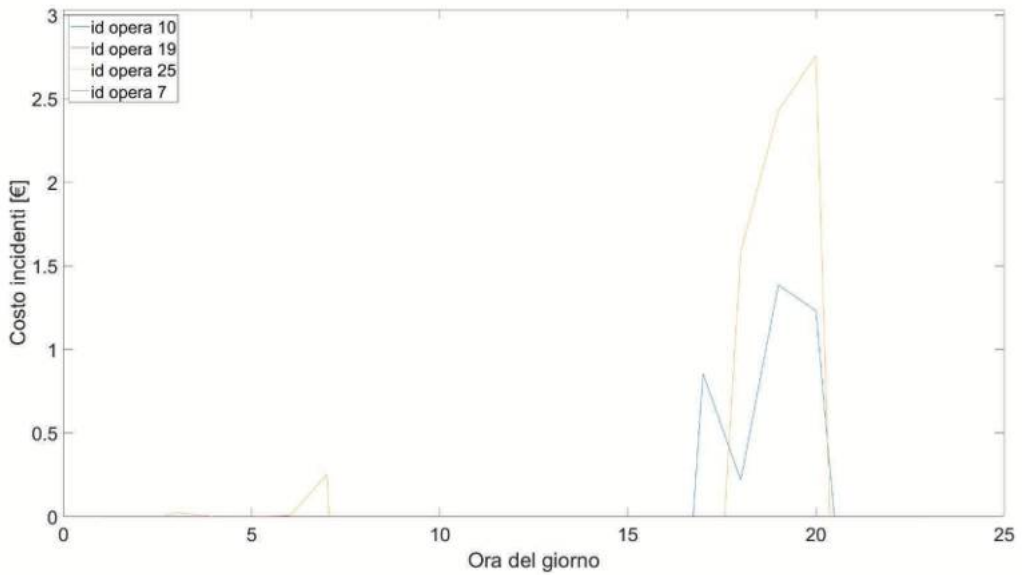


Figura 8.99 Chiusura parziale: andamento giornaliero del costo marginale dovuto agli incidenti con riferimento all'intera area di studio.

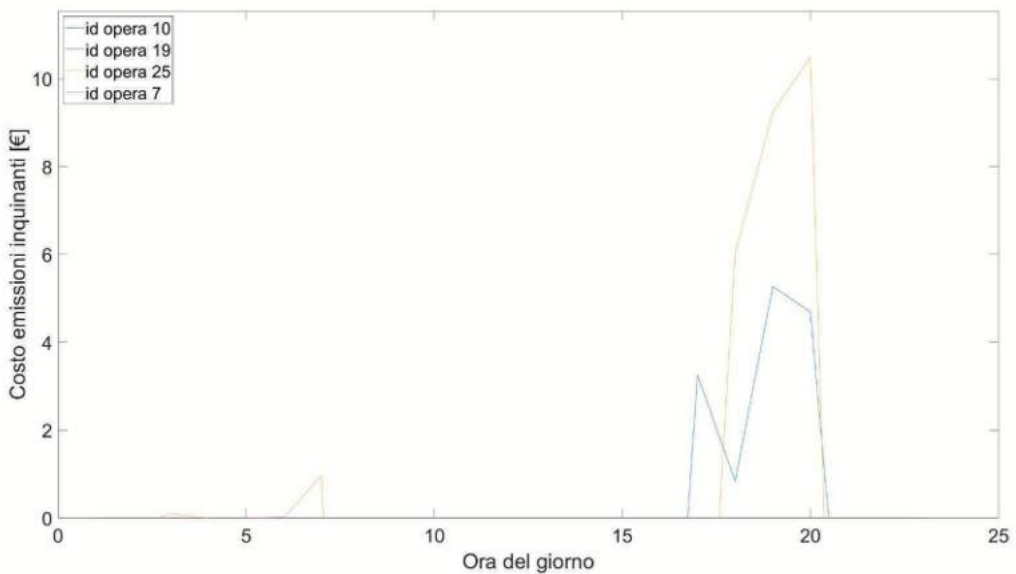


Figura 8.100 Chiusura parziale: andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni inquinanti con riferimento all'intera area di studio.

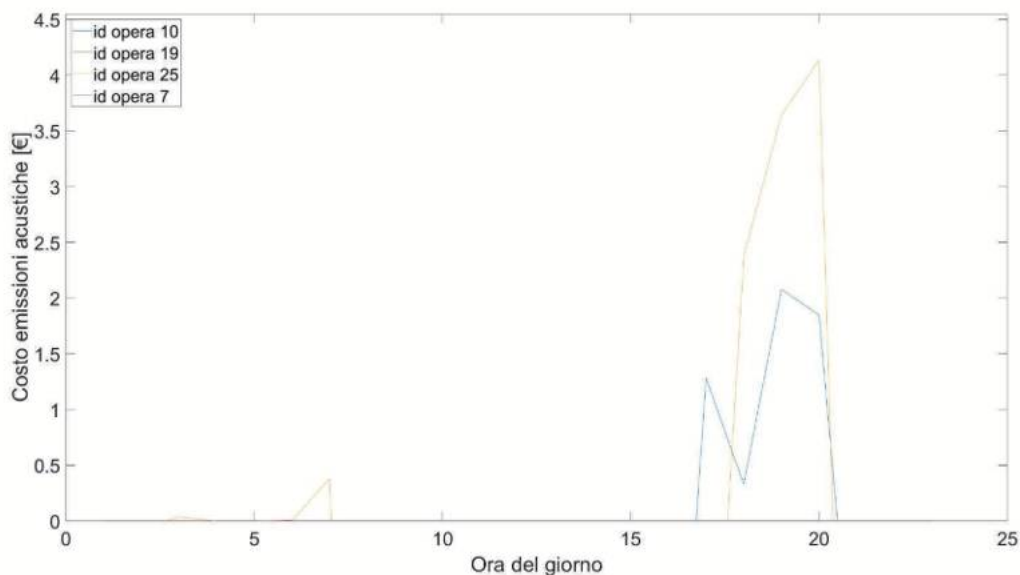


Figura 8.101 Chiusura parziale: andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni acustiche con riferimento all'intera area di studio.

8.6 Caso di Studio 6: rete primaria lungo la A2 (presso Salerno)

Il caso di studio riguarda le opere presenti lungo l'autostrada **A2** all'altezza di Salerno. Le potenziali opere di interesse sono 8 comprese tra lo svincolo Cava dei Tirreni e quello di Salerno. Le opere selezionate, e sottoposte ad analisi, sono 3 come indicato in Figura 8.102. Le restanti opere, dal punto di vista trasportistico, avrebbero lo stesso impatto dell'opera con ID uguale a 8, dato che si trovano tutte in un tratto omogeneo (senza quindi svincoli o cambiamenti di sezione). L'intera tratta è caratterizzata da una sezione trasversale continua con 2 corsie per senso di marcia.

L'infrastruttura è un asse viario strategico per la mobilità dell'area extraurbana, soprattutto per il suo spostamento Nord-Sud, di collegamento tra la zona costiera dell'area

Tabella 8.20 Riferimenti alle opere selezionate per il Caso Studio 6.

Concessionario	ID opera	Codice IOP	Nome	Progressiva km		S [ag/g]
				Iniziale	Finale	
S.P.N. Spa	4	STAU00A3PNQCYMPER	Viadotto Surdolo	46+450	46+626	0.1081
S.P.N. Spa	5	STAU00A3PN3KG9QBCJ	Sottopasso sulla S.S.18	43+000	43+025	0.1141
Autostrade Meridionali S.p.A.	8	STAU00A3PNRJFJG5RX	Viadotto Olivieri	49+870	50+000	0.1056

metropolitana di Napoli e la provincia di Salerno. Discorso diverso per le aree interne sia dell'area metropolitana e che delle province di Benevento ed Avellino dato che il movimento Nord/Sud in questo caso è effettuato tramite l'autostrada A30 Caserta-Salerno o tramite il Raccordo di Avellino RA2.

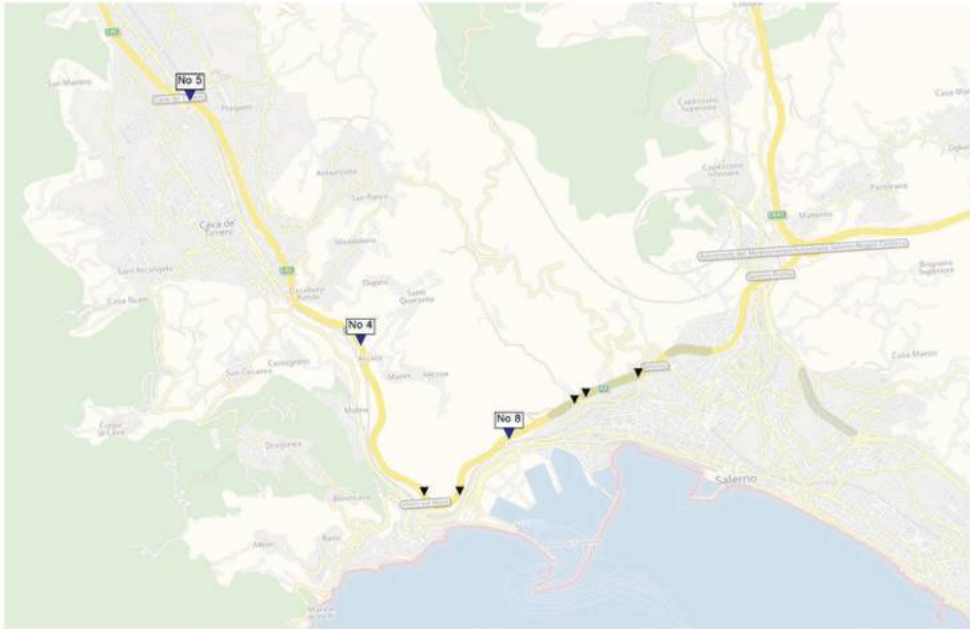


Figura 8.102 Individuazione planimetrica delle opere selezionate per il Caso di Studio 6. Con riferimento agli archivi nella Tabella 8.20 sono riportate alcune informazioni relative alle opere in esame.

8.6.1 Delimitazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A1**, è stata identificata l'**area di studio**, che si estende per una superficie di 1067 km². La delimitazione dell'area è stata effettuata tenendo conto della configurazione della rete stradale, della presenza di percorsi alternativi al segmento oggetto di potenziale interruzione e dell'accessibilità ai principali centri urbani.

8.6.2 Zonizzazione area di studio

In accordo con quanto indicato in **F1.A2**, l'**area di studio** è stata **zonizzata in unità territoriali**. In questo caso, non essendoci matrici O/D ufficiali, la zonizzazione è stata effettuata su base comunale (utilizzando quindi il campo PROCOM dell'ISTAT) e, per la sola città di Salerno, è stata adottata una suddivisione per codici di avviamento postale (CAP). Infine, il comune di Napoli è stato modellato solamente tramite le sezioni al cordone delle arterie principali di adduzione degli spostamenti extraurbani quali Autostrada A1, Autostrada A16, Strada Provinciale 1 ed Strada Statale 162dir.

Complessivamente, la zonizzazione ha prodotto 103 zone interne e 11 zone esterne/al cordone rappresentate cartograficamente in Figura 8.103.

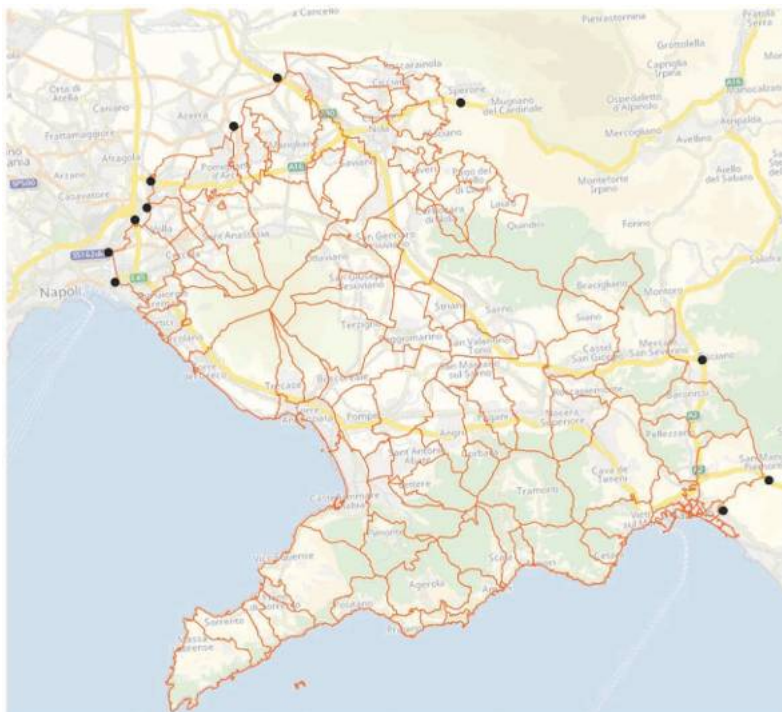


Figura 8.103 Individuazione planimetrica delle zone considerate nel Caso di Studio 6 (in nero le sezioni al cordone).

8.6.3 Costruzione del grafo rappresentativo della rete dei trasporti

In accordo con quanto indicato in **F1.A3**, la rete stradale è stata modellata mediante la **costruzione di un grafo**. Come descritto nella sezione metodologica, il processo si è articolato in tre fasi principali: (i) estrazione dei dati dalla rete Multinet³, (ii) importazione dei dati nel software di modellazione PTV VISUM e (iii) impostazione degli attributi dei nodi e degli archi. Particolare attenzione è stata dedicata alla **verifica dell'attributo relativo ai sistemi di trasporto ammessi su ogni arco**, al fine di garantire coerenza con la realtà in merito alla **percorribilità dei tronchi stradali da parte dei mezzi pesanti**. La modellazione ha generato un grafo composto da circa 14.480 nodi e 33.090 archi.

Il grafo risultante è rappresentato cartograficamente in Figura 8.104. Dall'analisi della figura emerge una certa capillarità della rete infrastrutturale, che copre in modo omogeneo

³ La rete multinet è un altro database di reti stradali. MultiNet fornisce mappe complete che includono dettagli elevati a livello di strada e interconnessioni delle reti stradali. A livello di definizione funzionale degli archi, essa è assimilabile a quella OSM ma con denominazioni diverse e contenuto informativo verificato. Il maggiore costo di accesso ai dati Multinet rispetto a quelli OSM è compensato dal minore sforzo necessario alla loro validazione e correzione.

lo spostamento tra i diversi comuni facenti parte la zonizzazione e solo in minima parte gli spostamenti all'interno della stessa zona. Per quanto riguarda l'area limitrofa alle opere sottoposte ad analisi questa condizione non è stata applicata bensì si è preferito avere una capillarità maggiore del grafo come si evince dalla Figura 8.104.

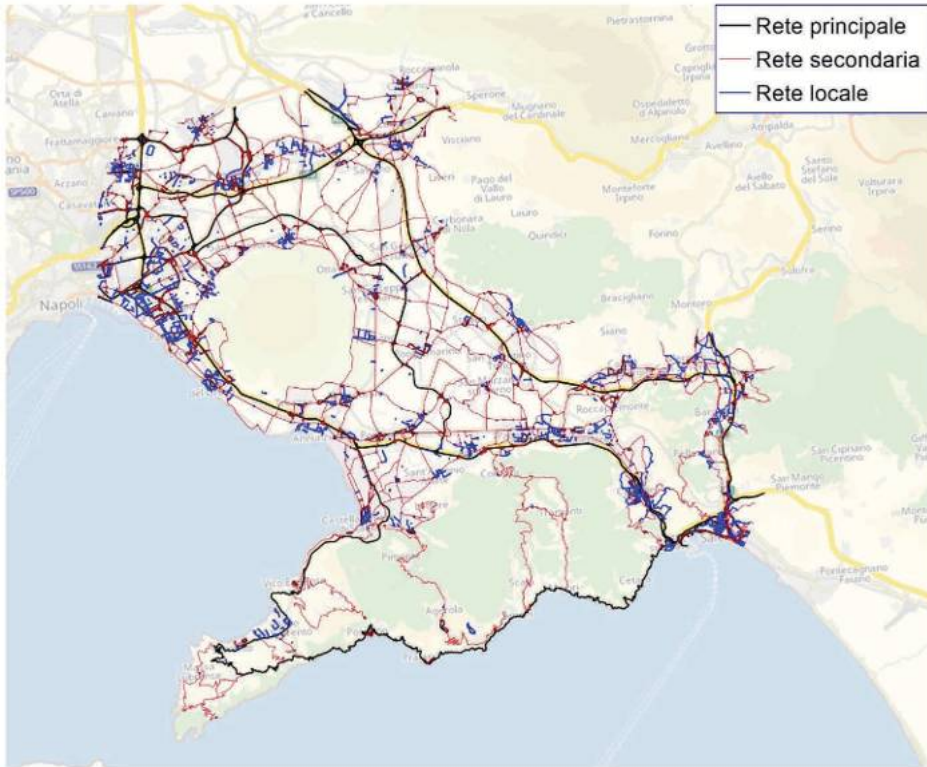


Figura 8.104 Rappresentazione cartografica del grafo modellato per il Caso di Studio 6 (software PTV Visum).

La rete principale si sviluppa principalmente nella direzione Nord – Sud ed è caratterizzata da

- ⊙ Autostrada A3
- ⊙ Strada Statale 162 dir
- ⊙ Autostrada A30
- ⊙ Autostrada A2;

Si noti che, alla rete autostradale e a quella primaria, si aggiunge una fitta rete secondaria, che permette di ottenere un grafo fortemente magliato e connesso. A valle di quest'ultima considerazione, e del posizionamento delle opere, è facile dedurre che un'analisi qualitativa non è realizzabile in questo caso e che quindi si deve procedere con una valutazione quantitativa della resilienza per identificare gli impatti specifici e valutare le possibili soluzioni per mitigare le criticità emerse.

In accordo con quanto indicato nella sezione metodologica, la modellazione della domanda (F2) può essere sviluppata seguendo approcci differenti: da un lato, metodi tradizionali basati sull'utilizzo delle matrici O/D ufficiali; dall'altro, soluzioni più innovative che sfruttano i dati provenienti da sistemi di navigazione. La scelta dell'approccio adottato influisce direttamente sugli esiti delle fasi successive (F3 e F4). Nel caso in esame si è adottato un approccio fondamentalmente basato su matrici OD campionate con *Floating Car Data* opportunamente tarate grazie all'utilizzo di conteggi stradali realizzati dal concessionario autostradale e messi a disposizione dello studio. L'utilizzo di questa tecnica ha permesso di estendere le considerazioni sulla resilienza non solo all'ora di punta bensì all'intera giornata di 24 ore.

8.6.4 Approccio ibrido: conteggi e dati FCD

Modellazione della domanda

Il punto di partenza della modellizzazione della domanda sono stati i conteggi, ottenuti da Autostrade per l'Italia relative alla sezione della A16 – Tufino. Essa rappresenta una sezione del cordone della nostra area di studio, per cui è stato possibile ottenere un coefficiente di espansione. Esso è stato tarato considerando in maniera aggregata le due differenti direzioni di marcia e 4 differenti intervalli temporali di seguito riportati:

- ⊙ 1 maggio – 31 maggio 2024 (feriali)
- ⊙ 1 giugno – 31 luglio 2024 (pre-festivi)
- ⊙ 1 giugno – 31 luglio 2024 (festivi)
- ⊙ 1 giugno – 31 luglio 2024 (feriali)

Gli intervalli temporali riportati nel precedente elenco puntato sono stati scelti sulla base dei dati di flusso forniti da Autostrade. Essi sono stati, quindi, anche il riferimento per la richiesta di matrici O/D dai dati di FCD (TomTom).

In questo caso studio, quindi, il totale dei passaggi ottenuti dai dati FCD è stato messo a confronto con i dati ottenuti da Autostrade. In Figura 8.105 si riporta un grafico a dispersione con l'accostamento tra flussi autostradali e flussi FCD. Da esso si evince un tasso di penetrazione della tecnologia pari al 9,7% e, conseguentemente, un **coefficiente di espansione pari a 10,306**.

Assegnazione della domanda

Come descritto nell'azione **F3.A1**, l'assegnazione della domanda alla rete stradale rappresenta un passaggio cruciale per simulare l'operatività della rete sia in condizioni normali sia in condizioni degradate. L'assegnazione è stata di equilibrio a rete congestionata, con la scelta del percorso basata sulla probabilità. Complessivamente sono state eseguite **96 assegnazioni distinte**: 24 (una per ogni fascia oraria giornaliera) relative allo scenario base di rete non degradata, e 72 con riferimento alle condizioni di rete degradata. Queste ultime sono relative a **24 assegnazione per ciascuna opera** (tre) di cui si è ipotizzata la chiusura.

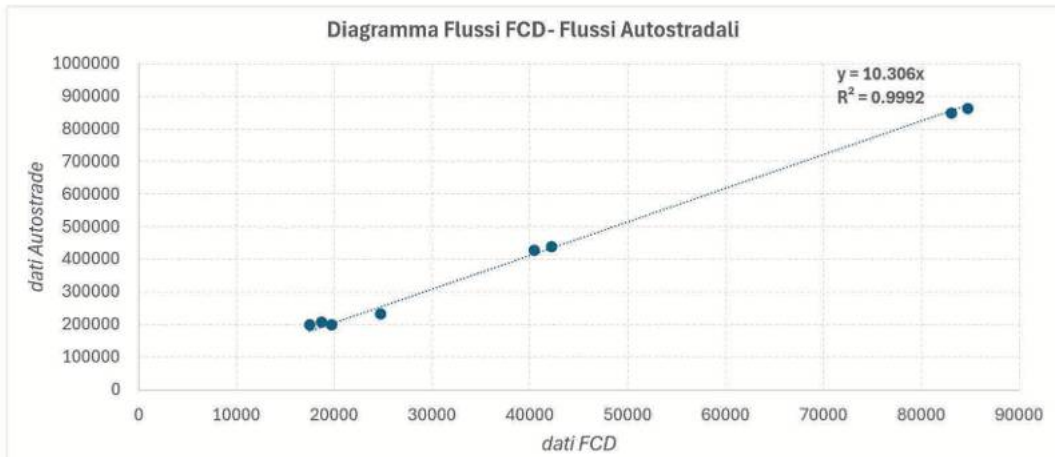


Figura 8.105 Diagramma a dispersione con conteggi autostradali e conteggi da FCD.

L'assegnazione della domanda alla rete stradale rappresenta un passaggio cruciale per simulare l'operatività della rete sia in condizioni normali sia in condizioni degradate. Il metodo di assegnazione utilizzato è stato quello dell'assegnazione di equilibrio a rete congestionata con approccio probabilistico alla scelta del percorso.

La domanda assegnata, in questo caso, si riferisce al giorno festivo medio estivo a cui fa riferimento l'intervallo 01-giugno-20024 e 21-luglio 2024 dell'estrazione dei FCD TomTom. La scelta è dovuta all'analisi dei conteggi autostradali per i tratti della A30 e della A16 di seguito riportati (dalla Figura 8.106 alla Figura 8.113).

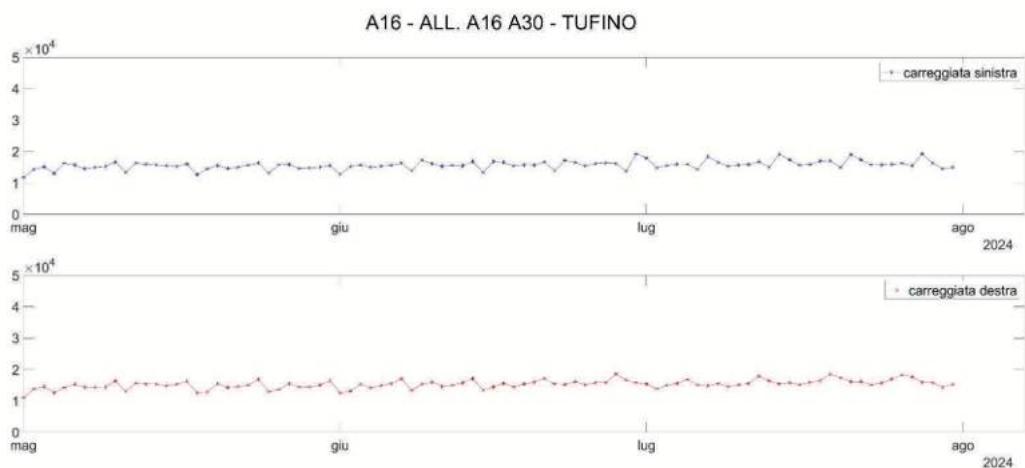


Figura 8.106 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A16 – Tufino.

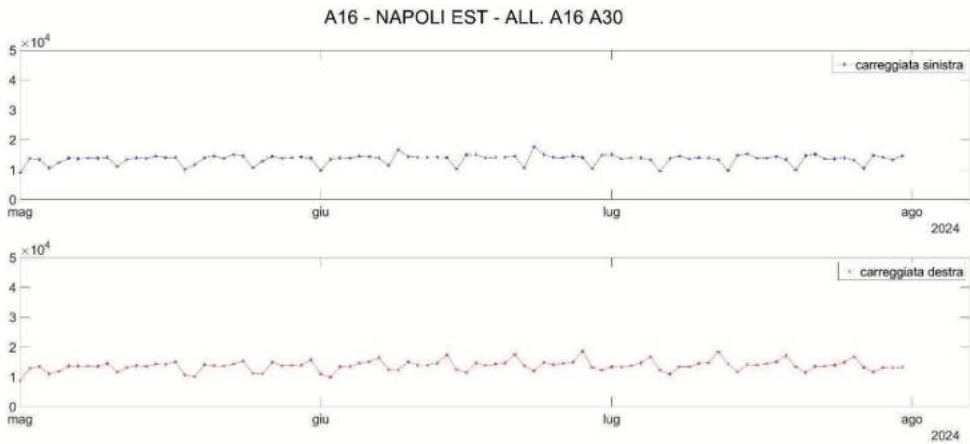


Figura 8.107 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione di allaccio tra A16 ed A30.

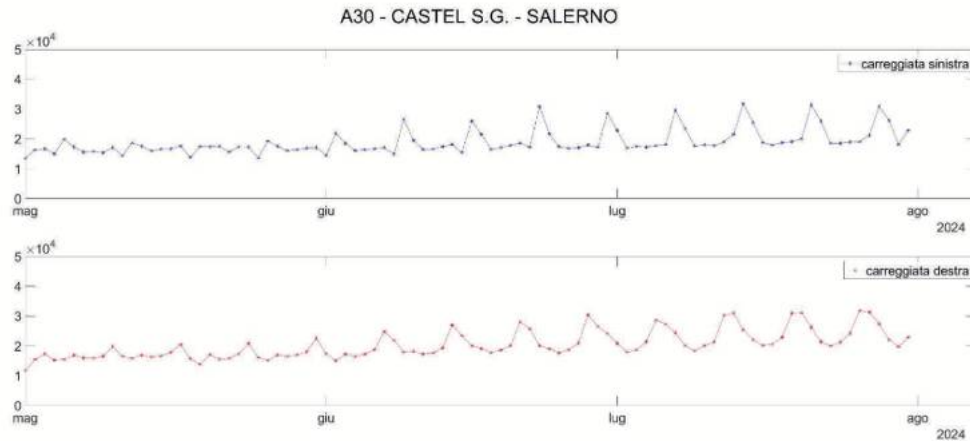


Figura 8.108 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30 tra Castel San Giorgio e Salerno.

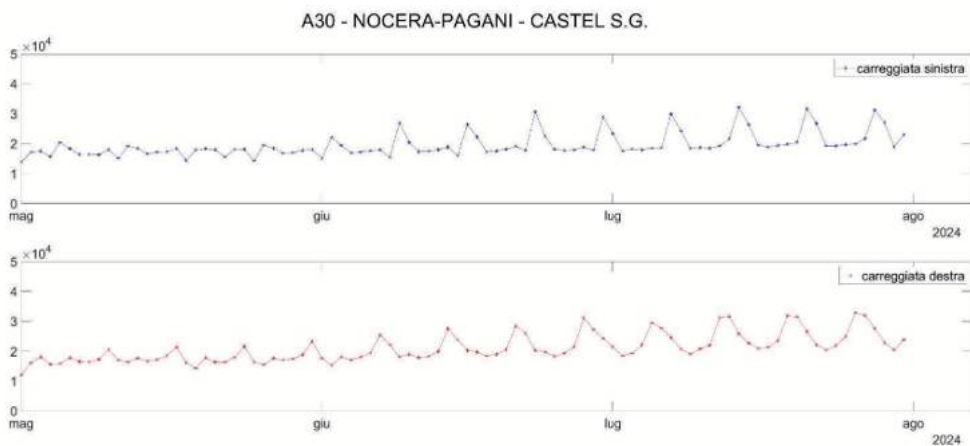


Figura 8.109 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30 tra Nocera-Pagani e Castel San Giorgio.

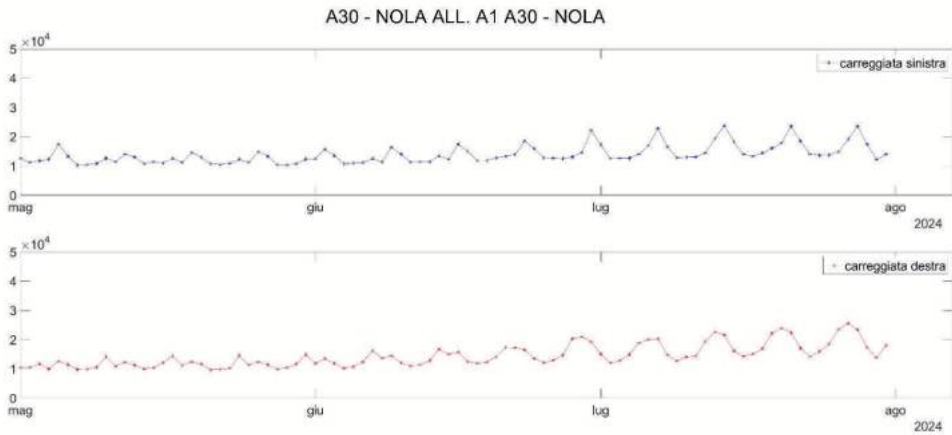


Figura 8.110 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30 tra Nola, allaccio A1-A30, e Nola.

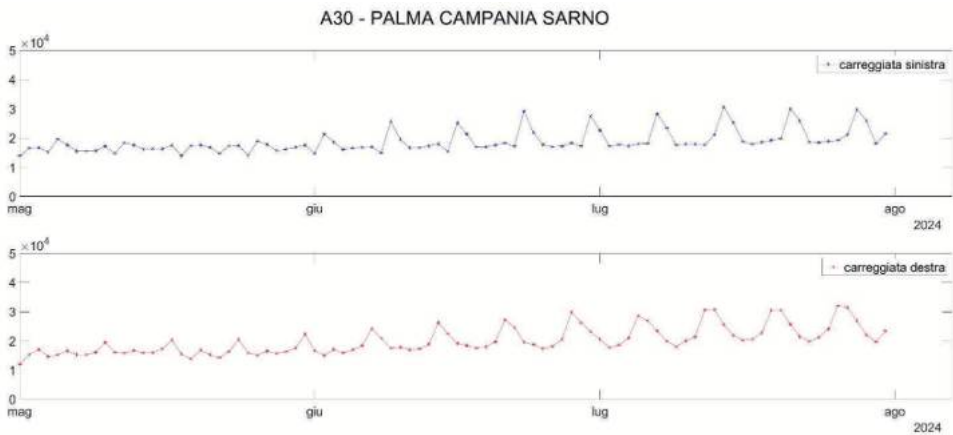


Figura 8.111 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30 tra Palma Campania e Sar/ no.

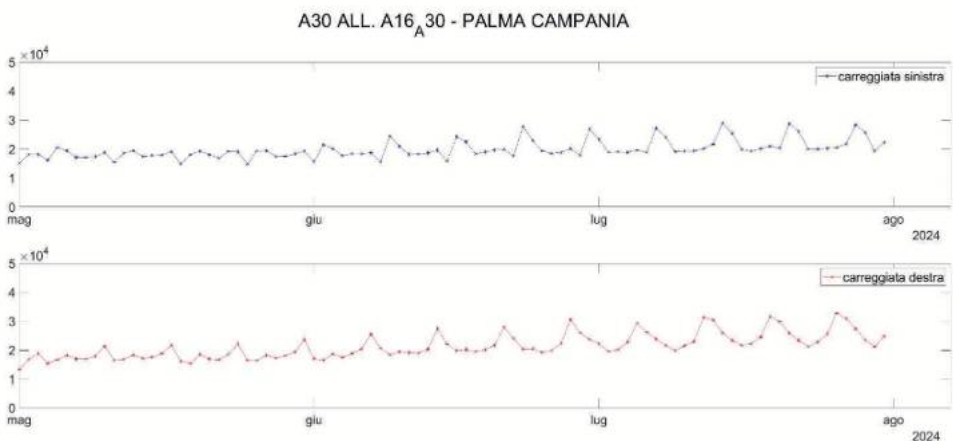


Figura 8.112 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30, allaccio con A16, di Palma Campania.

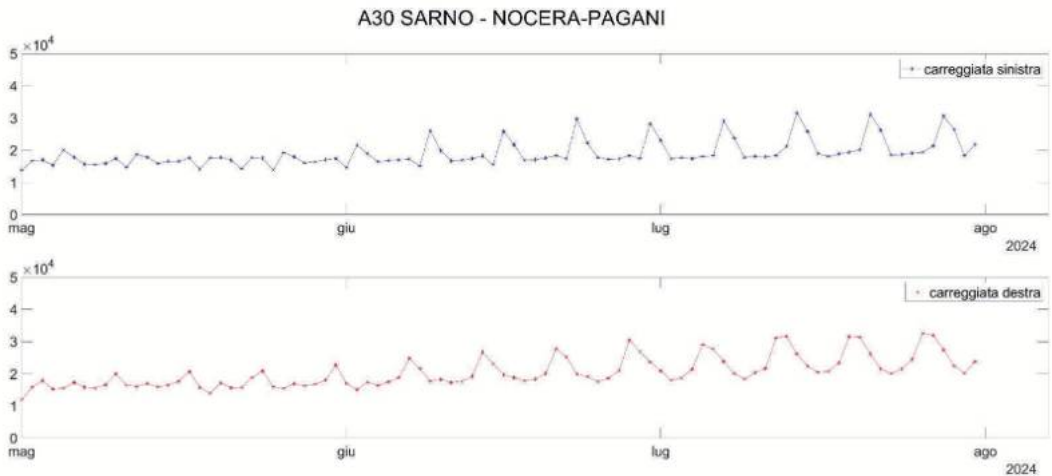


Figura 8.113 Andamento dei conteggi giornalieri per la sezione A30 tra Sarno e Nocera-Pagani.

8.6.5 Valutazione dei KPI sulla rete modellata

I livelli di domanda, della matrice O/D sono estremamente variabili durante l'arco della giornata per cui durante le ore notturne l'approccio valuterà maggiormente la *connettività* della rete (approccio **Connectivity-based**) dato che il livello di saturazione di quest'ultima è pressoché nullo mentre durante le ore di punta verrà valutato il livello di servizio dell'area (approccio **Level of Service-based**). In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A2**, per effettuare una valutazione quantitativa della resilienza della rete sono stati calcolati diversi **Key Performance Indicators (KPIs)** fondamentali, quali il tempo di percorrenza, la lunghezza dei percorsi e la velocità media degli spostamenti.

Per analizzare l'impatto delle condizioni degradate, è stata calcolata la **variazione percentuale** dei KPIs tra lo scenario di base, in cui il manufatto è pienamente operativo, e gli scenari degradati, che prevedono la chiusura totale del manufatto. I risultati verranno presentati graficamente mediante l'utilizzo di boxplot ovvero un grafico statistico che illustra la distribuzione del parametro attraverso l'utilizzo di 5 metriche: valore minimo, primo quartile (Q1), mediana (Q2), terzo quartile (Q3) e valore massimo.

Inoltre, i parametri verranno valutati sia con riferimento all'intera rete in esame, sia con riferimento alle sole relazioni O/D che, nello scenario non degradate, viaggiano lungo le opere analizzate. Infine, per quanto riguarda la variazione del tempo totale di viaggio il confronto verrà effettuato sia con riferimento all'intera rete sia con riferimento ad un limitato sottoinsieme di archi riportati in Figura 8.114. Gli archi sono stati individuati per prossimità rispetto alle opere prese in esame e risultano essere, inoltre, quelli maggiormente interessati da operazioni di *deviazione* dal percorso originale.

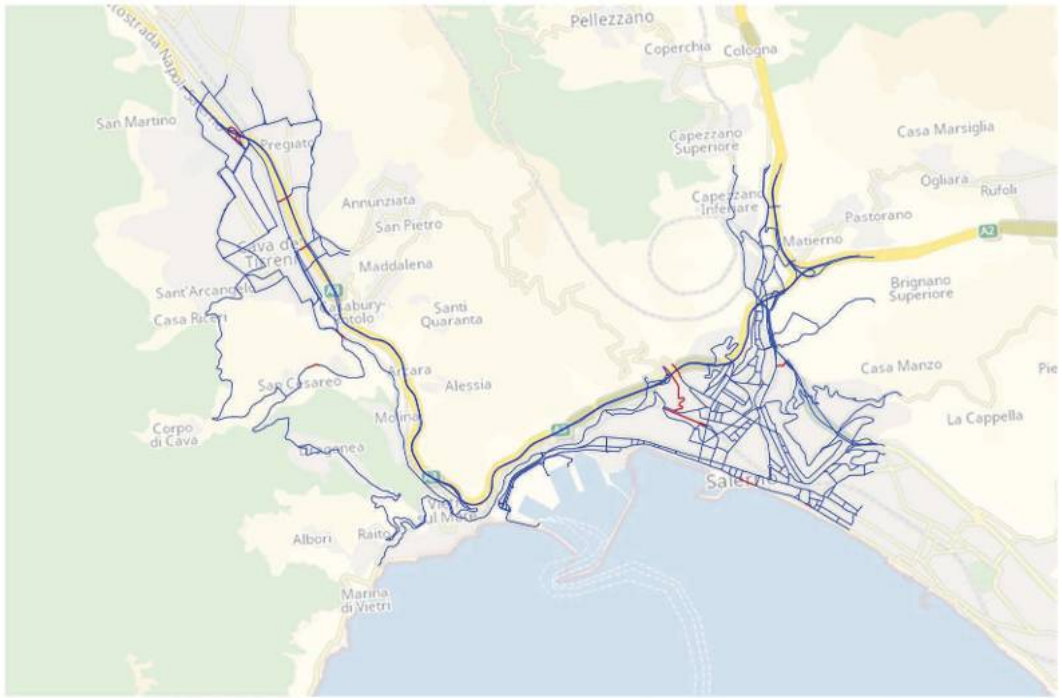


Figura 8.114 Sottoinsieme di archi considerato per l'analisi della variazione del tempo totale su rete.

Le analisi condotte (cfr. dalla Figura 8.115 alla Figura 8.121) evidenziano come la magnitudo dei risultati dipende dal considerare i parametri con riferimento alla globalità dell'area di studio o focalizzandosi solo sulle relazioni O/D che, in condizioni non perturbate, viaggiano sull'opera.

Difatti una analisi di dettaglio fa emergere un impatto similare tra le tre differenti opere con variazioni, con riferimento alle O/D direttamente interessate nello scenario non perturbato, dell'ordine del 20-30. Quando il rapporto viene portato a livello di intera rete, la forbice diminuisce fino ad ottenere valori in singola cifra.

Il comportamento, tra le diverse opere, è simile in quanto la deviazione da compiere è comune tra i tre manufatti considerati. Nel caso delle opere 4 ed 8 prevede l'utilizzo di via Alfonso Gatto e della Strada Regionale Tirrenia Inferiore per *bypassare* l'ostacolo per poi ritornare a percorrere l'autostrada mentre per l'opera 5 la deviazione avviene in prossimità dello svincolo di Vietri sul Mare e l'utilizzo della viabilità locale (via Rione Ponte, Strada Regionale Tirrenia Inferiore, etc.) fino allo svincolo di Cava dei Tirreni che permette la re-immissione nel tratto autostradale.

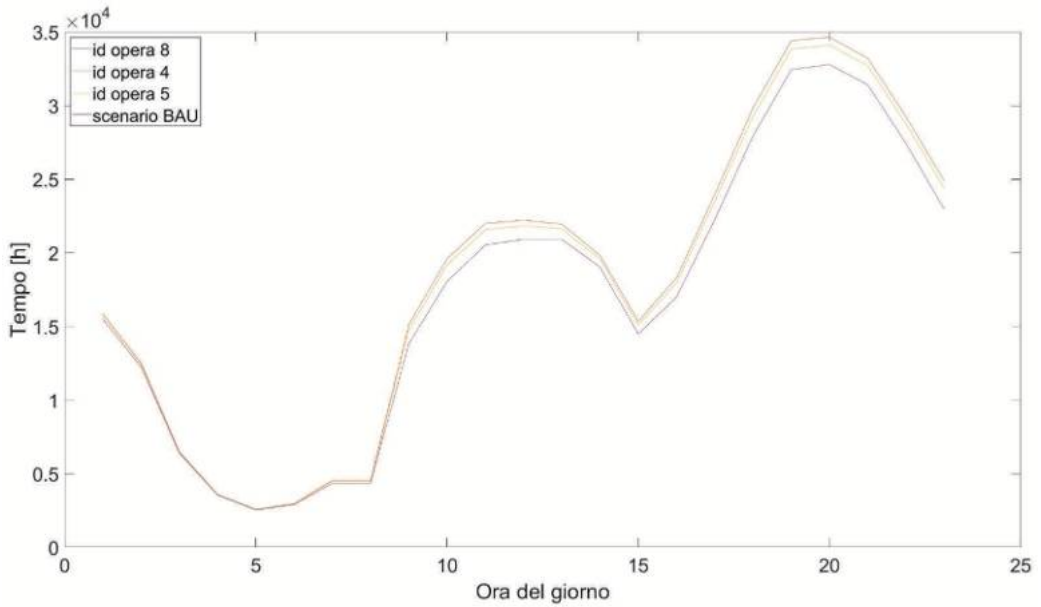


Figura 8.115 Andamento giornaliero del tempo di viaggio totale in ciascuno scenario.

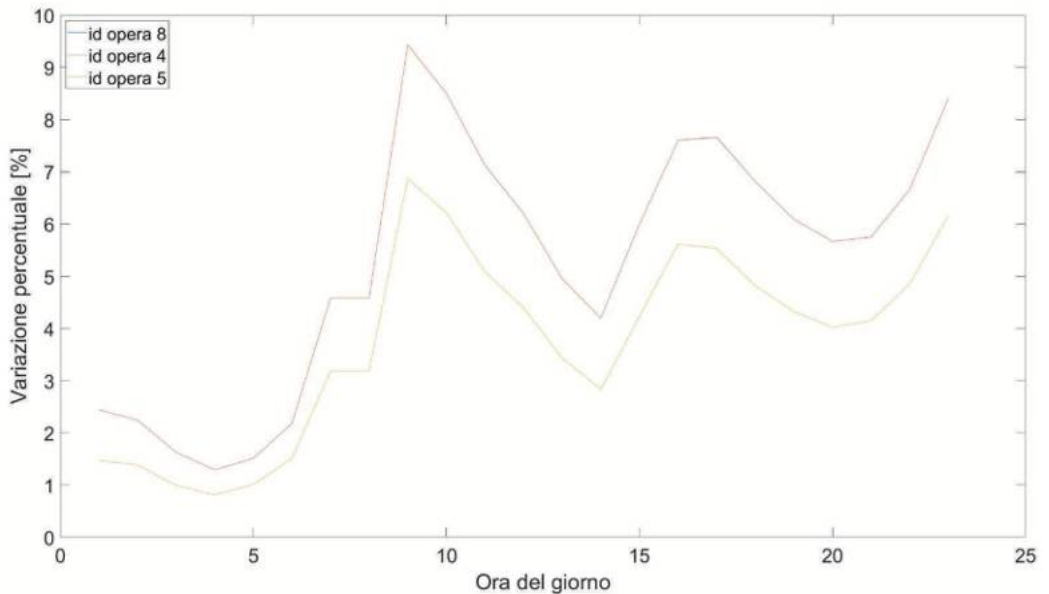


Figura 8.116 Andamento giornaliero della variazione percentuale del tempo di viaggio totale rispetto allo scenario non perturbato per l'intera rete.

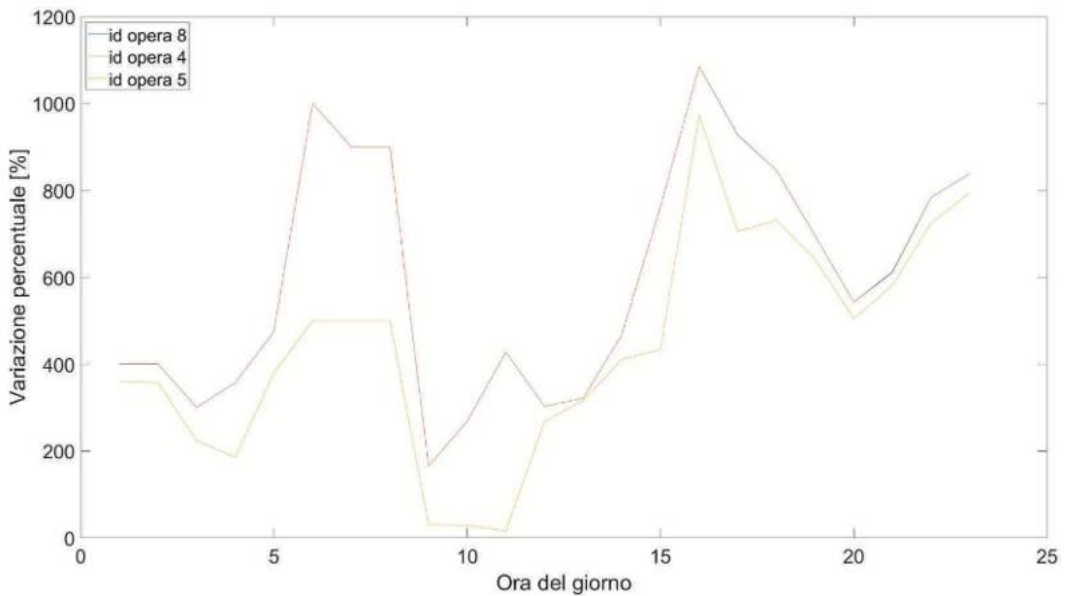


Figura 8.117 Andamento giornaliero della variazione percentuale del tempo di viaggio totale rispetto allo scenario non perturbato per gli archi limitrofi le opere.

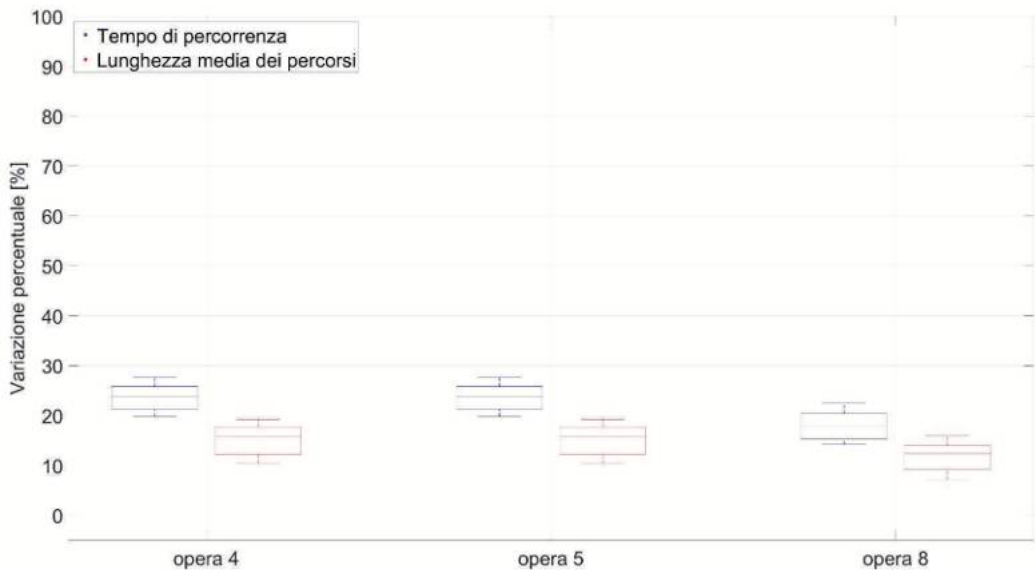


Figura 8.118 Distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per le relazioni OD interessate dall'opera.

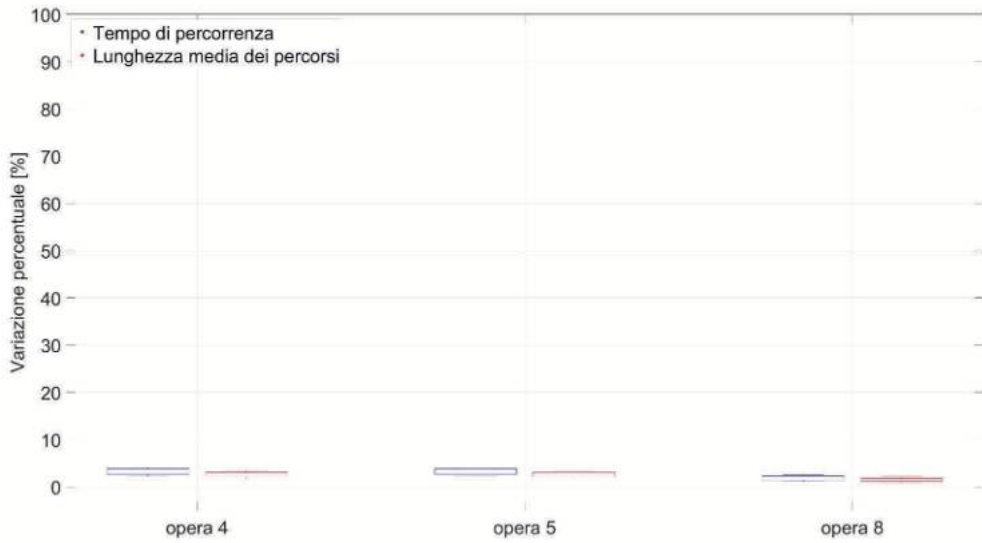


Figura 8.119 Distribuzione statistica della variazione percentuale dei parametri tempo di percorrenza e lunghezza media dei percorsi nei differenti scenari per l'intera area di studio.

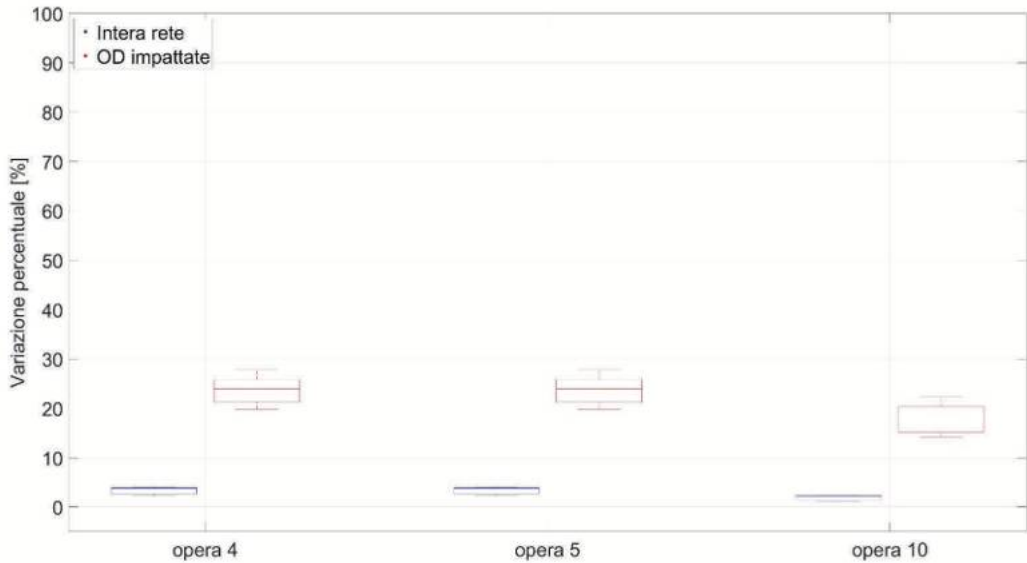


Figura 8.120 Distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro tempo di percorrenza: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

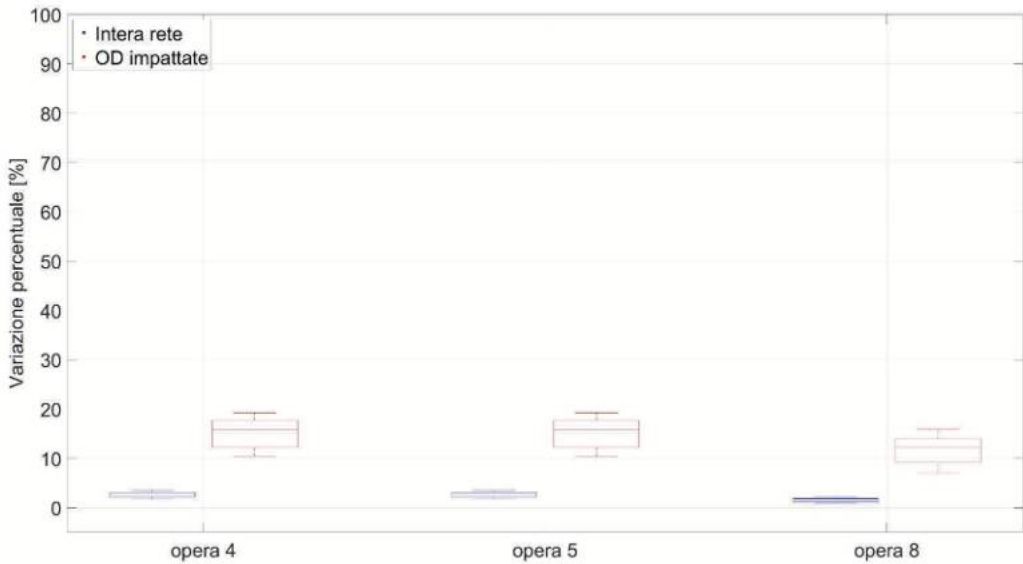


Figura 8.121 Distribuzione statistica della variazione percentuale del parametro lunghezza media dei percorsi: confronto tra intera area di studio e relazioni OD interessate dall'opera.

Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento

In linea con quanto previsto dall'azione **F3.A3**, per analizzare l'impatto socioeconomico derivante dall'interruzione, sia parziale sia totale, del manufatto, sono stati quantificati diversi **indicatori monetari**. Questi includono l'aumento dei costi associati ai tempi di viaggio, l'aumento dei costi operativi e l'aumento delle esternalità, come incidentalità stradali, emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ e emissioni acustiche. Le analisi sono state condotte seguendo le formulazioni proposte da Ventura et al. (2022) e De Aloe et al. (2023) nel contesto delle analisi costi-benefici, utilizzando i valori marginali riportati in Tabella 8.21.

I valori di riferimento, forniti dal MIT (2017), sono stati aggiornati al 2024 per tenere conto dell'inflazione, utilizzando i dati ISTAT.

Tabella 8.21 Valori marginali utilizzati per la quantificazione degli indicatori monetari di impatto socioeconomico.

Parametro	Valore
Valore marginale del tempo [€/veh equivalente*h]	9.200
Costo operativo marginale [€/veh equivalente*km]	0.343
Costo marginale degli incidenti stradali [€/veh equivalente*km]	0.008
Costo marginale delle emissioni inquinanti [€/veh equivalente*km]	0.008
Costo marginale delle emissioni di CO ₂ [€/gCO ₂]	0.0001149
Emissioni marginali di CO ₂ [gCO ₂ /(veh equivalente*km)]	265
Costo marginale delle emissioni acustiche [€/veh equivalente*km]	0.012

Concentrandosi sul **confronto tra lo scenario di base e quello caratterizzato dalla completa chiusura del manufatto**, i risultati ottenuti sono riportati in forma grafica e con riferimento all'andamento giornaliero di ciascun costo.

Dall'analisi (cfr. dalla Figura 8.122 alla Figura 8.126) emerge chiaramente che l'impatto maggiore è associato all'aumento dei costi legati ai tempi di viaggio, un effetto particolarmente accentuato per l'opera 19.

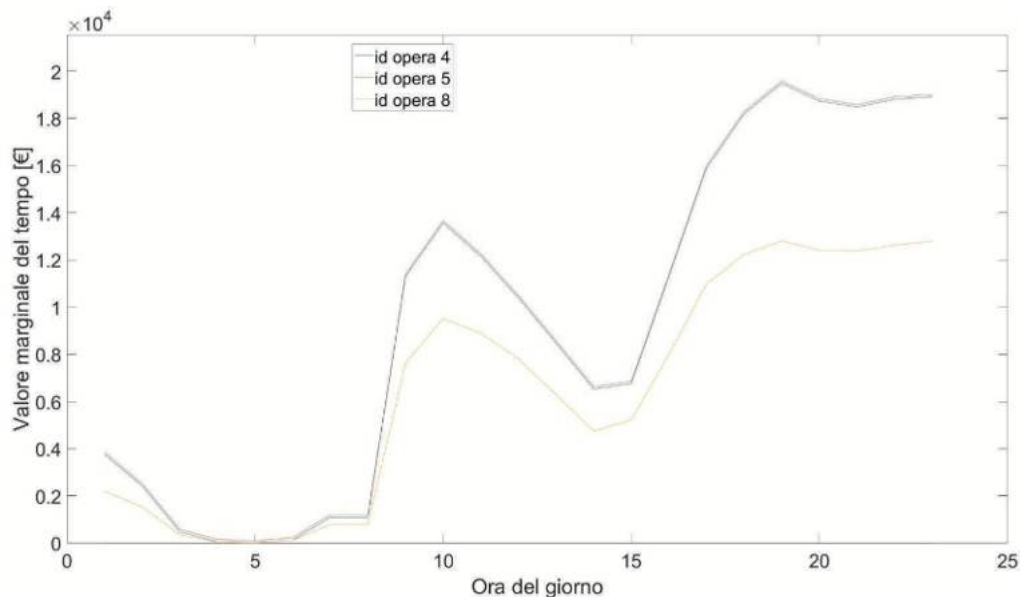


Figura 8.122 Andamento giornaliero del costo operativo con riferimento all'intera area di studio.

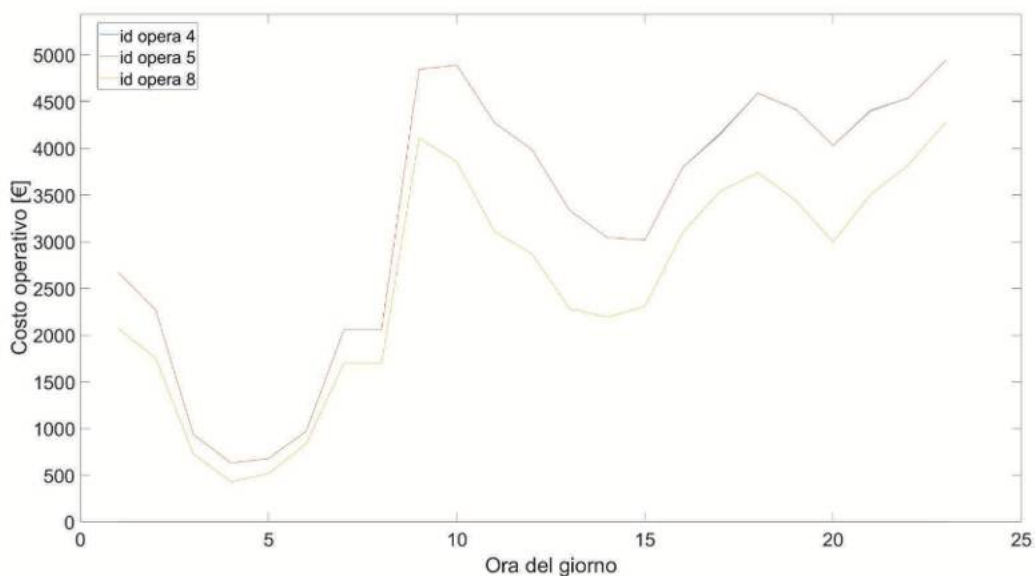


Figura 8.123 Andamento giornaliero del costo operativo con riferimento all'intera area di studio.

Questo risultato è in linea con l'analisi dei KPI descritta nel paragrafo precedente, che ha evidenziato come la chiusura del manufatto abbia un impatto significativo sui tempi di percorrenza e sulle velocità, soprattutto sul traffico merci.

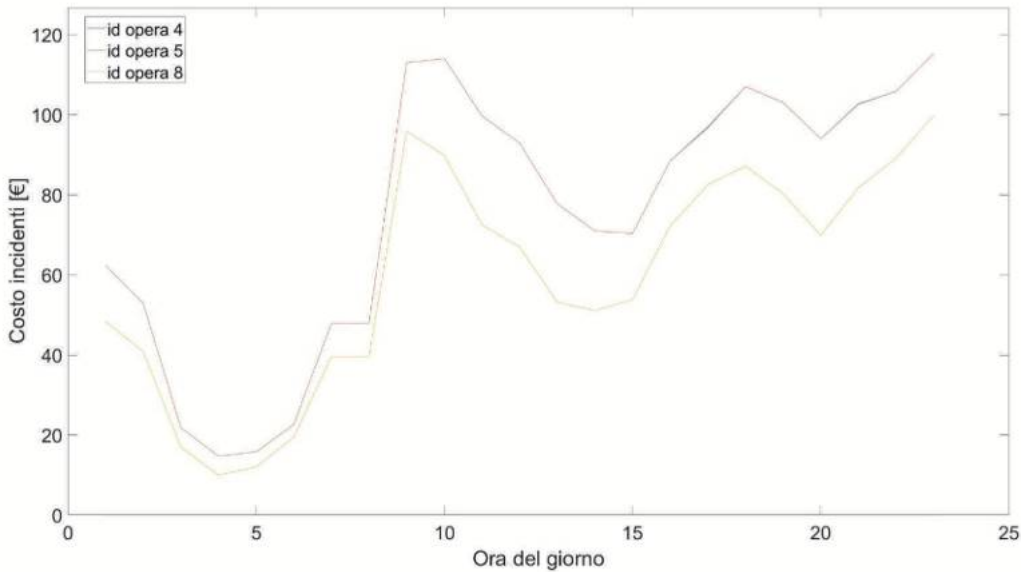


Figura 8.124 Andamento giornaliero del costo marginale dovuto agli incidenti con riferimento all'intera area di studio.

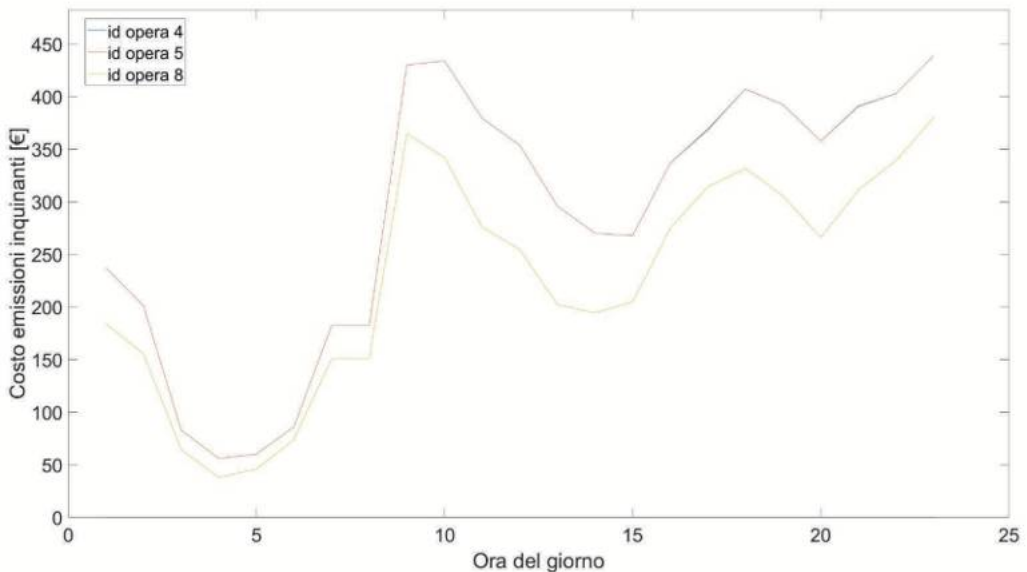


Figura 8.125 Andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni inquinanti con riferimento all'intera area di studio.

Meno rilevanti, invece, risultano le variazioni dei costi operativi e delle esternalità. Anche questo risultato è coerente con le evidenze precedenti. Infatti, le variazioni delle esternalità sono strettamente legate alla lunghezza dei percorsi, come dimostrato nel paragrafo precedente, che è risultata meno significativa rispetto alle variazioni di tempi e velocità. Complessivamente, l'analisi socioeconomica conferma l'importanza di mitigare gli impatti sulla viabilità.

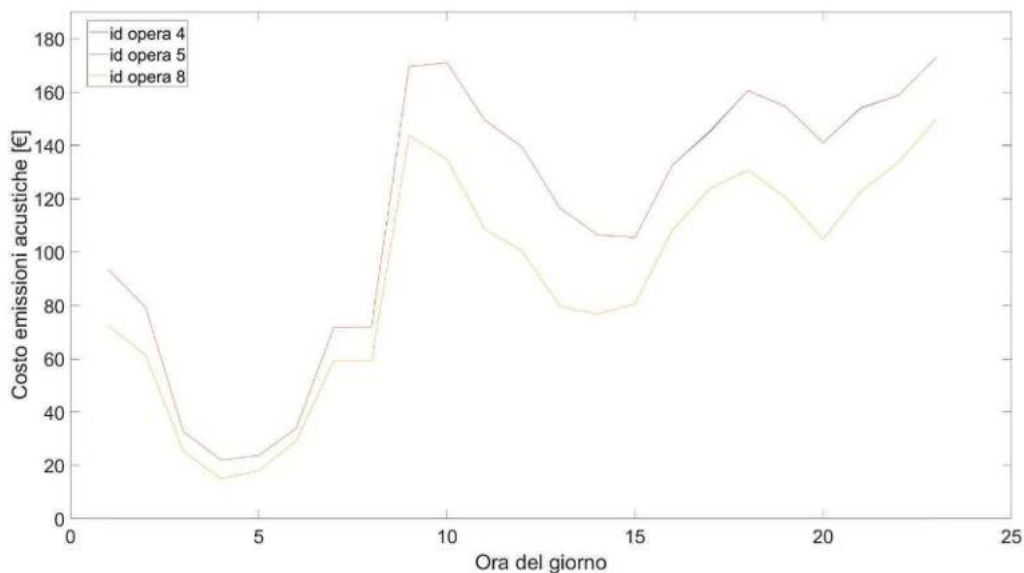


Figura 8.126 Andamento giornaliero del costo marginale legato alle emissioni acustiche con riferimento all'intera area di studio.

8.7 Caso di Studio 7: rete secondaria lungo la SP83, presso Baragiano (PZ)

Il settimo caso di studio analizza un'opera d'arte sulla rete stradale minore: un ponte sulla Fiumara di Picerno, situato lungo la SP83 tra i Comuni di Baragiano e Picerno, in provincia di Potenza. Il ponte oggetto di intervento, per il quale nel presente esempio applicativo si ipotizza la completa esclusione dal servizio, è alle coordinate 40.66192898736049, 15.607357886167517 (Figura 8.127); esso presenta una carreggiata bidirezionale con una corsia per senso di marcia (Figura 8.128) e fa parte di una rete infrastrutturale di collegamento tra i due Comuni menzionati e verso le aree rurali circostanti, in un'area a densità abitativa inferiore alla media nazionale, ma non particolarmente bassa (Comuni di Baragiano 84 abitanti/km², Picerno 71, Balvano 39, Ruoti 57, Bella 46).

Il ponte rappresenta un elemento del percorso ordinario di collegamento tra i territori comunali sopra indicati.



Figura 8.127 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 7.



Figura 8.128 Rappresentazione prospettica del sito considerato nel Caso di Studio 7 (fonte: Google Street View).

La posizione planimetrica del manufatto è indicata nella Figura 8.129, invece la rete stradale dell'area vasta attorno al ponte è rappresentata nella Figura 8.130.



Figura 8.129 Localizzazione territoriale del manufatto oggetto del Caso di Studio 7 (fonte Open Street Map).

8.7.1 Delimitazione area di studio

In accordo con le indicazioni in F1.A1, si è individuata l'area di studio. Questa è stata definita come l'ambito territoriale in cui si ipotizza si esauriscano la maggior parte degli effetti prodotti dall'interruzione del servizio svolto dal manufatto, basandosi su fattori strutturali e qualitativi, come previsto dalla linea guida metodologica.

Si è pertanto proceduto all'analisi qualitativa della rete, con identificazione delle principali strade, snodi e infrastrutture direttamente collegati al manufatto su mappe stradali e cartografiche, al fine di individuare i segmenti di rete che potrebbero potenzialmente assorbire flussi deviati e che pertanto devono rientrare nell'area di studio.

Sulla base delle precedenti considerazioni, si è stabilito un raggio preliminare di estensione per l'area di studio, sufficiente a garantire che tutte le tratte significative e potenzialmente impattate siano incluse, offrendo un quadro completo delle possibili ripercussioni. Il raggio individuato ha una dimensione massima di poco meno di 6 km. Sulla base di tale raggio, si è giunti a definire il perimetro come evidenziato nell'immagine che segue.

Dal punto di vista sociodemografico, l'area vasta attorno al sito comprende i Comuni di Baragiano e Picerno e le frazioni di Stazione di Bella-Muro, Zona Industriale di Balvano, Località Madonna dell'Assunta e Tito Scalo. Quest'area include anche il tratto dell'autostrada E847 che costituisce la principale viabilità del territorio, destinata alla lunga percorrenza.

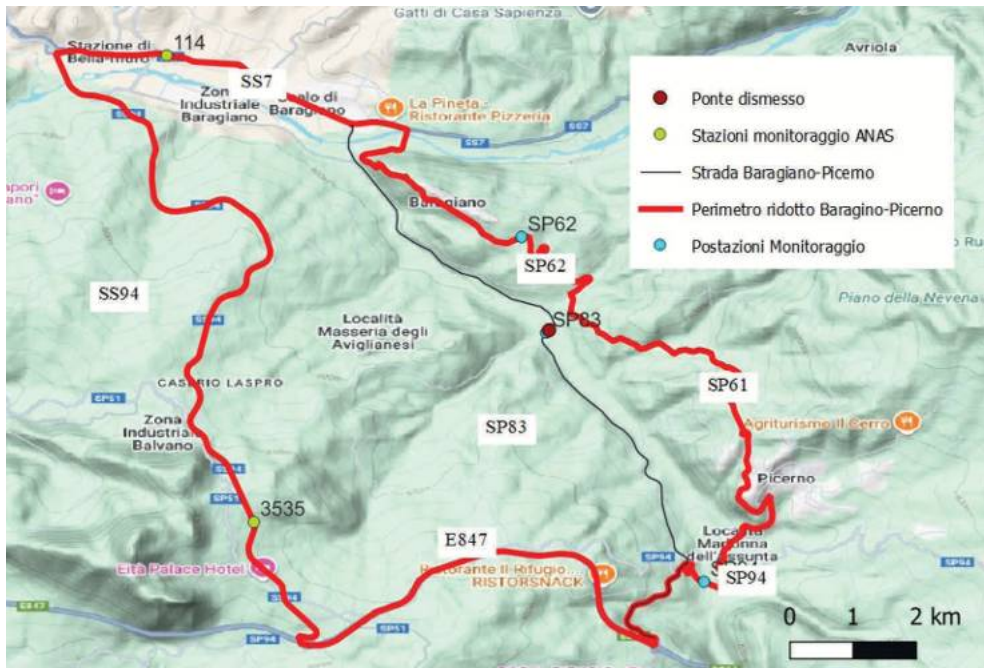


Figura 8.130 Vista planimetrica della rete stradale dell'area vasta che interessa il ponte, con rispettiva indicazione dei nomi delle strade. Indicazione delle postazioni di monitoraggio per il rilevamento del traffico lungo la rete stradale dell'area vasta (fonte Google su QGIS).

Dal punto di vista orografico, l'area di studio è caratterizzata da un territorio collinare e montuoso con svariate incisioni, superate da opere di scavalco a volte di luce non modesta.

La definizione dell'area di studio è stata subordinata ad una valutazione trasportistico-territoriale, ipotizzando di includere tutte le strade sulle quali si possano esaurire i principali effetti indotti dall'interruzione del manufatto. Dal punto di vista pratico, la definizione dell'area di studio è stata subordinata ad un'analisi preliminare dei tempi di percorrenza. Il collegamento sulla SP83 tra Baragiano e Picerno è caratterizzato da un tempo di percorrenza di 8', in condizioni ottimali. A seguito dell'interruzione del manufatto, si è, in prima istanza, individuata una rete di bypass che includesse esclusivamente le strade statali e autostrade viciniori per consentire lo smaltimento del traffico interrotto su strade di maggiore importanza gerarchica e funzionale. Tale rete coinvolgerebbe le Strade Statali 7, 94 e 94 dir oltre che l'autostrada E847 di competenza ANAS. Tuttavia, affidarsi a questa rete richiederebbe un tempo di percorrenza pari a 64' (+700%). L'aumento del tempo di percorrenza del 700%, seppur su strade ad alto scorrimento e di valenza sia funzionale che geometrica superiore alla SP83, non giustificherebbe come scelta strategica l'utilizzo di una rete di bypass di tali dimensioni. Pertanto, dal punto di vista pratico, anche prescindendo dai dati di traffico dettagliati e dai tempi di percorrenza associati a ciascuno degli itinerari alternativi proposti, è stato

possibile delineare l'area di studio attraverso un'analisi basata su fattori strutturali e qualitativi:

1. **Valutazione della rete infrastrutturale e della connessione con aree adiacenti:** l'analisi qualitativa della rete ha permesso di identificare le principali strade, snodi, e infrastrutture grazie alla semplice osservazione delle mappe stradali. Nel territorio afferente alla strada interrotta per la chiusura del manufatto (SP83) si trova un anello stradale che include due strade statali, rispettivamente a Nord (SS7) e a Ovest (SS94 e SS 94 dir) per poi raccordarsi all'autostrada in gestione all'ANAS (E847, principale attrattore e generatore di traffico insieme ai due Comuni di Baragiano e Picerno). In direzione Est, invece, la rete stradale è caratterizzata esclusivamente da strade provinciali, SP62, SP61 e SP94 che consentono il raccordo tra i Comuni e le principali direttrici di traffico (Figura 8.131).



Figura 8.131 Identificazione delle principali infrastrutture viarie che interessano l'area vasta in prossimità del manufatto (fonte Google su QGIS).

2. **Definizione dei criteri per la delimitazione dell'area di studio:** Coerentemente con il metodo indicato nel punto 2 di F1.A1, si procede alla delimitazione dell'area di studio impiegando i seguenti criteri:
 - ⊙ **Topologia della rete stradale e infrastrutturale:** Avendo valutato le strade in parola e tenendo a mente la modesta densità abitativa delle aree interessate, nonché la carenza di poli attrattori nelle vicinanze, è immediato constatare che il ponte oggetto di

analisi non svolge un ruolo significativo nei confronti dei traffici che transitano sulla rete considerata. Questo implica che i maggiori flussi di traffico che interessano le strade statali e le autostrade saranno marginalmente influenzati dal reindirizzamento del traffico agente sul manufatto dismesso. Infatti, verosimilmente, la chiusura del ponte sulla SP83 produrrà variazioni di transiti sulla rete che si estende nel raggio di circa 5-6 chilometri e che comprende la rete delle strade provinciali, a prevalenza con direzione Nord-Sud, o le Strade Statali di collegamento tra la SS7 e la E847, sempre a prevalenza direzionale Nord-Sud, ossia la SS94 e 94 dir. Quest'ultima scelta sarà più indicata per veicoli pesanti, data la configurazione geometrica della strada e le caratteristiche orografiche del territorio interessato. Le due alternative di percorso, una ad Est ed una ad Ovest del manufatto dismesso saranno selezionate in base alle esigenze specifiche degli utenti (Figura 8.132).



Figura 8.132 Topologia della rete stradale e infrastrutturale con relativa indicazione del manufatto (fonte Google su QGIS).

- © **Disponibilità e qualità delle alternative di percorso:** I percorsi alternativi che principalmente potrebbero essere utilizzati per le deviazioni, a seguito all'interruzione del manufatto, e che devono essere sottoposti a verifica di percorribilità, soprattutto da parte dei mezzi di maggiori dimensioni, sono deducibili dall'analisi topologica eseguita. Considerando i percorsi che interessano la SP83 tra Baragliano e Picerno e la rete stradale adiacente, si possono così elencare le due alternative di percorso individuate in ordine di allungamento del percorso:

- a) I veicoli sono reindirizzati secondo il percorso denominato Bypass_Ridotto_Est (Figura 8.133). Il tragitto della SP83 viene reindirizzato sulle strade provinciali adiacenti, SP62, SP61 e SP94, con tempi di percorrenza di 22'. Valutando la tortuosità della SP62, questo percorso risulta poco indicato per i veicoli pesanti (percorso valido anche per il senso di marcia opposto).

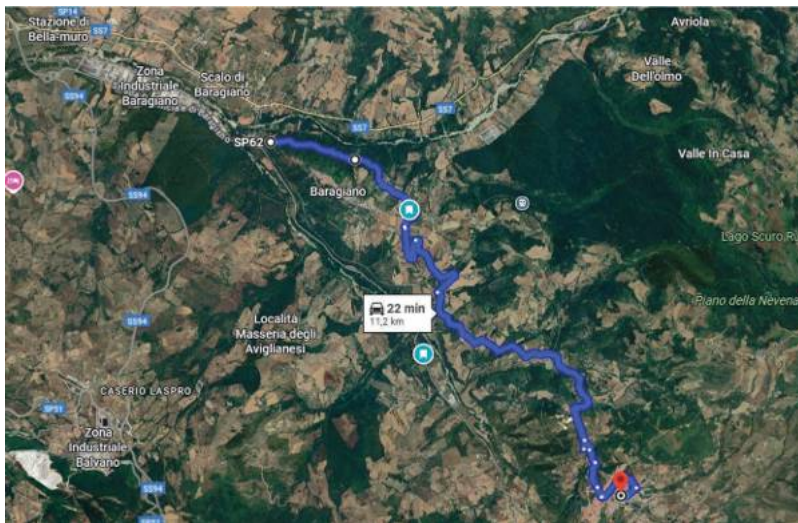


Figura 8.133 Alternativa di reindirizzamento su altro percorso (Bypass_Ridotto_Est).

In Figura 8.134 sono mostrati i tragitti sia da Baragiano a Picerno (frecche in rosso) che in direzione opposta (frecche in blu).



Figura 8.134 Identificazione del tragitto alternativo per il Bypass_Ridotto_Est.

b) i veicoli sono reindirizzati in loco, secondo il percorso denominato Bypass_Ridotto_Ovest (Figura 8.135). Tale percorso prevede il transito del flusso veicolare sulla SS7 direzione Ovest, sulla Strada Statale 94, 94dir e infine sulla E8407, per connettersi poi alla SP94, con destinazione Picerno (percorso valido anche per il senso di marcia opposto). In questo caso i tempi di percorrenza, ipotizzati a flusso libero risultano essere di 24'. La conformazione orografica e le caratteristiche di sezione e plano-altimetriche del tracciato consentono una maggiore percorribilità di questa soluzione da parte dei veicoli pesanti rispetto a quella del Bypass_Ridotto_Est.

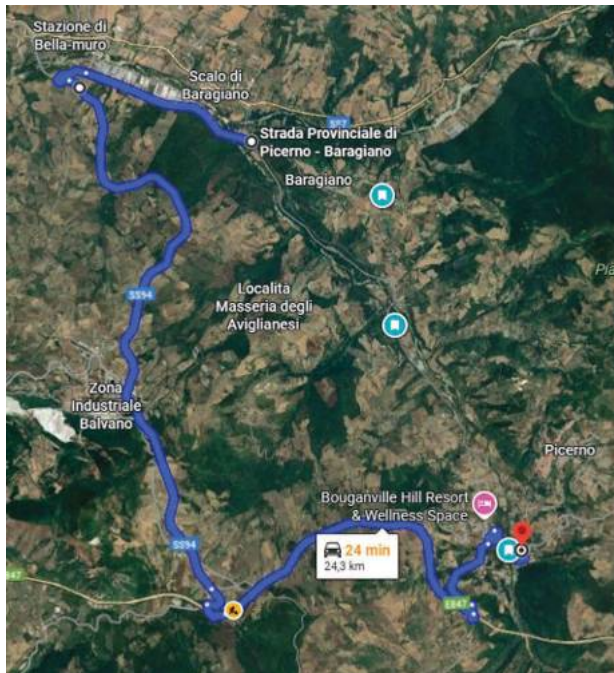


Figura 8.135 Alternativa di reindirizzamento su altro percorso (Bypass_Ridotto_Ovest).

In Figura 8.136 sono mostrati i tragitti sia da Baragiano a Picerno (freccie in rosso) in direzione opposta (freccie in blu).

- **Accessibilità e collegamenti con aree urbane e rurali limitrofe:** Quando si considera la connessione tra la zona interessata dall'interruzione e le aree vicine, che potenzialmente subiranno le più importanti ripercussioni in termini di accessibilità e tempi di spostamento, sono da valutare senz'altro i percorsi "locali" già individuati al punto precedente. Tenendo conto delle probabili difficoltà di iscrizione in curva dei veicoli di grandi dimensioni e dei loro possibili rallentamenti a causa delle livellette acclivi ivi presenti, non si individuano per questi ultimi delle alternative più celeri rispetto al percorso Bypass_Ridotto_Ovest. In definitiva quest'ultimo risulta essere l'unica alternativa per i mezzi pesanti.



Figura 8.136 Identificazione del tragitto alternativo per il Bypass_Ridotto_Ovest.

3. **Determinazione del raggio geografico:** Sulla base dei criteri stabiliti nel metodo per la fase F1.A1, è possibile concludere la procedura di delimitazione dell'area di studio definendo il raggio di estensione dell'area di studio. Tale raggio serve a definire un contorno dell'area di interesse tale per cui tutte le tratte significative potenzialmente impattate dalla chiusura del manufatto siano incluse (Figura 8.137).

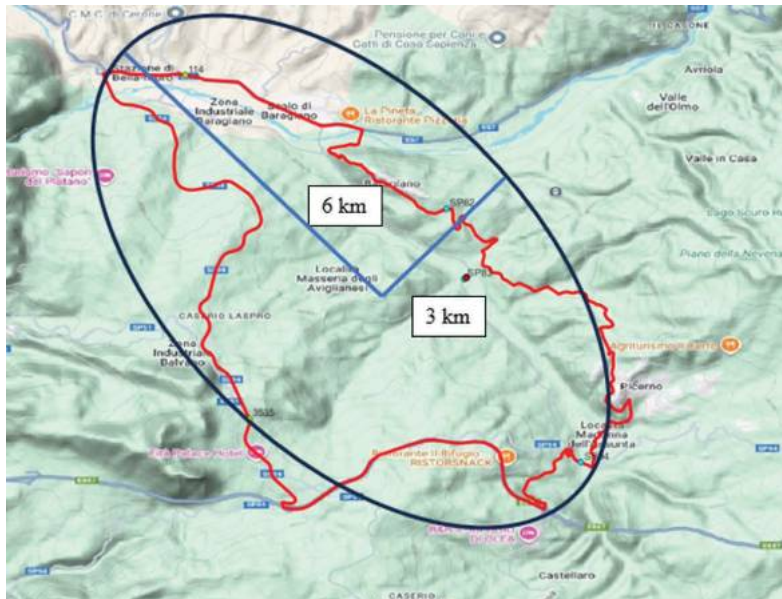


Figura 8.137 Determinazione del raggio geografico.

In questa maniera si offre un quadro completo delle possibili ripercussioni indotte dalle deviazioni del traffico. Il raggio individuato è di circa 6 km in direzione SE-NW e 3 km in direzione W-E, come evidenziato in figura. Le strade interne al perimetro in blu sono oggetto di studio.

4. **Revisione e aggiustamento dell'area di studio:** Al termine della fase F1.A1 è prevista la verifica dell'adeguatezza dell'area selezionata, garantendo che includa tutte le vie di collegamento e i nodi che potrebbero essere impattati. Nel presente esempio, si è provveduto alla verifica effettuando dei sopralluoghi conoscitivi a piedi e in auto, percorrendo tutte le vie individuate di interesse nel precedente esame (Figura 8.138). Il sopralluogo ha confermato la delimitazione mostrata in precedenza.



Figura 8.138 Viste prospettive delle strade appartenenti alle alternative di percorso individuate, a seguito di sopralluoghi conoscitivi.

8.7.2 Zonizzazione dell'area di studio

La zonizzazione dell'area di studio è un passaggio preliminare per la costruzione del modello di traffico, poiché definisce le unità territoriali (zone di traffico) dalle quali e verso le quali si muovono i flussi di domanda. L'obiettivo della zonizzazione è semplificare la descrizione del fenomeno modellato, considerando che, nel mondo reale, gli spostamenti all'interno dall'area di interesse possono iniziare e terminare in un qualunque punto della stessa. Questa suddivisione è propedeutica alla successiva definizione delle matrici origine-destinazione (O/D). Tuttavia, valutando il caso di studio e l'esiguità dei traffici rilevati dai primi sopralluoghi (coerente con l'assenza di dati TomTom per l'area d'interesse), la zonizzazione si ritiene non necessaria, così come la conseguente modellazione con matrici O/D.

Al fine di confermare la correttezza di tale assunzione, sono da effettuarsi rilievi di traffico sugli assi viari che dovranno garantire la connettività e la fluidità al maggior traffico su di essi convogliato. Inoltre, appaiono essenziali le verifiche relative al passaggio dei veicoli pesanti lungo le alternative di percorso individuate (inscrivibilità geometrica dei mezzi nei punti più critici e angusti).

8.7.3 Modellazione della rete stradale

Per quanto accennato in precedenza rispetto alla relativa semplicità della rete stradale di interesse, non si procede alla sua modellazione su software (come VISUM, Paramics, o altri) né tantomeno alla costruzione di un grafo, ma, come previsto in F1.A3, si provvede alla sola classificazione delle criticità rilevate rispetto alla transitabilità per i veicoli pesanti, così da permettere analisi differenziate in funzione del tipo di veicolo e delle restrizioni infrastrutturali.

Riguardo ai percorsi alternativi individuati, appaiono particolarmente critici per i veicoli pesanti i seguenti elementi, esclusivamente per l'alternativa Bypass_Ridotto_Est:

- tortuosità e ampiezza della piattaforma stradale sul ramo della SP94 tra la SP83 e la SP61, con larghezza del piano viabile pavimentato di 6,50 metri e raggio di curvatura minimo inferiore a 20 m. Tuttavia, in curva il piano viabile pavimentato raggiunge larghezze di circa 9,50 metri (Figura 8.139). Lo stesso discorso relativo alla larghezza di piano viabile e ai raggi di curvatura è applicabile anche alla SP61 e alla SP62 (con raggi di curvatura minimi inferiori a 50 metri).



Figura 8.139 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 1 di 3.

- Intersezioni tra la strada provinciale 61 con la strada urbana che attraversa Picerno: raggi di curvatura modesti (Figura 8.140).
- Intersezione tra la SP62 e la Strada in Costruzione caratterizzata da una conformazione atipica e da raggi di curvatura modesti (Figura 8.141).

8.7.4 Modellazione della domanda di trasporto

La fase 2 si riferisce alla modellazione della domanda di traffico passeggeri (F2.A1) e merci (F2.A2), anche in relazione alla disponibilità di banche dati o di notizie socio-economiche che permettano una validazione incrociata dei dati raccolti.



Figura 8.140 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 2 di 3.



Figura 8.141 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 3 di 3.

In questo esempio, la questione fondamentale è in realtà relativa al passaggio dei veicoli pesanti lungo una delle due alternative individuate, caratterizzata da alcuni spazi angusti e da un'elevata tortuosità plano-altimetrica.

Considerando queste premesse, la modellazione della domanda si è effettuata distinguendo i veicoli per dimensione (larghezza e lunghezza), associando gli autobus ai mezzi commerciali pesanti e i mezzi commerciali leggeri alle autovetture.

Tra le alternative indicate nella metodologia, la modellazione viene eseguita ricorrendo ai **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di **sezioni significative** individuate lungo alcuni segmenti chiave della rete compresa nella zona precedentemente delimitata e confrontando i dati sperimentali ottenuti con quelli disponibili dagli enti territoriali o disponibili tramite **sistemi di navigazione mobili basati su GPS (FCD)**, e in particolare da TomTom MOVE (TomTom, 2024), benché la proporzione di utenti che utilizzano dispositivi compatibili con il sistema di raccolta dati sia risultata piuttosto bassa. Poiché la Provincia di Potenza non dispone di dati di traffico per le strade in parola, è stato necessario eseguire uno specifico rilievo, come meglio esplicitato nel seguito. Oltre ai dati di traffico sulla Strada Provinciale considerata, SP83, sono stati anche utilizzati i dati di traffico disponibili per le strade appartenenti alla rete di rango superiore contermini. In particolare, il primo dato a cui ci si è affidati è stato quello relativo ai “Dati di Traffico medio giornaliero annuale” reperibili sul sito di ANAS⁴. In particolare, dalle stazioni 3039 al km 48+619 della E847 e 3535 al km 1+822 della SS94dir si sono potuti ricavare i dati di traffico relativi all’anno 2024. Dalla stazione 114 sulla SS7, al km 428+365, si è potuto invece ricavare il solo dato di traffico rilevato al 2018⁵.

I valori ottenuti per le stazioni indicate sono riportati in Tabella 8.22.

Tabella 8.22 Flussi di traffico rilevati dall’ente gestore (ANAS) in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio fisse presenti sulla rete stradale perimetrale al manufatto.

Strada	ID stazione monitoraggio ANAS	Chilometrica	Anno del dato	TGM (veicoli/giorno)	%Veicoli pesanti	Tipo sezione stradale
E847	3039	48+619	2024	20491	5.3	Doppia carreggiata; doppia corsia per senso di marcia
SS94dir	3535	1+822	2024	2740	12.4	Singola carreggiata; singola corsia per senso di marcia
SS7	114	428+365	2018	2166	3.0	Singola carreggiata; singola corsia per senso di marcia

Per quel che riguarda la stazione 114 sulla SS7, ipotizzando un fattore di crescita del 2,6% annuo fino al 2024 (ottenuto dal confronto con un’altra stazione presente sulla SS7, la 15017 al km 360+175, di cui si hanno i dati per tutti gli anni dal 2018 al 2024), si è stimato che al 2024 il TGM sia pari a 2.531 veicoli/giorno. Osservando quindi i dati di traffico delle tre strade in parola, si osserva come i volumi che le interessano sono di entità non importante. Ciò lascia desumere che altrettanto possa dirsi per le strade di rango inferiore limitrofe.

⁴ <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/osservatorio-del-traffico/dati-traffico-medio-giornaliero-annuale>

⁵ È stata anche fatta una specifica richiesta ad ANAS per ottenere dati più recenti senza successo.

La circostanza che i dati Tom Tom, che pure sono stati utilizzati per eseguire l'analisi di traffico, abbiano restituito dati di traffico sostanzialmente nulli nell'area d'interesse appare confermare quanto sopra osservato.

Sulle strade appartenenti alle due alternative individuate (Bypass_Ridotto_Ovest e Bypass_Ridotto_Est) si sono effettuati i monitoraggi, con contatori di traffico mobili, installati per almeno 24 ore. L'intento originale era quello di combinare i dati dei monitoraggi con gli FCD TomTom nell'area ridotta (assenti per l'area esaminata) o con quelli disponibili da parte degli enti gestori nel caso di presenza di strade di competenza ANAS e/o ASPI. Ci si è affidati pertanto ai soli dati del rilievo strumentale eseguito ed agli ulteriori dati delle stazioni di monitoraggio ANAS, come sopra indicati (Figura 8.142).

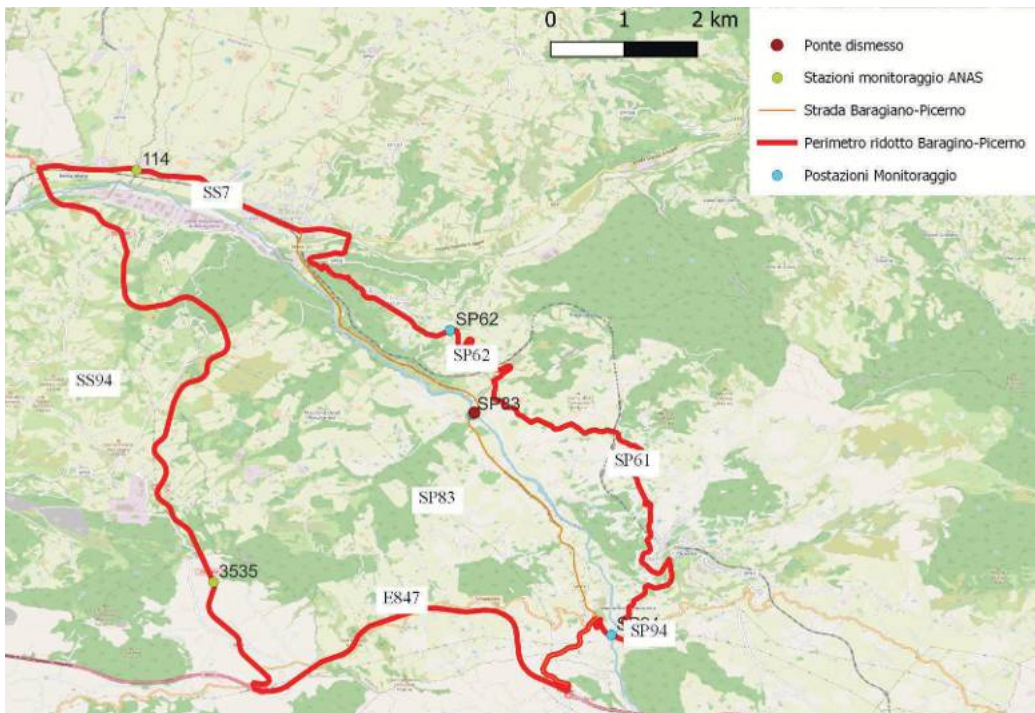


Figura 8.142 Localizzazione delle postazioni di monitoraggio fisse e mobili utilizzate per rilevare i traffici agenti sulla rete stradale di interesse.

Come anticipato, si è innanzitutto verificato che la capacità delle strade interessate dal percorso di bypass ridotto non risultasse saturata dal traffico indotto dalla chiusura della SP83. Nel qual caso il traffico residuo si deve necessariamente reindirizzare lungo il percorso di bypass "esteso".

Dalle rilevazioni di traffico si è ottenuto il quadro di traffico riepilogato nella tabella che segue (Tabella 8.23).

Tabella 8.23 Sintesi dei traffici rilevati sulle strade appartenenti alla rete di interesse.

Strada	N. Contatore	Durata Monitoraggio	Periodo	TGM (veicoli/giorno)	Traffico punta oraria sulle due direzioni (veicoli/h)	%Veicoli pesanti	Direzione Positiva di traffico	TGM direzione +	TGM direzione -	Max capacità oraria da HCM 2022 sulle due direzioni (veicoli/h)
SP62	26209	24h	Novembre 2024	391	38	4,6	Baragiano	187	204	2500-3000
SP94	26303	24h	Novembre 2024	645	61	7	Picerno	340	305	2500-3000
SP83	26290	24h	Novembre 2024	3784	316	3,6	Baragiano	1963	1821	2500-3000

8.7.5 Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

L'obiettivo della Fase 3 è simulare l'interazione tra offerta e domanda per l'area di studio e valutare la resilienza del sistema di trasporto, misurando i principali Key Performance Indicators (KPIs) – (e.g., tempo di percorrenza, lunghezza dei percorsi, velocità media) sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni degradate, in seguito a interruzioni.

Per carichi di traffico significativi, la Fase 3 richiede l'impiego di algoritmi di assegnazione e di ricerca dell'equilibrio della rete. Nelle condizioni osservate per l'ambito in parola (Baragiano-Picerno), ci si può concentrare sulla verifica della connettività tra coppie origine-destinazione verificando la percorribilità da parte delle varie componenti di traffico reindirizzate a causa dell'interruzione. Non si mettono a confronto la domanda di traffico e le capacità degli archi, in quanto si è constatato, con le rilevazioni speditive effettuate in vari punti notevoli della rete, il modesto numero dei movimenti. Il traffico sugli archi rimarrebbe modesto anche quando tutti i transiti sul ponte interrotto dovessero essere deviati su un solo percorso tra quelli possibili. Non si esegue un'analisi di dettaglio dei Livelli di Servizio, tenendo a mente le eventuali problematiche e rallentamenti nel caso in cui i mezzi pesanti percorressero l'alternativa Bypass_Ridotto_Est per le criticità precedentemente evidenziate.

Per il caso studio in esame, considerando che il traffico di punta orario sulle due direzioni della strada da interrompere è notevolmente inferiore (è pari al 10% della sua capacità massima, o poco più) alla capacità totale oraria delle strade provinciali (variabile tra 2500 e 3000 veicoli/h a seconda delle condizioni al contorno, quali altimetria, limiti di velocità e frequenza dei tratti in cui è possibile il sorpasso⁶), e che, allo stato attuale, il flusso orario nell'ora di punta sulle SP di bypass considerate è pari rispettivamente al 1% ed al 2% della capacità di tali strade, risulta evidente come sia effettivamente più conveniente, per il traffico deviato dalla SP83, percorrere i percorsi individuati (SP62, SP61 e SP94). Difatti, il

⁶ La capacità giornaliera massima, invece, è da ritenersi compresa tra 24100 e 24900 veicoli/giorno, in dipendenza degli stessi fattori considerati per la capacità oraria. Anche confrontando il TGM alla capacità giornaliera, ci si assesta intorno al 16% della capacità massima delle strade, che si andrebbe a redistribuire su strade interessate da un traffico pari al 2-3% della Capacità massima (indicata come Livello di Servizio E). Quindi anche a seguito della redistribuzione del traffico si andrebbe sempre in condizioni di traffico corrispondenti ai Livelli di servizio da A a C.

volume di traffico indotto dall'interruzione non genera significative modifiche ai livelli di servizio delle strade interessate dai bypass, restando sempre compresi tra A e C.

Si è altresì verificato che il limite oltre il quale non vi è certezza che i veicoli vengano reindirizzati efficacemente su uno dei due percorsi alternativi individuati è rappresentato da un volume di traffico sulla strada interrotta pari o superiore al 50%⁷ della sua capacità massima (oraria o giornaliera), quindi pari a Livello di Servizio compresi tra D ed E. In questo caso, parte del traffico potrebbe essere reindirizzato su un bypass "esteso" che include esclusivamente le strade gerarchicamente e funzionalmente superiori (solo strade statali e autostrade). Pertanto, qualora si verificasse tale condizione, l'analisi speditiva eseguita non risulterebbe più sufficientemente affidabile. In tali circostanze occorrerebbe utilizzare altre metodologie d'analisi, basate su modelli di simulazione tipici delle scienze trasportistiche, come evidenziato nella linea guida.

Tornando ai risultati dell'analisi eseguita, di seguito sono riportati i tempi di percorrenza minimi e massimi calcolati per tutte le tipologie di veicolo (leggeri e pesanti) nelle diverse fasce orarie giornaliere lungo i percorsi individuati (Tabella 8.24 e Figura 8.143).

Tabella 8.24 Confronto delle lunghezze, dei tempi di percorrenza e della percorribilità da parte dei mezzi sul percorso attuale (lungo il manufatto non interrotto) e sui due percorsi alternativi, individuati a seguito dell'interruzione del manufatto (Bypass_Ridotto_Est e Bypass_Ridotto_Ovest).

Percorso	Via	Lunghezza percorso (Km)	Intervallo Orario	Durata percorso (min)	Ritardo rispetto alla condizione attuale (min)	Percorrenza per tipologia di veicoli
Baragiano-Picerno	SP83 (Attuale)	8.8	00:00-06:00	8		Leggeri + Pesanti
			06:00-12:00	8		
			12:00-18:00	10		
			18:00-24:00	8		
Baragiano-Picerno	Bypass_Ridotto_Ovest	24.3	00:00-06:00	22	14	Leggeri + Pesanti
			06:00-12:00	24	14	
			12:00-18:00	22	14	
			18:00-24:00	22	14	
Baragiano-Picerno	Bypass_Ridotto_Est	13.7	00:00-06:00	24	16	Leggeri
			06:00-12:00	24	16	
			12:00-18:00	24	16	
			18:00-24:00	24	16	

⁷ Come da Exhibit 36 di NHCRP Report 825 "Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the Highway Capacity Manual" (2016). US Department of Commerce, Bureau of Public Roads.

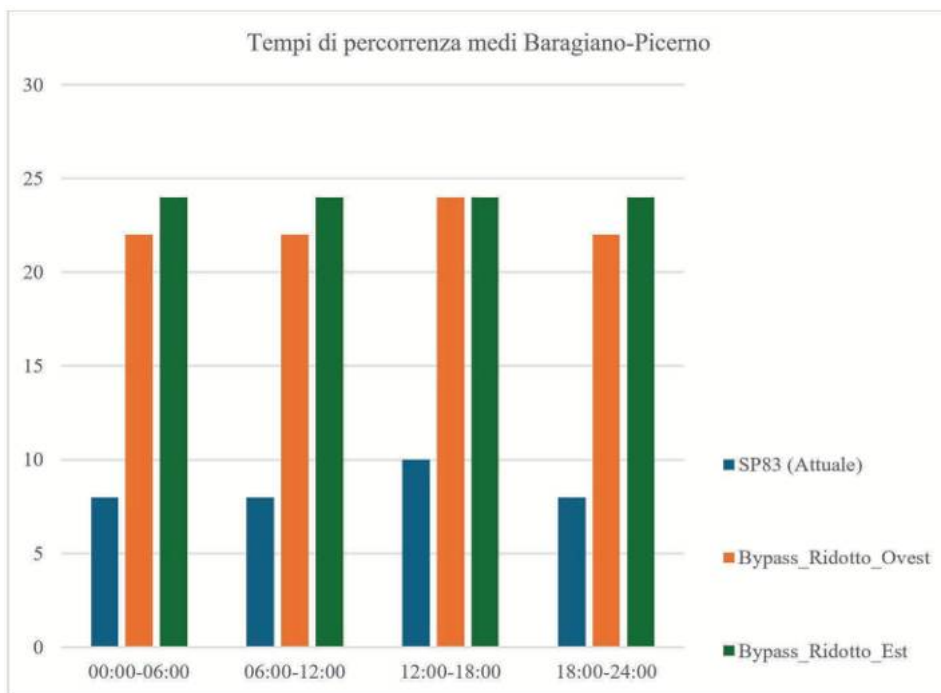


Figura 8.143 Confronto dei tempi di percorrenza sul percorso attuale (lungo il manufatto non interrotto) e sui due percorsi alternativi, individuati a seguito dell'interruzione del manufatto (Bypass_Ridotto_Est e Bypass_Ridotto_Ovest).

L'attività prosegue con la fase **F3.F3** (Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento), identificando nel miglior modo possibile, allo stadio di conoscenza acquisito, gli interventi prioritari di manutenzione e di gestione suscettibili di rafforzare la resistenza della rete e ridurre l'impatto sulle comunità.

Nel caso allo studio, gli interventi di manutenzione dovranno consistere essenzialmente nel rifacimento del manto di usura della pavimentazione stradale per il Bypass_Ridotto_Ovest e nella rettifica e riorganizzazione di alcuni rami del Bypass_Ridotto_Est, qualora si volessero rendere tali rami accessibili anche ai veicoli pesanti.

Gli interventi gestionali consisteranno essenzialmente in una possibile differente regolazione della circolazione, individuando i percorsi per soli mezzi leggeri e i percorsi per mezzi pesanti.

8.8 Caso di Studio 8: rete secondaria lungo la SP123 presso Troia (FG)

L'ottavo caso di studio analizza un'opera d'arte sulla rete stradale minore: un ponte sul Torrente Sannoro, situato lungo la SP123 tra i Comuni di Troia e Orsara di Puglia, in provincia di Foggia (Figura 8.144). Il ponte oggetto di intervento per il quale nel presente esempio applicativo si ipotizza la completa esclusione dal servizio è alle coor-

dinate 41.328762399526674, 15.288608858672504; esso presenta una carreggiata bidirezionale con una corsia per senso di marcia (Figura 8.144, Figura 8.145) e fa parte di una rete infrastrutturale di collegamento tra i due Comuni menzionati e verso le aree rurali circostanti, in un'area a densità abitativa notevolmente inferiore alla media nazionale (Comune di Troia 39 abitanti/km², Orsara di Puglia 30, Castelluccio Valmaggiore 44, Biccari 24).

Il ponte rappresenta un elemento del percorso ordinario di collegamento tra i territori comunali sopra indicati.



Figura 8.144 Individuazione planimetrica del sito considerato nel Caso di Studio 8.



Figura 8.145 Rappresentazione prospettica del sito considerato nel Caso di Studio 8 (fonte: Google Street View).

La posizione planimetrica del manufatto è indicata nella Figura 8.146, invece la rete stradale dell'area vasta attorno al ponte è rappresentata nella Figura 8.147.



Figura 8.146 Localizzazione territoriale del manufatto oggetto del Caso di Studio 8 (fonte Open Street Map).

8.8.1 Delimitazione area di studio

In accordo con le indicazioni in F1.A1, si è individuata l'area di studio. Questa è stata definita come l'ambito territoriale dove si ipotizza si esauriscano la maggior parte degli effetti prodotti dall'interruzione del servizio svolto dal manufatto, basandosi su fattori strutturali e qualitativi, come previsto dalla linea guida metodologica.

Si è pertanto proceduto all'analisi qualitativa della rete, con identificazione delle principali strade, snodi e infrastrutture direttamente collegate al manufatto su mappe stradali e cartografiche, al fine di individuare i segmenti di rete che potrebbero potenzialmente assorbire flussi deviati e che pertanto devono rientrare nell'area di studio.

Sulla base delle precedenti considerazioni, si è stabilito un raggio preliminare di estensione per l'area di studio, sufficiente a garantire che tutte le tratte significative e potenzialmente impattate siano incluse, offrendo un quadro completo delle possibili ripercussioni. Il raggio individuato ha una dimensione massima di poco meno di 12 km, includendo possibili connessioni con il Comune di Lucera. Sulla base di tale raggio, si è giunti a definire il perimetro come evidenziato nell'immagine che segue (Figura 8.147).

Dal punto di vista sociodemografico, l'area vasta attorno al sito comprende i Comuni di Lucera, Troia, Orsara di Puglia, Contrada Giardinetto e Contrada Tavernazza. Quest'area include anche il tratto della Strada Statale 90 che costituisce la principale viabilità del territorio, destinata alla lunga percorrenza, consentendo di raccordare l'area in parola alla circonvallazione di Foggia e, quindi, all'Autostrada A14.

questi percorsi sono stati esclusi a priori, nonostante coinvolgano strade ad alto scorrimento e di valenza sia funzionale che geometrica superiore alla SP123. Pertanto, dal punto di vista pratico, anche prescindendo dai dati di traffico dettagliati e dai tempi di percorrenza per ciascuno degli itinerari alternativi proposti, è stato possibile delineare l'area di studio attraverso un'analisi basata su fattori strutturali e qualitativi, includendo nell'area di interesse anche strade di importanza gerarchica e funzionale comparabile a quella della strada in parola.

1. **Valutazione della rete infrastrutturale e della connessione con aree adiacenti** (Figura 8.148): l'analisi qualitativa della rete ha permesso di identificare le principali strade, snodi, e infrastrutture grazie alla semplice osservazione delle carte stradali. Adiacenti alla strada interrotta per la chiusura del manufatto (SP123) si trova un anello stradale che include due strade statali, rispettivamente a Nord (SS17) e a Sud-Est (SS90) e che poi si riconnette alla strada in esame mediante una rete di Strade Provinciali (SP18, SP109, SP112, SP113, SP115, SP116, SP117) e Comunali (Strada Comunale Torre Guevara e Strada Comunale Selce di Martino- Giardinetto).



Figura 8.148 Identificazione delle principali infrastrutture viarie che interessano l'area vasta in prossimità del manufatto (fonte Google su QGIS).

2. **Definizione dei criteri per la delimitazione dell'area di studio:** Coerentemente con il metodo indicato nel punto 2 di F1.A1, si procede alla delimitazione dell'area di studio impiegando i seguenti criteri:

- ⊙ **Topologia della rete stradale e infrastrutturale:** Avendo valutato le strade in parola e tenendo a mente la modesta densità abitativa delle aree interessate, nonché della carenza di grandi poli attrattori nelle vicinanze (escludendo le città di Lucera e di Foggia, ben distanti e diversamente servite dalla rete stradale rispetto ai Comuni e alle Contrade in oggetto), è immediato constatare che il ponte oggetto di analisi svolge un ruolo significativo nei confronti dei traffici che transitano sulla rete (Figura 8.149). Questo implica che i maggiori flussi di traffico che interessano le strade statali e le autostrade saranno marginalmente influenzati dal reindirizzamento del traffico agente sul manufatto dismesso. Le uniche due Strade Statali che potenzialmente potrebbero risentire in maniera marginale di tale interruzione sono la SS90 e la SS17. Quest'ultima in maniera molto marginale, è interessata esclusivamente nel caso di possibili raccordi con Lucera passando per i Comuni di Baragiano e Picerno, con un'estensione chilometrica notevole (circa 70 km) rispetto agli altri spostamenti di corto raggio interessati dal manufatto (circa 15 km). Infatti, verosimilmente, la chiusura del ponte sulla SP123 produrrà variazioni di transiti sulla rete che si estende nel raggio di circa 7 chilometri e che comprende la rete delle strade provinciali, a prevalenza con direzione Nord-Sud, le Strade Comunali viciniori a prevalenza direzionale Ovest-Est e la Strada Statale di SS90 (di bordo per l'area vasta individuata) sempre a prevalenza direzionale Nord-Sud. Quest'ultima sarà la scelta più indicata per veicoli pesanti, data la configurazione geometrica della strada e le caratteristiche orografiche del territorio interessato. Diverse alternative di percorso in prossimità del manufatto dismesso saranno selezionate.

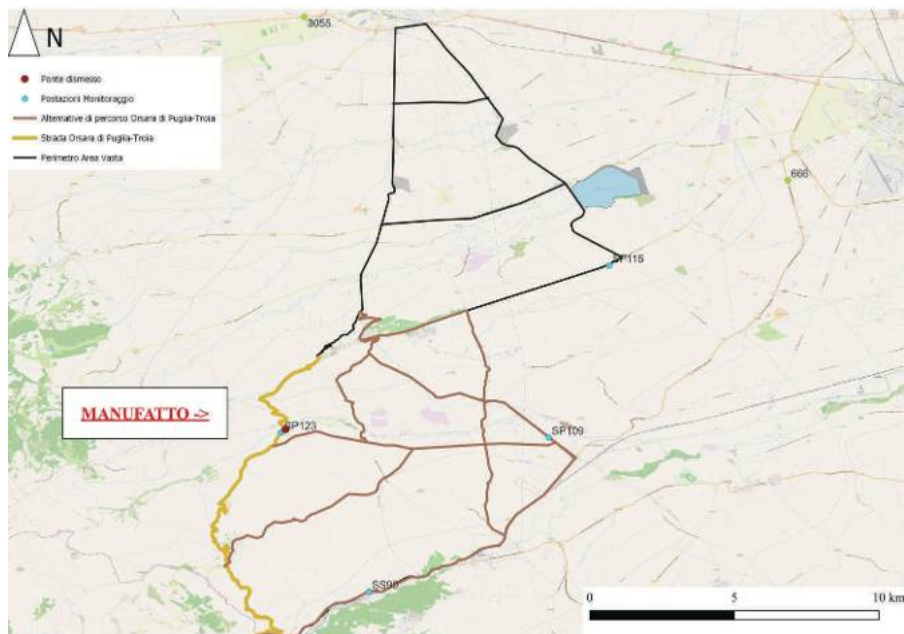


Figura 8.149 Topologia della rete stradale e infrastrutturale con relativa indicazione del manufatto (fonte Google su QGIS).

- ◎ **Disponibilità e qualità delle alternative di percorso:** I percorsi alternativi che principalmente potrebbero fungere da deviazioni in seguito all'interruzione del manufatto e che devono essere sottoposti a verifica di percorribilità, soprattutto da parte dei mezzi di maggiori dimensioni, sono deducibili dall'analisi topologica eseguita. Preliminarmente si indica che la SP123 è caratterizzata da una sezione stradale avente 7 m di larghezza e da elevata tortuosità, due caratteristiche che la rendono poco indicata per i mezzi pesanti, nonostante gli esistenti allargamenti in curva per favorire l'inscrivibilità dei suddetti mezzi (Figura 8.150).

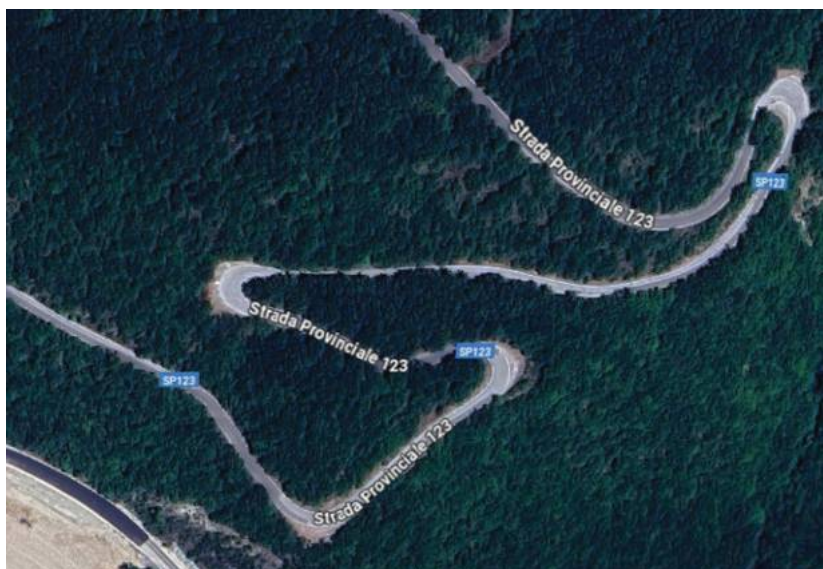


Figura 8.150 Identificazione delle criticità relative al transito dei veicoli pesanti e dei veicoli leggeri per la SP123.

Considerando i percorsi che interessano la SP123 tra Orsara di Puglia e Troia e la rete stradale adiacente, si possono così elencare le alternative individuate in ordine di allungamento del percorso:

- La prima rete stradale alternativa prevede il reindirizzamento veicolare in prossimità del manufatto (a Sud) ed è valida per entrambe le direzioni di marcia (da Orsara di Puglia verso Troia e viceversa). Da questa deviazione, sono possibili cinque percorsi alternativi, di estensione e tempi di percorrenza simili, che coinvolgono, in prima istanza, la SC Torre Guevara in direzione Est-Ovest. La percorribilità di tale strada è stata accertata a seguito di indagini conoscitive e specifici sopralluoghi. Da tali approfondimenti emerge che oggi la SC Guevara, è caratterizzata da un andamento rettilineo e pianeggiante, ed è percorsa sporadicamente da veicoli pesanti; essa, tuttavia, dispone di una ridotta sezione trasversale (la larghezza della carreggiata risulta mediamente pari a 6,00 m) per cui il passaggio di veicoli pesanti risulta critico, soprattutto in caso di

loro incrocio. Inoltre, lo strato di usura risulta, in alcuni tratti, ammalorato. Nonostante queste considerazioni, la SC Torre Guevara può rappresentare indubbiamente una valida alternativa di percorso per i mezzi leggeri. Per quel che riguarda i mezzi pesanti, invece, essa può essere considerata come alternativa di percorso in caso di un modesto numero di passaggi degli stessi.

Il primo dei cinque percorsi (Figura 8.154a), il più breve (estensione di circa 17 km e tempo di percorrenza di 23' in condizioni ordinarie) prevede il raccordo sulla SP111 (Figura 8.151) in direzione Nord prima di procedere sulla SP109 che si connette a Troia. Tale alternativa, anche se correntemente utilizzata da sporadici mezzi pesanti, si dovrebbe scartare aprioristicamente per via di caratteristiche plano-altimetriche, di sezione e, soprattutto, di stato conservativo, altamente inadeguate.



Figura 8.151 Identificazioni delle criticità che presenta la SP111 a livello di sezione stradale e stato manutentivo della pavimentazione stradale.

Il secondo percorso (Figura 8.154b), prevede che dopo il tratto sulla SC Torre Guevara, i veicoli siano reindirizzati sulle strade provinciali adiacenti, SP112 e SP109, con tempi di percorrenza pari a 26' in condizioni ordinarie (estensione del percorso di circa 23 km). Per questa alternativa le condizioni plano-altimetriche e lo stato conservativo risultano decisamente migliori rispetto alla precedente, rendendo tale tragitto valido per tutti i mezzi (fermo restando le premesse relative alla SC Torre Guevara). L' unica criticità del tracciato è rappresentata dalla curva di raggio ridotto (inferiore a 20 m) e forte pendenza longitudinale del tratto della SP109 in ingresso a Troia (Figura 8.152). Tuttavia, tale curva è correntemente percorsa da mezzi pesanti, come emerso da sopralluoghi.



Figura 8.152 Identificazione delle criticità al transito dei veicoli pesanti lungo la SP109 e contestuale verifica visiva del passaggio dei mezzi pesanti sulla stessa.

Per quel che riguarda le dimensioni della sezione trasversale, La SP112 è però caratterizzata da una dimensione trasversale della piattaforma bitumata pari a 5,50 m, che rende difficoltoso l'eventuale incrocio dei mezzi pesanti.

L'alternativa tre (Figura 8.154c), prevede che i veicoli deviano sulla SP112, dalla SC Torre Guevara, proseguano lungo la SP113 e si raccordino sulla SP115 per l'ingresso a Troia. Questa alternativa ha un'estensione chilometrica di circa 25 km e tempi di percorrenza in condizioni di traffico ordinario pari a 31'. Le uniche criticità rappresentate da tale alternativa risiedono nelle ridotte dimensioni della sezione trasversale lungo la SP112 e la SP113 (larghezza della piattaforma bitumata di circa 5,50 m), nello stato conservativo della pavimentazione e nella geometria stradale (Figura 8.153) in corrispondenza del raccordo tra la SP109 e la SP112 (raccordo con raggio di curvatura inferiore ai 20 m).



Figura 8.153 Identificazione delle criticità al transito dei veicoli lungo l'intersezione tra la SP109 e la SP112.

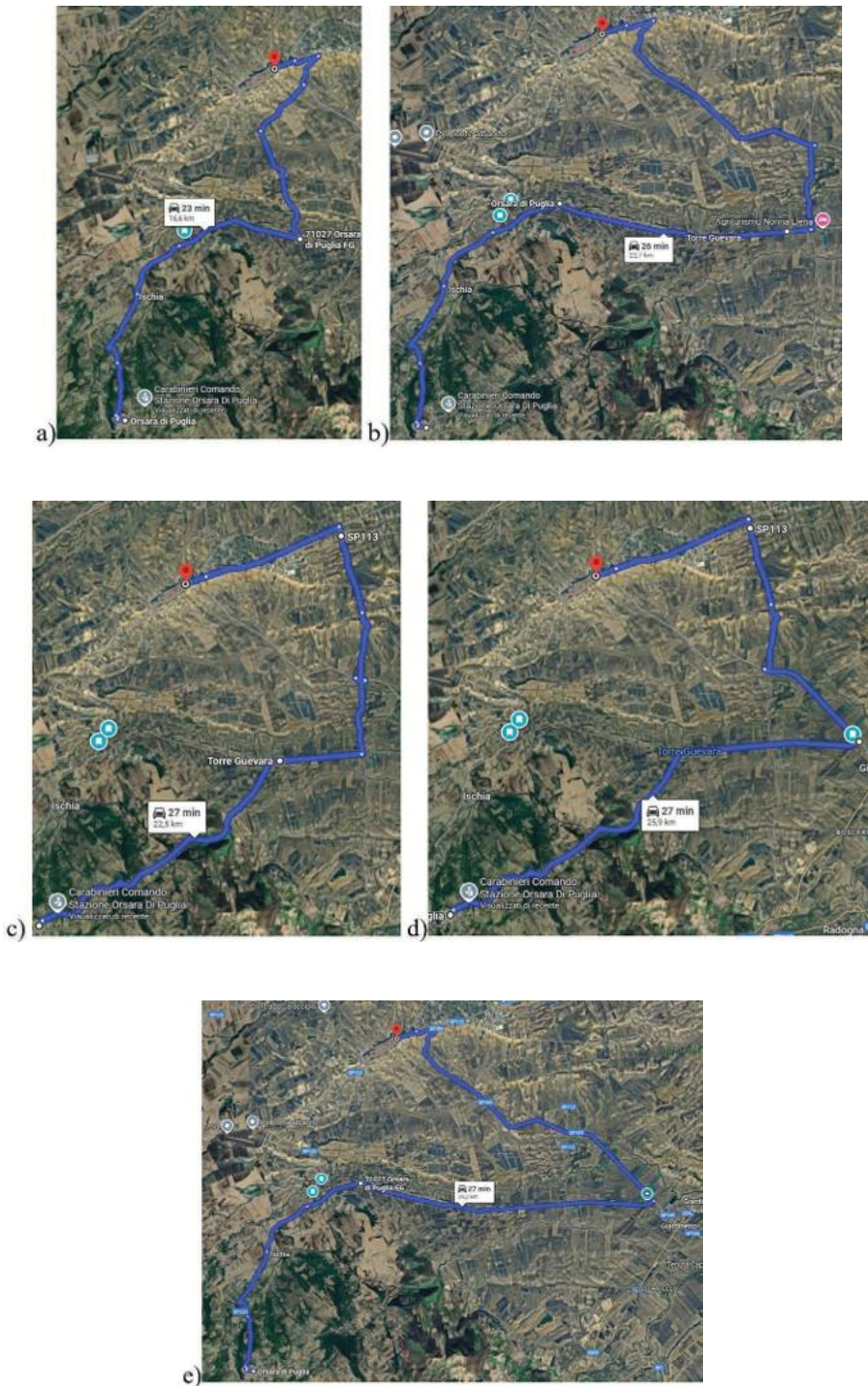


Figura 8.154 Identificazione delle 5 alternative di percorso all'interno della prima rete di bypass individuata a seguito dell'interruzione del manufatto, e relativi tempi di percorrenza.

La quarta alternativa (Figura 8.154d) prevede che i veicoli percorrano la SC Torre Guevara per tutta la sua estensione fino alla SP109 e da questa poi si raccordino alla SP112, per poi proseguire lungo la SP113 e SP115 che accede al Comune di Troia. Le criticità evidenziate sono le stesse dell'alternativa precedente. I tempi di percorrenza, in questo caso sono di 31', per un'estensione chilometrica di circa 28 km.

Il quinto percorso alternativo (Figura 8.154e) prevede che i veicoli percorrano la SC Torre Guevara per tutta la sua estensione fino alla SP109 e poi percorrano la SP109 fino a Troia. Tale alternativa presenta le criticità evidenziate precedentemente per la SP109, ha un'estensione chilometrica di circa 26 km ed è caratterizzata da un tempo di percorrenza di 27'.

In Figura 8.155 sono mostrati i tragitti per ciascuna delle alternative evidenziate all'interno della rete individuata. Le frecce sono mostrate per il tragitto in direzione Orsara di Puglia-Troia ma sono valide anche per la direzione opposta di marcia. La parte di percorso comune a tutte le alternative (da Orsara di Puglia fino alla deviazione a Sud del manufatto dismesso su SC Torre Guevara) è identificata da una freccia nera, dopodiché, la prima alternativa è rappresentata dalle frecce in rosso, la seconda dalle frecce in blu, la terza dalle frecce in verde, la quarta dalle frecce in giallo, la quinta dalle frecce viola.



Figura 8.155 Identificazione dei tragitti per ciascuna delle cinque alternative individuate. Frecce rosse = alternativa uno; frecce blu = alternativa due; frecce verdi = alternativa tre; frecce gialle = alternativa quattro; frecce viola = alternativa cinque; freccia nera = percorso comune.

b) La seconda rete stradale alternativa prevede il reindirizzamento veicolare in prossimità del Comune di Orsara di Puglia, lungo la SC Martino-Giardinetto, bypassando così, a monte, l'interruzione del manufatto lungo la SP123. Tale soluzione è valida per entrambe le direzioni di marcia (da Orsara di Puglia verso Troia e viceversa). Da questa deviazione, sono possibili quattro percorsi alternativi, di estensione e tempi di percorrenza simili, che coinvolgono, in prima istanza, la SC Martino-Giardinetto in direzione Nord-Sud. La percorribilità di tale strada è stata accertata a seguito di indagini conoscitive e specifici sopralluoghi. Da tali approfondimenti emerge che oggi la SC Martino-Giardinetto, è caratterizzata da un andamento planimetricamente tortuoso e altimetricamente irregolare, ed è percorsa sporadicamente da veicoli pesanti; essa, tuttavia, dispone di una sezione trasversale (la carreggiata risulta mediamente di 6,50 m) non ideale per il passaggio di veicoli pesanti, soprattutto in caso di loro incrocio. Inoltre, lo strato di usura risulta, in alcuni tratti, ammalorato. Nonostante queste considerazioni, la SC Martino-Giardinetto può rappresentare indubbiamente una valida alternativa di percorso per i mezzi leggeri.

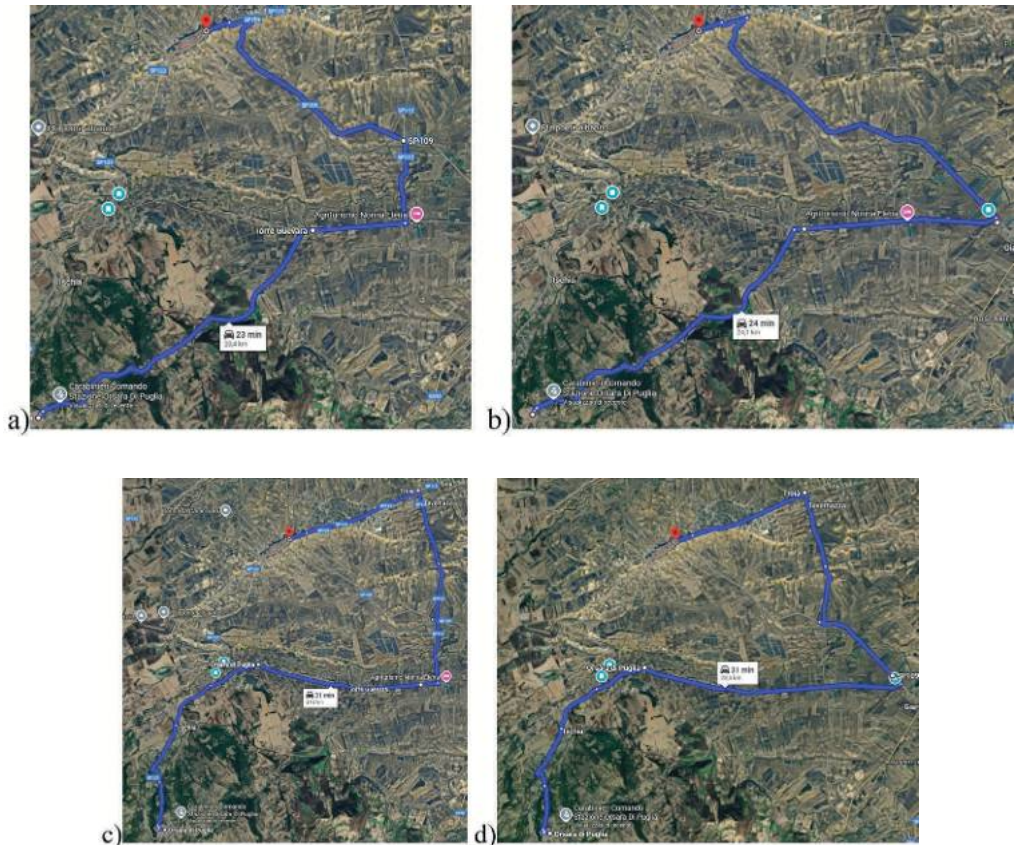


Figura 8.156 Identificazione delle 4 alternative di percorso all'interno della seconda rete di bypass individuata a seguito dell'interruzione del manufatto, e relativi tempi di percorrenza.

Per quel che riguarda i mezzi pesanti, invece, essa può essere considerata come alternativa di percorso in caso di un modesto numero di passaggi degli stessi. A partire da questa deviazione, è possibile individuare quattro percorsi alternativi che ripercorrono le stesse strade precedentemente individuate (dall'alternativa due all'alternativa cinque dell'esempio a)), con una sola differenza relativa al primo tratto che si sviluppa lungo la SC sopra menzionata per poi congiungersi con la SC Torre Guevara.

La prima alternativa di questa rete (Figura 8.156a) passa per SC Torre Guevara, si collega alla SP112 e poi si raccorda con la SP109, per un tempo di percorrenza di circa 23' (estensione chilometrica pari a circa 20 km).

La seconda alternativa di questa rete (Figura 8.156b) passa per SC Torre Guevara e per la SP109 fino a Troia (tempo di percorrenza 24' ed estensione chilometrica pari a circa 24 km).

Il terzo tracciato alternativo di questa rete (Figura 8.156c) passa per SC Torre Guevara, per poi raccordarsi con la SP112, SP113 e SP115 per l'accesso al Comune di Troia (tempo di percorrenza 27' ed estensione chilometrica pari a circa 23 km).

Il quarto tracciato alternativo (Figura 8.156d) passa per SC Torre Guevara, per poi raccordarsi con la SP109, SP112, SP113, SP115 per l'accesso al Comune di Troia (tempo di percorrenza 27' ed estensione chilometrica pari a circa 26 km).

Le criticità delle strade interessate dai vari percorsi alternativi sono già state discusse precedentemente.



Figura 8.157 Identificazione dei tragitti per ciascuna delle quattro alternative individuate. Freccie rosse = alternativa uno; freccie blu = alternativa due; freccie verdi = alternativa tre; freccie gialle = alternativa quattro; freccie nere = percorso comune.

In Figura 8.157 sono mostrati i tragitti per ciascuna delle alternative evidenziate all'interno della rete individuata. Le frecce sono mostrate per il tragitto in direzione Orsara di Puglia-Troia ma sono valide anche per la direzione opposta di marcia. La parte di percorso comune a tutte le alternative (da Orsara di Puglia fino a SC Torre Guevara percorrendo la SC Martino-Giardinetto) è identificata da una freccia nera, dopodiché, la prima alternativa è rappresentata dalle frecce in rosso, la seconda dalle frecce in blu, la terza dalle frecce in verde, la quarta dalle frecce in giallo

- c) La terza rete stradale alternativa prevede il reindirizzamento veicolare sulla SS90 evitando completamente i tratti della SP123 in prossimità del manufatto. Infatti, tale soluzione, valida per entrambe le direzioni di marcia (da Orsara di Puglia verso Troia e viceversa), prevede di utilizzare la SP123 solo per raccordare Orsara di Puglia alla SS90, in direzione Nord-Sud. Da questa deviazione, sono possibili due percorsi alternativi, di estensione e tempi di percorrenza simili, che coinvolgono, in prima istanza, la SP123 fino alla SS90, dopodiché prevedono il passaggio lungo la SS90 fino a Giardinetto (intersezione con la SP109). Da qui, la prima alternativa (Figura 8.158a) prevede di proseguire lungo la SP109 fino a Troia, con le criticità già menzionate (tempo di percorrenza 36' ed estensione chilometrica di circa 34 km).



Figura 8.158 Identificazione delle due alternative di percorso all'interno della terza rete di bypass individuata a seguito dell'interruzione del manufatto, e relativi tempi di percorrenza.

La seconda alternativa (Figura 8.158b) prevede il transito lungo la SP109 fino all'intersezione con la SP112. Da qui il percorso prevede l'attraversamento della SP112, SP113 e SP115, fino all'ingresso al Comune di Troia, con le criticità già menzionate (tempo di percorrenza 40' ed estensione chilometrica di circa 36 km). Queste alternative prevedono l'utilizzo di una strada, SS90, gerarchicamente e funzionalmente superiore alla SP123, connotata da una geometria plano-altimetrica, da una sezione stradale trasversale e da uno stato conservativo ben superiori a quelle delle strade comunali e provinciali sin qui menzionate. Pertanto, questi due percorsi passanti per la SS90 risultano maggiormente indicati per convogliare il maggior volume di traffico di mezzi pesanti

deviato a causa dell'interruzione del manufatto in parola. La percorribilità di tale strada è stata accertata a seguito di indagini conoscitive e specifici sopralluoghi.

In Figura 8.159 sono mostrati i tragitti per ciascuna delle alternative evidenziate all'interno della rete individuata. Le frecce sono mostrate per il tragitto in direzione Orsara di Puglia-Troia ma sono valide anche per la direzione opposta di marcia. La parte di percorso comune a tutte le alternative (da Orsara di Puglia fino alla SP109 lungo la SS90) è identificata da una freccia nera, dopodiché, la prima alternativa è rappresentata dalle frecce in rosso, la seconda dalle frecce in blu.



Figura 8.159 Identificazione dei tragitti per ciascuna delle quattro alternative individuate. Frecce rosse = alternativa uno; frecce blu = alternativa due; frecce nere = percorso comune.

- ⊙ **Accessibilità e collegamenti con aree urbane e rurali limitrofe:** Quando si considera la connessione tra la zona interessata dall'interruzione e le aree vicine, che potenzialmente subiranno le più importanti ripercussioni in termini di accessibilità e tempi di percorrenza, sono da valutare senz'altro i percorsi "locali" già individuati al punto precedente. Tenendo conto delle probabili difficoltà di iscrizione in curva dei veicoli di grandi dimensioni, dei problemi di incrocio dei mezzi pesanti, conseguenti alle ridotte dimensioni della sezione e dei loro possibili rallentamenti a causa delle livellette acclivi ivi presenti, si indica come principale alternativa per i mezzi pesanti la rete che include la SS90.
- 3. Determinazione del raggio geografico:** Sulla base dei criteri stabiliti nel metodo per la fase **F1.A1**, è possibile concludere la procedura di delimitazione dell'area di studio definendo il raggio di estensione dell'area di studio. Tale raggio serve a definire un contor-

no dell'area di interesse tale per cui tutte le tratte significative potenzialmente impattate dalla chiusura del manufatto siano incluse (Figura 8.160). In questa maniera si offre un quadro completo delle possibili ripercussioni indotte dalle deviazioni del traffico. Il raggio individuato è di circa 6 km in direzione Est-Ovest e 7 km in direzione Nord-Sud, come evidenziato in figura. Le strade interne al perimetro in blu sono oggetto di studio

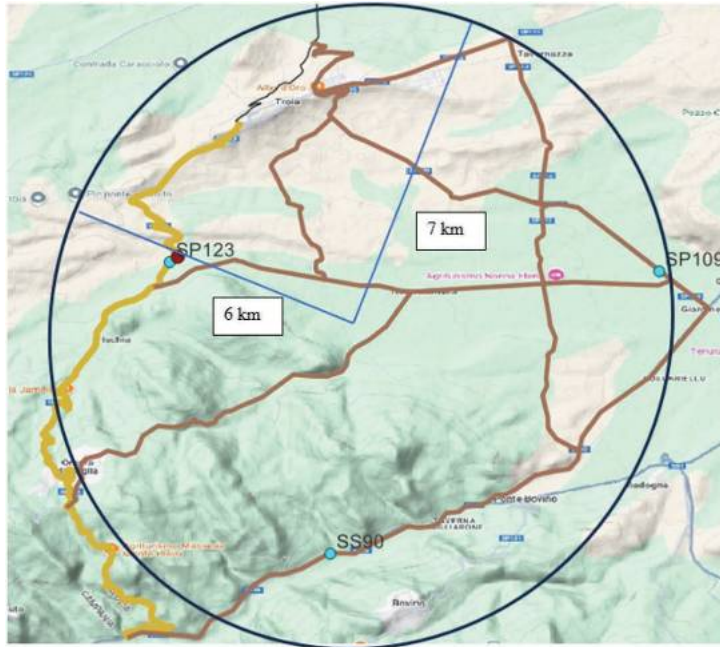


Figura 8.160 Determinazione del raggio geografico.

4. Revisione e aggiustamento dell'area di studio: Al termine della fase F1.A1 è prevista la verifica dell'adeguatezza dell'area selezionata, garantendo che includa tutte le vie di collegamento e i nodi che potrebbero essere impattati. Nel presente esempio, si è provveduto alla verifica effettuando dei sopralluoghi conoscitivi a piedi e in auto, percorrendo tutte le vie individuate di interesse nel precedente esame (Figura 8.161). Il sopralluogo ha confermato la delimitazione mostrata in precedenza.

8.8.2 Zonizzazione dell'area di studio

La zonizzazione dell'area di studio è un passaggio preliminare per la costruzione del modello di traffico, poiché definisce le unità territoriali (zone di traffico) dalle quali e verso le quali si muovono i flussi di domanda. L'obiettivo della zonizzazione è semplificare la descrizione del fenomeno modellato, considerando che, nel mondo reale, gli spostamenti all'interno dall'area di interesse possono iniziare e terminare in un qualunque punto della stessa. Questa suddivisione è propedeutica alla successiva definizione delle matrici origine-destinazione (O/D).



Figura 8.161 Viste prospettive delle strade appartenenti alle alternative di percorso individuate, a seguito di sopralluoghi conoscitivi.

Tuttavia, valutando il caso di studio e l'esiguità dei traffici rilevata dai primi sopralluoghi (coerente con l'assenza di dati TomTom per l'area d'interesse), la zonizzazione si ritiene non necessaria, come come la seguente modellazione con matrici O/D.

Al fine di confermare la correttezza di tale assunzione, sono da effettuarsi rilievi di traffico sugli assi viari che dovranno garantire la connettività e la fluidità al maggior traffico su di essi convogliato. Inoltre, appaiono essenziali le verifiche relative al passaggio dei veicoli pesanti lungo le alternative di percorso individuate (inscrivibilità geometrica dei mezzi nei punti più costretti e angusti).

8.8.3 Modellazione della rete stradale

Per quanto accennato in precedenza rispetto alla relativa semplicità della rete stradale di interesse, non si procede alla sua modellazione su software (come VISUM, Paramics, o altri) né tantomeno alla costruzione di un grafo, ma, come previsto in F1.A3, si provvede alla sola classificazione delle criticità rilevate rispetto alla transitabilità per i veicoli pesanti, così da permettere analisi differenziate in funzione del tipo di veicolo e delle restrizioni infrastrutturali.

Riguardo ai percorsi alternativi individuati, appaiono particolarmente critici per i veicoli pesanti i seguenti elementi:

- Dimensioni ridotte della sezione stradale (dimensione media di circa 6 metri) e tortuosità della SP123, con raggi di curvatura minimo inferiori a 50 m. Tuttavia, in curva il piano viabile pavimentato risulta allargato, con dimensioni trasversali che raggiungono circa 9,50-10 metri. Queste caratteristiche rappresenterebbero un deterrente al passaggio dei veicoli pesanti lungo la SP123 fino al manufatto interrotto, anche se, da sopralluoghi effettuati, i mezzi pesanti percorrono correntemente questa strada. Un'ulteriore criticità della strada è dovuta ai diffusi ammaloramenti del piano viabile (Figura 8.162).



Figura 8.162 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 1 di 8.

- La geometria del raccordo dell'intersezione tra SP109 e SP112 che rende difficoltose le manovre dei mezzi pesanti per via di un raggio di curvatura inferiore a 20 m. A complicare le manovre c'è anche la presenza di una profonda ormaia sulla corsa di marcia in corrispondenza dell'intersezione (Figura 8.163).



Figura 8.163 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 2 di 8.

- Le dimensioni della sezione trasversale delle SP112 e SP113, di larghezza media di circa 5–5,50 m, con assenza di banchine e di segnaletica orizzontale di demarcazione delle corsie (Figura 8.164).



Figura 8.164 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 3 di 8.

- Le dimensioni della sezione trasversale della SP109, di larghezza media di circa 6 metri. Tali dimensioni risultano svantaggiose, in particolar modo in corrispondenza delle curve. Infatti, i mezzi pesanti tenderanno ad invadere parzialmente la corsia adiacente per effettuare correttamente le manovre. Inoltre, la SP109, in prossimità dell'ingresso al Comune di Troia, presenta una curva di raggio inferiore ai 20 m, di difficile percorrenza per i mezzi pesanti; i quali, tuttavia, la percorrono regolarmente, come da riscontri in fase di indagini visive (Figura 8.165).



Figura 8.165 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 4 di 8.

- Le condizioni della pavimentazione della SP111 la rendono di difficile percorribilità da parte di qualsivoglia tipologia di veicoli, nonostante, attualmente risulta essere percorsa sia da mezzi pesanti che da mezzi leggeri (Figura 8.166).



Figura 8.166 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 5 di 8.

- Le dimensioni ridotte della sezione trasversale della SC Guevara (la carreggiata risulta mediamente di 6,00 m), caratterizzata da un andamento rettilineo e pianeggiante, la rendono critica per il passaggio dei mezzi pesanti, soprattutto in caso di incrocio fra due mezzi pesanti (Figura 8.167). Tuttavia, tale strada è attualmente percorsa sporadicamente da veicoli pesanti.



Figura 8.167 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 6 di 8.

- Le dimensioni ridotte della sezione trasversale della SC Martino-Giardinetto (la carreggiata risulta mediamente di 5,50 m), con assenza di segnaletica orizzontale di demarcazione delle corsie e pavimentazione gravemente ammalorata rappresentano delle criticità al passaggio dei mezzi pesanti (Figura 8.168).



Figura 8.168 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 7 di 8.

- A questa condizione si aggiunge un'elevata tortuosità plano-altimetrica del tracciato che lo rende estremamente sconsigliato per i mezzi pesanti. I raggi minimi di curvatura risultano essere inferiori a 50 m, senza allargamenti delle corsie in curva (Figura 8.169).



Figura 8.169 Classificazione degli archi e delle intersezioni critiche alla transitabilità dei mezzi pesanti – 8 di 8.

8.8.4 Modellazione della domanda di trasporto

La fase 2 si distingue in modellazione della domanda di traffico passeggeri (F2.A1) e merci (F2.A2), anche in relazione alla disponibilità di banche dati o di notizie socio-economiche che permettano una validazione incrociata dei dati raccolti. In questo esempio, la questione fondamentale è in realtà relativa al passaggio dei veicoli pesanti lungo una delle due alternative individuate, caratterizzata da angusti spazi disponibili ed elevata tortuosità plano-altimetrica.

Considerando queste premesse, la modellazione della domanda si è effettuata distinguendo i veicoli per dimensione (larghezza e lunghezza), associando gli autobus ai mezzi commerciali pesanti e i mezzi commerciali leggeri alle autovetture.

Tra le alternative indicate nella metodologia, la modellazione viene eseguita ricorrendo ai **flussi di traffico osservati** in corrispondenza di **sezioni significative** individuate lungo alcuni segmenti chiave della rete compresa nella zona precedentemente delimitata e confrontando i dati sperimentali ottenuti con quelli disponibili dagli enti territoriali o disponibili tramite **sistemi di navigazione mobili basati su GPS**, (FCD) e in particolare da TomTom MOVE (TomTom, 2024), benché la proporzione di utenti che utilizzano dispositivi compatibili con il sistema di raccolta dati sia risultata piuttosto bassa. Poiché la Provincia di Foggia non dispone di dati di traffico per la strada in parola, è stato necessario eseguire uno specifico

rilievo. A parte il dato di traffico sulla Strada Provinciale considerata, sono stati anche utilizzati i dati di traffico disponibili per le strade appartenenti alla rete di rango superiore contermini. In particolare, il primo dato a cui ci si è affidati è stato quello relativo ai “Dati di Traffico medio giornaliero annuale” reperibili sul sito di ANAS⁸.

L’unico dato di traffico disponibile per l’area vasta è quello relativo alla stazione di monitoraggio ANAS ubicata sulla SS90, identificativo 666, al km 79+706, in prossimità della circonvallazione di Foggia. La stazione di monitoraggio ubicata sulla SS17, identificativo 3055, al km 317+590 risulta infatti non essere in funzione dal 2023 (ultimo dato disponibile relativo al 2022). Piuttosto che ricavare il traffico al 2024 come fatto in precedenza, si è preferito in questo caso ricorrere ad una nuova postazione sulla SS17, comunque interna ai percorsi dell’area vasta, identificativo 283, al km 332+184. I dati relativi a questa stazione, come anche quelli relativi alla 666 sono stati reperiti non solo dalla sezione “Dati di Traffico medio giornaliero annuale” di ANAS ma sono stati anche forniti dalla Struttura Territoriale Puglia, con rilevazioni giornaliere nel periodo che va dal 01/05/2024 al 31/07/2024.

La Tabella 8.25 sintetizza i dati di traffico a disposizione.

Tabella 8.25 Flussi di traffico rilevati dall’ente gestore (ANAS) in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio fisse presenti sulla rete stradale perimetrale al manufatto.

Strada	ID stazione monitoraggio ANAS	Chilometrica	Anno del dato	TGM (veicoli/giorno)	%Veicoli pesanti	Tipo sezione stradale
SS90	666	79+706	2024	3419	7.5	Singola carreggiata, singola corsia per senso di marcia
SS17	283	332+184	2024	10655	6.6	Doppia carreggiata, doppia corsia per senso di marcia

Osservando quindi i dati di traffico delle tre strade in parola, si osserva come i volumi che le interessano sono di entità particolarmente esigua. Ciò lascia desumere che altrettanto possa dirsi per le strade di rango inferiore più vicine, come la SP123. Anche in questo caso, la circostanza che i dati Tom Tom, che pure sono stati utilizzati per eseguire l’analisi di traffico, abbiano restituito dati di traffico sostanzialmente nulli nell’area d’interesse appare confermare quanto sopra osservato.

Considerati i traffici, quindi, si è valutata l’ipotesi che i percorsi alternativi fossero relativi soltanto ai collegamenti tra Troia e Orsara di Puglia, considerando Lucera al di fuori dell’area interessata dall’interruzione del manufatto (come evidenziato in Figura 8.170).

Per quanto attiene alle alternative di tracciato precedentemente individuate, le indagini conoscitive sono state approfondite con specifici sopralluoghi ed indagini.

Considerate queste premesse, la campagna di monitoraggio è avvenuta sulle strade provinciali di bypass SP109, SP115, sulla SS90, oltre che sulla SP123 interessata dall’interruzione. Esclusivamente per la SP115 si è optato per l’utilizzo dei dati del SIT Puglia, in quanto non è stato possibile effettuare il rilievo in sito.

⁸ <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/osservatorio-del-traffico/dati-traffico-medio-giornaliero-annuale>

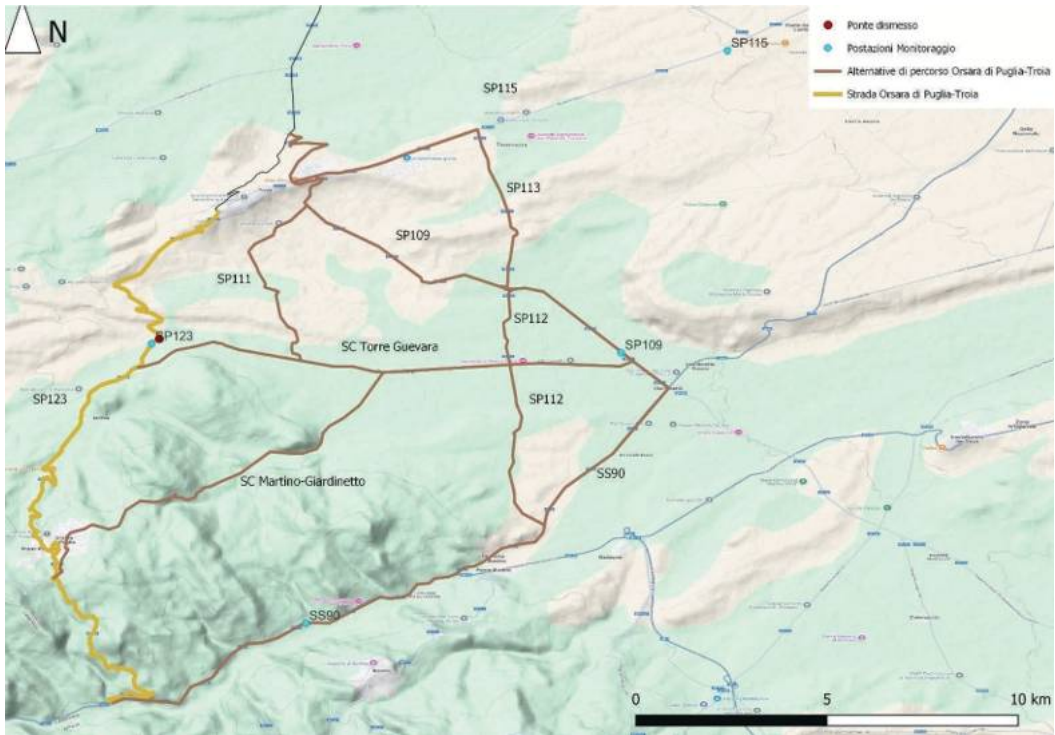


Figura 8.170 Identificazione della effettiva rete infrastrutturale dell'area vasta di interesse a seguito dell'interruzione del manufatto e localizzazione delle postazioni di monitoraggio fisse e mobili utilizzate per rilevare i traffici agenti sulla rete stradale di interesse.

Si è innanzitutto verificato che la capacità delle strade interessate dal percorso di bypass individuato non risultasse saturata dal traffico indotto dalla chiusura della SP123. Nel qual caso il traffico residuo si deve necessariamente reindirizzare lungo strade gerarchicamente e funzionalmente superiori, come possono essere le strade statali SS90 e SS17. Dalle rilevazioni di traffico si è ottenuto il quadro di traffico riepilogato nella Tabella 8.26 che segue.

Tabella 8.26 Sintesi dei traffici rilevati sulle strade appartenenti alla rete di interesse.

Strada	N. Contatore	Durata Monitoraggio	Periodo	TGM (veicoli/giorno)	Traffico punta oraria (veicoli/h)	%Veicoli pesanti	Direzione Positiva di traffico	TGM direzione +	TGM direzione -	Max capacità oraria da HCM 2022
SP123	26303	24h	Novembre 2024	351	44	11.1	Orsara di Puglia	181	170	2500-3000
SP109	26290	24h	Novembre 2024	1099	141	9.7	Melfi	557	542	2500-3000
SS90	26209	24h	Novembre 2024	1563	238	30.4	Benevento	663	900	2500-3000
SP115	Dati SIT Puglia	24h	Ottobre 2007	3319	264	5.4	Troia	1785	1534	2500-3000

8.8.5 Modellazione dell'Interazione Offerta-Domanda e Valutazione della Resilienza

L'obiettivo della fase 3 è simulare l'interazione tra offerta e domanda per l'area di studio e valutare la resilienza del sistema di trasporto, misurando i principali Key Performance Indicators (KPIs) – (e.g., tempo di percorrenza, lunghezza dei percorsi, velocità media) sia in condizioni di normale funzionamento sia in condizioni degradate, in seguito a interruzioni.

Per carichi di traffico significativi, la fase 3 richiede l'impiego di algoritmi di assegnazione e di ricerca dell'equilibrio della rete. Nelle condizioni osservate per l'ambito in parola (Orsara di Puglia-Troia), ci si può concentrare sulla verifica della connettività tra coppie origine-destinazione verificando la percorribilità da parte delle varie componenti di traffico reindirizzate a causa dell'interruzione. Non si mettono a confronto la domanda di traffico e le capacità degli archi, in quanto si è constatata, con le rilevazioni speditiva effettuate in vari punti notevoli della rete, la modestia del numero dei movimenti. Il traffico sugli archi rimarrebbe modesto anche quando tutti i transiti sul ponte interrotto dovessero essere deviati su un unico e solo percorso tra i possibili. Non si esegue un'analisi di dettaglio dei Livelli di Servizio, tenendo a mente le eventuali problematiche e rallentamenti nel caso in cui i mezzi pesanti percorressero le alternative individuate per le criticità precedentemente evidenziate.

Per il caso studio in esame, considerando che il traffico di punta orario sulle due direzioni della strada da interrompere è notevolmente inferiore (è pari al 1% della sua capacità massima, o poco più) alla capacità totale oraria delle strade provinciali (variabile tra 2500 e 3000 veicoli/h a seconda delle condizioni al contorno, quali altimetria, limiti di velocità e frequenza dei tratti in cui è possibile il sorpasso⁹), e che allo stato attuale il flusso orario nell'ora di punta sulle strade alternative considerate è pari rispettivamente al 6% ed al 11% della capacità di tali strade, risulta evidente come sia effettivamente più conveniente per il traffico deviato dalla SP123 percorrere i percorsi vicini. Difatti il volume di traffico spostato non genera significative modifiche al livello di servizio delle strade interessate dai "bypass", restando sempre con livelli di servizio compresi tra A e C.

Si è altresì verificato che il limite oltre il quale non vi è certezza che i veicoli vengano reindirizzati sui percorsi più vicini è rappresentato anche in questo caso da un volume di traffico sulla strada interrotta pari o superiore al 50%¹⁰ della capacità massima (oraria o giornaliera), quindi pari a Livello di Servizio compresi tra D ed E. In questo caso, parte del traffico potrebbe essere reindirizzato sulle strade gerarchicamente e funzionalmente superiori, individuate dalla preliminare definizione dell'area vasta, e, pertanto, l'analisi speditiva eseguita non risulta più sufficientemente affidabile. In tali circostanze occorre

⁹ La capacità giornaliera massima, invece, è da ritenersi compresa tra 24100 e 24900 veicoli/giorno, in dipendenza degli stessi fattori considerati per la capacità oraria. Anche confrontando il TGM alla capacità giornaliera, ci si assesta intorno all'1% della capacità massima delle strade, che si andrebbe a redistribuire su strade interessate da un traffico pari al 5-14% della Capacità massima (indicata come Livello di Servizio E). Quindi anche a seguito della redistribuzione del traffico si andrebbe sempre in condizioni di traffico corrispondenti ai Livelli di servizio da A a C.

¹⁰ Come da Exhibit 36 di NHCPR Report 825 "Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the Highway Capacity Manual" (2016). US Department of Commerce, Bureau of Public Roads.

utilizzare altre metodologie d'analisi, basate su modelli di simulazione tipici delle scienze trasportistiche.

Tornando ai risultati dell'analisi eseguita, di seguito sono riportati i tempi di percorrenza minimi e massimi calcolati per tutte le tipologie di veicolo (leggeri e pesanti) nelle diverse fasce orarie giornaliere lungo i percorsi di bypass ridotto (Tabella 8.27 e Figura 8.171).

Tabella 8.27 Confronto delle lunghezze, dei tempi di percorrenza e della percorribilità da parte dei mezzi sul percorso attuale (lungo il manufatto non interrotto) e sulle tre reti alternative, individuate a seguito dell'interruzione del manufatto Rete alternativa a), Rete alternativa b), Rete alternativa c).

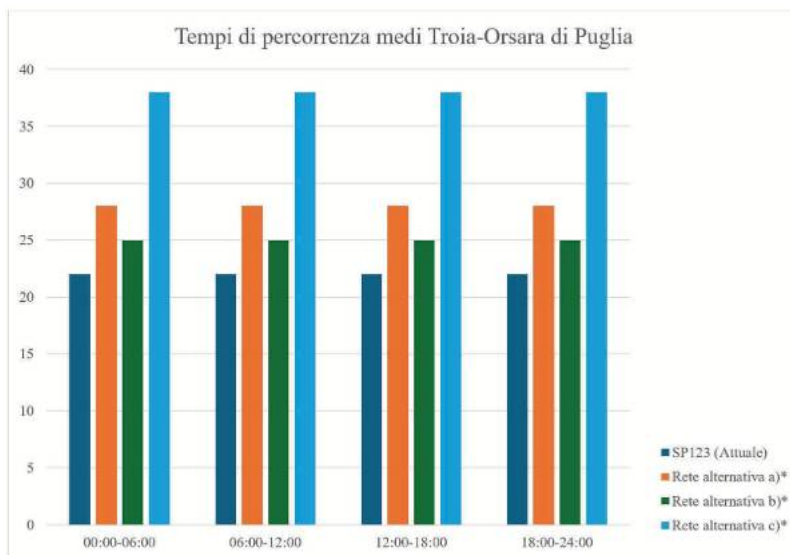
Percorso	Via	Km	Intervallo Orario	Durata	Ritardo	Percorrenza
Troia-Orsara di Puglia	SP123 (Attuale)	15.5	00:00-06:00	21		Leggeri + Pesanti
			06:00-12:00	21		
			12:00-18:00	21		
			18:00-24:00	21		
Troia-Orsara di Puglia	Rete alternativa a)*	23.8	00:00-06:00	28	7	Leggeri
			06:00-12:00	28	7	
			12:00-18:00	28	7	
			18:00-24:00	28	7	
Troia-Orsara di Puglia	Rete alternativa b)*	23	00:00-06:00	25	4	Leggeri
			06:00-12:00	25	4	
			12:00-18:00	25	4	
			18:00-24:00	25	4	
Troia-Orsara di Puglia	Rete alternativa c)*	35	00:00-06:00	38	17	Leggeri+Pesanti
			06:00-12:00	38	17	
			12:00-18:00	38	17	
			18:00-24:00	38	17	

*Considerando che ogni rete alternativa ha più percorsi possibili associati, sono indicati in tabella le estensioni e i tempi mediati su tutte le alternative possibili per ciascuna rete.

L'attività prosegue con la fase F3.F3 (Analisi dell'impatto socioeconomico e definizione delle priorità di intervento), identificando nel miglior grado possibile allo stadio di conoscenza acquisito gli interventi prioritari di manutenzione e di gestione suscettibili di rafforzare la resistenza della rete e ridurre l'impatto sulle comunità.

Nel caso allo studio, gli interventi di manutenzione dovranno consistere essenzialmente nel rifacimento del manto di usura della pavimentazione stradale per le strade SC Torre Guevara, SC Martino-Giardinetto, SP109, SP111 (per questa sarebbe opportuno rifare l'intero pacchetto stradale), SP112, SP113 e nella rettifica e riorganizzazione di alcuni rami dei percorsi alternativi, caratterizzati da elevata tortuosità qualora si volessero rendere tali

rami accessibili anche ai veicoli pesanti. Si deve considerare il rifacimento delle barriere e della segnaletica orizzontale, così come pensare alla realizzazione di banchine pavimentate per tutte le strade esaminate, per le quali si può contare soltanto su terreno vegetale, in caso di fuoriuscita dalla corsia. Gli interventi gestionali consisteranno essenzialmente in una possibile differente regolazione della circolazione, individuando i percorsi per soli mezzi leggeri e i percorsi per mezzi pesanti.



*Considerando che ogni rete alternativa ha più percorsi possibili associati, sono indicati in tabella le estensioni e i tempi mediati su tutte le alternative possibili per ciascuna rete.

Figura 8.171 Confronto dei tempi di percorrenza sul percorso attuale (lungo il manufatto non interrotto) e sulle tre reti alternative individuate a seguito dell'interruzione del manufatto: Rete alternativa a), Rete alternativa b), Rete alternativa c).

Lista degli acronimi e delle variabili

Lista degli acronimi

- ⊙ F: Fase
- ⊙ CSLPP: Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
- ⊙ GIS: Geographic Information System
- ⊙ KPI: Key Performance Indicator
- ⊙ O/D (alternativamente OD): Origine/Destinazione
- ⊙ OSM: Open Street Map
- ⊙ VDL: Velocità di Deflusso Libero
- ⊙ FCD: Floating Car Data

Lista delle variabili

- ⊙ C_{od}^* : Costo minimo per andare dalla zona di origine o alla zona di destinazione d .
- ⊙ C_{odr} : Costo per andare dalla zona di origine o alla zona di destinazione d associato al percorso r .
- ⊙ F_{od} : Flusso totale dalla zona di origine o alla zona di destinazione d .
- ⊙ F_{odr} : Porzione di flusso assegnata al generico percorso r .
- ⊙ l_{od}^0 : Lunghezza media di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero.
- ⊙ l_{od}^{cur} : Lunghezza media di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di rete carica.
- ⊙ t_{od}^0 : Tempo medio di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero.
- ⊙ t_{od}^{cur} : Tempo medio di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di rete carica.
- ⊙ v_{od}^0 : Velocità media di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di flusso libero.
- ⊙ v_{od}^{cur} : Velocità media di percorrenza dalla zona di origine o alla zona di destinazione d in condizioni di rete carica.
- ⊙ δ : Indicatore sulla correttezza di una soluzione numerica rispetto all'equilibrio di Wardrop.
- ⊙ p_n : Coefficiente di frazionamento della domanda all'iterazione n per il metodo incrementale di ricerca dell'equilibrio.
- ⊙ V_{ij}^n : Flusso incrementale (o ausiliario) per il generico arco che va dal nodo iniziale i al nodo finale j , all'iterazione n , nel metodo incrementale di ricerca dell'equilibrio.
- \emptyset : Parametro per i metodi del volume medio e dell'equilibrio.

Riferimenti bibliografici

- COM – The European Commission, (2014). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*.
- De Aloe, M., Ventura, R., Bonera, M., Barabino, B., & Maternini, G. (2023). Applying cost-benefit analysis to the economic evaluation of a tram-train system: Evidence from Brescia (Italy). *Research in Transportation Business & Management*, 47, 100916. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100916>
- D.Lgs. n. 285/1992 e s.m., Nuovo Codice della Strada.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2017). Guida all'analisi costi/benefici dei progetti d'investimento. Appendice: Tabelle di sintesi dell'analisi della mobilità urbana /ACE/ACB: Istruzioni per la compilazione.
- Provincia di Varese. (2025). Cartografia provinciale. Consultato a luglio 2025. Sito: <https://cartografia.provincia.va.it>
- PTV Planung Transport Verkehr GmbH. (2023). PTV Visum 2022 Manual.
- Regione Lombardia. (2024). *Trasporti: Matrici passeggeri e veicoli commerciali*. Dati Lombardia. Consultato il 13 novembre 2024. Sito: <https://www.dati.lombardia.it/stories/s/Trasporti0Matrici0passeggeri0e0veicoli0commerciali/5tsd0gjin/>
- TomTom. (2024). TomTom MOVE: Login. Consultato il 17 dicembre 2024. Sito: <https://move.tomtom.com/login>
- UNECE. (2002). Road transport infrastructure (Document No. TRANS/SC.1/2002/3). Retrieved from <https://unece.org> (official list begins on p. 13).
- Ventura, R., Bonera, M., Carra, M., Barabino, B., & Maternini, G. (2022). Evaluating the viability of a Tram-Train system: A case study from Salento (Italy). *Case Studies on Transport Policy*, 10(3), 194501963. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.08.009>
- Ventura, R., Maternini, G., & Barabino, B. (2024). Traffic hazards on main road's bridges: Real-time estimating and managing the overload risk. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(9), 12239012255. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3234567>

Appendici

Le Appendici del volume sono disponibili a questo link:

<https://www.ledizioni.it/download/95498/>

