

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea

*VULNERABILITÀ DI UNA RETE DI TRASPORTO. ANALISI
DELL'EFFETTO DELLA VARIAZIONE DELLA DOMANDA DI
MOBILITÀ MEDIANTE UN MODELLO ACTIVITY-BASED*

Relatore:

Ch.mo Prof.Ing. Massimiliano Gastaldi

Correlatore:

Ing. Gregorio Gecchele

Laureando:

Riccardo Ceccato

Matricola 1057342

Indice

1	Introduzione	1
2	Stato dell'Arte.....	5
2.1	MODELLAZIONE DELLA DOMANDA POST-SISMA	6
2.1.1	Passeggeri.....	6
2.1.2	Merci.....	25
2.2	MODELLAZIONE DELL'OFFERTA POST-SISMA.....	30
2.2.1	Ponti.....	31
2.2.2	Edifici	40
2.2.3	Strade.....	46
2.3	MODELLIZZAZIONE DELL'INTERAZIONE DOMANDA-OFFERTA.....	47
2.3.1	<i>Four- step model</i>	50
2.3.2	<i>Activity-based model</i>	57
2.4	VULNERABILITÀ DI UNA RETE DI TRASPORTO	69
2.4.1	Definizioni.....	69
2.4.2	Metodi di valutazione.....	74
2.4.3	Indicatori.....	75
3	Caso Applicativo	93
3.1	Introduzione.....	93
3.2	Area di studio	94
3.3	Approccio Metodologico adottato	97
3.4	Modello Activity-Based impiegato.....	99
3.4.1	Implementazione del modello.....	109
3.5	Raccolta ed elaborazione dei dati.....	112
3.6	Analisi dei risultati della simulazione.....	118
3.6.1	Stato Iniziale	130

3.6.2	Scenari di danno – Modello a Domanda Variabile	146
3.6.3	Scenari di Danno – Modello a Domanda Fissa.....	215
3.6.4	Confronto tra i Modelli	238
4	Conclusioni e Sviluppi Futuri	245
5	Bibliografia	249

Indice delle figure

Figura 2-1: rappresentazione dell'interazione tra domanda e offerta di trasporto; fonte: (Wegener 2004).....	48
Figura 2-2: modifica del processo di interazione tra domanda e offerta di trasporto per considerare i danni alle infrastrutture del sistema; fonte: adattamento da (Wegener 2004)	49
Figura 2-3; struttura del combined model; fonte: Elaborazione da (Shinozuka et al. 2005)...	56
Figura 2-4; rappresentazione di una possibile sequenza di attività e relativi spostamenti compiuti da un individuo in una generica giornata lavorativa; si riporta il numero d'ordine ed il motivo, ulteriori elementi in sempio di una sequenza di spostamenti di una giornata lavorativa relativa ad un generico individuo; il dettaglio degli spostamenti è riportato nella Tabella 2-11; fonte: rielaborazione da (Bradley et al. 1999).....	60
Figura 2-5: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	61
Figura 2-6; esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	62
Figura 2-7; esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	62
Figura 2-8: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	63
Figura 2-9: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	63
Figura 2-10: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	64
Figura 2-11: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	64
Figura 2-12: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003).....	64
Figura 2-13: struttura generale dei modelli Activity-Based; fonte: rielaborazione da (Ortuzar & Willumsen 2011; Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006).....	65
Figura 2-14: rappresentazione della relazione tra funzionalità, vulnerabilità, rischio e incidente; fonte: (Berdica 2002).....	70
Figura 2-15: matrice di rischio; fonte: (Berdica 2002) e (Taylor & D'Este 2003)	71
Figura 2-16: geografia dell'Australia con le principali vie di collegamento stradale; fonte: (Taylor et al. 2006).....	72
Figura 3-1: rappresentazione della rete di Dolo con i codici di zona; in rosso: i nodi centroidi interni, in grigio i centroidi esterni	94
Figura 3-2: rappresentazione della rete di Dolo, particolare del centro; i rosso i centroidi interni, in grigio i centroidi esterni	95

Figura 3-3: principali vie di comunicazione del comune di Dolo; i rosso le direttrici Nord-Sud, in verde e blu i percorsi di collegamento Est-Ovest; fonte: Google Earth Pro	96
Figura 3-4: schema del processo adottato per l'analisi di vulnerabilità	98
Figura 3-5: struttura del modello Activity-Based adottato	100
Figura 3-6: struttura e componenti del simulatore di attività	102
Figura 3-7: schema di scelta dei possibili patterns	104
Figura 3-8: rappresentazione schematica del processo per la scelta dei vincoli.....	110
Figura 3-9: rappresentazione della rete di Dolo, in rosso sono evidenziati gli archi in esame successivamente eliminati dal grafo	119
Figura 3-10: particolare della rete del centro di Dolo con le intersezioni, in rosso: archi in esame da eliminare	120
Figura 3-11: particolare della rete presso Sambruson con le intersezioni, in rosso: archi in esame da eliminare	121
Figura 3-12: in verde: viabilità interna al centro di Dolo alternativa al passaggio attraverso le intersezioni semaforizzate di Via Matteotti, in rosso: archi da eliminare	122
Figura 3-13: particolare del centro di Dolo, in colori diversi dal blu: archi sul Naviglio del Brenta che, se eliminati, isolano l'intera rete in due porzioni	123
Figura 3-14: rappresentazione della rete con i cut-link ed il relativo codice identificativo ..	124
Figura 3-15: flussogramma relativo al periodo di punta della mattina	131
Figura 3-16: particolare del flussogramma relativo centro di Dolo per il periodo AM	132
Figura 3-17: flussogramma relativo al periodo MD	133
Figura 3-18: flussogramma relativo al periodo di punta della sera	134
Figura 3-19: flussogramma relativo al periodo PM - particolare del centro di Dolo	135
Figura 3-20: flussogramma relativo al periodo OP	136
Figura 3-21: linee di desiderio per il periodo di punta della mattina; in blu: gli spostamenti in uscita dalle zone, in verde: gli spostamenti in entrata	137
Figura 3-22: linee di desiderio per il periodo della mattina; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati dal centro di Dolo aventi destinazioni esterne all'area di studio	138
Figura 3-23: linee di desiderio per il periodo della mattina; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati ed in verde quelli attratti dalle zone residenziali dell'area di studio .	139
Figura 3-24: linee di desiderio per il periodo PM; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati ed in verde quelli attratti dalle zone residenziali dell'area di studio	140

Figura 3-25: linee di desiderio per il periodo di punta della sera; in blu sono rappresentati gli spostamenti che il centro di Dolo attrae dalle zone esterne all'area di studio	141
Figura 3-26: linee dei desiderio per il periodo di punta della mattina; in verde: gli spostamenti attratti dalla zona del centro di Dolo con i maggiori edifici scolastici	142
Figura 3-27: linee dei desiderio per il periodo di punta della sera; in verde: gli spostamenti attratti dalla zona del centro di Dolo con i maggiori edifici scolastici, in blu: gli spostamenti generati.....	143
Figura 3-28: ubicazione del link numero 100409	148
Figura 3-29: ubicazione del link numero 200131	149
Figura 3-30: linee di desiderio; i blu: gli spostamenti generati dal centro di Dolo verso le zone esterne all'area di studio per il periodo di punta della mattina	164
Figura 3-31: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100409....	196
Figura 3-32: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100409 – particolare del centro di Dolo.....	197
Figura 3-33: flussogramma per il periodo di punta della sera relativo alla rete privata dell'arco 100409	198
Figura 3-34: flussogramma per il periodo di punta della sera relativo alla rete privata dell'arco 100409 – particolare del centro di Dolo.....	199
Figura 3-35: flussogramma per il periodo MD relativo alla rete privata dell'arco 100409...	200
Figura 3-36: flussogramma per il periodo OP relativo alla rete privata dell'arco 100409....	201
Figura 3-37: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 200131....	202
Figura 3-38: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 200131 – particolare del centro di Dolo.....	203
Figura 3-39: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 200131	204
Figura 3-40: ubicazione del link 100525	205
Figura 3-41: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100525....	206
Figura 3-42: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100525 – particolare del centro di Dolo.....	207
Figura 3-43: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 100525	208
Figura 3-44: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 100525 – particolare del centro di Dolo.....	209
Figura 3-45: ubicazione dell'arco 100383	210

Figura 3-46: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100383 ...	211
Figura 3-47: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100383 – particolare del centro di Dolo	212
Figura 3-48: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata del cut-link 110106	213
Figura 3-49: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata del cut-link 110106 – particolare del centro di Dolo	214
Figura 3-50: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della mattina	228
Figura 3-51: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo	229
Figura 3-52: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della sera	230
Figura 3-53: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della sera – particolare del centro di Dolo	231
Figura 3-54: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della mattina	232
Figura 3-55: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo	233
Figura 3-56: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della sera	234
Figura 3-57: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della sera – particolare del centro di Dolo	235
Figura 3-58: flussogramma relativo allo scenario caratterizzato dalla rimozione del cut-link numero 110106 per il periodo di punta della mattina	236
Figura 3-59: flussogramma relativo allo scenario caratterizzato dalla rimozione del cut-link numero 110106 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo	237
Figura 3-60: flussogramma relativo allo scenario 400063 per il periodo AM ottenuto dall'applicazione del.....	243
Figura 3-61: flussogramma relativo allo scenario 400063 per il periodo AM ottenuto dall'applicazione del.....	244

Indice dei grafici

Grafico 3-1: andamento della differenza di spostamenti per i diversi motivi rispetto all'iterazione precedente del ciclo rappresentato in Figura 3-8	111
Grafico 3-2: andamento del numero totale degli spostamenti effettuati in auto per periodo	144
Grafico 3-3: spostamenti effettuati in un'ora generica appartenente a ciascuno dei quattro periodi.....	144
Grafico 3-4: differenza del costo totale di rete tra lo scenario iniziale e ciascuno degli scenari di rete privata di un arco	150
Grafico 3-5: differenza percentuale del costo totale di rete tra lo scenario iniziale e gli scenari di danno	151
Grafico 3-6: valori dell'indicatore Importance per ogni scenario di danno	154
Grafico 3-7: differenza del totale della matrice degli spostamenti assegnati alla rete tra lo scenario iniziale e gli scenari di danno	155
Grafico 3-8: differenza percentuale tra i totali di matrici espressi in assoluto dal Grafico 3-7	156
Grafico 3-9: percentuale di spostamenti che si sono ridistribuiti tra le celle della matrice come illustrato nel capitolo 3.6.....	157
Grafico 3-10: differenza percentuale della matrice al netto della riduzione di spostamenti come indicato nel capitolo 3.6	158
Grafico 3-11: Mean of Absolute Deviation: rappresenta la variazione media delle celle della matrice rispetto allo scenario iniziale.....	159
Grafico 3-12: distanza euclidea tra le matrici di spostamento relative agli scenari di danno e quella per lo scenario iniziale	160
Grafico 3-13: Differenza assoluta del costo totale di rete tra gli scenari di danno e lo scenario iniziale	162
Grafico 3-14: Variazione percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale	163
Grafico 3-15:valori dell'indicatore Importance per ogni scenario di danno	163
Grafico 3-16: differenza del totale della matrice degli spostamenti assegnati alla rete tra gli scenari di danno e lo scenario iniziale.....	165

Grafico 3-17: differenza percentuale tra i totali di matrici espressi in assoluto dal Grafico 3-16	165
Grafico 3-18: percentuale di spostamenti che si sono ridistribuiti tra le celle della matrice come illustrato nel capitolo 3.6	166
Grafico 3-19: differenza percentuale della matrice al netto della riduzione di spostamenti come indicato nel capitolo 3.6.....	166
Grafico 3-20: Mean of Absolute Deviation: rappresenta la variazione media delle celle della matrice rispetto allo scenario iniziale	167
Grafico 3-21: distanza euclidea tra le matrici di spostamento relative agli scenari di danno e quella per lo scenario iniziale.....	167
Grafico 3-22: Link Importance per $\beta = 0.25$; in rosso sono indicati i cut-link.....	170
Grafico 3-23: Link Importance per $\beta = 0.50$; in rosso sono indicati i cut-link	171
Grafico 3-24: Link Importance per $\beta = 0.75$; in rosso sono indicati i cut-link.....	172
Grafico 3-25: Link Importance per diversi valori di β	173
Grafico 3-26: numero di persone che decidono di effettuare almeno uno spostamento per i vari scenari	175
Grafico 3-27: variazione percentuale numero di persone che decidono di effettuare almeno uno spostamento tra gli scenari di danno e quello iniziale	176
Grafico 3-28: numero di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto per i vari scenari	177
Grafico 3-29: variazione percentuale del numero di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto rispetto allo scenario iniziale.....	178
Grafico 3-30: numero medio di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto per i vari scenari	179
Grafico 3-31: numero di spostamenti compiuti in auto per gli scenari in esame	182
Grafico 3-32: variazione percentuale del numero di spostamenti compiuti in auto rispetto allo scenario iniziale	183
Grafico 3-33: numero di tours compiuti in auto per gli scenari in esame	184
Grafico 3-34: differenza percentuale del numero di tours compiuti in auto rispetto allo scenario iniziale.....	185
Grafico 3-35: numero medio di spostamenti per tour per i vari scenari.....	186
Grafico 3-36: variazione percentuale del numero medio di spostamenti per tour rispetto allo scenario iniziale.....	187

Grafico 3-37: lunghezza media di un tour per i vari scenari	188
Grafico 3-38: variazione percentuale della lunghezza media di un tour rispetto allo scenario iniziale.....	189
Grafico 3-39: durata media di un tour per i vari scenari.....	190
Grafico 3-40: variazione percentuale della durata media di un tour rispetto allo scenario iniziale.....	191
Grafico 3-41: variazione percentuale dell'accessibilità media per persona rispetto allo scenario iniziale	192
Grafico 3-42: numero di spostamenti in auto per periodo e per quattro scenari compreso quello iniziale.....	193
Grafico 3-43: variazione percentuale del numero di spostamenti in auto per periodo e per tre scenari rispetto a quello iniziale.....	194
Grafico 3-44: differenza del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale.....	217
Grafico 3-45: differenza percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale	218
Grafico 3-46: indicatore Importance per i vari scenari	219
Grafico 3-47: differenza del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale.....	220
Grafico 3-48: differenza percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale	220
Grafico 3-49: valori dell'indicatore Importance	221
Grafico 3-50: Link Importance per $\beta = 0.25$; in rosso sono indicati i cut-link	223
Grafico 3-51: Link Importance per $\beta = 0.50$; in rosso sono indicati i cut-link	224
Grafico 3-52: Link Importance per $\beta = 0.75$; in rosso sono indicati i cut-link	225
Grafico 3-53: Link Importance per valori diversi di β	226
Grafico 3-54: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di variazione del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale per i non cut-link	240
Grafico 3-55: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di valori assunti dall'indicatore Importance per i non cut-link.....	241
Grafico 3-56: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di variazione del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale per i cut-link....	242
Grafico 3-57: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di valori assunti dall'indicatore Importance per i cut-link.....	242

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: correlazione tra Bridge Damage Index e Bridge Damage State; fonte: (Chang et al. 2000).....	32
Tabella 2-2: relazione tra Link Damage State e Link damage Index; fonte: (Chang et al. 2000)	32
Tabella 2-3: relazione tra Link Damage State e Damage Multipliers; fonte: (Chang et al. 2000)	33
Tabella 2-4: relazione tra Link Damage State, capacità e flusso su un arco; fonte: (Dong & Frangopol 2015)	33
Tabella 2-5; relazione tra capacità di traffico e capacità di carico di un ponte; fonte: (Mackie & Stojadinović 2004a)	35
Tabella 2-6: relazione tra stato di danno, tempo e capacità di traffico residua di un ponte; fonte: (Padgett & DesRoches 2007).....	36
Tabella 2-7: relazione tra stato di danno di un ponte e capacità di traffico residua; fonte: (Bocchini & Frangopol 2011).....	38
Tabella 2-8: relazione tra stato di danno, capacità residua e velocità a free-flow speed di un ponte fonte: (Zhou et al. 2004).....	39
Tabella 2-9: relazione tra larghezza della carreggiata e livello di funzionalità della strada fonte: (Syner-G D5.1 2011)	45
Tabella 2-10: rappresentazione schematica della classificazione dei modelli di assegnazione; fonte: (Appunti 2013; Appunti 2014).....	55
Tabella 2-11; fonte: rielaborazione da (Bradley et al. 1999)	60
Tabella 2-12: sintesi dei concetti espressi da Jenelius; fonte: (Jenelius et al. 2006).....	73
Tabella 3-1: suddivisione della popolazione in base alle fasce di reddito	114
Tabella 3-2: classificazione scuole ed alunni.....	115
Tabella 3-3: classificazione degli addetti nei vari settori	116
Tabella 3-4: numero degli archi in esame e loro ubicazione	125
Tabella 3-5: spostamenti per motivo e periodo	145
Tabella 3-6: coefficienti di correlazione tra gli indicatori utilizzati: IMP: Importance, C_RETE: Costo totale di rete; ACCD: Variazione di accessibilità; TOT: Differenza tra i totali d matrice; R: Differenza percentuale tra i totali di matrice; R_ABS: Percentuale di spostamenti ridistribuiti all'interno della matrice rispetto allo scenario iniziale; RS: Differenza percentuale	

dei totali di matrice al netto della riduzione degli spostamenti; MAD: Mean of Absolute Deviation; DE: istanza Euclidea	153
Tabella 3-7: coefficienti di correlazione tra gli indicatori utilizzati: IMP: Importance, C_RETE: Costo totale di rete; ACCD: Variazione di accessibilità; TOT: Differenza tra i totali d matrice; R: Differenza percentuale tra i totali di matrice; R_ABS: Percentuale di spostamenti ridistribuiti all'interno della matrice rispetto allo scenario iniziale; RS: Differenza percentuale dei totali di matrice al netto della riduzione degli spostamenti; MAD: Mean of Absolute Deviation; DE: istanza Euclidea	162
Tabella 3-8: matrice di correlazione tra gli indicatori utilizzati	215
Tabella 3-9: matrice di correlazione tra gli indicatori utilizzati	216

1 Introduzione

Lo scopo primario di un sistema di trasporto è consentire agli utenti di effettuare spostamenti in modo efficiente ed affidabile, ed in questo senso esso costituisce uno dei fattori rilevanti dello sviluppo sociale ed economico di un Paese. Per questo motivo è importante garantire il massimo livello di funzionalità del sistema anche in condizioni eccezionali, ovvero in caso di eventi sia interni al sistema stesso, come incidenti o lavori programmati, sia esterni, come terremoti ed eventi meteorologici straordinari. I danni prodotti sugli elementi della rete possono infatti generare conseguenze nel breve o nel medio termine, sia sugli individui che sul sistema economico. Nel breve periodo, che in alcuni casi è una fase di immediata post-emergenza, la parziale o totale inagibilità delle vie di comunicazione può ritardare o impedire il transito dei veicoli o degli eventuali mezzi di soccorso allertati. Nel medio-lungo termine la riduzione di funzionalità della rete viaria impatta sullo sviluppo sociale ed economico del territorio inducendo una redistribuzione delle attività nel territorio, a causa degli elevati ritardi o della disconnessione tra alcune zone. Attraverso l'analisi di vulnerabilità della rete, è possibile fornire ai decisori informazioni utili per allocare in maniera ottimale le risorse per gli interventi di manutenzione preventiva, di gestione delle emergenze, di pianificazione e ricostruzione.

L'analisi dello stato dell'arte relativo alla vulnerabilità di una rete di trasporto ha permesso di individuare alcuni ambiti di ricerca di interesse in rapporto all'uso di indicatori di vulnerabilità e alle ipotesi relative alla domanda di trasporto. In linea generale l'analisi di

vulnerabilità di una rete di trasporto può essere definita come la ricerca degli elementi della rete che, se danneggiati, causano una maggiore riduzione di funzionalità del sistema ovvero la possibilità di utilizzare un elemento della rete (nodo, arco o percorso) in un dato periodo di tempo. Per quantificare le conseguenze del danneggiamento degli elementi della rete si ricorre all'uso di opportuni indicatori di vulnerabilità, che valutano le variazioni di funzionalità tra condizioni di normalità e condizioni eccezionali, misurate attraverso i costi di viaggio (tempi e distanze), l'accessibilità di alcune zone o la connettività della rete.

Nella quasi totalità delle ricerche presenti in letteratura si è osservato che la domanda di trasporto viene assunta fissa, ovvero indipendente dalle mutazioni delle caratteristiche fisiche e funzionali della rete. Con questa assunzione non si considerano le eventuali variazioni nell'assetto spaziale e temporale delle attività condotte dagli individui e degli spostamenti che da queste vengono generate.

Sulla base di queste criticità, in questo lavoro di tesi si è deciso di condurre un'analisi di vulnerabilità in grado di considerare gli effetti indotti dalle modificazioni prestazionali della rete e dalla ridistribuzione spaziale e temporale delle attività degli utenti, con le loro reciproche interazioni. Differentemente degli studi precedenti la determinazione della domanda di trasporto è stata condotta con un modello Activity-Based, attraverso cui è possibile stimare la variazione della domanda a seguito del verificarsi di un evento che rende inoperabili alcuni archi della rete. Lo studio è stato condotto sulla rete viaria del Comune di Dolo, in provincia di Venezia, applicando un processo di analisi del tipo *full scan approach* agli archi più importanti della rete. Tale processo valuta la vulnerabilità degli archi indipendentemente dal tipo di evento considerato, eliminandone uno alla volta e valutandone gli effetti attraverso gli indicatori di vulnerabilità scelti. Il processo simulativo prevede l'applicazione del modello Activity-Based per ogni arco eliminato, per determinare la nuova domanda di trasporto ed effettuare l'assegnazione alla rete danneggiata. Dall'analisi degli indicatori scelti è stato possibile identificare gli archi della rete più vulnerabili, confrontando i valori degli indicatori ottenuti dall'applicazione del modello a domanda variabile con i valori degli stessi indicatori derivati dall'applicazione di un modello a domanda fissa.

L'aspetto più innovativo della tesi è dato dall'applicazione di un modello Activity-Based per la stima della domanda di trasporto. A differenza di un modello a quattro stadi, che adotta

come unità fondamentale di analisi il singolo spostamento, un modello Activity-Based si concentra sulla sequenza di attività condotte da ciascun individuo nell'arco della giornata, derivando da queste gli spostamenti ad esse collegate. Nel modello le caratteristiche socio-economiche degli individui e delle famiglie, nonché i vincoli spaziali, temporali e interpersonali influenzano direttamente lo schema delle attività e quindi le caratteristiche degli spostamenti.

La tesi è organizzata in due parti principali. La prima contiene un'analisi dello stato dell'arte che ha permesso di evidenziare le problematiche riguardanti la modellazione della variazione della domanda, dell'offerta del sistema di trasporto e di identificare i metodi per l'analisi di vulnerabilità. Nello specifico questa sezione si articola nei seguenti capitoli:

- **Modellazione della domanda:** il capitolo descrive gli approcci esistenti in letteratura per considerare le variazioni della domanda a seguito di un evento che danneggia la rete. In particolare è stata analizzata sia la mobilità di persone che di merci.
- **Modellazione dell'offerta:** in questo capitolo si riportano i più importanti approcci utilizzati per correlare lo stato di danno strutturale di un elemento della rete alla sua variazione di funzionalità da un punto di vista trasportistico.
- **Modellazione dell'interazione domanda-offerta:** il capitolo illustra i metodi impiegati in letteratura per valutare il processo di interazione tra domanda di trasporto ed offerta, in caso di eventi eccezionali che impattano sul sistema dei trasporti e il sistema delle attività.
- **Vulnerabilità di una rete di trasporto:** in questo capitolo si analizzano le definizioni di vulnerabilità e i metodi per lo studio e la quantificazione della stessa presenti in letteratura.

La seconda parte della tesi presenta l'analisi di vulnerabilità riferita ad un caso di studio reale mediante l'applicazione di un modello Activity-Based. Essa si compone dei seguenti capitoli:

- **Area di studio:** contiene una breve descrizione delle caratteristiche della rete e delle zone che la compongono.
- **Approccio metodologico adottato:** in questo capitolo si illustra il metodo utilizzato per la valutazione della vulnerabilità.

- **Modello Activity-Based impiegato:** presenta la struttura globale e descrive i componenti fondamentali del modello Activity-Based impiegato nel presente lavoro di tesi.
- **Raccolta ed elaborazione dei dati:** il capitolo contiene la descrizione dei dati necessari al modello e la loro elaborazione.
- **Analisi dei risultati della simulazione:** in questo capitolo si riportano i risultati ottenuti dal modello per ogni scenario di danno della rete. In particolare si analizzano le variazioni della domanda, i valori degli indicatori di vulnerabilità e gli effetti sulla distribuzione dei flussi sulla rete prodotti dal modello a domanda variabile; infine si effettua un confronto con i risultati ottenuti dall'applicazione del modello a domanda fissa.
- **Conclusioni:** si presentano le considerazioni finali e gli sviluppi futuri emersi dal lavoro di tesi.

2 Stato dell'Arte

In questo capitolo si riporta l'analisi dello stato dell'arte relativo agli elementi utili per uno studio completo della vulnerabilità di una rete di trasporto; esso infatti comprende la modellazione delle variazioni della domanda, dell'offerta e delle reciproche interazioni tra i due sistemi. Da una prima analisi è emerso che la maggior parte dei testi considerano i terremoti come gli eventi che possono danneggiare più intensamente e più frequentemente i componenti di un sistema di trasporto; pertanto si presentano gli studi degli Autori relativi a questi casi. Infine si descrivono le definizioni e i metodi utilizzati per valutare la vulnerabilità di una rete di trasporto indipendentemente dall'evento che danneggia le infrastrutture.

2.1 MODELLAZIONE DELLA DOMANDA POST-SISMA

2.1.1 Passeggeri

2.1.1.1 Introduzione

La maggior parte dei testi che trattano dell'interazione tra la domanda ed offerta di trasporto a seguito di un evento sismico si focalizza soprattutto sul secondo aspetto. Infatti l'analisi si concentra principalmente sugli elementi infrastrutturali maggiormente vulnerabili al danno provocato da un terremoto (ponti, edifici); dato che l'obiettivo è quello di stimare le *performance* della rete in seguito a variazioni degli elementi fisici che la compongono, l'aspetto relativo al cambiamento della domanda non viene quasi mai considerato.

Tuttavia la variazione della domanda di trasporto in seguito al sisma, intesa come insieme di spostamenti degli utenti della rete da una zona di origine ad una di destinazione, non può essere trascurata, poiché il fine dell'analista è quello di ottenere un modello che sia il più possibile aderente alla realtà.

Infatti molti Autori (Giuliano & Golob 1998; Kiremidjian et al. 2007; Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010; Chang et al. 2011; Chang 2012; Nakanishi et al. 2013) hanno sottolineato tale aspetto, evidenziato anche dalle analisi di traffico successive a terremoti che si sono verificati nel passato, soprattutto negli Stati Uniti d'America e in Giappone. In particolare, in relazione ad eventi che disturbano o danneggiano la rete (chiusura di ponti, terremoti), Zhu e Levinson (Zhu & Levinson 2008) sostengono che gli utenti siano costretti ad "esplorare" la nuova configurazione della rete, e modificare il loro comportamento abitudinario sulla base di tale esperienza e delle informazioni ricevute dall'esterno. A titolo di esempio, tali variazioni possono essere: la correzione di un percorso, il cambiamento dell'orario di partenza, oppure addirittura una modifica del luogo di lavoro o di residenza (Cairns et al. 2002). Inoltre Cairns, Atkins e Goodwin (Cairns et al. 2002) hanno sottolineato come i nuovi

comportamenti degli utenti siano dettati maggiormente dalle nuove esperienze, piuttosto che dalle abitudini passate.

Dato che la domanda è generata dai comportamenti degli utenti, le considerazioni degli Autori precedentemente riportate rafforzano la tesi per cui la variazione della domanda in seguito al sisma debba essere considerata nella modellazione, in quanto sensibilmente diversa da quella pre-sisma; tale differenza risulterà maggiore nel lungo periodo poiché i nuovi spostamenti degli utenti sono condizionati dalla loro conoscenza della rete, che aumenta con il trascorrere del tempo.

La modellazione della domanda post-sisma è molto complessa (Chang et al. 2011; Chang 2012) a causa dei diversi fattori che sono coinvolti. Nel breve periodo (immediatamente dopo l'evento) questa differisce da altri eventi straordinari naturali (come uragani o piene di corsi d'acqua) per il fatto che non è possibile dare nessun allarme preventivo alla popolazione, in quanto il terremoto non è prevedibile (Giuliano & Golob 1998; Chang et al. 2011; Chang 2012). Inoltre, nel lungo periodo, la simulazione risulta difficoltosa a causa della stretta interconnessione della domanda con le attività sul territorio e con la rete; infatti questi elementi variano nel tempo in seguito ad interventi di ricostruzione e gestione del traffico (Giuliano & Golob 1998; Nojima & Sugito 2000; Chang et al. 2011; Chang 2012).

Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno brevemente analizzato alcuni dei maggiori terremoti (*Loma Prieta* 1989 e *Northridge* 1994 negli Stati Uniti, *Kobe* 1995 e *Niigate-Chuetsu* 2004 in Giappone) in relazione alla variazione della domanda osservata dopo il sisma. Gli autori hanno evidenziato che questa può cambiare drasticamente non solo nel tempo (diminuisce per pochi giorni e successivamente cresce dopo una settimana), ma anche nello spazio, cioè a seconda della regione; quest'ultimo aspetto è sottolineato anche da Kiremidjian (Kiremidjian et al. 2007), che ha osservato come tali variazioni siano dovute ai diversi comportamenti degli utenti, che differiscono a seconda del luogo (e delle abitudini). Per questo non è possibile ottenere dei risultati sempre validi, in termini di simulazione della domanda post-sisma, ma devono essere considerati specifici del luogo e del periodo di analisi.

Di seguito si analizzano varie metodologie di simulazione della domanda distinguendole a seconda del periodo di tempo cui l'analisi si riferisce. In particolare si considera:

- Breve periodo: intervallo di tempo compreso tra l'evento sismico e il momento in cui cominciano le operazioni di riparazione degli elementi fisici della rete e ricostruzione degli edifici danneggiati;
- Lungo periodo: successivo all'inizio delle operazioni di riparazione e ricostruzione.

La maggior parte dei testi analizzati e riportati si riferisce al primo dei due periodi; ciò è dovuto al fatto che questi modelli di simulazione hanno lo scopo di fornire elementi utili alle amministrazioni per pianificare gli interventi di gestione del traffico immediatamente dopo il terremoto.

2.1.1.2 Soccorsi ed evacuazione

2.1.1.2.1 Introduzione

In seguito ad un terremoto gli interventi più importanti in risposta allo stesso sono l'evacuazione delle persone e la gestione dei feriti e dei beni di soccorso (Najafi et al. 2013). In particolare, la prima ha luogo nella fase di emergenza immediatamente successiva al sisma, mentre la seconda continua per un periodo più lungo, poiché ha come obiettivo quello di trasportare i feriti nei centri di assistenza medica e rifornire di beni di prima necessità le aree colpite dall'evento (Najafi et al. 2013; Najafi et al. 2014). A causa della difficoltà di prevedere le zone di azione e le caratteristiche dei terremoti (Giuliano & Golob 1998; Chang et al. 2011; Chang 2012) è necessario pianificare gli interventi riportati in precedenza in modo da ridurre gli effetti del sisma sulla popolazione (Yi & Özdamar 2007; Sisiopiku 2007; Najafi et al. 2014).

In particolare, una rassegna della letteratura relativa alle operazioni di gestione di eventi disastrosi (*DOM-Disaster Operation Management*) è stata condotta da Galindo e Batta (Galindo & Batta 2013) che, proseguendo l'attività di Altay e Green (Altay & Green 2006), hanno suddiviso i lavori sul tema in base a diversi criteri (nazionalità degli autori, metodologia applicata, periodo di analisi, tipo di evento considerato, eccetera). In particolare gli Autori (Galindo & Batta 2013) hanno indicato le diverse assunzioni adottate nei vari documenti commentando quali fossero ragionevoli, irrealistiche o troppo restrittive.

Di seguito si citano diversi articoli suddivisi secondo il criterio, più semplice, adottato da Najafi et al. (Najafi et al. 2013). L'elenco non è in alcun modo esaustivo, data l'ampiezza degli argomenti collegati alle fasi di evacuazione e soccorso, ma ha come unico scopo quello di presentare le attività più rilevanti riscontrate nella ricerca.

2.1.1.2.2 Evacuazione

Per le operazioni di evacuazione è importante pianificare la dislocazione ottimale dei rifugi e i percorsi che la popolazione deve utilizzare per potercisi recare. La scala di applicazione di questi piani è solitamente a livello urbano. In particolare Ye et al. (Ye et al. 2012) hanno stimato il numero di persone per unità abitativa ed identificato possibili zone di rifugio, come parchi pubblici o piazze molto estese. A seconda della superficie di questi ultimi, gli Autori (Ye et al. 2012) ne hanno determinato la capacità e assegnato la popolazione a seconda del percorso di costo minimo (tempo) richiesto per giungervi. Un approccio più complesso è stato invece sviluppato da Coutinho-Rodrigues et al. (Coutinho-Rodrigues et al. 2012), i quali hanno assunto, come obiettivo per la determinazione dei piani di evacuazione di una città, la minimizzazione dei seguenti parametri:

- distanza per raggiungere il rifugio;
- rischio associato ad un percorso;
- rischio di trovarsi in uno specifico rifugio;
- tempo richiesto per trasportare una persona da un rifugio ad un centro di assistenza medica;
- numero totale di rifugi.

Inoltre gli Autori hanno previsto di determinare due percorsi per l'evacuazione, in modo che il secondo possa essere adottato nel caso il primo non sia praticabile a causa dei danni alla rete.

Differenti *softwares* sono disponibili per supportare la pianificazione delle fasi di evacuazione. La maggior parte di questi richiedono i seguenti input (Moriarty et al. 2007): caratteristiche fisiche della rete, informazioni sulla popolazione da evacuare, periodo di analisi e condizioni metereologiche. Alcuni di queste applicazioni sono state concepite per

specifici eventi come danni ad impianti nucleari (come *DYNEV - Dynamic Network Evacuation*), uragani (come *ETIS - Evacuation Traffic Information System*) oppure entrambi (come *OREMS - Oak Ridge Evacuation Modeling System*) (Chang 2012). Solo pochi (come *TEMPO - Transportation Emergency Management of Post-Disaster Operations*) sono stati sviluppati per l'evacuazione nel caso di terremoti data la complessità della simulazione in questi casi (Chang 2012). In particolare, a differenza di altri eventi, la domanda varia a seconda dei danni subiti dalla rete e non vi è nessun allarme preventivo; per questo motivo i risultati del modello non sono attendibili, in quanto i percorsi scelti dagli utenti sono dettati principalmente da caratteristiche comportamentali difficilmente simulabili.

A questo scopo, Bu e Xie (Bu & Xie 2010) hanno sviluppato un metodo per valutare la generazione di spostamenti in caso di evacuazione. Gli Autori (Bu & Xie 2010) hanno utilizzato un modello Logit che considera diversi parametri (comportamentali e non) al fine di stimare la probabilità che una persona decida di evacuare dal luogo in cui si trova, seguendo il percorso indicato, oppure tornare alla propria abitazione; le variabili significative utilizzate sono le seguenti:

- Tipo di edificio in cui l'utente si trova e suo possesso o meno;
- Ordine di evacuazione o meno;
- Distanza dall'area colpita dai danni;
- Esperienza della persona riguardo a casi di emergenza;
- Età, livello di istruzione e stato civile dell'individuo.

Il modello è stato calibrato dagli autori per la città di Xiamen (Cina) sulla base dei dati rilevati da un'intervista ai residenti.

2.1.1.2.3 Soccorsi ai feriti

Come citato in precedenza, in seguito o durante la fase di evacuazione, è necessario trasportare i feriti ai centri di assistenza medica più vicini al fine di diminuire il numero di potenziali vittime del sisma. Con questo scopo Gao et al. (Gao & Sun 2012) hanno stimato il numero di feriti e di vittime per edificio in base al tipo di costruzione, al danno subito e al tasso di occupazione. Inoltre gli Autori (Gao & Sun 2012) hanno determinato il percorso

minimo che i veicoli di soccorso devono compiere in base al tempo di percorrenza, imponendo un tempo di sopravvivenza minimo per i feriti. Infine Gao et al. (Gao & Sun 2012) hanno proposto un metodo per valutare la priorità di riparazione della rete in modo da massimizzare la capacità dei percorsi di soccorso prima calcolati.

Una delle fasi importanti per la pianificazione dell'emergenza è la stima del numero di feriti. Molto spesso non esiste una sufficiente quantità di dati, relativi a eventi sismici passati, tale da poter costruire un modello sofisticato e attendibile (FEMA 2003). La metodologia proposta in HAZUS (FEMA 2003) correla il numero e lo stato di salute dei feriti al tipo di danno che una struttura può subire; il modello classifica le vittime in base al grado di assistenza medica di cui necessitano ed ipotizza che queste siano causate solamente dal crollo di ponti ed edifici. In particolare il metodo suddivide la popolazione in vari gruppi a seconda dell'attività che sta svolgendo al momento del terremoto (residenti, studenti, impiegati nel settore commerciale, ...) e considera tre periodi in cui un sisma può avvenire (ogni periodo massimizza il numero di feriti di un certo gruppo). Una volta noti, per ogni edificio, il numero di persone presenti, la probabilità di avere un certo livello di danno ed il tasso di feriti (*casualty rate*), il modello determina il numero di feriti di ogni classe per struttura. Il metodo proposto utilizza i pochi dati relativi ad eventi sismici passati combinati con l'opinione di esperti. In ambito europeo, è stato sviluppato un modello contenuto nel progetto *Syner-g* (Syner-G D4.7 2012; Syner-G D5.1 2011). In particolare il metodo introduce i *casualties ratios*, definiti come il rapporto tra il numero di persone uccise dal sisma ed il numero di individui presenti nell'edificio; tali valori sono stati calibrati sulla base dei dati storici relativi a due terremoti avvenuti in Italia (in Friuli nel 1976 e in Irpinia nel 1980). Questi parametri sono distinti per tre classi di edifici, per livello di danno subito dalla struttura e per intensità del sisma. Con questo metodo semi-empirico è possibile stimare il numero di vittime per tutti gli stati di danno.

Inoltre, per la stima del numero di feriti in una certa area, Schweier e Markus (Schweier & Markus 2006) hanno proposto una procedura basata sull'analisi di *laser scanners* aerei. Sulla base di questi rilevamenti e delle caratteristiche geometriche degli edifici (come il numero di piani), gli Autori (Schweier & Markus 2006) hanno realizzato una classificazione dei fabbricati e ha stimato il numero di feriti, dato dal crollo di queste strutture, correlandolo alla riduzione di volume dell'edificio stesso.

Infine, Jotshi et al. (Jotshi et al. 2009) hanno sviluppato un modello per organizzare informazioni sui feriti e sul danno alle infrastrutture provenienti da diverse fonti (*data fusion*); questa fase avviene introducendo dei pesi che considerino l'incertezza associata alla provenienza dell'informazione stessa. Con questi dati, il metodo (Jotshi et al. 2009) si suddivide in due parti: la prima riguarda l'assegnazione di uno o più mezzi di soccorso ad una zona colpita dal sisma e poi ad un ospedale; la seconda considera la determinazione del percorso di ciascun veicolo anche in relazione ai danni subiti dalla rete.

Fiedrich et al. (Fiedrich et al. 2000) hanno invece proposto un modello per la distribuzione delle risorse (mezzi ed equipaggiamenti) per il trasporto delle persone ferite. Il metodo si riferisce alle fasi di emergenza relative ai primi giorni successivi al terremoto e prevede di minimizzare il numero di vittime, introducendo una relazione, dipendente dal tempo, tra la probabilità di avere una certa quantità di feriti e le operazioni di soccorso degli stessi.

In relazione al trasporto dei feriti in seguito al sisma, Salman e Gül (Salman & Gül 2014) hanno sviluppato un procedimento per determinare i luoghi di dislocazione di ospedali da campo provvisori. Questi possono essere realizzati presso scuole, parchi, campi sportivi o edifici prefabbricati (Salman & Gül 2014). Il numero dei feriti è stimato attraverso una procedura descritta in un documento di *J.I.C.A. & I.M.M. (Japan International Cooperation Agency & Istanbul Metropolitan Municipality)* (JICA & IMM 2004); questo metodo propone delle curve di interpolazione che mettono in relazione la quantità di individui colpiti e i danni del terremoto agli edifici, sulla base di dati da eventi sismici passati. Gli obiettivi posti dagli Autori (Salman & Gül 2014) al modello sono la minimizzazione del tempo di attesa e di trasporto dei feriti, e del costo di realizzazione delle nuove aree di soccorso; attraverso la procedura sviluppata è possibile aggiornare in modo continuo il numero di persone da soccorrere sulla base degli individui già trasportati e delle decisioni del periodo immediatamente precedente quello in considerazione (Salman & Gül 2014).

2.1.1.2.4 Logistica e distribuzione dei beni

Un'altra fase di elevata importanza nella fase dei soccorsi post-sisma è la logistica dei beni di soccorso e di prima necessità da fornire alla popolazione colpita. In particolare quest'attività comprende la previsione della domanda, la generazione dei percorsi per i mezzi di trasporto ed il reperimento di dati con cui aggiornare le decisioni (Sheu 2007). Kamel e Loukaitou-

Sideris(Kamel & Loukaitou-Sideris 2004) hanno analizzato gli effetti a lungo termine delle operazioni di assistenza in diverse aree di *Los Angeles* soggette al *Northridge Earthquake* del 1994, sottolineando l'importanza di questa attività. Gli stessi (Kamel & Loukaitou-Sideris 2004) hanno evidenziato che nelle zone che hanno ricevuto minor aiuti si è verificata una riduzione maggiore della popolazione e delle unità abitative. Secondo Sheu (Sheu 2007) la logistica dei beni nel caso del terremoto è più complessa di quella in situazioni di normalità a causa dei seguenti aspetti:

- La domanda di beni, servizi e feriti da trasportare è fortemente incerta e difficilmente prevedibile sulla base di dati storici;
- L'offerta delle merci di soccorso non è facilmente controllabile dai decisori;
- Le infrastrutture di trasporto subiscono dei danni molto spesso solamente ipotizzabili, che variano nel tempo e che possono causare ostacoli ai mezzi di trasporto;
- Le aree soggette al terremoto sono frequentemente molto vaste.

La difficoltà di conoscere e prevedere la domanda di beni di soccorso è sottolineata da diversi autori. In particolare Sheu (Sheu 2007; Sheu 2010; Sheu 2014) ha evidenziato che chi fornisce queste informazioni molto spesso non necessita direttamente degli aiuti, e che questi dati provengono da fonti diverse, generando frequentemente incertezze negli elementi a disposizione dei decisori. In relazione a questi aspetti e alla vastità delle zone colpite, Das e Hanaoka (Das & Hanaoka 2014) hanno suggerito l'uso delle tecnologie e dei media di comunicazione oggi ampiamente disponibili a ciascun individuo.

Relativamente ai primi giorni dopo il sisma, Sheu (Sheu 2007) ha proposto un metodo basato sulla previsione della domanda di beni di soccorso e sulla classificazione delle aree colpite a seconda dell'urgenza nella distribuzione degli stessi oggetti (razioni alimentari, letti, coperte, ...). La quantità di domanda è correlata con il numero di persone colpite dal sisma presenti in una zona; le informazioni relative a quest'ultima sono costantemente aggiornate in seguito alle operazioni di consegna delle merci effettuate. In questo modo si ottiene un modello di tipo dinamico. Lo stesso Autore (Sheu 2010) ha proposto un metodo per organizzare le informazioni sulla domanda provenienti da diverse fonti (*data fusion*), aggregare questi dati su base zonale e determinare la priorità di consegna tra i vari luoghi. Anche questa

procedura è di tipo dinamico, in quanto prevede un aggiornamento continuo delle informazioni relative alla quantità di feriti.

Infine altri autori si sono occupati della determinazione del percorso minimo da assegnare al mezzo di trasporto per raggiungere le zone cui portare i soccorsi necessari. In particolare Hsu e Jung (Hsu & Jung 2004) hanno introdotto il concetto di affidabilità (*reliability*) di un percorso, definendo quest'ultima come il grado di certezza con cui, attraverso quel percorso, il veicolo raggiunge la destinazione in tempo. Tale aspetto è legato al fatto che la rete soggetta al sisma è considerata (Hsu & Jung 2004) in modo stocastico e dipendente dal tempo; per questo il tempo di percorrenza di ogni *link* può essere rappresentato da una variabile aleatoria con una distribuzione di probabilità che varia nel tempo. Il metodo proposto è applicato dagli Autori (Hsu & Jung 2004) ad un caso-studio dimostrando che molto spesso il percorso con la massima affidabilità non è quello avente la distanza minima. Il problema della determinazione del percorso minimo è affrontato anche da Wang et al. (Wang et al. 2010), che hanno proposto un metodo per valutare quali centri di distribuzione rendere operativi, assegnare a questi ultimi i veicoli disponibili, definire le aree in cui intervenire, e determinare i percorsi dei mezzi di soccorso. I criteri utilizzati includono:

- La minimizzazione del tempo di percorrenza di un percorso;
- La minimizzazione dei costi relativi alle infrastrutture e ai mezzi;
- La massimizzazione dell'affidabilità minima dei percorsi tra tutti i veicoli.

A differenza di Hsu e Jung (Hsu & Jung 2004), Wang et al. (Wang et al. 2010) hanno definito l'affidabilità di un percorso come la possibilità, per i mezzi di trasporto, di soddisfare completamente la domanda di beni di soccorso di tutte le zone appartenenti a quel percorso.

2.1.1.2.5 Evacuazione e soccorsi

Sebbene la maggior parte degli articoli analizzino la gestione dell'evacuazione e la logistica dei feriti e dei beni di soccorso in modo indipendente, alcuni autori hanno considerato entrambe le operazioni durante la stessa fase di emergenza (Najafi et al. 2013). In particolare Yi e Özdamar (Yi & Özdamar 2007) hanno introdotto un metodo per coordinare il trasporto dei beni dai centri di distribuzione alle aree colpite e dei feriti da quest'ultime agli

ospedali. Inoltre dato che il modello prevede di trattare i veicoli non singolarmente, ma come flusso, gli Autori (Yi & Özdamar 2007) hanno sviluppato un algoritmo per convertire la soluzione in percorsi dei mezzi. L'obiettivo assunto da Yi e Özdamar (Yi & Özdamar 2007) è quello di minimizzare il ritardo (o il tempo di attesa) dei feriti e delle persone che devono ancora ricevere il servizio di soccorso. Infine gli stessi Autori (Yi & Özdamar 2007) hanno considerato la dinamicità del problema, ovvero il fatto che risulta necessario ripianificare le attività, a causa di cambiamenti nei dati relativi alla domanda o nelle condizioni della rete. Lo stesso concetto è stato poi sviluppato da Najafi et al. (Najafi et al. 2014). Un approccio simile è stato utilizzato da Najafi et al. (Najafi et al. 2013), i quali hanno però assegnato una diversa priorità a feriti e beni, a differenza di Yi e Özdamar (Yi & Özdamar 2007) che hanno trattato questi due elementi in modo equivalente.

Un approccio particolare è stato introdotto da Xie e Turnquist (Xie & Turnquist 2009), i quali hanno considerato il conflitto tra il flusso generato dai mezzi di soccorso e quello prodotto dai veicoli civili in evacuazione. Nello specifico gli Autori (Xie & Turnquist 2009) hanno sottolineato che durante le condizioni eccezionali dovute al sisma, la conoscenza perfetta delle caratteristiche della rete da parte degli utenti non è più realistica; pertanto le assegnazioni successive dei veicoli sono di tipo stocastico. In particolare, per considerare il conflitto tra i due tipi di flusso, Xie e Turnquist (Xie & Turnquist 2009) hanno previsto due fasi: la prima riguarda la determinazione dei percorsi dei veicoli di soccorso cui sono riservate delle corsie specifiche; la seconda considera l'assegnazione dei percorsi di evacuazione sulla base dei vincoli generati dal passo precedente. Il concetto di flusso di conflitto è ripreso in maniera esplicita da Cui et al. (Cui et al. 2014), che hanno proposto delle equazioni per la sua quantificazione. Infatti gli Autori (Cui et al. 2014) hanno evidenziato che, se un veicolo di soccorso deve transitare velocemente, il flusso degli altri veicoli deve essere rallentato subendo un ritardo; perciò il costo del flusso di conflitto in un arco è ipotizzato proporzionale ai flussi di soccorso e di evacuazione. Inoltre un ulteriore elemento di disturbo è dato dal fatto che molto spesso alcuni veicoli necessitano di invadere la corsia di senso opposto; per questo il relativo costo è calcolato in maniera proporzionale al numero di corsie di senso inverso a quello del *link* in esame. I percorsi dei veicoli sono generati considerando, oltre alle due voci di costo precedenti, il tempo di evacuazione ed il tempo di soccorso.

2.1.1.3 Breve periodo

Con il termine “breve periodo” si vuole indicare quel lasso di tempo che intercorre tra il verificarsi dell’evento sismico e l’inizio degli interventi infrastrutturali. Tali operazioni hanno come scopo il ripristino della funzionalità delle componenti della rete di trasporto danneggiate (ponti, strade, sottopassi, rampe) e la ricostruzione, o la messa in sicurezza, degli edifici danneggiati. Il periodo così definito comprende anche la fase di soccorso alle vittime del sisma e lo spostamento della popolazione nei punti di raccolta in seguito all’evacuazione degli edifici, già presentata nel paragrafo precedente.

Zhu et Levinson (Zhu & Levinson 2008) hanno riportato che, immediatamente dopo l’evento, si hanno variazioni del comportamento degli utenti in termini di:

- Cambiamenti di percorso, per evitare i links chiusi e quelli più congestionati;
- Mutamenti degli orari nelle attività della giornata per evitare i periodi di congestione;
- Variazione delle destinazioni degli spostamenti (soprattutto quelli non-sistematici);
- Preferenze per pochi spostamenti con più scopi, rispetto a singoli spostamenti per un solo motivo;
- Utilizzo di modi di trasporto alternativi all’automobile;
- Condivisione della propria auto con i familiari per diversi motivi di spostamento.

Tali cambiamenti nelle abitudini si riflettono in una modifica della domanda.

Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno proposto una suddivisione dei metodi utilizzati per simulare i cambiamenti nelle scelte di viaggio degli utenti a seguito del terremoto:

1. Modifica della matrice Origine-Destinazione pre-sisma;
2. Utilizzo di diversi modelli di assegnazione della matrice O-D pre-sisma alla rete danneggiata.

Al primo tipo appartiene il metodo utilizzato da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010), i quali hanno modificato la matrice Origine-Destinazione pre-sisma attraverso dei coefficienti di riduzione, determinati in base alla porzione di superficie degli edifici danneggiata. Quest'operazione è stata effettuata considerando che, in seguito al terremoto, la capacità di alcuni edifici è ridotta a causa dei danni subiti; per questo anche le attività che vi si svolgono normalmente diminuiscono proporzionalmente (Shinozuka et al. 2005). Questa considerazione è in accordo con quanto si è verificato con il sisma di *Northridge*: nelle aree colpite gli edifici chiusi (scuole ed attività) hanno prodotto una riduzione dei volumi di traffico rispetto a quelli registrati prima del sisma (Giuliano & Golob 1998), ovvero una riduzione della domanda. La procedura utilizzata da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) necessita di conoscere le varie tipologie di edifici danneggiati (in legno, in muratura, ...), la loro superficie utilizzabile in seguito al sisma, l'attività che vi viene svolta (residenziale, commerciale, ...), la loro distribuzione percentuale in ciascuna zona componente l'area di studio ed il tasso di occupazione degli edifici. All'interno della trattazione sono effettuate alcune ipotesi fondamentali:

1. La distribuzione di edifici in base alla tipologia costruttiva è costante nell'area di studio;
2. Il tasso di occupazione non cambia in seguito al sisma;
3. La "quantità" di attività svolte in un edificio è proporzionale alla superficie di tale edificio.

Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) hanno sottolineato come quest'ultimo aspetto non sia veritiero; infatti, molto spesso, un edificio con una superficie danneggiata pari al 60% è dichiarato inagibile. Tuttavia gli stessi Autori (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) hanno indicato che tale assunzione è statisticamente valida nell'area di studio, al cui livello i risultati sono poi aggregati. Dato che il tasso di occupazione di un edificio varia da giorno a notte, Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) hanno utilizzato il tasso diurno per valutare gli spostamenti verso i luoghi di lavoro ed il tasso notturno per stimare gli spostamenti prodotti dalle residenze. La procedura prevede di determinare la percentuale di superficie danneggiata per tipo di attività e, per ogni attività, la popolazione per unità di superficie. In questo modo, una volta raggruppate le attività per motivo di spostamento (Casa-Lavoro, Casa-Scuola, Casa-Altra locazione, Lavoro-Altra

locazione, Altra locazione-Altra locazione), si possono determinare i coefficienti di riduzione degli spostamenti attratti e generati per ogni zona e per un determinato motivo. Poiché il danno agli edifici varia con l'intensità del sisma, è possibile ottenere diversi coefficienti a seconda delle caratteristiche del terremoto stesso. Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno evidenziato come tale procedura non consideri la presenza di rifugi e zone in cui sono presenti materiali pericolosi. Il metodo è stato applicato da Zhou et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) nell'area di Los Angeles ed Orange Counties (California) negli Stati Uniti, su di una rete costituita da 148 nodi e 231 links.

Allo stesso insieme di metodi appartiene anche la procedura proposta da Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012), che ha come scopo quello di fornire un modello utile per valutare eventuali azioni di pianificazione e gestione dell'emergenza post-sisma. Gli Autori hanno considerato due scenari diversi, uno di giorno e uno di notte, in modo da valutare la diversità della domanda nei due periodi. La procedura di modifica della matrice Origine-Destinazione pre-sisma è in parte simile a quella utilizzata da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010); tuttavia Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno introdotto alcune ipotesi fondamentali che riguardano la domanda di trasporto:

1. La popolazione, in seguito al sisma, evacua direttamente dal luogo in cui si trova senza recarsi a casa;
2. La generazione di spostamenti è assunta proporzionale alla popolazione colpita dal terremoto ed il tasso di generazione è considerato costante all'interno della zona;
3. La produzione e l'attrazione di spostamenti è modificata per ogni zona a seconda della presenza di rifugi, ospedali ed aree con presenza di sostanze pericolose (di seguito HAZMAT);
4. Gli edifici con un danno moderato sono evacuati;
5. Le zone vicine a fabbriche che producono sostanze pericolose o impianti nucleari sono evacuate.

In particolare l'Autore prevede che:

1. Se una zona contiene ospedali o rifugi, il suo potenziale di attrazione è incrementato a seconda del numero di posti letto dell'ospedale e della capacità del rifugio;
2. Se nella zona è presente HAZMAT, la sua attrazione è annullata e la sua generazione è aumentata degli spostamenti per l'evacuazione della stessa;
3. Se la zona comprende edifici danneggiati, la sua attrazione è ridotta con coefficienti di riduzione e la generazione è accresciuta per l'evacuazione;
4. Se nella zona si trovano rifugi ed ospedali, HAZMAT ed edifici danneggiati, la sua generazione è incrementata per l'evacuazione e la sua attrazione è aumentata a seconda della capacità delle aree di soccorso;
5. Le restanti zone non presentano variazioni di spostamenti generati od attratti rispetto al caso pre-sisma.

Si osserva che i coefficienti di riduzione degli spostamenti attratti sono ottenuti a partire da quelli elaborati da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010). Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno osservato che il totale degli spostamenti attratti ed il totale di quelli generati, calcolati dalla nuova matrice Origine-Destinazione, non coincidono, poiché, hanno concluso gli Autori, la conservazione degli spostamenti non può essere garantita in condizioni straordinarie. Il metodo proposto è stato applicato alla rete di *Sioux-Falls* (Chang et al. 2011; Chang 2012) e alla *St. Louis metropolitan area* (Chang 2012), entrambe negli Stati Uniti; l'ultima è costituita da 17352 nodi, 40432 links e 7263025 zone.

La seconda classe di metodi proposti prevede di utilizzare diversi modelli di assegnazione, in modo da simulare le variazioni di scelte di percorso effettuate dagli utenti a seguito del sisma che, in realtà, sono dovute ad un cambiamento della domanda. Con questo scopo, Nojima e Sugito (Nojima & Sugito 2000) hanno previsto di utilizzare il *Modified Incremental Assignment Method* (di seguito MIAM). Il metodo è stato modificato dagli Autori, rispetto alle sue versioni precedenti, per evitare che l'algoritmo si arrestasse nel caso in cui un centroide risultasse isolato, cioè senza alcun percorso che lo colleghi ad altri (alcune zone risultano inaccessibili). In generale il MIAM prevede di suddividere la matrice Origine-Destinazione pre-sisma in varie sottomatrici e di assegnarle in maniera incrementale alla rete; questo avviene attraverso il calcolo di alberi dei cammini minimi determinati sulla base dei costi dei links con i flussi accumulati dai caricamenti precedenti (Ortuzar & Willumsen

2011). L'algoritmo modificato prevede di arrestarsi quando tutte le coppie Origine-Destinazione siano isolate, oppure quando tutta la matrice iniziale sia stata caricata, mentre nessun flusso è caricato su links che hanno raggiunto la loro capacità (Nojima & Sugito 2000). Attraverso queste modifiche la matrice Origine-Destinazione che risulta caricata alla fine della procedura è differente da quella pre-sisma a causa della presenza di centroidi isolati, saturazione oppure congestione (Nojima & Sugito 2000). Come evidenziato da Ortuzar e Willumsen (Ortuzar & Willumsen 2011), questo procedimento è facile da implementare ma non sempre converge all'equilibrio di Wardrop; inoltre, una volta che un flusso è stato assegnato ad un link, non può più essere rimosso da quest'ultimo. Il MIAM è stato applicato da Nojima e Sugito (Nojima & Sugito 2000) al sisma *Hanshin-Awaji* del 1995 avvenuto in Giappone, su di una rete costituita da 100 links, 30 nodi ed 8 centroidi. Lo scopo degli stessi Autori è stato quello di valutare alcuni indicatori di *performance* e di individuare i centroidi isolati.

Un altro esempio di metodi per valutare la variazione della domanda post-sisma con procedure di assegnazione "alternative" è quello proposto da Kiremidjian et al. (Kiremidjian et al. 2006; Kiremidjian et al. 2007); gli Autori hanno comparato i risultati ottenuti dall'applicazione di un modello con domanda fissa (di seguito FDM) e domanda variabile (di seguito VDM). Come indicato (Kiremidjian et al. 2006; Kiremidjian et al. 2007), a causa dei danni provocati dal sisma alla rete di trasporto si ha una riduzione della funzionalità (una minore capacità) della rete; questo fenomeno causa un aumento del tempo di percorrenza ed un calo del numero di spostamenti effettuati dagli utenti. Questa conseguenza non è colta dai metodi di assegnazione classici (FDM), in quanto assumono che la domanda, in termini di quantità di spostamenti tra una coppia di zone, non vari con il costo minimo del percorso tra i due nodi. In altre parole, la scelta del percorso cambia a seconda dei costi di percorso, ma non il fatto di compiere o meno lo spostamento (domanda inelastica). Il VDM, invece, considera che la domanda cambi a seconda del livello di servizio della rete (domanda elastica), come generalmente avviene nel caso di cambiamenti rilevanti nella configurazione della rete (Ortuzar & Willumsen 2011). Per ottenere questo è necessaria una relazione che esprima il tasso di produzione di spostamenti da un nodo di origine ad una destinazione in funzione dei costi di percorso ed una procedura ciclica che legghi il modello di generazione degli spostamenti a quello di assegnazione. Nel caso specifico (Kiremidjian et al. 2006; Kiremidjian et al. 2007), gli Autori hanno utilizzato i due metodi di assegnazione, FDM e

VDM, caricando rispettivamente la matrice O-D pre-sisma e quella post-sisma relativa al periodo di punta (2 ore) della mattina nella *San Francisco Bay Area*; quest'area di studio è costituita da 26904 links, 10647 nodi e 1120 zone. La rete è stata opportunamente modificata per considerare la riduzione di capacità dei ponti causata dai danni del terremoto. Per effettuare un confronto tra FDM e VDM, sono stati calcolati (Kiremidjian et al. 2006) il grado di saturazione (rapporto flusso/capacità) ed il tempo totale speso dai veicoli in rete. Nel caso di FDM il tempo totale di rete è risultato maggiore di quello relativo al caso pre-sisma, tuttavia questa crescita risulta esagerata rispetto a ciò che può avvenire nella realtà; invece, con il VDM, il tempo totale di rete è risultato di poco superiore a quello pre-sisma. Inoltre il numero di links con grado di saturazione maggiore di 1 è stato riscontrato essere più grande per il FDM rispetto al VDM. Questi due dati confermano (Kiremidjian et al. 2006; Kiremidjian et al. 2007) che la diminuzione di livello di servizio della rete in seguito ai danni da terremoto causa una riduzione della domanda. Tuttavia sono gli stessi Autori (Kiremidjian et al. 2007) a sottolineare che tale assunzione è valida solamente in alcune regioni, poiché la domanda varia a seconda dei comportamenti degli utenti (che cambiano a seconda del luogo). In particolare questa ipotesi è stata introdotta (Kiremidjian et al. 2007) sulla base di ciò che è stato osservato in seguito ai terremoti di *Loma Prieta* 1989 e *Northridge* 1994, negli Stati Uniti. Al contrario con il sisma di *Kobe* 1995, in Giappone, si è avuta una crescita della domanda.

Infine Miller (Miller 2014; Miller et al. 2014), per considerare la variazione della domanda in seguito al terremoto, ha utilizzato l'*Activity-Based Model*. Questo metodo (descritto in dettaglio nel capitolo 2.3.2) è considerato un modello a domanda variabile; esso infatti prevede di costruire un campione di popolazione rappresentativo dell'area di analisi, per il quale sono disponibili diversi dati con un livello di dettaglio molto elevato (come il numero di componenti la famiglia, il numero di lavoratori e studenti per famiglia, il reddito, le auto possedute). In una prima fase, sulla base delle caratteristiche dell'individuo e della rete (accessibilità) si simula lo schema di attività di una giornata-tipo del singolo utente (questa procedura avviene con l'applicazione di modelli di tipo *Multinomial Logit* e *Nested Logit*). Quindi questi risultati disaggregati sono aggregati su base zonale, ottenendo una matrice Origine-Destinazione; l'ipotesi dell'Autore (Miller 2014) è che la distribuzione delle preferenze per le attività non vari dopo il terremoto. In un secondo passo la matrice così ottenuta è assegnata, secondo il *Deterministic User Equilibrium*, alla rete danneggiata dal

sisma. In questo modo si ricava una rete carica che, con i suoi indicatori (tempo di percorrenza, ...) diventa l'input della prima fase, attraverso una modifica delle scelte degli utenti, innescando un processo iterativo. Miller (Miller 2014; Miller et al. 2014) ha eseguito tre iterazioni, ciascuna delle quali comprende le due fasi precedenti ed una graduale riduzione della capacità dei links danneggiati della rete; successivamente ha effettuato altri tre cicli, questa volta senza modificare le caratteristiche dei links. Come sottolineato dagli stessi Autori (Miller et al. 2014), con questa procedura si assume, tra i vari aspetti, che le famiglie e i lavoratori non scelgano di trasferirsi all'interno della regione o al di fuori; ciò potrebbe comportare una sovrastima dell'impatto del terremoto. L'Autore ha applicato questo metodo alla *San Francisco Bay Area* in California; questa rete è costituita da 32858 links, e 11921 tra nodi e centroidi. Questo modello, a differenza dei precedenti, permette di collegare direttamente la domanda ai comportamenti degli utenti, applicando (Ortuzar & Willumsen 2011) il concetto secondo cui la domanda di trasporto è derivata, nel senso che è un mezzo per compiere determinate attività.

2.1.1.4 Lungo periodo

Per "lungo periodo" si intende il periodo di tempo successivo all'inizio delle fasi di riparazione e ricostruzione delle infrastrutture danneggiate. Da questo instante in avanti gli elementi fisici della rete (strade, ponti) riacquistano gradualmente la loro funzionalità originale, ritornando ai valori di capacità pre-sisma. Il momento iniziale e la durata di questa fase variano da caso a caso (Zhu & Levinson 2008), in quanto dipendono dall'entità dei danni provocati dal terremoto, dalla tempestività di intervento e dalla capacità di azione delle squadre di operai (oltre che da fattori inerenti alla disponibilità economica). A titolo di esempio, nel caso del sisma di *Northridge*, che si è verificato nel Gennaio 1994 con danni rilevanti nella città di *Los Angeles*, il periodo di ricostruzione è terminato nel Novembre dello stesso anno (Giuliano & Golob 1998). Tuttavia, un ripristino della funzionalità della rete non comporta un immediato ri-equilibrio della domanda rispetto alle condizioni che si avevano prima del terremoto (Giuliano & Golob 1998). Infatti, nel lungo periodo, gli utenti possono scegliere di cambiare luogo di residenza o di lavoro (Cairns et al. 2002); oppure nel caso di eventi sismici molto severi, come il sisma di *Kobe* nel 1995 (Menoni 2001) o l'*East Japan Earthquake* nel 2011 (Nakanishi et al. 2013), la popolazione può essere costretta ad

abbandonare le proprie abitazioni in attesa della loro messa in sicurezza. In conclusione questa fase di ricostruzione non può avere un intervallo temporale ben definito, perciò quest'ultimo non può essere valutato con certezza prima dell'evento.

Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005) hanno legato la variazione della domanda nella fase di ricostruzione al ripristino della funzionalità degli edifici, stimando (Shinozuka et al. 2005; Zhou et al. 2010) la matrice Origine-Destinazione post-sisma a partire da quella pre-sisma, opportunamente modificata attraverso coefficienti di riduzione proporzionali alla superficie degli edifici rimasta utilizzabile dopo il terremoto. Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005) hanno ipotizzato che la domanda ritorni ai valori originali in un tempo T_{max} pari a 365 giorni, nel caso di un sisma con MMI (Scala Mercalli Modificata) pari a 9; per valori differenti (g) gli Autori hanno proposto:

$$T_{max} = \frac{365}{10 - g}$$

Inoltre essi hanno supposto di avere una variazione lineare dei coefficienti di riduzione della domanda (R_T , al tempo T generico) rispetto a quelli stimati in precedenza (R_0 , subito dopo il sisma):

$$R_T = R_0 \frac{T}{T_{max}}$$

Tuttavia sono gli stessi Autori (Shinozuka et al. 2005) a sottolineare come tali assunzioni siano state introdotte per semplificare un fenomeno in realtà molto difficile da modellare.

Nakanishi et al. (Nakanishi et al. 2013) hanno analizzato la fase di ricostruzione in seguito all'*East Japan Earthquake* del 2011 per la città di *Ishinomaki*. Il sisma provocò elevati danni anche a causa del successivo *tsunami* che si abbatté sulla costa nei pressi della città; molte aree urbane furono evacuate. Gli Autori (Nakanishi et al. 2013) hanno simulato diversi scenari di ricostruzione con la riallocazione della popolazione all'interno della città una decina di mesi dopo il disastro. A causa della scarsità di dati, Nakanishi et al. (Nakanishi et al. 2013) hanno scelto di non utilizzare un modello a quattro stadi, la cui prima fase riguarda la generazione/attrazione di spostamenti, bensì un modello a tre stadi; in tale metodo la prima fase è la distribuzione di spostamenti. In particolare il numero di spostamenti prodotti al

giorno (T_{ij}) da un'origine i ad una destinazione j prima del sisma è stimato con un modello gravitazionale:

$$T_{ij} = \frac{P_i \cdot A_i / t_{ij}^\gamma}{\sum_j A_j / t_{ij}^\gamma}$$

Dove: P_i è la popolazione nella zona i ; A_i è il numero di impiegati nella zona i ; t_{ij} è il tempo di percorrenza dalla zona i alla zona j , stimato dividendo la distanza minima tra le due zone per la velocità di 30 km/h; γ è un *friction factor* assunto pari a 0,3. Il modello gravitazionale è soggetto al seguente vincolo: $\sum_j T_{ij} = P_i$. Tra i diversi scenari analizzati, la popolazione in una zona in seguito al sisma e nella fase di ricostruzione è determinata sulla base dei progetti di riallocazione; in particolare:

- $P_i = 0$, se la popolazione riallocata proviene dalla zona i ;
- $P_i = P_i^1 + \frac{S_i}{\sum_j S_j} \cdot \sum_k P_k$, se la popolazione è trasferita nella zona i ;
- $P_i = P_i^1$, altrimenti.

Dove: P_i è la popolazione nella zona i terminata la fase di riallocazione; P_i^1 è la popolazione nella zona i prima del sisma; S_i è la superficie della zona i in km^2 ; $\sum_j S_j$ è la sommatoria riferita solamente alle zone in cui la popolazione è riallocata; $\sum_k P_k$ è la sommatoria riferita alle zone da cui la popolazione proviene. Nakanishi et al. (Nakanishi et al. 2013) hanno utilizzato un'assegnazione di tipo *all-or-nothing* supponendo di non avere congestione. Il risultato è una domanda dalle città alla zona portuale che prima non esisteva, in quanto la popolazione trasferita si reca al lavoro con tale destinazione.

Si osserva che i modelli per la valutazione della variazione della domanda descritti nel capitolo 2.1.1 possono essere applicati anche per simulare ciò che avviene nel lungo periodo; a questo scopo è necessario ottenere delle relazioni che forniscano, in funzione del tempo, l'andamento della funzionalità residua (capacità) degli elementi strutturali della rete (strade e ponti) e degli edifici. Queste metodologie sono descritte in dettaglio nel capitolo 2.2.

2.1.2 Merci

2.1.2.1 Introduzione

Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, l'evento sismico causa diversi danni alle infrastrutture ed alle vie di comunicazione e di servizio (Kim et al. 2002); pertanto questi eventi straordinari portano ad una modifica delle interazioni tra il territorio e le attività che vi si svolgono. Tali variazioni riguardano anche il sistema economico (Seongkil Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001; Cho et al. 2000; Kim et al. 2002; Ham et al. 2005a) sia su scala regionale che inter-regionale attraverso un sistema di importazioni-esportazioni (Kim et al. 2002; Ham et al. 2005a). Molti Autori (Seongkil Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001; Cho et al. 2000; Kim et al. 2002; Ham et al. 2005a; Kiremidjian et al. 2006) hanno stimato l'impatto economico di un sisma sul territorio colpito; in particolare Kim et al. (Kim et al. 2002) hanno evidenziato come tali conseguenze siano di tipo:

- Diretto: in quanto il sisma danneggia le infrastrutture di trasporto e gli edifici utilizzati per la produzione di beni e servizi;
- Indiretto: poiché il danno ad un settore industriale causa ripercussioni anche sugli altri cui è collegato tramite relazioni inter-industriali.

2.1.2.2 Cenni ai modelli input-output

I cosiddetti "modelli input-output" permettono di stimare la quantità di merci prodotta da un determinato settore industriale; questo risultato deve poi essere disaggregato per valutare la produzione e l'attrazione di spostamenti di merci per una specifica zona dell'area di studio. Molto spesso (Seongkil Cho et al. 2001; Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Kiremidjian et al. 2006; Giuliano et al. 2010) gli spostamenti considerati sono solamente quelli che avvengono tramite veicoli pesanti; per questo motivo è necessario stimare coefficienti di equivalenza diversi a seconda del tipo di veicolo utilizzato.

Uno degli approcci utilizzati (Cho et al. 2000; Seongkil Cho et al. 2001; Kiremidjian et al. 2006; Gordon 2001; Giuliano et al. 2010) è quello proposto da Cho et al. (Seongkil Cho et al.

2001). Gli Autori hanno utilizzato un modello input-output che necessita di numerosi dati ad un livello di dettaglio molto elevato:

- Matrici Input-Output, da cui ricavare i relativi coefficienti tecnici;
- Numero di impiegati per zona e per settore industriale;
- Flusso di spostamenti di merci inter-regionali (in dollari oppure tonnellate) da aeroporti, porti, autostrade;
- Quantità di denaro mobilitata da un settore per tonnellata di merce;
- Tonnellate di merce trasportate da un veicolo pesante per ogni settore;
- Numero e tipo di veicoli pesanti utilizzati da un settore industriale.

Cho et al. (Cho et al. 2000; Seongkil Cho et al. 2001) hanno determinato i requisiti per l'output i nella zona z (in altre parole (Kiremidjian et al. 2006), la quantità di merce i necessaria a supportare l'attrazione della zona z) come:

$$D_i^z = \sum_j a_{ij} X_j^z + \text{importazioni e domanda delle famiglie}$$

Dove: a_{ij} è il flusso da i a j per unità di output di j ; X_j^z è l'output totale della merce (settore) j per la zona z , tale valore è stimato (Sungbin Cho et al. 2001; Seongkil Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001; Cho et al. 2000; Giuliano et al. 2010; Gordon 2001) sulla base del numero di impiegati nella zona z relativamente alla merce (settore) j :

$$X_j^z = \frac{E_j^z}{\sum_z E_j^z} \left(\sum_i x_{ij} + \alpha H_j + R_j \right)$$

Dove: E_j^z è il numero di impiegati nella zona z relativamente alla merce (settore) j ; x_{ij} è il flusso (in \$) da i a j ; H_j sono i consumi delle famiglie relativamente alla merce j ; α rappresenta la porzione di consumi delle famiglie che causa lo spostamento di merci (di solito è posto pari a 0 oppure un valore molto basso [Gordon2010]); R_j è la domanda finale non associata alle famiglie.

In maniera analoga l'offerta di output j della zona z (in altre parole (Kiremidjian et al. 2006), la quantità di merce j necessaria a supportare la produzione nella zona z) è posta pari a:

$$O_j^z = \sum_i b_{ij} X_i^z + \text{importazioni e domanda delle famiglie}$$

Dove: b_{ij} è il flusso da i a j per unità di output di i ; X_i^z è l'output totale della merce (settore) i per la zona z , tale valore è stimato sulla base del numero di impiegati nella zona z relativamente alla merce (settore) i in modo simile a quanto esposto in precedenza.

Si osserva che tutti i valori che compongono D_i^z ed O_j^z sono espressi in unità monetarie (dollari, nel caso specifico); per convertirli in tonnellate deve essere nota la quantità di denaro mobilitata da un settore per tonnellata di merce. In particolare Cho et al. (Seongkil Cho et al. 2001) e Kiremidjian et al. (Kiremidjian et al. 2006) hanno utilizzato dei coefficienti costruiti sulla base della *1993 Commodity Flow Survey (CFS, U.S. Department of Transportation 1997)*. Successivamente è necessario trasformare tali risultati in *Passenger Car Equivalent (PCEs)*; in particolare Gordon et al. (Gordon 2001) hanno sfruttato dati sul tipo di veicoli pesanti (numero di assi) per settore e la loro proporzione rispetto al traffico totale rilevato. In questo modo si costruiscono dei coefficienti di equivalenza diversi a seconda del settore industriale considerato. La stessa procedura è stata seguita da Kiremidjian et al. (Kiremidjian et al. 2006):

$$\frac{\text{tons}}{\text{PCEs}} \text{ per settore} = \frac{A}{B \cdot C}$$

Dove: A sono le tonnellate per settore giornaliero; B è il numero di veicoli pesanti giornaliero; C è PCE per un determinato tipo di veicolo pesante (ottenuti da *TRB, 1994, Highway Capacity Manual*) per settore. In questo modo si ottiene il totale degli spostamenti prodotti ed il totale degli spostamenti attratti dalla zona z per un dato settore industriale.

Quindi, una volta determinati gli spostamenti intra-regionali (cioè tra le zone interne all'area di studio), è necessario valutare quelli inter-regionali. Questi ultimi sono stimati da Gordon et al. (Gordon 2001) da diverse fonti per i porti, gli aeroporti e le autostrade e riferiti alle rispettive zone (per le autostrade si utilizzano pseudo-centroidi). In seguito essi sono distribuiti tra le zone interne in maniera proporzionale agli spostamenti attratti da queste ultime (Giuliano et al. 2010):

$$F^{Eo,d} = \sum_i Inb_i^{Eo} \frac{A_i^d}{\sum_i A_i^d}$$

$$F^{o,Ed} = \sum_i Outb_i^{Ed} \frac{P_i^o}{\sum_o P_i^o}$$

Dove: $F^{Eo,d}$ è il numero di spostamenti da un punto di entrata-uscita Eo alla zona interna d ; Inb_i^{Eo} è la quantità di merce i proveniente (prodotta) dal punto di entrata-uscita Eo ; A_i^d è il totale di spostamenti attratti dalla zona interna d relativi al settore i ; $F^{o,Ed}$ è il numero di spostamenti dalla zona interna o a un punto di entrata-uscita Ed ; $Outb_i^{Ed}$ è la quantità di merce i diretta (attratta) dal punto di entrata-uscita Ed ; A_i^d è il totale di spostamenti prodotti dalla zona interna d relativi al settore o .

Nelle trattazioni di Cho et al. (Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001), Gordon et al. (Gordon 2001; Giuliano et al. 2010) e Kiremidjian et al. (Kiremidjian et al. 2006) sono considerati solamente gli spostamenti relativi ai veicoli pesanti su strada; invece Ham et al. (Ham et al. 2005a; Ham et al. 2005b) hanno introdotto una fase di Ripartizione Modale, distinguendo tra veicoli su strada e mezzi su ferro. Questa procedura consiste nell'utilizzo di un modello di tipo *Logit*, in cui le utilità dei due diversi modi sono valutate a seconda della quantità di merce trasportata (in \$/ton) e della distanza media percorsa (in miglia).

Per completezza si riporta che Kiremidjian et al. (Kiremidjian et al. 2006), per distribuire gli spostamenti tra le zone, hanno utilizzato un modello di tipo gravitazionale in cui la funzione di impedenza è stimata solamente sulla base dei tempi di percorrenza dei veicoli leggeri. Tuttavia gli stessi Autori (Kiremidjian et al. 2006) hanno sottolineato come questa operazione sia un'approssimazione, poiché, più correttamente, i parametri della funzione andrebbero determinati considerando i flussi di equilibrio dei veicoli leggeri e quelli pesanti caricati sulla rete insieme. Questo aspetto è stato approfondito da Cho et al. (Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001) e ripreso da Gordon et al. (Gordon 2001; Giuliano et al. 2010). In particolare Cho et al. (Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001) hanno applicato il seguente procedimento:

1. Determinazione di costi iniziali ottenuti dall'assegnazione alla rete dei soli veicoli leggeri;

2. Stima dei parametri della funzione di impedenza per i veicoli pesanti con criterio di Putnam (Putnam 1983); applicazione di un modello gravitazionale a vincolo singolo per determinare la matrice Origine-Destinazione dei veicoli pesanti;
3. Somma della matrice Origine-Destinazione dei veicoli pesanti con quella dei veicoli leggeri; assegnazione della matrice così ottenuta per ottenere nuovi costi;
4. Si ripete dalla fase 2. fino a convergenza (cioè fino ad ottenere parametri stabili della funzione di impedenza dei veicoli pesanti).

Con queste fasi i parametri della funzione di impedenza sono stati determinati in base ai costi prodotti dai veicoli leggeri e quelli pesanti; tuttavia a seguito di questa procedura è necessario ricalibrare i coefficienti della stessa funzione relativa ai veicoli leggeri (Seongkil Cho et al. 2001). Per questo gli Autori (Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001) hanno introdotto i seguenti passi:

5. Stima dei parametri della funzione di impedenza dei veicoli leggeri sulla base dei costi determinati alla fine della fase 4.; applicazione di un modello gravitazionale a vincolo doppio per determinare la matrice Origine-Destinazione dei veicoli leggeri;
6. Stima dei parametri della funzione di impedenza per i veicoli pesanti con criterio di Putnam (Putnam 1983); applicazione di un modello gravitazionale a vincolo singolo per determinare la matrice Origine-Destinazione dei veicoli pesanti;
7. Somma della matrice Origine-Destinazione dei veicoli pesanti con quella dei veicoli leggeri; assegnazione della matrice così ottenuta per ottenere nuovi costi;
8. Si ripete dalla fase 5. fino a convergenza.

Cho et al. (Cho et al. 2000; Sungbin Cho et al. 2001; Sungbin Cho et al. 2001) hanno utilizzato il metodo descritto in precedenza per valutare le conseguenze economiche di un potenziale sisma presso la città di *Los Angeles* (Stati Uniti), sulla *Los Angeles Metropolitan Area Transportation Network*, costituita da 19601 links e 1534 zone.

2.2 MODELLAZIONE DELL'OFFERTA POST-SISMA

Secondo Ortuzar e Willumsen (Ortuzar & Willumsen 2011) la principale caratteristica di ciò che costituisce l'offerta di trasporto è quella di essere un servizio e non un bene. Come tale essa deve essere funzionale alla domanda di trasporto. Per questo motivo, gli elementi che compongono la rete sono di seguito analizzati esclusivamente da un punto di vista trasportistico, e non strutturale, anche se il primo non può prescindere dal secondo. Quindi il fine è quello di analizzare le variazioni prodotte dal sisma sull'infrastruttura a livello funzionale che, a sua volta (Zhou et al. 2010), comporta una modifica dell'interazione tra domanda ed offerta.

Innanzitutto, per raggiungere questo scopo, è necessario definire quali siano i componenti dell'offerta che risultano maggiormente vulnerabili ai terremoti. Secondo diversi Autori (Zhou et al. 2004; Shiraki et al. 2007; Shinozuka et al. 2005; Stergiou & Kiremidjian 2010; Zhou et al. 2010; Lee et al. 2011; Chang 2012; Frangopol & Bocchini 2012; Decò et al. 2013; Dong & Frangopol 2015) gli elementi più vulnerabili al sisma sono i ponti; ulteriori danni diretti alla rete sono quelli relativi alle infrastrutture stradali (Zhou et al. 2004; Syner-G D1.1 2009; FEMA 2003); infine esistono anche danni indiretti come quelli causati dall'occupazione della sede stradale di porzioni di edifici crollati (Giovinazzi & Nicholson 2010; Syner-G D1.1 2009; FEMA 2003; Nariyuki et al. 2004; Tung 2004; Argyroudis et al. 2005; Goretti & Sarli 2006; Mansouri et al. 2008; Argyroudis & Ptilakis 2011; Zolfaghari & Moghesi 2012; Ptilakis & Kakderi 2011). L'obiettivo è quello di identificare delle relazioni danno-funzionalità di questi elementi anche se, come sottolineato da Padgett et DesRoches (Padgett & DesRoches 2007) e, più recentemente, da Giovinazzi e Nicholson (Giovinazzi & Nicholson 2010), la letteratura ha prestato poca attenzione a formulare delle correlazioni tra stato di danno e stato funzionale (cioè riduzione di capacità).

2.2.1 Ponti

Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno definito la relazione danno-funzionalità di un ponte come una funzione che lega la capacità residua ad un particolare stato di danno. Questa riduzione di funzionalità può essere dovuta, ad esempio, al crollo o alla chiusura di una corsia (Chang et al. 2011) e può variare nel tempo a seguito di interventi fisici di riparazione e/o ricostruzione.

Secondo Padgett e DesRoches (Padgett & DesRoches 2007) e Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012) i diversi approcci per ricavare la relazione danno-funzionalità di un ponte si possono suddividere in:

- Empirici;
- Analitici;
- Basati sulle opinioni di esperti.

I primi consistono nell'elaborazione di dati esistenti relativi al danno di un ponte e la sua capacità residua (Chang et al. 2011; Chang 2012); questo metodo richiede un elevato numero di informazioni da osservazioni su eventi sismici passati e pertanto può essere applicato solamente in regioni dove vi è un'adeguata disponibilità di informazioni (Chang et al. 2011; Chang 2012), come, ad esempio, la *West Coast* degli Stati Uniti (Padgett & DesRoches 2007).

Il secondo tipo di approccio è stato sviluppato da Mackie e Stojadinovic (Mackie & Stojadinović 2004a; Mackie & Stojadinović 2004b; Mackie & Stojadinović 2006) con riferimento alla California. Gli autori hanno correlato la riduzione di capacità di traffico del ponte con la perdita di capacità di carico (*load carrying capacity*), senza tenere in considerazione le decisioni in merito alla manutenzione straordinaria del ponte (riparazione o chiusura) (Chang et al. 2011).

Infine i metodi basati sulle opinioni di esperti sono stati largamente utilizzati, in quanto sono facili da implementare e permettono di considerare la soggettività delle possibili decisioni in rapporto alle strategie di intervento (Chang et al. 2011). Questo approccio è impiegato in quelle regioni in cui vi è scarsità di dati sui sismi passati (Chang 2012).

Chang et al. (Chang et al. 2000) hanno proposto una correlazione tra stato di danno di un link contenente uno o più ponti e la sua perdita di funzionalità, valutata non in termini di capacità di traffico, ma come aumento del tempo di percorrenza. Nel dettaglio gli autori (Chang et al. 2000) hanno utilizzato la seguente equazione per determinare il *Link Damage Index*:

$$D_l = \sqrt{\sum_{g=1}^{G_l} \delta_{gl}^2}$$

Dove: D_l è il *Link Damage Index* di un link l ; G_l è il numero di ponti contenuti nel link l ; δ_{gl} è il *Bridge Damage Index* relativo al ponte g appartenente al link l . I valori di quest'ultimo indice sono riportati dagli Autori (Chang et al. 2000) nella seguente tabella:

Bridge Damage State	Bridge Damage Index, δ
None	0.0
Minor	0.1
Moderate	0.3
Major	0.75
Collapse	1.0

Tabella 2-1: correlazione tra Bridge Damage Index e Bridge Damage State; fonte: (Chang et al. 2000)

Attraverso una correlazione fornita dagli stessi Autori (Chang et al. 2000), e riportata in Tabella 2, è possibile determinare lo stato di danno (*Bridge Damage State*) del link l .

Link Damage State	Link Damage Index, D_l
No Damage	$D_l < 0.5$
Minor	$0.5 \leq D_l < 1.0$
Moderate	$1.0 \leq D_l < 1.5$
Major	$D_l \geq 1.5$

Tabella 2-2: relazione tra Link Damage State e Link damage Index; fonte: (Chang et al. 2000)

Infine, attraverso opportuni moltiplicatori (*Damage Multipliers*) correlati allo stato di danno del link l , Chang et al. (Chang et al. 2000) hanno previsto di incrementare la lunghezza

originale di tale arco per considerare l'aumento del tempo di percorrenza causato dal suo danneggiamento; tali moltiplicatori non considerano l'effetto di congestione, ma la ridondanza della rete, ossia la capacità della stessa di fornire più percorsi alternativi per giungere ad una destinazione (Chang et al. 2000). Gli Autori hanno proposto i seguenti valori dei *Damage Multipliers*, per la rete di *Los Angeles*:

Link Damage State	Damage Multiplier
None	1
Minor	2
Moderate	4
Major	6

Tabella 2-3: relazione tra Link Damage State e Damage Multipliers; fonte: (Chang et al. 2000)

La stessa procedura è stata in parte adottata da Dong et al. (Dong & Frangopol 2015) in uno studio finalizzato alla stima della variazione della sostenibilità (*sustainability*) di una rete di trasporto nel tempo. La funzionalità dei *links* contenenti ponti è determinata con le stesse equazioni e gli stessi valori dei parametri forniti da Chang et al. (Chang et al. 2000). Diversamente da questi ultimi, Dong et al. (Dong & Frangopol 2015) hanno utilizzato delle curve di fragilità che forniscono lo stato di danno del ponte, e quindi il *Bridge Damage Index*, in funzione del tempo; inoltre gli Autori (Dong & Frangopol 2015) hanno correlato il *Link Damage State* a diversi livelli di capacità di traffico e velocità del flusso. Queste relazioni sono state riassunte nella seguente tabella:

Link Damage State	Flow capacity [% rispetto al link non danneggiato]	Flow speed [% rispetto al link non danneggiato]
Slight	100	75
Moderate	75	50
Major	50	50

Tabella 2-4: relazione tra Link Damage State, capacità e flusso su un arco; fonte: (Dong & Frangopol 2015)

Torbol et al. (Torbol & Shinozuka 2014) hanno applicato un metodo, calcolando il danno ad un arco contenente un ponte attraverso il *Link Damage Index* con valori differenti della capacità residua del link.

Come Chang et al. (Chang et al. 2000), anche Bocchini et Frangopol (Bocchini & Frangopol 2012) hanno messo in relazione la perdita di funzionalità di un *link* contenente un ponte con il tempo di percorrenza dei percorsi alternativi. Infatti gli Autori (Bocchini & Frangopol 2012) hanno scomposto il tempo di percorrenza di un tratto di strada in due parti:

1. Tempo di percorrenza con tutti i ponti in servizio;
2. Tempo speso per le deviazioni causate dai ponti chiusi o parzialmente aperti a causa dei danni del sisma.

In particolare, mantenendo la suddetta distinzione:

$$c_{ij} = c_{ij}^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{f_{ij}}{f_{ij}^c} \right)^\beta \right] + \sum_{b \in ij} s_{b,ij} c_b^d \left[1 + \alpha \left(\frac{s_{b,ij} f_{ij}}{f_b^d} \right)^\beta \right]$$

Dove: c_{ij} è il tempo per percorrere il segmento ij ; c_{ij}^0 è il tempo per percorrere lo stesso segmento in condizioni di flusso libero; f_{ij} è il flusso sul tratto ij ; f_{ij}^c è la capacità pratica; α e β sono parametri della funzione i cui valori sono suggeriti dagli Autori (Bocchini & Frangopol 2012); b è un indice relativo ai ponti presenti nel segmento ij ; c_b^d è il minimo tempo di percorrenza per bypassare il ponte b ; f_b^d è la capacità pratica del percorso di deviazione dal ponte b ; $s_{b,ij}$ è un parametro adimensionale che valuta l'impatto del ponte b sul tratto ij . Il suo *range* varia (Bocchini & Frangopol 2012) tra 0 (flusso di traffico in condizioni normali) ad 1 (flusso bloccato); i valori intermedi sono forniti (Bocchini & Frangopol 2012) a seconda di:

- Livello di danno del ponte;
- Presenza di lavori per la riparazione;
- Presenza di cavalcavia.

Bocchini et Frangopol (Bocchini & Frangopol 2012) hanno rielaborato la precedente equazione in modo da inserirla più efficacemente nell'algoritmo di Frank and Wolfe. Infine gli stessi Autori (Bocchini & Frangopol 2012) hanno fornito un modello di restaurazione della funzionalità del ponte, secondo il quale il livello di danno del ponte è massimo immediatamente dopo il sisma, si mantiene costante per un certo intervallo di tempo, successivamente si riduce linearmente.

Mackie et Stojadinovic (Mackie & Stojadinović 2004a; Mackie & Stojadinović 2004b; Mackie & Stojadinović 2006), per valutare una relazione tra il danno ad un ponte e la sua variazione di funzionalità, hanno utilizzato un approccio di tipo analitico, allo scopo di fornire ai decisori elementi il più possibile razionali per pianificare le azioni sui ponti in seguito ad un terremoto (Mackie & Stojadinović 2004a). In particolare essi hanno messo in relazione la diminuzione di capacità di traffico di un ponte (*Traffic capacity remaining*) con la sua perdita di capacità portante (*Loss of load carrying capacity*); quest'ultima è correlata all'intensità del sisma in termini probabilistici a partire dall'analisi dei dati esistenti per diversi ponti della California (Mackie & Stojadinović 2004a). In questo modo è possibile, per una data intensità, determinare la probabilità di avere un certo valore di capacità di traffico con un conseguente intervento (chiusura di una corsia, restrizioni ai veicoli pesanti, ...). Tuttavia l'associazione tra i diversi valori di capacità di traffico e gli interventi da adottare avviene tramite tabelle fissate in modo empirico. Un esempio è fornito dalla seguente tabella:

Objective name	Traffic capacity remaining (volume)	Loss of lateral load carrying capacity	Loss of vertical load carrying capacity
Immediate access	100%	< 2%	< 5%
Weight restriction	75%	< 2%	< 10%
One lane open only	50%	< 5%	< 25%
Emergency access only	25%	< 20%	< 50%
Closed	0%	> 20%	> 50%

Tabella 2-5; relazione tra capacità di traffico e capacità di carico di un ponte; fonte: (Mackie & Stojadinović 2004a)

L'approccio più impiegato (Chang et al. 2011) per la valutazione della relazione danno-funzionalità è quello basato sulla raccolta di pareri di esperti. Tale metodologia è stata applicata (Padgett & DesRoches 2007; Chang et al. 2011) in *ATC-13*¹ per la stima della funzionalità e dei tempi di riparazione di un ponte soggetto a diversi stati di danno. Questi risultati sono stati utilizzati in *Hazus*² per costruire le curve di ripristino (*Restoration curves*). Analogamente Padgett et DesRoches (Padgett & DesRoches 2007) hanno effettuato un sondaggio per raccogliere l'opinione di ingegneri del *Central and Southeastern U.S. Department of Transportation*; ad essi era stato chiesto di valutare quale fosse la capacità di

¹ L'ATC-13 è una pubblicazione che contiene dati e metodi per la valutazione dei danni alle infrastrutture situate in California e causate da terremoti. Tale documento è stato realizzato da *Applied Technology Council* (ATC), un'associazione composta da ingegneri civili della California.

² Hazus è un insieme di metodi sviluppati dalla *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) per la stima dei potenziali danni causati da eventi catastrofici, in particolare terremoti, inondazioni ed uragani. Questi modelli sono stati realizzati in ambito statunitense e, simulando gli impatti fisici, economici e sociali, sono utilizzati nelle fasi di prevenzione, emergenza e ricostruzione.

traffico residua di un ponte soggetto ad un certo livello di danno, a diversi intervalli di tempo, e quali dovessero essere le contromisure da intraprendere. Come dichiarato dagli Autori (Padgett & DesRoches 2007), l'utilizzo di tale metodologia è giustificato dal fatto che le decisioni sugli interventi da effettuare dopo il sisma sono molto soggettive; per questo motivo le informazioni sono state richieste ai responsabili dei provvedimenti da adottare. I dati raccolti (28 risposte, pari a circa il 75% del totale) sono stati organizzati da Padgett et DesRoches (Padgett & DesRoches 2007) per determinare:

$$P[X = x | D = d \cap T = t]$$

Dove P è la probabilità di rispondenti; x è la capacità di traffico disponibile; d è un determinato stato di danno; t è un tempo specifico. In questo modo P è la probabilità di avere un certo valore di capacità residua x in seguito ad un danno di tipo d e dopo un periodo t . I risultati hanno portato al seguente grafico:

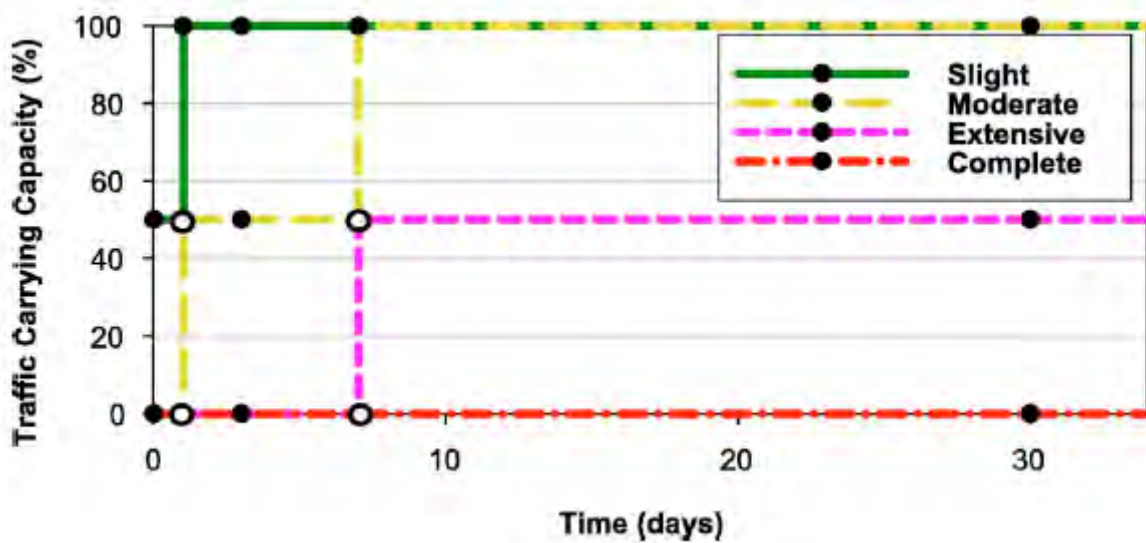


Tabella 2-6: relazione tra stato di danno, tempo e capacità di traffico residua di un ponte; fonte: (Padgett & DesRoches 2007)

Come si nota, la capacità è fornita per valori discreti (0%, 50%, 100%) come anche il tempo (0, 24 ore, 3 giorni, 7 giorni e 30 giorni). Come indicato da Chang (Chang et al. 2011), questi risultati sono stati utilizzati dal MAE Center per ottenere delle curve danno-funzionalità di tipo continuo; la funzionalità è valutata come la media pesata della capacità del ponte, in cui i pesi (*Weighting Factors*) corrispondono alla probabilità di essere in uno specifico stato di danno e sono ricavati dalle curve di fragilità. In questo modo la funzionalità del ponte può essere espressa come):

Bridge Functionality

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^3 \{Weighting Factor \cdot Capacity Level\} \\
 &= \sum_{i=1}^3 \left\{ \left[\sum P(Damage State) \right] \cdot Capacity Level \right\}
 \end{aligned}$$

Dove $P(Damage State)$ è la probabilità di essere in un certo stato di danno secondo le curve di fragilità; $Capacity Level$ è il livello di capacità prima definito (0%, 50%, 100%) cui corrisponde l'indice i .

Anche Bocchini e Frangopol (Bocchini & Frangopol 2011) hanno proposto una funzione continua per la valutazione della capacità residua di un link (f_{ij}^c):

$$f_{ij}^c = f_{ij}^{c0} \cdot \exp[-\alpha^{RC} \cdot (\max I)^{\beta^{RC}}]$$

Dove: f_{ij}^{c0} è la capacità pratica pre-sisma; α^{RC} e β^{RC} sono parametri che devono essere calibrati e nel caso specifico (Bocchini & Frangopol 2011) assunti pari rispettivamente a 0,03 e 4; $\max I$ è il massimo indice di danno (*damage index*) tra i ponti appartenenti all'arco ij . Tale indicatore è calcolato dagli Autori [Bocchini2011] per il generico ponte b sulla base della seguente equazione:

$$\begin{aligned}
 I_b = & 0 \cdot P(no\ damage) + 1 \cdot P(minor\ damage) + 2 \cdot P(moderate\ damage) + 3 \\
 & \cdot P(major\ damage) + 4 \cdot P(collapse)
 \end{aligned}$$

Dove: $P(\dots)$ è la probabilità di essere in quello stato di danno ottenuta dalle curve di fragilità. Questo indice di danno può variare tra 0 e 4, dove 0 e 4 corrispondono rispettivamente a nessun danno e al crollo.

I risultati forniti da Padgett et DesRoches (Padgett & DesRoches 2007) sono stati utilizzati da diversi Autori (Kim & Spencer 2008; Chang 2012). Kim et al. (Kim & Spencer 2008) hanno utilizzato gli stessi valori di capacità ridotta ed hanno ipotizzato che le strade alternative ai links danneggiati, in condizioni eccezionali, possano supportare una capacità superiore dell'1% rispetto a quella "normale".

Questa metodologia è stata sfruttata nella maggior parte dei testi analizzati. Infatti Zhou et al. (Zhou et al. 2004), Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005), Stevanovic et al. (Stevanovic &

Nadimpalli 2010), Zhou et al. (Zhou et al. 2010), Bocchini et al. (Bocchini & Frangopol 2011), Lee et al. (Lee et al. 2011), Torbol et al. (Torbol & Shinozuka 2014) e Dong et al. (Dong et al. 2014), hanno correlato lo stato di danno del ponte contenuto in un arco con la capacità residua dello stesso attraverso valori definiti discretamente. Dato che i risultati dell'analisi del sistema di trasporto cambiano a seconda di tali valori, alcuni Autori, come Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005), Zhou et al. (Zhou et al. 2010), Bocchini et al. (Bocchini & Frangopol 2011) e Torbol et al. (Torbol & Shinozuka 2014), hanno condotto varie simulazioni con diversi valori di capacità residua. A titolo di esempio si riporta la seguente tabella:

Damage state	Residual capacity (%)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
No damage	100	100	100	100
Minor damage	100	100	100	100
Moderate damage	75	50	25	50
Major damage	50	25	10	25
Collapse	50 ^a	25 ^a	10 ^a	0

Tabella 2-7: relazione tra stato di danno di un ponte e capacità di traffico residua; fonte: (Bocchini & Frangopol 2011)

Zhou et al. (Zhou et al. 2004) e Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005) hanno introdotto l'ipotesi per cui, se un link contiene più ponti al suo interno, allora lo stato di danno dell'arco (e quindi la sua capacità di traffico) è definito dal ponte più severamente danneggiato. Tale ipotesi è chiamata "collo di bottiglia" (*bottle-neck*). Tuttavia, come indicato da Bocchini et al. (Frangopol & Bocchini 2012; Bocchini & Frangopol 2011), questa considerazione è valida solamente per le strade maggiori, con un numero molto limitato di accessi e uscite (come le autostrade) (Bocchini & Frangopol 2011), oppure per strade extra-urbane (Frangopol & Bocchini 2012; Bocchini & Frangopol 2011), cioè con pochi percorsi alternativi. Per evidenziare quest'ultimo aspetto gli Autori (Frangopol & Bocchini 2012) hanno indicato che, per un tratto di strada di 10 km con cinque ponti e con vie per evitare tali infrastrutture, i risultati nella simulazione dei percorsi devono essere differenti se si considera il collasso di uno o più ponti. Infatti, se uno solo crolla, i veicoli utilizzeranno le vie alternative per bypassare il ponte con un ritardo minimo; invece, se tutti e cinque collassano, allora l'intero link è inutilizzabile. Tuttavia l'ipotesi *bottle-neck* non permette di distinguere tra queste due situazioni. Per questo motivo gli Autori (Frangopol & Bocchini 2012; Bocchini & Frangopol 2011) hanno previsto solamente due stati di danno possibili per un ponte (in servizio oppure collassato) ed hanno stimato la capacità di un link che contiene vari ponti (f_{ij}^C) come:

$$f_{ij}^c = f_{ij}^{c0} \cdot \max\{0, (1 - NUB_{ij} \cdot \alpha^{UB})\}$$

Dove: f_{ij}^{c0} è la capacità pratica pre-sisma; NUB_{ij} è il numero di ponti collassati che appartengono all'arco ij ; α^{UB} è un parametro che considera l'effetto della chiusura di un ponte sulla capacità dell'intero link. Il valore di α^{UB} deve essere calibrato per il caso specifico di analisi; Bocchini e Frangopol (Frangopol & Bocchini 2012; Bocchini & Frangopol 2011) hanno indicato 0,1 per strade extra-urbane (pochi percorsi alternativi) e 0,2 – 0,5 per strade urbane. Si nota che l'ipotesi di *bottle-neck* si ottiene ponendo α^{UB} pari ad 1 (Frangopol & Bocchini 2012). Dato che l'equazione precedente assegna lo stesso effetto medio dei ponti alla rete, Bocchini e Frangopol (Bocchini & Frangopol 2011) hanno proposto la seguente relazione per determinare la capacità dello stesso link ij :

$$f_{ij}^c = f_{ij}^{c0} \cdot \max\left\{0, \left(1 - \sum_{k \in ij} \alpha_k^{UB}\right)\right\}$$

Dove: f_{ij}^{c0} è la capacità pratica pre-sisma; k è un indice legato ai ponti presenti nell'arco ij ; α_k^{UB} è un parametro che considera la riduzione della capacità dovuta alla chiusura dello specifico ponte k . Tale variabile è stimata dagli Autori (Bocchini & Frangopol 2011) attraverso i dati contenuti nel *National Bridge Inventory* (FEMA 2009).

Zhou et al (Zhou et al. 2004), Stevanovic et al.(Stevanovic & Nadimpalli 2010), Rossi et al. (Rossi et al. 2012) e Dong et al. (Dong & Frangopol 2015), hanno messo in relazione il danno ad un ponte presente in un link non solo con la capacità residua dell'arco, ma anche con una variazione della velocità (Rossi et al. 2012) a flusso libero (Zhou et al. 2004; Stevanovic & Nadimpalli 2010; Dong & Frangopol 2015). Tale correlazione avviene sempre tramite valori non continui; a titolo di esempio si riporta la seguente tabella:

State of Link Damage	Capacity Change Rate	Free Flow Speed Change Rate
No Damage	100%	100%
Minor Damage	100%	75%
Moderate Damage	75%	50%
Major Damage	50%	50%
Collapse	50%*	50%*

Tabella 2-8: relazione tra stato di danno, capacità residua e velocità a free-flow speed di un ponte fonte: (Zhou et al. 2004)

Infine Decò et al. (Decò et al. 2013) e, Dong e Frangopol (Dong & Frangopol 2015) hanno correlato la variazione della capacità di un link con la funzionalità dei ponti in esso presenti.

In particolare, secondo Dong e Frangopol (Dong & Frangopol 2015), la funzionalità dipende a sua volta dalla somma pesata delle probabilità di essere in uno specifico stato di danno, determinate dalle curve di fragilità. Il parametro che rappresenta la funzionalità può variare tra 0 e 1, dove 0 significa il collasso del ponte; i valori intermedi sono associati a diversi tipi di intervento e corrispondenti tassi di riduzione della capacità di traffico; ad esempio, gli Autori (Dong & Frangopol 2015) hanno indicato che, se la funzionalità è compresa tra 0,4 e 0,6, allora si avrà una sola corsia utilizzabile ed una capacità diminuita del 50% rispetto a quella originale. Nello stesso articolo (Dong & Frangopol 2015) Dong e Frangopol hanno simulato il recupero nel tempo della funzionalità dei ponti attraverso delle curve fornite da ATC (ATC 1999) ed in parte modificate. Questo tipo di curve sono fornite anche da HAZUS (FEMA 2003).

Dall'analisi effettuata, e come indicato da Giovinazzi e Nicholson (Giovinazzi & Nicholson 2010), si nota che esistono diversi metodi per correlare parametri strutturali dei ponti ai differenti stati di danno, tuttavia non sono presenti relazioni funzionali che leghino il livello di danno alla capacità di traffico residua ed agli interventi da adottare. Inoltre non appaiono procedure per trasferire la natura probabilistica del danno dovuta al sisma alle variazioni nelle caratteristiche funzionali della rete.

2.2.2 Edifici

Nel caso di un sisma, la riduzione di funzionalità di un segmento stradale può essere dovuta anche all'ostruzione, parziale o totale, della carreggiata; questo evento è causato dall'accumulo di detriti dato dal crollo completo o parziali di edifici (Nariyuki et al. 2004; Tung 2004; Argyroudis et al. 2005; Goretti & Sarli 2006; Mansouri et al. 2008; Argyroudis & Ptilakis 2011; Zolfaghari & Moghesi 2012; Ptilakis & Kakderi 2011), oppure dall'attuazione di interventi per la messa in sicurezza degli stessi (ad esempio, sostegni alle pareti) (Goretti & Sarli 2006). La valutazione di questi ostacoli è di fondamentale importanza per le operazioni nella fase di emergenza ed, in particolare, per il transito dei veicoli di soccorso (Nariyuki et al. 2004; Goretti & Sarli 2006; Mansouri et al. 2008).

Questo aspetto è stato evidenziato dall'analisi di casi reali. Nariyuki et al. (Nariyuki et al. 2004) hanno condotto un esame di foto aree della città di Kobe (Giappone) a seguito del

Hyogoken-Nanbu Earthquake avvenuto nel 1995. Incrociando queste osservazioni con dati sulle caratteristiche geometriche delle strade e degli edifici, gli Autori (Nariyuki et al. 2004) hanno ricavato la curva densità di probabilità relativa all'estensione della massa dei detriti sulla carreggiata. Questa curva rispetta la distribuzione di tipo Gamma, i cui parametri sono stati stimati dagli Autori (Nariyuki et al. 2004). Le strade che, a seguito della caduta di detriti, risultano avere un'ampiezza inferiore ai 3 m, sono considerate chiuse. Con questo criterio, attraverso l'equazione della curva precedentemente determinata, è possibile valutare la probabilità che un link sia chiuso.

Un altro approccio di tipo semi-empirico è stato sviluppato da HAZUS (FEMA 2003). La quantità finale di detriti è espressa in unità di peso (tonnellate) per tipo di edificio; questo valore è ottenuto, per ogni edificio, a partire dalla superficie, dal peso per unità di superficie, dalla percentuale di detriti (sul peso) prodotta ad ogni livello di danno e dalla probabilità di essere in uno stato di danno. Il modello distingue inoltre tra due tipologie di detriti (c.a. e acciaio, e mattoni, legno o altro) e due tipi di danno alle strutture (strutturale e non strutturale).

Altri Autori hanno utilizzato dei parametri basati sull'esperienza. In particolare, Mansouri et al. (Mansouri et al. 2008), in uno studio sull'ostruzione delle strade causata dai detriti, per vari scenari sismici della città di Tehran (Iran), hanno introdotto il *Road Blockage Index (RBI)*, i cui valori variano a seconda del rapporto tra l'altezza dell'edificio e la larghezza della carreggiata. Un edificio è considerato generatore di detriti se si trova in uno stato di danno di tipo completo; la probabilità di trovarsi in questo livello di collasso è combinata con il RBI ottenendo, nota la dislocazione degli edifici, una mappatura delle probabilità di ostruzione dei *links* della rete.

Anche Tung (Tung 2004) ha introdotto diverse ipotesi e parametri per stimare l'estensione dei detriti sulla carreggiata, senza tuttavia considerare il carattere probabilistico dei risultati. Inizialmente l'Autore (Tung 2004) ha suddiviso gli edifici che si affacciano sulle strade (gli unici in grado di produrre cadute di materiali) in blocchi omogenei. In seguito, noto il numero di edifici collassati per blocco, è possibile stimare la densità di fabbricati crollati e la lunghezza della strada interessata, ottenendo il *longitudinal blockage*. Successivamente Tung (Tung 2004) ha calcolato l'estensione trasversale dei detriti (*lateral blockage*); quest'ultima dipende dalla percentuale di edifici aventi mensole, dal meccanismo di crollo dell'edificio

variabile a seconda del materiale che lo compone, dall'altezza dell'immobile e dalla distanza tra i fabbricati di un blocco e la sede stradale. In questo modo l'Autore (Tung 2004) ha suddiviso i *links* della rete in diverse classi di *longitudinal* e *lateral blockage*.

L'aspetto probabilistico è stato invece mantenuto e sviluppato da Goretti e Sarli (Goretti & Sarli 2006) i quali hanno considerato come causa di riduzione di capacità di un *link* non solo la presenza di detriti sulla carreggiata, ma anche le contromisure a breve termine (come sostegni agli edifici); inoltre gli Autori (Goretti & Sarli 2006) hanno valutato anche la variazione nel tempo dovuta alla loro rimozione. In particolare lo stato di ogni strada è rappresentato da una variabile binaria (0 se il *link* è accessibile e 1 altrimenti). Quest'ultimo è considerato come una variabile aleatoria, dato che non è possibile conoscere il suo valore *a priori* nel caso di un sisma (Goretti & Sarli 2006). Inoltre si ipotizza che il numero di ostruzioni lungo una strada segua una distribuzione di Poisson, ottenendo una probabilità di chiusura (P_f) pari a:

$$P_f = 1 - e^{-N_{b|I}}$$

Dove: $N_{b|I}$ è il numero di ostruzioni quando si ha un terremoto con intensità I . Per stimare quest'ultimo valore, Goretti e Sarli (Goretti & Sarli 2006) hanno suddiviso gli edifici in T classi di vulnerabilità e hanno posto:

$$N_{b|I} = N_{bld} \cdot P(b|I) = N_{bld} \cdot \sum_T P(b|T, I) \cdot P(T)$$

Dove: N_{bld} è il numero di immobili lungo la strada; $P(b|I)$ è la probabilità che un edificio blocchi il *link* quando è soggetto ad un'intensità I ; $P(T)$ è la percentuale di fabbricati appartenenti alla classe T ; $P(b|T, I)$ è la probabilità che uno stabile, appartenente alla classe T e soggetto ad un sisma con intensità I , ostruisca la carreggiata. Quest'ultima probabilità è calcolata come:

$$P(b|T, I) = \sum_{K=p,o,c} P(b|k, T) \cdot P(k|T, I) = \sum_{k=p,o,c} \left[\sum_{d=0,\dots,5} P(b|k, T) \cdot P(k|d, T) \cdot P(d|T, I) \right]$$

Dove: d rappresenta lo stato di danno delle edificio e varia da 0 (danno nullo) a 5 (crollo); k indica diverse cause di ostruzione della carreggiata (p : puntelli, o : crollo parziale di un fabbricato dovuto alla caduta di muri, c : collasso di uno stabile; dove questi eventi sono

mutuamente esclusivi poiché dipendono dai diversi stati di danno (Goretti & Sarli 2006)); $P(b|k, T)$ è la probabilità che un immobile di classe T e soggetto ad un evento k blocchi la strada (dipende dall'edificio e dalle caratteristiche geometriche della strada); $P(k|d, T)$ rappresenta la probabilità che un edificio, che subisce un danno d e che appartiene alla classe T , sia soggetto a k ; $P(d|T, I)$ è la probabilità che una costruzione di classe T subisca un danno d quando soggetta ad un sisma con intensità I ; i valori di questi due ultimi parametri sono stimati sulla base di analisi statistiche di terremoti avvenuti in Italia. Goretti e Sarli (Goretti & Sarli 2006) hanno sottolineato che l'ipotesi della distribuzione di Poisson, derivata da osservazioni sperimentali, può essere ritenuta valida nel caso di crolli indipendenti di edifici; quando questo non sia veritiero si può assumere che la probabilità di ostruzione sia pari alla minima probabilità di bloccaggio tra i fabbricati presenti sulla strada. Infine, per considerare il ripristino della funzionalità () dei *links*, gli Autori (Goretti & Sarli 2006) hanno supposto che la presenza dei detriti e degli interventi di sostegno agli edifici che ostruiscono la carreggiata segua nel tempo un andamento di tipo esponenziale negativo:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Dove: t è il tempo espresso in giorni e λ è un parametro i cui valori sono tabellati dagli Autori stessi (Goretti & Sarli 2006).

Un approccio simile, che considera la natura probabilistica del fenomeno, è stato sviluppato da Zolfaghari e Mogheisi (Zolfaghari & Moghesi 2012), i quali hanno utilizzato la seguente relazione per determinare la probabilità condizionata che un edificio produca una specifica estensione di detriti ($P(ED = ED_i)$):

$$P(ED = ED_i) = \sum_{k=1}^{n_{IM}} \left\{ \sum_{j=1}^{n_{DS}} \left[\sum_{i=1}^{n_{ED}} P(ED = ED_i | DS_j) \cdot P(DS = j | IM_k) \cdot P(IM_k) \right] \right\}$$

Dove: n_{IM} indica il numero di livelli di intensità del sisma; n_{DS} rappresenta il numero di stati di danno dell'edificio; n_{ED} è il numero di classi di estensione di detriti. A seconda dell'estensione dei detriti, gli Autori (Zolfaghari & Moghesi 2012) hanno introdotto 4 stati di chiusura di una strada (m). Successivamente la probabilità che un *link* sia in uno dei predetti stati è calcolata come:

$$P(\text{di avere almeno uno stato } m) = 1 - \left[\prod_{i=1}^n (1 - P_i(m)) \right]$$

Dove: n è il numero di edifici che si affacciano sul tratto di strada in esame; $P_i(m)$ è la probabilità che il fabbricato i causi abbastanza detriti da portare il *link* in uno stato m .

Un altro tipo di relazioni empiriche è stato introdotto da Argyroudis et al. (Argyroudis et al. 2005; Argyroudis & Pitilakis 2011), i quali hanno condotto un'analisi della funzionalità della rete stradale nella città di Thessaloniki (Grecia). In questo studio (Argyroudis et al. 2005), data l'assenza di dati storici relativi ad ostruzioni delle strade a seguito del sisma, gli Autori hanno costruito delle semplici relazioni tra l'altezza degli edifici e l'estensione della massa di detriti da essi provocata. In particolare, attraverso l'osservazione di fotografie di immobili crollati, sono state definite delle configurazioni geometriche che lo stabile può assumere una volta collassato. Successivamente, tra tutte le forme ipotizzate, è stata ricavata una funzione "media" che lega il numero di piani di un fabbricato alla larghezza della massa di detriti. Infine Argyroudis et al. (Argyroudis et al. 2005) hanno assunto che la probabilità di crollo di un edificio con un certo numero di piani, nota dalle curve di fragilità, coincida con la probabilità di avere una determinata estensione di detriti e sia pari alla probabilità di avere un'ostruzione della carreggiata. Sotto quest'ipotesi, gli Autori (Argyroudis et al. 2005) hanno determinato, per ogni *link*, una curva che lega la probabilità di collasso degli immobili alla corrispondente dimensione della massa di detriti; impostando una soglia per cui la strada può essere definita chiusa, è stata ricavata la probabilità di avere un'ostruzione. In uno studio successivo Argyroudis e Pitilakis (Argyroudis & Pitilakis 2011) hanno utilizzato un'unica configurazione geometrica dell'edificio collassato, ma hanno supposto che la variazione dell'estensione dei detriti prodotti sulla carreggiata abbia una distribuzione di tipo Gaussiano, che è funzione della forma e del volume dei detriti stessi. In questo modo gli Autori (Argyroudis & Pitilakis 2011) hanno stimato la probabilità di avere una strada chiusa, ostruita per metà, o aperta. Lo stesso metodo è stato utilizzato in seguito da Pitilakis e Kakderi (Pitilakis & Kakderi 2011).

Infine in ambito europeo è stato sviluppato il Syner-G, ovvero un progetto (2009-2012) di ricerca collaborativa per lo studio della vulnerabilità sismica e per l'analisi del rischio di edifici, vie di comunicazione e infrastrutture (Syner-G D1.1 2009). I principali obiettivi consistono nello sviluppare curve di fragilità, calibrate e validate in ambito europeo, per

valutare la vulnerabilità e i danni strutturali, economici e sociali, di tutti gli elementi esposti al rischio sismico, considerando anche le loro interdipendenze (Syner-G D1.1 2009. In particolare sono state avanzate alcune indicazioni per valutare l'ostruzione delle strade causate dal crollo degli edifici adiacenti. Nello specifico, su scala urbana/regionale, gli edifici sono suddivisi in celle in base a parametri fisici e socio-economici (Syner-G D1.1 2009; Syner-G D5.1 2011). Considerando il segmento di strada di lunghezza L che appartiene ad una cella, il metodo (Syner-G D5.1 2011; Syner-G D5.5 2012) prevede di suddividere gli immobili in i tipologie (T_i) e di determinare il numero di edifici collassati:

$$N = dl \cdot L' \cdot \sum_i \mu_i \cdot C_i \cdot P_i$$

Dove: dl è la densità di edifici nella cella (stimabile con diversi metodi indicati (Syner-G D5.1 2011)); L' è una lunghezza virtuale che dipende dalla presenza degli stabili sui lati della strada ($2L$ su entrambi i lati, L su un solo lato e 0 se non vi sono fabbricati); μ_i è un fattore empirico che fornisce la proporzione di edifici che subiscono un danno da crollo (determinato utilizzando le curve di fragilità); C_i rappresenta lo stato di danno di ciascuna tipologia (vale 1 nel caso di crollo e 0 altrimenti); P_i è la percentuale di immobili appartenenti alla tipologia T_i . In seguito, una volta nota l'altezza media degli edifici di ogni tipologia (Y_i), vengono suggeriti alcuni metodi per la stima dell'estensione dei detriti, tra cui quelli proposti da Goretti (Goretti & Sarli 2006), Tung (Tung 2004) e Argyroudis e Pitilakis (Argyroudis & Pitilakis 2011). In particolare, utilizzando l'ultimo di questi è possibile ottenere la larghezza di carreggiata non ostruita (W_{fr}) e la probabilità $P(W_{fr}|Y_i)$. Successivamente il metodo suggerisce (Syner-G D5.1 2011) tre diversi livelli di funzionalità della strada (FL_j):

Livelli di funzionalità della strada		W_{fr}
FL_0	Aperta	$\geq W_r$
FL_1	Aperta per emergenza	$< W_r$
FL_2	Chiusa	$< 3,5 \text{ m}$

Tabella 2-9: relazione tra larghezza della carreggiata e livello di funzionalità della strada fonte: (Syner-G D5.1 2011)

Dove: W_r è la larghezza della carreggiata in condizioni normali. In questo modo è possibile determinare la probabilità di superamento del livello di funzionalità FL_j , quando un singolo edificio di tipologia T_i collassa sul segmento in esame ($P(\geq FL_j|Y_i)$). Quindi, considerando che è sufficiente che un singolo immobile crolli per causare un'ostruzione (Syner-G D5.1

2011), si calcola la probabilità di superamento del livello FL_j del tratto di strada in considerazione e per tutte le n tipologie di edifici presenti nella cella ($P_{L'}(\geq FL_j)$):

$$P_{L'}(\geq FL_j) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(\geq FL_j | Y_i)]^{N_i}$$

Queste analisi sono state applicate in alcune città d'Europa (WP6), in particolare in Austria (Syner-G D6.2 2013), Grecia (Syner-G D6.1 2013) e Italia (Syner-G D6.3 2012).

2.2.3 Strade

Tra gli elementi che compongono una rete di trasporto anche le strade stesse possono subire dei danni che ne alterino la funzionalità. In particolare si considerano i tunnel, i rilevati, le trincee e le pavimentazioni in generale.

In ambito americano, la procedura descritta da HAZUS (FEMA 2003) considera solamente le pavimentazioni stradali e i tunnel, per i quali definisce diversi stati di danno. Per gli stessi indica delle curve di fragilità e delle curve di ripristino della funzionalità in funzione del tempo e del tipo di danno subito.

Invece, nel contesto europeo, il Syner-G analizza i potenziali danni di pavimentazioni, rilevati e trincee stradali, e tunnel (Syner-G D3.7 2011). Come HAZUS, si introduce una classificazione di questi elementi, i livelli di danno che essi possono subire, e, a seconda di questi ultimi, le azioni da adottare per un tratto di strada (aperto totalmente o parzialmente, oppure chiuso). Infine, per ogni elemento, sono state sviluppate le relative curve di fragilità.

2.3 MODELLIZZAZIONE DELL'INTERAZIONE DOMANDA-OFFERTA

Lo studio del comportamento del sistema di trasporto in seguito ad un sisma è molto complesso proprio perchè le *performance* del sistema variano sia per la riduzione della capacità dei *links* danneggiati dal terremoto, sia per la modifica della domanda, del tempo di percorrenza e della lunghezza dei percorsi (Nojima & Sugito 2000). Queste interazioni tra la domanda e l'offerta di trasporto sono il risultato dei comportamenti degli individui; infatti gli individui cambiano il loro comportamento sulla base delle variazioni di fattori esterni o interni; le prime riguardano le alterazioni dell'offerta, come la chiusura di un ponte o la variazione di capacità di un *link*; le seconde si riferiscono a modifiche dello stato della persona, per esempio l'impiego lavorativo, il luogo di lavoro o di abitazione, l'età o il numero di figli (Hunt et al. 2002).

Cairns et al. (Cairns et al. 2002) e Hunt et al. (Hunt et al. 2002) hanno analizzato i cambiamenti della domanda in seguito a variazioni dell'offerta di trasporto nel breve periodo; in particolare Hunt et al. (Hunt et al. 2002) hanno ricercato le cause delle variazioni di flusso in seguito alla chiusura del *Centre Street Bridge* in Calgary (Canada); l'analisi ha identificato cambiamenti nei comportamenti degli utenti, dipendenti dalla loro conoscenza degli itinerari alternativi. Invece nel lungo periodo le variazioni dell'offerta di trasporto possono causare cambiamenti più marcati nell'uso del territorio, come lo spostamento del luogo di residenza o di lavoro (Sivakumar 2007).

Questa stretta interazione tra domanda e offerta di trasporto è ben rappresentata dallo schema proposto da Wegener (Wegener 2004) e di seguito riportato:

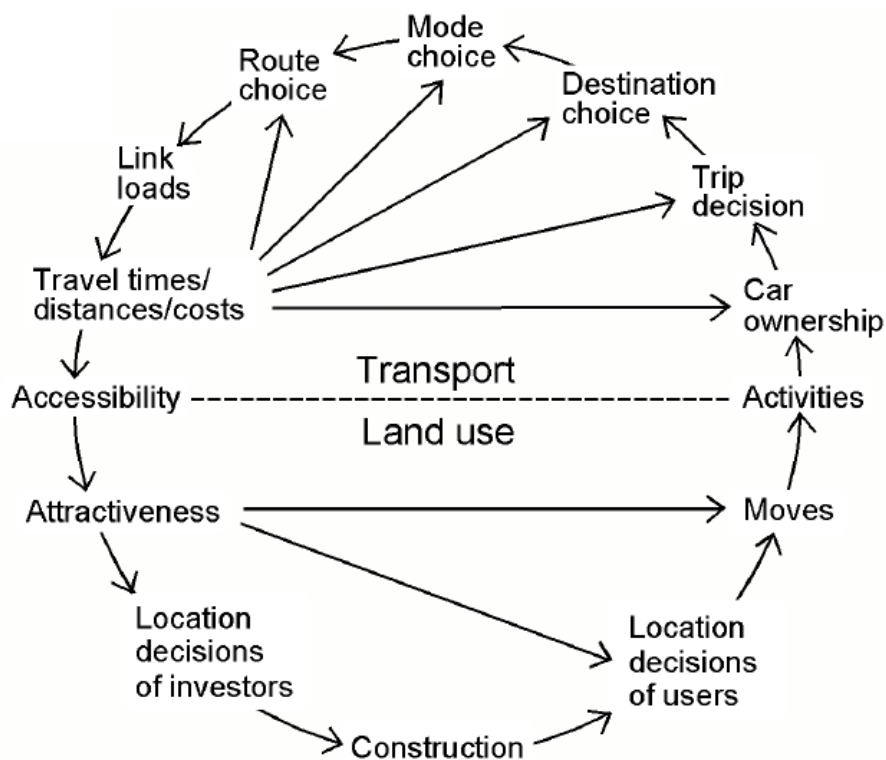


Figura 2-1: rappresentazione dell'interazione tra domanda e offerta di trasporto; fonte: (Wegener 2004)

Le relazioni sono brevemente elencate dall'Autore (Wegener 2004):

- La configurazione del territorio urbano determina la dislocazione delle attività degli individui (lavoro, educazione, svago, acquisti);
- La necessità di condurre le attività in diversi luoghi genera gli spostamenti delle persone (per questo motivo la domanda di trasporto è derivata);
- Le caratteristiche delle infrastrutture di trasporto rendono possibili gli spostamenti e possono essere quantificate attraverso l'accessibilità;
- La diversa accessibilità delle zone contribuisce a determinare le decisioni sui luoghi di svolgimento delle attività e quindi i cambiamenti nell'uso del territorio.

Nel caso si verifichi un terremoto, si ha una modificazione dell'offerta dovuta ai danni da esso provocati; questa fase può essere considerata, nel precedente diagramma, ottenendo:

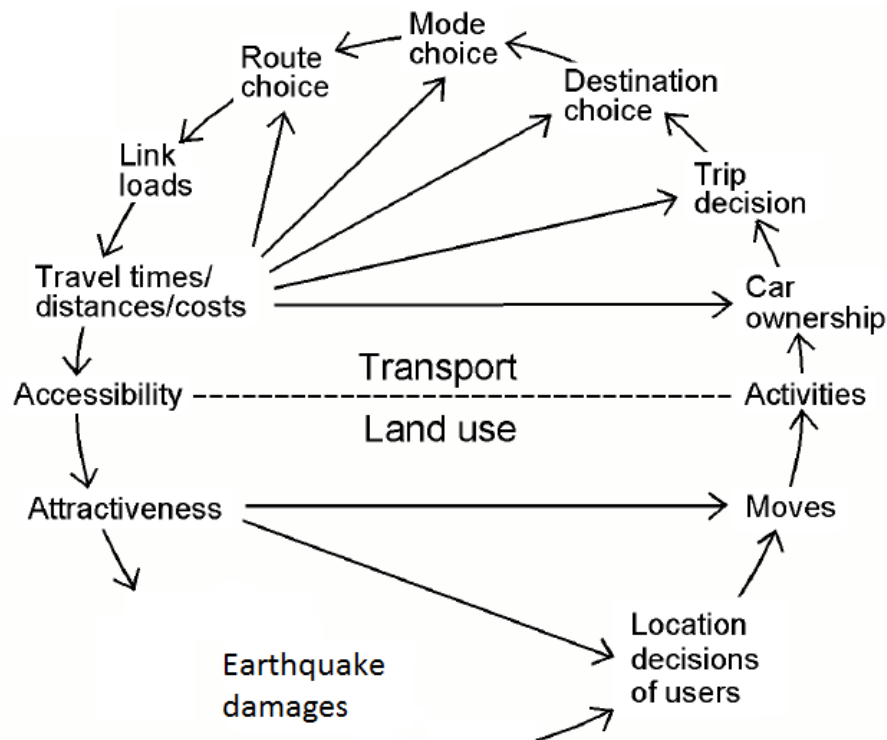


Figura 2-2: modifica del processo di interazione tra domanda e offerta di trasporto per considerare i danni alle infrastrutture del sistema; fonte: adattamento da (Wegener 2004)

In generale, in un sistema di trasporto, esistono tre diversi livelli di equilibrio tra domanda ed offerta (Ortuzar & Willumsen 2011):

1. *Road network equilibrium*: considerando una matrice di domanda fissa, gli utenti cercano un percorso che minimizzi il costo da essi sostenuto. Questa procedura prevede l'esplorazione della rete con un continuo cambio di itinerari. L'equilibrio è raggiunto quando gli utenti non sono più in grado di trovare un percorso migliore, in termini di costo, per il loro spostamento;
2. *Multimode network equilibrium*: quando la congestione aumenta, gli utenti e i gestori del trasporto pubblico, che condivide le stesse infrastrutture viarie di quello privato, possono modificare modo e /o percorso utilizzato i primi, i percorsi delle linee i secondi, facendo variare, a loro volta, il flusso stesso sui *links*;
3. *System equilibrium*: quando una generica matrice Origine-Destinazione è caricata sulla rete, produce dei flussi che determinano una variazione dei livelli di servizio con cui la matrice stessa era stata stimata; è quindi necessario utilizzare questi ultimi

come input negli stadi precedenti di generazione della domanda e ripetere l'operazione finché i livelli di servizio rimangono invariati.

I paragrafi seguenti presentano una sintesi dei modelli più utilizzati per valutare le interazioni domanda-offerta nel caso di un sisma; in particolare essi sono:

- *Four-step model*, impiegato da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005) e Chang et al. (Chang et al. 2011; Chang 2012);
- Activity-Based model, usato da Miller (Miller 2014; Miller et al. 2014).

2.3.1 Four- step model

2.3.1.1 Formulazione classica

Il modello a quattro stadi prevede [appunti], per semplicità, di separare le scelte degli utenti in quattro fasi; le variabili utilizzate sono aggregate e costituiscono il risultato delle scelte individuali. Inoltre il modello non considera l'orario di inizio dello spostamento, quindi è di tipo statico, e fissa lo scopo degli spostamenti, perciò è necessario condurre un'analisi separata per ciascun motivo. Di conseguenza, tra le caratteristiche elementari degli spostamenti, restano da determinare: l'origine e la frequenza, la destinazione, il modo e il percorso; questi sono valutati rispettivamente attraverso ciascuno dei quattro stadi:

1. Generazione;
2. Distribuzione;
3. Ripartizione modale;
4. Assegnazione degli spostamenti alla rete.

Il risultato di ogni fase costituisce l'input dello stadio successivo. Di seguito si descrive brevemente ogni modello utilizzando le seguenti notazioni (Appunti 2013):

N → numero totale di centroidi nell'area di studio;

i → indice della generica zona di origine ($i = 1, \dots, N$);

j → indice della generica zona di destinazione ($j = 1, \dots, N$); con $i \neq j$;

M_{ij} → numero totale dei modi di trasporto che collegano la coppia ij ;

m → indice del generico modo di trasporto ($m = 1, \dots, M_{ij}$);

R_{ijm} → numero totale di percorsi che collegano la coppia ij con il modo m ;

r → indice del generico percorso ($r = 1, \dots, R_{ijm}$).

STADIO 1: Generazione degli spostamenti

In questo stadio si possono determinare (Appunti 2013):

- T_i → numero di spostamenti prodotti dalla zona i (Modello di produzione degli spostamenti);
- T_j → numero di spostamenti attratti dalla zona j (Modello di attrazione degli spostamenti);
- T_i e T_j contemporaneamente.

Nel primo caso le variabili utilizzate sono legate alle attività residenziali, invece, nel secondo, sono relative ad attività non residenziali (ad esempio, commerciali). Nel terzo caso si deve ottenere che: $\sum T_i = \sum T_j$ (Ortuzar & Willumsen 2011; Appunti 2013).

I metodi utilizzati (Ortuzar & Willumsen 2011; Appunti 2013) per determinare queste variabili sono:

- Analisi di regressione: modelli usati sia per gli spostamenti in attrazione che per quelli in generazione, stimati come la combinazione, lineare o meno, di variabili esplicative del fenomeno e relativi coefficienti;
- Analisi di categoria: modelli che si utilizzano solo per la produzione di spostamenti. Essi prevedono di suddividere i nuclei di famiglie in diverse categorie socio-economiche, e stimare gli spostamenti prodotti da ciascuna di esse in modo sperimentale.

Ciascuno dei due metodi è utilizzato anche per stimare gli spostamenti relativi ad un periodo successivo a quello della calibrazione.

STADIO 2: Distribuzione degli spostamenti

Con questa fase è possibile determinare, per ogni coppia Origine-Destinazione ij , T_{ij} , cioè il numero di spostamenti che si verificano dalla zona i alla zona j ; con la condizione che i sia diverso da j . In questo modo si costruisce una matrice Origine-Destinazione, per uno specifico motivo e per un determinato riferimento temporale (Appunti 2013).

In particolare, esistono tre tipologie di modelli di distribuzione:

- Vincolati in origine: quando, nello stadio precedente, si calcolano i T_i ;
- Vincolati in destinazione: se, invece, sono noti i T_j ;
- Doppia vincolati: quando sono stati determinati sia i T_i che i T_j .

L'intensità degli spostamenti dipende dall'attrattività della zona in destinazione e dalla separazione spaziale (distanza) tra le zone. Sulla base di questa considerazione, il modello più utilizzato è quello di tipo Gravitazionale (in analogia con la nota formulazione dalla fisica). Nel caso di vincolo in origine e in destinazione, questo assume la seguente forma funzionale (Ortuzar & Willumsen 2011):

$$T_{ij} = A_i T_i B_j T_j f(c_{ij})$$

Dove: A_i e B_j sono fattori relativi rispettivamente alle zone in origine e in destinazione; $f(c_{ij})$ è detta funzione di impedenza e rappresenta il disincentivo allo spostamento (Ortuzar & Willumsen 2011), in quanto dipende dal costo del viaggio da i a j (c_{ij}) oltre che da alcuni parametri che devono essere calibrati. Il costo (generalizzato), a sua volta, può essere funzione di diverse variabili come la distanza, il tempo di percorrenza o il costo monetario.

STADIO 3: Ripartizione modale degli spostamenti

Questo passo prevede di suddividere la matrice Origine-Destinazione precedentemente ottenuta nei vari modi di trasporto presi in considerazione; quindi ottenendo i T_{ijm} , ossia il numero di spostamenti dalla zona i alla destinazione j che avvengono con il modo m . In questo caso il vincolo da rispettare è il seguente: $\sum_{m=1}^{M_{ij}} T_{ijm} = T_{ij}$ (per ogni i e j , e con $i \neq j$).

Una volta fissati il motivo ed il periodo di inizio dello spostamento, i fattori che influenzano la scelta del modo di trasporto possono essere raggruppati in (Ortuzar & Willumsen 2011; Appunti 2013):

1. Caratteristiche dei modi di trasporto disponibili: come tempo di percorrenza, costi monetari oppure variabili qualitative e parametri specifici del modo (disponibilità di parcheggio, per le auto, o regolarità del servizio, per il trasporto pubblico);
2. Caratteristiche degli utenti: come reddito, età, possesso della patente di guida o disponibilità di autovetture.

Questi modelli possono essere di tipo aggregato, se basati su informazioni zonali, o di tipo disaggregato, se invece, derivano da dati sulle famiglie o sugli individui (Ortuzar & Willumsen 2011). In particolare i metodi disaggregati prevedono di utilizzare una funzione di utilità, per quantificare l'utilità (U_{mh}) del generico individuo h nello scegliere il modo m :

$$U_{mh} = b_m + \sum_{i=1}^k a_i X_{imh}$$

Dove: b_m è una costante specifica del modo m ; X_{imh} è una delle caratteristiche precedentemente elencate; a_i è il peso associato alla caratteristica X_{imh} ; i è un indice che varia con il numero delle k caratteristiche considerate.

Il calcolo dei T_{ijm} avviene tramite modelli probabilistici, come il modello Logit; in particolare, quest'ultimo determina la probabilità (P_{mh}) che il generico individuo h scelga il modo m , per ogni modo $m \in M_h$ (insieme dei modi disponibili all'utente h):

$$P_{mh} = \frac{\exp(U_{mh})}{\sum_{q \in M_h} \exp(U_{qh})}$$

Infine se si considera la popolazione omogenea dal punto di vista delle caratteristiche individuali (Appunti 2013), la funzione di utilità dipende solo dalle variabili relative al modo di trasporto; quindi i T_{ijm} possono essere così determinati: $T_{ijm} = P_m \cdot T_{ijm}$.

STADIO 4: Assegnazione degli spostamenti alla rete

In questa fase ciascuna delle matrici contenenti i T_{ijm} è caricata sulla rete, ottenendo il flusso (F_{ijmr}) sul generico percorso r che, con il modo m , collega la coppia $i-j$, ed il vettore

dei flussi d'arco \vec{f} . Quindi la struttura globale comprende un modello di scelta di percorso che riceve in input i costi d'uso dei *links*, le caratteristiche topologiche della rete e gli spostamenti T_{ijm} . A differenza dei tre stadi precedenti, si esegue un'unica assegnazione indipendente dal motivo, poiché le scelte di percorso sono di solito svincolate da quest'ultimo, ma, piuttosto, sono condizionate dai costi del cammino [appunti]. Inoltre, poiché si suppone, per semplicità, che non vi siano interazioni tra diversi modi di trasporto (Appunti 2013; Appunti 2014), non si considera il *Multimode network equilibrium*; per questo si conduce un'assegnazione separata per ogni modo. I vincoli di conservazione degli spostamenti impongono che: $\sum_{r=1}^{R_{ijm}} F_{ijmr} = T_{ijm}$ (per ogni i, j e m , e con $i \neq j$).

Le ipotesi fondamentali utilizzate in questa fase sono le seguenti [appunti e appunti2]:

1. Stazionarietà: tutte le variabili che descrivono lo stato della rete sono indipendenti dal tempo;
2. Funzioni di costo separabili: il flusso su un *link* dipende solo dal costo di quell'arco;
3. Razionalità dei comportamenti di scelta del percorso: l'utente sceglie sempre il percorso di minimo costo percepito.

I modelli di assegnazione si possono classificare a seconda di (Appunti 2013; Appunti 2014):

➤ Costi d'uso:

- Fissi: il costo di un link è costante rispetto al flusso che lo attraversa (quest'ipotesi è valida se il flusso è molto basso);
- Variabili: il costo di un arco aumenta con il suo flusso.

➤ Conoscenza della rete da parte degli utenti:

- Perfetta: tipica dei pendolari in condizioni "normali";
- Imperfetta o aleatoria: se vi sono errori di percezione, come nel caso di utenti occasionali o pendolari in condizioni "eccezionali".

In questo modo si possono rappresentare come (Appunti 2013; Appunti 2014):

	Conoscenza perfetta	Conoscenza imperfetta o aleatoria
Costi Fissi	Tutto o Niente	Caricamento Stocastico
Costi Variabili	Equilibrio Deterministico	Equilibrio Stocastico

Tabella 2-10: rappresentazione schematica della classificazione dei modelli di assegnazione; fonte: (Appunti 2013; Appunti 2014)

I due modelli di equilibrio considerano il *Road network equilibrium*; pertanto il problema dell'assegnazione di equilibrio può essere formulato come un problema del punto fisso, secondo cui i flussi dipendono da sé stessi; cioè si ha che (Appunti 2014):

$\vec{f} = A \cdot \vec{F}$, dove: A è la matrice di incidenza archi-percorsi e \vec{F} è il vettore dei flussi di percorso;

$\vec{F} = \vec{h}(\vec{C})$, dove: \vec{C} è il vettore dei costi di percorso;

$\vec{C} = A^T \cdot \vec{c}$, dove: \vec{c} è il vettore dei costi d'arco;

$\vec{c} = \vec{c}(\vec{f})$, che rappresenta la dipendenza dei flussi dai costi.

In particolare, sostituendo, si ottiene che: $\vec{f} = A \cdot \vec{h}(A^T \cdot \vec{c}(\vec{f}))$, da cui: $\vec{f} = \vec{z}(\vec{f})$, ovvero i flussi dipendono da sé stessi, finché non si raggiunge una congruenza tra costi e flussi [appunti2]. Questo problema è chiamato problema del punto fisso ed è risolto con algoritmi iterativi.

2.3.1.2 Combined model

Lo scopo dell'utilizzo di questa formulazione del *Four-Step Model* è quello di raggiungere il *System Equilibrium* (Ortuzar & Willumsen 2011); ovvero di trovare un equilibrio tra la domanda di trasporto e le misure dei livelli di servizio da essa prodotti in seguito all'assegnazione. Di conseguenza la domanda non si considera fissa, ma variabile, ovvero elastica in quanto dipendente dai costi di percorso. Questo è corretto soprattutto nel caso di cambiamenti importanti nella struttura della rete o nel caso di lunghi periodi di analisi (Ortuzar & Willumsen 2011). Secondo Ortuzar e Willumsen (Ortuzar & Willumsen 2011) l'approccio più semplice consiste nell'applicare il modello a 4 stadi una prima volta, ottenendo dei costi di percorrenza che generano dei livelli di servizio, nell'utilizzare questi

ultimi per una nuova iterazione del modello, e nel ripetere la procedura fino a convergenza. Il primo (Ortuzar & Willumsen 2011) algoritmo che prevede l'applicazione di questo metodo è stato sviluppato da Suzanne Evans nel 1976 (Evans 1976), che ha introdotto il nome stesso del modello.

Lo stesso algoritmo è stato applicato da Shinozuka et al. (Shinozuka et al. 2005), da Chang (Chang 2012) e da Chang et al. (Chang et al. 2011) per la valutazione della domanda post-sisma. Infatti, come indicato nel capitolo 2.1.1.3, essi (Shinozuka et al. 2005; Chang et al. 2011; Chang 2012) hanno introdotto dei fattori di riduzione della matrice Origine-Destinazione pre-sisma sulla base dei danni agli edifici causati dal terremoto (*Trip Reduction Model*).

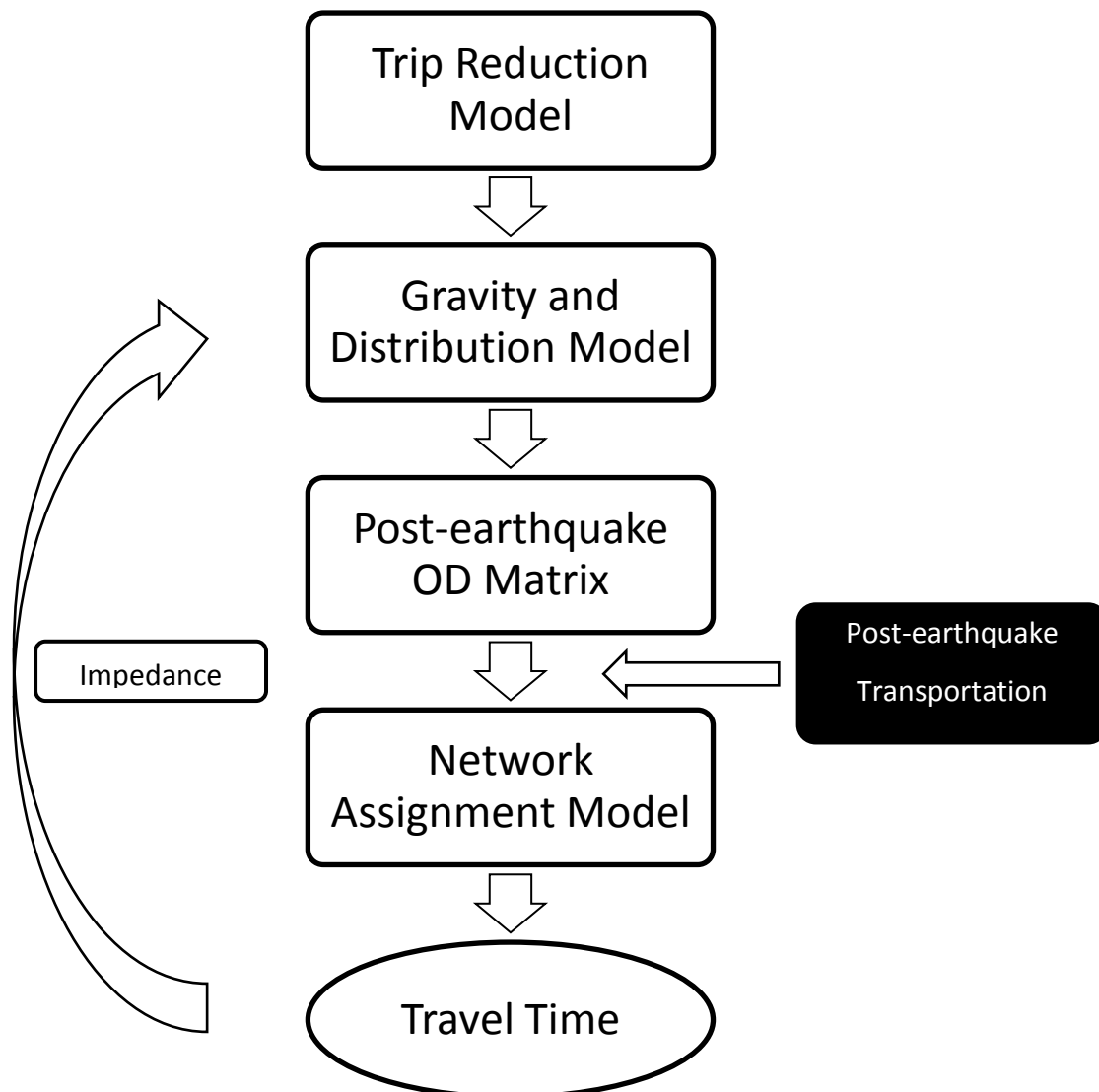


Figura 2-3; struttura del combined model; fonte: Elaborazione da (Shinozuka et al. 2005)

Come indicato dal grafico sopra riportato, i fattori di riduzione sono introdotti nella fase consecutiva di generazione e distribuzione degli spostamenti, in modo da ottenere la matrice Origine-Destinazione post-sisma. Successivamente il modello di assegnazione carica la matrice di domanda sulla rete opportunamente modificata per considerare i danni prodotti dal terremoto; tra i risultati generati da quest'ultima fase è presente il tempo di percorrenza a carico, che è utilizzato per aggiornare la funzione di impedenza (*Impedance*) contenuta nel modello gravitazionale. In questo modo è possibile ripetere i tre stadi del modello, finché la matrice di domanda produce gli stessi livelli di servizio che l'hanno generata.

2.3.2 *Activity-based model*

Il modello a 4 stadi (FSM) è stato realizzato allo scopo di valutare l'impatto di nuovi investimenti nelle infrastrutture di trasporto nel secondo dopoguerra, in un periodo storico in cui la rapida crescita dell'offerta favoriva l'aumento della popolazione e delle attività economiche (McNally & Rindt 2008). Negli anni Settanta, in seguito a cambiamenti nelle politiche urbane, ambientali ed energetiche, emersero diversi studi che fondarono le basi teoriche ed empiriche dei modelli Activity-Based (ABM) (McNally & Rindt 2008). In particolare lo sviluppo di questi metodi può essere ricondotto a diversi fattori:

1. La variazione delle caratteristiche e delle cause della domanda di trasporto: si è assistito ad un aumento dei flussi su strada senza che questo fosse correlato ad una crescita della popolazione (Meloni & Spissu 2003);
2. L'incapacità degli interventi basati unicamente sull'ampliamento dell'offerta di trasporto di soddisfare la variazione della domanda: infatti devono essere modellati anche misure di regolazione della domanda (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Bhat et al. 2003);
3. I limiti del modello tradizionale a 4 stadi dovuti, principalmente, alla non considerazione della domanda di trasporto come derivata dall'esigenza degli individui di compiere determinate attività (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Ortuzar & Willumsen 2011; Sivakumar 2007; Shan et al. 2012; Bifulco et al. 2010; Bhat et al. 2003; Bowman 1995).

L'ultimo aspetto consente di analizzare le differenze sostanziali tra il modello a 4 stadi ed il modello Activity-Based. Innanzi tutto è necessario introdurre alcune definizioni (Ortuzar & Willumsen 2011) utili per capire i concetti espressi in seguito:

- Un' *attività* è definita come un'interazione continua con l'ambiente circostante, un servizio o una persona, all'interno di uno stesso contesto socio-spaziale, e comprende anche i perditempo prima e dopo l'evento stesso;
- Uno *stage* è un movimento continuo attraverso un solo modo di trasporto ed è costituito anche dai perditempo ad esso connessi (ad esempio il tempo di attesa presso la fermata dell'autobus);
- Un *trip* è una sequenza di *stages* tra due diverse attività;
- Un *tour* è una sequenza di *trips* che cominciano e finiscono nello stesso luogo;
- Una *trip chain*, o catena di spostamenti, è un tour che però potrebbe non terminare nello stesso luogo.

Mentre il modello a 4 stadi identifica gli spostamenti (*trips*) come unità fondamentali dell'analisi, il modello Activity-Based si concentra sulle attività (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Sivakumar 2007); secondo diversi Autori (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008) la struttura di questi ultimi metodi è stata sintetizzata da Jones (Jones et al. 1990), secondo cui "il viaggio è analizzato all'interno di schemi di comportamento giornaliero o multigiornaliero, correlato a, o derivato da, differenze negli stili di vita e nella partecipazione alle attività della popolazione (Meloni & Spissu 2003; Jones et al. 1990). Attraverso questa definizione le attività da compiere sono le cause degli spostamenti (Meloni & Spissu 2003), perciò la comprensione del comportamento di viaggio diventa secondaria a quella delle attività (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008). In questo modo si concretizza il concetto per cui la mobilità è derivata dalla necessità di compiere determinate attività (Meloni & Spissu 2003; Ortuzar & Willumsen 2011; McNally & Rindt 2008; Sivakumar 2007; Bhat et al. 2003; Bifulco et al. 2010); infatti gli individui prima organizzano le attività da svolgere nella giornata, e, solo sulla base di queste, valutano le tappe da effettuare nei loro viaggi, e quindi il numero di *trips* da compiere (Bhat et al. 2003).

Il seguente esempio permette di comprendere la differenza tra le unità di analisi che i due approcci (*Trip-Based* e *Activity-Based*) adottano.

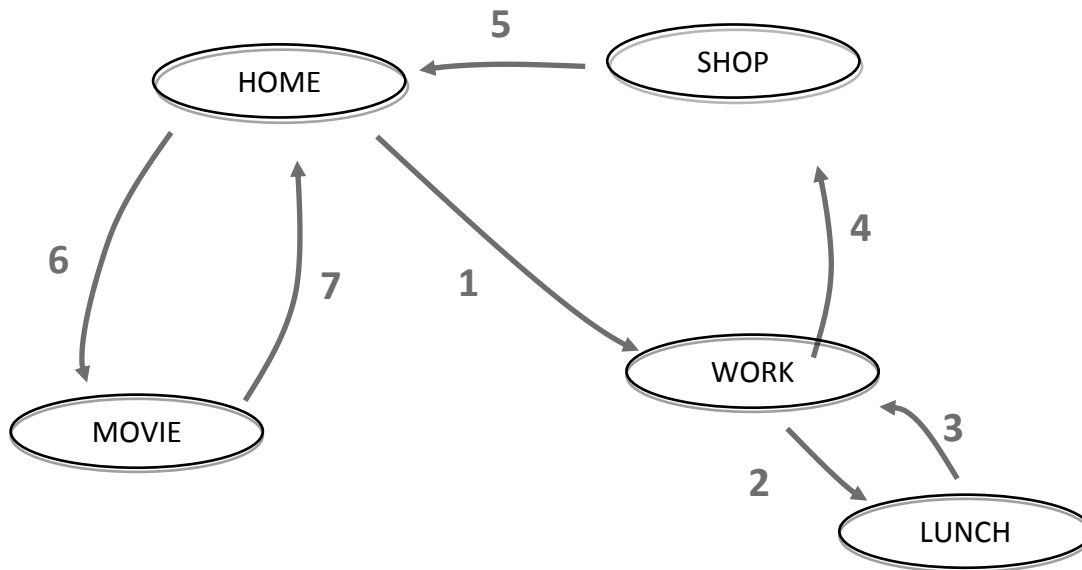


Figura 2-4; rappresentazione di una possibile sequenza di attività e relativi spostamenti compiuti da un individuo in una generica giornata lavorativa; si riporta il numero d'ordine ed il motivo, ulteriori elementi in sempio di una sequenza di spostamenti di una giornata lavorativa relativa ad un generico individuo; il dettaglio degli spostamenti è riportato nella Tabella 2-11; fonte: rielaborazione da (Bradley et al. 1999)

Approccio	Unità di analisi	Trips
Trip-Based	1 home-based work (HBW) trip	1
	3 non-home-based work (NHBW) trips	2-3-4
	3 home-based other (HBO) trips	5-6-7
Activity-Based	Attività giornaliera costituita da un primary work tour, con un work-based subtour e una sosta nel ritorno a casa, e un secondary non-work tour	1-2-3-4-5-6-7

Tabella 2-11; fonte: rielaborazione da (Bradley et al. 1999)

Proprio per il fatto che il modello a 4 stadi assume come unità di analisi il singolo *trip*, considerato indipendente, porta tale metodo ad ignorare le relazioni spaziali e temporali tra i *trips* che una persona compie (McNally & Rindt 2008; Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003; Bifulco et al. 2010). In particolare esso modella in maniera indipendente gli home-

based *trips* e gli non-home-based *trips*. Si supponga (Bhat et al. 2003) che una persona si sposti in auto da casa al luogo di lavoro, e poi, sulla via del ritorno, effettui una sosta per degli acquisti (Figura 2-5); in seguito ad un intervento di miglioramento delle linee di trasporto pubblico tra l'abitazione e l'azienda, il modello a 4 stadi porta ad un cambiamento di modo di trasporto, dalla macchina al mezzo pubblico per il corrispondente spostamento; nella realtà tale variazione non può avvenire per il fatto che l'individuo ha deciso preventivamente di effettuare una sosta in un negozio.

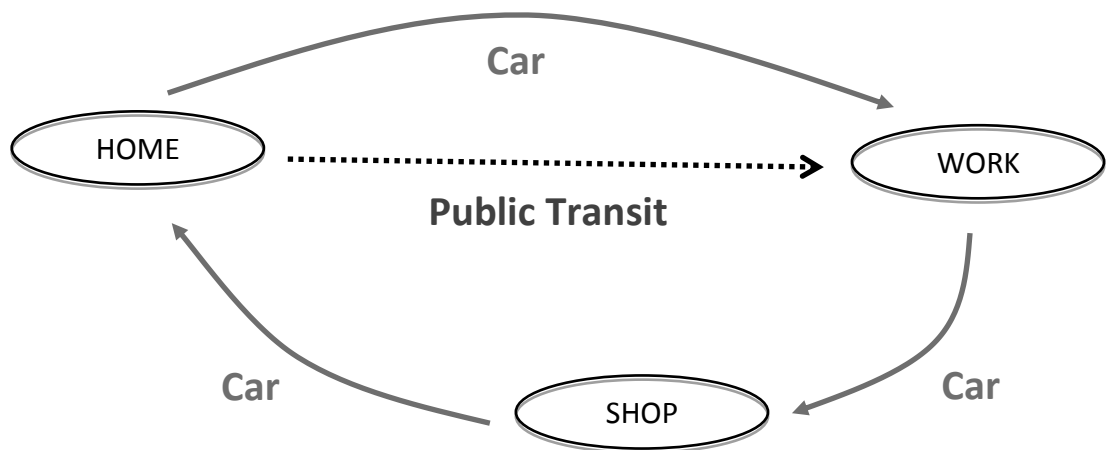


Figura 2-5: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)

Inoltre il non considerare il trip all'interno di uno schema di attività comporta un'errata valutazione degli effetti delle politiche sul sistema di trasporto: se, per esempio, si attuano delle misure per eliminare le soste nel viaggio di ritorno dal lavoro, una persona che prima si fermava per fare acquisti (Figura 2-6), ora può tornare a casa ed effettuare un *secondary tour* con tale scopo (Figura 2-7); il modello tradizionale non è in grado di cogliere questa redistribuzione temporale degli spostamenti (Bhat et al. 2003). Infine il FSM non prevede di modellare le relazioni spaziali tra gli spostamenti, quando, nella realtà, la decisione del luogo in cui effettuare una sosta per un'attività influenza anche la locazione delle fermate successive (Bhat et al. 2003).



Figura 2-6; esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)



Figura 2-7; esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)

Oltre agli aspetti precedenti, il modello a 4 stadi non prende in esame i vincoli temporali e spaziali che una persona deve considerare quando pianifica le proprie attività giornaliere (Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003; McNally & Rindt 2008; Bowman 1995). Infatti, a seconda della disponibilità del tempo, un individuo può scegliere se, dove, e quando compiere determinate attività [Meloni]. Inoltre gli spostamenti di un utente sono legate anche ai *trips* di altri individui nella stessa famiglia (Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003; McNally & Rindt 2008; Bifulco et al. 2010); si supponga (Bhat et al. 2003) di avere una famiglia composta da tre persone: l'individuo che lavora (1) compie solitamente lo schema di attività illustrato in Figura 2-8 (in particolare durante la mattina, prima di recarsi al lavoro, lascia il figlio a scuola), invece l'altra persona (2) non si sposta di casa; se, per esempio, si introduce una tariffa di congestione, l'utente 1 lascerà il compito di portare il figlio a scuola alla persona 2, che può decidere di effettuare anche una fermata per acquisti nella zona vicina (Figura 2-9); questa variazione del numero di spostamenti non è colta dal FSM poiché lavora a livello aggregato, a differenza del modello Activity-Based che opera ad un livello fortemente disaggregato (cioè individuale) [Bhat2003].

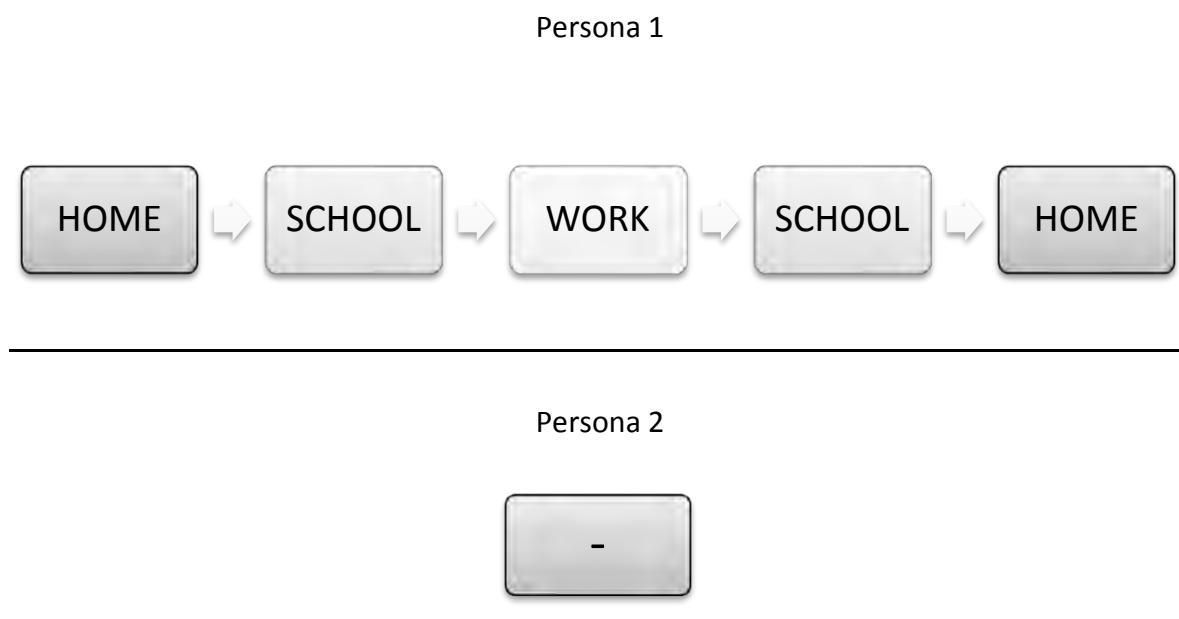


Figura 2-8: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)

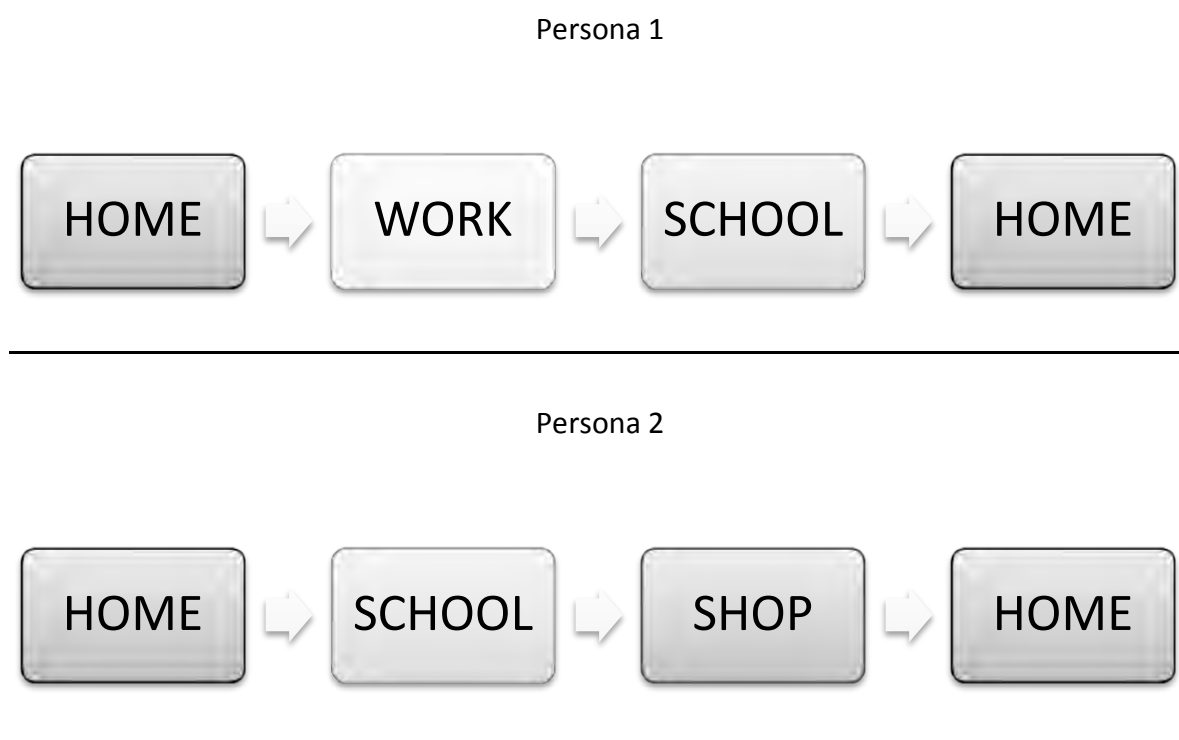


Figura 2-9: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)

Un'altra differenza del modello a 4 stadi, rispetto all'ABM, riguarda la trattazione del tempo. Il primo metodo, infatti, considera il tempo come fissato durante tutto il periodo di analisi, inoltre non è utilizzato come attributo nella generazione degli spostamenti e quindi non influenza la loro esistenza (Bhat et al. 2003; Meloni & Spissu 2003). Esso, invece, è

introdotto solamente a partire dalla fase di distribuzione e solamente come un costo da pagare per effettuare gli spostamenti (Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003) che gli utenti tendono a minimizzare (Meloni & Spissu 2003). Nella realtà il fenomeno è più complesso; si consideri (Bhat et al. 2003) infatti una persona che abitualmente finisce di lavorare alle 17:00, si reca in un negozio per 25 minuti, e poi torna a casa alle 18:00 (Figura 2-10); nel caso termini il lavoro alle 16:00, egli può decidere di effettuare gli stessi spostamenti di prima, ed essere a casa alle 17:00, prima dell'ora di punta (Figura 2-11); oppure, avendo più tempo a disposizione, può recarsi presso un punto vendita più distante del precedente in cui trascorre più tempo, e tornare all'abitazione alle 18:00 (Figura 2-12).



Figura 2-10: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)



Figura 2-11: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)



Figura 2-12: esempio di attività; fonte: rielaborazione da (Bhat et al. 2003)

Dagli esempi citati si comprende come il FSM sia inadeguato alla valutazione degli effetti delle misure di regolazione della domanda (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Bhat et al. 2003). Inoltre, nel modello a 4 stadi, il collegamento tra attività e viaggio avviene solamente nella fase di generazione (McNally & Rindt 2008); nelle fasi successive si ha un decremento del peso delle caratteristiche delle attività ed un aumento dell'influenza di quelle del viaggio (Meloni & Spissu 2003). Infine nella fase di generazione la domanda di

trasporto è indipendente dall'offerta e, solamente nella fase di distribuzione, si possono introdurre dei livelli di servizio (McNally & Rindt 2008); quindi, in particolare, le variazioni dell'offerta non influenzano la scelta di compiere o meno degli spostamenti, poiché la generazione di questi ultimi non è condizionata dal costo generalizzato (McNally & Rindt 2008; Meloni & Spissu 2003). Per questo motivo, e per i precedenti, attraverso il modello a 4 stadi non è possibile valutare la domanda indotta (McNally & Rindt 2008; Meloni & Spissu 2003).

Esistono diversi tipi di modelli Activity-Based (Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003; McNally & Rindt 2008), che tuttavia condividono una stessa macro-struttura concettuale basata sui seguenti passaggi:

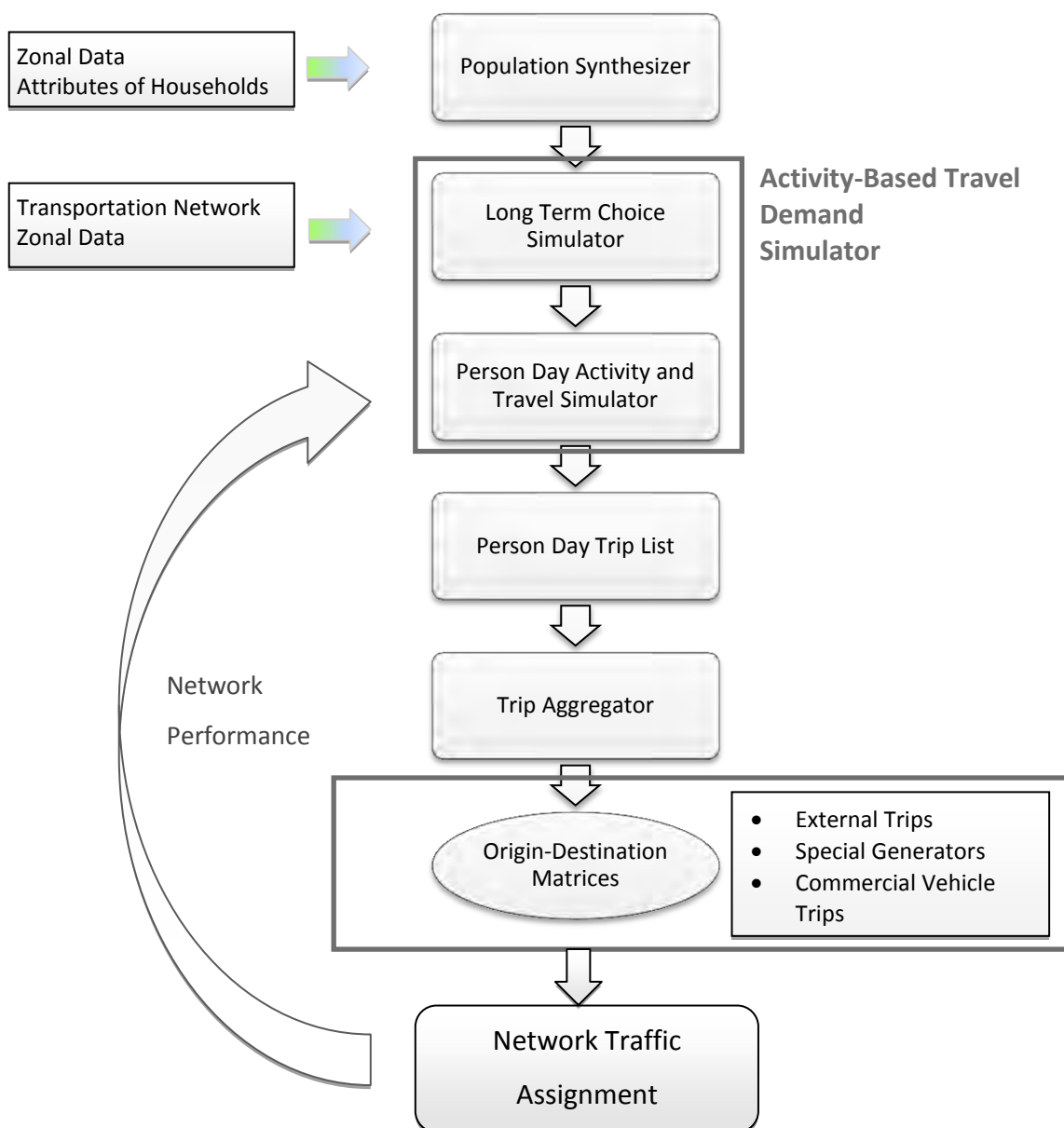


Figura 2-13: struttura generale dei modelli Activity-Based; fonte: rielaborazione da (Ortuzar & Willumsen 2011; Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006)

Il *Population Synthesizer* (o Sintetizzatore di Popolazione) riceve come input le caratteristiche delle zone di traffico in analisi (come il numero di abitanti) e gli attributi delle famiglie (Ortuzar & Willumsen 2011); solitamente, questi ultimi possiedono un elevato livello di dettaglio (numero, età, reddito dei componenti, ...) solamente per un campione rappresentativo di famiglie tra le varie zone. Queste caratteristiche sono estese a tutte le famiglie residenti nell'area di studio dal *Population Synthesizer*, creando la popolazione su cui il modello Activity-Based sarà applicato per determinarne gli spostamenti.

Successivamente, il *Travel Demand Simulator* necessita dei dati zonali e delle caratteristiche della rete di trasporto, in particolare i livelli di servizio. Questo blocco si compone di due fasi consecutive:

- *Long Term Choice Simulator*: in questa fase si generano le scelte a lungo termine per ogni membro delle famiglie in esame, come il luogo di lavoro, della scuola o il numero di auto possedute (Ortuzar & Willumsen 2011; Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006);
- *Person Day Activity and Travel Simulator*: con questo strumento si creano le strutture di attività e di viaggio per ogni individuo (Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006); nella maggior parte dei casi il periodo in considerazione è costituito da una giornata (Bhat et al. 2003) e, molto spesso, la struttura di questo modello è di tipo *Multinomial Logit* oppure *Nested Logit* (Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006; Bhat et al. 2003; Ortuzar & Willumsen 2011).

In questo modo si ottiene una lista di *tours* e *trips* per ogni persona della popolazione (*Person Day Trip List*), in cui ogni spostamento è caratterizzato da molti dettagli come l'origine, la destinazione, il periodo di partenza e di fine, la durata o il numero di fermate. Tali informazioni sono aggregate per periodo e per modo di trasporto attraverso il *Trip Aggregator*, ottenendo, in tal modo, delle matrici Origine-Destinazione (Ortuzar & Willumsen 2011).

La domanda espressa da queste matrici è generata dalla popolazione residente nell'area di studio e si esaurisce all'interno della stessa (Shan et al. 2012; Sacramento Area Council of Governments with assistance from D K S Associates-Bradley Research and Consulting 2008; Zhang et al. 2013; Ortuzar & Willumsen 2011). Per modellare i restanti tipi di spostamenti è

necessario aggiungere (Ortuzar & Willumsen 2011; Bowman & Bradley 2005; Bowman et al. 2006; Sacramento Area Council of Governments with assistance from D K S Associates-Bradley Research and Consulting 2008):

- Gli spostamenti che provengono dall'esterno dell'area di studio (*External Trips*);
- Gli spostamenti generati da luoghi specifici come aeroporti, porti, stazioni ferroviarie o caselli autostradali (*Special Generators*);
- Gli spostamenti prodotti dai veicoli commerciali (*Commercial Vehicle Trips*).

Tali spostamenti possono essere di tipo esogeno oppure semi-esogeno, cioè la generazione di alcune zone (come gli aeroporti) è introdotta dall'esterno, ma la destinazione di tali spostamenti dipende dalle attività e dalle caratteristiche dell'area di studio (Sacramento Area Council of Governments with assistance from D K S Associates-Bradley Research and Consulting 2008).

La combinazione di tutti questi tipi di spostamenti produce delle matrici che sono assegnate alla rete di trasporto, ottenendo degli indicatori di prestazione della rete (*Network Performance*), utilizzati per aggiornare i livelli di servizio impiegati nel *Travel Demand Simulator* (Ortuzar & Willumsen 2011). In questo modo si genera un procedimento iterativo che si arresta quando la domanda è in equilibrio con i livelli di servizio da essa prodotti in seguito all'assegnazione.

Gli aspetti di fondamentale innovazione del modello Activity-Based, rispetto al FSM, possono essere riassunti nei seguenti punti:

- La domanda di trasporto è derivata dalla necessità di compiere determinate attività (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Ortuzar & Willumsen 2011; Sivakumar 2007; Zhang et al. 2013; Bifulco et al. 2010; Bhat et al. 2003; Bowman & Bradley 2005);
- L'unità di analisi è la sequenza di attività (Meloni & Spissu 2003; Sivakumar 2007; McNally & Rindt 2008);
- Le caratteristiche socio-economiche degli individui e delle famiglie influenzano le attività e le caratteristiche degli spostamenti (McNally & Rindt 2008);

- I vincoli spaziali, temporali e inter-personali condizionano lo schema delle attività e quindi gli spostamenti delle persone (Meloni & Spissu 2003; Bhat et al. 2003; McNally & Rindt 2008; Bowman 1995; Bifulco et al. 2010);

Questo tipo di modello, per produrre tali risultati, necessita di dati molto dettagliati sugli individui e, molto spesso, presenta un costo computazionale molto elevato (Meloni & Spissu 2003; McNally & Rindt 2008; Ortuzar & Willumsen 2011).

2.4 VULNERABILITÀ DI UNA RETE DI TRASPORTO

2.4.1 Definizioni

Diversi autori (Berdica 2002; Taylor & D'Este 2003; Taylor 2007; Jenelius et al. 2006; Balijepalli & Oppong 2014) hanno sottolineato che non esiste una definizione di vulnerabilità largamente accettata. Uno dei primi significati del termine, con riferimento alle reti di trasporto (Rupi et al. 2014; Rupli et al. 2015; Reggiani et al. 2015), è stato fornito da Berdica (Berdica 2002); l'autrice definisce la vulnerabilità come la suscettività ad incidenti (*incidents*) che possono portare ad una significativa riduzione della funzionalità (*serviceability*) del sistema; quest'ultima è intesa come la possibilità di utilizzare un elemento della rete (nodo, arco o percorso) in un dato periodo di tempo. Invece, secondo Taylor e D'Este (Taylor & D'Este 2003), Taylor et al. (Taylor et al. 2006; Taylor 2007), e Taylor (Taylor 2008; Taylor 2012), il concetto di vulnerabilità è strettamente correlato a quello di connessione tra due aree, ovvero alla facilità con cui un individuo che si trova in una determinata zona può partecipare ad attività che si svolgono in un altro luogo utilizzando un sistema di trasporto (Taylor et al. 2006). Sulla base di questo concetto gli stessi autori hanno introdotto le seguenti definizioni:

- *Access vulnerability* (D'Este & Taylor 2001): un nodo è vulnerabile se la distruzione (o il danneggiamento) di pochi archi diminuisce significativamente l'accessibilità (*accessibility*) di quel nodo (Taylor et al. 2006; Taylor 2007; Taylor 2008; Taylor 2012);
- *Connective vulnerability* (D'Este & Taylor 2001): un link è vulnerabile se l'eliminazione (o il deterioramento) di quel link abbassa considerevolmente l'accessibilità della rete o di particolari nodi (Taylor et al. 2006; Taylor 2007; Taylor 2008; Taylor 2012).

La stessa correlazione tra vulnerabilità e accessibilità è stata utilizzata da Chen et al. (Chen et al. 2007), che hanno definito la prima come la suscettività al danneggiamento, che causa a sua volta una riduzione significativa delle funzionalità della rete, intese come capacità di spostamento di passeggeri e merci.

Infine Husdal (Husdal 2004) indica che una rete è vulnerabile quando comporta un basso livello di servizio espresso in termini di non-operabilità e non-accessibilità in determinate circostanze. In particolare, secondo l'autore (Husdal 2004) la vulnerabilità è data dalla combinazione di attributi strutturali (caratteristiche topologiche e fisiche della rete), naturali (terremoti, eventi di piena) e legati al traffico (variazioni del flusso veicolare). Successivamente Husdal (Husdal 2004) ha sottolineato che la vulnerabilità di un elemento del sistema produce dei costi per gli individui, attraverso cui questa può essere quantificata.

Tuttavia la vulnerabilità di una rete è spesso correlata ad altri concetti. Infatti Berdica (Berdica 2002) ha inserito la definizione di vulnerabilità all'interno di una cornice che comprende anche la *serviceability*, ridotta o interrotta da *incidents*, la cui probabilità di accadimento, combinata con le possibili conseguenze, costituisce il rischio (*risk*); come esemplificato dalla stessa autrice in una struttura circolare (Figura 2-14).

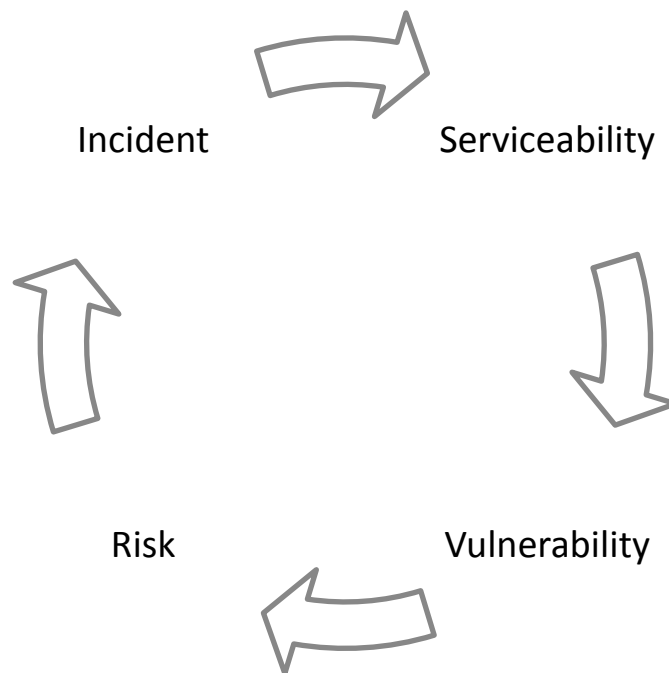


Figura 2-14: rappresentazione della relazione tra funzionalità, vulnerabilità, rischio e incidente; fonte: (Berdica 2002)

Inoltre Berdica ha correlato alla vulnerabilità anche il concetto di affidabilità (*reliability*), definendo quest'ultima come un adeguato livello di funzionalità (*serviceability*) in condizioni normali e in un determinato periodo di tempo; cioè essa descrive la possibilità di effettuare uno spostamento da una zona ad un'altra. Infine l'Autrice (Berdica 2002) ha concluso che l'affidabilità permette di valutare in maniera corretta la vulnerabilità, dato che la prima è complementare alla seconda e consente di considerare sia la natura probabilistica dei danni

che le conseguenze. A questo scopo Berdica (Berdica 2002) ha introdotto le seguenti definizioni:

- *Terminal reliability*: probabilità di raggiungere una certa destinazione;
- *Reliability of travel time*: probabilità di giungere in una certa zona in un tempo fissato;
- *Capacity reliability*: probabilità che la rete sia in grado di supportare un certo livello di traffico.

Il concetto di *reliability* è stato utilizzato anche da Bell (Bell 2000) per valutare le performance della rete a seguito della chiusura di un link. In particolare, una rete è definita affidabile se i costi di viaggio previsti dagli utenti sono accettabili anche quando gli individui sono estremamente pessimisti sullo stato della rete.

Come Berdica (Berdica 2002), anche Taylor e D'Este (Taylor & D'Este 2003), hanno correlato il rischio alla vulnerabilità, definendo il primo come composto da due fattori: la probabilità che un evento negativo si verifichi, e l'estensione e la severità delle relative conseguenze. Tale concetto è rappresentato, come in Berdica (Berdica 2002), dalla matrice di rischio (Figura 2-15).

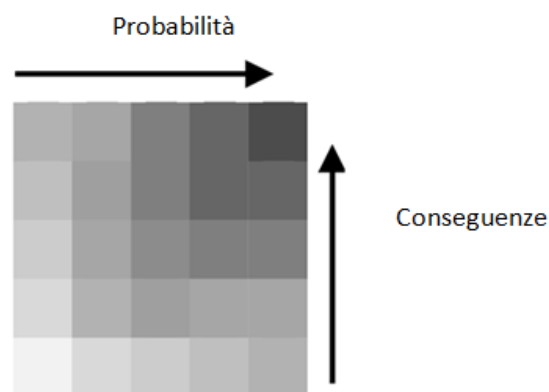


Figura 2-15: matrice di rischio; fonte: (Berdica 2002) e (Taylor & D'Este 2003)

Tuttavia Taylor e D'Este (Taylor & D'Este 2003) e Taylor et al. (Taylor et al. 2006) hanno sottolineato che lo studio della vulnerabilità consente di ampliare il campo di analisi del rischio; infatti, secondo gli Autori (Taylor & D'Este 2003; Taylor et al. 2006), la vulnerabilità permette di estendersi a quelle aree della matrice caratterizzate da conseguenze

significative e da basse, o non quantificabili, probabilità di accadimento; inoltre essa permette di indirizzare l'analisi del rischio attraverso l'identificazione di quegli elementi che risultano essere più fragili, invece di condurre uno studio del rischio su tutti i componenti del sistema.

Anche D'Este e Taylor (D'Este & Taylor 2001), Taylor e D'Este (Taylor & D'Este 2003), e Taylor (Taylor 2008; Taylor 2012) hanno valutato l'applicazione della *reliability*, indicando che la sola analisi di quest'ultima può portare a non identificare alcuni problemi della rete. In uno studio sulla rete australiana, D'Este e Taylor (D'Este & Taylor 2001), per illustrare la differenza tra affidabilità e vulnerabilità, hanno evidenziato che la chiusura della *Eyre Highway* e della *transcontinental rail line* (Figura 2-16) tra Perth ed Adelaide, pur avendo una bassa probabilità di verificarsi e mantenendo comunque la connessione della rete, avrebbe importanti conseguenze economiche. Con questo esempio gli Autori (D'Este & Taylor 2001; Taylor & D'Este 2003) hanno sottolineato che la *reliability* è correlata alla connettività e alla probabilità di accadimento, mentre la *vulnerability* è legata alle conseguenze ed indipendente dalla natura probabilistica degli eventi.



Figura 2-16: geografia dell'Australia con le principali vie di collegamento stradale; fonte: (Taylor et al. 2006)

Quest'ultima considerazione è stata sviluppata anche da Jenelius et al. (Jenelius et al. 2006), i quali, adottando la definizione di rischio come prodotto tra la probabilità di un evento e le sue conseguenze, valutabili in termini di costi monetari, hanno indicato che la vulnerabilità

può essere suddivisa in due componenti: una relativa alla probabilità e l'altra alle conseguenze. Tuttavia, data la difficoltà di stima della prima, lo studio degli Autori (Jenelius et al. 2006) si concentra sulla *conditional vulnerability*, o, come suggerito dagli Autori, sull'*exposure*, ovvero la vulnerabilità che si ha una volta assunto che un evento si verifichi; dall'indipendenza dell'*exposure* rispetto alla probabilità si ha l'uguaglianza con il concetto prima esposto di D'Este e Taylor (Jenelius et al. 2006). Inoltre, secondo Jenelius et al. (Jenelius et al. 2006), la criticità (*criticality*) di un elemento della rete, come il rischio, comprende sia la probabilità che tale componente sia danneggiato, sia le conseguenze di tale situazione nel sistema. Perciò un elemento è importante (*important*) se le conseguenze della sua eliminazione sono significative sulla rete, invece è debole (*weak*) se la sua probabilità di distruzione è elevata; se tale componente è contemporaneamente debole e importante, allora è critico (*critical*) (Jenelius et al. 2006). In modo speculare al concetto di *conditional vulnerability*, Jenelius et al. hanno introdotto la definizione di *conditional criticality*. Il legame tra i concetti di rischio (*risk*), *vulnerability* e *criticality* è sintetizzato dalla seguente tabella.

Composite concept (A*B)	Concept A	Concept B
Risk	Probability	Consequence
Vulnerability	Probability	Exposure or conditional vulnerability
Criticality	Weakness (probability)	Importance or conditional criticality

Tabella 2-12: sintesi dei concetti espressi da Jenelius; fonte: (Jenelius et al. 2006)

Dall'analisi delle definizioni di vulnerabilità di precedenti Autori (vedere (Jenelius et al. 2006)), Jenelius et al. hanno evidenziato che questa è stata valutata come la riduzione di operabilità, affidabilità e accessibilità; tuttavia la *reliability* e l'*accessibility* riguardano la vulnerabilità dal lato della domanda, invece la *serviceability* è relativa all'aspetto dell'offerta.

Infine la relazione tra vulnerabilità e affidabilità è stata analizzata anche da Husdal (Husdal 2004), indicando che la *reliability* di una rete esprime il suo grado di operabilità in condizioni di sollecitazione, cioè è la capacità di continuare a svolgere la propria funzione; invece la *vulnerability* descrive la non-operabilità della rete nelle stesse condizioni. In questo senso una rete è affidabile se possiede un alto grado di operabilità in ogni circostanza, viceversa è

vulnerabile se ha un basso livello di operabilità in determinate situazioni. Per questo motivo l'Autore (Husdal 2004) conclude che la *vulnerability* è pari alla *non-reliability* in specifiche circostanze e può essere definita come il costo per gli utenti e, in generale, per la società, conseguente la mancanza di *reliability*. Inoltre, secondo Husdal (Husdal 2004), analogamente a Taylor e D'Este (Taylor & D'Este 2003), il rischio può essere espresso come la combinazione di conseguenze e probabilità; cioè, in particolare, risulta essere il prodotto tra la vulnerabilità ad un certo evento e la probabilità che questo si verifichi.

2.4.2 Metodi di valutazione

Secondo Knoop et al. (Knoop et al. 2012) i metodi per identificare il link più vulnerabile all'interno di una rete si possono suddividere in tre gruppi.

Il primo consiste nel ridurre la capacità di un arco ed effettuare un'assegnazione per calcolare il valore degli indicatori scelti; questa procedura è ripetuta per ogni link della rete in modo da determinare quale arco è più vulnerabile. Tale approccio è stato seguito da numerosi Autori, ciascuno dei quali ha applicato i propri indicatori; in particolare alcuni hanno previsto di eliminare un arco alla volta (Jenelius et al. 2006; Jenelius 2007; Jenelius 2010; Jenelius & Mattsson 2015; Scott et al. 2006; Taylor 2008; Knoop et al. 2008; Ye et al. 2012; Rupi et al. 2014; Rupi et al. 2015; Balijepalli & Oppong 2014; El-rashidy & Grant-muller 2014), invece altri (Jenelius & Mattsson 2012; Dehghani et al. 2014; Jenelius & Mattsson 2015) hanno considerato i links presenti in specifiche aree, in modo da simulare gli effetti della chiusura di un arco sugli altri. In definitiva questi procedimenti consentono un'analisi completa della rete di trasporto, ma richiedono un elevato tempo computazionale (Knoop et al. 2012; Luathep et al. 2011).

Per ovviare a quest'ultimo svantaggio (Knoop et al. 2012; Wang et al. 2015), i metodi che appartengono al secondo gruppo prevedono di applicare dei criteri per identificare quali archi siano più probabilmente vulnerabili rispetto ad altri; in questo modo, è possibile eliminare dalla rete solo questi links e calcolare gli indici richiesti. Tra i criteri utilizzati (Wang et al. 2015) vi sono la probabilità di scelta di un percorso (D'Este & Taylor 2001; Taylor & D'Este 2003; Taylor et al. 2006; Taylor 2007; Taylor 2012) e indicatori basati sul flusso e la capacità (Knoop et al. 2012).

Infine il terzo gruppo è costituito da quei metodi che, per gli approcci utilizzati, non rientrano nei casi precedenti. In essi si ha la *game theory* di Bell (Bell 2000), in cui l'analisi della *reliability* di una rete è condotta simulando un gioco non-cooperativo tra: l'utente, che cerca un percorso che minimizzi il costo percepito, e un'entità che impone i veri costi all'utente in modo da massimizzare quelli percepiti; l'utente cerca di indovinare i costi imposti, invece l'entità il percorso scelto dal primo; all'equilibrio, l'utente non è più in grado di ridurre i costi attesi cambiando percorso, e l'entità di massimizzare i costi reali (Bell 2000). Infine a questo gruppo appartiene l'analisi costi-benefici di Husdal (Husdal 2004), il quale considera che la vulnerabilità di un sistema genera dei danni che causano un costo per la società, e che, al contrario, l'incremento di affidabilità rappresenta un beneficio (Husdal 2004).

2.4.3 Indicatori

In questa sezione sono presentati diversi indicatori di vulnerabilità derivati dalla letteratura; l'utilizzo di ciascuno di questi da parte degli autori dipende dalla definizione di *vulnerability* di volta in volta adottata (Wang et al. 2015). Dall'analisi della letteratura, gli indici sono stati organizzati in funzione dei parametri su cui si basano, secondo la seguente struttura:

- Indicatori basati sulla differenza tra costi (o tempi) di percorrenza nella rete iniziale e in quella danneggiata;
- Indicatori basati sull'accessibilità;
- Altri indicatori.

2.4.3.1 Indicatori basati sulla differenza dei costi di percorrenza

Gli indicatori maggiormente utilizzati in letteratura per valutare la vulnerabilità di una rete stradale e dei suoi componenti sono basati sulla differenza dei costi di percorrenza tra lo stato del sistema in condizioni di operatività normale e quelli nel caso in cui uno dei link della rete sia eliminato. In questo senso l'unità fondamentale di analisi è:

$$\Delta c_{ij}^{(e)} = c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)}$$

Dove: $c_{ij}^{(e)}$ è il costo di percorrenza dal nodo i al nodo j quando il link e non è operativo; $c_{ij}^{(0)}$ è il costo di percorrenza dal nodo i al nodo j nel caso di rete non danneggiata.

L'indicatore più semplice è stato introdotto da Scott et al. (Scott et al. 2006). Esso è stato denominato *Network Robustness Index* e costituisce un indicatore di vulnerabilità globale della rete, in quanto è basato sulla differenza tra i costi totali di rete calcolati come:

$$c = \sum_{l \in E} t_l(x_l)x_l$$

Dove: x_l è il flusso sul link l ; $t_l(x_l)$ è il tempo di percorrenza dell'arco l ; E è l'insieme degli archi della rete.

In altri casi la differenza di costi è pesata attraverso la domanda di spostamento, come in Taylor et al. (Taylor et al. 2006). Questi autori hanno calcolato la differenza tra i costi di percorrenza dei percorsi minimi da i a j , prima e dopo la chiusura del link e ($\Delta c_{ij}^{(e)}$), pesata per la domanda. L'indicatore di vulnerabilità è quindi posto pari a:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \Delta c_{ij}^{(e)}$$

Dove: d_{ij} è la domanda tra i e j .

Analogamente a Taylor et al. (Taylor et al. 2006), anche Jenelius et al. (Jenelius et al. 2006) hanno inserito la domanda nella definizione degli indicatori di vulnerabilità degli archi di una rete. In particolare gli autori (Jenelius et al. 2006) hanno introdotto il concetto di *cut link*, definito come un arco che, una volta eliminato, disconnette la rete in due parti e produce costi di viaggio infiniti per spostarsi tra le due porzioni di rete; la domanda tra queste due aree, che non è più servibile, può definirsi domanda insoddisfatta. Per questo si ha:

$$u_{ij}^{(e)} = \begin{cases} x_{ij} & \text{se } c_{ij}^{(e)} = \infty \\ 0 & \text{se } c_{ij}^{(e)} < \infty \end{cases}$$

Dove: $u_{ij}^{(e)}$ è la domanda insoddisfatta tra la zona i e la zona j quando il *cut link* e non è operativo; x_{ij} è la domanda di trasporto in condizioni normali tra i e j . Invece gli archi che producono un aumento finito dei costi di percorrenza sono chiamati *non-cut links* ed

appartengono all'insieme E^{nc} (dove E è l'insieme di tutti gli archi della rete). Di conseguenza, le misure di vulnerabilità basate su un incremento dei costi sono limitate ai *non-cut links*, mentre quelle fondate sulla domanda insoddisfatta sono applicate a tutti gli archi.

Attraverso la definizione di *importance*, prima riportata (si veda il capitolo 2.4.1), Jenelius et al. (Jenius et al. 2006) hanno definito l'importanza del *non-cut link* e rispetto alla rete globale, come:

$$importance_{net}(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, e \in E^{nc}$$

dove w_{ij} sono dei pesi introdotti per valutare l'importanza della coppia ij . Nel caso questi siano uguali tra loro si ottiene la *global importance*, cioè la capacità del sistema di fornire accesso a tutte le zone della rete; se questi pesi sono assunti pari alla domanda x_{ij} , si ottiene la *demand-weighted importance*, che misura l'abilità del sistema di mantenere la sua funzione di collegamento in modo proporzionale alla domanda.

In maniera analoga, nel caso di domanda insoddisfatta, l'importanza di un qualsiasi link e per la rete globale è data da:

$$importance_{net}^{uns}(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(e)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}, e \in E$$

Dalla definizione di *exposure* precedentemente riportata (si veda il capitolo 2.4.1), Jenelius et al. (Jenius et al. 2006) hanno ricavato la seguente equazione, per valutare l'effetto della chiusura di un arco qualsiasi su un generico gruppo di centroidi m :

$$exposure(m) = \frac{\sum_{i \in m} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in m} \sum_{j \neq i} w_{ij}}$$

In maniera analoga all'*importance*, è possibile definire la *global exposure* e la *demand-weighted exposure*, a seconda dei valori attribuiti ai pesi w_{ij} . Come nel caso precedente, gli Autori [Jenius2006] hanno introdotto le stesse misure nel caso di domanda insoddisfatta. Quest'ultima situazione, relativa allo scenario peggiore, può corrispondere ad un attacco di terroristi informati che vogliono causare il maggior numero di danni all'insieme di nodi m , in

un'unica volta; in questo senso si ha (Jenelius et al. 2006) un'analogia con la struttura di analisi della vulnerabilità proposta da Bell (Bell 2000).

Anche in uno studio successivo Jenelius (Jenelius 2007) ha utilizzato, come indicatore di vulnerabilità, l'incremento del tempo di viaggio che sia ha a seguito dell'interruzione di un link della rete; tuttavia egli ha proposto un modello dinamico per considerare la variazione nel tempo dell'informazione agli utenti sulla chiusura, e successiva riapertura, dell'arco. Per semplicità, l'Autore (Jenelius et al. 2006) ha assunto che una coppia od sia caratterizzata da una domanda x (costante ed anelastica). Ipotizzando che il tempo di percorrenza sia indipendente dal flusso, gli utenti scelgono tutti il percorso più corto (r_{orig}) per andare da o a d . All'istante $t = 0$, un generico link k che appartiene ad r_{orig} è chiuso al traffico; il processo di informazione agli utenti si sviluppa nel tempo in modo che la porzione di individui che sono a conoscenza dell'interruzione del percorso sia:

$$a(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t < 0 \\ 1 & \text{per } t \geq t_{clinf} \end{cases}$$

Dove: t_{clinf} è l'istante in cui tutti gli utenti sono informati della chiusura.

Quando il link è riaperto al traffico (all'istante t_{open}) gli utenti sono informati mediante un processo analogo al precedente, cosicché la parte di individui che riceve l'informazione risulta essere:

$$b(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t < t_{open} \\ 1 & \text{per } t \geq t_{opinf} \end{cases}$$

Dove: t_{opinf} è l'istante in cui tutti gli utenti sono informati dell'apertura.

Nel caso in cui, durante la chiusura, esistano percorsi alternativi ad r_{orig} , gli utenti informati ($a(t)$) scelgono il nuovo percorso più corto denominato r_{short} , a differenza di quelli non informati che, una volta giunti nei pressi del link e , utilizzano il percorso più lungo chiamato r_{long} . I tempi di percorrenza di r_{orig} , r_{short} e r_{long} sono rispettivamente τ_{orig} , τ_{short} e τ_{long} ; dove $\tau_{long} \geq \tau_{orig} \geq \tau_{short}$. Quando l'arco e è riaperto, il comportamento degli individui dipende dalle informazioni ottenute in passato; in particolare, gli utenti che hanno ricevuto notizia della chiusura e poi dell'apertura ($a(t)$) e quelli che non sono stati informati né della chiusura e né della riapertura ($1 - a(t)$) scelgono r_{orig} ; invece coloro che sanno

della chiusura, ma non della riapertura ($a(t)(1 - b(t))$) continuano ad utilizzare r_{short} . In questo modo l'aumento del tempo di viaggio nell'intervallo $[0; t_{open}]$ è indicato come:

$$\Delta T_e = x \int_0^{t_{open}} \left(a(t)(\tau_{short} - \tau_{orig}) + (1 - a(t))(\tau_{long} - \tau_{orig}) \right) dt \\ + x \int_{t_{open}}^{t_{openf}} a(t)(1 - b(t))(\tau_{short} - \tau_{orig}) dt$$

Indicando $A = \int_0^{t_{open}} a(t) dt$ e $B = \int_{t_{open}}^{t_{openf}} a(t)(1 - b(t)) dt$, si ottiene:

$$\Delta T_e = x[(A + B)(\tau_{short} - \tau_{orig}) + (t_{open} - A)(\tau_{long} - \tau_{orig})]$$

Nel caso in cui vi siano immediate informazioni agli utenti si ha che $t_{clinf} \rightarrow 0$ e $t_{openf} \rightarrow t_{open}$, perciò: $\Delta T_e^{trad} = x t_{open}(\tau_{short} - \tau_{orig}) \leq \Delta T_e$; perciò, in quest'ultimo caso, si ottiene una sottostima dell'incremento del tempo di percorrenza.

Invece, se non esistono percorsi alternativi ad r_{orig} , l'arco e è un *cut link*. Gli utenti informati della chiusura prima della loro partenza, attendono senza spostarsi fino alla riapertura, invece coloro che hanno ricevuto la notizia della chiusura dopo l'inizio del viaggio, arrivano al link e e poi tornano indietro, aspettando che l'arco diventi di nuovo operativo. Non considerando il tempo per arrivare all'arco in questione impiegato dai secondi, entrambi i tipi di utenti subiscono lo stesso incremento del tempo di viaggio. Tale variazione è data dalla somma di due componenti:

1. Il ritardo dal tempo previsto per la partenza e l'istante in cui il link è riaperto; dato che la domanda è ipotizzata costante, il ritardo medio di ogni utente è $\frac{t_{open}}{2}$;
2. La differenza di tempo tra la riapertura ed il momento in cui l'utente ne riceve notizia, pari a $\int_{t_{open}}^{t_{openf}} (1 - b(t)) dt$.

Poiché il numero di utenti che desiderano partire durante la chiusura è $x t_{open}$, l'incremento del tempo di percorrenza in questo periodo risulta:

$$\Delta T_e^{close} = x \left[\frac{t_{open}^2}{2} + t_{open} \int_{t_{open}}^{t_{openf}} (1 - b(t)) dt \right]$$

Quando il link e è riaperto, gli utenti che hanno ricevuto informazione della riapertura e coloro che non sono stati informati né della chiusura e né della riapertura utilizzano r_{orig} svolgendo il loro viaggio come pianificato. Invece gli individui che sanno della chiusura, ma non della riapertura scelgono di ritardare la loro partenza; il ritardo da essi subito per questo motivo è:

$$\int_t^{t_{opinf}} (1 - b_t(s)) ds = \int_t^{t_{opinf}} \frac{1 - b(s)}{1 - b(t)} ds$$

Dove: $b_t(s) = \frac{(b(s) - b(t))}{(1 - b(t))}$; s è l'istante in cui gli utenti sono informati della riapertura ($s \geq t$). All'istante t , la porzione di questi utenti è $a(t)(1 - b(t))$ e l'incremento del tempo di percorrenza in tale periodo è:

$$\begin{aligned} \Delta T_e^{open} &= x \int_{t_{open}}^{t_{opinf}} a(t)(1 - b(t)) \left(\frac{1}{1 - b(t)} \int_t^{t_{opinf}} (1 - b(s)) ds \right) dt \\ &= x \int_{t_{open}}^{t_{opinf}} a(t) \int_t^{t_{opinf}} (1 - b(s)) ds dt \end{aligned}$$

Nel caso in cui gli utenti ricevano immediata informazione della riapertura, si ha che:

$$\Delta T_e^{trad} = \frac{x t_{open}^2}{2}$$

Per lo sviluppo di questi integrali, l'Autore (Jenelius 2007) ha supposto un andamento lineare di $a(t)$ e $b(t)$. Nel caso applicativo, Jenelius (Jenelius 2007) ha identificato che gli archi più vulnerabili, cioè quelli che provocano un ritardo superiore alle 8 ore, sono dei *cut links*. Infine l'Autore (Jenelius 2007) propone delle modifiche al modello per considerare il tempo speso per arrivare fino al link e e la possibilità di ricevere previsioni dell'istante di apertura dell'arco stesso.

L'incremento del tempo di percorrenza è stato utilizzato dallo stesso Autore (Jenelius 2010) anche per valutare la disparità di effetti che si hanno tra gli utenti a seguito della chiusura di un link. In particolare egli ha introdotto due indicatori: *l'efficiency importance* e *l'equity*

importance. La prima fornisce l'incremento del tempo di viaggio tra tutte le coppie ij per il fatto che il link e non è più operativo:

$$I_{eff}(e) = \sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^e$$

Per quantificare la seconda l'Autore (Jenelius 2010) ha ipotizzato che, anche se il ritardo subito dagli utenti varia in funzione del tempo di partenza, tutti gli individui relativi ad una coppia ij sono affetti dallo stesso ritardo medio. Definiti, per una coppia ij , τ l'intervallo di tempo tra la chiusura del link e ed il ritorno alla situazione iniziale, ed x_{ij} la domanda in questo periodo (veicoli per unità di tempo), il ritardo medio vale $\Delta T_{ij}^e/x_{ij}\tau$. Per considerare la distribuzione non uniforme di questi ritardi tra gli individui, Jenelius (Jenelius 2010) ha impiegato il coefficiente di variazione (CV), un indice che varia tra 0 ed 1 e consente di valutare la dispersione dei dati:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_u p_u (y_u - \bar{y})^2}}{\bar{y}} = \frac{\sqrt{\sum_u p_u y_u^2 - \bar{y}^2}}{\bar{y}}$$

Dove: y_u è una popolazione i cui componenti hanno, ciascuno, un peso p_u ; $\mu = \bar{y} = \sum_u y_u p_u$. Nel caso specifico, la popolazione (u) è costituita dai $\Delta T_{ij}^e/x_{ij}\tau$ per le varie coppie ij , ciascuno con un peso $p_u = x_{ij}/x$ (dove: $x = \sum_{i,j \neq i} x_{ij}$). L'*equity importance* è posta pari al coefficiente di variazione:

$$I_{eq}(e) = CV_e = \frac{\sqrt{\sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \left(\frac{\Delta T_{ij}^e}{x_{ij}\tau} \right)^2 - \left(\sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \frac{\Delta T_{ij}^e}{x_{ij}\tau} \right)^2}}{\sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \frac{\Delta T_{ij}^e}{x_{ij}\tau}}$$

Dopo alcuni passaggi riportati in (Jenelius 2010) si ottiene:

$$I_{eq}(e) = \frac{\sqrt{x \sum_{i,j \neq i} \frac{(\Delta T_{ij}^e)^2}{x_{ij}} - (\sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^e)^2}}{\sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^e}$$

In conclusione, relativamente alla chiusura del link e , attraverso $I_{eff}(e)$ è possibile valutare le conseguenze globali, mentre attraverso $I_{eq}(e)$ si ha un indicazione della disparità delle conseguenze tra gli utenti.

Inoltre Jenelius (Jenius 2010) ha previsto di normalizzare i due indicatori rispetto all'intervallo [0;1] utilizzando i valori massimi e minimi di ciascuno tra tutti quelli relativi agli archi in esame ($l \in E$) :

$$\hat{I}_{eff}(e) = \frac{I_{eff}(e) - \min_{l \in E} I_{eff}(l)}{\max_{l \in E} I_{eff}(l) - \min_{l \in E} I_{eff}(l)}$$

$$\hat{I}_{eq}(e) = \frac{I_{eq}(e) - \min_{l \in E} I_{eq}(l)}{\max_{l \in E} I_{eq}(l) - \min_{l \in E} I_{eq}(l)}$$

Infine egli ha introdotto un unico indicatore ($I_{cv}(e)$) pesando i due precedenti:

$$I_{cv}(e) = (\hat{I}_{eff}(e))^{1-\alpha} (\hat{I}_{eq}(e))^\alpha, \alpha \in [0,1]$$

Nello stesso articolo Jenelius (Jenius 2010) ha indicato come calcolare il ritardo ΔT_{ij}^e . Nel caso il link chiuso sia un *cut link*, dato che la domanda è assunta costante nel tempo, gli utenti che desiderano partire durante la chiusura subiscono un ritardo medio $\tau/2$ e sono pari a $x_{ij}\tau$. Pertanto l'aumento del tempo di percorrenza di questi è pari a:

$$\Delta T_{ij}^e = \frac{x_{ij}\tau^2}{2}$$

Invece, se il link e non è un *cut link*, significa che esistono percorsi alternativi, quindi gli utenti possono scegliere se utilizzare il nuovo percorso minimo o attendere la riapertura dell'arco. Detta Δt_{ij}^e la differenza tra il tempo di percorrenza del nuovo percorso minimo rispetto a quello precedente la chiusura di e , se $\Delta t_{ij}^e \geq \tau$ tutti gli utenti attendono la riapertura del link (come nel caso in cui e sia un *cut link*). Invece, se $\Delta t_{ij}^e < \tau$, solamente gli utenti che desiderano partire dopo $t = \tau - \Delta t_{ij}^e$ traggono vantaggio dall'attendere la riapertura dell'arco invece di utilizzare il percorso alternativo. In questo modo, l'Autore (Jenius 2010) ha definito:

$$\Delta T_{ij}^e = \begin{cases} \frac{x_{ij}\tau^2}{2} & \text{se } \Delta t_{ij}^e \geq \tau \\ x_{ij}\Delta t_{ij}^e \left(\tau - \frac{\Delta t_{ij}^e}{2} \right) & \text{se } \Delta t_{ij}^e < \tau \end{cases}$$

In un'applicazione alla rete svedese degli indicatori prima esposti, Jenelius (Jenelius 2009) ha effettuato un'analisi di regressione per valutare la correlazione tra gli indicatori stessi e alcuni parametri. In particolare tali parametri sono:

- Variabili relative all'offerta:
 - Ridondanza dei link e scala della rete;
 - Densità della rete stradale;
 - Densità della popolazione;
- Variabili relative alla domanda:
 - Tempo di percorrenza;
 - Flusso di traffico;

Dall'analisi dei risultati l'Autore (Jenelius 2009) ha concluso che tutti gli indicatori manifestano una crescita lineare rispetto alle variabili di domanda.

Infine, considerando che molti archi di una rete possono essere chiusi ma sono difficilmente indagabili e che la non operatività di un link provoca effetti su altri adiacenti, Jenelius e Mattsson (Jenelius & Mattsson 2012) hanno previsto di suddividere la rete in più celle uguali applicando una griglia (G). Gli archi che intersecano i confini di una cella, che rappresenta l'estensione spaziale dell'evento dannoso, sono chiusi simultaneamente. In seguito gli Autori (Jenelius & Mattsson 2012) hanno adattato gli indicatori proposti in precedenza (Jenelius et al. 2006) per valutare la vulnerabilità di una cella. In particolare, posto τ il tempo di chiusura degli archi, Jenelius e Mattsson (Jenelius & Mattsson 2012) hanno definito l'importanza di una cella c come:

$$I(c|\tau) = \sum_i \sum_j \Delta C_{ij}^c(\tau)$$

Dove: $\Delta C_{ij}^c(\tau)$ è l'incremento dei costi di viaggio per gli utenti che si spostano da i a j . Inoltre gli stessi Autori (Jenelius & Mattsson 2012) hanno evidenziato come questo indicatore possa essere scomposto in più parti, considerando l'impatto della chiusura sugli spostamenti interni-interni, interni-esterni, esterni-esterni e di attraversamento della cella c .

In maniera analoga Jenelius (Jenius 2009) ha indicato come calcolare l'*exposure* di una regione. Nello specifico egli ha definito l'*Expected total exposure* come l'incremento totale dei tempi di percorrenza di tutti gli spostamenti degli utenti che partono dall'interno della regione r in cui un link casuale è non operativo; ed, in modo simile, l'*Expected user exposure* come l'aumento medio dei tempi di viaggio per spostamento. Allo stesso modo l'*user exposure* per lo scenario peggiore, tra tutte le possibili celle chiuse, è calcolata (Jenius & Mattsson 2012) come:

$$E(r|\tau, G) = \max_{c \in G} \frac{\sum_{i \in r} \sum_j \Delta C_{ij}^c(\tau)}{\sum_{i \in r} \sum_j x_{ij} \tau}$$

Secondo Balijepalli e Oppong (Balijepalli & Oppong 2014) hanno applicato gli indicatori proposti da Taylor (Taylor et al. 2006), Jenelius (Jenius et al. 2006) e Scott (Scott et al. 2006) in un caso studio. In particolare gli stessi autori hanno evidenziato che i primi due indici ipotizzano che gli utenti siano tutti assegnati al percorso minimo e, a differenza del terzo, possono essere applicati solamente a reti molto sparse ed estese, in cui i percorsi alternativi a quello minimo differiscono fortemente da quest'ultimo; al contrario, in aree urbane molto dense, esistono molti percorsi che servono una stessa coppia O-D (Balijepalli & Oppong 2014). Inoltre questi tre indici non permettono di considerare una riduzione parziale della capacità del link in esame (Balijepalli & Oppong 2014).

La differenza di costi è stata utilizzata anche da Rupi et al. (Rupi et al. 2014; Rupi et al. 2015) i quali hanno valutato le conseguenze della chiusura di un link della rete attraverso la definizione di *link importance* di Jenelius (Jenius et al. 2006) in modo da creare una gerarchia tra gli archi. In particolare l'indicatore proposto da quest'ultimo è stato modificato da Rupi et al. (Rupi et al. 2014; Rupi et al. 2015) per considerare anche il livello di utilizzo dell'arco (Rupi et al. 2014). In questo modo l'importanza del link e è valutata come:

$$LI_e = \beta F(ADT_e) + (1 - \beta) G(\Delta C_e)$$

Dove: ADT_j è il traffico medio giornaliero, $F(ADT_j)$ è chiamata *local importance*; ΔC_j è l'incremento del costo totale di rete dovuto alla chiusura dell'arco e ; $G(\Delta C_e)$ è denominata *global importance*; β è un parametro utilizzato per pesare $F(ADT_e)$ e $G(\Delta C_e)$, e può essere scelto sulla base dell'affidabilità dei dati a disposizione per stimare le due funzioni precedenti.

La *local importance* è proporzionale al traffico sull'arco, poiché un elevato numero di veicoli che transitano su di esso comporta una vulnerabilità maggiore (Rupi et al. 2014). In particolare (Rupi et al. 2014):

$$F(ADT_e) = \frac{ADT_e - ADT_{min}}{ADT_{max} - ADT_{min}}$$

Dove: ADT_{max} e ADT_{min} sono rispettivamente il traffico medio giornaliero massimo e minimo osservato sugli archi della rete. In questo modo l'indicatore è adimensionale e varia tra 0 e 1 in rapporto al flusso sull'arco.

In uno studio successivo, Rupì et al. (Rupi et al. 2015) hanno invece stimato la *local importance* come:

$$F(ADT_e) = \min \left\{ 1; \max \left\{ \frac{ADT_e}{ADT_{max}}; \frac{ADT_e + h(ADT_e - ADT_p)}{ADT_{max}} \right\} \right\}$$

Dove: ADT_p è determinato fissando la percentuale di archi il cui $F(ADT_e)$ vuole essere amplificato (Rupi et al. 2015); h è un parametro compreso tra 0 ed 1. Queste due variabili sono fissate dall'analista in modo da accrescere la *local importance* dei links soggetti ad un ADT maggiore (Rupi et al. 2015).

La *global importance* è invece definita come (Rupi et al. 2014):

$$G(\Delta C_e) = \frac{g_e - g_{min}}{g_{max} - g_{min}}$$

Oppure (Rupi et al. 2015):

$$G(\Delta C_e) = \frac{g_e}{g_{max}}$$

Come la *local importance*, questo indicatore è adimensionale e varia tra 0 e 1 (vale 1 nel caso di importanza maggiore). L'indice g_e è calcolato come:

$$g_e = \begin{cases} \Delta C_e & \text{se } d_{ij}^e = 0 \\ \Delta C_e + \alpha d_{ij}^e & \text{se } d_{ij}^e \neq 0 \end{cases}$$

Dove: d_{ij}^e è la domanda insoddisfatta tra i e j a causa della chiusura del link e ; α è un parametro posto pari al valore di un mancato spostamento tra i e j in seguito alla non

operatività dell'arco e ed è calibrato in modo che il valore di g_e per i cut-link sia sempre superiore a quello dei non-cut link. In questo modo l'importanza maggiore in termini di variazione del costo totale di rete è associata ai *cut links*, la cui rilevanza varia a seconda della domanda insoddisfatta provocata da ciascuno.

2.4.3.2 Indicatori basati sull'accessibilità

D'Este e Taylor (D'Este & Taylor 2001) hanno elencato alcuni di indicatori di accessibilità per valutare la vulnerabilità di una rete e dei suoi componenti secondo la definizione precedentemente espressa di *Access Vulnerability* (capitolo 2.4.1). In particolare gli Autori (D'Este & Taylor 2001) hanno distinto in *relative accessibility indices* e *integral accessibility indices*.

I primi descrivono il grado di connessione tra due nodi i e j , e, generalmente, sono espressi come:

$$A_{ij} = C_{ij}$$

Dove: C_{ij} è una misura di separazione tra le due zone (distanza, tempo o costo).

I secondi indicano il grado di interconnessione tra un nodo e tutti gli altri dell'area di studio. Solitamente l'accessibilità di una zona i è la somma di tutte le accessibilità da i a j :

$$AI_i = \sum_j A_{ij}$$

Gli indici utilizzati da D'Este e Taylor (D'Este & Taylor 2001), sono:

- L'indice di Hansen in forma normalizzata (D'Este & Taylor 2001):

$$AI_i = \frac{\sum_j B_j f(c_{ij})}{\sum_j B_j}$$

Dove: B_j è l'attrattività della zona j assunta pari alla sua popolazione residente (Taylor et al. 2006; Taylor 2007); $f(c_{ij})$ è la funzione di impedenza, assunta, in uno studio successivo (Taylor et al. 2006; Taylor 2007), pari a $1/x_{ij}$ (dove x_{ij} è la distanza tra i e j).

- L'indice di Black-Conroy:

$$AI_i(T) = \int_0^T N_i(t) dt$$

Dove: $AI_i(T)$ è il numero cumulativo di opportunità entro T unità di costo per uno spostamento dalla zona i ; $N_i(t)$ è il numero di opportunità a t unità di costo da i . Gli Autori (D'Este & Taylor 2001) hanno riportato che quest'ultimo indice permette di ottenere una misura continua dell'accessibilità, ma non è molto impiegato a causa della soggettività nella scelta del limite T .

Successivamente Taylor et al. (Taylor et al. 2006) e Taylor (Taylor 2007; Taylor 2012) hanno indicato che l'indice di Hansen è utile per valutare l'accessibilità in una rete avente una distribuzione uniforme delle città nello spazio; per questo non può essere applicato ad aree rurali caratterizzate da piccoli insediamenti oppure a regioni con bassa densità abitativa. Tali proprietà sono tipiche dell'area di studio degli Autori, nello specifico, l'Australia. Per valutare la vulnerabilità di questa regione il Governo Australiano ha utilizzato l'indice ARIA (*Accessibility/Remoteness Index of Australia*); esso varia in modo continuo da 0 (elevata accessibilità) a 15, e si basa sulla distanza, misurata attraverso gli archi della rete, tra una zona i e cinque (Taylor et al. 2006) o sei (Taylor 2007; Taylor 2012) tipi di centri di servizio, classificati a seconda della popolazione residente in ciascuno di essi. Nello specifico tale indice vale:

$$ARIA_{iL} = \sum_L \min \left\{ 3, \frac{x_{iL}}{\bar{x}_L} \right\}$$

Dove: x_{iL} è la distanza, in termini di somma delle lunghezze degli archi, tra la città i e il centro di servizio di categoria L più vicino; \bar{x}_L è la distanza media di tutte le zone dal centro di servizio di tipo L più vicino (vedere (Taylor 2007)). L'indice ARIA è basato, quindi, solamente su variabili spaziali ed è stabile nel tempo (Taylor et al. 2006; Taylor 2007; Taylor 2012).

Infine Susilawati e Taylor (Taylor 2007), una volta ottenuti i valori dell'indice di accessibilità, hanno determinato il link critico, come l'arco che causa la massima variazione relativa di tali indicatori:

$$\Delta RA = 1 - \frac{A_i^1}{A_i^0}$$

Dove: A_i^1 e A_i^0 sono l'accessibilità della zona i con la rete rispettivamente mancante di un link e allo stato iniziale.

Invece, Taylor (Taylor 2008) ha utilizzato la variazione assoluta dell'accessibilità calcolata con questi indicatori:

$$\Delta TA = TA^0 - TA^1 \text{ e } \Delta A_i = A_i^0 - A_i^1$$

Dove: gli indici 1 e 0 rappresentano la rete rispettivamente nello stato danneggiato e iniziale; A_i è l'accessibilità della zona i ; TA è l'accessibilità globale della rete ($TA = \sum_i A_i$).

Il concetto di accessibilità è stato usato anche da Chang e Nojima (Chang & Nojima 2001) in uno studio per valutare le performance della rete di Kobe (Giappone) in seguito all'azione del *Hyogoken-Nanbu earthquake* del 1995. In particolare i due autori hanno introdotto due indicatori. Il primo è chiamato *total distance-based accessibility* e permette di ottenere un'indicazione sulle prestazioni globali del sistema, stimando l'accessibilità di tutti i nodi della rete:

$$D = \frac{f - A}{f - 1}$$

Con:

$$A = \frac{\sum_i \sum_j dist_{ij}}{\sum_i \sum_j \overline{dist}_{ij}}$$

Dove: $dist_{ij}$ e \overline{dist}_{ij} indicano la lunghezza del percorso minimo tra i e j rispettivamente nel caso di rete danneggiata e intatta; f è un parametro che dipende dallo stato di danno dell'arco ed è stato introdotto per considerare l'incremento di tempo di percorrenza dovuto alle deviazioni.

Il secondo indicatore (*areal distance-based accessibility*) riguarda invece l'accessibilità della rete dal punto di vista dei quartieri all'interno dell'area di studio; l'accessibilità così definita per un'area s vale:

$$D_s = \frac{f - A_s}{f - 1}$$

Con:

$$A_s = \frac{1}{n_s} \sum_{i \in N_s} A_i$$

Inoltre:

$$A_i = \frac{\sum_{j \neq i} w_{ij} dist_{ij}}{\sum_{j \neq i} w_{ij} dist_{ij}}$$

Dove: N_s è l'insieme dei nodi dell'area s (in numero pari ad n_s); w_{ij} è un parametro che valuta l'importanza del nodo j per gli utenti provenienti dalla zona i ed è calcolato sulla base della matrice Origine-Destinazione pre-sisma (vedere (Chang & Nojima 2001)).

Infine Chen et al. (Chen et al. 2007) hanno utilizzato il *combined demand model* per valutare le conseguenze nei comportamenti degli utenti della chiusura di uno o più archi della rete. Tale metodo è stato applicato con lo scopo di considerare l'interazione tra i comportamenti degli utenti e lo stato di danno della rete. Per lo studio della vulnerabilità gli Autori (Chen et al. 2007) hanno impiegato una misura dell'accessibilità basata sulle utilità calcolate dalla struttura *nested logit* del modello. In particolare sono stati utilizzati i seguenti indicatori:

- Network Accessibility: $A = \frac{\sum_i N_i \widetilde{W}_i}{\sum_i N_i}$;
- Zonal Accessibility: $A_i = \widetilde{W}_{t|i}$;
- O-D Accessibility: $A_{ij} = \widetilde{W}_{j|i}$;
- O-D Accessibility by mode m : $A_{ijm} = \widetilde{W}_{m|ij}$.

Dove: N_i è il numero di potenziali utenti che partono dall'origine i ; \widetilde{W}_i , $\widetilde{W}_{t|i}$, $\widetilde{W}_{j|i}$ e $\widetilde{W}_{m|ij}$ sono le utilità attese delle scelte ad ogni livello del modello logit (scelta del percorso, del modo, della destinazione e di viaggio).

2.4.3.3 Altri indicatori

La connettività della rete è stata utilizzata da Scott et al. (Scott et al. 2006) per valutare gli effetti dell'eliminazione di un arco. L'indicatore proposto dagli autori è l'Indice Gamma; esso considera solamente le caratteristiche topologiche della rete e assume valori tra 0 ed 1, dove 1 si ha per una rete completamente connessa. In particolare tale indice è calcolato come:

$$\gamma = \frac{l}{l_{max}}$$

Dove: l rappresenta il numero di archi attuale nella rete; l_{max} è il massimo numero di links quando la rete è totalmente connessa. Quest'ultimo parametro vale:

$$l_{max} = 3(n - 2)$$

Dove: n è il numero di nodi della rete.

Chen et al. (Chen et al. 2012) hanno invece valutato la vulnerabilità di una rete attraverso il concetto di efficienza. Gli Autori (Chen et al. 2012) hanno proposto la seguente formula per stimare quest'ultima nel caso di eliminazione del link a considerando la congestione:

$$E = \frac{\sum_i \sum_{rs} \frac{u_i^{rs} q_{rs}}{\pi_i^{rs}}}{\sum_{rs} q_{rs}}$$

Dove: q_{rs} è la domanda tra r ed s ; u_i^{rs} è la proporzione di utenti di tipo i che viaggiano da r ad s ; π_i^{rs} è il minimo tempo di percorrenza per andare da r ad s , a disposizione dell'individuo di categoria i .

Successivamente la vulnerabilità è definita come la variazione relativa dell'efficienza della rete rispetto allo stato iniziale:

$$VUL_a = \frac{E_0 - E_a}{E_0}$$

Dove: E_0 ed E_a sono le misure di efficienza della rete rispettivamente allo stato iniziale e in seguito alla chiusura del link a .

Il concetto di efficienza è stato impiegato anche da Dheghani et al. (Dehghani et al. 2014) i quali hanno valutato la vulnerabilità considerando le probabilità che uno scenario distruttivo si verifichi. In particolare la vulnerabilità è espressa come:

$$V_r(s) = \frac{|E[r(s)] - r^0|}{r^0}$$

Dove: $V_r(s)$ è la vulnerabilità della rete nello stato s rispetto all'indicatore r ; r^0 è il valore dell'indicatore per la rete allo stato iniziale. Gli Autori (Dehghani et al. 2014) hanno indicato che possono esistere diversi scenari distruttivi della rete (a); questi sono varie configurazioni della rete che corrispondono alla chiusura di uno o più archi (se la rete è composta da n link esistono 2^n scenari possibili (Dehghani et al. 2014)). Il calcolo della probabilità che uno scenario si verifichi si basa sulle probabilità di eliminazione dei link. Inoltre:

$$E[r(s)] = \sum_{a \in A} p(a) \cdot r(a)$$

Dove: $r(a)$ è il valore dell'indicatore di prestazione scelto nel caso dello scenario di distruzione a ; $p(a)$ è la probabilità di accadimento dello scenario a . Nello specifico gli indicatori r proposti sono di due tipi:

- Indicatore di rete: utilizza il concetto di efficienza (analogamente a Chen et al. (Chen et al. 2012)) per valutare le prestazioni della rete globale; in particolare:

$$EFF(a) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{dist_{ij}(a)}$$

Dove: N è il numero di nodi della rete; $dist_{ij}(a)$ è il percorso minimo che collega la coppia ij per lo scenario a . Il valore dell'efficienza allo stato iniziale può essere calcolato in modo analogo (Dehghani et al. 2014).

- Indicatore di trasporto: corrisponde a VMT (*Vehicle Miles Traveled*) per l'intero sistema:

$$VMT(a) = \sum_{i \neq j} x_{ij} dist_{ij}(a)$$

Dove: x_{ij} è la domanda tra i e j .

Dopo aver analizzato alcuni indici di vulnerabilità presenti in letteratura, Balijepalli e Oppong (Balijepalli & Oppong 2014) hanno proposto un nuovo indicatore che considera la funzionalità e la gerarchia degli archi, oltre alla possibilità di effettuare delle deviazioni (Balijepalli & Oppong 2014). Nello specifico tale indicatore è chiamato *Network Vulnerability Index* ed è definito come:

$$NVI = \sum_{l=1}^E \left[\left(\frac{x_l^{before}}{r_l^{before}} t_l^{before} \right) \right] - \sum_{l=1}^E \left[\left(\frac{x_l^{after}}{r_l^{after}} t_l^{after} \right) \right]$$

Dove: gli indici *before* e *after* si riferiscono allo stato della rete rispettivamente prima e dopo la chiusura di un link; E è l'insieme degli archi della rete; x_l è il flusso sul link l ; t_l è il tempo di percorrenza del link l ; r_l è la funzionalità dell'arco l ed è definita come il rapporto tra la capacità totale di l disponibile (ottenuta dalla somma delle capacità di tutte le corsie) e la capacità standard oraria per corsia, che varia a seconda della gerarchia della strada (Balijepalli & Oppong 2014).

Infine El-Rashidy e Grant-Muller (El-rashidy & Grant-muller 2014) hanno previsto di combinare sei indici tratti dalla letteratura che considerano le caratteristiche degli archi (capacità, flusso, lunghezza, numero di corsie, velocità a flusso libero). Questi indicatori (VI_l) sono pesati, normalizzati e introdotti a formare due indici vulnerabilità:

- *Physically-based aggregated vulnerability:*

$$V_{ph} = \frac{\sum_{l=1}^E VI_l l_i n_l}{\sum_{l=1}^E l_i n_l}$$

Dove: E è il numero di archi nella rete; l_i è la lunghezza del link l ; n_l è il numero di corsie di l .

- *Operational based aggregated vulnerability:*

$$VI_{op} = \frac{\sum_{l=1}^E VI_l x_l}{\sum_{l=1}^E x_l}$$

Dove: x_l è il flusso sull'arco l .

3 Caso Applicativo

3.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo viene presentata l'analisi di vulnerabilità condotta sulla rete di trasporto di un'area di studio esistente. Tale analisi ha incluso lo studio delle variazioni nella domanda di trasporto indotte dalla modifica degli elementi della rete attraverso un modello di tipo Activity-Based, che sembra essere la struttura modellistica più adatta a questi scopi (capitolo 2.3.2). L'obiettivo dell'analisi è creare una gerarchia degli archi della rete in esame in rapporto alla loro vulnerabilità sulla base del calcolo di alcuni indicatori specifici.

Il capitolo si compone di diverse sezioni. Innanzitutto si descrive l'area di studio e la relativa rete di trasporto (**Area di studio**) e viene introdotto nel dettaglio il metodo impiegato per l'analisi di vulnerabilità; nel capitolo **Modello Activity-Based** si illustra la struttura globale del modello Activity-Based utilizzato e il funzionamento dei suoi componenti principali; in **Raccolta ed elaborazione dei dati** si elencano quali dati sono necessari al modello e la loro elaborazione; infine nel capitolo **Analisi dei risultati della simulazione** si riportano le analisi dei risultati ottenuti in termini di variazione della domanda di traffico, degli indicatori e dei flussi sulla rete.

3.2 AREA DI STUDIO

L'area di studio comprende il territorio del comune veneziano di Dolo (15176 abitanti, 24,08 km² di estensione). Oltre a Dolo, le principali località del comune sono Arino, a nord di Dolo, e Sambruson, situato a sud di Dolo. Il grafo della rete viaria si estende poco oltre i confini comunali, per considerare i collegamenti con l'esterno, ed è costituito da 2389 archi monodirezionali (di cui 190 connettori) e 1121 nodi. Le zone di traffico sono 83 in totale, di cui 18 esterne e 65 interne.

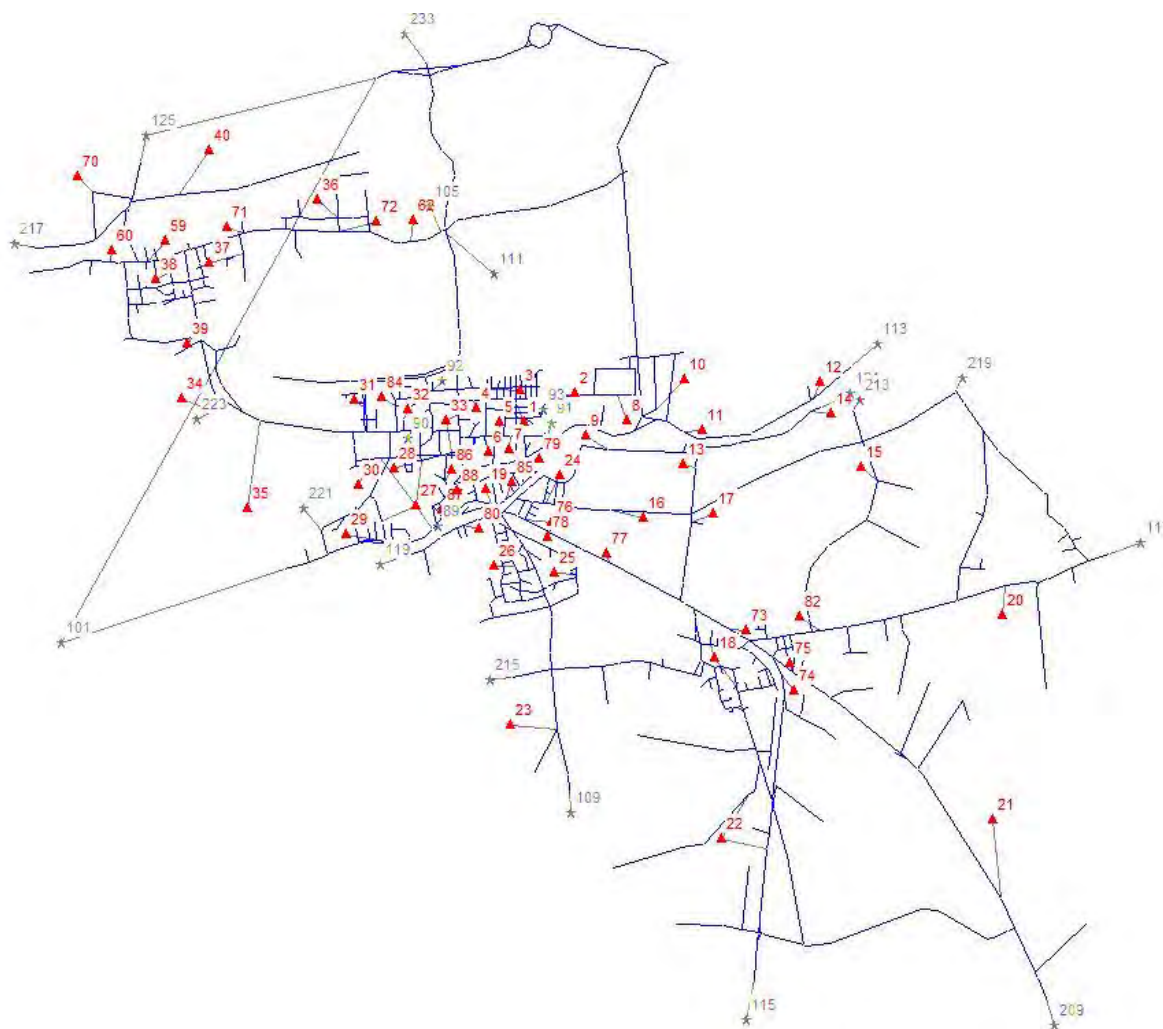


Figura 3-1: rappresentazione della rete di Dolo con i codici di zona; in rosso: i nodi centroidi interni, in grigio i centroidi esterni



Figura 3-2: rappresentazione della rete di Dolo, particolare del centro; i rosso i centroidi interni, in grigio i centroidi esterni

Le principali vie di comunicazione si sviluppano lungo alcune direttrici ben definite:

- Direttrice Nord-Sud, costituita da Via Provinciale Sud (SP26) – Via Arzerini/SP19 (Ramo Sud) e SP13 (ramo direzione Sud-Ovest) diretta a Sambruson (in rosso sulla Figura 3-3);
- Direttrice Est-Ovest, con l'alternativa costituita dalla Strada Regionale 11 che passa per il centro di Dolo e costeggia il Naviglio del Brenta (in verde sulla Figura 3-3) e l'alternativa rappresentata dalla cosiddetta "Bassa", costituita da una serie di strade locali (Via Dolo, Via San Giacomo, Via Vego Scocco, Via Brenta Bassa e Via Ettore Tito) (in blu sulla Figura 3-3).



Figura 3-3: principali vie di comunicazione del comune di Dolo; i rosso le direttrici Nord-Sud, in verde e blu i percorsi di collegamento Est-Ovest; fonte: Google Earth Pro

Le zone più rilevanti dell'area di studio, in termini di potenziale di attrazione degli spostamenti, sono:

- le zone 2 e 9, in cui si trovano gli istituti di istruzione superiore;
- le zone 5 e 18, in cui hanno sede alcune scuole dell'infanzia e primarie;
- la zona 27, in cui è presente l'ospedale di Dolo;
- la zona 33, in cui è presente la sede municipale e il cinema di Dolo;
- la zona 86, con il centro commerciale "Dolo 2000";
- le zone 36, 3 e 37, con una marcata presenza di attività artigianali ed industriali.

3.3 APPROCCIO METODOLOGICO ADOTTATO

La procedura per la valutazione della vulnerabilità ha lo scopo di creare una gerarchia degli archi della rete basata sulla loro importanza, valutando gli effetti della loro eliminazione sia sulla domanda di trasporto che sulle prestazioni della rete. Per simulare le variazioni indotte dall'eliminazione degli archi sugli spostamenti compiuti dagli utenti è stato applicato un modello di tipo Activity-Based. La procedura è stata adottata applicando anche un modello a domanda fissa, più largamente impiegato in letteratura, al fine di effettuare un confronto tra i due approcci.

Il metodo di valutazione della vulnerabilità adottato prevede preliminarmente di selezionare gli archi su cui effettuare l'analisi (si veda il capitolo 2.4.2); in questo caso si è scelto un gruppo ridotto, al fine di ridurre l'onerosità computazionale associata all'applicazione del modello Activity-Based. La procedura si articola successivamente nei seguenti passaggi ed è illustrata in Figura 3-4:

1. Valutazione dello Scenario di riferimento (rete intatta).
 - a. Applicazione del modello Activity-Based allo scenario iniziale di riferimento, ovvero corrispondente alla rete intatta, per determinare le caratteristiche delle attività giornaliere compiute dagli utenti e quindi i loro spostamenti. Sono inoltre stati identificati i vincoli che le attività sistematiche impongono alle persone;
 - b. Assegnazione alla rete delle matrici prodotte;
 - c. Calcolo degli indicatori di vulnerabilità scelti.
2. Valutazione dello Scenario di danno (rete priva di un arco)
 - a. Eliminazione dal grafo di partenza di uno degli archi scelti, per simularne la chiusura al traffico veicolare. In particolare, nel presente lavoro di tesi, non si sono fatte ipotesi in merito alla causa della sua rimozione; in questo modo il metodo sviluppato può essere applicato a qualsiasi evento dannoso che causi l'ostruzione di un link, come il crollo di un ponte, la caduta di edifici, o semplicemente l'interruzione di una strada per lavori.
 - b. Applicazione del modello Activity-Based per simulare le nuove sequenze di spostamenti compiute dagli utenti a seguito della variazione della struttura del

grafo, nel rispetto dei vincoli alle attività obbligatorie determinati nello scenario di riferimento.

- c. Assegnazione alla rete delle matrici prodotte;
- d. Calcolo degli indicatori di vulnerabilità scelti relativi all'arco eliminato.

3. Il passo 2 è stato ripetuto per tutti gli archi selezionati per l'analisi, ottenendo valori diversi degli indicatori per ogni scenario di danno.

La stessa procedura è stata applicata utilizzando un modello a domanda fissa, pari alla domanda prodotta dalla prima esecuzione del modello Activity-Based, ripetendo il calcolo degli stessi indicatori impiegati nel caso del modello a domanda variabile.

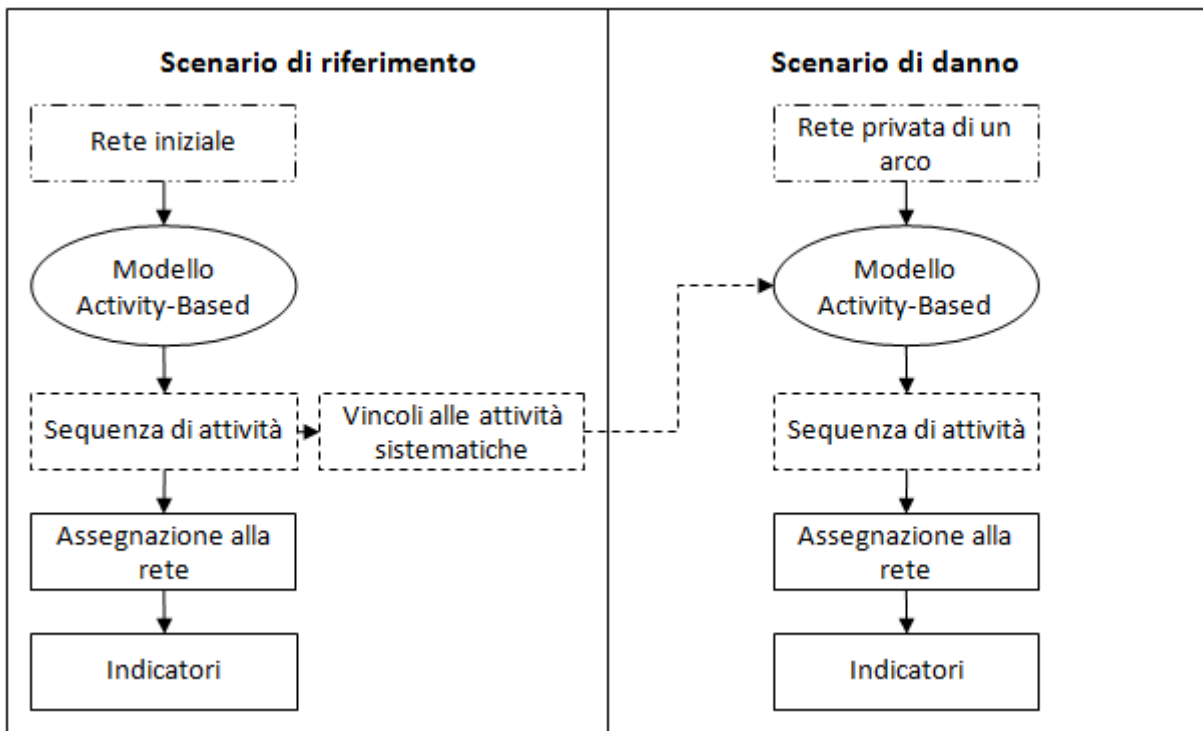


Figura 3-4: schema del processo adottato per l'analisi di vulnerabilità

3.4 MODELLO ACTIVITY-BASED IMPIEGATO

In questo lavoro di tesi l'analisi della vulnerabilità di una rete di trasporto è stata condotta utilizzando un modello di tipo Activity-Based; le ragioni di tale applicazione risiedono nel fatto che questo metodo stima la domanda di trasporto simulando le sequenze di attività che gli individui decidono di compiere, in base alle loro caratteristiche personali, alle loro preferenze e alle interazioni che si instaurano tra il sistema dell'offerta e quello della domanda (si veda il capitolo 2.3). In questo senso il modello permette di stimare le variazioni indotte dai cambiamenti nella struttura della rete nella struttura degli spostamenti; lo studio di tali effetti consente di condurre un'analisi sulla vulnerabilità degli elementi della rete che hanno causato la sua modifica.

Per tali ragioni un approccio simile è stato adottato da Miller (Miller 2014; Miller et al. 2014) con lo scopo di valutare la variazione di accessibilità percepita dagli utenti in seguito al danneggiamento della rete prodotto da alcuni scenari sismici.

In questa tesi è stato adottato il modello Activity-Based proposto nel pacchetto Cubetown (Citilabs 2015), del software di simulazione Cube Voyager di Citilabs. La struttura globale del modello è stata parzialmente modificata per adattarla agli scopi della tesi. Nello specifico la struttura del modello Activity-Based si compone delle seguenti fasi fondamentali (Figura 3-5):

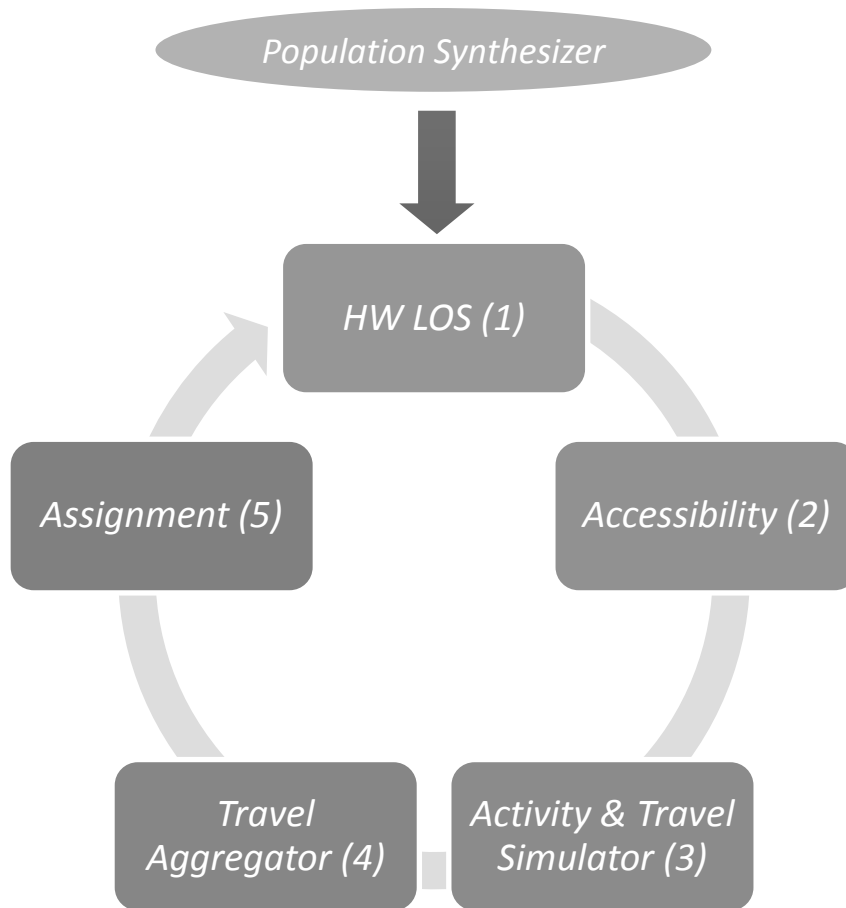


Figura 3-5: struttura del modello Activity-Based adottato

Il *Population Synthesizer* (Figura 3-5) permette di identificare una popolazione di sintesi, caratterizzata da alcuni attributi socio-economici ed utilizzata nel modello per simulare le attività condotte dalle famiglie. Questa popolazione si ottiene a partire da informazioni caratterizzate da un livello di dettaglio molto elevato, ma relative ad una porzione limitata di individui e di famiglie (tipicamente ottenute attraverso un'indagine campionaria). Questi dati sono poi estesi a tutta la popolazione dell'area di studio (universo) attraverso una procedura di tipo *Iterative Proportional Fitting (IPF)* ed un campionamento casuale.

Nella fase denominata *HW LOS* (Figura 3-5) si determinano i livelli di servizio iniziali relativi alla rete scarica. Questi consistono in matrici che contengono i tempi di percorrenza e le distanze relative ai percorsi minimi per andare da una zona di origine ad una di destinazione; i valori dei livelli di servizio sono distinti a seconda del modo di trasporto (auto con solo conducente, auto con passeggeri, e a piedi).

Nel blocco *Accessibility* (Figura 3-5) si determinano i valori dell'accessibilità relativa alle diverse zone dell'area di studio. L'accessibilità di una zona è calcolata come combinazione dei livelli di servizio per quella zona ed altri attributi della stessa (numero di persone impiegate in specifici settori e di studenti). Questi valori sono ottenuti a seconda di:

- Periodo: AM peak (periodo di picco della mattina), MD (periodo di morbida di metà giornata), PM peak (picco della sera) e OP (morbida della notte);
- Direzione: in uscita dalla zona (*away from zone*) e in entrata della stessa (*return to zone*);
- Disponibilità del modo auto o meno;
- Motivo di spostamento: lavoro (*work*), scuola (*school*), e altro (*other*).

L'*Activity & Travel Simulator* (Figura 3-5) costituisce il simulatore delle attività giornaliere che gli utenti della popolazione di sintesi scelgono di compiere, sulla base delle caratteristiche degli individui, delle zone di traffico e delle prestazioni della rete. La sequenza di attività di ogni persona si traduce in una successione di spostamenti, caratterizzati per periodo, modo, motivo, durata, distanza, origine e destinazione; a partire da tale struttura, è possibile determinare i vincoli imposti dai tour sistematici, quali il periodo e la destinazione per i tour con motivo lavoro o scuola, o il numero di auto possedute da ogni famiglia. Infine attraverso il simulatore di attività viene stimata anche l'accessibilità percepita da ciascun utente nel recarsi dalla propria zona di residenza verso tutte le destinazioni raggiungibili dell'area di studio.

In seguito il *Travel Aggregator* (Figura 3-5) aggrega i risultati ottenuti in termini di *trips* e loro caratteristiche, in modo da ottenere le matrici Origine-Destinazione distinte per modo e periodo, da caricare successivamente nella rete. Infatti nella fase successiva (*Assignment* - Figura 3-5) si producono quattro assegnazioni, una per ogni periodo; dato che il modello Activity-Based è in grado di simulare le attività prodotte dalla popolazione residente nell'area di studio e quindi solamente gli spostamenti che hanno origine interna all'area stessa, nella fase di assegnazione sono stati caricati anche gli spostamenti con origine esterna ottenuti da matrici pre-esistenti.

Infine si applica di nuovo il blocco *HWLOS* (Figura 3-5) per aggiornare i valori dei livelli di servizio sulla base delle caratteristiche della rete carica con il precedente processo di assegnazione.

Da qui è possibile procedere attraverso un processo iterativo che si arresta quando la differenza tra i livelli di servizio di due iterazioni consecutive è minore di una tolleranza prefissata. Quando viene soddisfatto questo criterio significa che la domanda generata dal simulatore di attività è in equilibrio con i livelli di servizio prodotti dal suo caricamento sulla rete.

Il simulatore di attività si compone di diversi sotto-modelli inseriti nella struttura riportata in Figura 3-6:

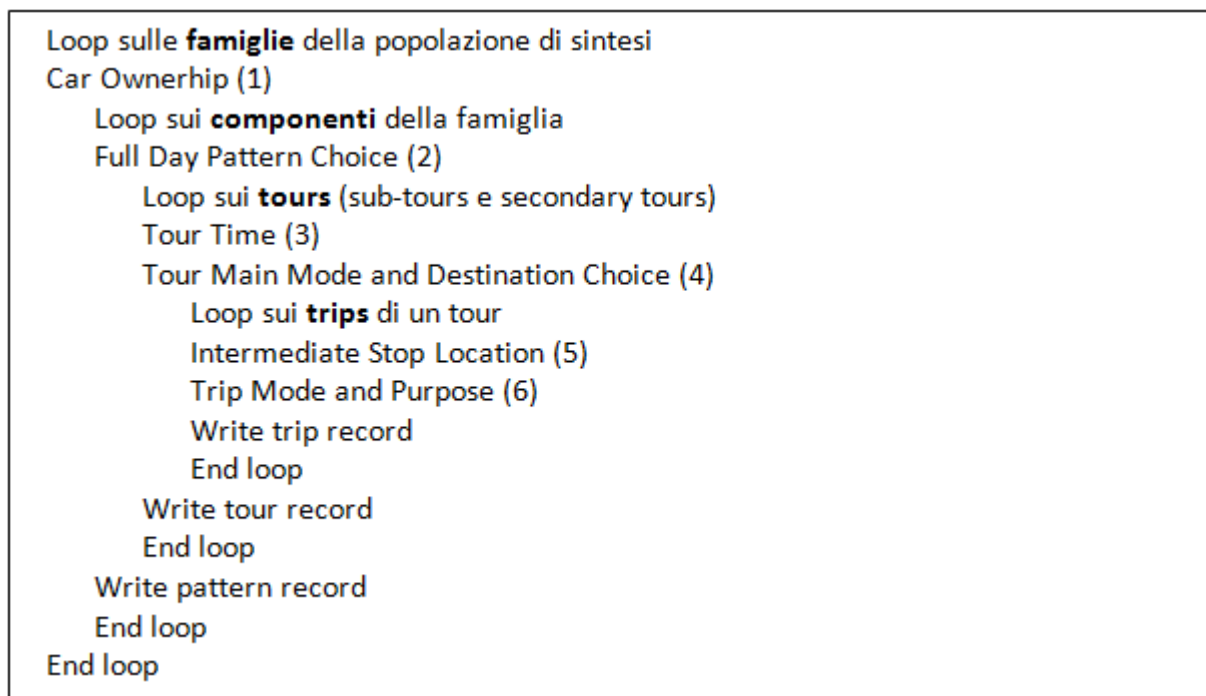


Figura 3-6: struttura e componenti del simulatore di attività

Car Ownership (1)

Il modello determina il numero di auto possedute da una famiglia (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6+) sulla base delle caratteristiche socio-economiche della famiglia stessa e dell'accessibilità della zona di residenza. In particolare sono calcolate le utilità del possesso di diversi veicoli, a seconda di:

- Numero di componenti della famiglia;

- Numero di adulti in una famiglia;
- Numero di lavoratori in una famiglia;
- Numero di studenti in una famiglia;
- Reddito della famiglia;
- Accessibilità della zona in cui la famiglia risiede.

Il numero di autoveicoli posseduti è determinato in modo casuale sulla base delle utilità prima determinate.

Full Day Pattern Choice (2)

Questa fase permette di assegnare una struttura di attività giornaliera a ciascun componente della famiglia. Le 51 strutture proposte, identificate dall'analisi di un campione di individui, sono distinte in base a:

- Scelta se rimanere a casa o effettuare degli spostamenti;
- Scopo del *primary tour* (*work, school e other*);
- Numero di fermate prima (*stops before*) e dopo (*stops after*) la destinazione del tour;
- Numero di *sub-tours*;
- Numero di *secondary tours*.

Il modello calcola le utilità di ogni *pattern* a seconda di:

- Tipo di occupazione dell'individuo (*worker, student* o altro);
- Caratteristiche del *pattern* prima riportate;
- Attributi della famiglia (numero di individui, di adulti, di bambini, di lavoratori, di auto possedute e reddito);
- Accessibilità della zona di residenza.

Sulla base di queste utilità, la probabilità di scelta di un *pattern* è calcolata attraverso un modello di tipo *Nested Logit* considerando la struttura riportata in Figura 3-7:

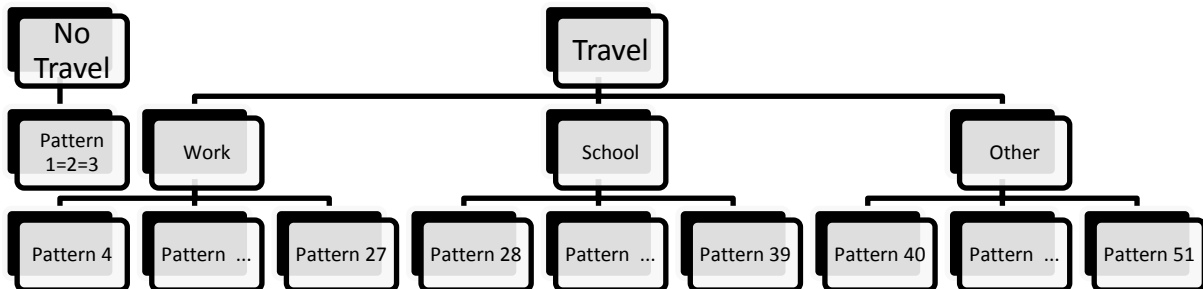


Figura 3-7: schema di scelta dei possibili patterns

Note queste probabilità, il modello associa una struttura di attività ad ogni individuo in modo stocastico. In seguito sostituisce le caratteristiche del *pattern* scelto con dei valori determinati casualmente; in questo modo la nuova sequenza di attività della singola persona non è più quella utilizzata all'inizio della procedura, bensì varia per:

- Numero e tipo dei *sub-tours* (solo *work-based*);
- Numero e scopo dei *secondary tours* (solamente *other*);
- Numero di *stops before* e *stops after*.

La determinazione casuale delle suddette caratteristiche avviene sulla base di probabilità pre-calcolate relative ad alcune combinazioni di queste variabili (determinate dall'analisi di un campione pre-selezionato di individui).

Tour Time (3)

Il modello definisce i periodi di inizio e di fine di ciascun tour; i periodi considerati sono 4 e sono organizzati in modo da ottenere 13 diverse combinazioni del periodo di partenza e di arrivo:

1. AM: punta della mattina, avente la durata di 2 ore;
2. MD: periodo di morbida di metà giornata, con la durata di 7 ore;
3. PM: punta della sera, di 2 ore;

4. OP: morbida della notte, di 13 ore.

In seguito le utilità di ciascuna combinazione sono calcolate sulla base di:

- Misure di accessibilità della zona di residenza e scopo del tour, per il *primary tour*;
- Periodo del *primary tour*, per *secondary tours* e *sub-tours* (queste utilità sono pre-calcolate).

Attraverso questi valori, la procedura determina in maniera stocastica il periodo di partenza e di ritorno da un tour.

Tour Main Mode and Destination Choice (4)

In questa fase sono calcolati il modo di trasporto principale e la destinazione di ogni tour. All'inizio il modello pone la destinazione del *primary tour* come origine dei *work-based tours*, e la zona di residenza come origine di tutti gli altri tipi di tours. In seguito sono definite le utilità di ciascun modo e di ciascuna zona di destinazione. In particolare i modi considerati sono 3:

1. SOV (*Single Occupancy Vehicle*): autoveicoli con solo guidatore;
2. HOV (*High Occupancy Vehicle*): automobili con passeggero a bordo;
3. Walk: a piedi.

Tali utilità dipendono da:

- Per i diversi modi di trasporto:
 - Caratteristiche della famiglia (numero di componenti, di adulti, di lavoratori, di auto possedute e reddito)
 - Caratteristiche dell'individuo (età);
 - Attributi della zona di destinazione (costo del parcheggio, per SOV e HOV);
 - Attributi della coppia Origine-Destinazione (Livelli di servizio);
 - Caratteristiche del tour (motivo, periodi di inizio e di fine);
- Per le varie destinazioni:

- Caratteristiche della famiglia (numero di componenti, di adulti, di lavoratori, di auto possedute e reddito)
- Caratteristiche dell'individuo (età);
- Attributi della zona di destinazione (costo del parcheggio, per SOV e HOV, numero di impiegati e di studenti);
- Attributi della coppia Origine-Destinazione (Livelli di servizio);
- Caratteristiche del tour (motivo, periodi di inizio e di fine).

La determinazione del modo e della destinazione di ogni tour è effettuata in modo casuale attraverso le utilità prima calcolate.

Intermediate Stop Location (5)

In questo modello ogni tour è suddiviso in due metà; per ciascuna di esse sono noti, dalle fasi precedenti:

- ✓ Zone di origine e destinazione;
- ✓ Scopo (per la seconda metà, è *work*, se il tour è di tipo *work-based*, altrimenti è *at home*);
- ✓ Numero di *stops*;
- ✓ Periodo.

Il numero totale di *trips* in una metà è pari al numero di *stops* incrementato di 1. A questo punto la destinazione dell'ultimo *trip* di una *half-tour* è posta pari alla destinazione del *half-tour* stesso. In seguito si calcolano i valori dell'impedenza (o deterrenza allo spostamento) verso una zona e da una zona. Essi dipendono da:

- Per l'impedenza verso la fermata intermedia (*stop*):
 - Caratteristiche della zona (costo del parcheggio);
 - Modo di trasporto;

- Periodo di tempo;
 - Attributi della coppia Origine-Destinazione (Livelli di servizio);
- Per l'impedenza dalla *stop*:
- Modo di trasporto;
 - Periodo di tempo;
 - Attributi della coppia Origine-Destinazione (Livelli di servizio).

L'utilità della destinazione è calcolata considerando l'impedenza ed il numero di impiegati nella zona stessa. Attraverso queste utilità il modello determina la zona di destinazione di ogni *trip* in modo stocastico.

Trip Mode and Purpose (6)

Questa fase prevede di assegnare il modo di trasporto ad ogni *trip*. In particolare il *trip mode* è posto pari al *tour mode*.

Inoltre il modello determina il *purpose* di ogni *trip*, con i seguenti passi:

- Per la prima metà del tour, il motivo dell'ultimo *trip* è pari a quello del tour stesso;
- Lo scopo dell'ultimo *trip* appartenente ad un *work-based sub-tour* diventa *work*;
- L'ultimo *trip* di altri tour ha *at home*, come scopo;
- Per i restanti *trips*, il *purpose* è posto pari a *intermediate stop*.

Attraverso questa procedura l'*Activity & Travel Simulator* determina la sequenza e le caratteristiche delle attività di ogni individuo appartenente alla popolazione di sintesi. In questo modo per ogni individuo appartenente ad una famiglia si ottengono, con riferimento ad una generica giornata lavorativa, i seguenti outputs a differenti livelli di dettaglio (*trip*, *tour* e *pattern*):

- A livello di tour:
 - Numero di tours compiuti;
 - Scopo del *primary* tour;

- Numero di *secondary tours*;
 - Periodo, modo, origine e destinazione dei tour;
 - Numero di fermate intermedie in ciascuna metà delle due metà dei tour;
- A livello di trip:
- Modo, periodo, origine e destinazione degli spostamenti;
 - Lunghezza e durata dei trips.

Come si nota nel modello è presente una forte componente di aleatorietà, introdotta con l'utilizzo di procedure di campionamenti di tipo Monte Carlo. Tuttavia gli errori così introdotti diminuiscono con l'aumentare degli individui modellati e sono comunque molto piccoli rispetto ad errori di altro tipo presenti in qualsiasi modello (errori di misura, di previsione degli input) (Ortuzar & Willumsen 2011; Bradley et al. 1999).

3.4.1 Implementazione del modello

Come già anticipato, in questo lavoro di tesi è stato adottato il modello Activity-Based proposto nel pacchetto Cubetown (Citilabs 2015), all'interno del software di simulazione Cube Voyager di Citilabs, introducendo alcune modifiche in fase di implementazione.

Il modello Activity-Based descritto in precedenza è in grado di produrre risultati con un alto livello di disaggregazione e di dettaglio, ma è caratterizzato da una struttura molto complessa, con un elevato numero di parametri. Per la difficoltà di reperimento delle informazioni necessarie a una completa calibrazione di tali parametri (indagini a domicilio *ad hoc*), si è proceduto ad una validazione indiretta del modello, confrontando la matrice Origine-Destinazione stimata dal modello per il periodo della mattina, con una matrice pre-esistente relativa alla stessa area di studio e determinata sulla base di indagini cordonali e a domicilio, e aggiornata attraverso conteggi di traffico.

Tale verifica è stata effettuata in riferimento agli spostamenti aventi origine interna all'area di studio e destinazione sia interna che esterna. Gli spostamenti totali prodotti nei due casi differiscono tra loro del 3,4%; inoltre la popolazione generata dal modello è inferiore di circa il 2,4% rispetto a quella attualmente residente nell'area di studio

Il modello Activity-Based così validato è stato incorporato in un modello più ampio, in grado di rappresentare l'intero processo di analisi della vulnerabilità della rete di trasporto (Capitolo 3.3). Per rendere comparabili i risultati ottenuti negli scenari di danno sono stati introdotti dei vincoli alle attività delle persone, derivanti da quelle compiute dagli stessi individui nello scenario di riferimento iniziale:

- Per **tutti** gli individui:
 1. Il numero di veicoli posseduti da una famiglia deve essere lo stesso che si ha per lo stato iniziale del sistema;
- Gli individui che nello stato iniziale hanno compiuto **almeno un tour per un motivo sistematico** (lavoro o scuola):
 2. Devono effettuare comunque un tour per lo stesso **motivo**;

3. Devono mantenere la **destinazione** di quel tour (oppure non effettuare il tour se la destinazione non è raggiungibile, come avviene per le zone isolate in seguito all'eliminazione dell'arco);
4. Devono compiere quel tour nello stesso **periodo**.

Dato che la seconda categoria di vincoli è posta a livello di tour, gli utenti sono liberi di modificare le caratteristiche di tutti gli spostamenti effettuati prima e dopo quelli di tipo sistematico. Tale assunzione è coerente con quello che avviene tipicamente nella realtà; un individuo è vincolato ad andare al lavoro o a scuola in un determinato luogo e in uno specifico orario, anche quando un tratto di strada viene chiuso, ma può decidere di modificare la catena di spostamenti in relazione alle diverse prestazioni della rete.

Per verificare la coerenza dell'introduzione di tali vincoli, si sono generate sequenze successive di spostamenti a partire dalla sequenza di attività determinata sulla rete intatta. La procedura, riportata in Figura 3-8, è stata applicata per 20 volte, ottenendo 20 diverse sequenze di attività, basate sui vincoli alle attività degli individui introdotti dalla prima iterazione.

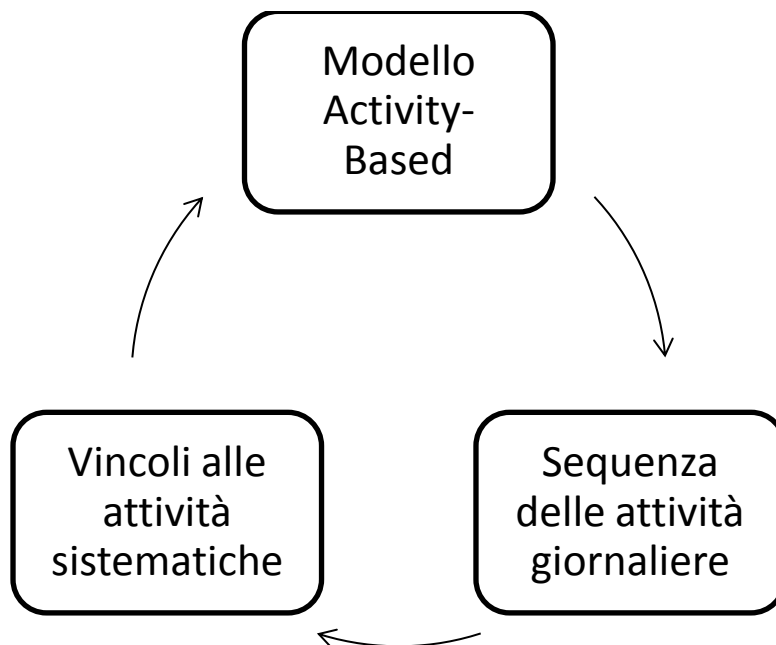


Figura 3-8: rappresentazione schematica del processo per la scelta dei vincoli

Come si può osservare dalla Figura 3-8, il numero di spostamenti effettuati per diversi motivi (sistematici e non) tende a diminuire dopo le prime iterazioni e ad oscillare intorno allo zero.

Si è quindi scelto di utilizzare la sequenza di attività prodotta all'iterazione numero 19 come riferimento per il caso della rete intatta e come base per le analisi successive sulle reti danneggiate.

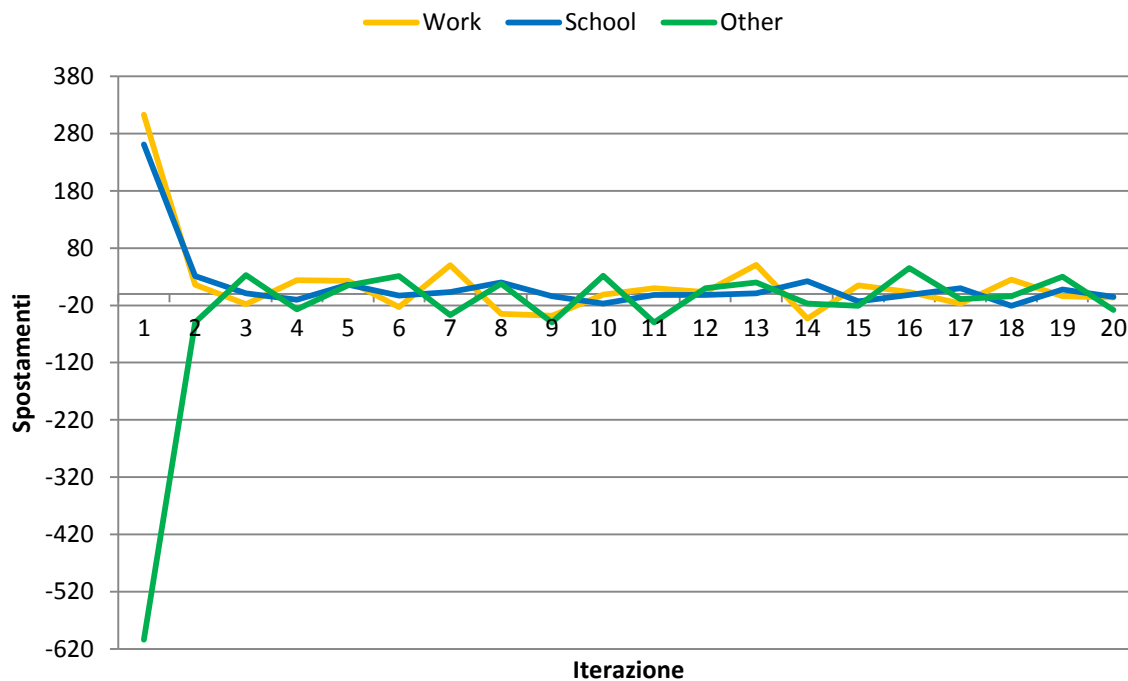


Grafico 3-1: andamento della differenza di spostamenti per i diversi motivi rispetto all'iterazione precedente del ciclo rappresentato in Figura 3-8

3.5 RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI

I dati richiesti dal modello Activity-Based utilizzato, sono i seguenti:

➤ Per ogni zona (TAZ):

✓ Numero di famiglie residenti;

Per ogni famiglia:

- (Fascia di) reddito;
- Numero di componenti;

Per ogni componente della famiglia (queste due caratteristiche non sono necessarie per ogni zona e per tutte le famiglie, ma solo per una o più zone e per un campione limitato, perché sono poi estese a tutta l'area di studio e a tutta la popolazione di sintesi tramite il Sintetizzatore di Popolazione):

- Età;
 - Tipo di impiego (studente, lavoratore, ...);
- ✓ Numero di studenti (nelle scuole della zona);
- ✓ Numero di lavoratori impiegati nei seguenti settori:
- Negozi al dettaglio (*retail*);
 - Servizi (*service*);
 - Altri;
- ✓ Eventuale presenza di parcheggi a pagamento.

Il numero di famiglie residenti in ogni zona e la loro composizione è stato ricavato da dati forniti dall'Ufficio Anagrafe del Comune di Dolo.

Da un'indagine telefonica effettuata nell'ambito della redazione del Piano Urbano del Traffico è stato possibile ricavare l'età ed il tipo di occupazione dei componenti delle famiglie intervistate che costituiscono circa il 5,3% (337 su 6319) delle famiglie residenti nel comune di Dolo. In particolare sono state considerate le seguenti tipologie di occupazione:

1. Lavoratore dipendente
2. Lavoratore autonomo
3. Casalinga
4. Studente
5. Pensionato
6. Inoccupato
7. Altro

Queste due informazioni sono utilizzate nel *Population Synthesizer* per determinare le caratteristiche della popolazione nell'are di studio e la struttura delle loro attività giornaliere.

Una procedura specifica è invece stata seguita per valutare la fascia di reddito percepito da ogni famiglia. Dal sito del Dipartimento delle Finanze del Ministero dell'Economia e delle Finanze (Finanze 2015) è stato possibile ricavare il numero di contribuenti del comune di Dolo appartenenti a otto diverse fasce di reddito relativi all'anno d'imposta più recente (2013). Per l'implementazione del modello, queste ultime sono state raggruppate nei seguenti insiemi:

1. INC1: Da 0 a 15000 €;
2. INC2: Da 15000 a 26000 €;
3. INC3: Da 26000 a 55000 €;
4. INC4: Oltre 55000 €.

In questo modo si sono ottenute le percentuali di contribuenti del Comune di dolo appartenenti a ciascuna fascia di reddito (Tabella 3-1).

Contribuenti	INC1	INC2	INC3	INC4	Totali
Numero	4061	3736	2354	483	10634
Percentuale	38	35	22	5	100

Tabella 3-1: suddivisione della popolazione in base alle fasce di reddito

Dalla popolazione di sintesi sono stati selezionati solamente gli individui con un impiego di tipo 1, 2 o 5, ovvero dei percipienti reddito, e a ciascuno di essi è stato associato casualmente un certo reddito, in modo da rispettare nella popolazione la distribuzione espressa in Tabella 3 1. Dall'aggregazione di questi valori si è ottenuto il reddito complessivo di una famiglia e la relativa fascia di appartenenza, verificando che il reddito medio fosse confrontabile a quello della regione Veneto.

Non essendo nota la ripartizione di questi valori tra le varie zone dell'area di studio, ed essendo tali dati espressi in termini di persone, e non di famiglie, è stata adottata la seguente procedura:

- I. Dall'indagine campionaria è stato determinato il numero di famiglie composte da 1 fino a 6 individui (la caratteristica dei gruppi così ottenuti è stata denominata SIZE);
- II. Dalla stessa fonte, per ciascuna SIZE, è stato ricavato il numero di persone che presentano la dichiarazione dei redditi; a questo fine sono stati considerati solamente gli individui appartenenti che hanno un'occupazione di tipo 1, 2 e 5;
- III. Per ogni SIZE, è stato calcolato il rapporto tra il numero di contribuenti appartenente alle famiglie di quella SIZE (ottenuto dalla fase II.) ed il numero di famiglie della stessa SIZE (ricavato dalla fase I.);
- IV. Moltiplicando, per ciascuna SIZE, il rapporto precedente con il numero di famiglie di quella SIZE in ogni zona, è stato determinato, per ogni zona, il numero di individui appartenenti ad una famiglia avente una specifica SIZE che hanno presentato la dichiarazione dei redditi;
- V. I valori ottenuti dalla fase precedente sono stati sommati su ogni zona;

- VI. Il totale di ogni zona è stato ripartito tra le diverse fasce di reddito prima considerate secondo le percentuali fornite dal Dipartimento delle Finanze (Finanze 2015);
- VII. I dati ottenuti dalla fase precedente sono stati moltiplicati per opportuni fattori di espansione in modo da rispettare i totali, per ogni zona, ricavati dal passo V.;
- VIII. Attraverso i rapporti ottenuti dalla fase III. è stato possibile convertire i dati da numero di contribuenti a numero di famiglie, che sono stati aggiustati in modo da ottenere valori interi.

Dall'analisi dell'area di studio è stato possibile identificare le zone che contengono delle scuole. Inoltre dai dati forniti dagli Uffici Comunali del comune di Dolo si è ricavato il numero di studenti appartenenti ad ogni istituto suddivisi in due categorie a seconda del tipo di scuola.

TAZ	Nome	Tipo	Alunni	Classificazione AB
2	Galilei	Scuola superiore	1019	Enrol_hs
2	Istituto Lazzari	Scuola superiore	580	Enrol_hs
2	Istituto Musatti	Scuola superiore	826	Enrol_hs
9	Centro professionale Enaip	Scuola superiore	254	Enrol_hs
6	Immacolata di Lourdes	Infanzia paritaria	83	Enrol_elem
38	Santa Maria Goretti	Infanzia paritaria	87	Enrol_elem
18	Santa Bernardetta	Infanzia paritaria	86	Enrol_elem
85	Isola del Tesoro	Infanzia	145	Enrol_elem
5	De Amicis	Primaria	238	Enrol_elem
5	Giuliani	Media	299	Enrol_elem
18	Gandhi	Media	134	Enrol_elem
80	Giotto	Primaria	202	Enrol_elem
18	Piccole Tracce	Infanzia	87	Enrol_elem
37	San Giovanni Bosco	Primaria	107	Enrol_elem
18	Manin	Primaria	227	Enrol_elem

Tabella 3-2: classificazione scuole ed alunni

In questo modo è stato determinato il numero di studenti di ciascuna delle due categorie per ogni zona.

I dati relativi al numero di lavoratori per ogni zona di analisi sono stati ricavati dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) per l'anno 2002. In particolare, i lavoratori sono suddivisi per zona censuaria e per settore di attività secondo la Classificazione delle Attività Economiche (ATECO 2002). Tali settori sono stati raggruppati in modo da ottenere tre categorie:

1. *Retail*: vendite al dettaglio;
2. *Service*: servizi;
3. *Other*: altre attività.

La suddivisione adottata è la seguente:

Sezioni ATECO 2002	Sottosezioni ATECO 2002	Classificazione AB
Agricoltura, caccia e silvicoltura		Other
Pesca, piscicoltura e servizi connessi		Other
Estrazione di minerali		Other
Attività manifatturiere		Other
Produzione e distribuzione di energia elettrica, gas e acqua		Other
Costruzioni		Other
Commercio all'ingrosso e al dettaglio; riparazione di autoveicoli, motocicli e di beni personali e per la casa	Commercio, manutenzione e riparazione di autoveicoli e motocicli; vendita al dettaglio di carburanti per autotrazione	Retail
	Commercio all'ingrosso e intermediari del commercio, autoveicoli e motocicli esclusi	Other
	Commercio al dettaglio (escluso quello di autoveicoli e di motocicli); riparazione di beni personali e per la casa	Retail
Alberghi e ristoranti		Retail
Trasporti, magazzinaggio e comunicazioni		Service
Attività finanziarie		Service
Attività immobiliari, noleggio, informatica, ricerca, servizi alle imprese		Service
Amministrazione pubblica		Service
Istruzione		Service
Sanità e assistenza sociale		Service
Altri servizi pubblici, sociali e personali		Service

Tabella 3-3: classificazione degli addetti nei vari settori

Attraverso l'utilizzo di un software GIS e Google Earth è stato possibile mettere in relazione le zone di traffico con le zona censuarie, e associare a ciascuna TAZ il numero di impiegati di ATECO; questo è stato eseguito attraverso una ripartizione effettuata in base alla superficie di ogni zona di traffico rispetto alla zona censuaria di appartenenza. Dato che tali informazioni risultano di molto antecedenti rispetto alle altre utilizzate nel modello, in quanto riferite all'anno 2002, dal sito dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT 2015) è stato ricavato il numero di addetti alle imprese del comune di Dolo suddivise per settore di attività economica (ATECO 2007) e relativi all'anno 2011. Attraverso una corrispondenza tra le

classificazioni ATECO 2002 e ATECO 2007, il numero di impiegati per ogni zona e per i tre settori considerati sono stati aggiornati all'anno 2011.

Da ultimo sono state identificate le zone che includono al proprio interno un parcheggio a pagamento. Ad esse è stato associato un prezzo orario per la sosta degli autoveicoli in base alle tariffe stabilite dal Comune di Dolo.

Attraverso l'applicazione del modello così elaborato è possibile ottenere una stima degli spostamenti generati dalle zone interne e aventi destinazione interna all'area di studio; restano quindi esclusi dal modello gli spostamenti diretti all'esterno dell'area. Per modellare questi ultimi è stata adottata la seguente procedura:

1. Dall'indagine sugli spostamenti delle famiglie e dei loro componenti sono stati isolati gli spostamenti interni-esterni e gli spostamenti interni-interni relativi al periodo di punta della mattina. Tutti questi sono stati raggruppati secondo lo scopo dello spostamento; i motivi considerati, in accordo con quelli utilizzati dal modello Activity-Based: *work* (lavoro), *school* (scuola) e *other* (altro), ulteriormente suddiviso in *retail* e *service*;
2. A ciascuno dei precedenti spostamenti è stata associata una destinazione tra le zone esterne presenti nel modello;
3. Noti il numero di lavoratori (nei settori *retail*, *service* e *other*) ed il numero di studenti (*enrol_hs* ed *enrol_elem*) presenti nelle zone interne all'area, è stato calcolato il rapporto tra questi ed il numero di spostamenti interni-interni prima determinato ed avente allo stesso motivo;
4. Moltiplicando tali rapporti per il numero di spostamenti interni-esterni prima ricavato è stato possibile stimare il totale degli impiegati e degli studenti su tutte le zone esterne;
5. Questi totali sono stati ripartiti tra le varie zone a seconda del numero di spostamenti attratti determinati al punto 2.

In questo modo le zone esterne all'area di studio, avendo un numero di impiegati e studenti diverso da zero, diventano accessibili agli utenti; quindi gli individui hanno la possibilità di compiere le proprie attività anche in queste zone.

3.6 ANALISI DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Come indicato in precedenza, l'analisi di vulnerabilità della rete è stata condotta rimuovendo un arco alla volta e ripetendo il calcolo degli indicatori per i vari scenari di danno, applicando sia il modello a domanda fissa che il modello a domanda variabile (modello Activity-Based). Tale analisi è stata effettuata su un gruppo di 52 archi della rete, per limitare l'onere computazionale dell'analisi ed escludere gli archi che appaiono di scarsa rilevanza.

Dall'analisi della struttura topologica del grafo e della distribuzione dei flussi sulla rete in condizioni normali è stato possibile identificare gli archi più rilevanti ai fini del deflusso veicolare e selezionarne alcuni per l'analisi (Figura 3-9). Tra questi sono stati inclusi gli archi che interrompono le principali vie di comunicazione dell'area, tra cui la Strada Regionale n.11, Via San Giacomo, e le Provinciali n.19 (Via del Vaso), n.13 (Via Badoera) e n.22 (Via Stradona). Inoltre sono stati considerati alcuni archi presenti nelle intersezioni più importanti, come le intersezioni semaforizzate di Dolo (Figura 3-10), tra Via Cairoli e Via Matteotti, e tra Via Matteotti e Via Zinelli, e di Sambruson (Figura 3-11), tra Via Argine Sinistro e Via Badoera, e tra Via Stradona, Via Calcroci e Via Argine Sinistro; oltre ad alcune rotonde come quella tra Via Riviera XXIX Aprile e Via Pasteur (Figura 3-10).

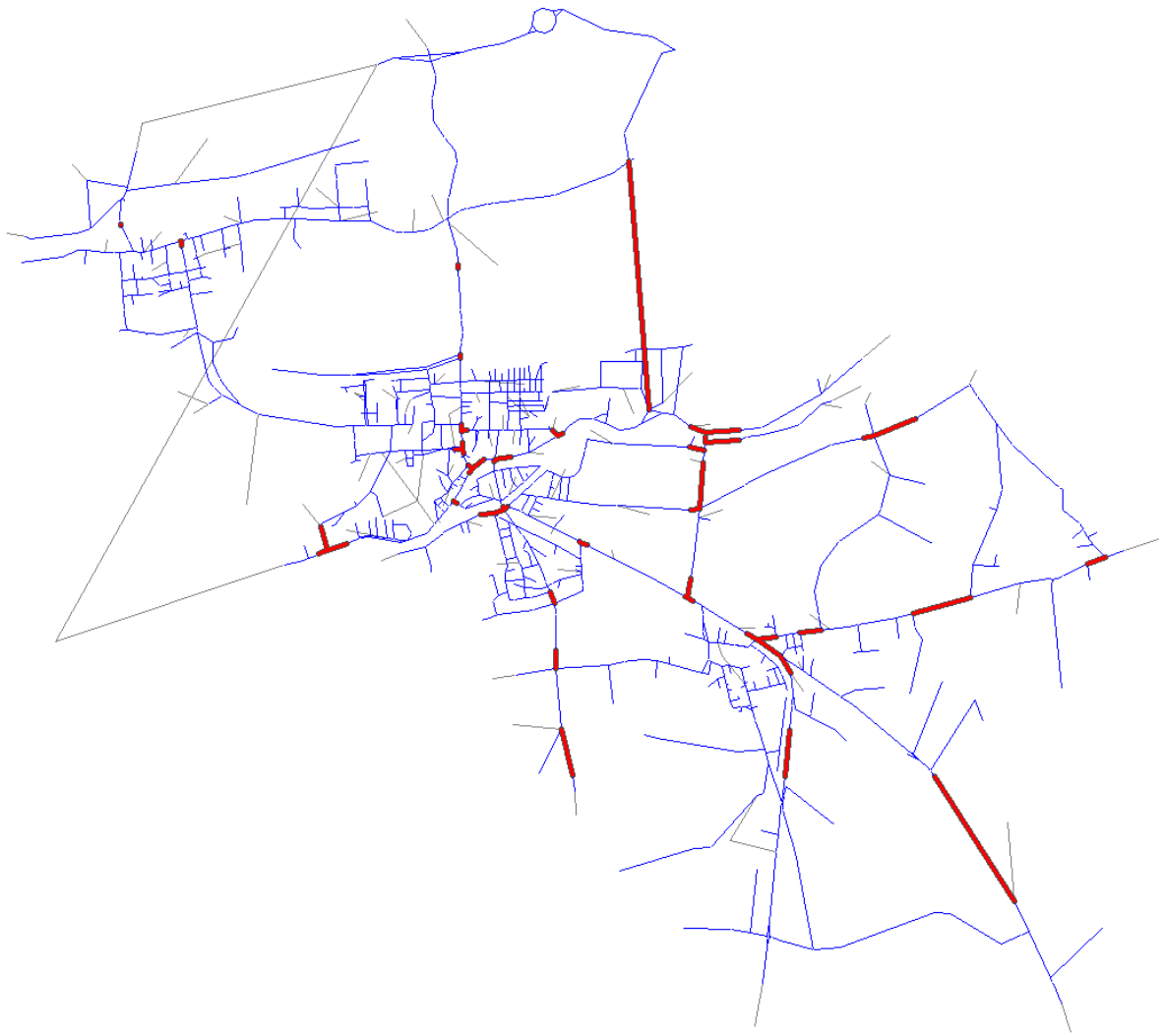
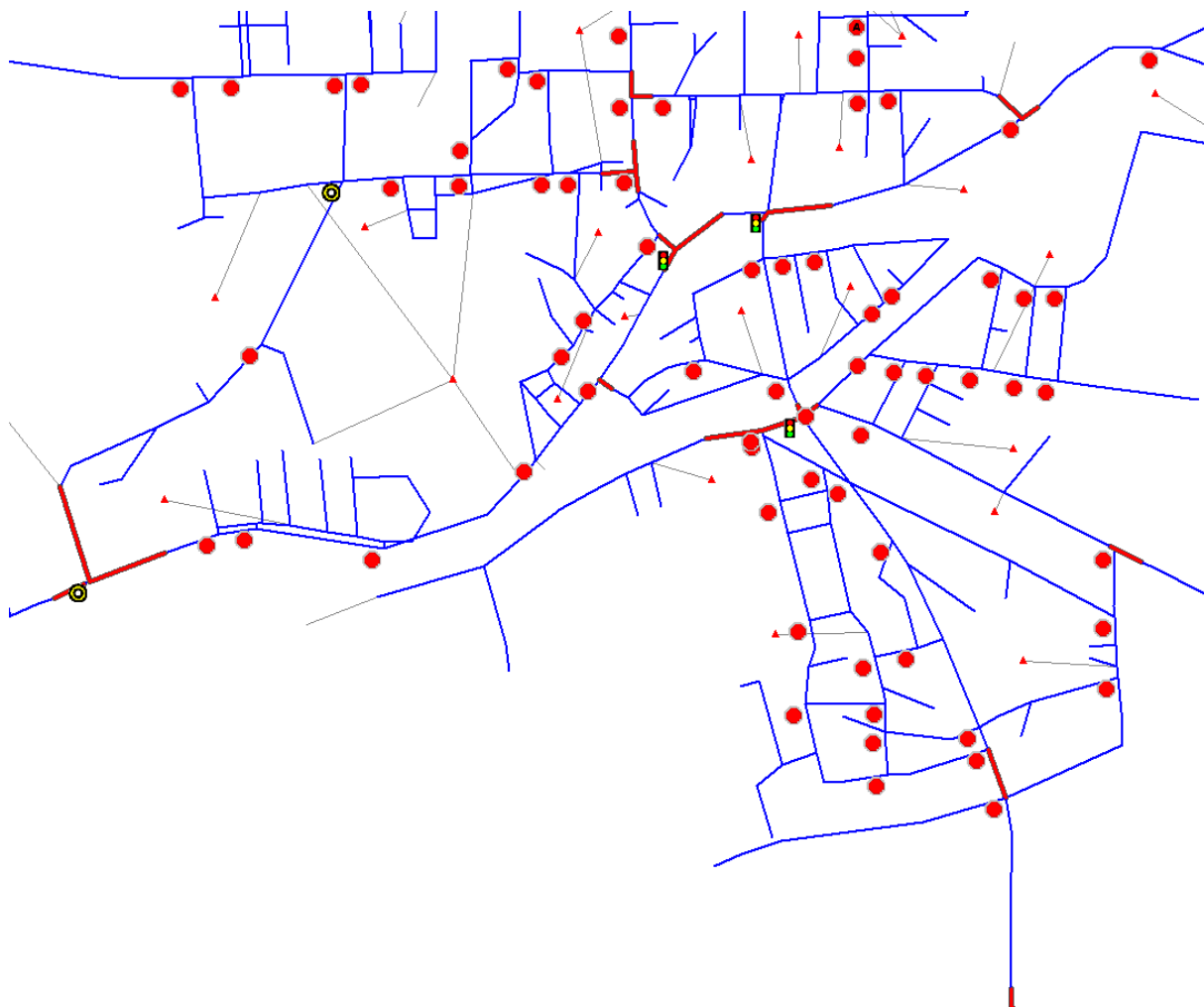


Figura 3-9: rappresentazione della rete di Dolo, in rosso sono evidenziati gli archi in esame successivamente eliminati dal grafo



LEGENDA INTERSEZIONI



Intersezione semaforizzata

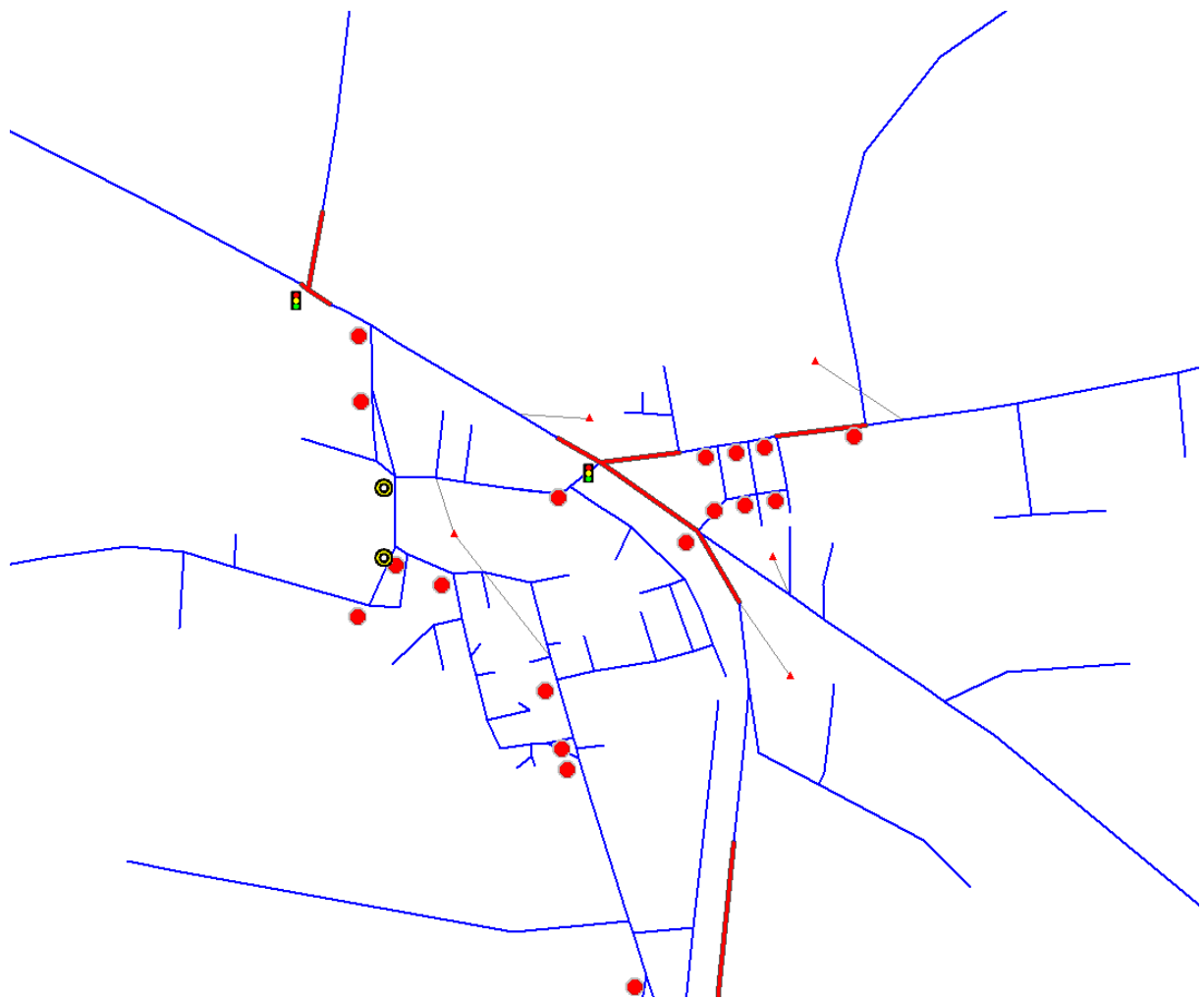


Intersezione a priorità



Intersezione a rotatoria

Figura 3-10: particolare della rete del centro di Dolo con le intersezioni, in rosso: archi in esame da eliminare



LEGENDA INTERSEZIONI




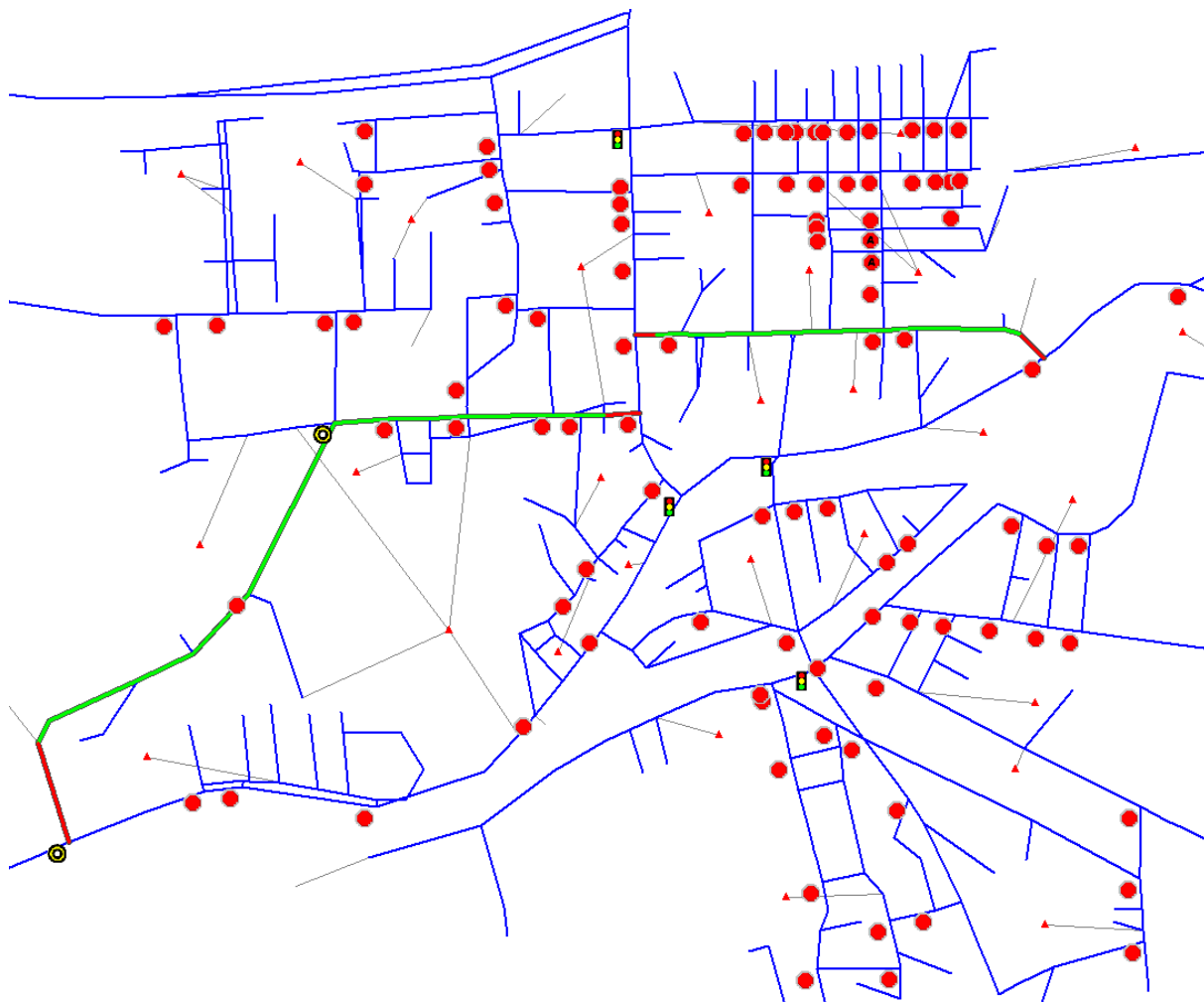
	Intersezione semaforizzata
	Intersezione a priorità
	Intersezione a rotatoria

Figura 3-11: particolare della rete presso Sambruson con le intersezioni, in rosso: archi in esame da eliminare

Infine sono stati considerati alcuni archi che sono parte della viabilità secondaria del centro di Dolo (Figura 3-12); in particolare lungo Via Pasteur e Via Arino, ad Ovest, e lungo Via Vittorio Veneto, ad Est.



LEGENDA INTERSEZIONI



Intersezione semaforizzata



Intersezione a priorità



Intersezione a rotatoria

Figura 3-12: in verde: viabilità interna al centro di Dolo alternativa al passaggio attraverso le intersezioni semaforizzate di Via Matteotti, in rosso: archi da eliminare

In seguito sono stati selezionati anche gli archi più sensibili da un punto di vista strutturale, ovvero i ponti e gli attraversamenti minori; come i quattro ponti sul Naviglio del Brenta, la cui interruzione porta alla separazione della rete in due porzioni.

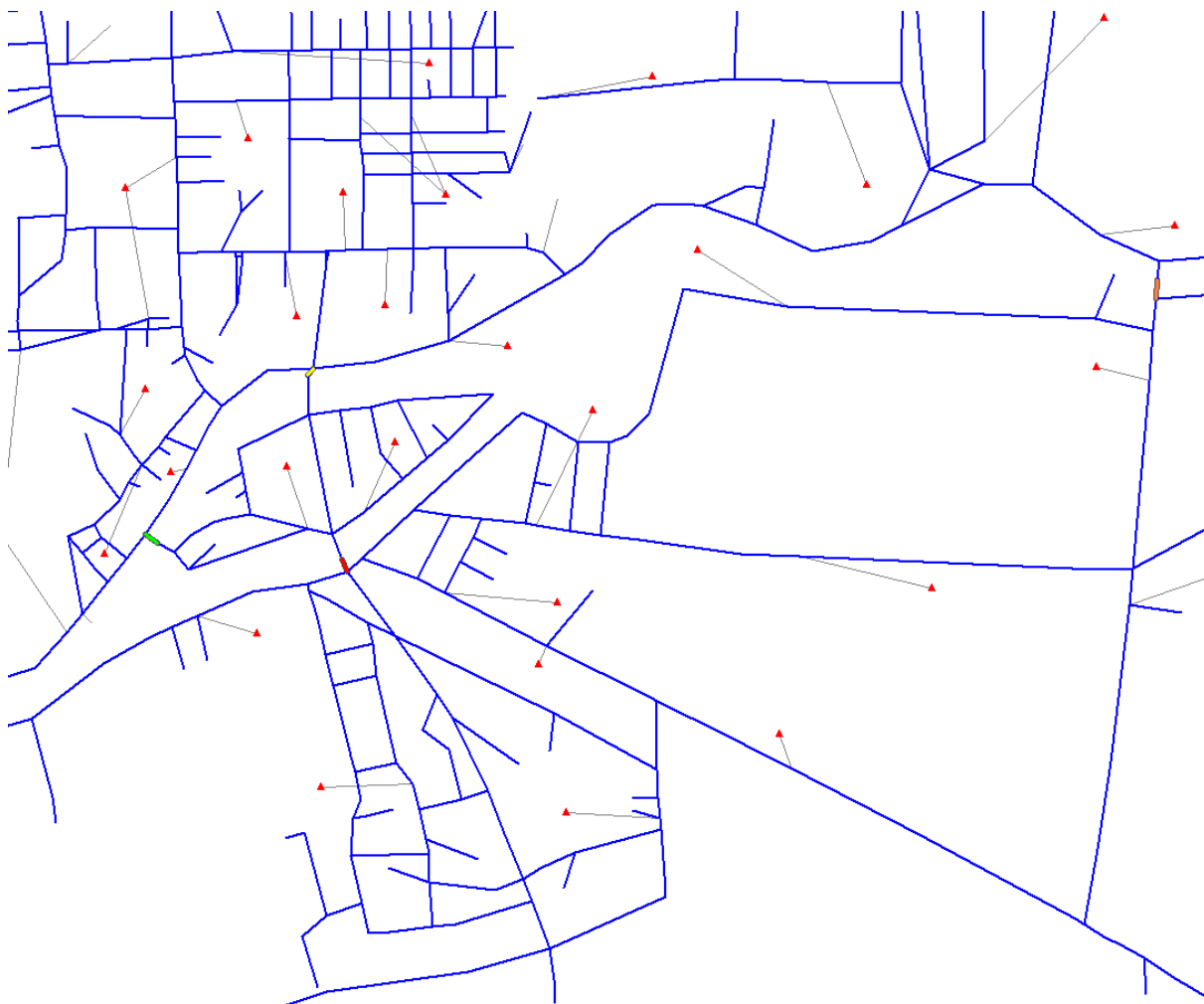


Figura 3-13: particolare del centro di Dolo, in colori diversi dal blu: archi sul Naviglio del Brenta che, se eliminati, isolano l'intera rete in due porzioni

Infine l'insieme dei link in esame comprende anche 5 cut-link che, se eliminati singolarmente, isolano alcune porzioni di rete (Figura 3-14); è importante evidenziare che in tutte le aree isolate, ad eccezione di quella generata dal link 100483, vi sono dei centroidi residenziali e dei centroidi che rappresentano zone esterne. Questa situazione è rilevante nel caso del modello a domanda variabile, poiché tali aree, mantenendo comunque un collegamento con alcune zone esterne, permettono agli utenti di compiere quelle attività le cui destinazioni non erano state vincolate (per motivi sistematici) su centroidi interni all'area. Questi cut-link sono stati scelti per la loro particolare rilevanza sia come infrastrutture che come elementi costitutivi delle principali direttrici presenti nell'area. Infatti il 107490 ed il 100483 rappresentano due ponti, il primo sull'autostrada ed il secondo sull'idrovia Venezia-Padova; invece i tre restanti consentono di valutare gli effetti della chiusura dei principali collegamenti dell'area lungo la direzione Est-Ovest.



Figura 3-14: rappresentazione della rete con i cut-link ed il relativo codice identificativo

Di seguito (Tabella 3-4) si riporta l'elenco completo degli archi selezionati per l'analisi della vulnerabilità con il relativo codice identificativo ed il nome della via di cui fanno parte.

NLINK	NOMESTRADA	NLINK	NOMESTRADA
100319	Via Torre	106650	Via Giuseppe Mazzini
100368	Via Giuseppe Garibaldi	106790	Via Benedetto Cairoli
100376	Via Benedetto Cairoli	107490	Via Ferrovia
100382	Via Benedetto Cairoli	108431	Via Riviera del Brenta
100383	Via Giacomo Matteotti	109294	Via Badoera
100387	Via San Giacomo	109422	Riviera 29 Aprile
100397	Via Destro Zinelli	109448	Via Badoera
100409	Via Destro Zinelli	110097	Via Argine Sinistro
100412	Via Argine Sinistro	110100	Via Seriola
100483	Via del Vaso	110105	Via Ettore Tito
100515	Via Brentabassa	110106	Riviera Martiri della Libertá
100525	Via Badoera	110134	Via Seriola

100551	Via Calcroci	110139	Via Seriola
100552	Via Stradona	110174	Via Calcroci
100577	Via Stradona	200036	Via Argine Sinistro
100599	Via Stradona	200058	Via Giacomo Matteotti
101043	Via Sambruson	200065	Via Argine Sinistro
102442	Via Provinciale Sud	200117	Via del Vaso
103789	Via Provinciale Sud	200131	Via Ca' Tron
104304	Via Calcroci	200144	Via Argine Sinistro
104653	Via del Vaso	300006	Via Arino
104826	Via Giacomo Matteotti	400055	Via Vittorio Veneto
105446	Via Cazzaghetto	400063	Via San Giacomo
106603	Via Arino	400101	Via Argine Sinistro
106610	Via Bendetto Cairoli	599056	Via Brentasecca
106635	Via Vittorio Veneto	600002	

Tabella 3-4: numero degli archi in esame e loro ubicazione

Dopo aver selezionato i link da esaminare è stato necessario identificare alcuni indicatori per valutare le conseguenze della chiusura di un arco sulla rete e sulla struttura delle attività giornaliere degli utenti. In questo modo è possibile ottenere un'indicazione quantitativa della vulnerabilità di specifici link e ordinarli in base alla loro importanza. La scelta è stata effettuata in seguito all'analisi della letteratura, considerando gli aspetti che ciascun indice permette di evidenziare in rapporto agli obiettivi della tesi. Il calcolo è stato sviluppato sia per gli scenari a domanda fissa che per quelli a domanda variabile; in particolare l'analisi dei risultati prodotti dai diversi indici, nel caso del modello Activity-Based, deve essere effettuata tenendo in considerazione le variazioni indotte dalla e nella domanda di traffico. L'utilizzo di più indicatori è giustificato dal fatto che ognuno considera variabili differenti, conducendo a risultati talvolta diversi tra loro in termini di importanza relativa dei link.

Il primo indicatore scelto è la variazione del costo totale di rete tra lo scenario iniziale e ciascuno degli scenari caratterizzati dalla rete privata di un arco (Scott et al. 2006):

$$\Delta C^{(e)} = \sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(e)} c_{ij}^{(e)} - \sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)} c_{ij}^{(0)}$$

Dove: e è l'arco eliminato in ogni scenario; 0 è lo scenario iniziale (rete intatta); x_{ij} è la domanda di traffico tra la zona i e la zona j ; c_{ij} è il costo, valutato in termini di tempo, per andare da i a j considerando anche i ritardi dovuti alle intersezioni.

Il secondo indicatore utilizzato è l'*importance* definita da Jenelius (Jenius et al. 2006) in maniera differente per i cut-link e i non cut-link (si veda il capitolo 2.4.3). In particolare per questi ultimi si ha:

$$Importance_{net}(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}$$

Invece per i primi l'importanza è valutata considerando la domanda insoddisfatta prodotta dall'isolamento di alcuni centroidi della rete:

$$Importance_{net}^{uns}(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(e)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}$$

Dove: u_{ij} è la domanda insoddisfatta per andare da i a j .

Per avere un'unica base di confronto per i cut-link e per i non cut-link, è stata adottata la definizione di *Link Imporance* di Rupì et al. (Rupì et al. 2014); questo indicatore è composto da due parti, una che considera il flusso sull'arco eliminato nello scenario iniziale e l'altra basata sulla differenza del costo totale di rete (così come definita in precedenza); i due sono pesati tramite un coefficiente β , il cui valore è scelto dall'analista (Rupì et al. 2014). L'importanza di un arco è calcolata come:

$$LI^{(e)} = \beta F^{(e)}(f) + (1 - \beta) G^{(e)}(\Delta C)$$

Dove: β è un parametro scelto per pesare l'importanza dei due indici $F^{(e)}(f)$ e $G^{(e)}(\Delta C)$. Inoltre:

$$F^{(e)}(f) = \frac{f_e - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}$$

In cui: f_e è il flusso giornaliero sul link e ; f_{max} e f_{min} sono rispettivamente il flusso giornaliero massimo e minimo tra tutti gli archi della rete; tutti questi parametri sono determinati nello scenario iniziale. Infine:

$$G^{(e)}(\Delta C) = \frac{g^{(e)} - g_{min}}{g_{max} - g_{min}}$$

Dove i parametri g sono definiti come:

$$g^{(e)} = \begin{cases} \Delta C^{(e)} \text{ se } u_{ij}^{(e)} = 0 \\ \Delta C^{(e)} + \alpha u_{ij}^{(e)} \text{ se } u_{ij}^{(e)} \neq 0 \end{cases}$$

In questo modo, per i cut-link, si ottiene un incremento del costo totale di rete proporzionale, tramite α , alla quantità di domanda insoddisfatta generata dalla loro eliminazione. Il parametro α corrisponde al minimo valore per cui i cut-links producono un $g^{(e)}$ maggiore dei non cut-link (Rupi et al. 2014).

Inoltre, per quantificare la variazione di accessibilità degli utenti del sistema, ovvero la loro possibilità di raggiungere le zone dell'area di studio partendo dalla propria residenza, è stata calcolata la variazione di accessibilità media per persona, definita come (Miller 2014; Miller et al. 2014):

$$ACC^{(e)} = \frac{\frac{A_s^{(e)}}{s^{(e)}} - \frac{A_s^{(0)}}{s^{(0)}}}{\frac{A_s^{(0)}}{s^{(0)}}}$$

Con:

$$A_s = \sum_{d=1}^D e^{V_{s,d}}$$

Dove: $s^{(0)}$ ed $s^{(e)}$ sono il numero di persone che effettuano uno spostamento rispettivamente per lo scenario iniziale e di rete senza il link e ; d è l'insieme di destinazioni che l'utente s può raggiungere partendo dalla propria zona di residenza; $V_{s,d}$ è l'utilità che s percepisce nel recarsi in d ed è funzione delle caratteristiche dell'individuo e della famiglia (reddito, età, numero di auto possedute), dei livelli di servizio della rete, e da variabili di zona (numero di impiegati, presenza di parcheggio a pagamento).

Infine, per avere un indice della variazione della domanda, sono stati scelti i seguenti indicatori di confronto tra le matrici di spostamento:

1. Variazione percentuale del totale della matrice rispetto allo scenario iniziale:

$$R = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(e)} - \sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)}}$$

L'indicatore fornisce un'informazione sulla variazione del totale degli spostamenti assegnati alla rete.

2. Variazione percentuale assoluta della matrice:

$$R_{ABS} = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} |x_{ij}^{(e)} - x_{ij}^{(0)}|}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)}}$$

In questo modo si considera la quantità di spostamenti che si sono ridistribuiti all'interno della matrice; valutando quindi la variazione spaziale della domanda.

3. Variazione percentuale della matrice al netto della riduzione di spostamenti:

$$R_S = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} |x_{ij}^{(e)} - x_{ij}^{(0)}| - \left| \sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(e)} - \sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)} \right|}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}^{(0)}}$$

L'indicatore specifica di quanto la matrice è cambiata al netto della riduzione di spostamenti.

4. *Mean of absolute deviation* (MAD) (Reddy & Chakroborty 1999):

$$MAD = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} |x_{ij}^{(e)} - x_{ij}^{(0)}|}{n^2}$$

Dove: n è la dimensione della matrice di domanda. Questo indicatore fornisce la variazione media delle celle della matrice rispetto allo scenario iniziale.

5. Distanza euclidea:

$$DE = \sqrt{\sum_i \sum_{j \neq i} (x_{ij}^{(e)} - x_{ij}^{(0)})^2}$$

6. Distanza lagrangiana:

$$DL = \max_{i,j} |x_{ij}^{(e)} - x_{ij}^{(0)}|$$

L'indice fornisce la massima variazione assoluta tra le celle della matrice. In aggiunta è stata specificata la coppia $i-j$ relativa all'indicatore.

Il modello Activity-Based permette di stimare la struttura della attività degli individui per l'intera giornata; come già indicato, gli spostamenti così ottenuti sono aggregati su quattro periodi generando lo stesso numero di matrici di domanda, ciascuna composta da una sottomatrice per ogni modo di trasporto. Dato che l'obiettivo della tesi è quello di valutare gli effetti della chiusura di un link sulla domanda di traffico e sulla rete viaria, è stato scelto di condurre l'analisi solamente sugli autoveicoli e sulle 24 ore. Pertanto sono state eseguite quattro assegnazioni (una per ogni periodo) delle matrici relative ai soli spostamenti in auto. I risultati prodotti sono stati aggregati sulle 24 ore e utilizzati per il calcolo degli indicatori, invece gli schemi delle attività generati dal modello Activity-Based sono stati impiegati per l'analisi della variazione delle caratteristiche della domanda. Pertanto le valutazioni dei successivi capitoli si riferiscono unicamente al modo auto e alle 24 ore.

3.6.1 Stato Iniziale

Dallo studio dello stato della rete caricata con la domanda stimata dal modello Activity-Based per lo scenario iniziale è possibile identificare gli archi più utilizzati dagli utenti. Dall'analisi del rapporto flusso su capacità (Figura 3-15 e Figura 3-16) per il periodo di punta della mattina (AM), si nota che tra gli archi più congestionati vi è Via Zinelli presso il ponte che si collega a Via del Vaso in direzione nord, il cui flusso proviene principalmente da Via del Vaso, Via San Giacomo e Via Argine Sinistro, riversandosi su Via Zinelli e su Via Garibaldi. Inoltre si nota una situazione critica in corrispondenza degli incroci tra Via Cairoli, la strada Regionale n.11 e Via Zinelli. Invece in Via Velluti si nota un rapporto di congestione elevato negli archi che conducono alle vicine scuole. In generale si osserva che le strade più trafficate sono la Regionale n.11, soprattutto in direzione Ovest-Est, Via Arino verso il centro di Dolo, e la Provinciale n.29 (Via Provinciale Sud e Via Cairoli) anch'essa verso Dolo. Presso Sambruson si ha un rapporto di congestione elevato in corrispondenza dell'incrocio semaforizzato tra Via Argine Sinistro e Via Badoera in direzione Dolo, e lungo Via Badoera verso nord.

Nel periodo di metà mattina (MD) si ha una generale diminuzione del livello di congestione con un valore massimo di circa 0.4; tale situazione è coerente con ciò che realisticamente può avvenire in un periodo di morbida (Figura 3-17).

Per quanto riguarda la punta della sera (PM), permangono le stesse situazioni critiche presenti negli incroci indicate nel periodo della mattina, ma con un aggravamento dei livelli di congestione per gli archi con direzione opposta al caso AM; si veda ad esempio (Figura 3-18 e Figura 3-19) l'incrocio tra Via Stradona, Via Calcroci e Via Argine Sinistro, in cui il flusso maggiore si ha verso Sambruson, anziché verso Dolo come avveniva nel periodo AM. Analogamente altre vie vedono peggiorare il rapporto di congestione nelle direzioni opposte, come la Regionale n.11, Via Velluti e Via Badoera.

Infine nel periodo di morbida della notte (OP) si hanno dei livelli di congestione molto bassi con i valori massimi pari a circa 0.11 sulle maggiori direttrici (Figura 3-20).

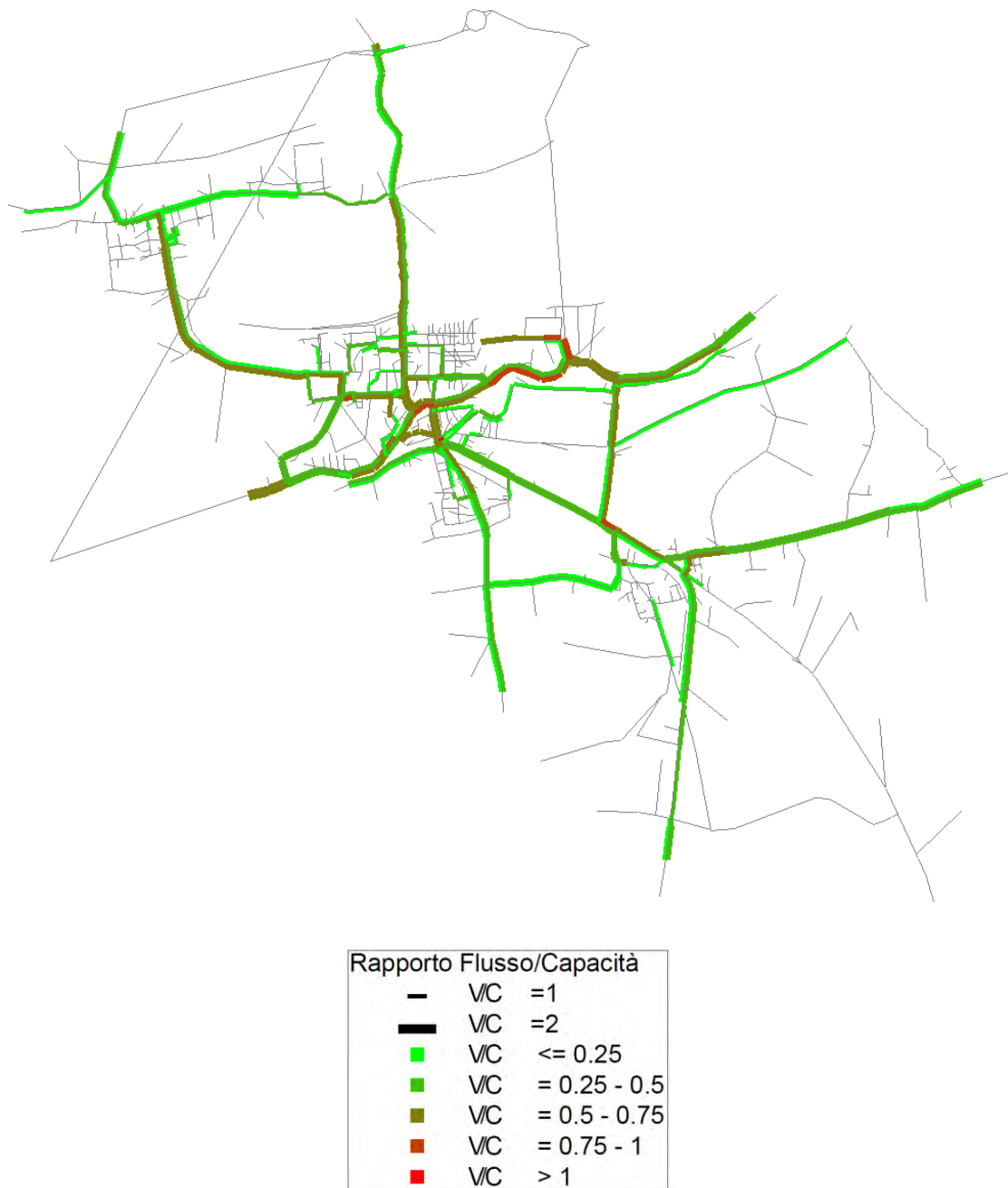


Figura 3-15: flussogramma relativo al periodo di punta della mattina

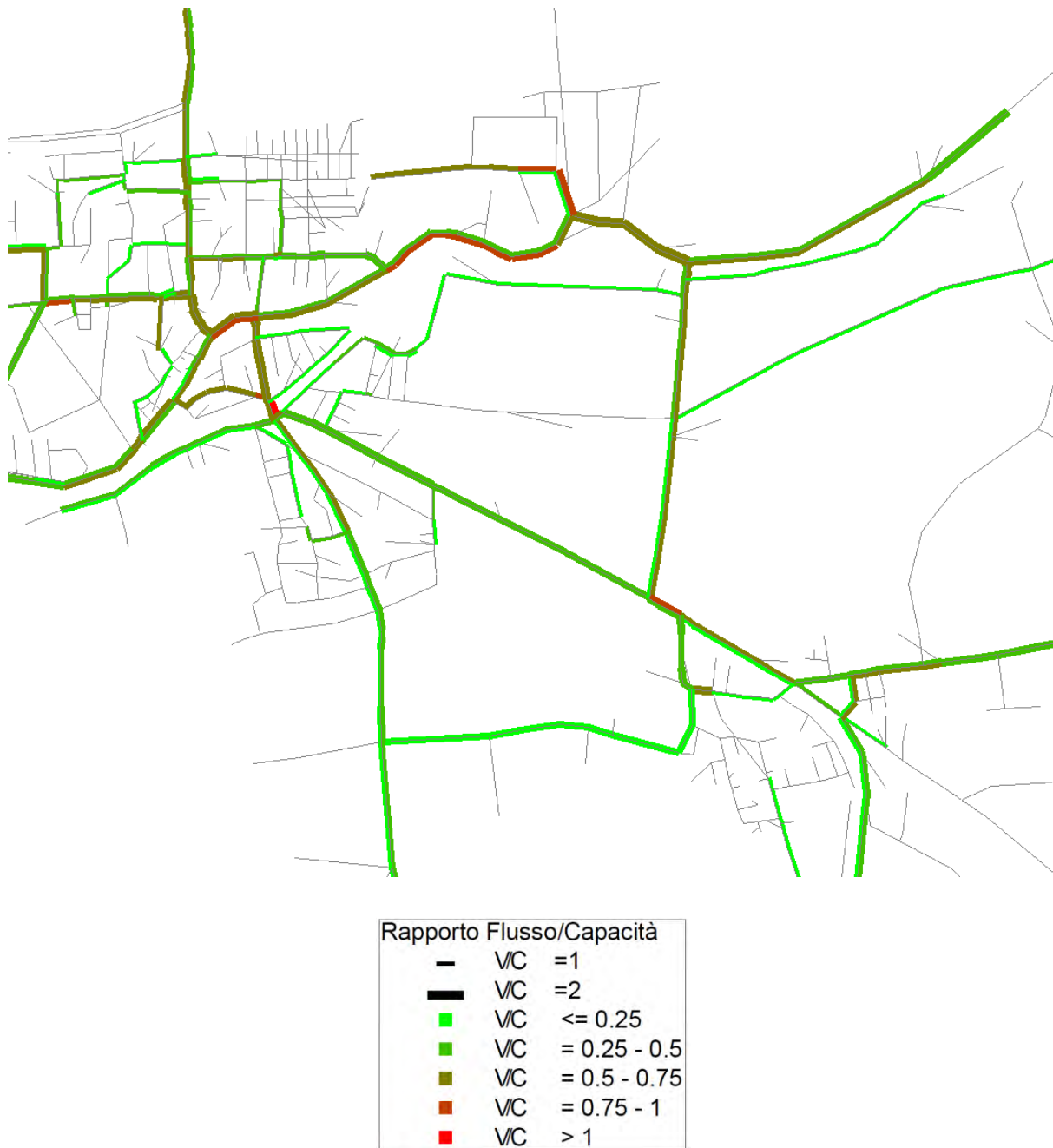


Figura 3-16: particolare del flussogramma relativo centro di Dolo per il periodo AM

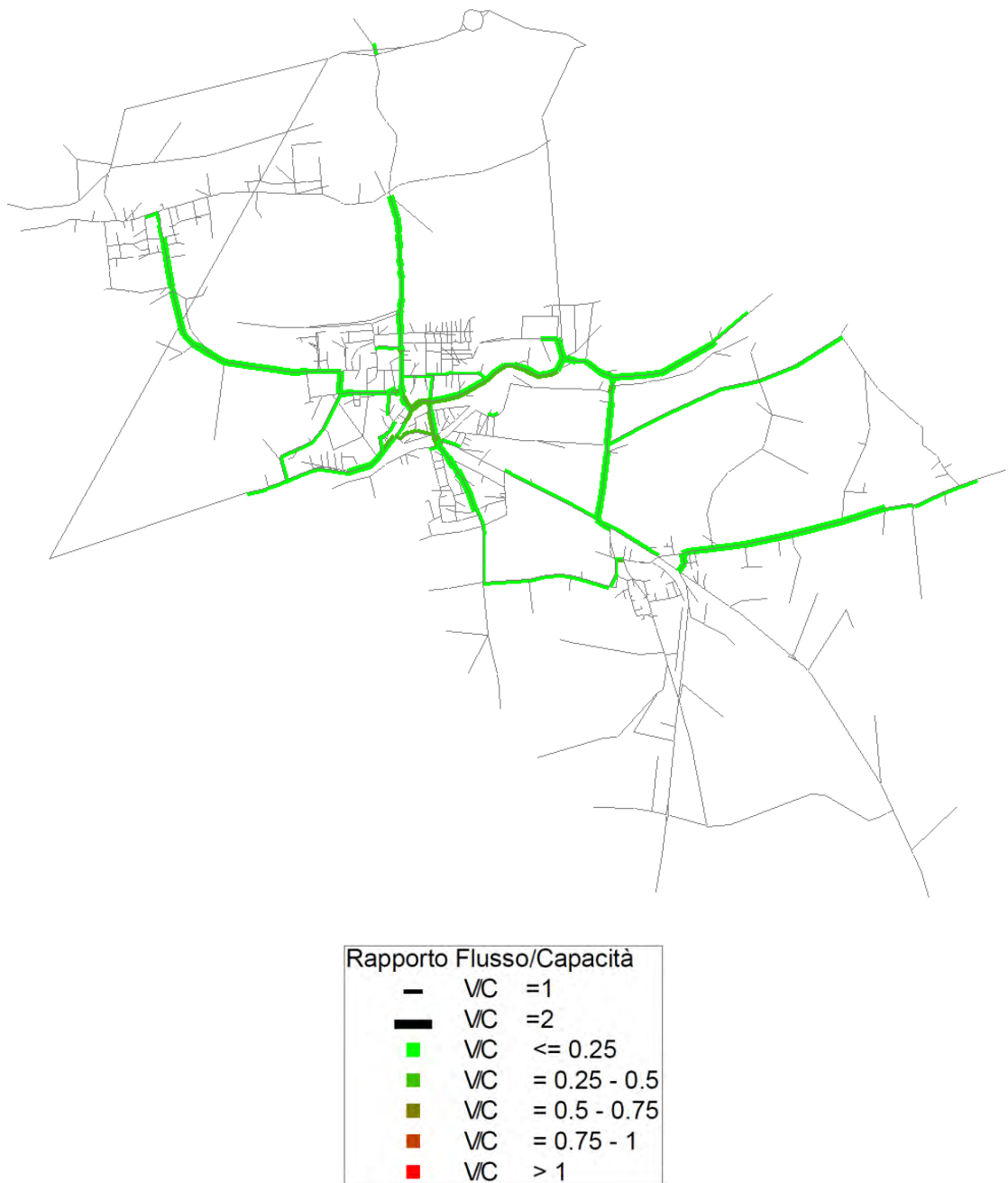


Figura 3-17: flussogramma relativo al periodo MD

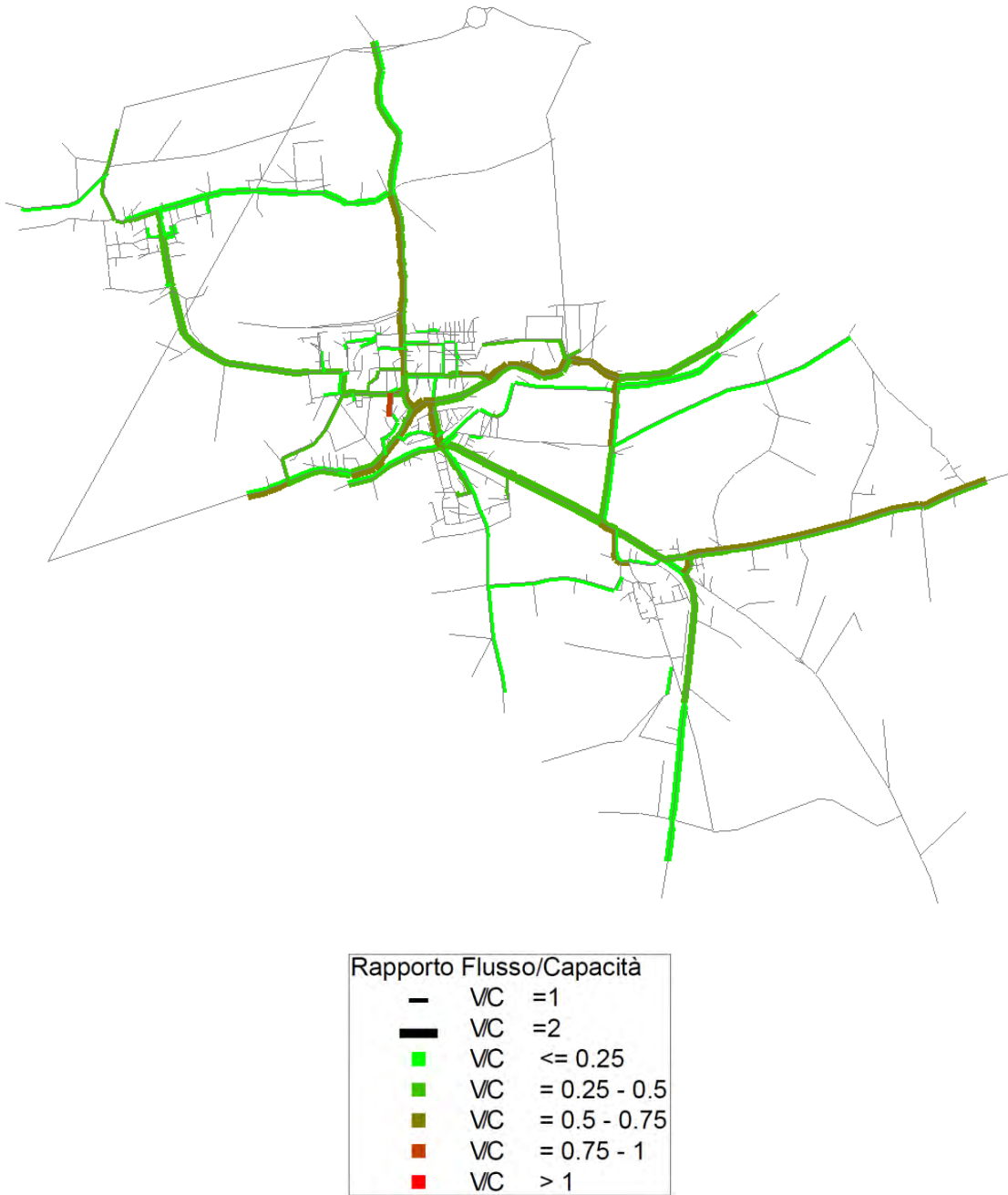


Figura 3-18: flussogramma relativo al periodo di punta della sera

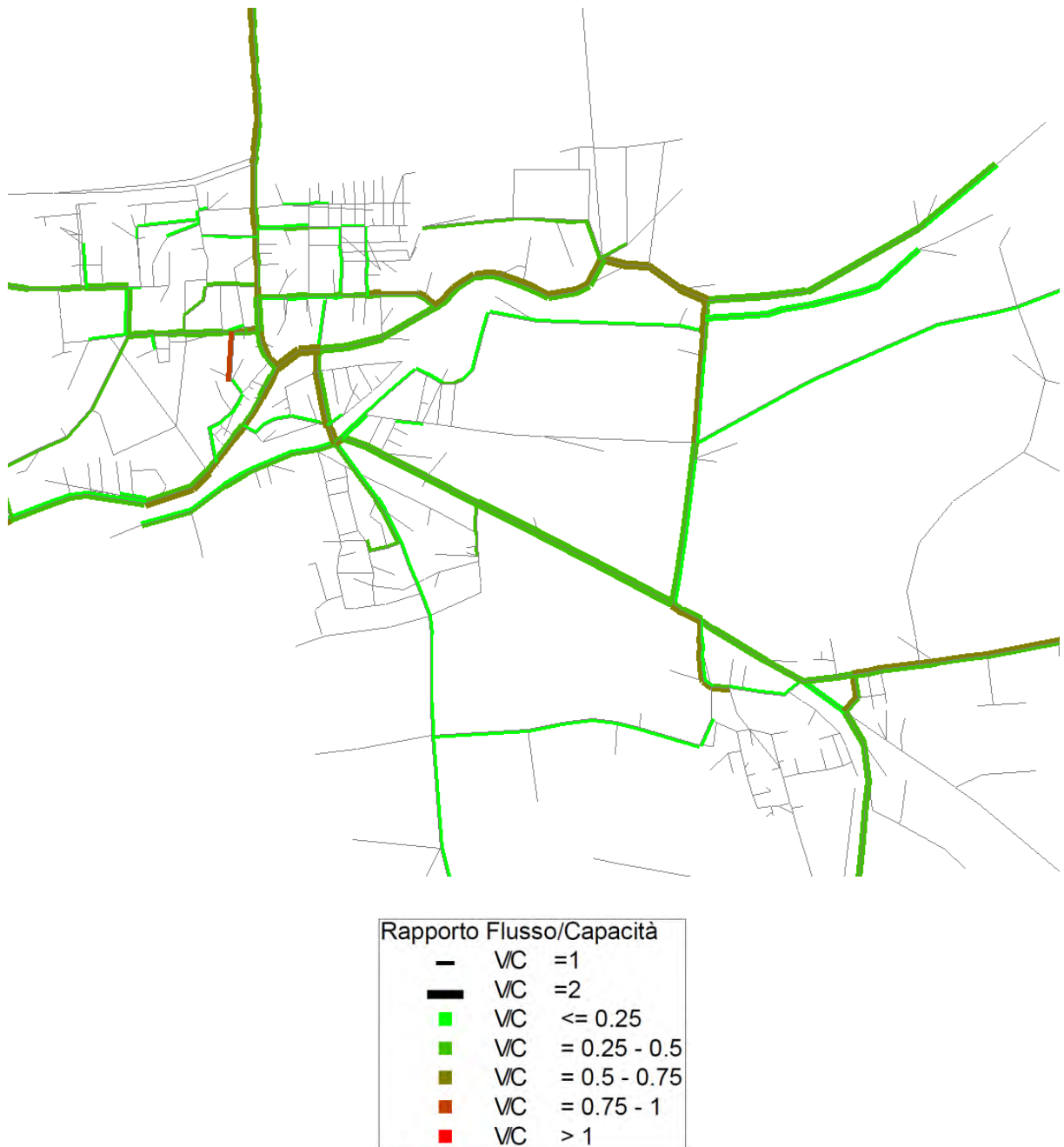


Figura 3-19: flussogramma relativo al periodo PM - particolare del centro di Dolo

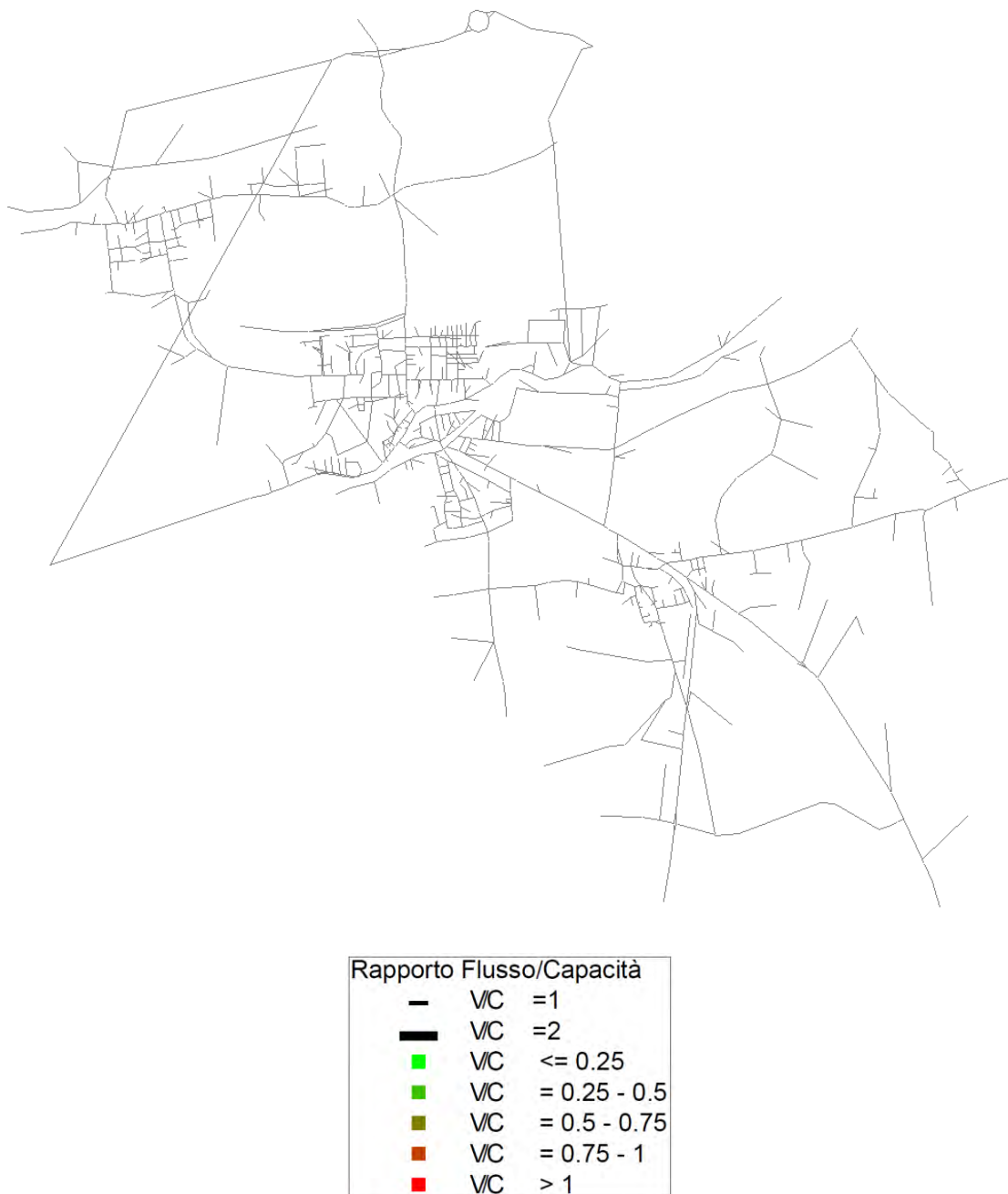


Figura 3-20: flussogramma relativo al periodo OP

Informazioni aggiuntive sono state ricavate attraverso l'analisi delle linee di desiderio, che rappresentano gli spostamenti attratti e generati dalle zone con uno spessore proporzionale all'entità degli spostamenti stessi. Per il periodo di punta della mattina si evidenzia come la maggior parte degli spostamenti di attraversamento avvenga in direzione Est-Ovest (Figura 3-21).

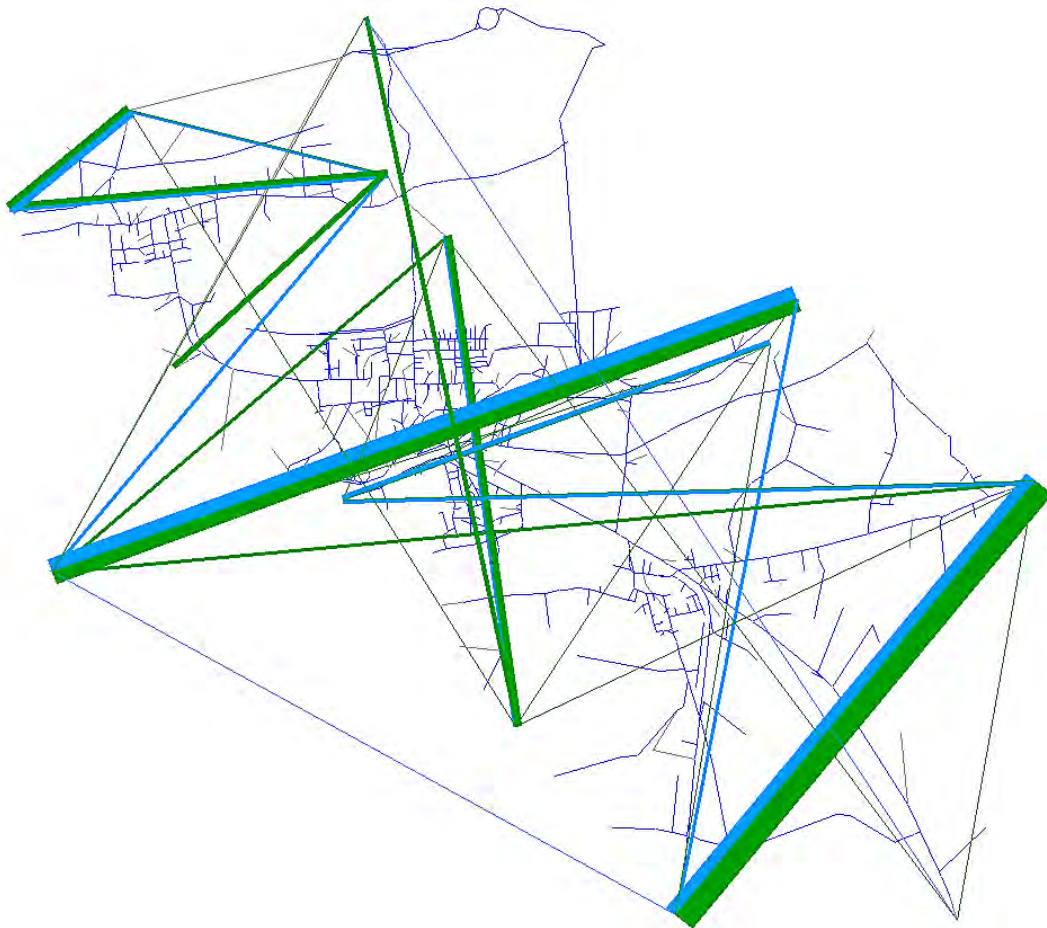


Figura 3-21: linee di desiderio per il periodo di punta della mattina; in blu: gli spostamenti in uscita dalle zone, in verde: gli spostamenti in entrata

Dalla Figura 3-22 si possono evidenziare le principali destinazioni esterne degli spostamenti originati dal centro di Dolo nel periodo AM. Nello specifico si identificano tre zone: ad Ovest verso Padova, ad Est verso Mira e Venezia, e a Nord verso Mirano ed il casello autostradale. Inoltre, nello stesso periodo, si nota che esiste una parte di domanda molto elevata che si sposta dall'esterno verso Dolo (Figura 3-23).

Dalla Figura 3-23 si osserva che la maggior parte degli spostamenti generati dalle zone residenziali dell'area di studio nel periodo AM hanno una destinazione esterna alla stessa; invece nel periodo di punta della sera si hanno più spostamenti nelle direzioni opposte (Figura 3-24). Questo indica che le persone residenti in Dolo si recano al lavoro o a scuola nel periodo AM, e invece rientrano nel periodo PM.

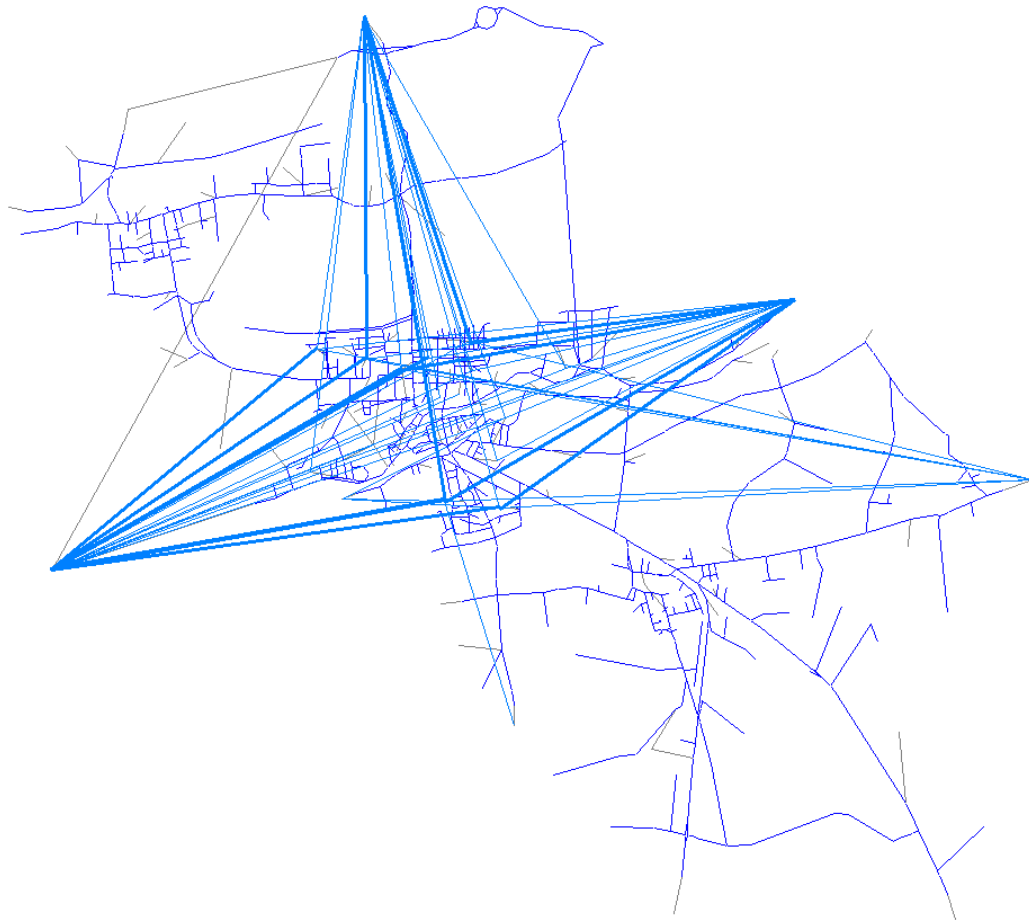


Figura 3-22: linee di desiderio per il periodo della mattina; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati dal centro di Dolo aventi destinazioni esterne all'area di studio

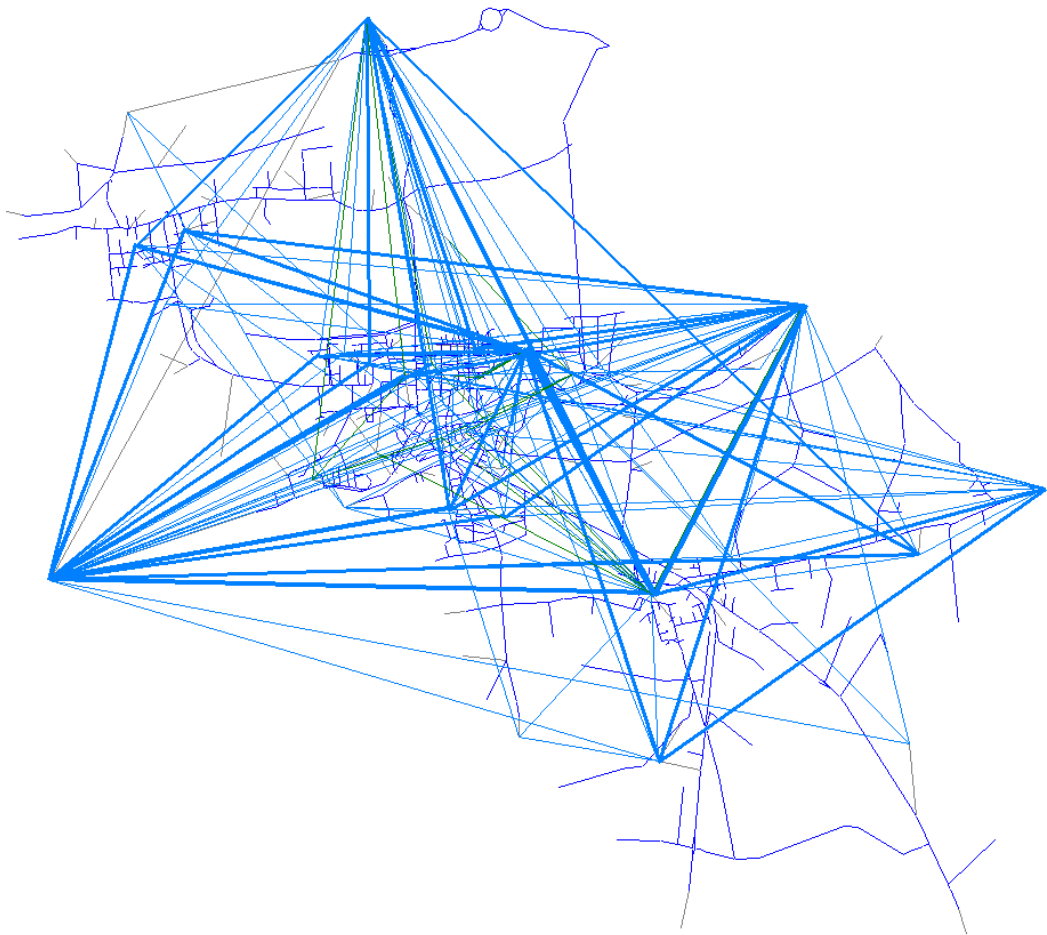


Figura 3-23: linee di desiderio per il periodo della mattina; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati ed in verde quelli attratti dalle zone residenziali dell'area di studio

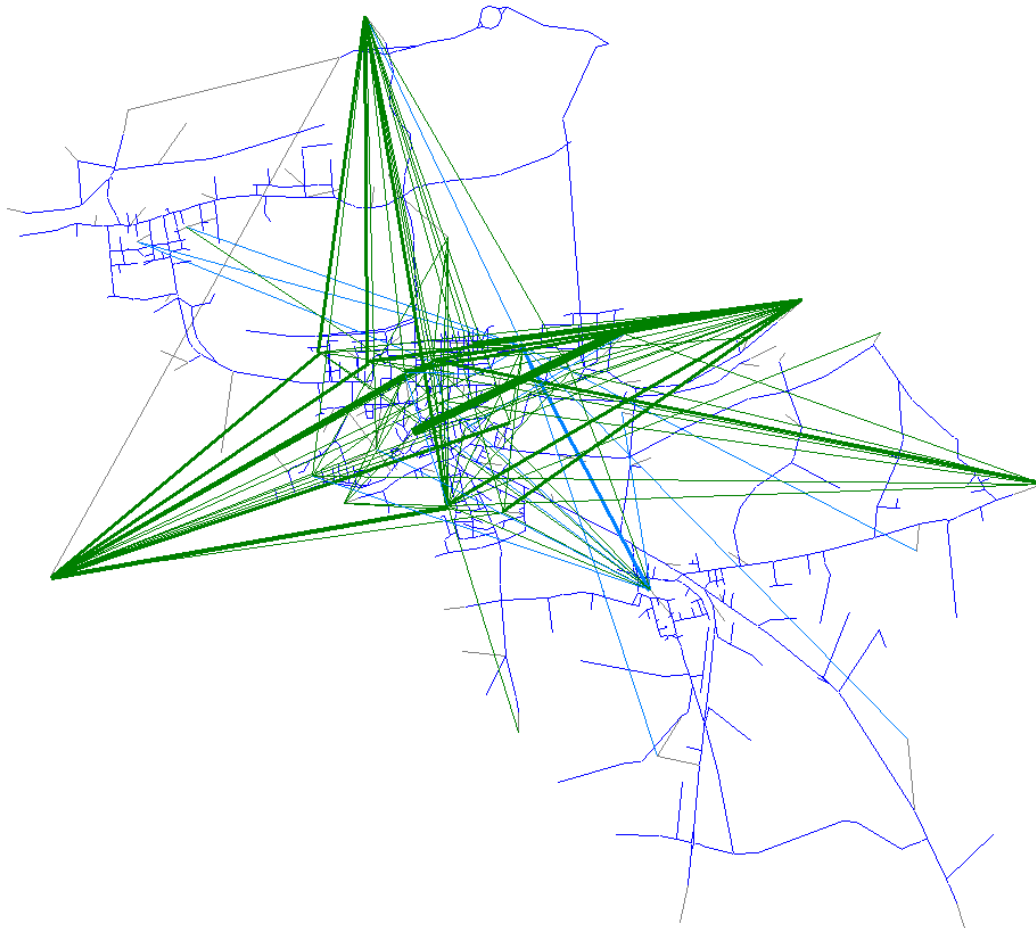


Figura 3-24: linee di desiderio per il periodo PM; in blu sono rappresentati gli spostamenti originati ed in verde quelli attratti dalle zone residenziali dell'area di studio



Figura 3-25: linee di desiderio per il periodo di punta della sera; in blu sono rappresentati gli spostamenti che il centro di Dolo attrae dalle zone esterne all'area di studio

Un'altra differenza sostanziale tra i vari periodi della giornata in termini di distribuzione spaziale e temporale della domanda si ha per la zona 2, in cui vi sono i principali istituti scolastici. Nel periodo di punta della mattina si ha una domanda verso tale area (Figura 3-26), invece negli altri periodi si nota che gli spostamenti da essa prodotti sono maggiori di quelli attratti (Figura 3-27). Questo spiega la variazione del livello di congestione in Via Velluti (principale accesso all'area scolastica) tra i due periodi evidenziata in precedenza.

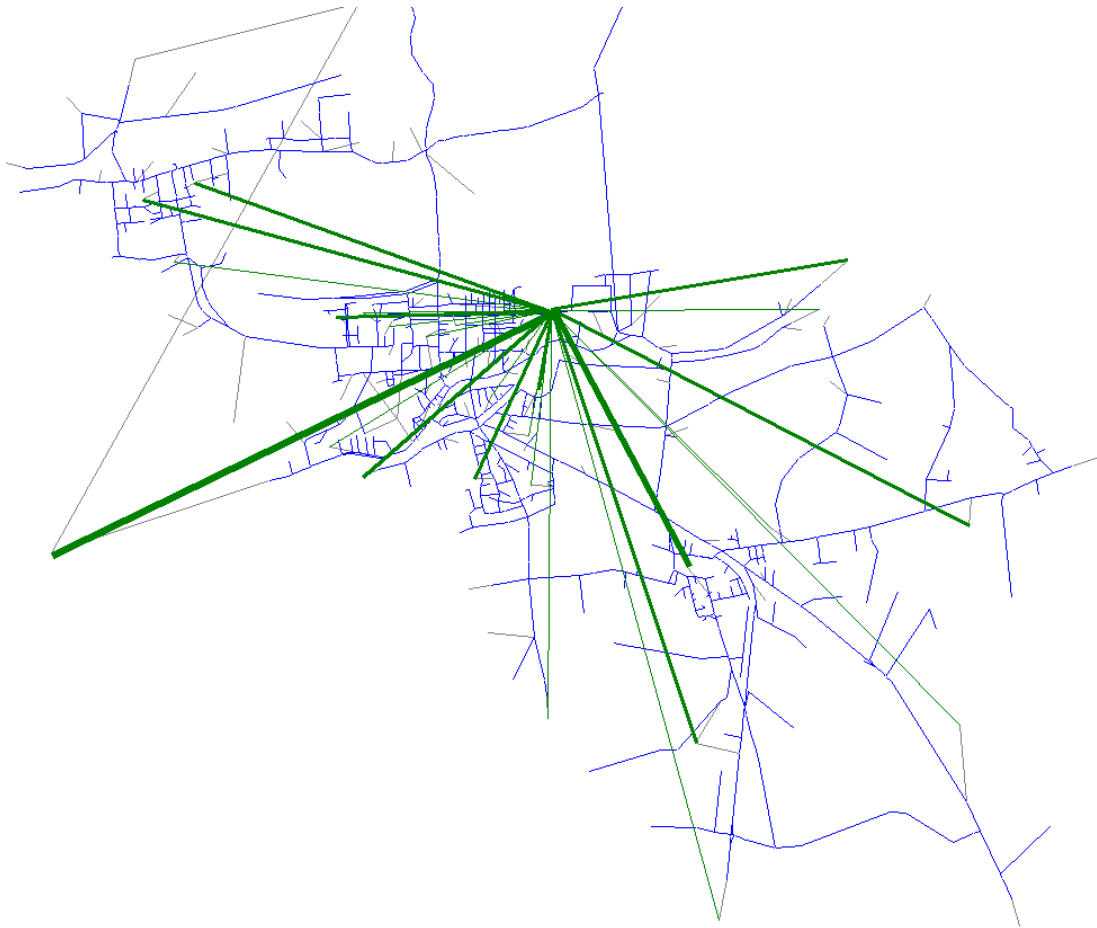


Figura 3-26: linee dei desiderio per il periodo di punta della mattina; in verde: gli spostamenti attratti dalla zona del centro di Dolo con i maggiori edifici scolastici



Figura 3-27: linee dei desiderio per il periodo di punta della sera; in verde: gli spostamenti attratti dalla zona del centro di Dolo con i maggiori edifici scolastici, in blu: gli spostamenti generati

Di seguito si analizzano alcuni aspetti della domanda stimata dal modello Activity-Based; questo metodo consente di simulare le attività solamente delle persone che risiedono nell'area di studio. Pertanto l'analisi riguarda solamente gli spostamenti originati dalle zone interne all'area e con destinazioni interne ed esterne alla stessa.

Il numero di persone residenti nell'area di studio stimate dal modello è pari a 14818, un numero non lontano dalle 15176 effettivamente residenti; la differenza risulta di circa il 2,4% ed è dovuta alle procedure di approssimazione presenti nel *Population Synthesizer* (in particolare al metodo IPF). Di questa popolazione, 12882 (il 86,9%) persone decidono di effettuare almeno uno spostamento nell'arco della giornata e 12000 (il 93,2%) scelgono l'auto come mezzo di trasporto. Il numero medio di spostamenti in auto compiuti da un utente risulta pari a 3.

Il numero di spostamenti effettuati in ogni periodo è riportato nel grafico sottostante (Grafico 3-2); supponendo di avere una distribuzione della domanda uniforme all'interno di

ciascun intervallo di tempo è possibile determinare gli spostamenti di un'ora qualsiasi all'interno dei quattro periodi. Dal Grafico 3-3 si notano le due punte della mattina (AM) e della sera (PM), oltre ai due periodi di morbida (MD e OP).

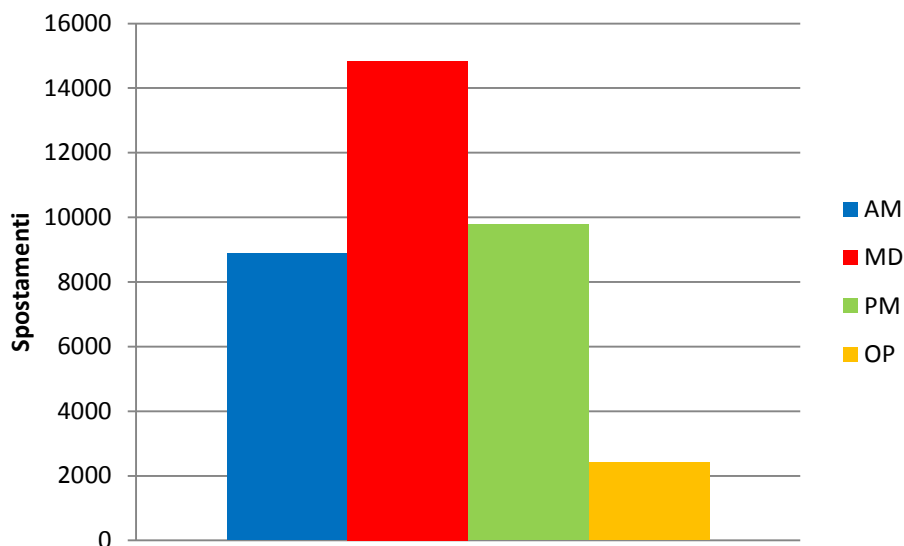


Grafico 3-2: andamento del numero totale degli spostamenti effettuati in auto per periodo

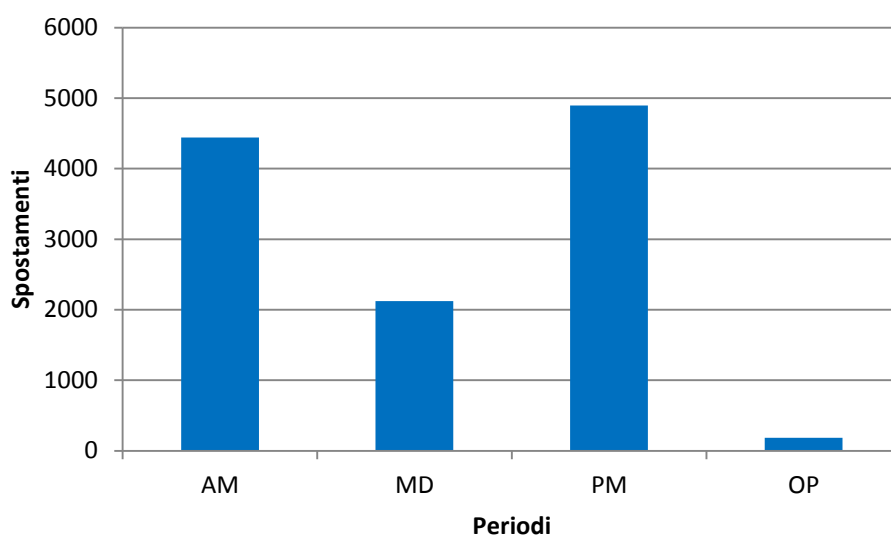


Grafico 3-3: spostamenti effettuati in un'ora generica appartenente a ciascuno dei quattro periodi

Inoltre è possibile suddividere gli spostamenti a seconda del motivo e del periodo in cui sono effettuati. Dalla tabella seguente si nota che la maggior parte degli spostamenti per motivi sistematici (*Work* e *School*) sono compiuti nel periodo AM; inoltre quasi tutti gli spostamenti di rientro a casa (*Intermediate Stop*) avvengono in PM ed in MD. Infatti nella realtà sia gli studenti che i lavoratori partono di mattina e tornano di pomeriggio o di sera. Sulla base di

queste considerazioni si può concludere che il modello Activity-Based è in grado di produrre comportamenti ed attività degli utenti in modo coerente e realistico.

	AM	MD	PM	OP
Work	2772	1255	90	461
School	1915	274	23	1
Other	1493	4214	544	127
Work-Based	283	114	6	18
Intermediate Stop	1948	4036	2902	703
At home	474	4950	6222	1102

Tabella 3-5: spostamenti per motivo e periodo

3.6.2 Scenari di danno – Modello a Domanda Variabile

Di seguito si presentano i risultati ottenuti dall'applicazione del modello Activity-Based agli scenari di rete privata di un arco. Per chiarezza metodologica l'analisi è riportata in sezioni distinte (indicatori, domanda e rete), tuttavia le valutazioni complessive devono essere effettuate considerando ciò che avviene in ciascuna di esse poiché, nel caso di domanda variabile, si ha un'interazione molto forte tra la domanda di spostamento e le condizioni della rete. Come per lo scenario iniziale, l'analisi della domanda riguarda solamente gli spostamenti con origine interna all'area, mentre i risultati prodotti dagli indicatori e lo studio della rete includono anche gli spostamenti generati dalle zone esterne.

L'analisi degli indicatori ha come scopo quello di valutare le conseguenze globali della variazione della domanda indotta dai cambiamenti nella struttura topologica della rete sul sistema di trasporto. Lo studio della domanda permette di esaminare le nuove caratteristiche delle attività svolte dagli utenti; quest'ultimo tipo di analisi è condotta aggregando i risultati in termini medi su tutti gli individui per facilità di rappresentazione, anche se i dati che si ottengono dal modello Activity-Based consentono un'analisi ad un livello molto disaggregato, fino a focalizzarsi sul singolo utente.

I risultati sono riportati per ogni scenario, identificato da un numero che corrisponde al codice del link eliminato dalla rete.

3.6.2.1 Analisi degli Indicatori

In questa sezione si riportano i valori assunti dagli indicatori, suddivisi a seconda del tipo di archi che sono stati rimossi dalla rete. In particolare si distinguono gli indicatori per i non cut-link, per i cut-link e gli indici calcolati per un confronto congiunto di entrambi.

3.6.2.1.1 Non Cut-Link

Il primo indicatore valutato è il Costo totale di rete o Tempo totale speso in rete dai veicoli, dato che nel caso in esame il costo generalizzato coincide con il tempo di percorrenza. Per lo scenario iniziale esso vale 6271,79 ore; di seguito si riportano le differenze assolute e percentuali rispetto a quest'ultimo valore per i vari scenari di danno. Dai grafici (Grafico 3-4 e Grafico 3-5) si nota che in tutti i casi si ha un aumento del tempo totale speso dai veicoli, dal momento che la chiusura di un arco costringe gli utenti ad effettuare percorsi più lunghi e/o con un tempo di percorrenza maggiore. L'incremento più elevato (pari a circa il 440% rispetto allo scenario iniziale) si ha nel caso di eliminazione del link 100409, corrispondente al ponte sul Vaso (Figura 3-28), che interrompe la principale direttrice Nord-Sud dell'area; il secondo caso più gravoso riguarda l'eliminazione dell'arco 200131 (Figura 3-29), che ostruisce la Regionale n.11. Nella maggior parte degli scenari si osserva che l'aumento rimane entro valori percentualmente più bassi (tra il 5% ed il 10%).



Figura 3-28: ubicazione del link numero 100409

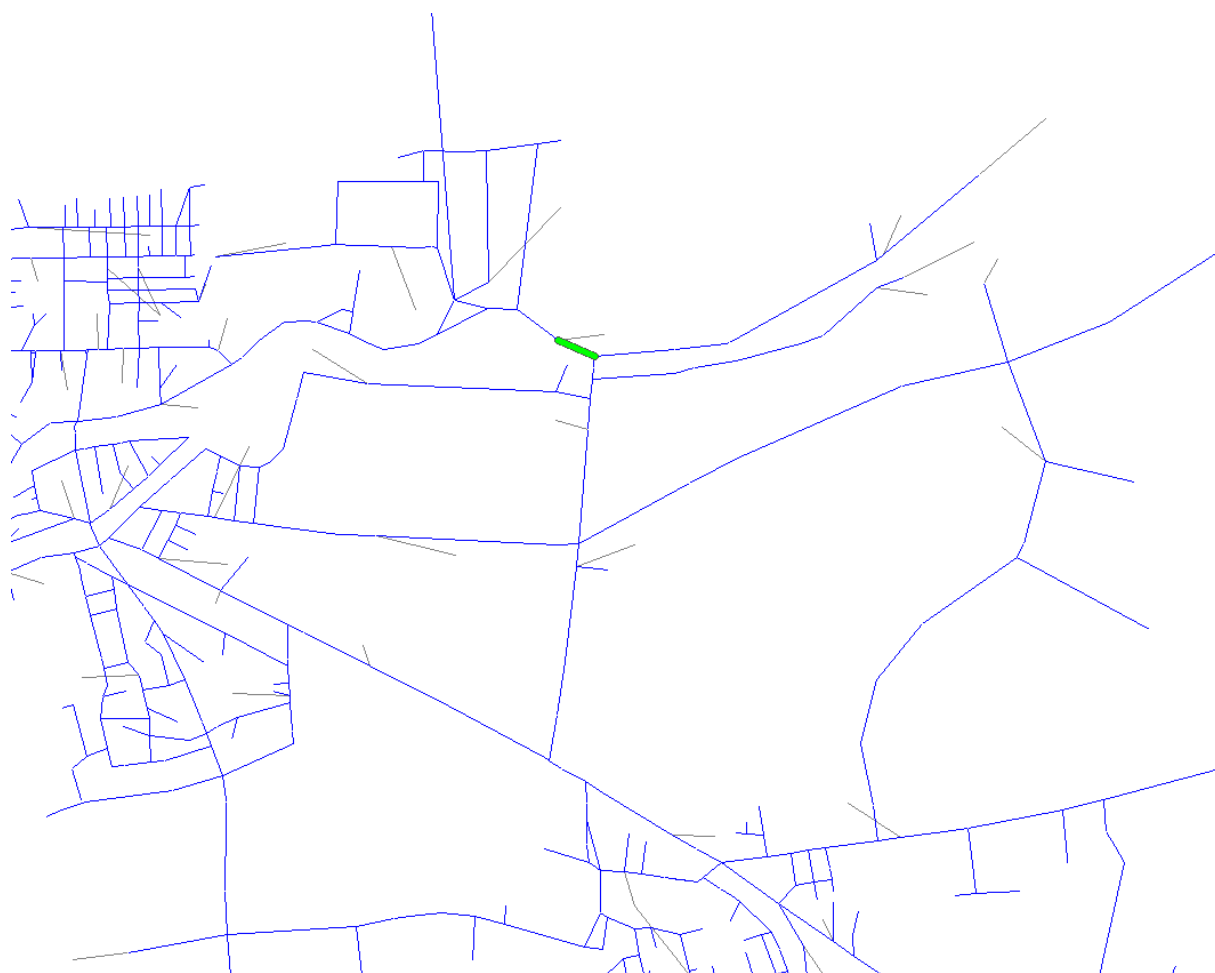


Figura 3-29: ubicazione del link numero 200131

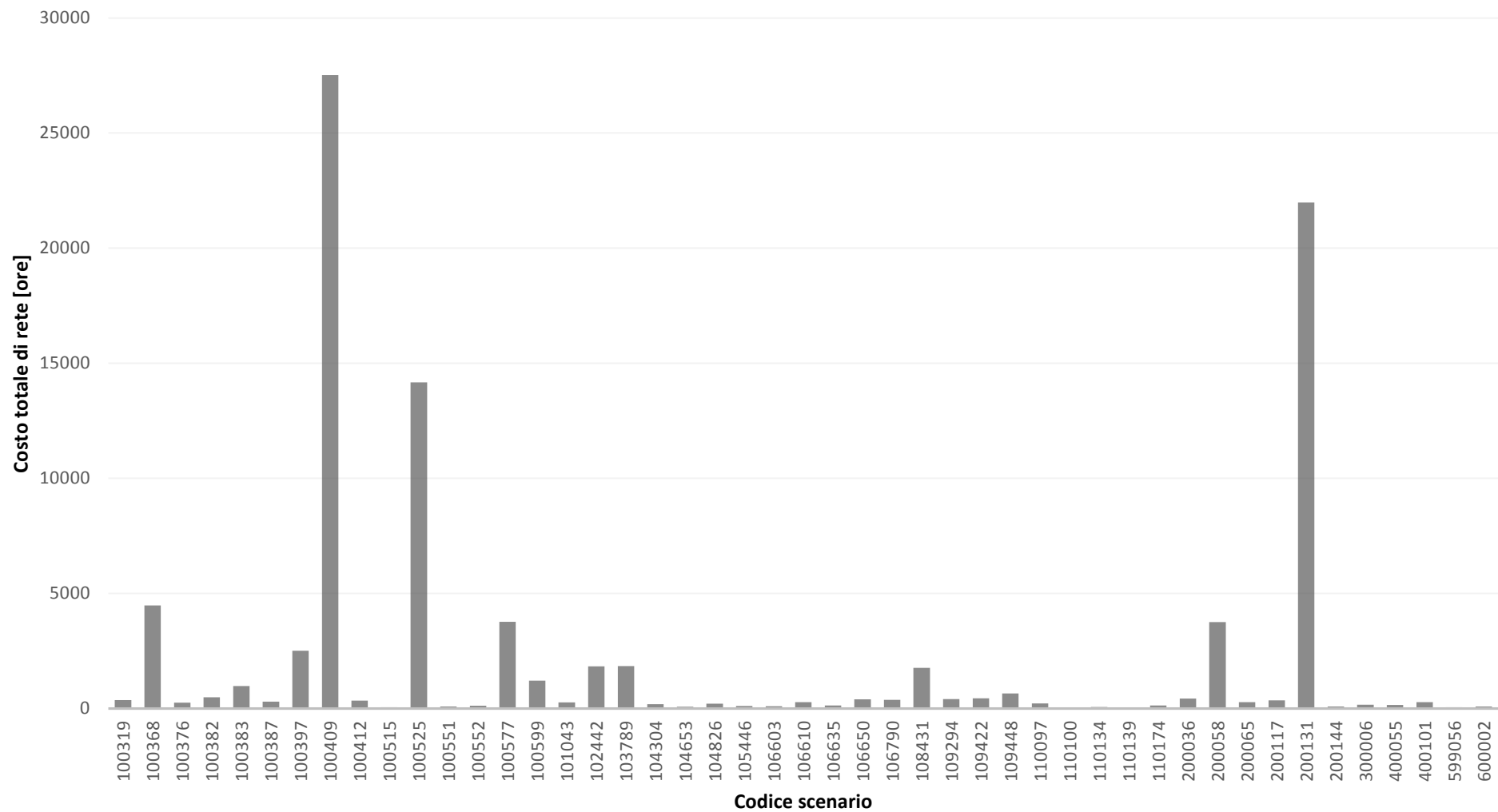


Grafico 3-4: differenza del costo totale di rete tra lo scenario iniziale e ciascuno degli scenari di rete privata di un arco

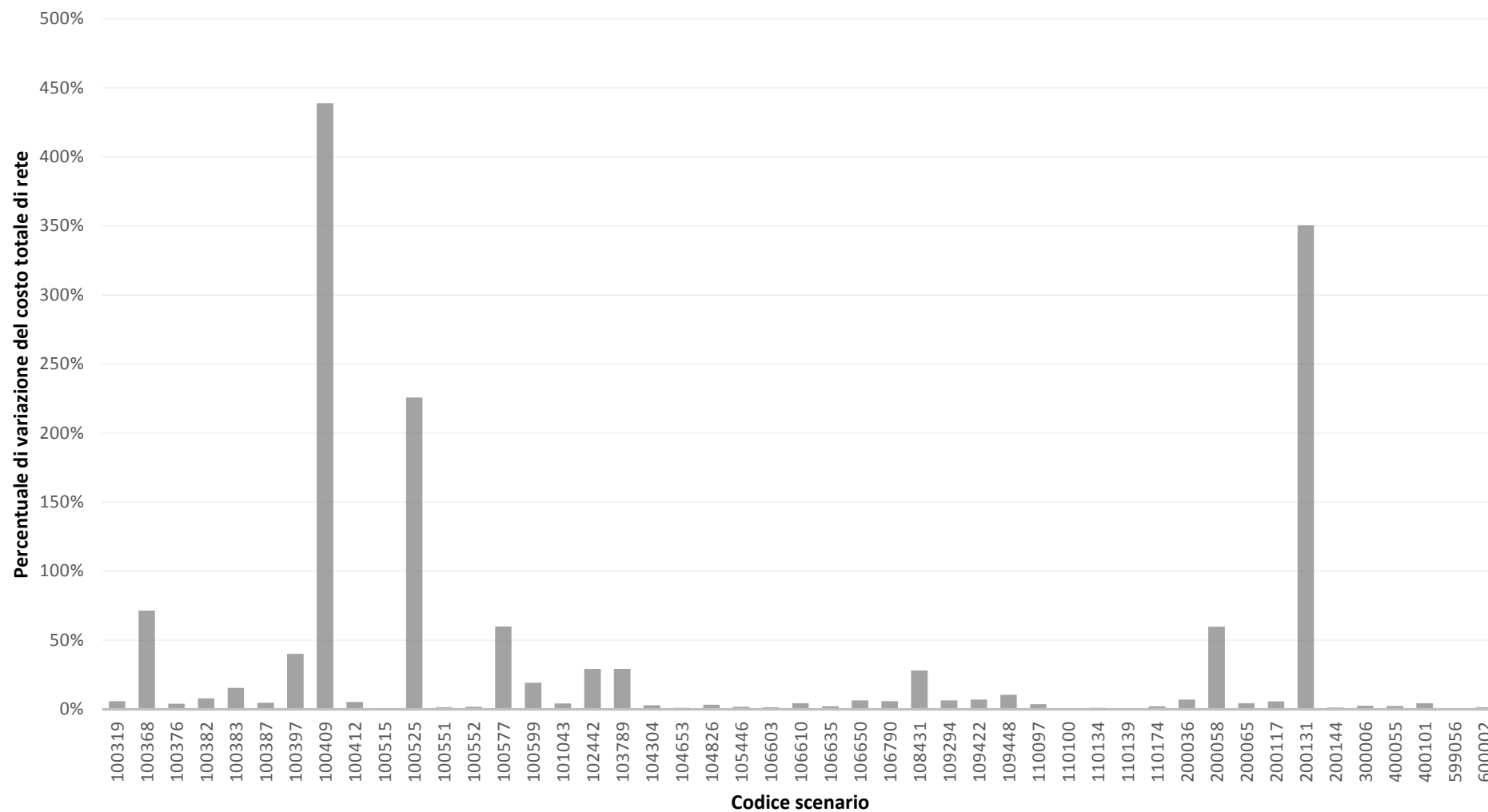


Grafico 3-5: differenza percentuale del costo totale di rete tra lo scenario iniziale e gli scenari di danno

Il secondo indicatore calcolato è l'*Importance* che, come illustrato in precedenza, pesa la variazione del costo totale di rete tra due zone per la domanda di spostamento. La gerarchia in termini di importanza degli archi così prodotta (Grafico 3-6) risulta analoga a quella fornita dall'indicatore precedente poiché è da quest'ultimo che l'*Importance* dipende direttamente.

Da ultimo si analizzano i risultati relativi agli indicatori di confronto tra la matrice degli spostamenti assegnati alla rete in ogni scenario di danno e la matrice relativa allo stato iniziale. Dal Grafico 3-7 si nota che per la maggior parte degli archi si ha una diminuzione del numero di spostamenti caricati, che provoca comunque un aumento del costo totale di rete (Grafico 3-5) poiché gli utenti variano le proprie scelte di percorso peggiorando le condizioni della rete (come si specificato nella sezione di analisi della domanda). Inoltre, dal Grafico 3-8 e dal Grafico 3-9, si osserva che sebbene globalmente il totale di matrice vari di poco (al massimo dello 0,8% - Grafico 3-8), all'interno delle matrici si ha una redistribuzione dei valori tra le celle molto più elevata (fino al 13% - Grafico 3-9). Questo evidenzia come la rimozione di un link causi una variazione spaziale nell'assetto degli spostamenti, ovvero nella domanda di trasporto. Una conferma di questo si trova anche nei grafici MAD (Grafico 3-11) e DE (Grafico 3-12). L'arco che, se eliminato, causa una redistribuzione della domanda più elevata (Grafico 3-9) è il 108431, che si trova sulla Regionale n.11.

Di seguito si riporta la matrice di correlazione tra gli indicatori utilizzati; essa contiene in ogni cella il coefficiente di correlazione di Spearman che, variando tra -1 ed 1, fornisce un'indicazione del legame tra la variabile di riga e quella di colonna. Nel caso in esame si nota (Tabella 3-6) una correlazione pressoché perfetta tra l'*Importance* ed il costo totale di rete, oltre che tra la differenza assoluta percentuale, la RS e MAD. Infine si nota una buona correlazione negativa tra il costo totale di rete e la differenza di accessibilità, e tra quest'ultima e l'*Importance*; la variazione di accessibilità dipende infatti in larga misura dal cambiamento dei livelli di servizio tra cui il tempo di percorrenza.

	IMP	C_RETE	ACCD	TOT	R	R_ABS	RS	MAD	DE
IMP	1,0000	1,0000	-0,8014	-0,2109	-0,2109	0,2611	0,2613	0,2611	0,0191
C_RETE	1,0000	1,0000	-0,8015	-0,2101	-0,2101	0,2613	0,2615	0,2613	0,0194
ACCD	-0,8014	-0,8015	1,0000	0,1644	0,1644	-0,6355	-0,6355	-0,6355	-0,2621
TOT	-0,2109	-0,2101	0,1644	1,0000	1,0000	-0,2219	-0,2143	-0,2219	-0,0082
R	-0,2109	-0,2101	0,1644	1,0000	1,0000	-0,2219	-0,2143	-0,2219	-0,0082
R_ABS	0,2611	0,2613	-0,6355	-0,2219	-0,2219	1,0000	0,9997	1,0000	0,6204
RS	0,2613	0,2615	-0,6355	-0,2143	-0,2143	0,9997	1,0000	0,9997	0,6233
MAD	0,2611	0,2613	-0,6355	-0,2219	-0,2219	1,0000	0,9997	1,0000	0,6203
DE	0,0191	0,0194	-0,2621	-0,0082	-0,0082	0,6204	0,6233	0,6203	1,0000

Tabella 3-6: coefficienti di correlazione tra gli indicatori utilizzati: IMP: Importance, C_RETE: Costo totale di rete; ACCD: Variazione di accessibilità; TOT: Differenza tra i totali d matrice; R: Differenza percentuale tra i totali di matrice; R_ABS: Percentuale di spostamenti ridistribuiti all'interno della matrice rispetto allo scenario iniziale; RS: Differenza percentuale dei totali di matrice al netto della riduzione degli spostamenti; MAD: Mean of Absolute Deviation; DE: istanza Euclidea

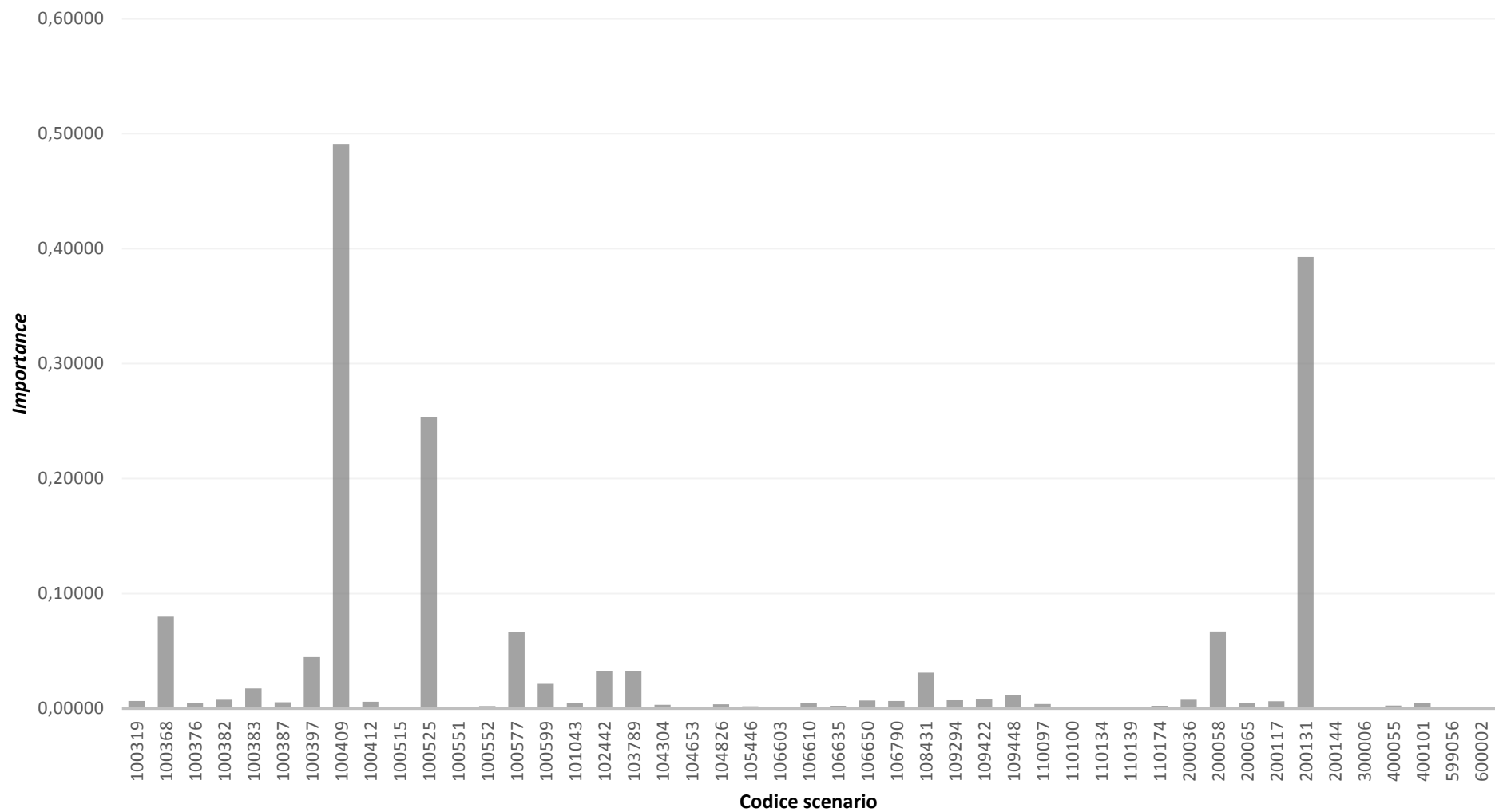


Grafico 3-6: valori dell'indicatore Importance per ogni scenario di danno

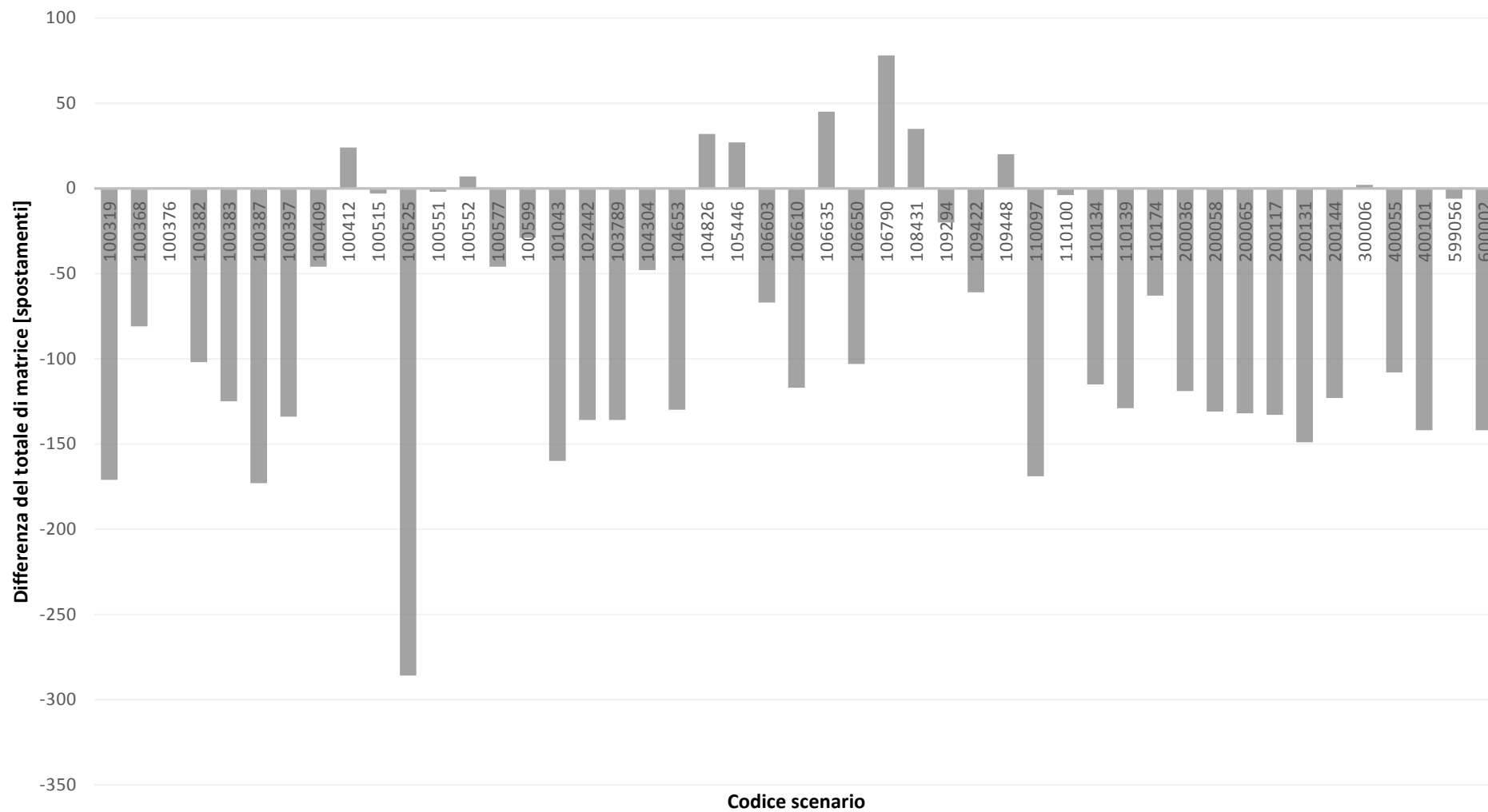


Grafico 3-7: differenza del totale della matrice degli spostamenti assegnati alla rete tra lo scenario iniziale e gli scenari di danno

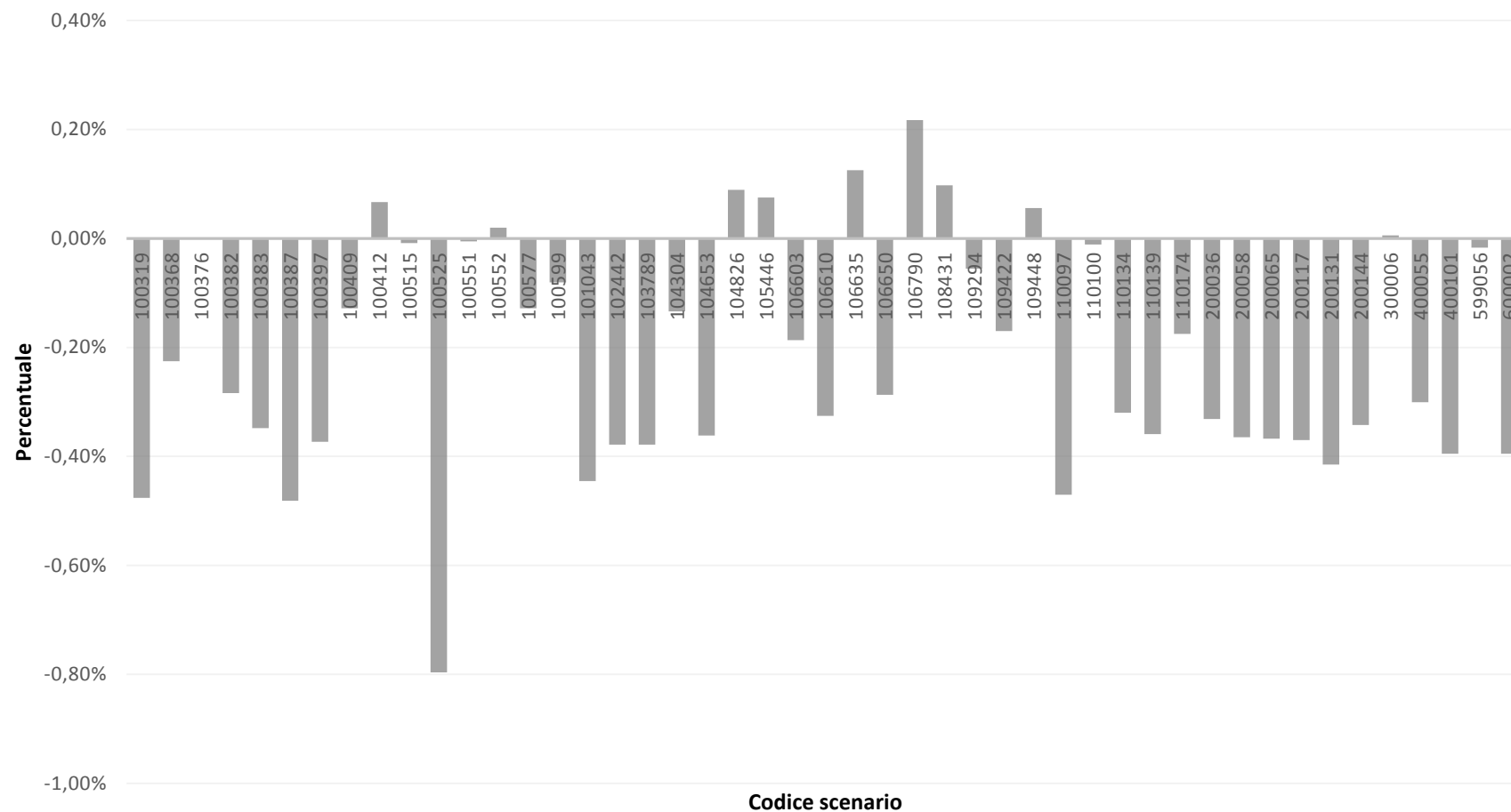


Grafico 3-8: differenza percentuale tra i totali di matrici espressi in assoluto dal Grafico 3-7

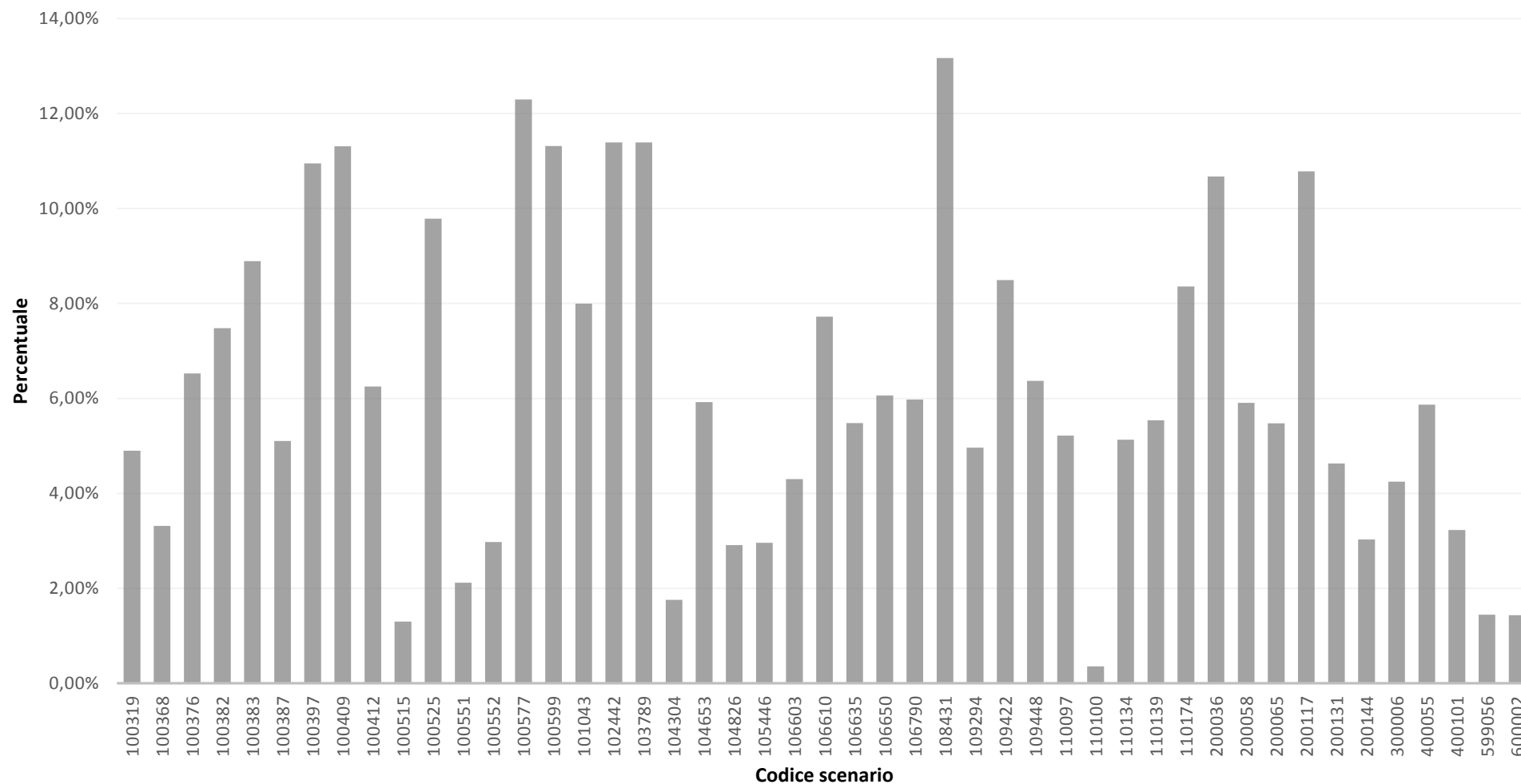


Grafico 3-9: percentuale di spostamenti che si sono ridistribuiti tra le celle della matrice come illustrato nel capitolo 3.6

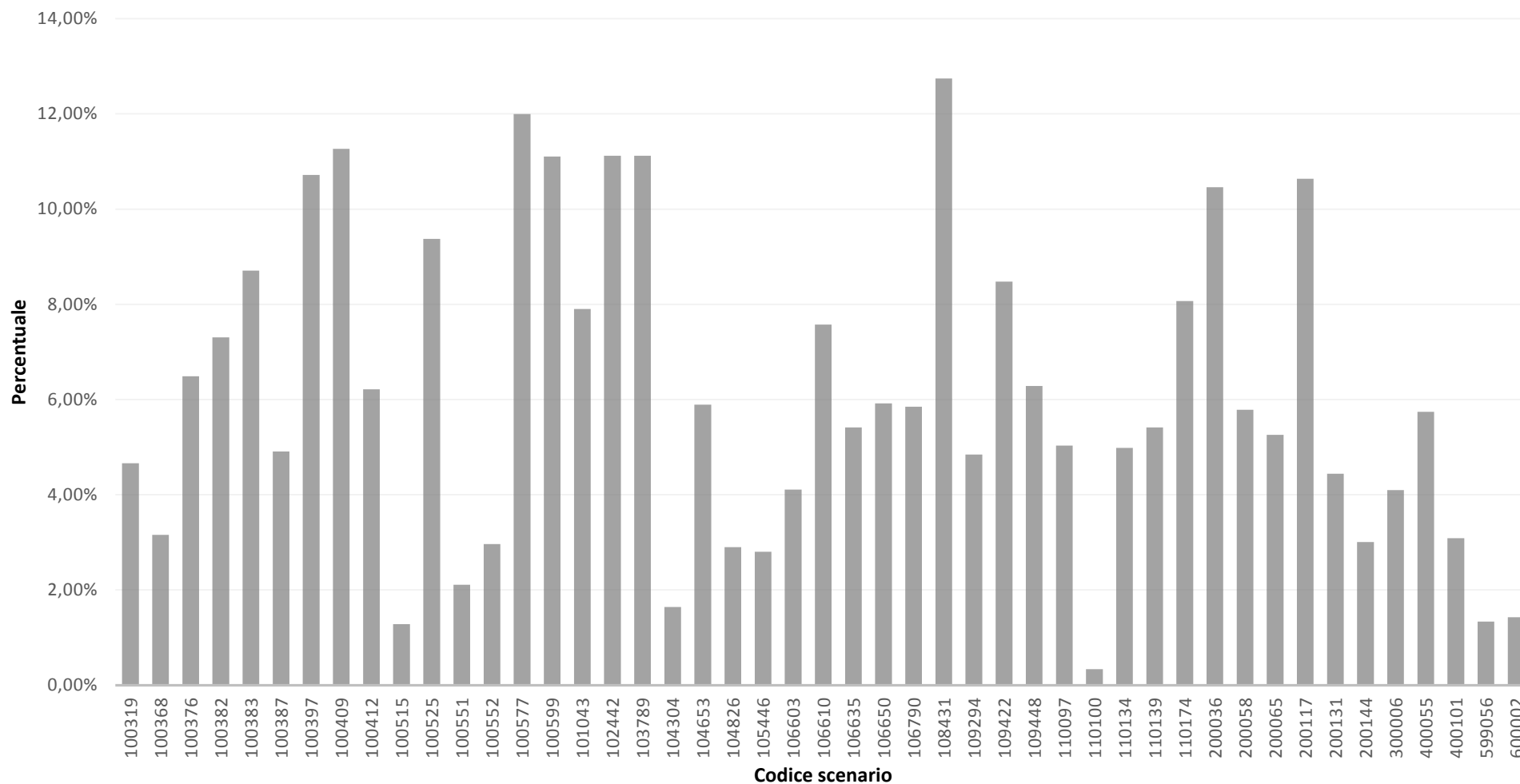


Grafico 3-10: differenza percentuale della matrice al netto della riduzione di spostamenti come indicato nel capitolo 3.6

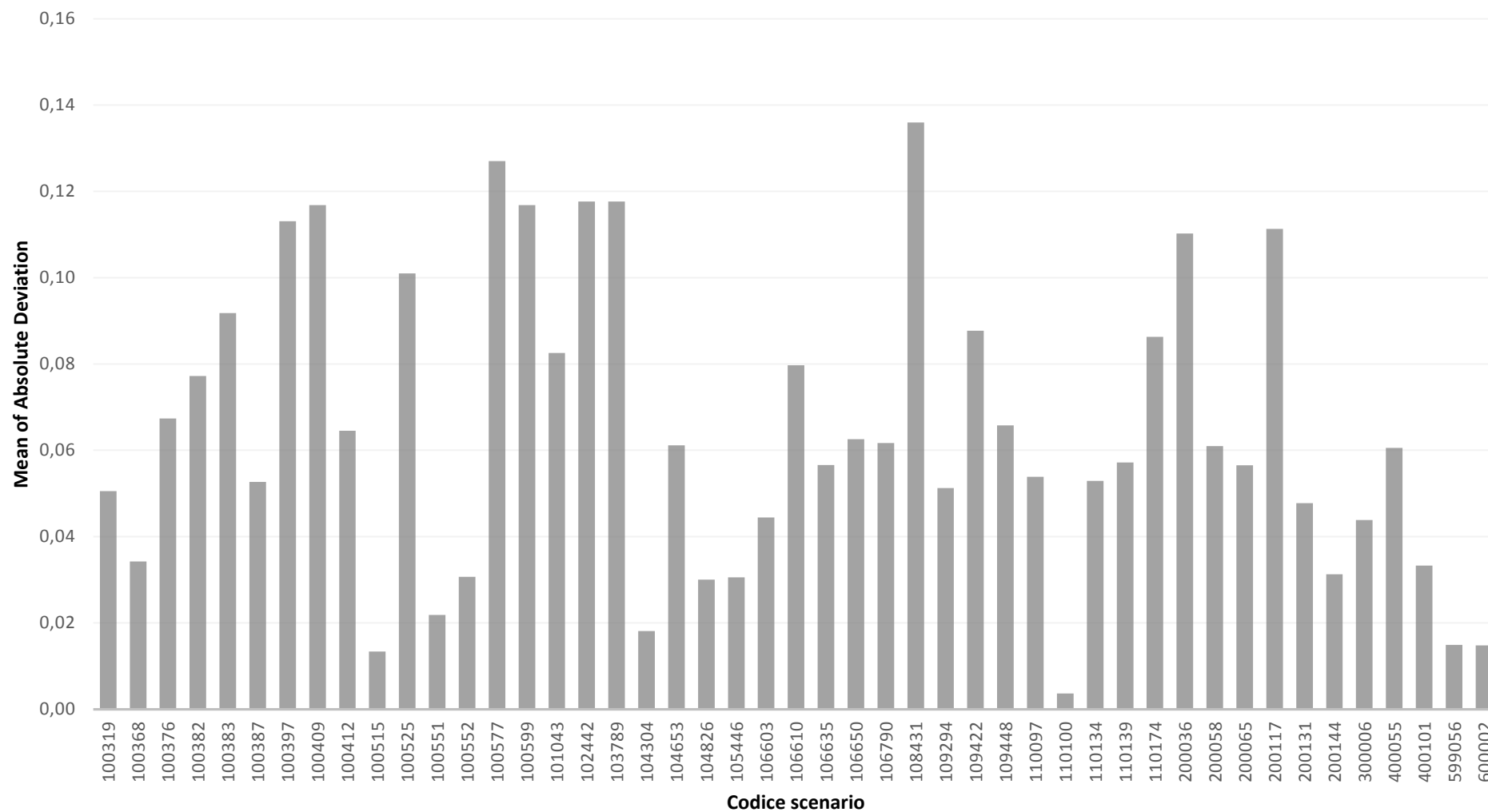


Grafico 3-11: Mean of Absolute Deviation: rappresenta la variazione media delle celle della matrice rispetto allo scenario iniziale

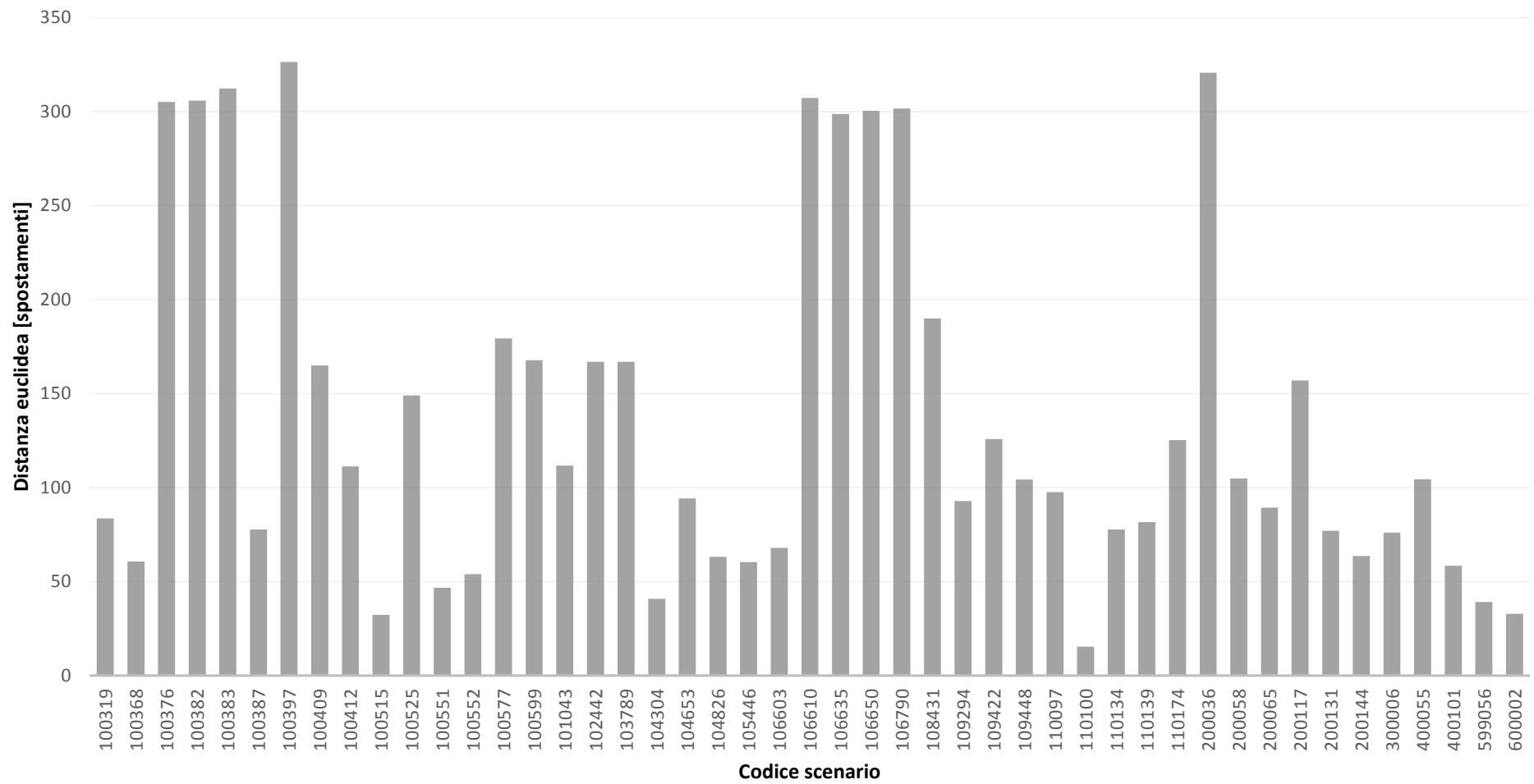


Grafico 3-12: distanza euclidea tra le matrici di spostamento relative agli scenari di danno e quella per lo scenario iniziale

3.6.2.1.2 Cut-Link

Come per i non cut-link, si riporta la variazione assoluta e percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale. Dal Grafico 3-13 e dal Grafico 3-14 si nota che per tutti gli scenari si ha una riduzione del tempo totale, in particolare nel caso di eliminazione dell'arco 110106, appartenente alla Strada Regionale n.11 (Figura 3-14). Questo miglioramento delle condizioni della rete è generato da una diminuzione della domanda; infatti, a causa dell'isolamento di alcune zone, gli utenti non possono più effettuare gli spostamenti a destinazione vincolata (cioè per motivi sistematici) verso aree non più raggiungibili.

Per questa tipologia di archi il calcolo dell'indicatore *Importance* è effettuato utilizzando la domanda insoddisfatta (come indicato nel capitolo 2.4.3); dal relativo grafico si conferma che l'arco 110106 produce la maggiore domanda insoddisfatta, in quanto impedisce gli spostamenti di attraversamento generati e attratti dalla zona 113 (si veda la Figura 3-21). In aggiunta a questo fenomeno, si osserva (Figura 3-30) come gli utenti che risiedono nel centro di Dolo non scelgano più la zona 113 come destinazione dei propri spostamenti a differenza di quanto avviene per lo scenario iniziale (Figura 3-22); da questo si nota la variazione della domanda correttamente simulata dal modello Activity-Based.

A differenza dei non cut-link, dai grafici Grafico 3-16 e Grafico 3-17, si nota che la variazione del totale di matrice è maggiore (fino al 15% - Grafico 3-17), con una redistribuzione dei valori tra le celle molto più elevata (con una punta del 65% - Grafico 3-18); questo fatto, insieme ai grafici MAD (Grafico 3-20) e DE (Grafico 3-21), conferma che i cut-link producono una variazione spaziale della domanda più marcata dei non cut-link.

Da ultimo si riporta la matrice di correlazione così come definita per i non cut-link (Tabella 3-7). In questo caso l'*Importance* ed il costo totale di rete sono negativamente correlati, anche se in misura minore. Questo tipo di legame si osserva anche tra la differenza sul totale di matrice e l'*Importance*, poiché un aumento di domanda insoddisfatta si lega a una diminuzione del numero totale di spostamenti. Inoltre il legame tra il tempo totale speso in rete e la differenza di spostamenti è positivo. Quanto sottolineato conferma che il calo del costo totale di rete è dovuto alla diminuzione della domanda. Infine si osserva che il coefficiente di correlazione di Spearman è prossimo a -1 anche per l'accessibilità in relazione agli indicatori che valutano la variazione delle celle della matrice, evidenziando come la

ridistribuzione spaziale della domanda sia causata da una diminuzione complessiva dell'accessibilità.

	IMP	C_RETE	ACCD	TOT	R	R_ABS	RS	MAD	DE
IMP	1,0000	-0,8927	0,4291	-1,0000	-1,0000	-0,3984	0,4506	-0,3984	-0,3595
C_RETE	-0,8927	1,0000	-0,0888	0,8929	0,8929	0,0533	-0,3383	0,0533	0,0496
ACCD	0,4291	-0,0888	1,0000	-0,4332	-0,4332	-0,9476	0,6059	-0,9476	-0,9731
TOT	-1,0000	0,8929	-0,4332	1,0000	1,0000	0,4003	-0,4577	0,4003	0,3630
R	-1,0000	0,8929	-0,4332	1,0000	1,0000	0,4003	-0,4577	0,4003	0,3630
R_ABS	-0,3984	0,0533	-0,9476	0,4003	0,4003	1,0000	-0,3296	1,0000	0,9818
RS	0,4506	-0,3383	0,6059	-0,4577	-0,4577	-0,3296	1,0000	-0,3296	-0,4480
MAD	-0,3984	0,0533	-0,9476	0,4003	0,4003	1,0000	-0,3296	1,0000	0,9818
DE	-0,3595	0,0496	-0,9731	0,3630	0,3630	0,9818	-0,4480	0,9818	1,0000

Tabella 3-7: coefficienti di correlazione tra gli indicatori utilizzati: IMP: Importance, C_RETE: Costo totale di rete; ACCD: Variazione di accessibilità; TOT: Differenza tra i totali di matrice; R: Differenza percentuale tra i totali di matrice; R_ABS: Percentuale di spostamenti ridistribuiti all'interno della matrice rispetto allo scenario iniziale; RS: Differenza percentuale dei totali di matrice al netto della riduzione degli spostamenti; MAD: Mean of Absolute Deviation; DE: istanza Euclidea

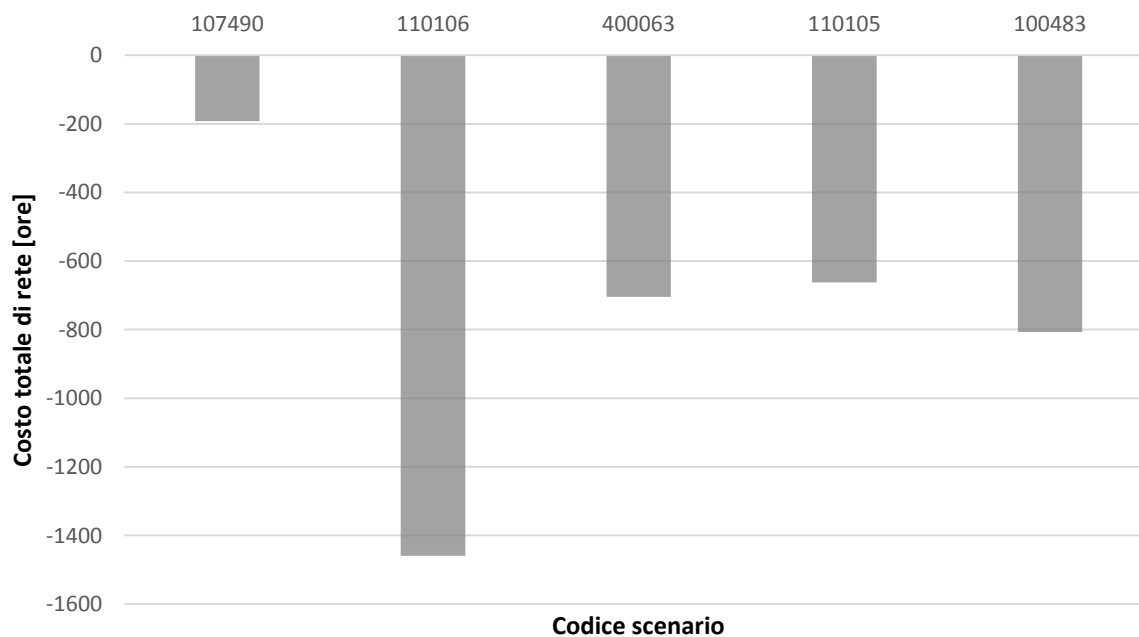


Grafico 3-13: Differenza assoluta del costo totale di rete tra gli scenari di danno e lo scenario iniziale

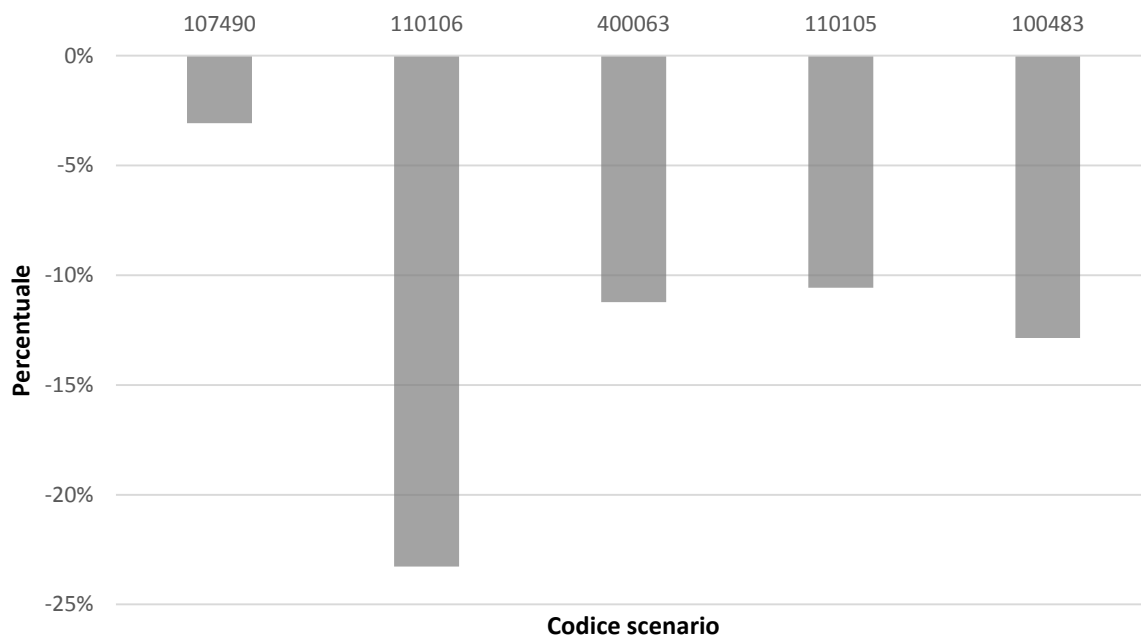


Grafico 3-14: Variazione percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale

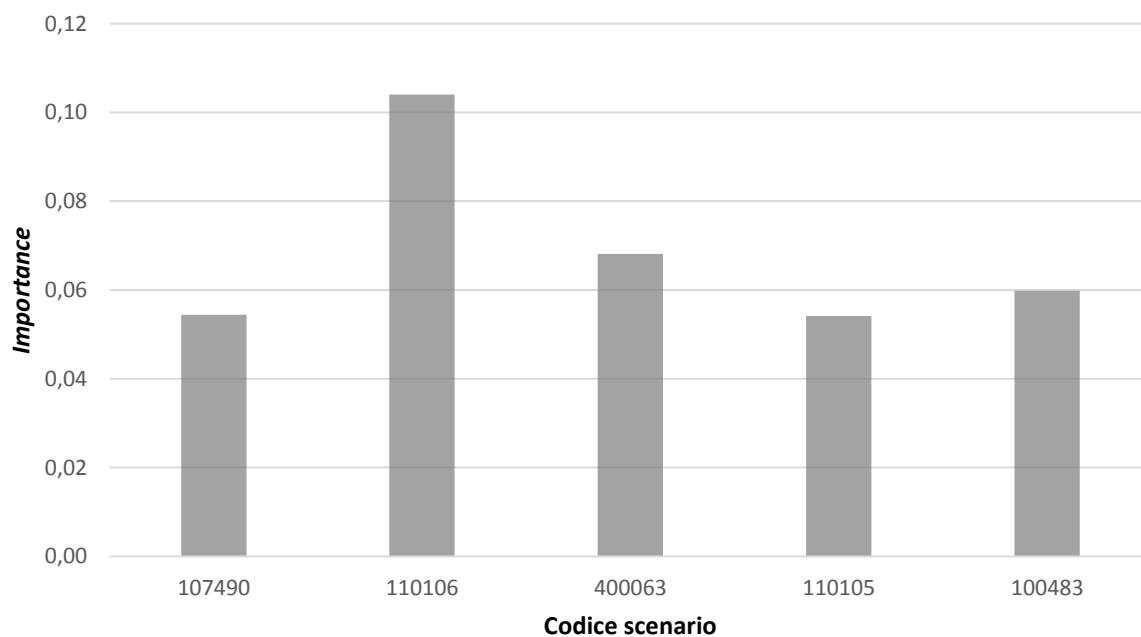


Grafico 3-15: valori dell'indicatore Importance per ogni scenario di danno

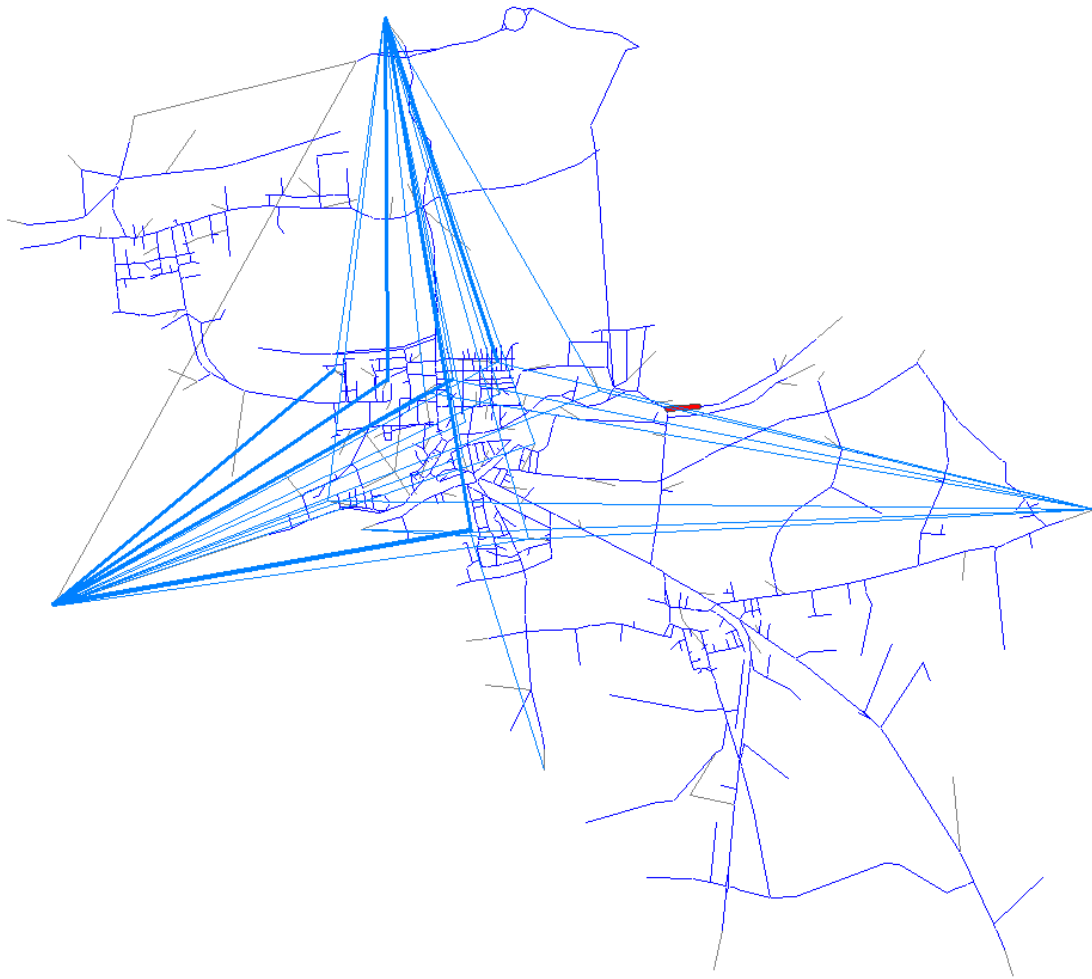


Figura 3-30: linee di desiderio; i blu: gli spostamenti generati dal centro di Dolo verso le zone esterne all'area di studio per il periodo di punta della mattina

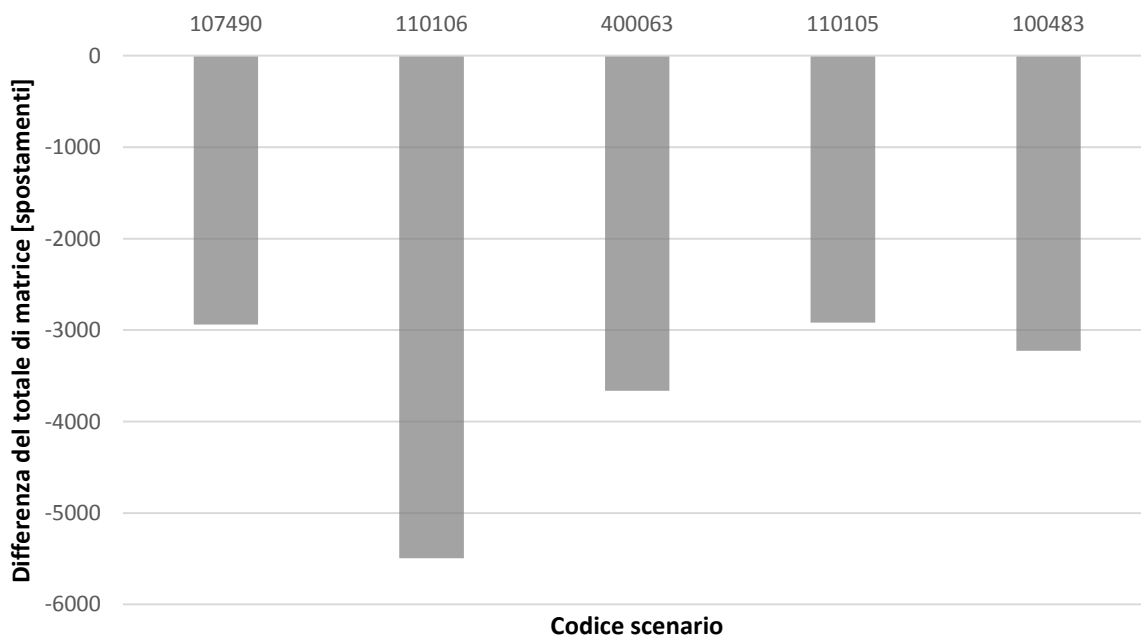


Grafico 3-16: differenza del totale della matrice degli spostamenti assegnati alla rete tra gli scenari di danno e o scenario iniziale

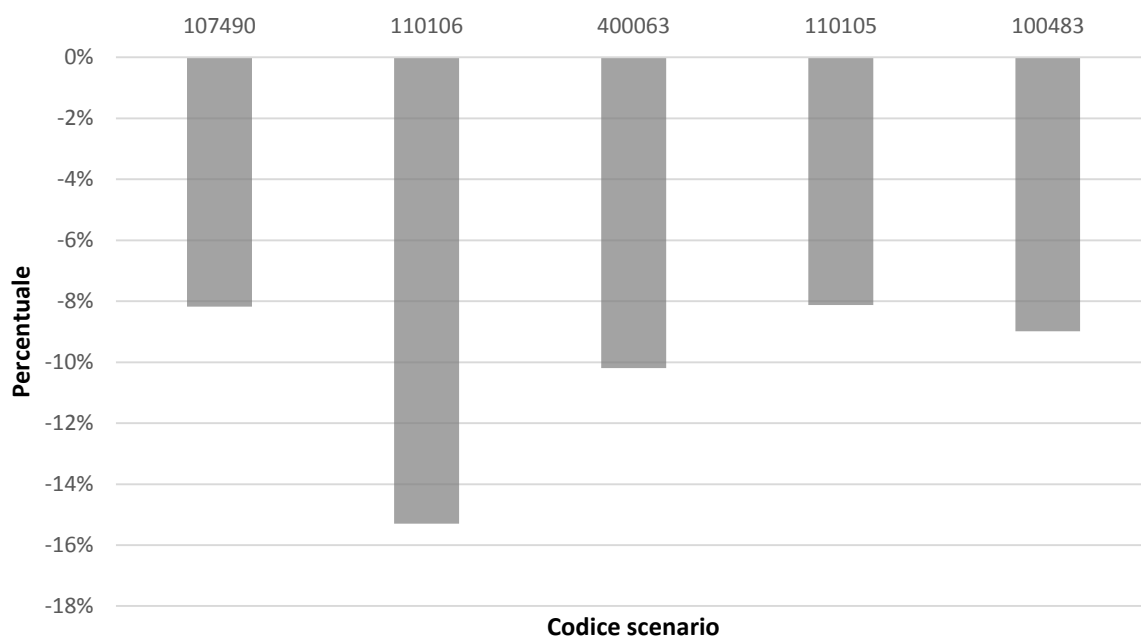


Grafico 3-17: differenza percentuale tra i totali di matrici espressi in assoluto dal Grafico 3-16

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

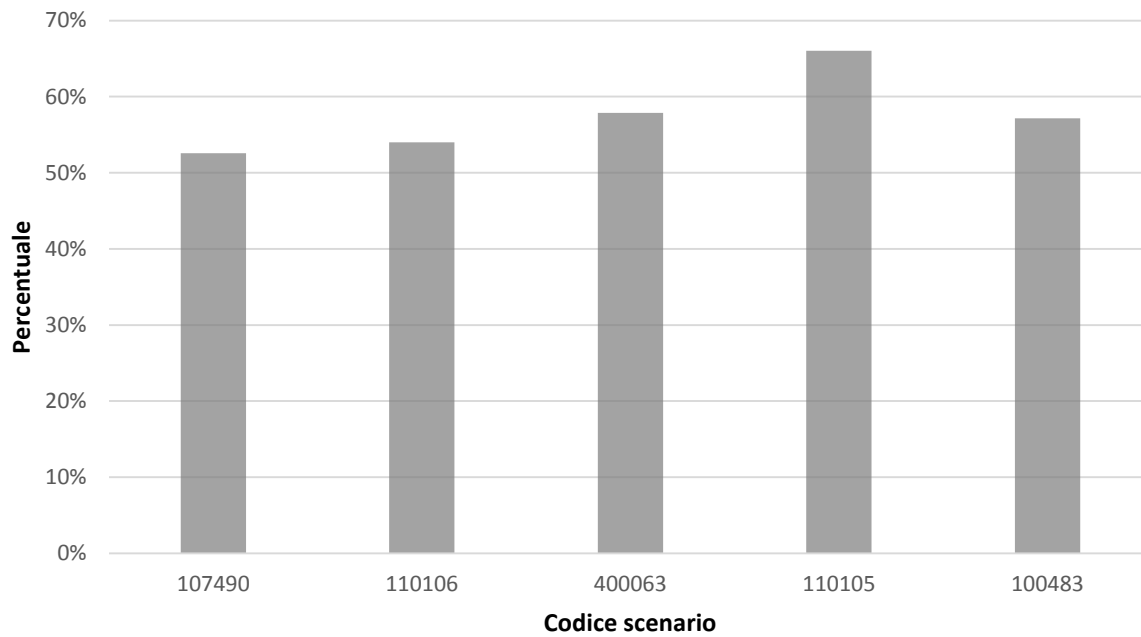


Grafico 3-18: percentuale di spostamenti che si sono ridistribuiti tra le celle della matrice come illustrato nel capitolo 3.6

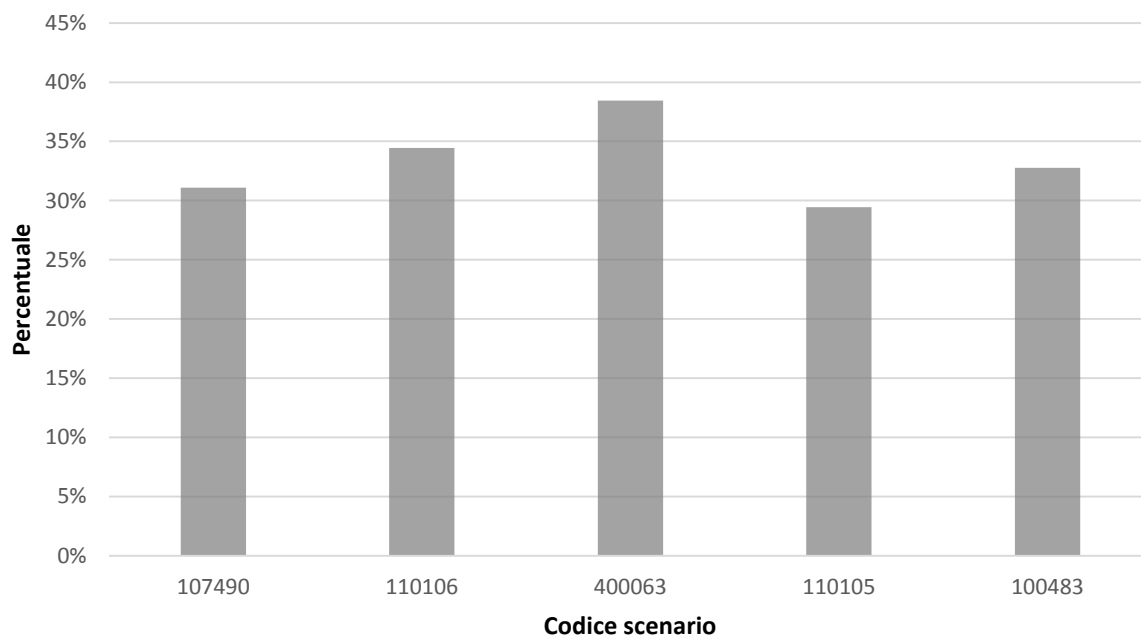


Grafico 3-19: differenza percentuale della matrice al netto della riduzione di spostamenti come indicato nel capitolo 3.6

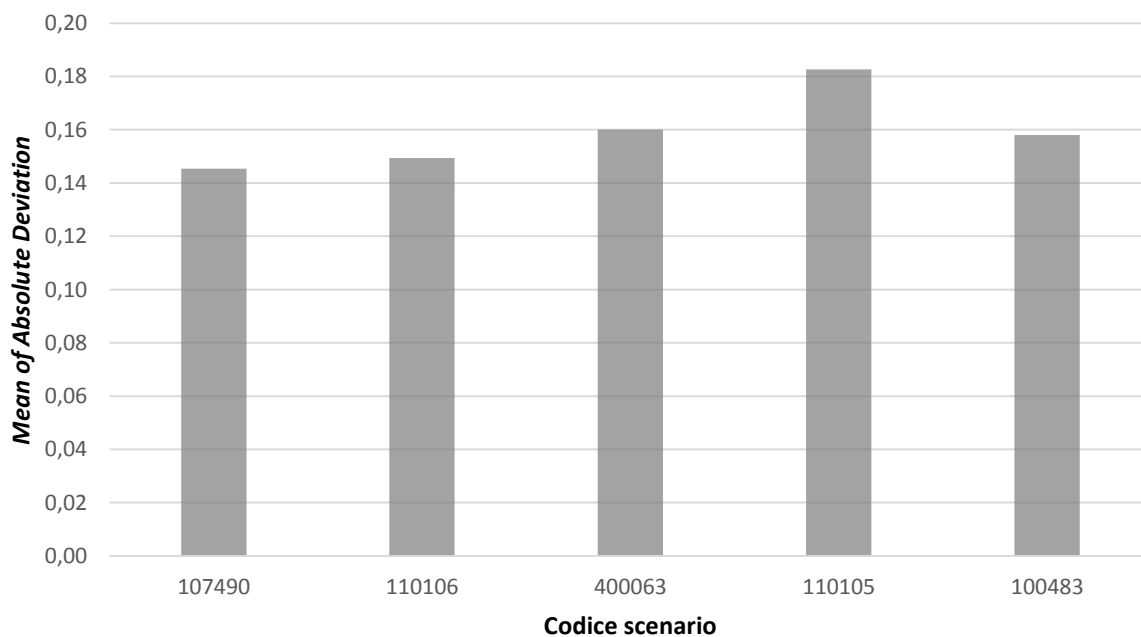


Grafico 3-20: Mean of Absolute Deviation: rappresenta la variazione media delle celle della matrice rispetto allo scenario iniziale

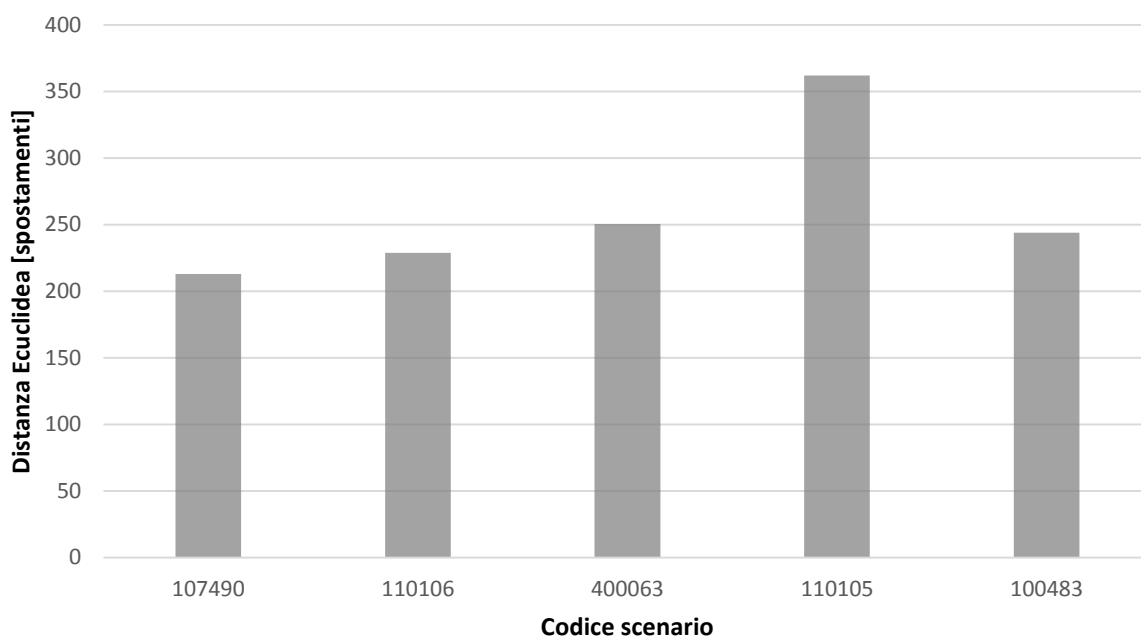


Grafico 3-21: distanza euclidea tra le matrici di spostamento relative agli scenari di danno e quella per lo scenario iniziale

3.6.2.1.3 Indicatore globale

Per ordinare tutti gli archi (cut-link e non cut-link) in base alla loro vulnerabilità è stato applicato l'indicatore proposto da Rupi et al. (Rupi et al. 2014; Rupi et al. 2015). Il parametro α è stato determinato in modo che il cut-link migliore (cioè con il minor valore assoluto del costo totale di rete) producesse un incremento del tempo totale superiore al peggiore non cut-link. Il valore di α , scelto secondo questo criterio, corrisponde a quello calcolato per il modello a domanda fissa. La scelta di tale impostazione equivale ad individuare come obiettivo fondamentale l'assegnazione di tutta la domanda alla rete, ovvero che tutti gli individui di possano effettuare gli spostamenti desiderati. Altri obiettivi determinano altre scelte del valore di α da impiegare nell'analisi.

Dato che i risultati prodotti dall'indicatore dipendono fortemente dal parametro β è stata condotta un'analisi di sensibilità utilizzando i seguenti valori:

1. $\beta = 0.25$;
2. $\beta = 0.50$;
3. $\beta = 0.75$.

Dal Grafico 3-22 si osserva che per β pari a 0.25 i cut-link hanno un'importanza sempre superiore ai non cut-link, poiché, in questo modo, il peso maggiore nel calcolo dell'indicatore è attribuito all'incremento del costo totale di rete (aumentato per i cut-link attraverso α). Il link peggiore risulta essere il 110106 e l'ordinamento generale in termini di importanza tra gli archi rispetta quello proposto dal tempo totale speso in rete.

Nel caso di β uguale a 0.5 (Grafico 3-23), si attribuisce lo stesso peso ai due termini che compongono l'indicatore; il link 110106 risulta essere sempre l'arco più importante, ma cambia la gerarchia dei restanti. Infatti il 100409, il 200131, il 100383 ed il 200058 si trovano ad un livello superiore rispetto agli altri cut-link, poiché hanno un flusso giornaliero molto più elevato (di almeno il 300%).

Infine ponendo β pari a 0.75 (Grafico 3-24) il peso maggiore è attribuito alla parte di indicatore che considera il flusso giornaliero sull'arco calcolato per lo scenario iniziale. Per questo motivo l'ordinamento è totalmente variato: l'arco più importante diventa il 100383

ed il 110106 si trova nella terza posizione; in particolare i non cut-link aumentano mediamente la loro importanza mentre quella di tutti i cut-link diminuisce.

Dal Grafico 3-25 è possibile visualizzare i cambiamenti nella gerarchia di importanza degli archi indotti dalla variazione di β .

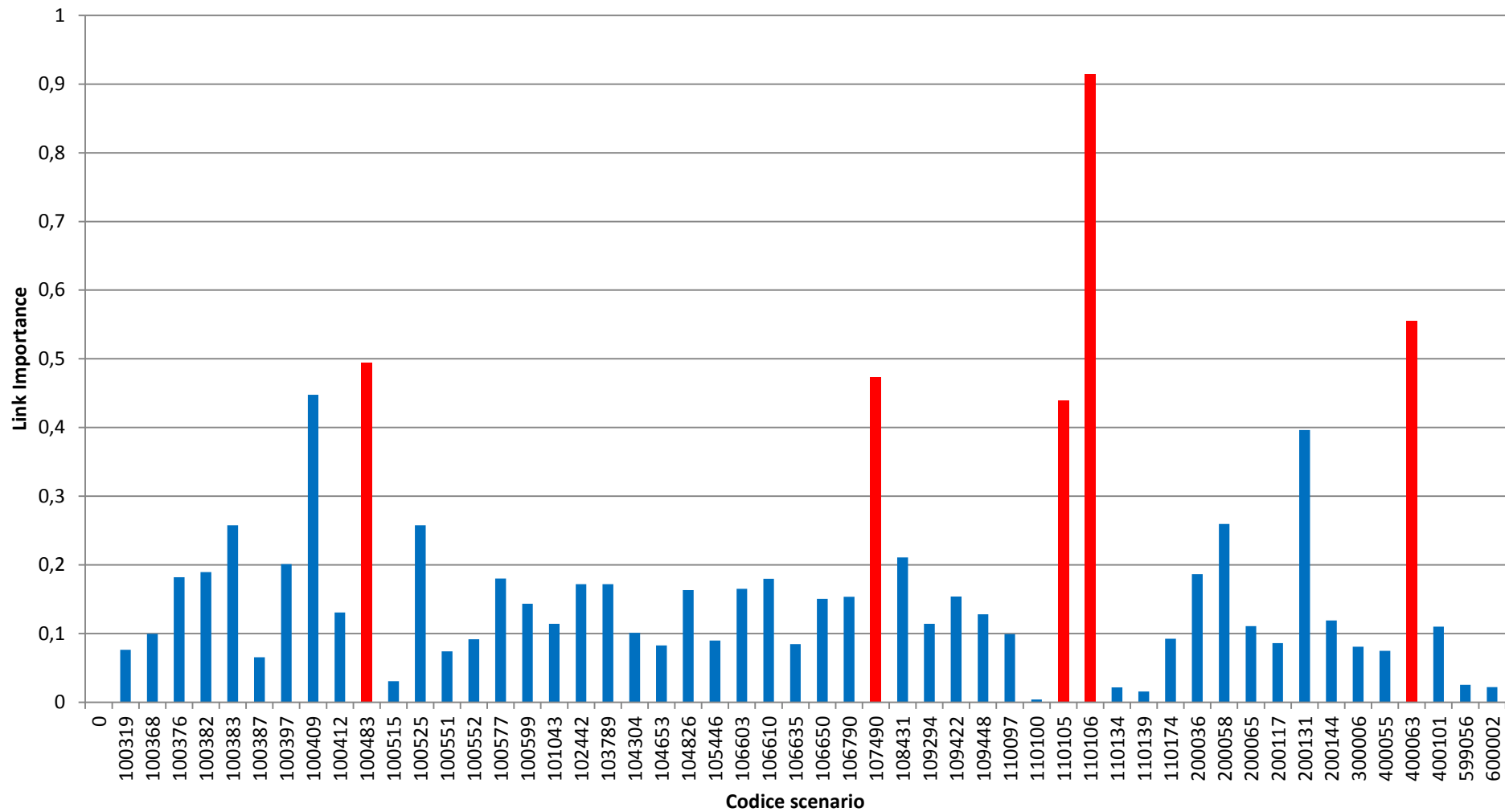


Grafico 3-22: Link Importance per $\beta = 0.25$; in rosso sono indicati i cut-link

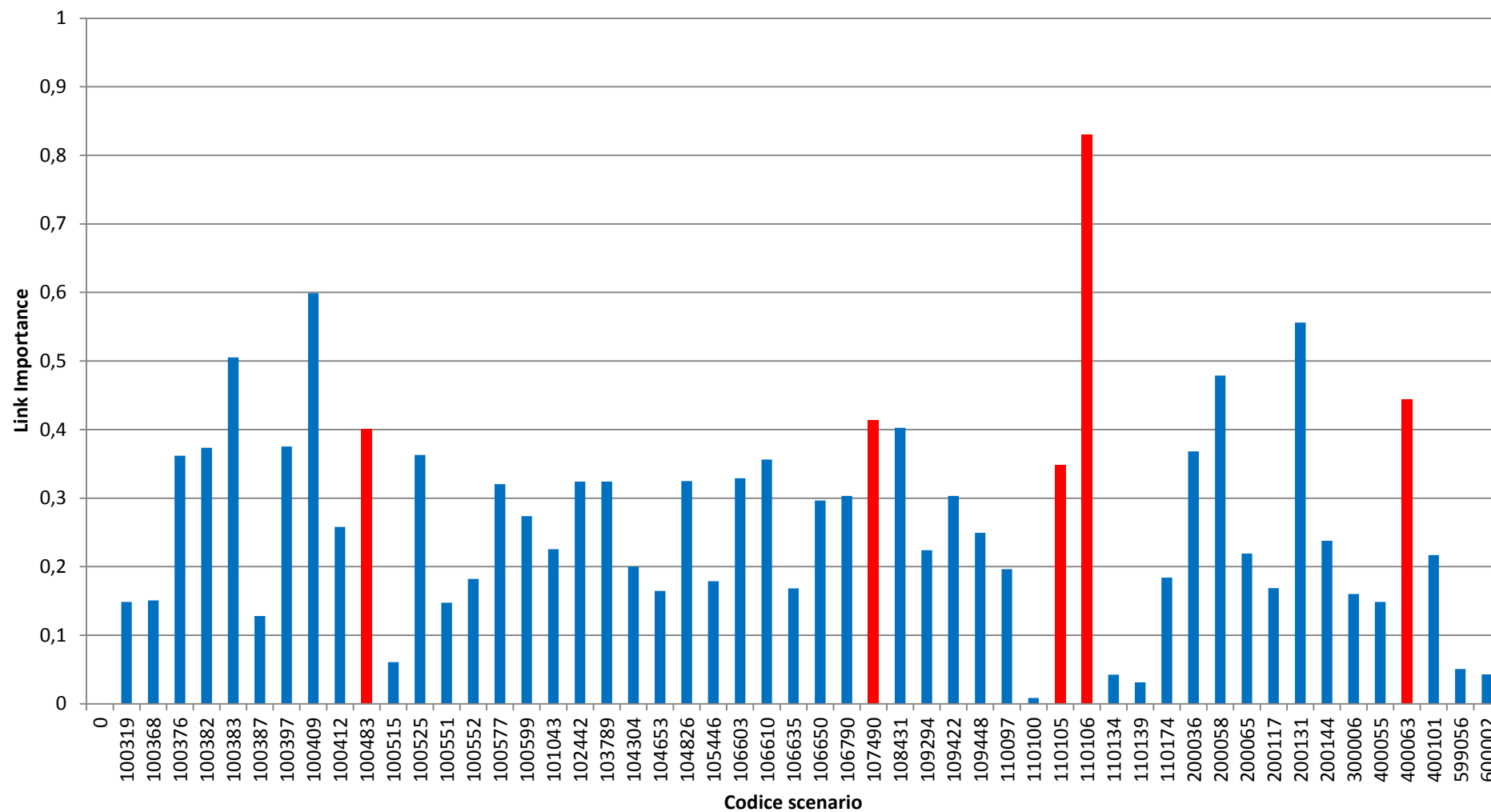


Grafico 3-23: Link Importance per $\alpha = 0.50$; in rosso sono indicati i cut-link

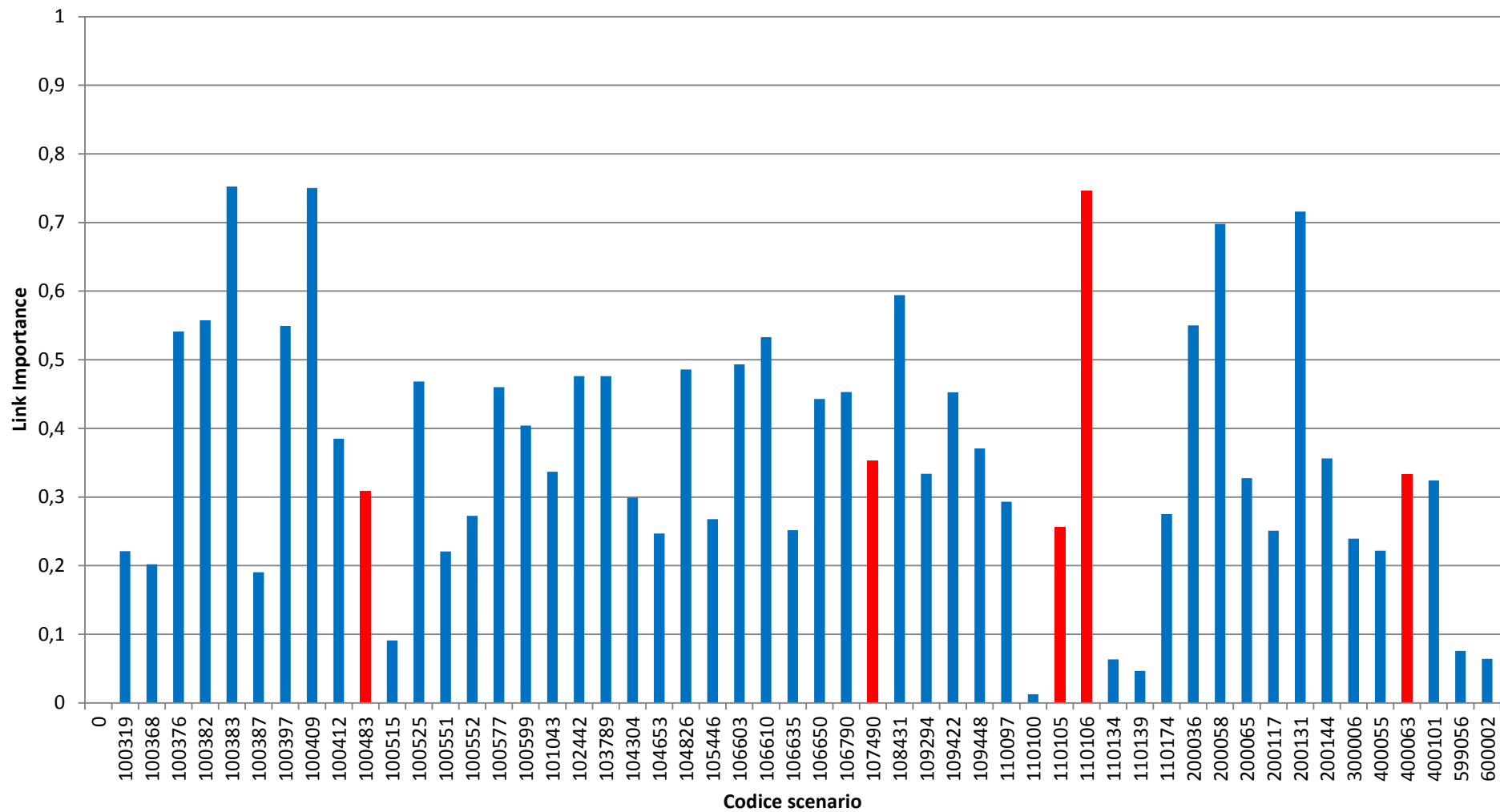


Grafico 3-24: Link Importance per $\beta = 0.75$; in rosso sono indicati i cut-link

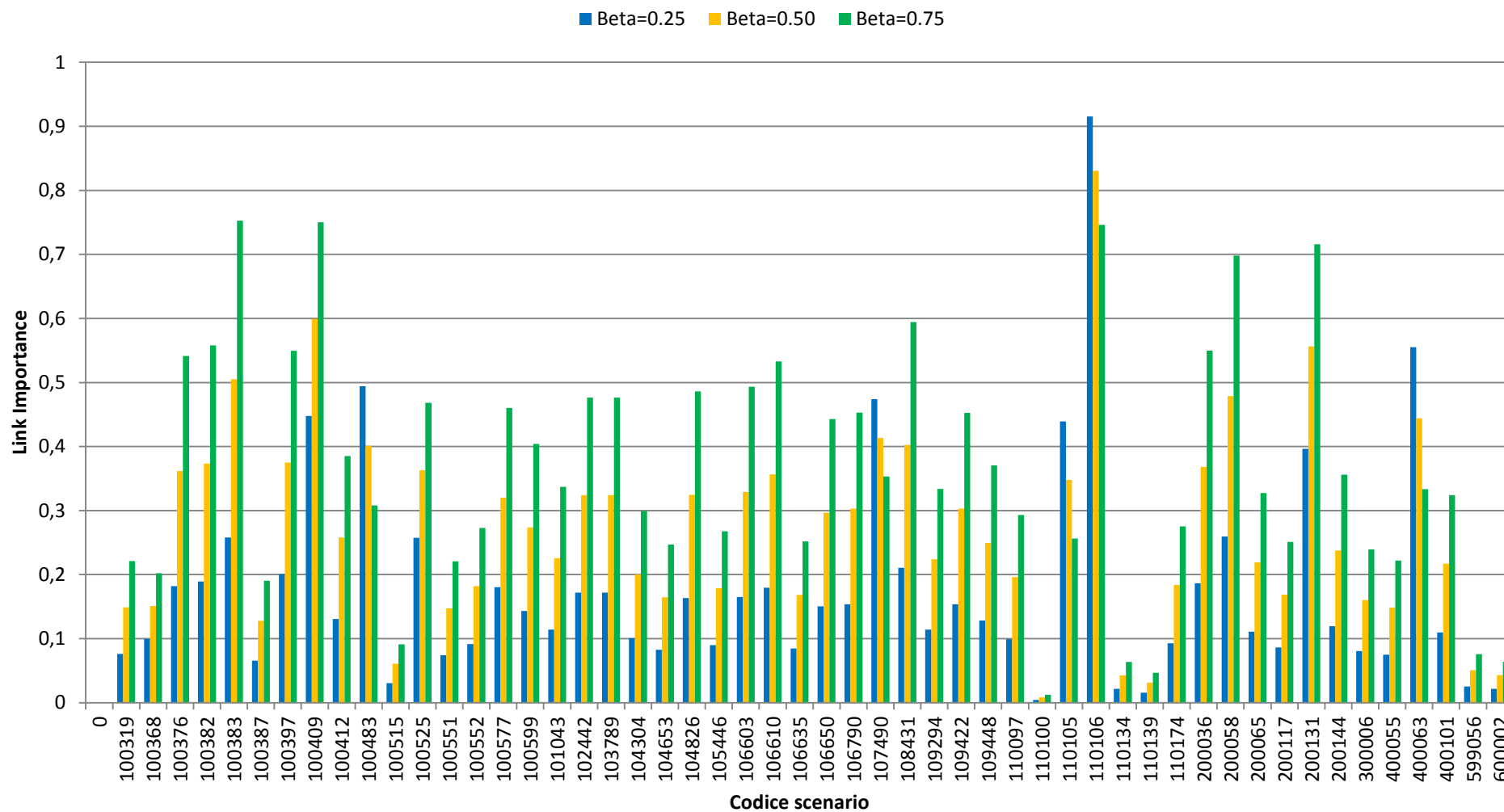


Grafico 3-25: Link Importance per diversi valori di β

3.6.2.2 Analisi della Domanda

In questo paragrafo si presenta un'analisi di dettaglio delle caratteristiche della domanda di trasporto simulate dal modello Activity-Based; come indicato in precedenza, i risultati riguardano solamente le attività generate dai residenti nell'area di studio. Anche se la forte disaggregazione dei dati consente uno studio con un dettaglio elevato (cioè a livello del singolo individuo), per confrontare tra loro i vari scenari è stato necessario aggregare le informazioni in modo da ottenere un valore medio per ogni scenario di danno.

Di seguito si riporta il numero di persone che, in ogni scenario, decidono di effettuare almeno uno spostamento (Grafico 3-26) e la loro differenza percentuale rispetto allo scenario iniziale (Grafico 3-27). Come atteso, si nota dal Grafico 3-27 che le maggiori variazioni (negative) si hanno per i cut-link, ad indicare il fatto che meno persone decidono di spostarsi. Ad eccezione di questi archi, le oscillazioni sono molto contenute (da +0.1% a -0.4%) e sono dovute alla forte componente aleatoria presente nel modello.

Il Grafico 3-28 presenta il numero di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto; dato che l'assegnazione è stata realizzata solo per gli autoveicoli, questi valori influiscono direttamente sugli indicatori di rete prima elencati. Dal grafico Grafico 3-29 si nota che per i cut-link la diminuzione è assai più marcata e dovuta principalmente al fatto che gli spostamenti per motivi sistematici da e verso le zone isolate non sono più realizzati. Come mostrato dal Grafico 3-30, si osserva che per tali archi il numero medio di spostamenti in auto effettuati da un utente diminuisce sensibilmente, mentre le variazioni per gli altri link sono associabili a cambiamenti nella scelta del modo di trasporto adottato.

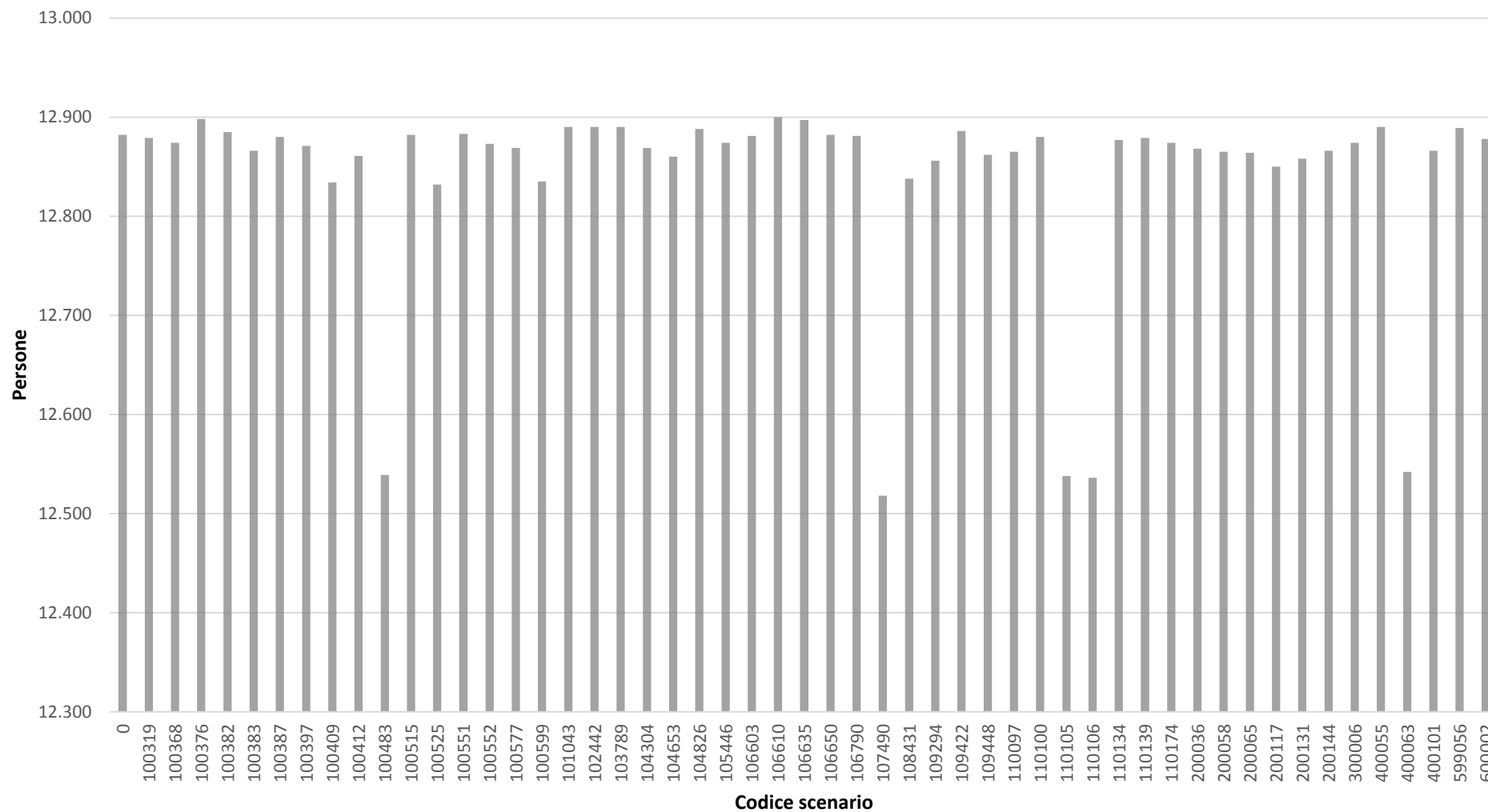


Grafico 3-26: numero di persone che decidono di effettuare almeno uno spostamento per i vari scenari

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

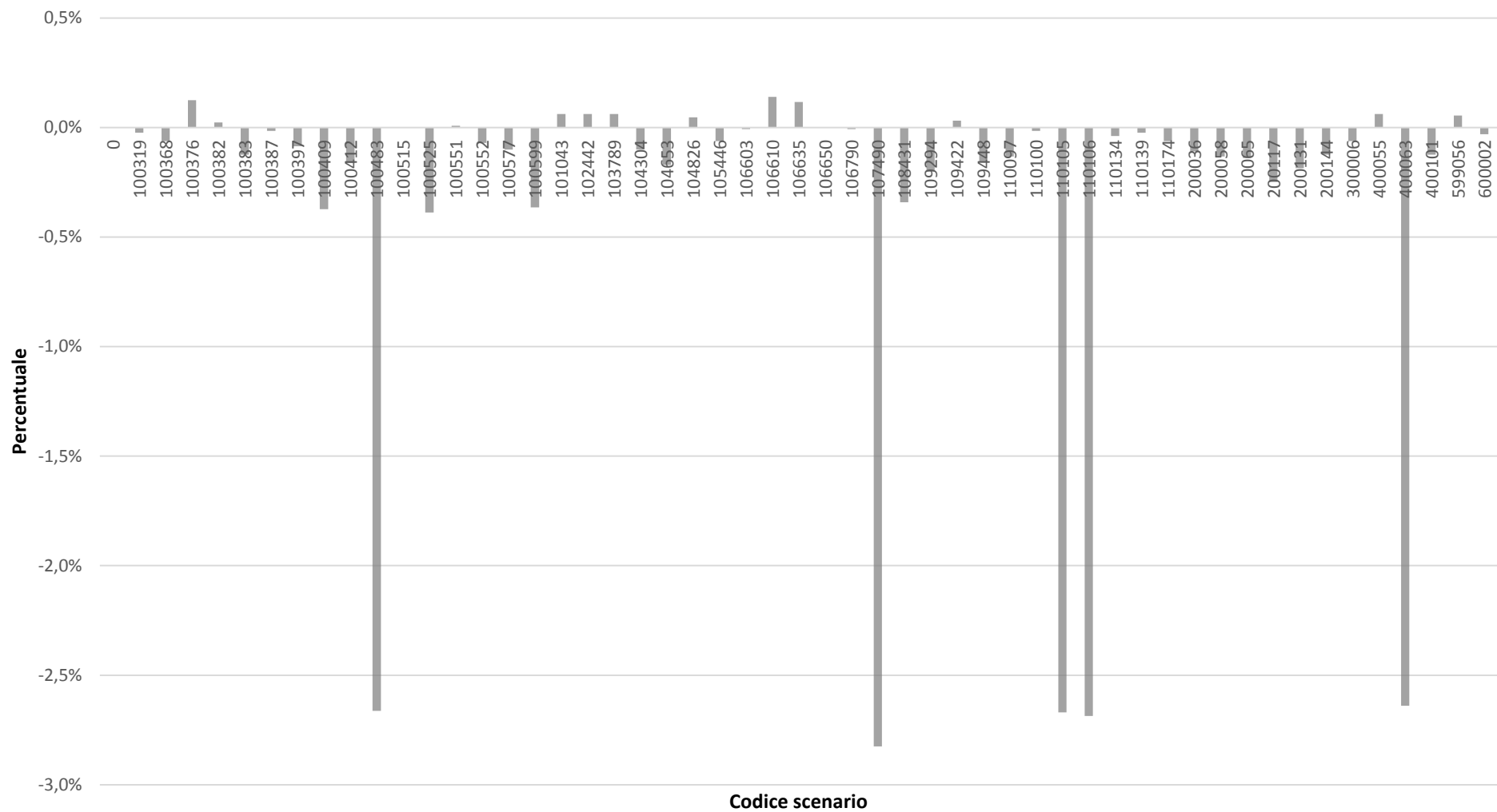


Grafico 3-27: variazione percentuale numero di persone che decidono di effettuare almeno uno spostamento tra gli scenari di danno e quello iniziale

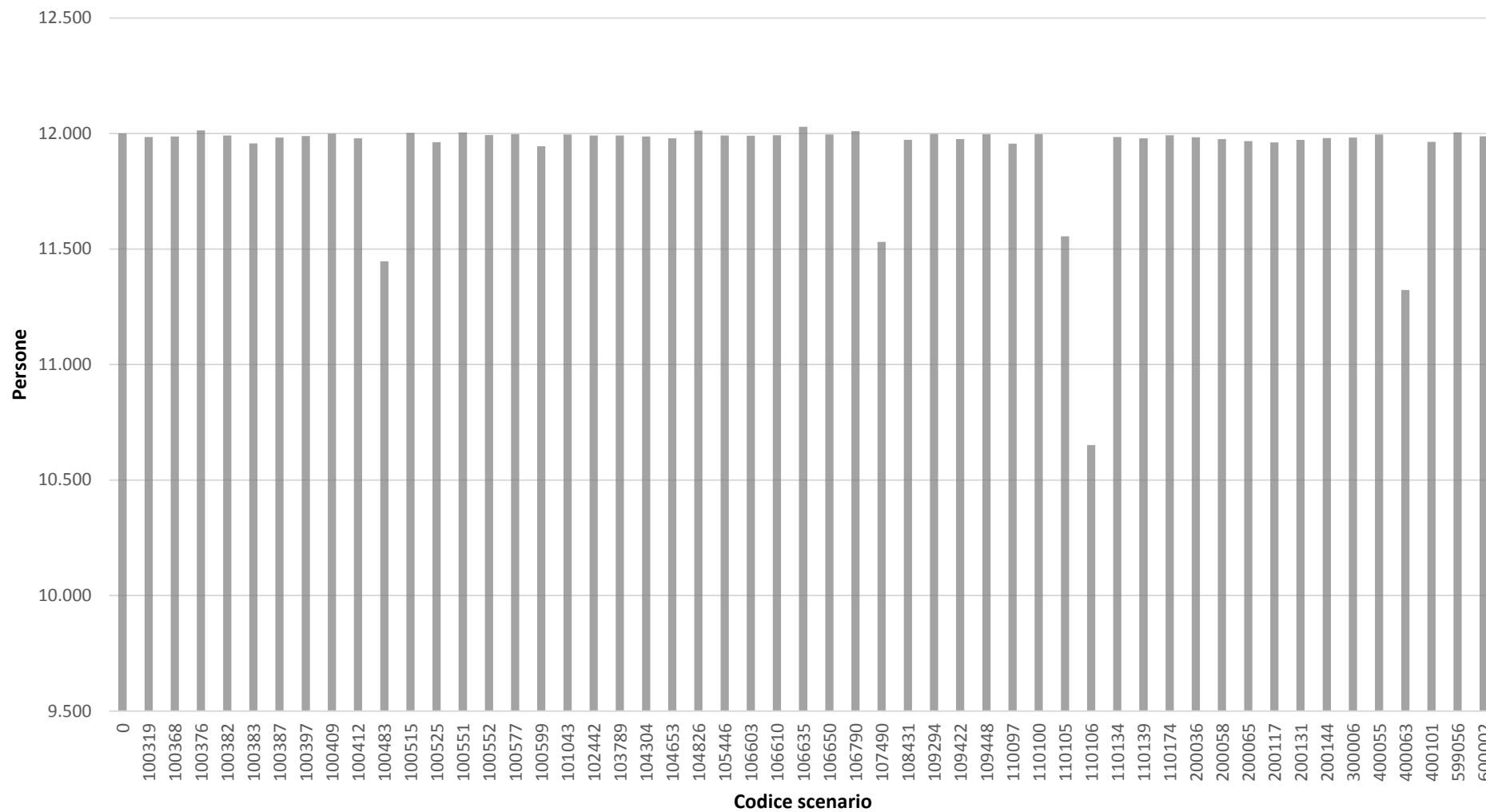


Grafico 3-28: numero di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto per i vari scenari

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

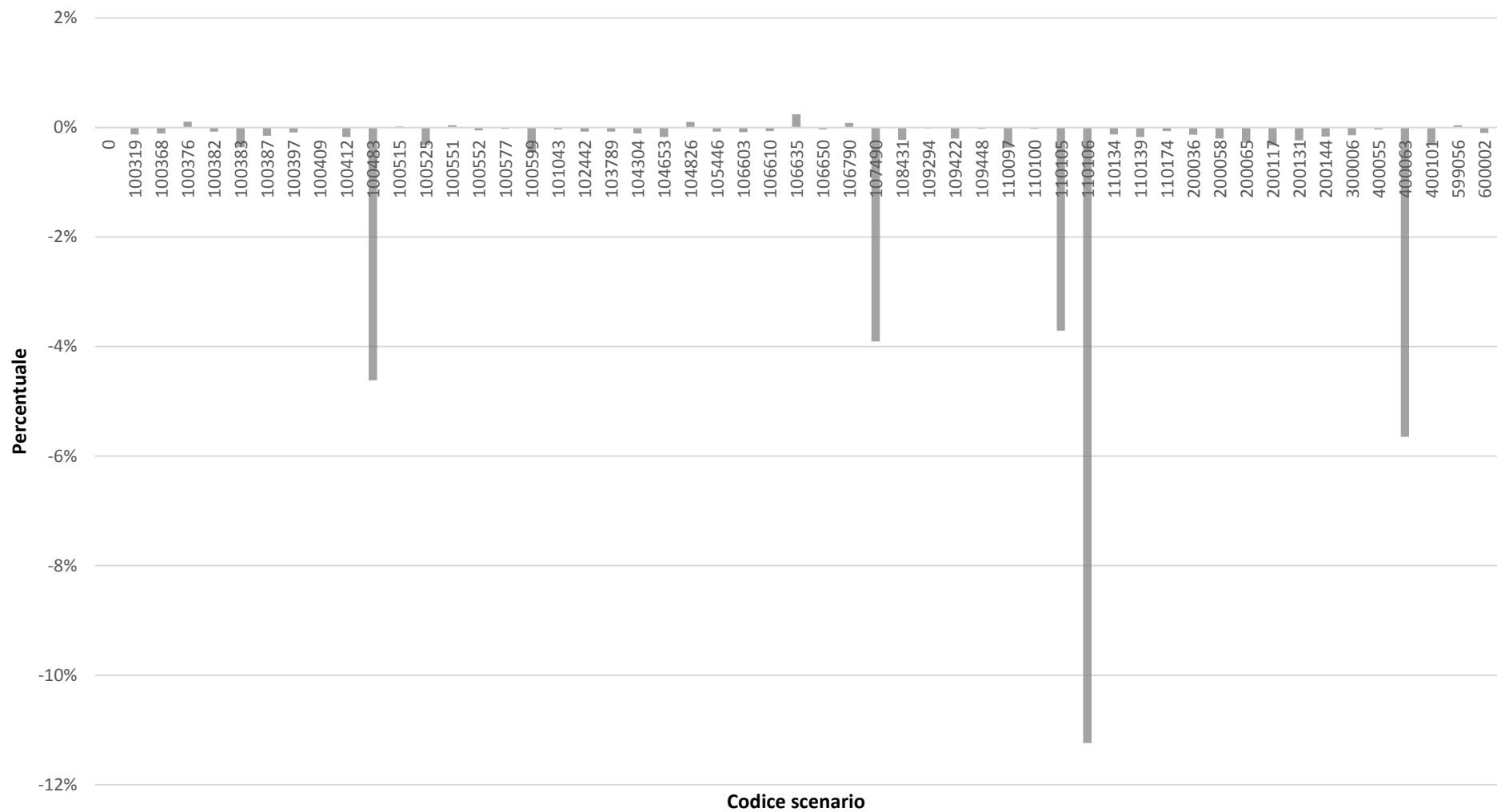


Grafico 3-29: variazione percentuale del numero di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto rispetto allo scenario iniziale

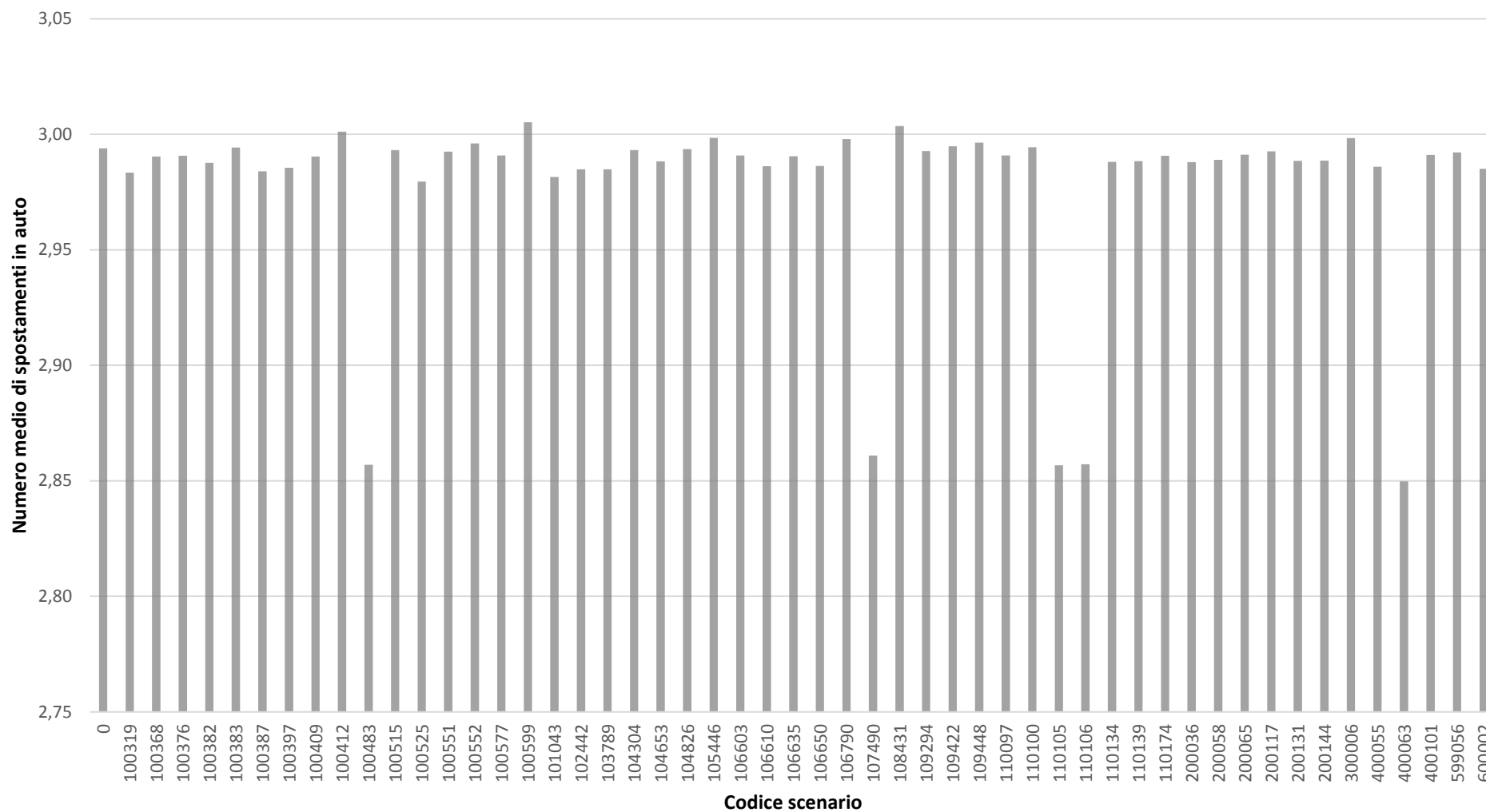


Grafico 3-30: numero medio di persone che effettuano almeno uno spostamento in auto per i vari scenari

Un ulteriore approfondimento dell'analisi viene dato dall'osservazione dei grafici Grafico 3-31, Grafico 3-32, Grafico 3-33 e Grafico 3-34, dai quali si osserva una diminuzione nel numero di spostamenti e di tour molto evidente per i cut-link. Questi grafici possono essere collegati al numero medio di spostamenti per tour (Grafico 3-35 e Grafico 3-36), alla lunghezza media di un tour (Grafico 3-37 e Grafico 3-38) e alla durata media di un tour (Grafico 3-39 e Grafico 3-40).

Dal Grafico 3-41 si osserva che l'accessibilità media percepita da ogni persona diminuisce per tutti gli scenari (tale decremento non risulta maggiore per i cut-link poiché dipende non solo dalla variazione dei livelli di servizio, ma anche dalle caratteristiche delle persone e delle famiglie modellate e dall'attrattività delle zone). Come conseguenza gli utenti decidono di modificare le caratteristiche delle proprie attività. Infatti dall'analisi dei grafici Grafico 3-37, Grafico 3-38, Grafico 3-39 e Grafico 3-40 si può concludere che l'eliminazione di un arco dalla rete induce le persone ad effettuare percorsi più lunghi sia in termini spaziali che temporali. Il peggioramento delle condizioni della rete, valutato in precedenza attraverso l'aumento del costo totale di rete (Grafico 3-4 e Grafico 3-5), trova giustificazione in questi cambiamenti nelle caratteristiche della domanda.

Secondo questo approccio il link 100409 risulta il più vulnerabile, poiché la sua rimozione causa una considerevole diminuzione dell'accessibilità media (circa il 19% in meno - Grafico 3-41); di conseguenza si osserva che gli utenti decidono di compiere tour meno complessi (infatti il numero di spostamenti e di tour diminuiscono - Grafico 3-32 e Grafico 3-34) aventi una durata e lunghezza media maggiori (rispettivamente del 30% e del 15% in più - Grafico 3-38 e Grafico 3-40), provocando un elevato aumento del tempo totale speso in rete (fino al 440% - Grafico 3-5).

In altri casi, come per l'arco 108431, le persone compiono catene di spostamenti più complesse (il numero medio di spostamenti per tour aumenta) e tour che sono mediamente più lunghi e con una durata maggiore.

Da questo tipo di analisi si evidenziano gli effetti dell'eliminazione del cut-link 110106: molte persone non possono più recarsi al lavoro o a scuola nelle zone isolate, preferendo non spostarsi (Grafico 3-32) o effettuare tour per altri motivi, ma comunque più brevi (Grafico

3-38 e Grafico 3-40), e causando una sensibile riduzione del tempo totale speso in rete dai veicoli (Grafico 3-13).

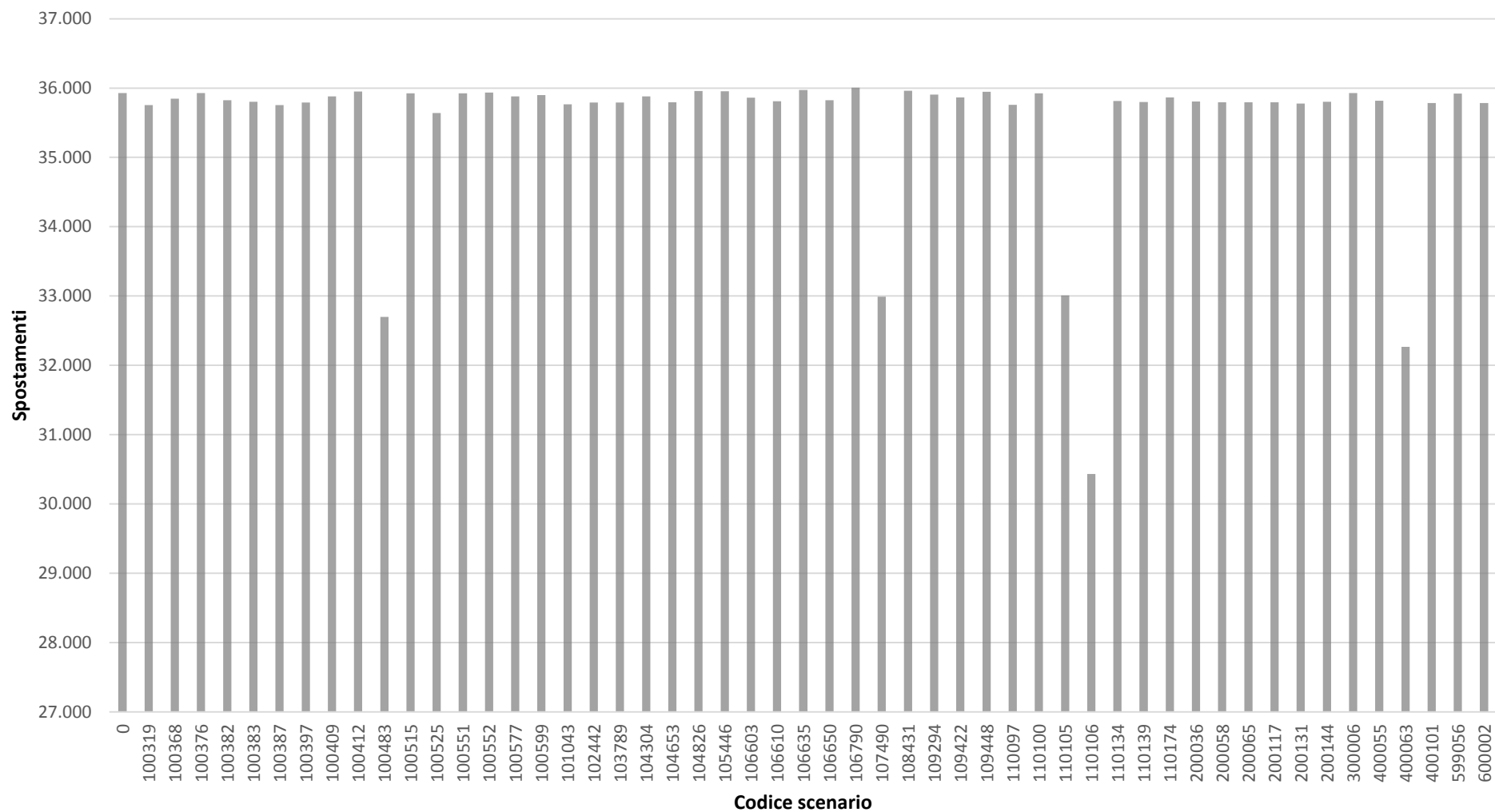


Grafico 3-31: numero di spostamenti compiuti in auto per gli scenari in esame

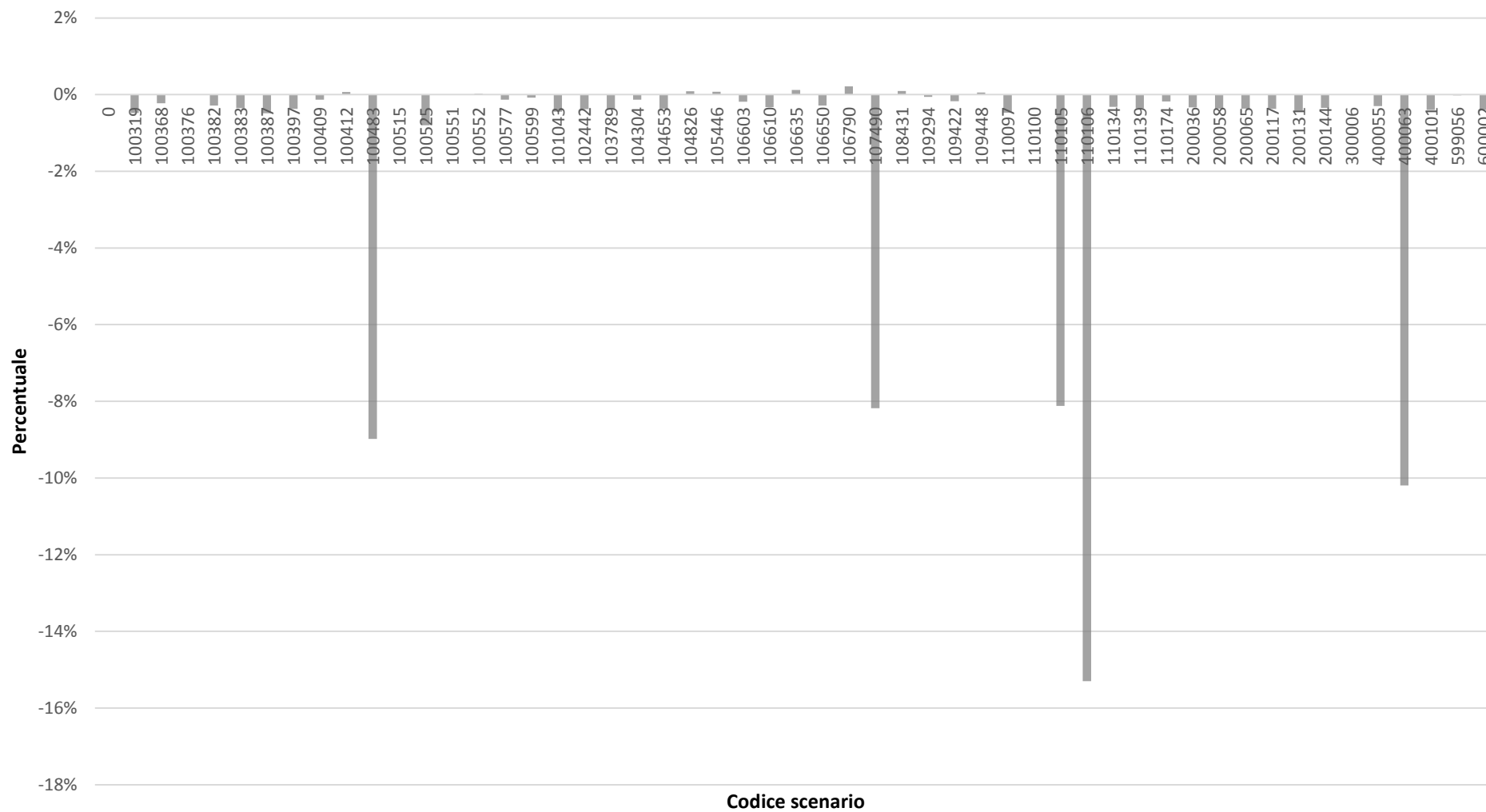


Grafico 3-32: variazione percentuale del numero di spostamenti compiuti in auto rispetto allo scenario iniziale

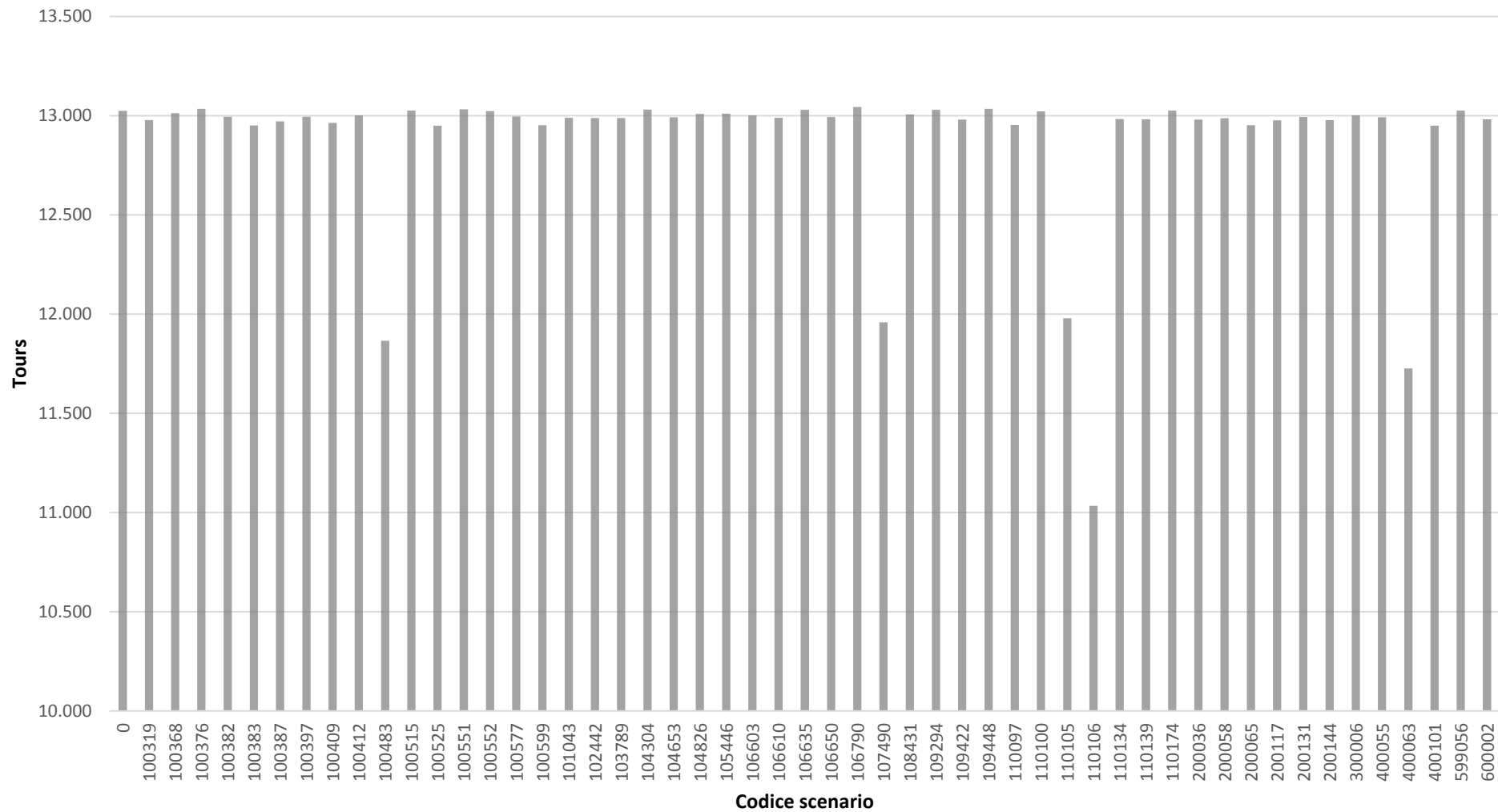


Grafico 3-33: numero di tours compiuti in auto per gli scenari in esame

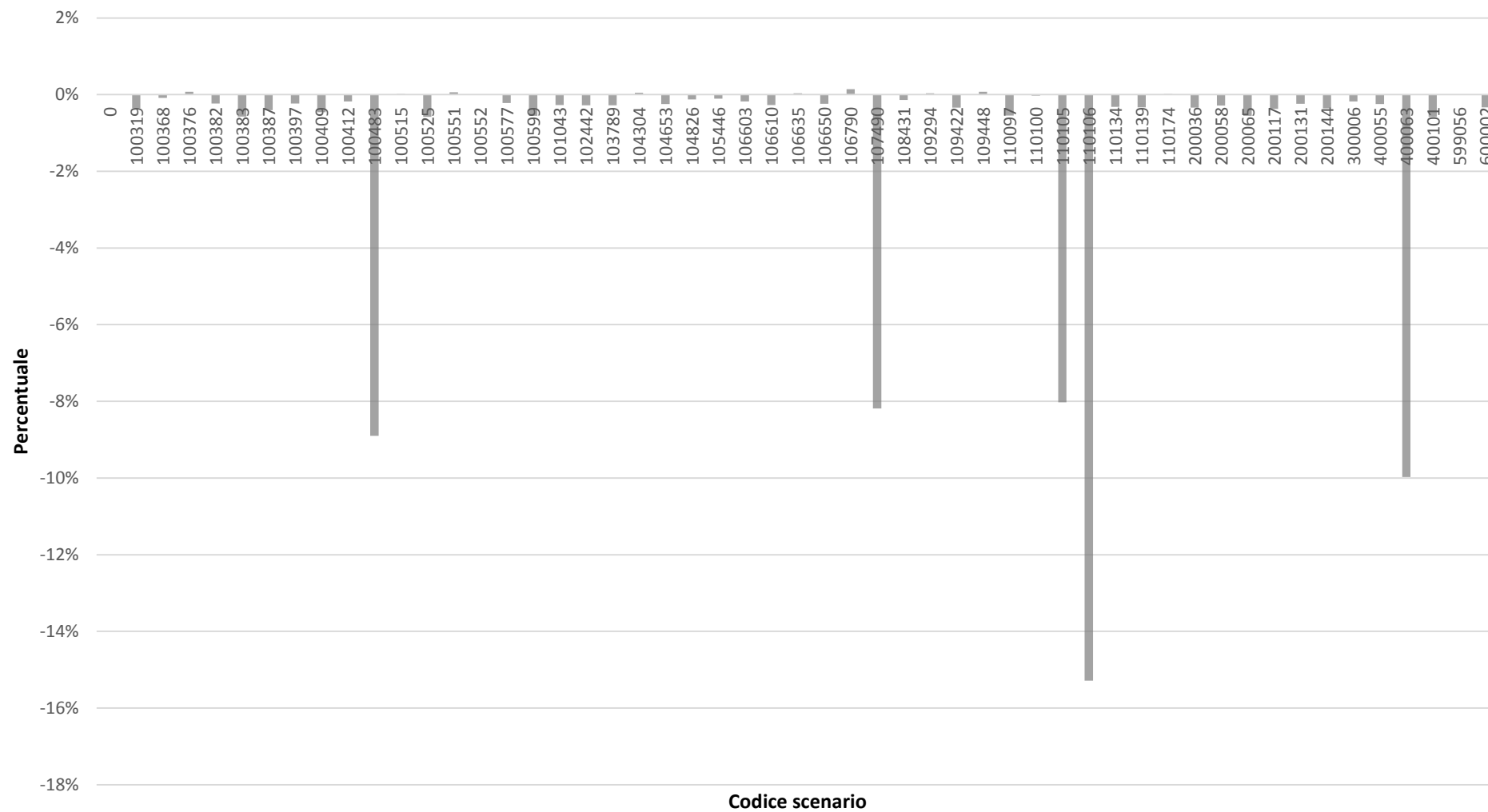


Grafico 3-34: differenza percentuale del numero di tours compiuti in auto rispetto allo scenario iniziale

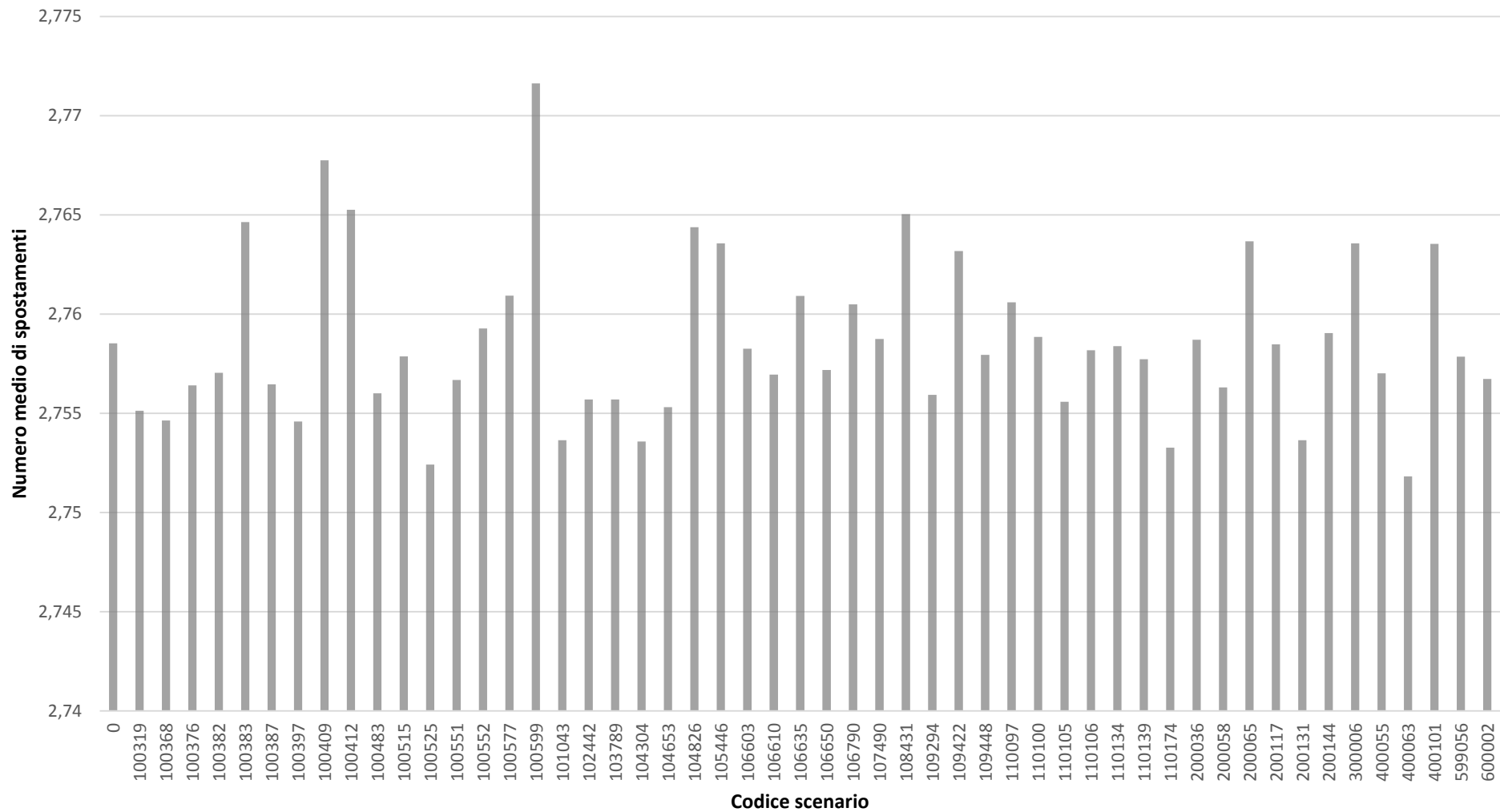


Grafico 3-35: numero medio di spostamenti per tour per i vari scenari

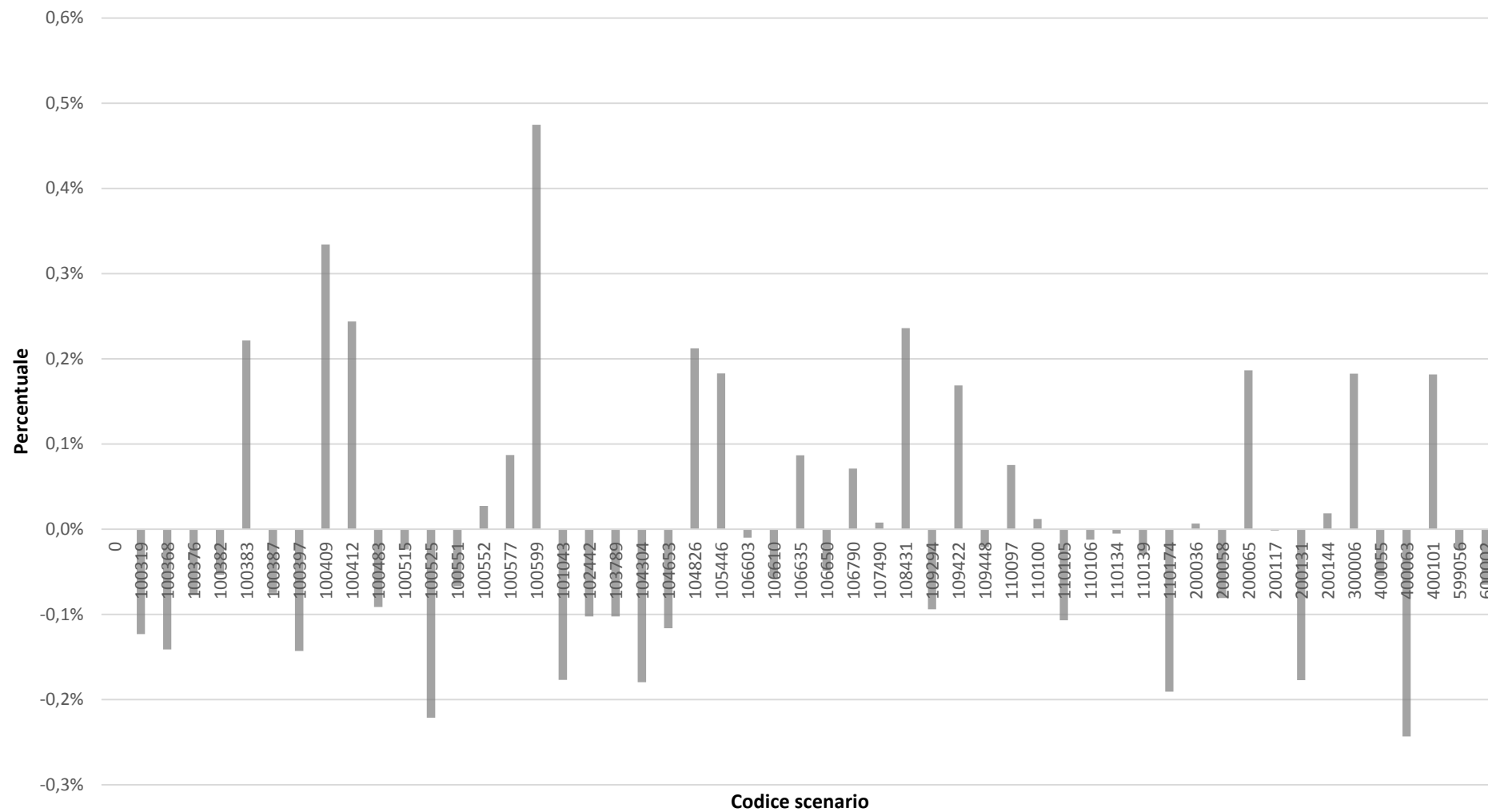


Grafico 3-36: variazione percentuale del numero medio di spostamenti per tour rispetto allo scenario iniziale

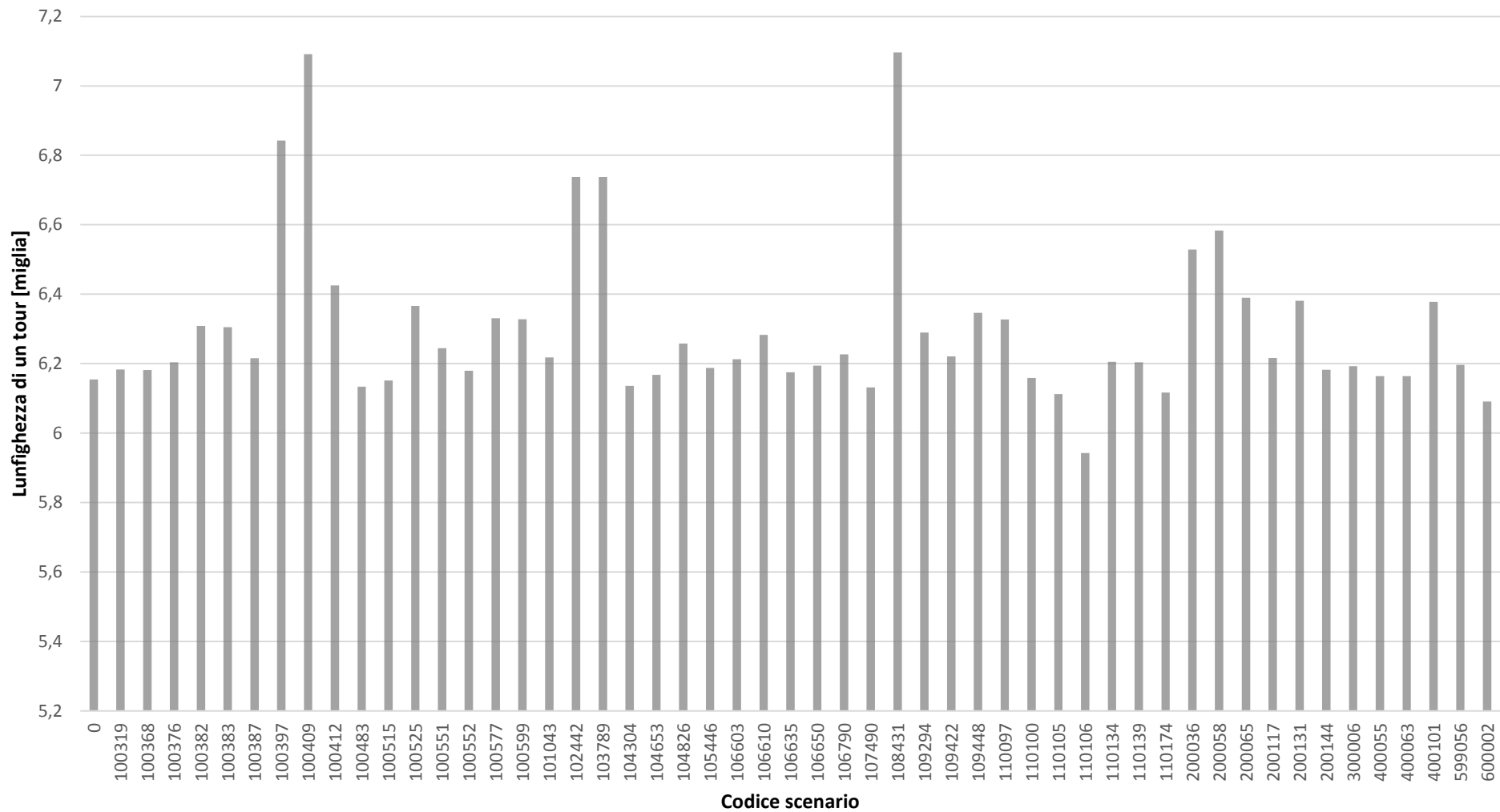


Grafico 3-37: lunghezza media di un tour per i vari scenari

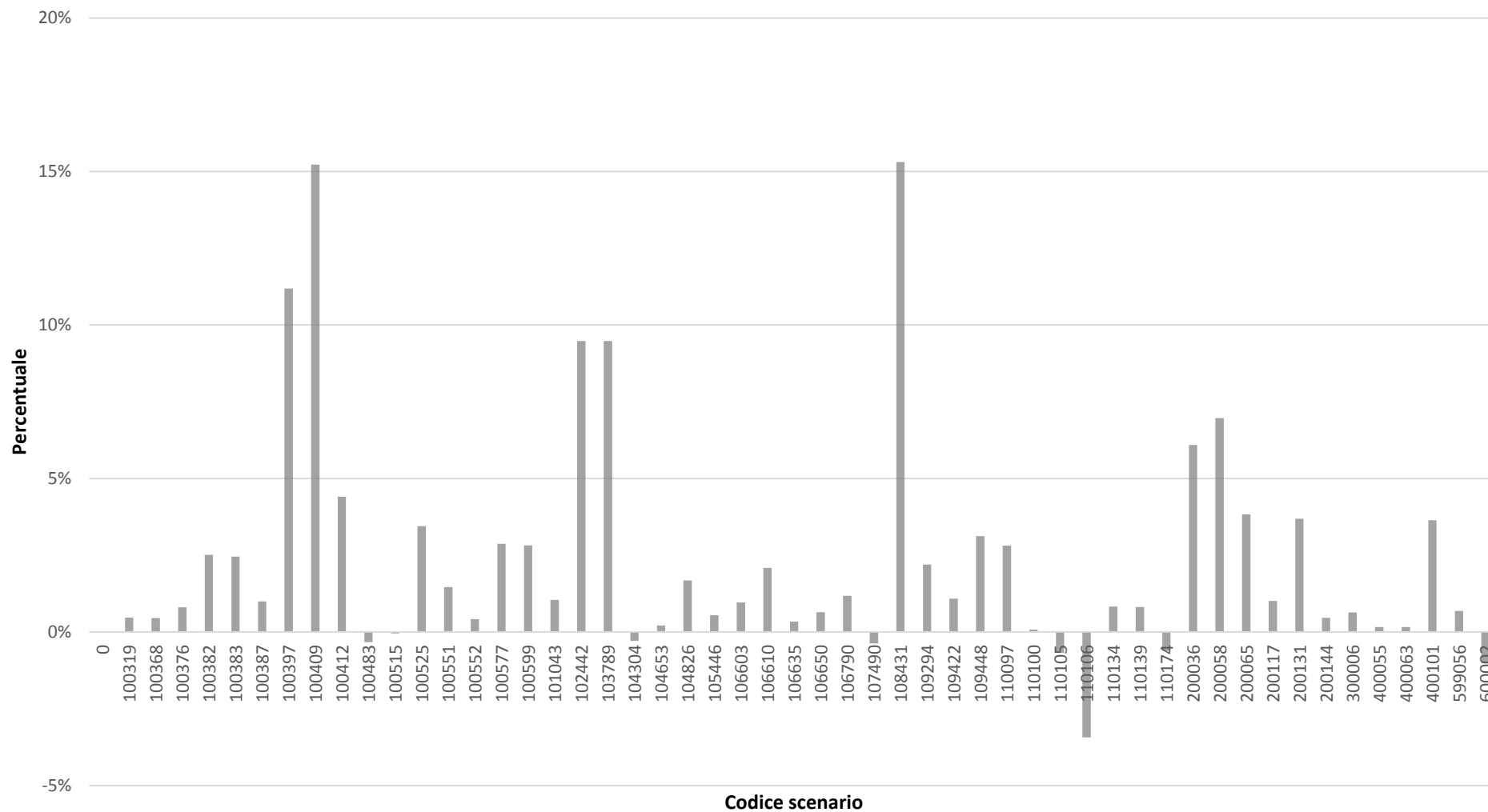


Grafico 3-38: variazione percentuale della lunghezza media di un tour rispetto allo scenario iniziale

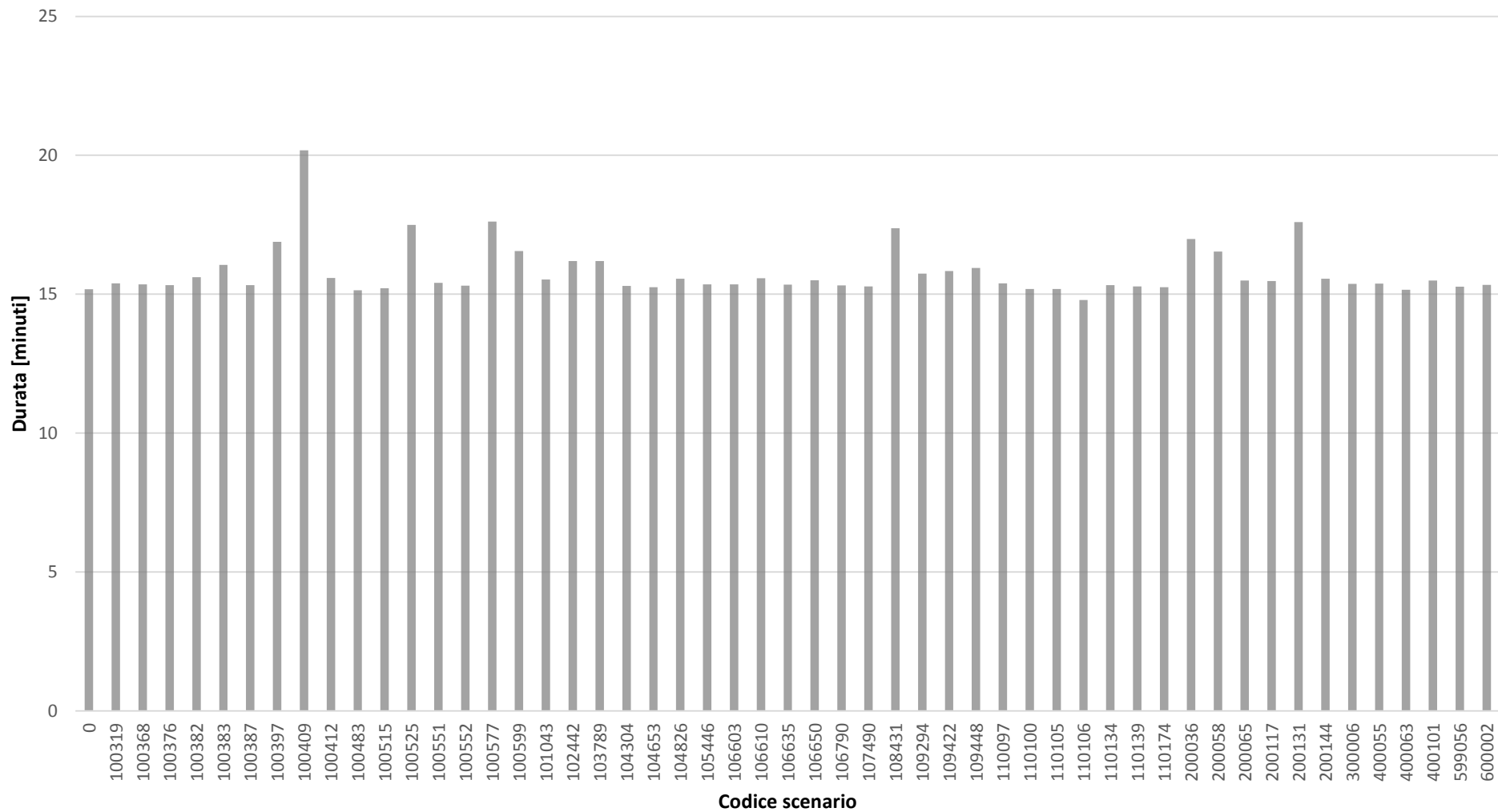


Grafico 3-39: durata media di un tour per i vari scenari

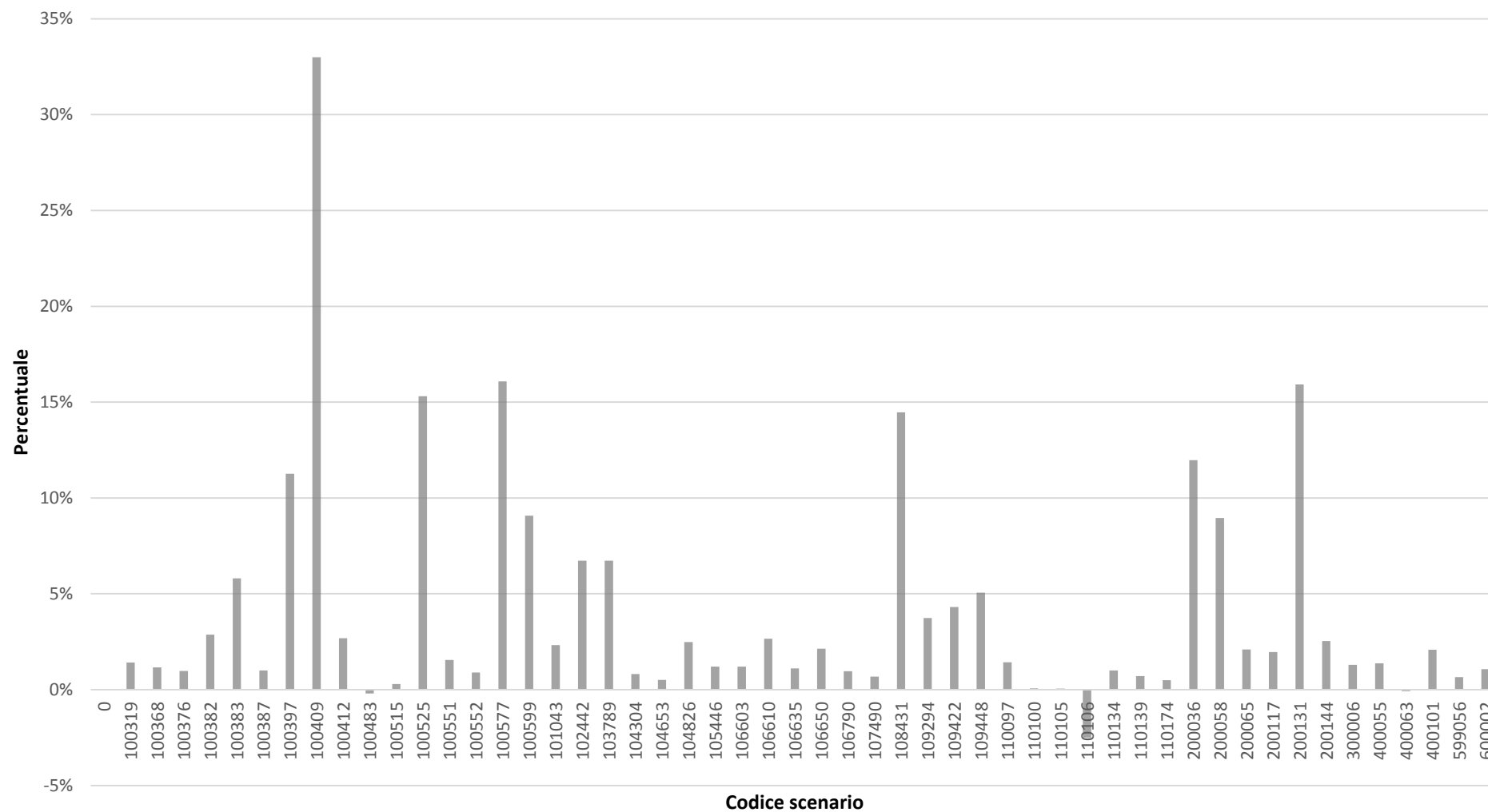


Grafico 3-40: variazione percentuale della durata media di un tour rispetto allo scenario iniziale

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

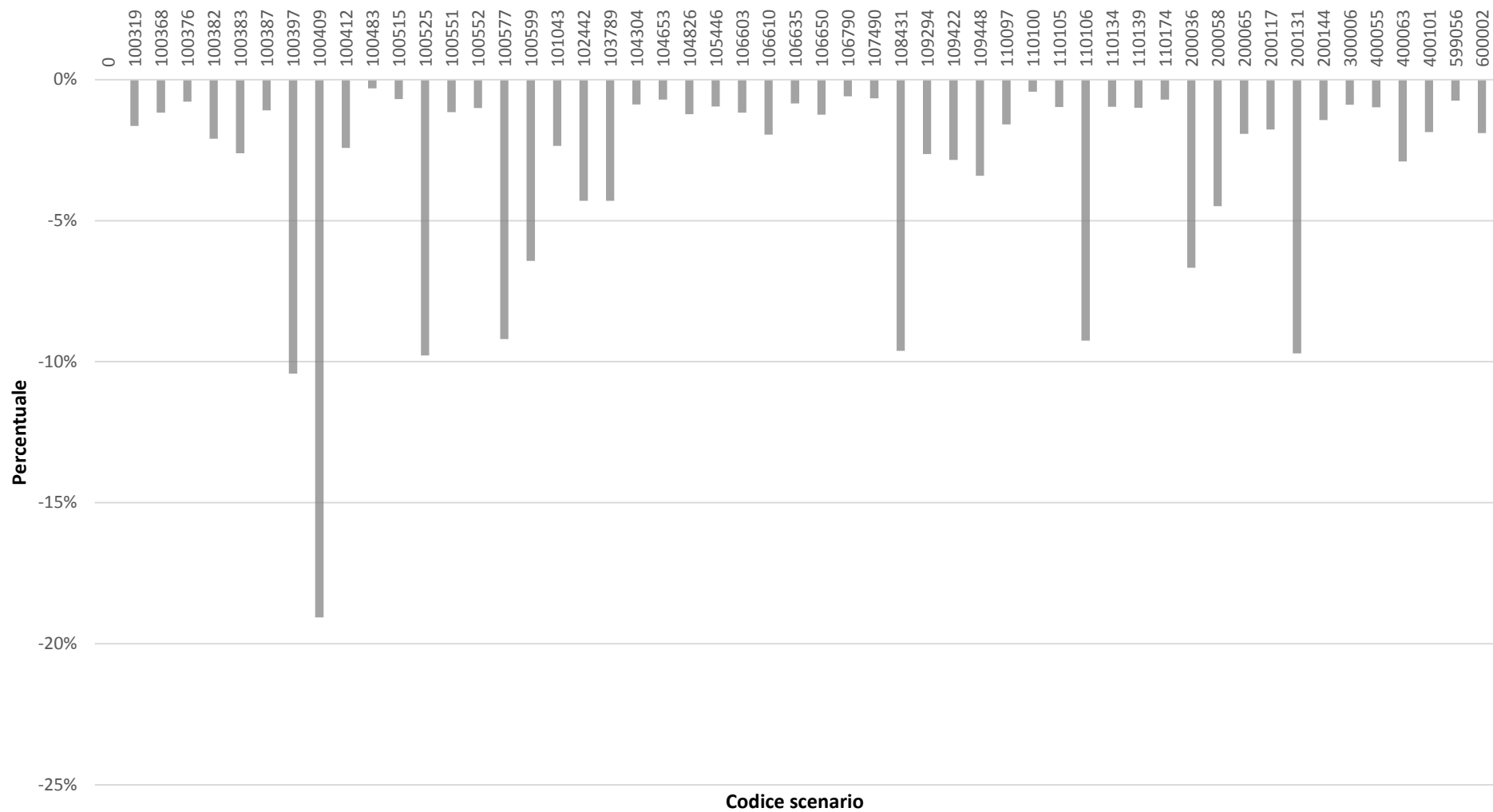


Grafico 3-41: variazione percentuale dell'accessibilità media per persona rispetto allo scenario iniziale

Nel caso di rimozione di alcuni archi si osserva, non solo una redistribuzione spaziale della domanda, ma anche una variazione del periodo in cui gli spostamenti sono effettuati. In particolare per gli scenari 100409, 200131 e 100577 si ha, rispetto allo scenario iniziale, una diminuzione degli spostamenti effettuati nelle punte della mattina e della sera ed un conseguente aumento di quelli nei due periodi di morbida (Grafico 3-42 e Grafico 3-43).

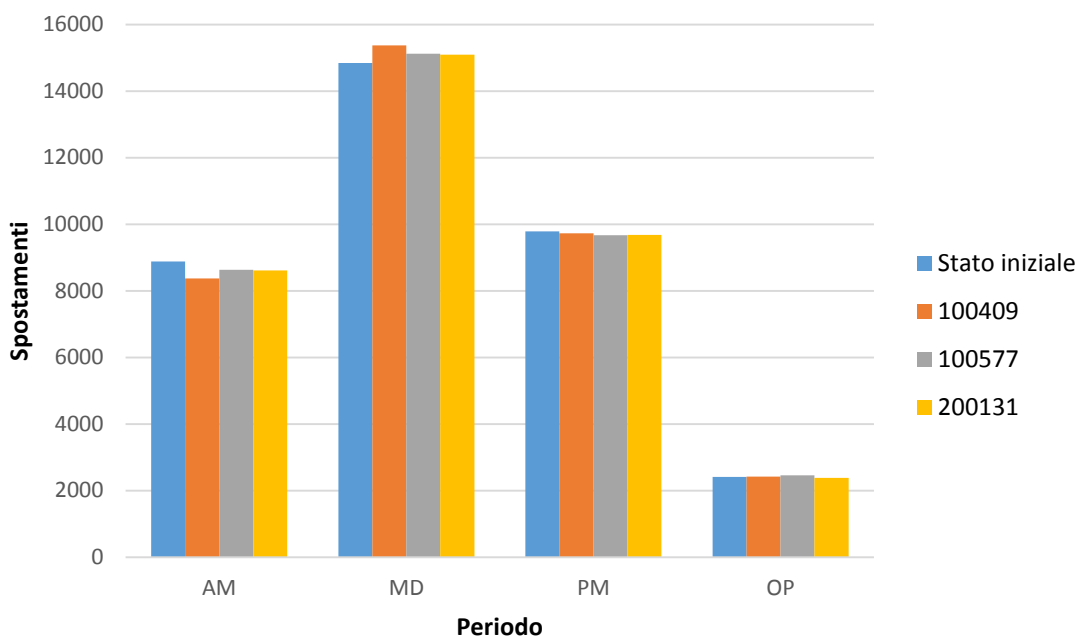


Grafico 3-42: numero di spostamenti in auto per periodo e per quattro scenari compreso quello iniziale

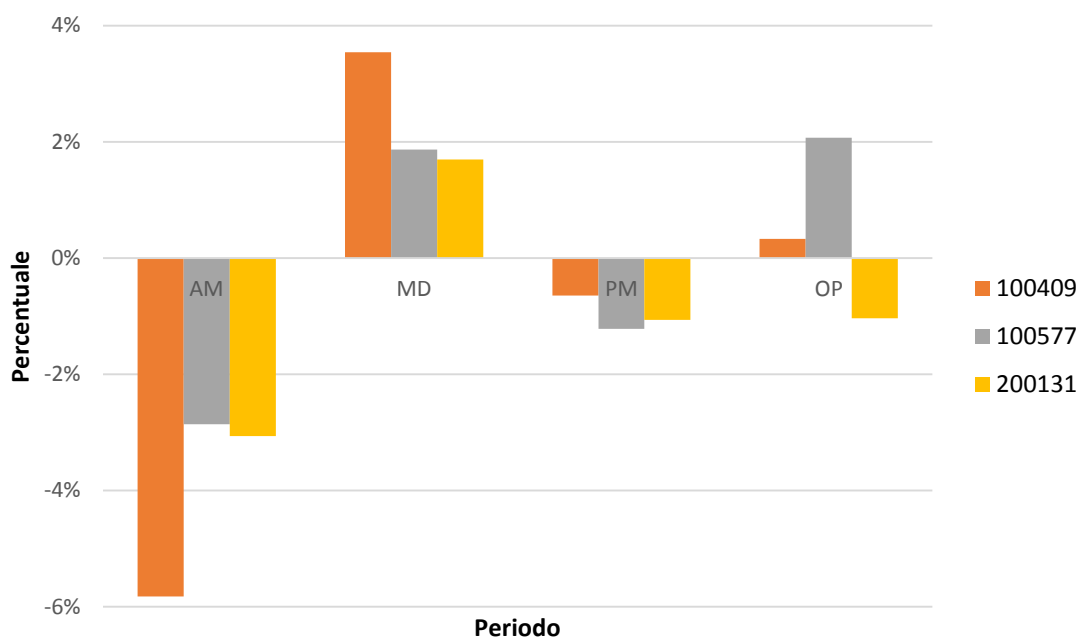


Grafico 3-43: variazione percentuale del numero di spostamenti in auto per periodo e per tre scenari rispetto a quello iniziale

3.6.2.3 Analisi della Rete

In questa sezione si analizzano gli effetti più rilevanti osservati in rete, in termini di distribuzione dei flussi, per gli scenari di danno più significativi.

Per lo scenario privo dell'arco 100409 (Ponte del Vaso), nel periodo di punta della mattina si nota che gli utenti che provengono da Sambruson e che vanno verso nord, non potendo più passare per il centro di Dolo, sono costretti a deviare lungo Via Badoera provocando un considerevole aumento del livello di congestione rispetto allo scenario iniziale (Figura 3-31). La Strada Regionale n.11 tra Via Zinelli e Via Badoera risulta essere fortemente congestionata in entrambe le direzioni, con aggravii anche sulla viabilità secondaria, come Via Fratelli Bandiera e Via Meloni (Figura 3-32). Nel periodo di punta della sera si ha un peggioramento delle condizioni simile a quello riferito alla punta del mattino (Figura 3-33); in aggiunta, rispetto allo scenario iniziale, si osserva un aumento del livello di congestione lungo Via Vittorio Veneto (Figura 3-34). In entrambi i periodi il flusso sull'arco 100525 risulta considerevolmente elevato. Nei due periodi di morbida (MD e OP) si ha una generale diminuzione dei flussi di percorrenza, con lo stesso tipo di deviazioni di percorso (Figura 3-35 e Figura 3-36).

Nel caso di rimozione dell'arco 200131 (S.R.11 in corrispondenza di Via Badoera) si nota (Figura 3-37) che, nel periodo AM, il livello di congestione cresce notevolmente per Via Mazzini, Via Garibaldi, Via Zinelli e Via del Vaso, e diminuisce lungo la Regionale n.11 tra Via D. Zinelli e Via Badoera. Questo avviene poiché gli utenti che provengono da Venezia e che nello scenario iniziale utilizzavano la S.R.11, sono costretti a deviare attraverso Via Badoera e proseguire verso Padova attraversando il Vaso (Figura 3-38). Un comportamento analogo avviene anche in direzione opposta. Inoltre si osserva un aumento dei flussi lungo Via del Vaso e Via Seriola che, nello scenario iniziale, era scarsamente utilizzata. Nelle ore di punta della sera si riscontrano problematiche analoghe (Figura 3-39).

Per lo scenario di rete privata del link 100525 (Via Badoera) (Figura 3-40), nel periodo AM si nota un livello di congestione superiore a quello inizialmente osservato sulla Strada Regionale n.11, Via Garibaldi e Via Zinelli (Figura 3-42). Come atteso, il flusso su Via Badoera è molto inferiore rispetto allo scenario iniziale (Figura 3-41). Nel periodo di punta della sera (Figura 3-43) si osserva invece un incremento dei flussi lungo direzioni differenti dal periodo AM: Via Zinelli ha un livello di congestione elevato verso Sud e si osserva un aumento importante dei flussi sulla direttrice Est-Ovest, lungo Via Ca' Tron Via Matteotti e su Via Vittorio Veneto (Figura 3-44), come riscontrato per lo scenario 100409.

Dall'analisi dello scenario 100383 (Via Matteotti) (Figura 3-45) per il periodo di punta della mattina si osserva un peggioramento del livello di congestione su Via Garibaldi, giustificato dal fatto che gli utenti che da Via del Vaso desiderano proseguire verso Padova sono costretti ad utilizzare tale strada. Invece coloro che provengono da Via G.Mazzini, Via Arino e Via Cairoli in direzione Venezia devono percorrere Via Vittorio Veneto, incrementandone notevolmente il livello di congestione (Figura 3-46 e Figura 3-47).

Nel caso di rimozione del cut-link 110106 si osserva (Figura 3-48 e Figura 3-49), nel periodo AM, una generale riduzione dei flussi rispetto allo scenario iniziale (con un rapporto flusso su capacità massimo di circa lo 0.83). Come indicato in precedenza questo causa una diminuzione considerevole del costo totale di rete. Risulta evidente che l'analisi dei soli flussogrammi non può essere utilizzata per la valutazione della vulnerabilità degli archi; infatti in questo caso, senza un'analisi congiunta della variazione della domanda, una diminuzione generale dei costi della rete può portare a concludere che il cut-link non sia rilevante.

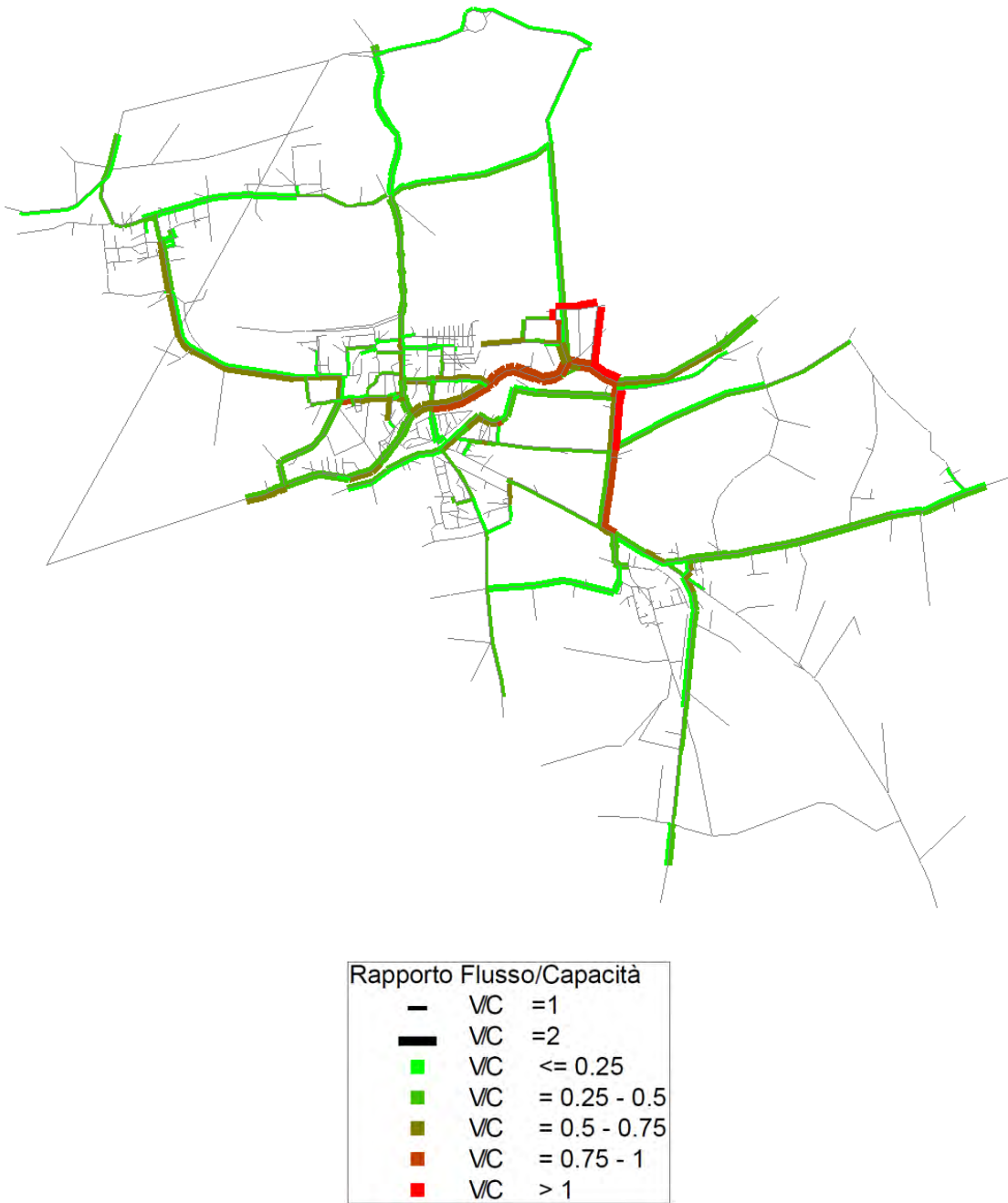


Figura 3-31: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100409

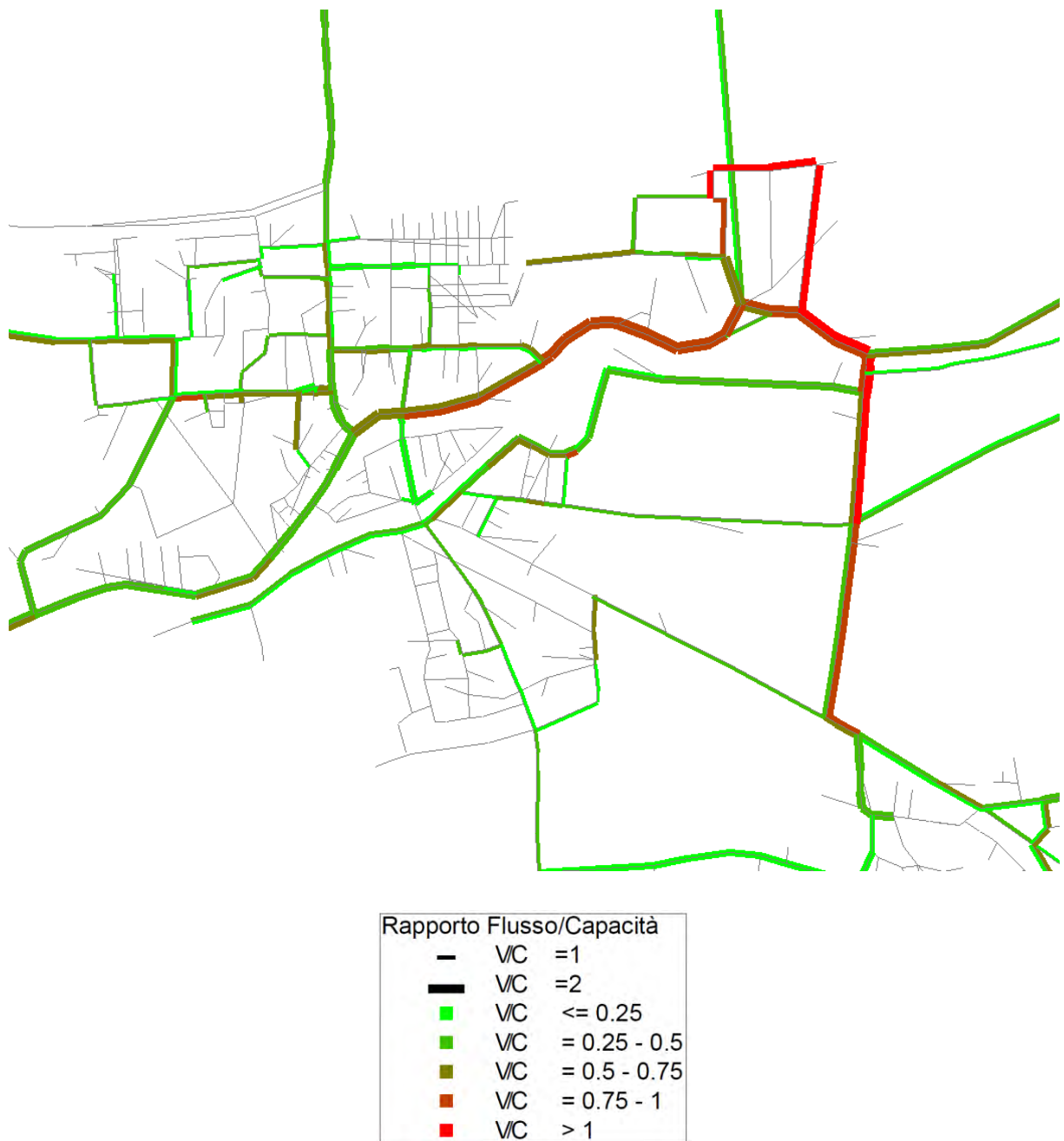


Figura 3-32: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100409 – particolare del centro di Dolo

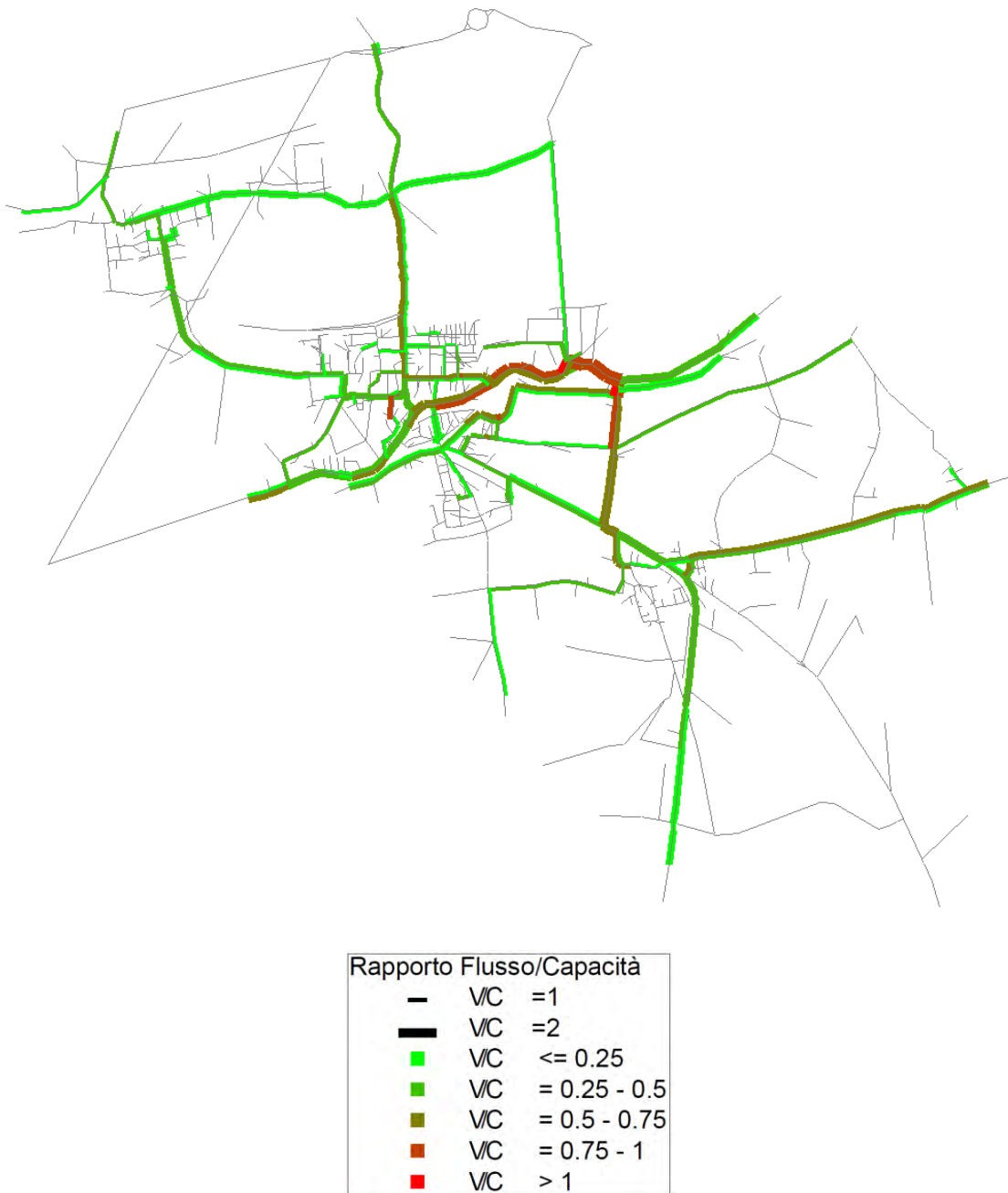


Figura 3-33: flussogramma per il periodo di punta della sera relativo alla rete privata dell'arco 100409

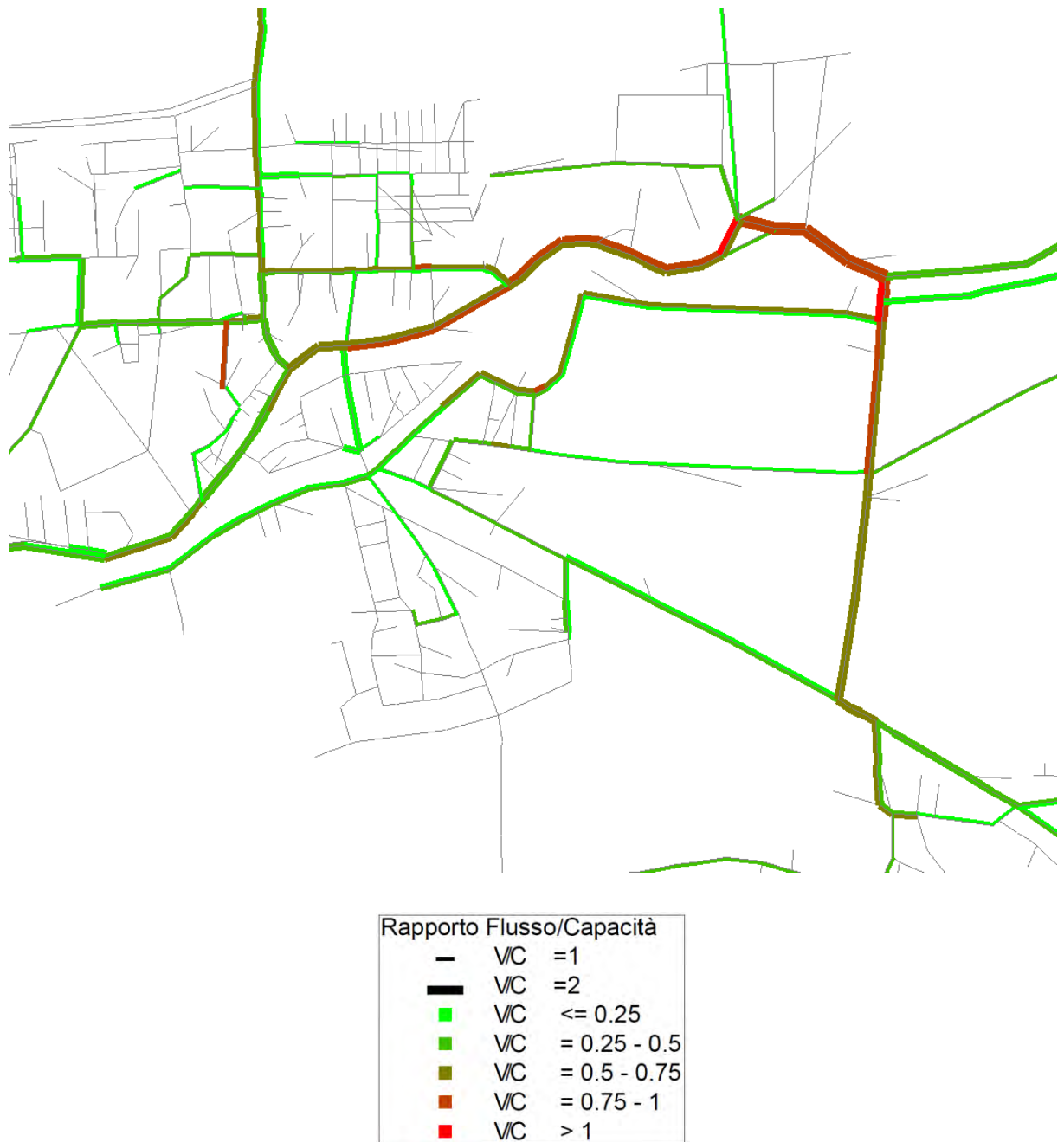


Figura 3-34: flussogramma per il periodo di punta della sera relativo alla rete privata dell'arco 100409 – particolare del centro di Dolo

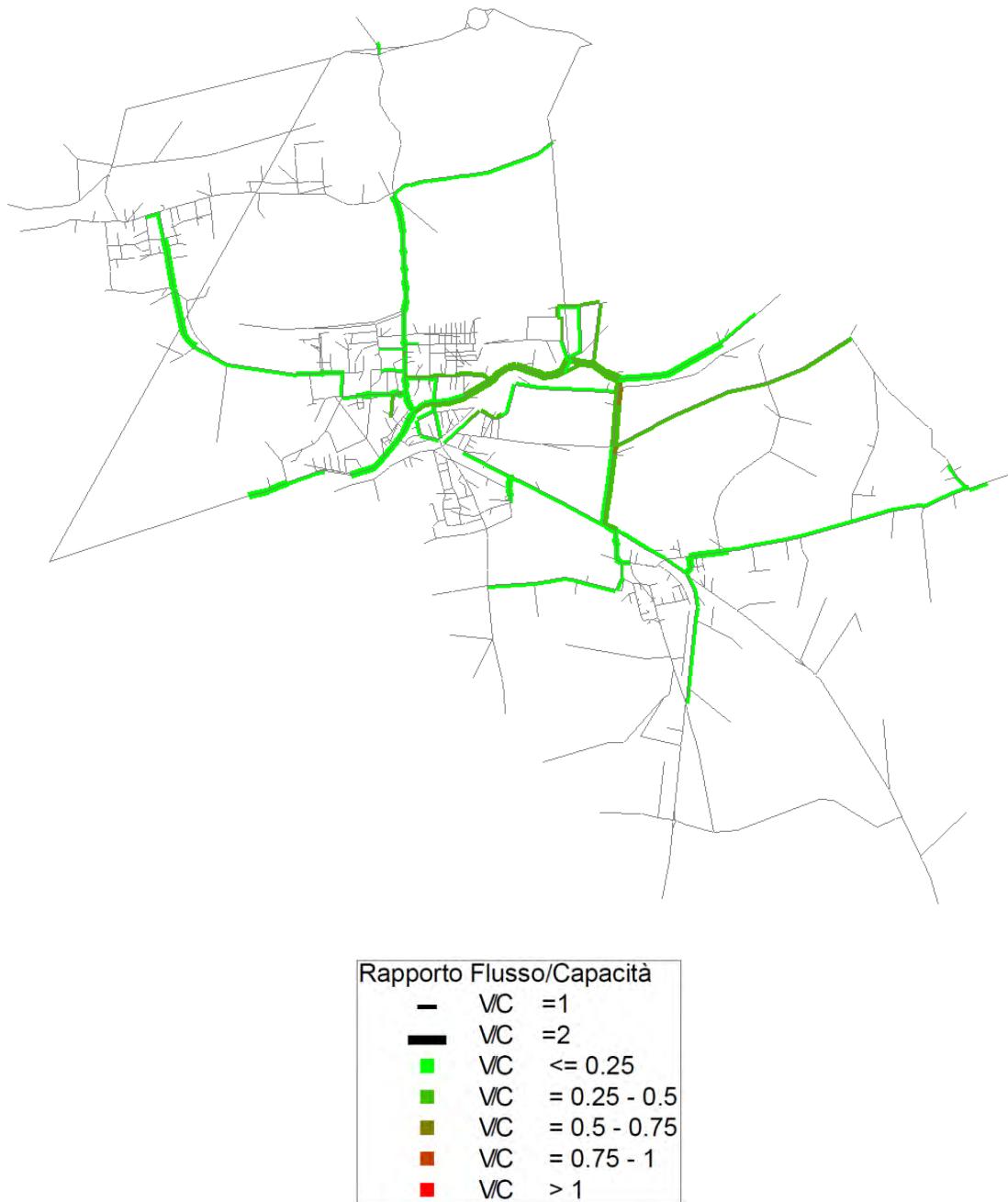


Figura 3-35: flussogramma per il periodo MD relativo alla rete privata dell'arco 100409

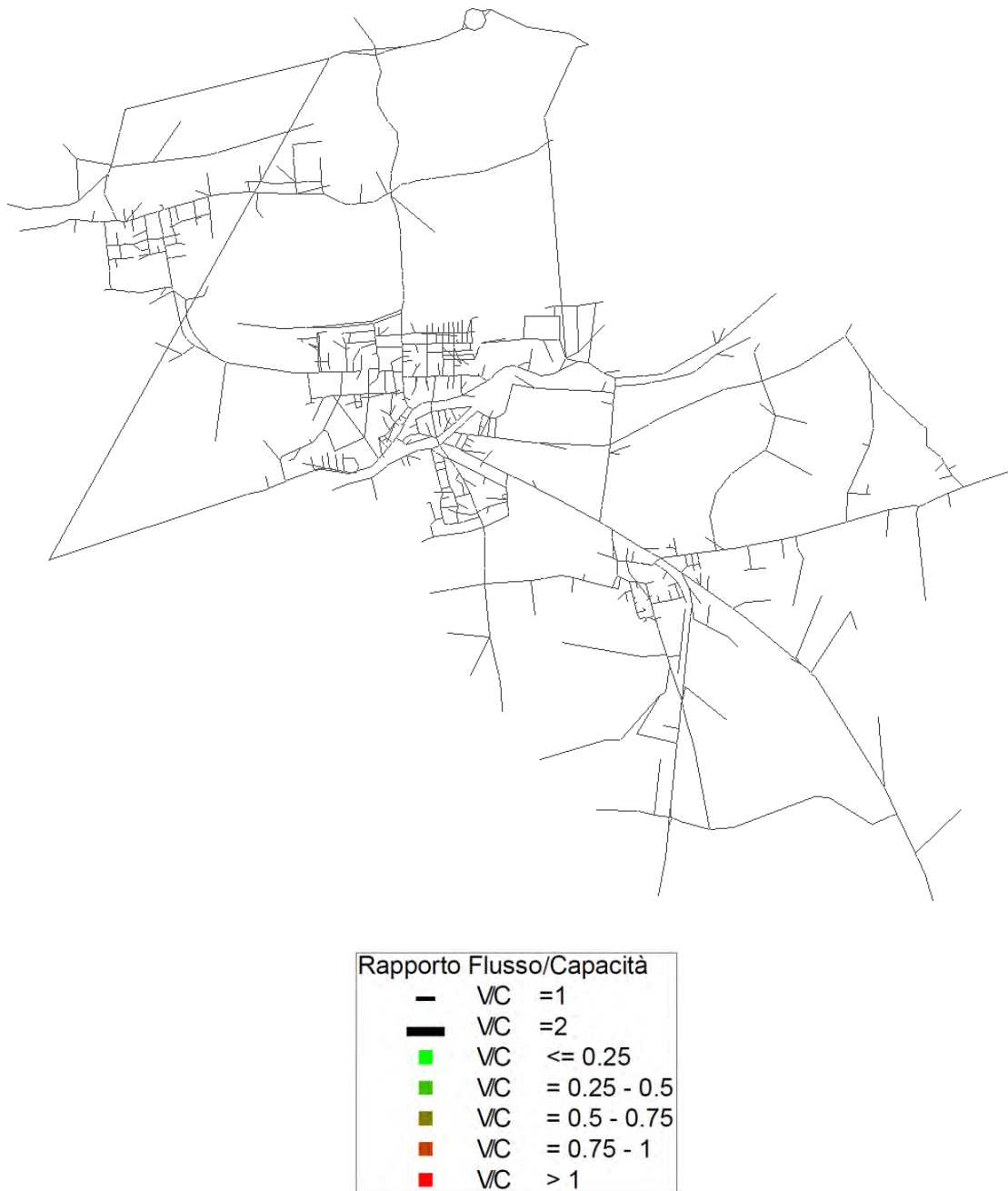


Figura 3-36: flussogramma per il periodo OP relativo alla rete privata dell'arco 100409

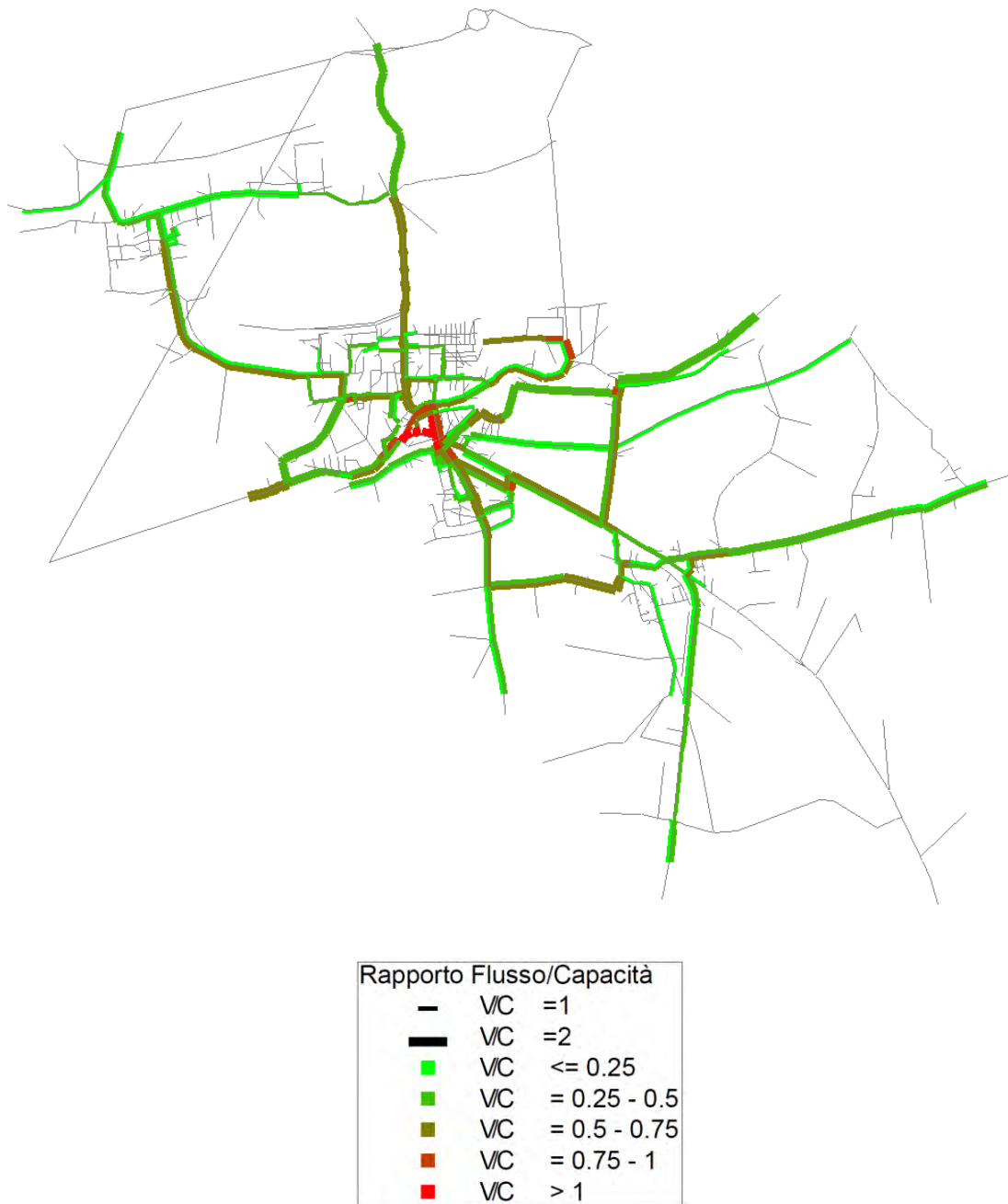


Figura 3-37: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 200131

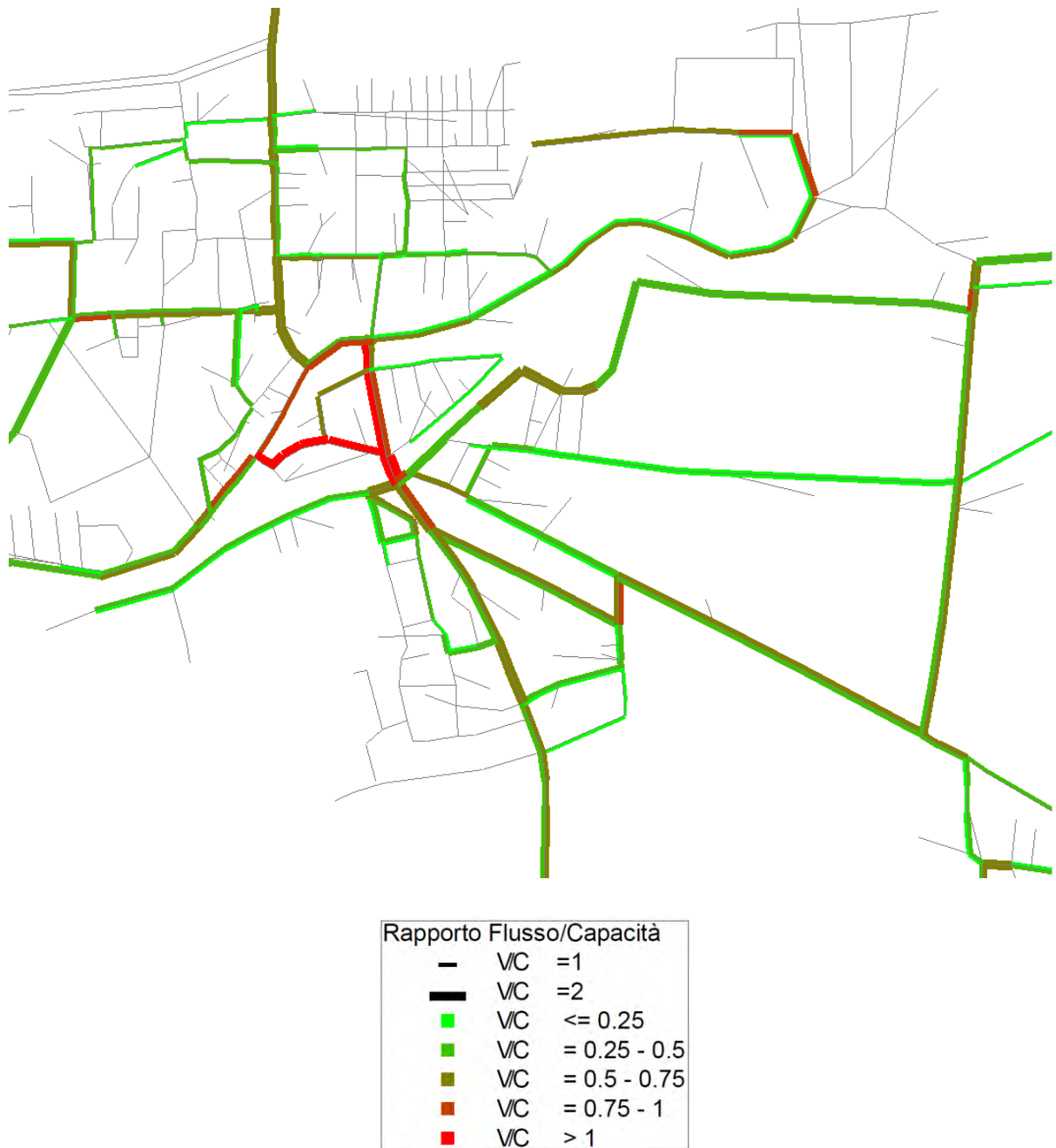


Figura 3-38: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 200131 – particolare del centro di Dolo

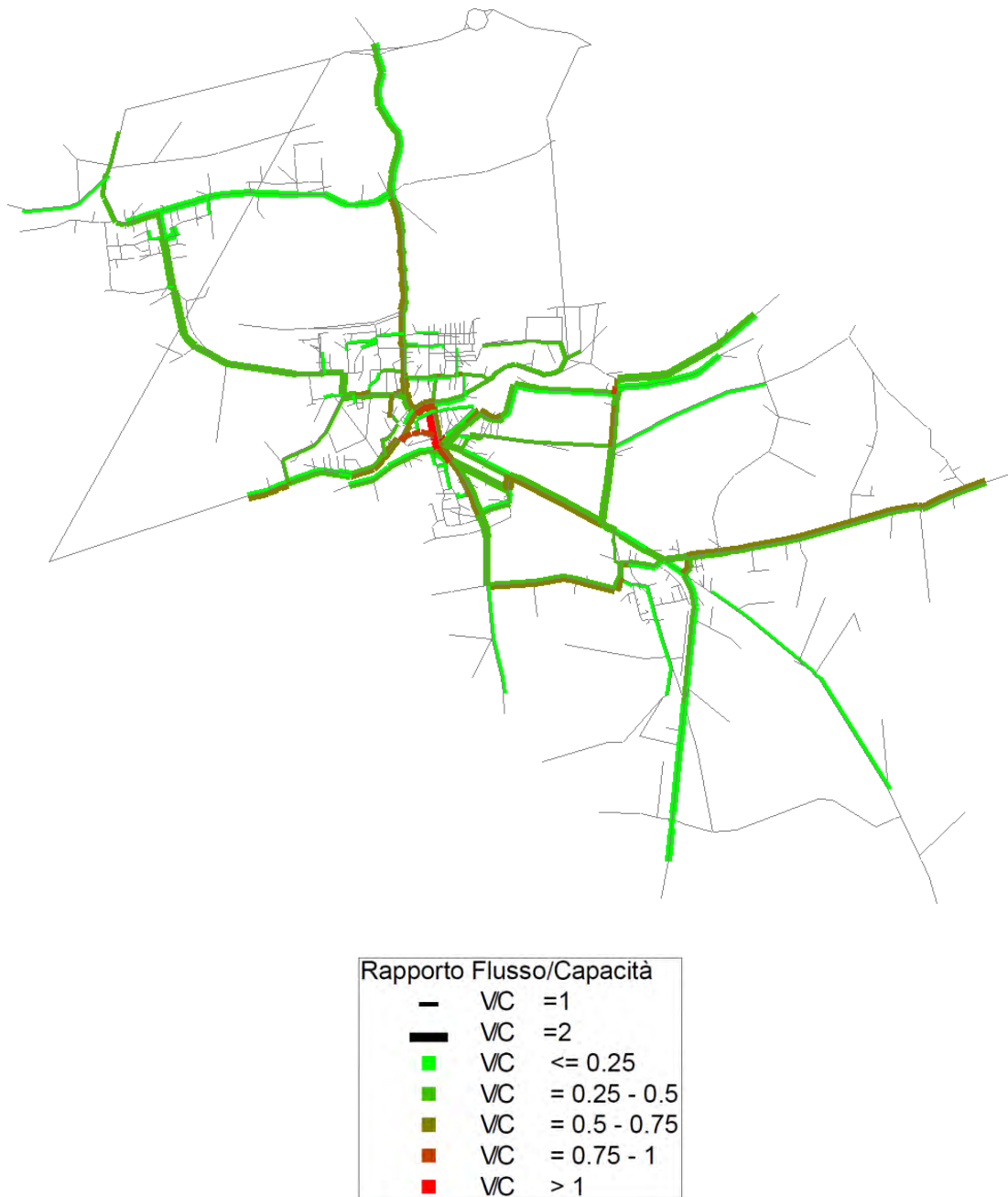


Figura 3-39: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 200131

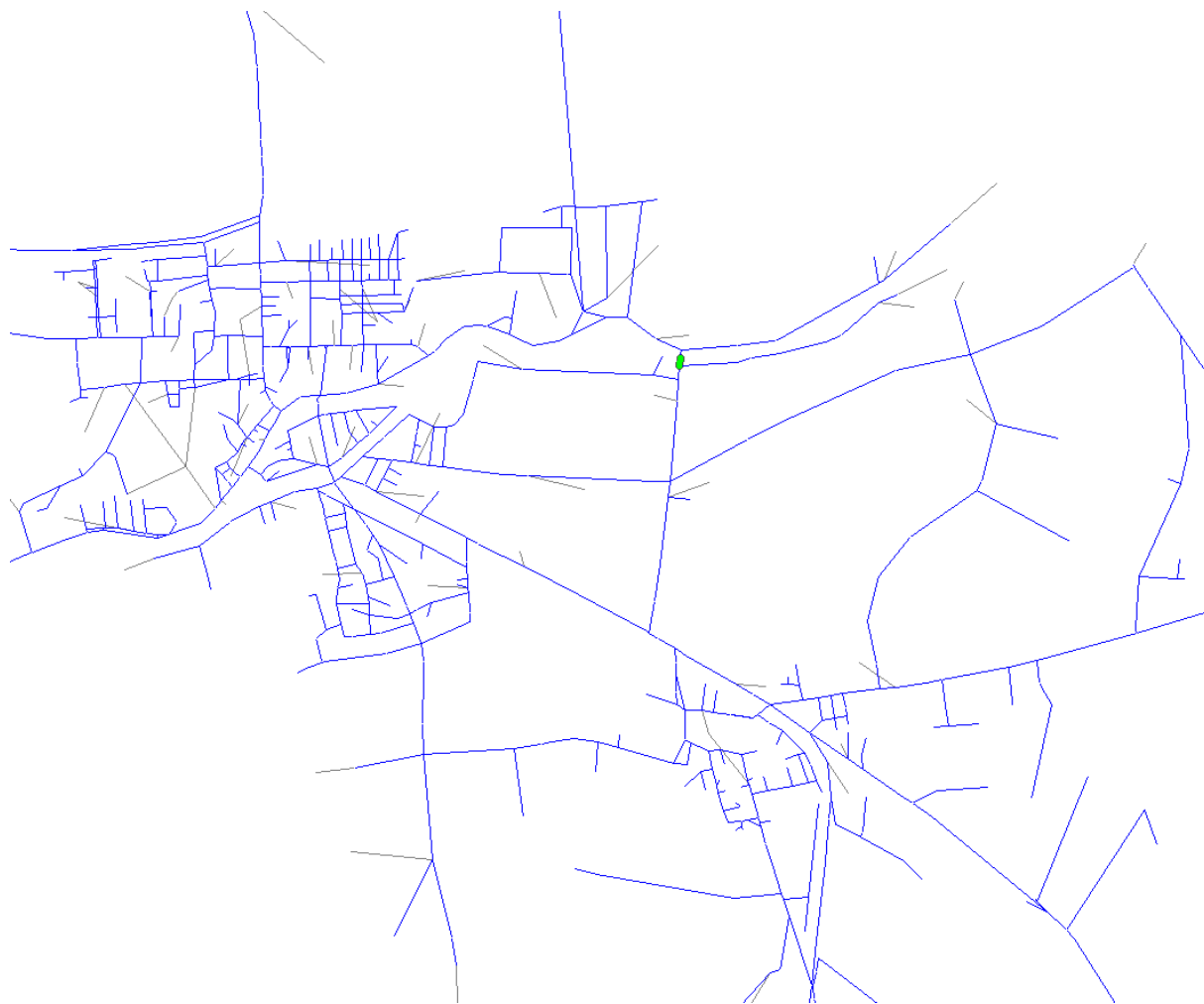


Figura 3-40: ubicazione del link 100525

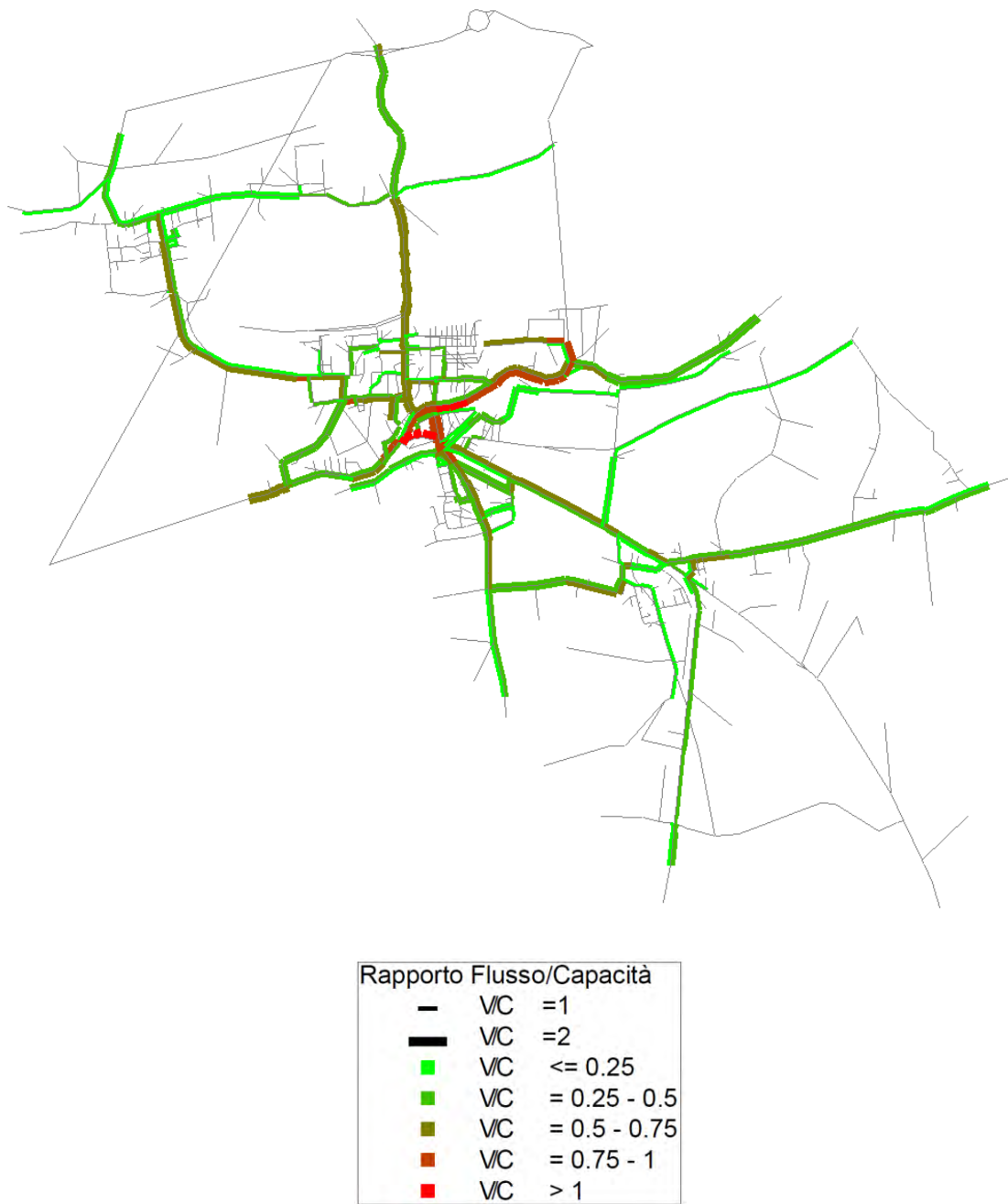


Figura 3-41: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100525

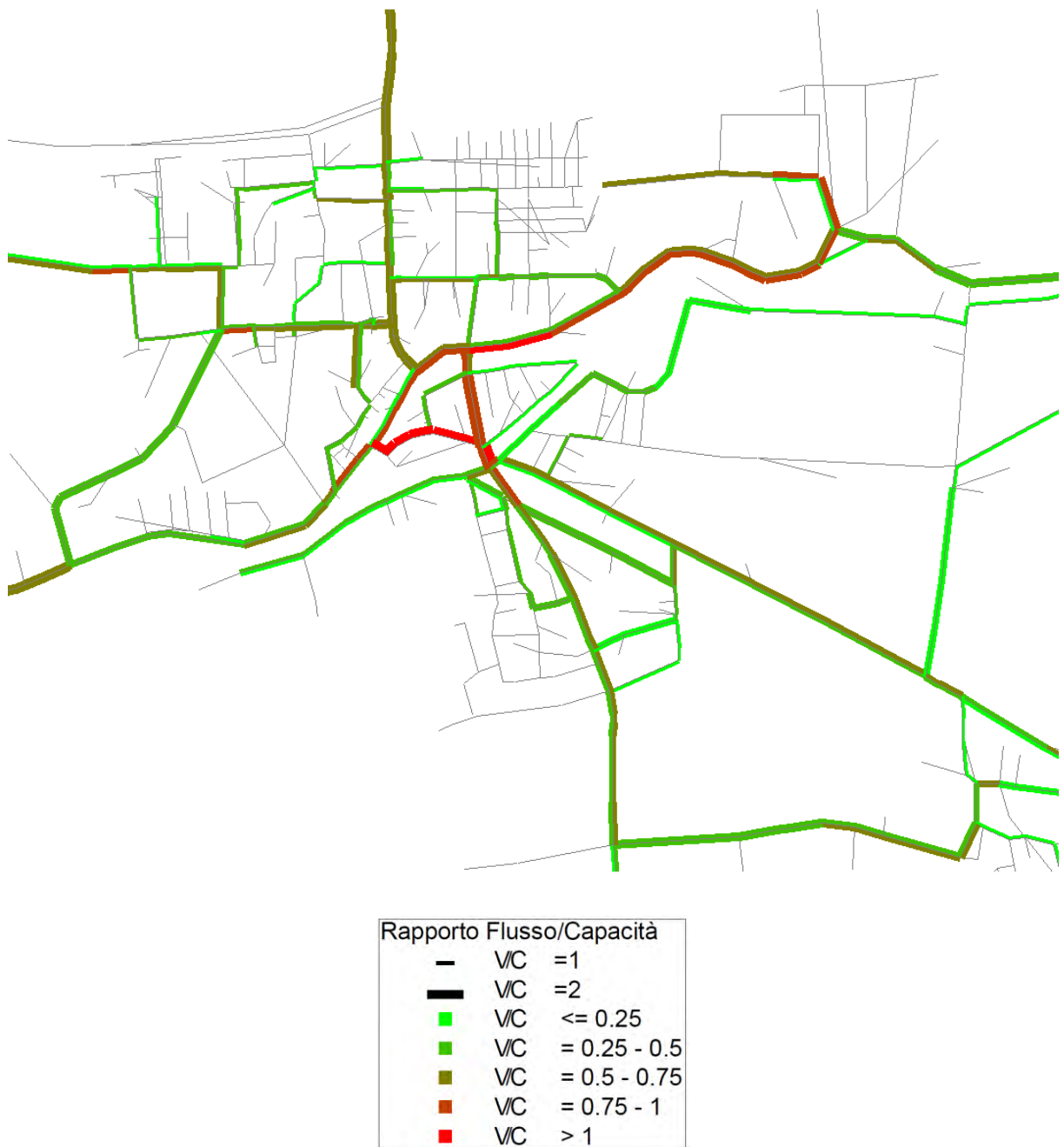


Figura 3-42: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100525 – particolare del centro di Dolo

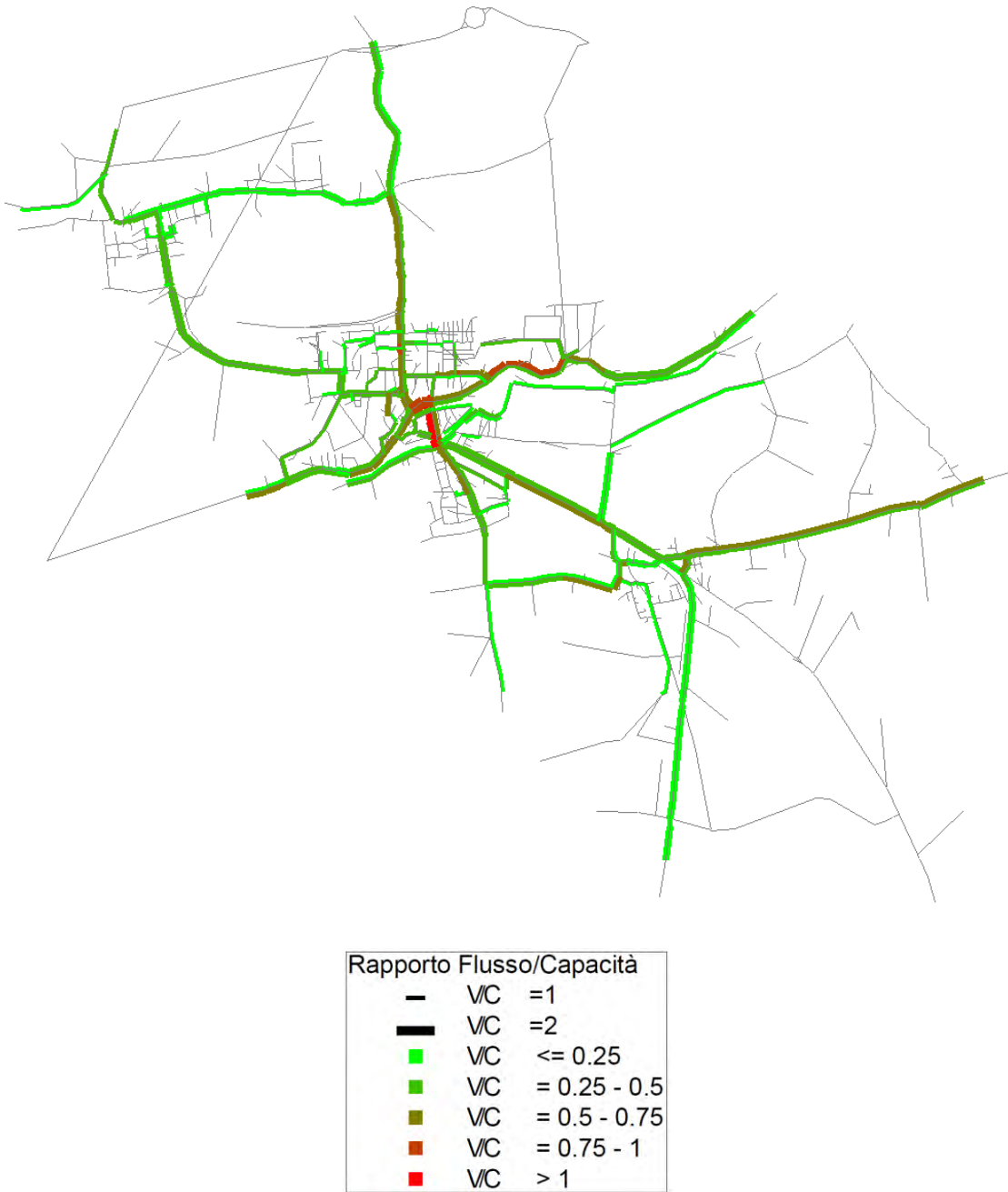


Figura 3-43: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 100525

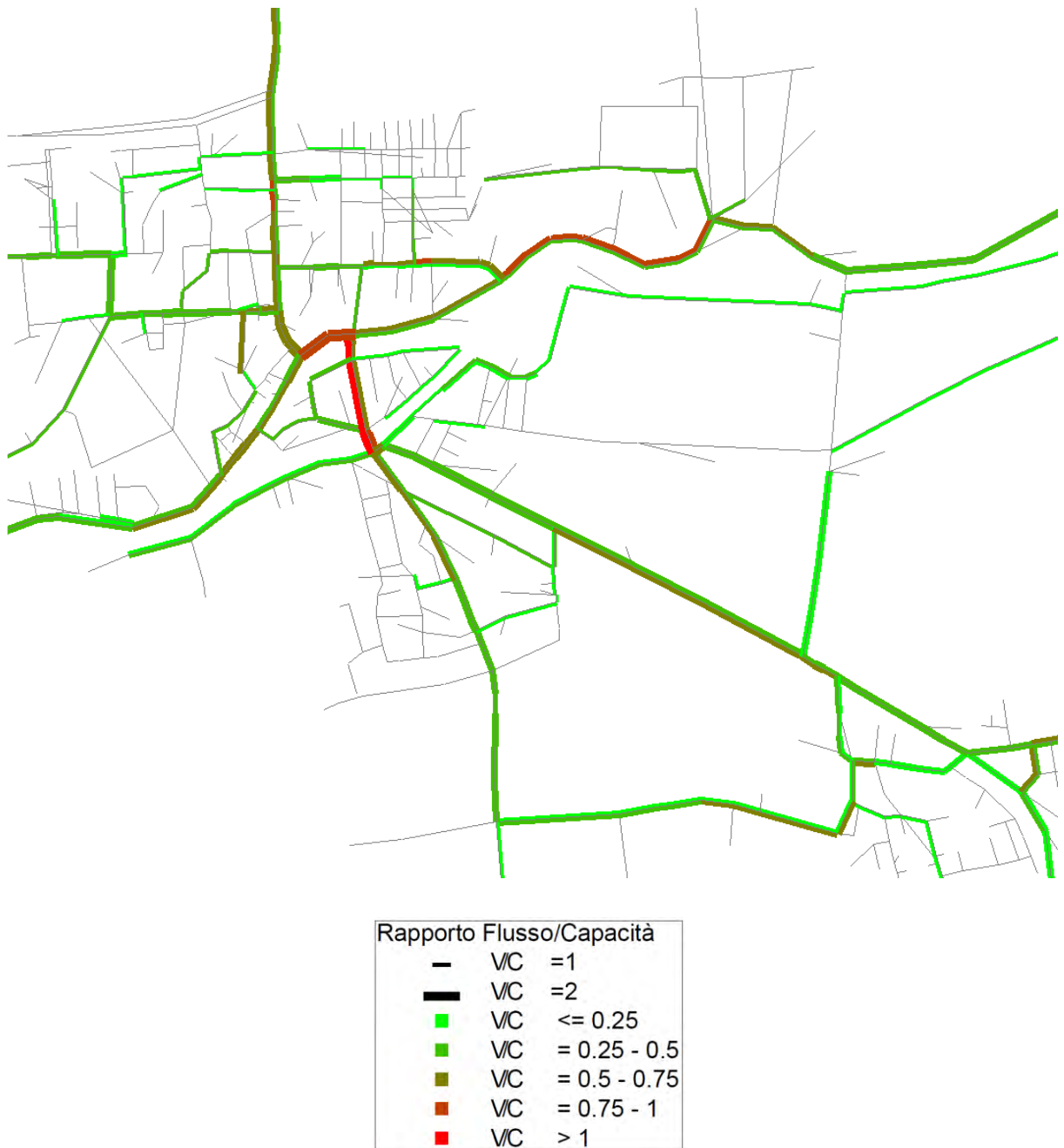


Figura 3-44: flussogramma per il periodo PM relativo alla rete privata dell'arco 100525 – particolare del centro di Dolo

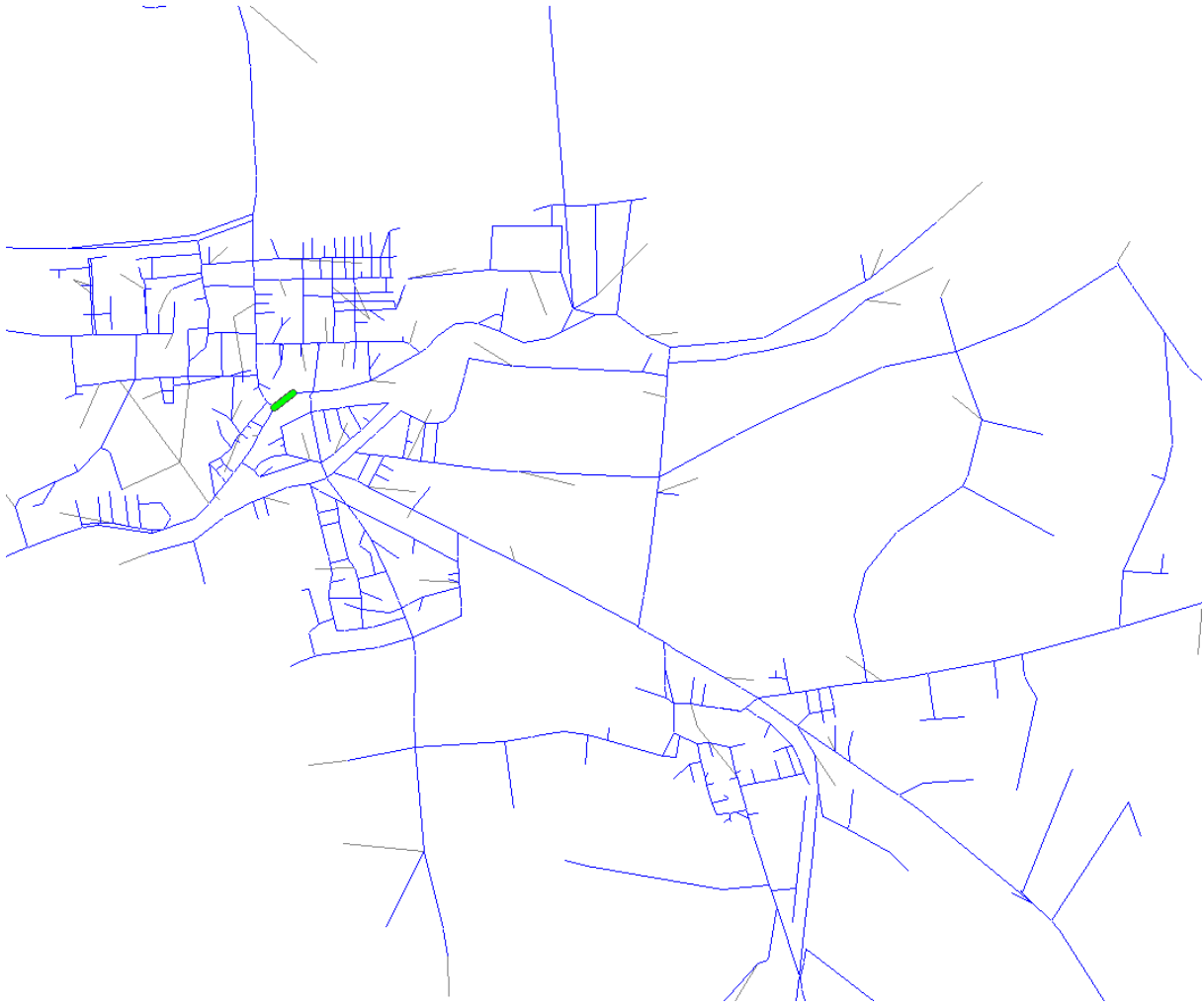


Figura 3-45: ubicazione dell'arco 100383

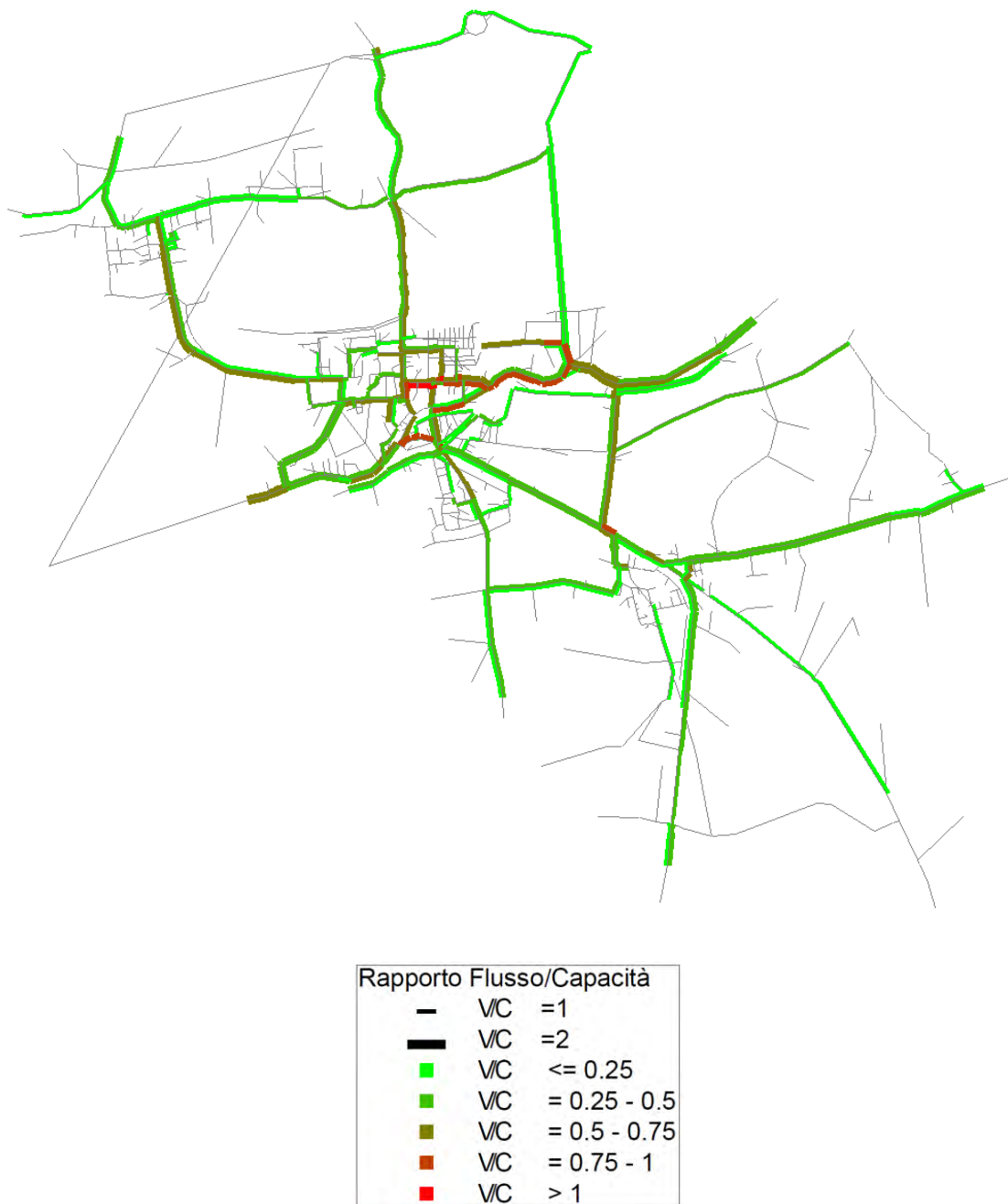


Figura 3-46: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100383

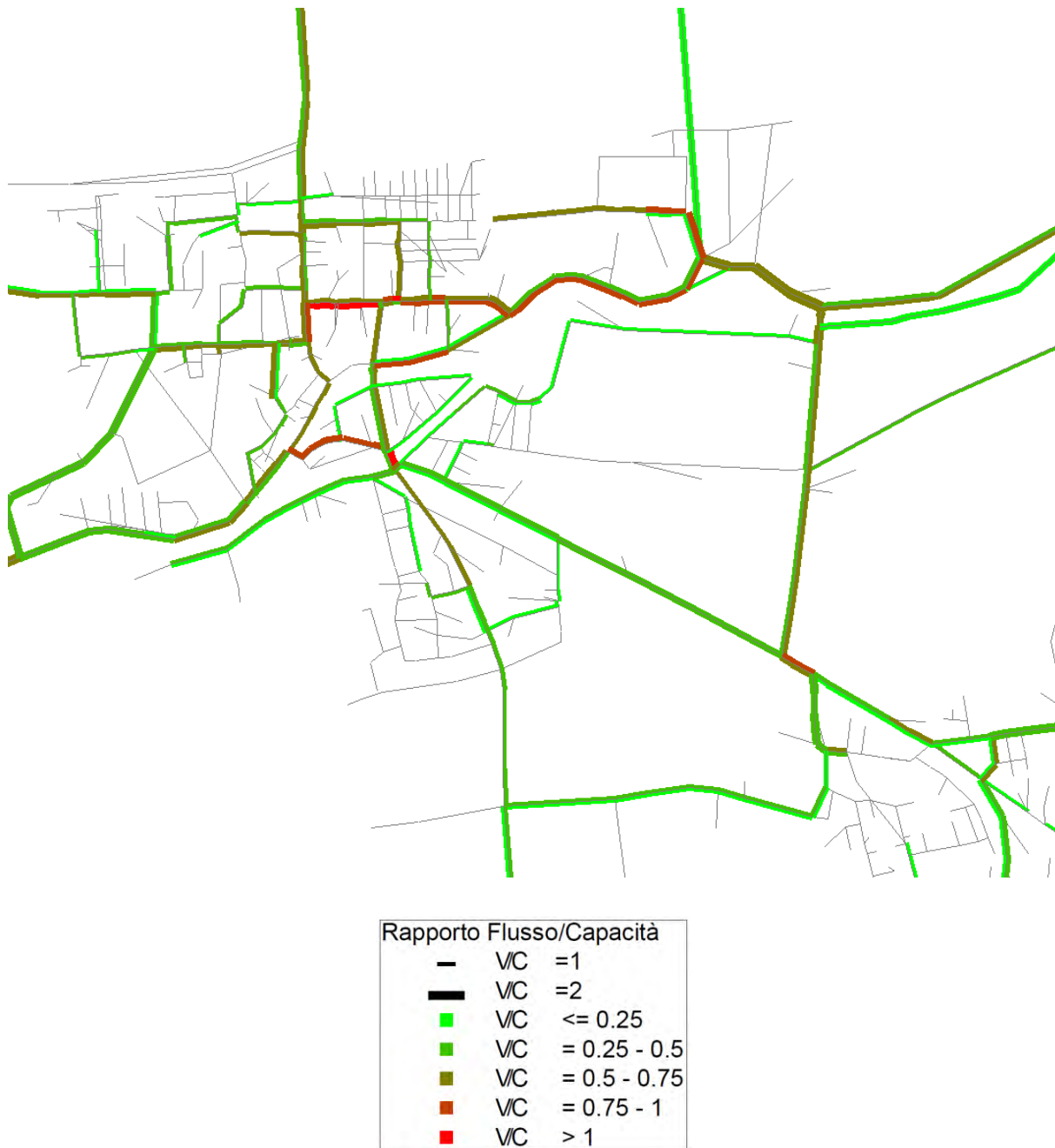


Figura 3-47: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata dell'arco 100383 – particolare del centro di Dolo

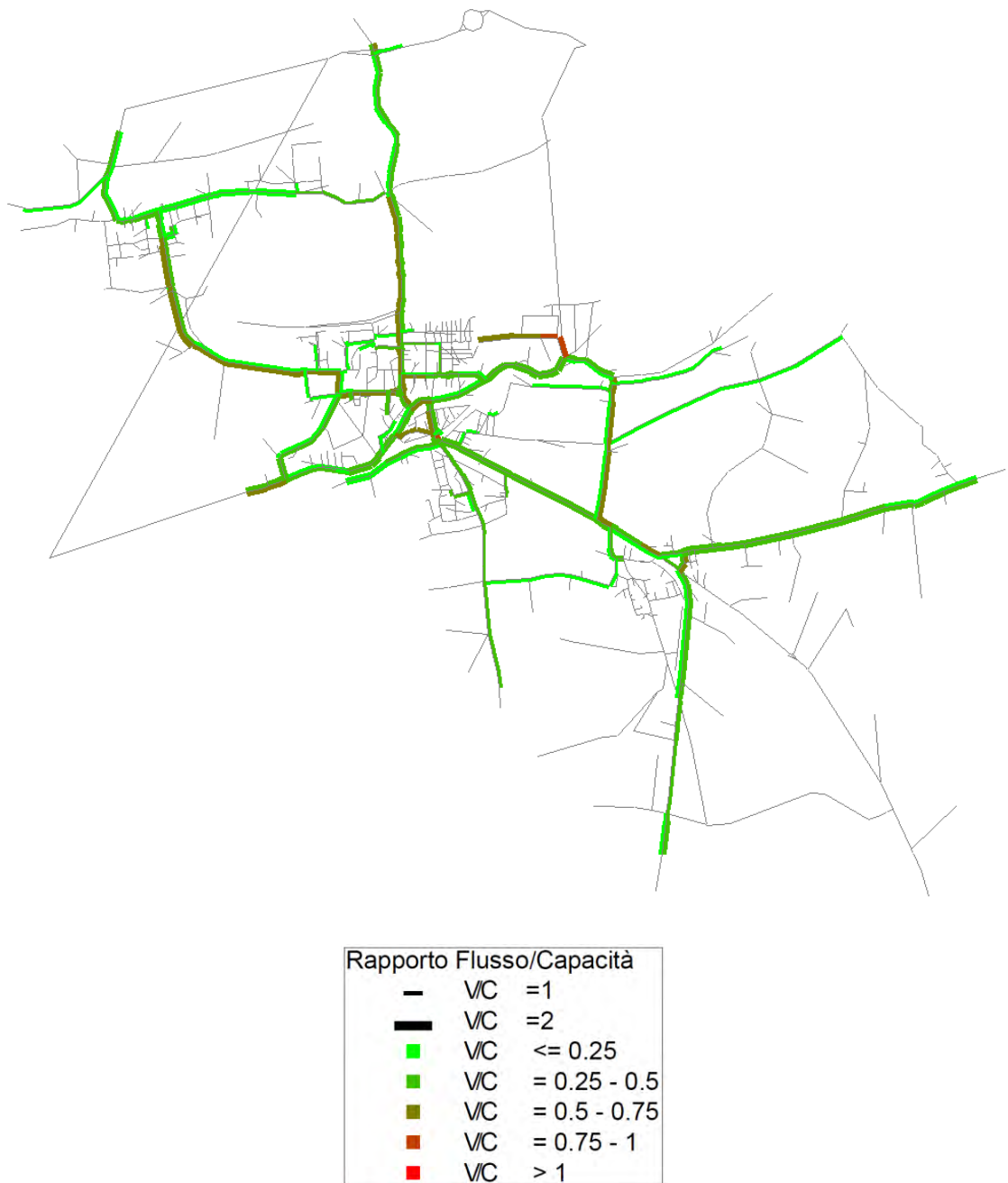


Figura 3-48: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata del cut-link 110106

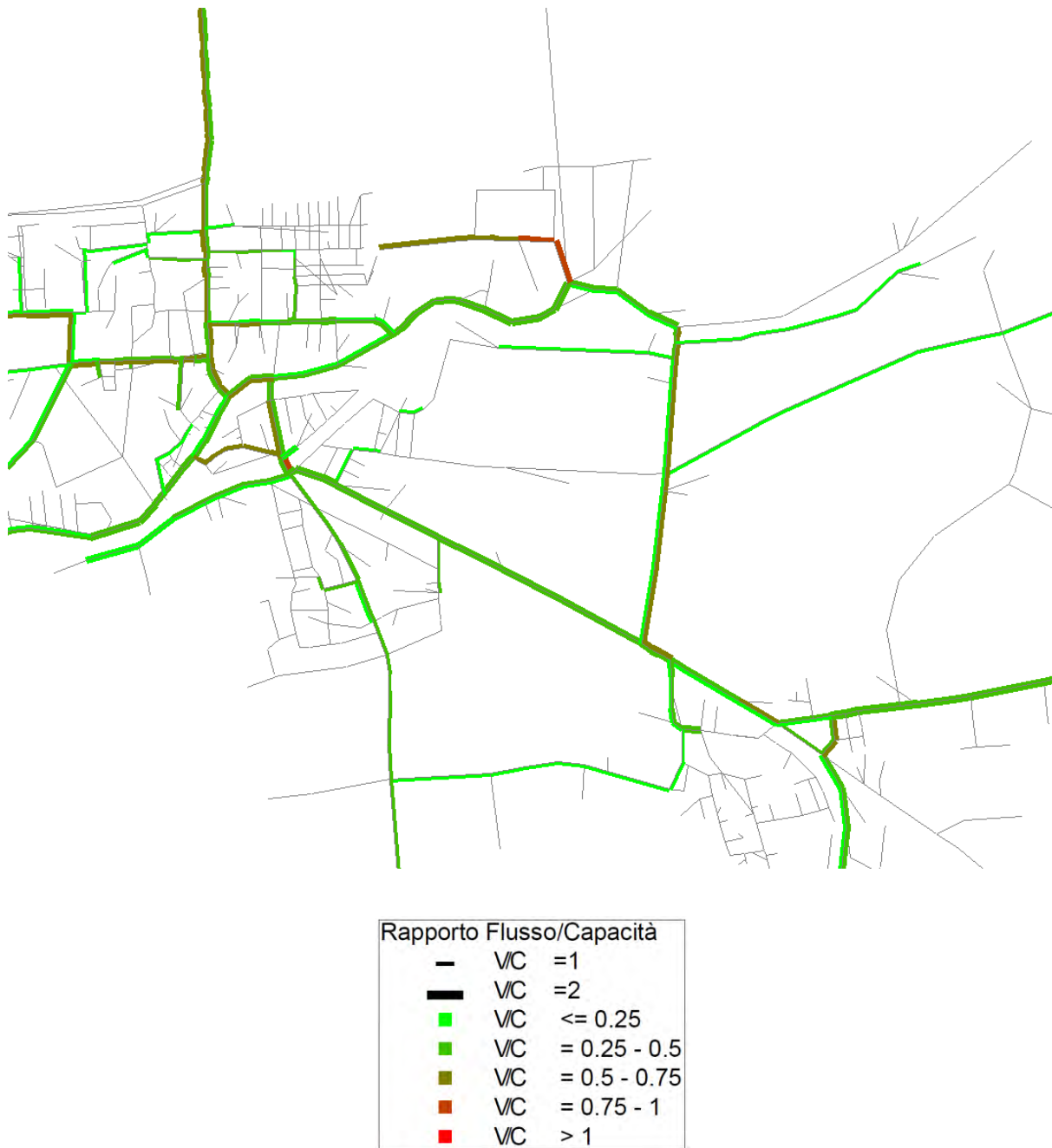


Figura 3-49: flussogramma per il periodo AM relativo alla rete privata del cut-link 110106 – particolare del centro di Dolo

3.6.3 Scenari di Danno – Modello a Domanda Fissa

In questo capitolo si descrivono i risultati ottenuti dall'applicazione del modello a domanda fissa agli scenari di rete privata di un arco. Come indicato in precedenza, la domanda che si carica in rete è derivata dalla sequenza di attività prodotte dal modello Activity-Based per lo scenario iniziale (rete non danneggiata). L'analisi è suddivisa in due parti: indicatori e stato della rete.

3.6.3.1 Analisi degli Indicatori

Nella presente sezione si analizzano i risultati in termini di indicatori di vulnerabilità. A differenza del modello a domanda variabile, sono stati valutati solamente il costo totale di rete, l'*Importance* e la *Link Importance*, poiché i restanti suppongono una variazione della domanda tra gli scenari. Anche in questo caso si suddivide l'analisi tra non cut-link e cut-link.

3.6.3.1.1 Non Cut-Link

Dall'analisi dei grafici seguenti (Grafico 3-44 e Grafico 3-45) si nota che tutti gli scenari sono caratterizzati da un aumento del costo totale di rete generalmente contenuto (circa l'8%), ma che diviene rilevante nel caso di rimozione degli archi 100409, 200131 e 10525. Il Grafico 3-46 fornisce lo stesso ordine di importanza dei link poiché la sua definizione è direttamente correlata al tempo totale speso in rete; questo legame si evidenzia anche dal valore prossimo a 1 del coefficiente di correlazione di Spearman riportato in Tabella 3-8.

	Importance	Costo totale di rete
Importance	1	0,999989
Costo totale di rete	0,999989	1

Tabella 3-8: matrice di correlazione tra gli indicatori utilizzati

3.6.3.1.2 Cut-Link

Come si nota dal Grafico 3-47 e dal Grafico 3-48 il costo totale di rete diminuisce per tutti gli scenari, con una differenza in media del 5% e una variazione maggiore per il link 110106 (circa il 30%). Per quanto riguarda l'indicatore *Importance*, calcolato sulla base della quantità di domanda insoddisfatta (Grafico 3-49) emerge che il cut-link peggiore è il numero 110106.

La Tabella 3-9 riporta il coefficiente di correlazione di Spearman tra i due indicatori. In questo caso si osserva una dipendenza negativa tra i due, a conferma del fatto che se la domanda caricata in rete diminuisce, il tempo totale diminuisce e l'Importance aumenta.

	Importance	Costo totale di rete
Importance	1	-0,99077
Costo totale di rete	-0,99077	1

Tabella 3-9: matrice di correlazione tra gli indicatori utilizzati

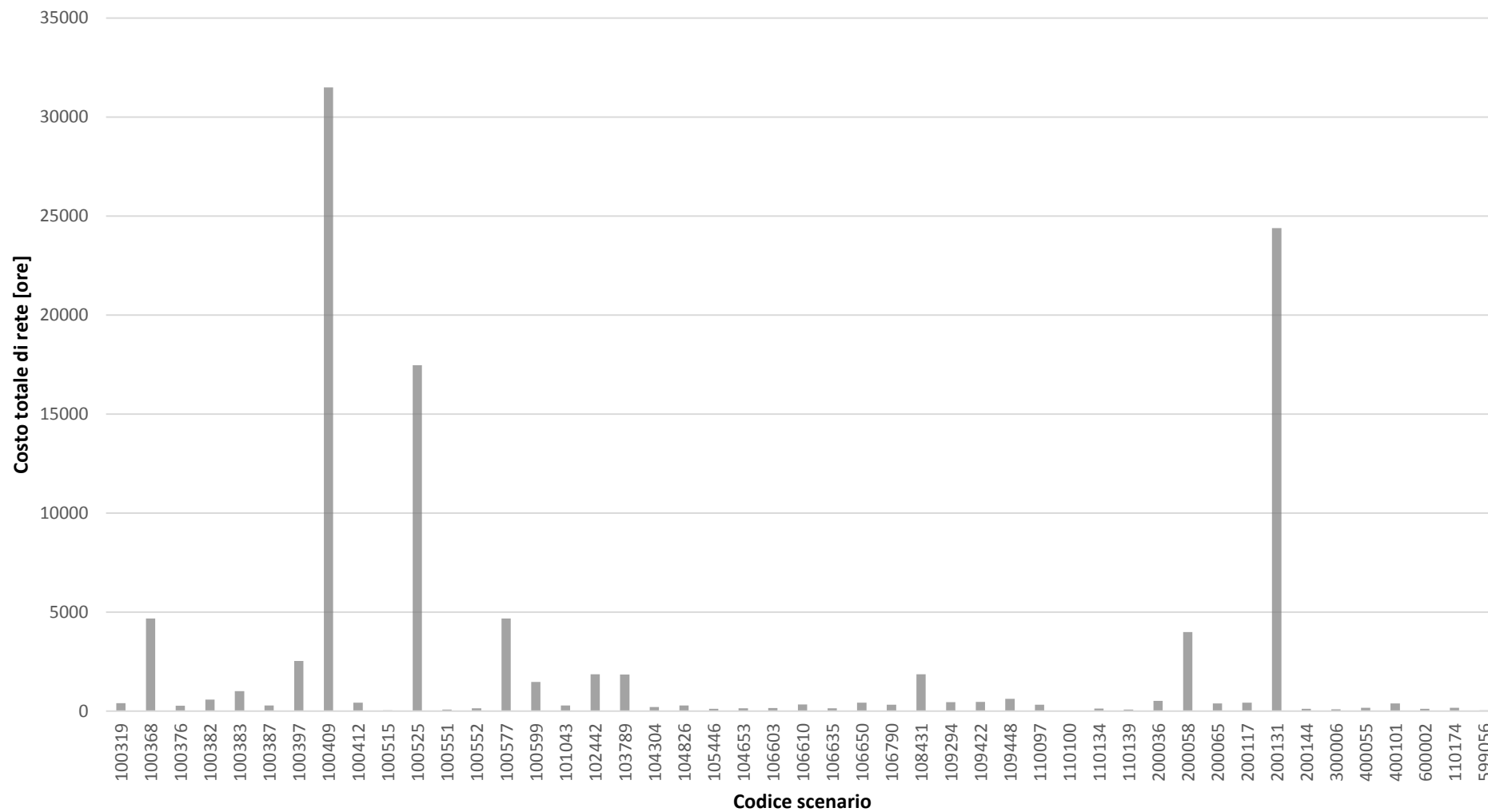


Grafico 3-44: differenza del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale

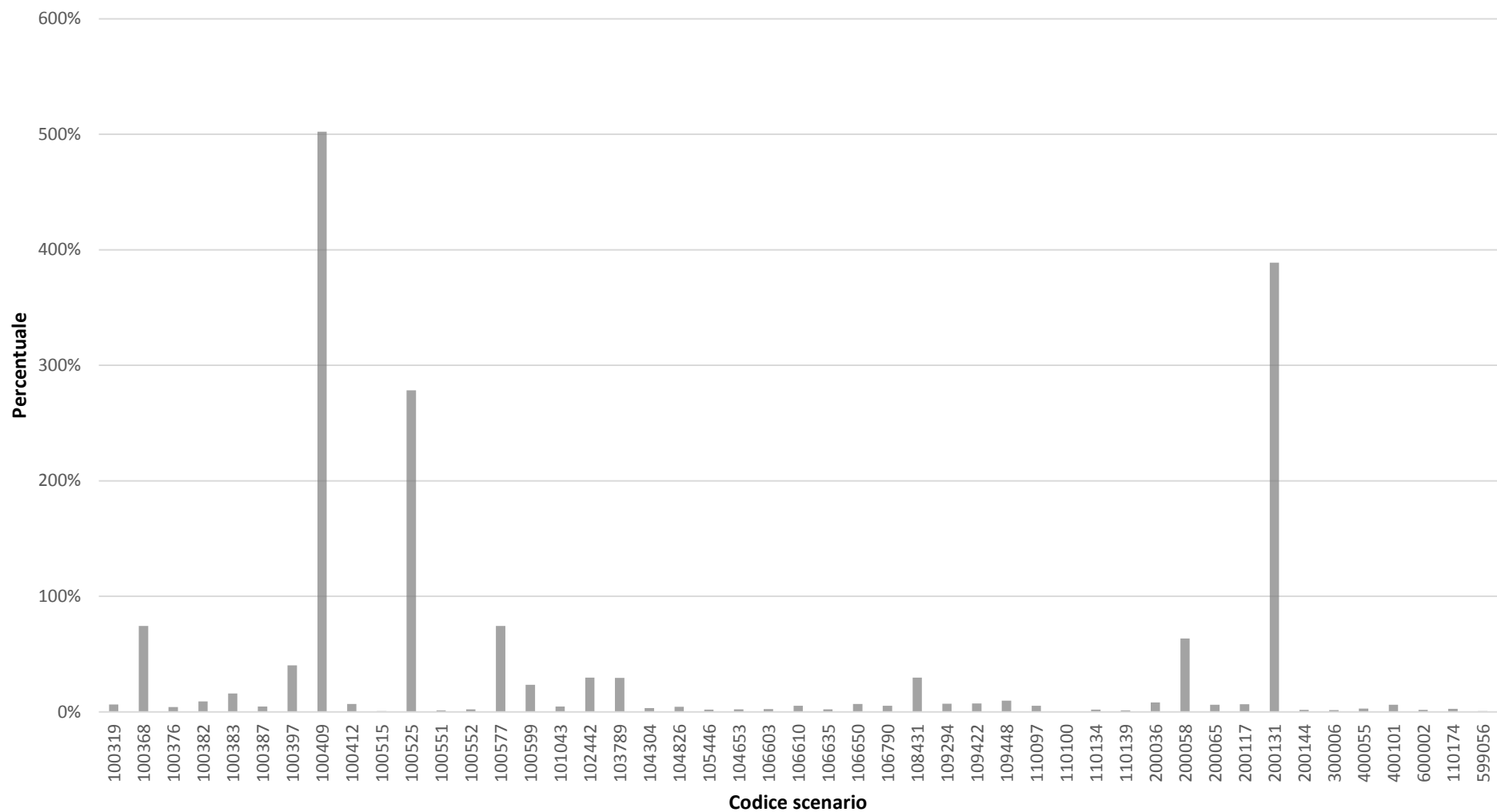


Grafico 3-45: differenza percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale

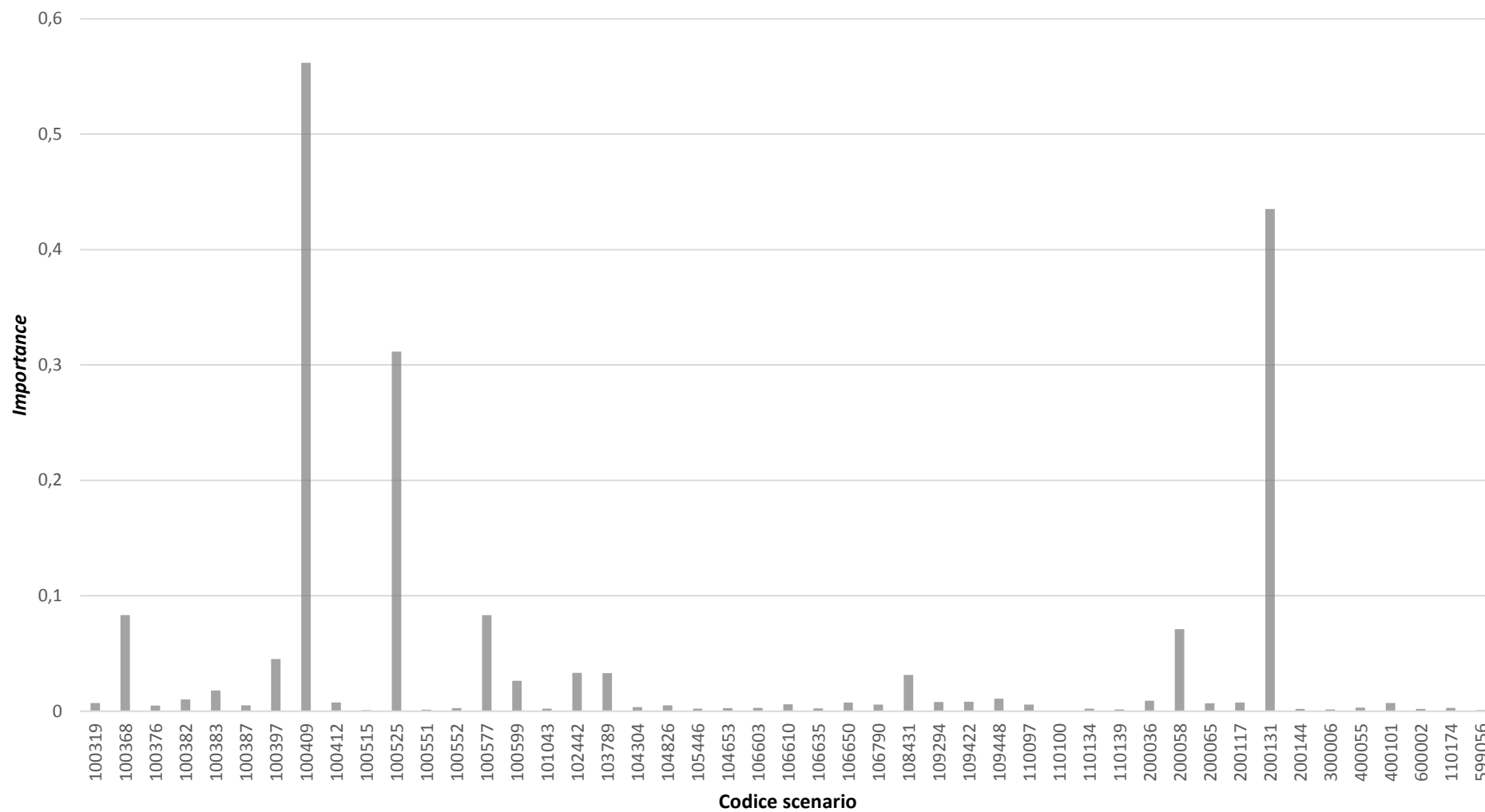


Grafico 3-46: indicatore Importance per i vari scenari

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

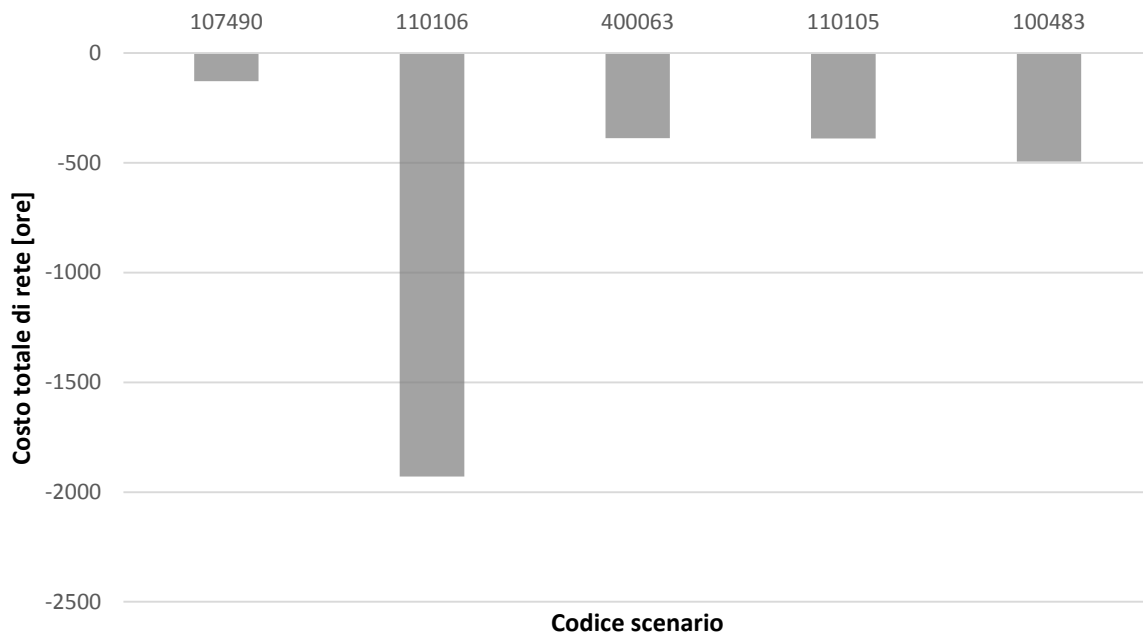


Grafico 3-47: differenza del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale

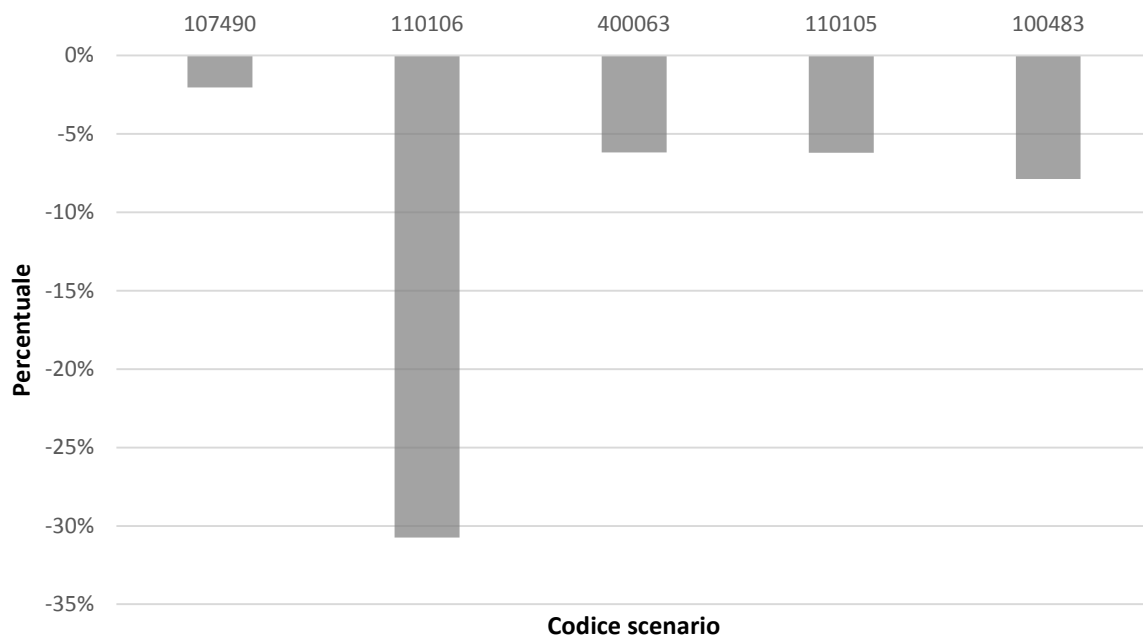


Grafico 3-48: differenza percentuale del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale

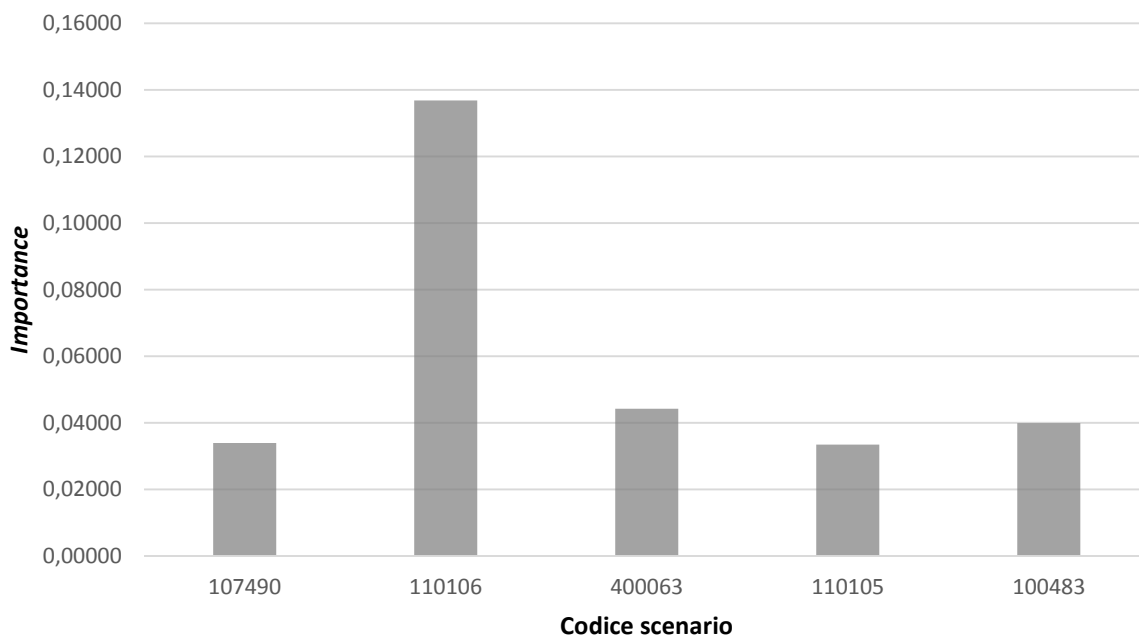


Grafico 3-49: valori dell'indicatore Importance

3.6.3.1.3 Indicatore globale

Come per il modello a domanda variabile è stato applicato l'indicatore proposto da Rupi et al. (Rupi et al. 2014; Rupi et al. 2015) per confrontare l'importanza di tutti gli archi. Il parametro α è stato calcolato per il cut-link che produce la minore diminuzione del costo totale di rete, ovvero il 110105. Inoltre è stata eseguita un'analisi di sensibilità per valutare gli effetti della variazione parametro β utilizzando i seguenti valori:

1. $\beta = 0.25$;
2. $\beta = 0.50$;
3. $\beta = 0.75$.

Per β pari a 0.25 (Grafico 3-50) si osserva che l'arco più importante risulta il cut-link 110106; tuttavia il valore del parametro non è sufficiente a garantire che tutti i cut-link si trovino ad un livello più elevato rispetto ai non cut-link. Infatti il secondo arco peggiore risulta il 100409.

Nel caso in cui β sia uguale a 0.5 (Grafico 3-51) si nota un aumento dell'importanza per i non cut-link. In generale l'ordinamento varia poiché si attribuisce lo stesso peso sia alla quantità di domanda insoddisfatta che al flusso giornaliero che caratterizzava l'arco nello scenario

iniziale; pertanto gli archi che aumentano di molto il loro livello sono quelli che hanno un flusso maggiore.

Infine se β vale 0.75 (Grafico 3-52) l'arco più importante diventa il 100383 seguito dal cut-link 110106 poiché anche quest'ultimo è caratterizzato da un flusso giornaliero più elevato rispetto agli altri. Il Grafico 3-53 riassume i risultati per ogni valore di β .

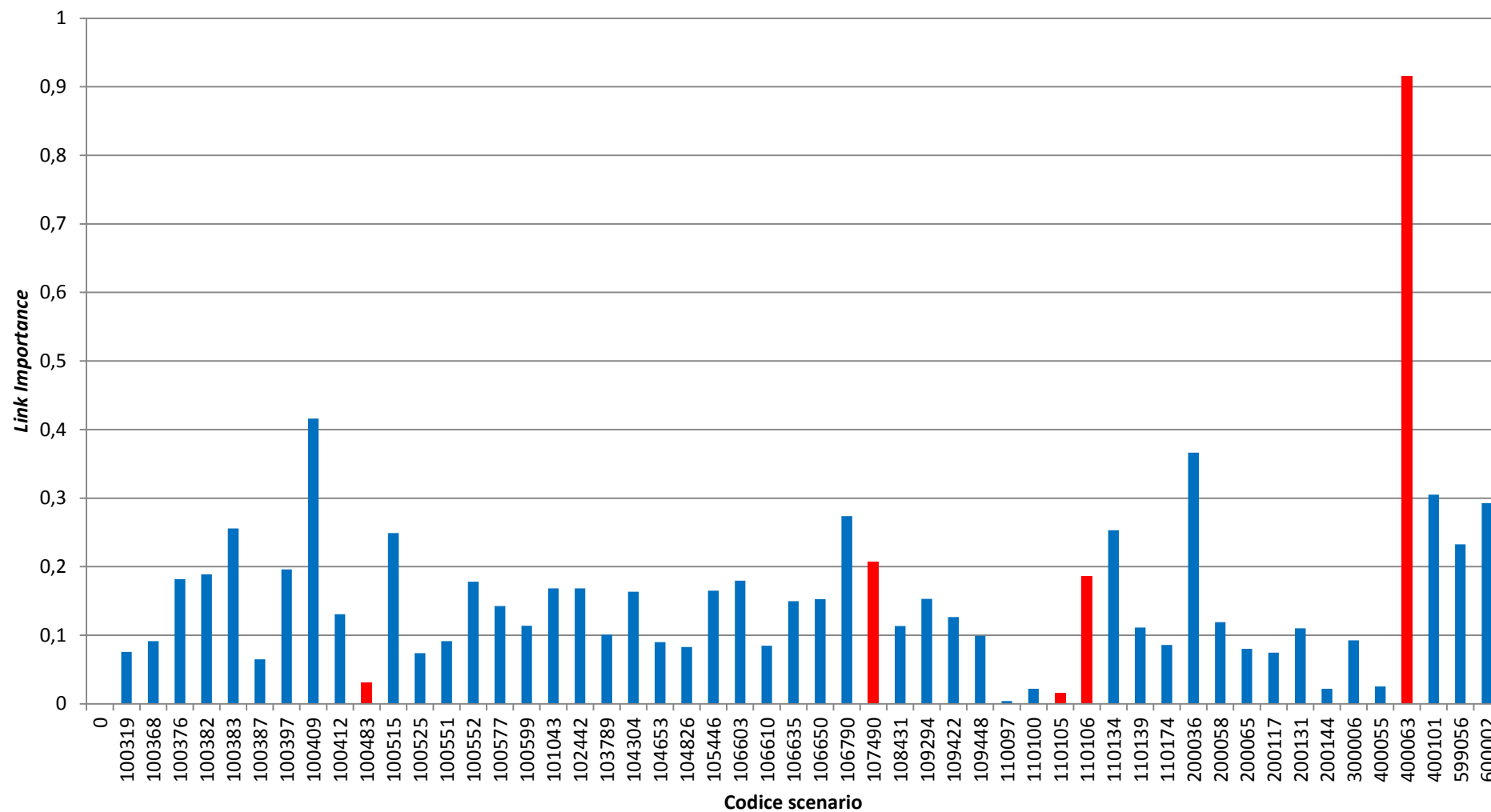


Grafico 3-50: Link Importance per $\beta = 0.25$; in rosso sono indicati i cut-link

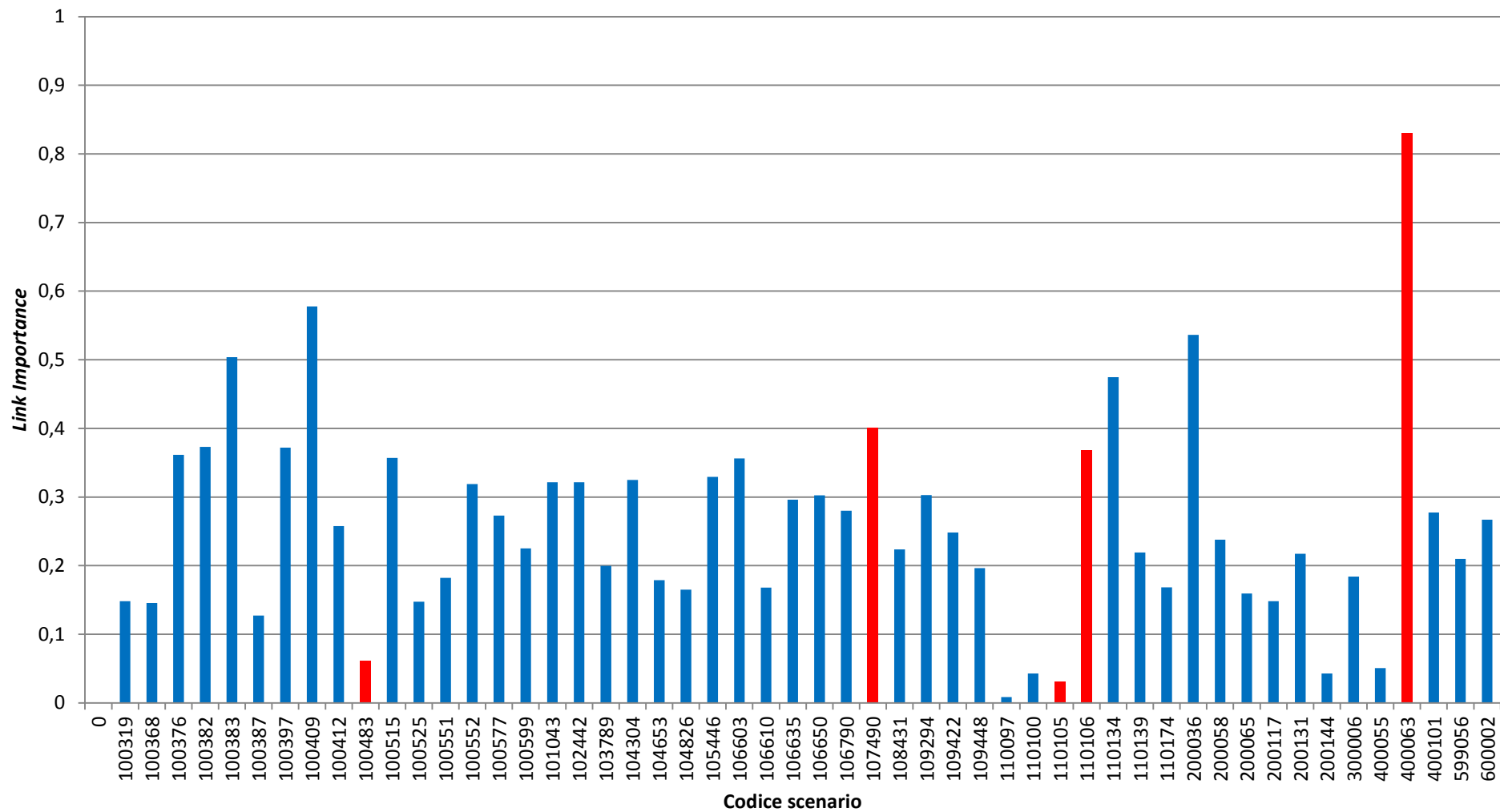


Grafico 3-51: Link Importance per $\beta = 0.50$; in rosso sono indicati i cut-link

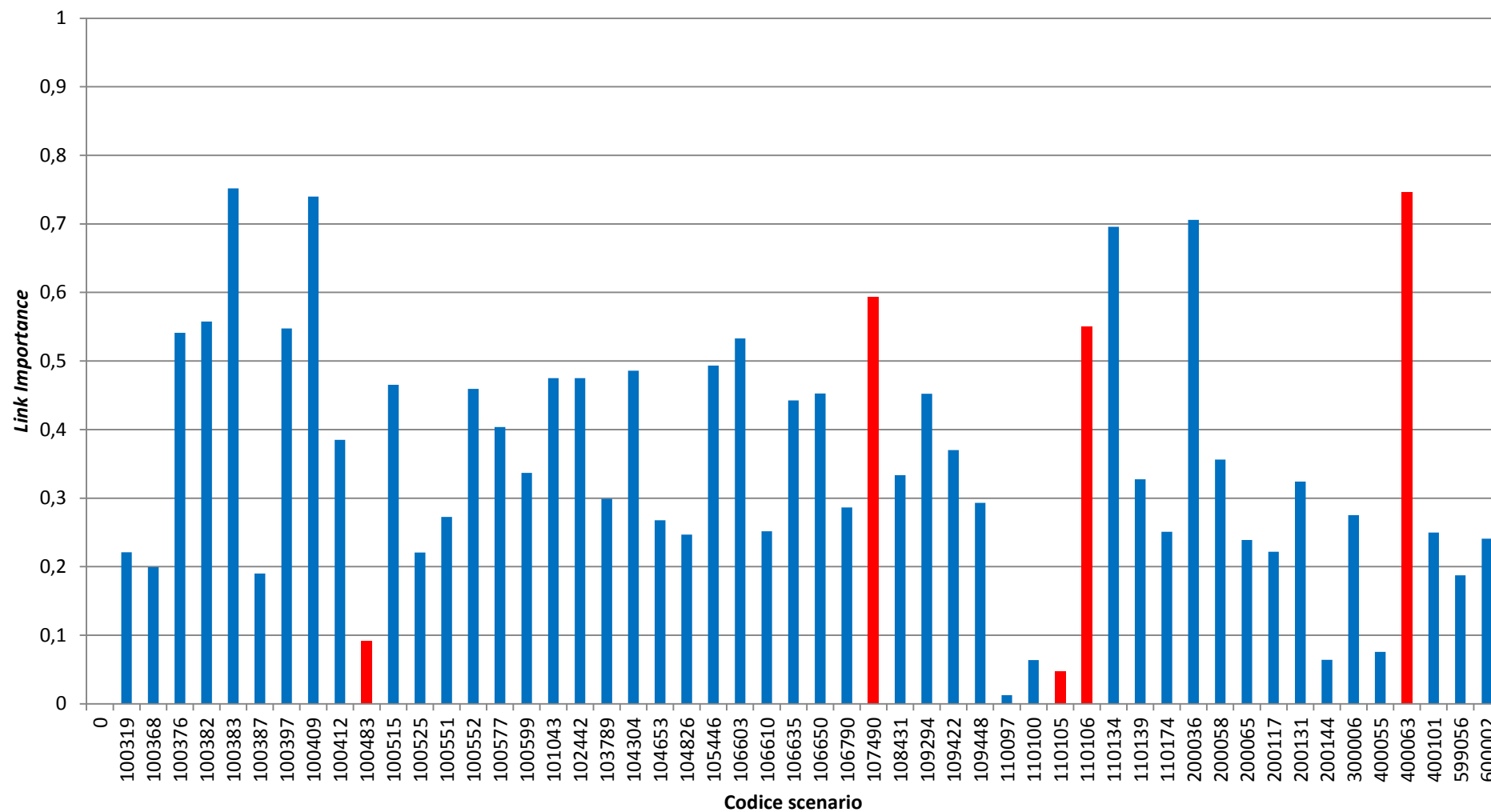


Grafico 3-52: Link Importance per $\beta = 0.75$; in rosso sono indicati i cut-link

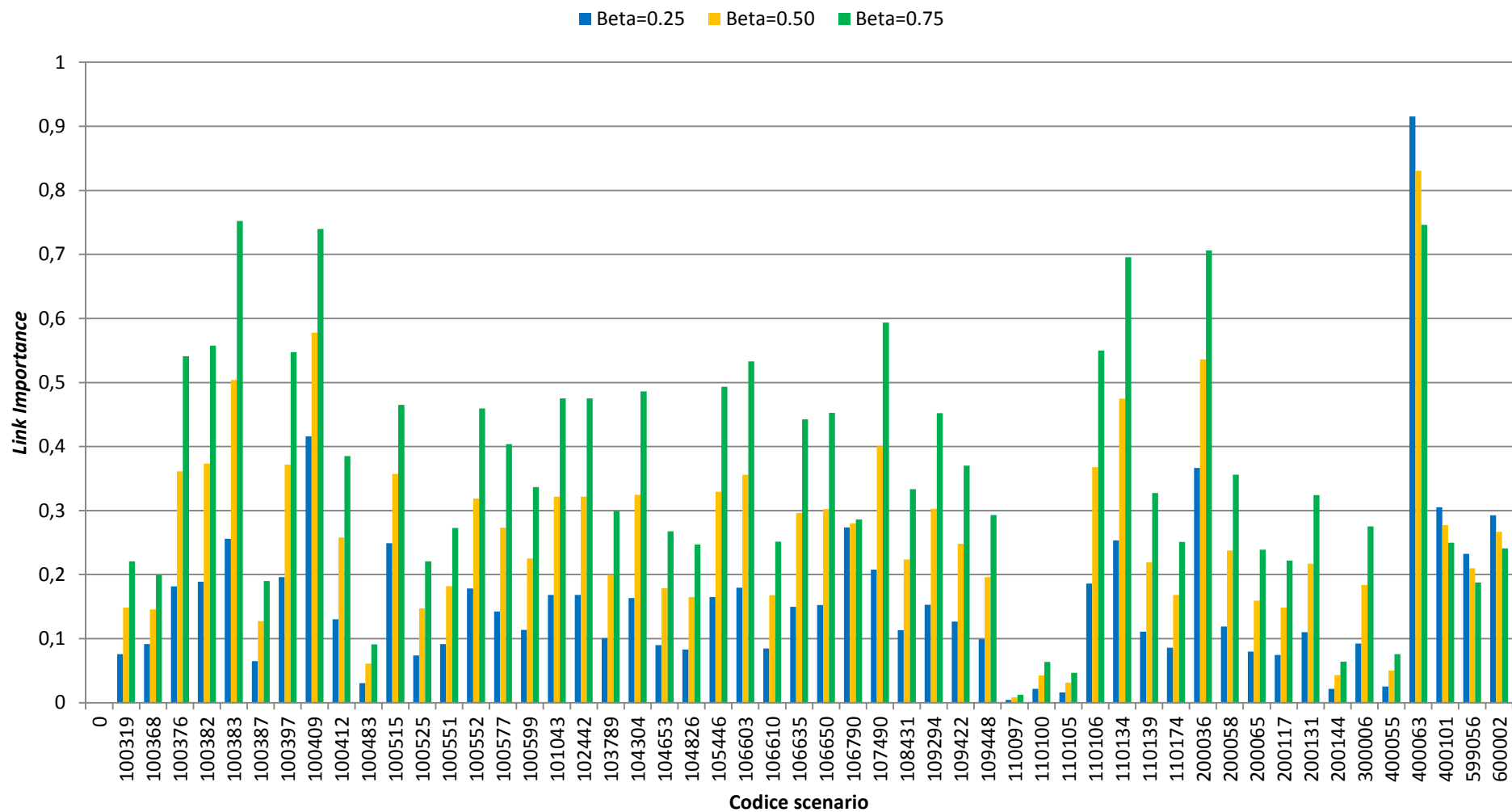


Grafico 3-53: Link Importance per valori diversi di β

3.6.3.2 Analisi della Rete

In questa sezione si analizzano gli effetti sulla rete per gli scenari più significativi, valutati nel caso di domanda fissa.

Per lo scenario di rete privata dell'arco 100409 (Ponte del Vaso), nel periodo della mattina si osserva un aumento considerevole del livello di congestione lungo Via Badoera, Via Fratelli Bandiera, Via Meloni e sulla Strada Regionale n.11 dopo l'intersezione con Via Zinelli verso Est (Figura 3-51). A differenza dello scenario iniziale si nota una crescita del flusso anche su Via Brenta Bassa e Via Seriola a causa degli utenti che da Via San Giacomo e da Via Argine Sinistro si dirigono verso Est (Figura 3-50). Nel periodo di punta della sera (Figura 3-52) si osservano gli stessi effetti, uniti ad una crescita del livello di congestione su più tratti di Via Ca' Tron e Via Matteotti (Figura 3-53).

Nel caso di rimozione dell'arco 200131 (S.R.11 in corrispondenza di Via Badoera), si ha un considerevole aumento dei flussi su gran parte della rete (Figura 3-54). Coloro che nello scenario iniziale percorrevano la Strada Regionale n.11 da o per Venezia sono costretti a deviare attraverso Via Brenta Bassa o Via Seriola per poi utilizzare Via Zinelli e Via Garibaldi, causando un aumento dei livelli di congestione su queste strade e su Via Matteotti (Figura 3-55). Nel periodo PM si nota un aumento dei flussi anche nelle direzioni opposte (Figura 3-56 e Figura 3-57).

Per lo scenario caratterizzato dall'eliminazione del cut-link 110106 (Via Matteotti) si osserva una diminuzione dei flussi soprattutto lungo la Strada Regionale n.11 a causa dei mancati spostamenti da e verso Venezia (Figura 3-58 e Figura 3-59).

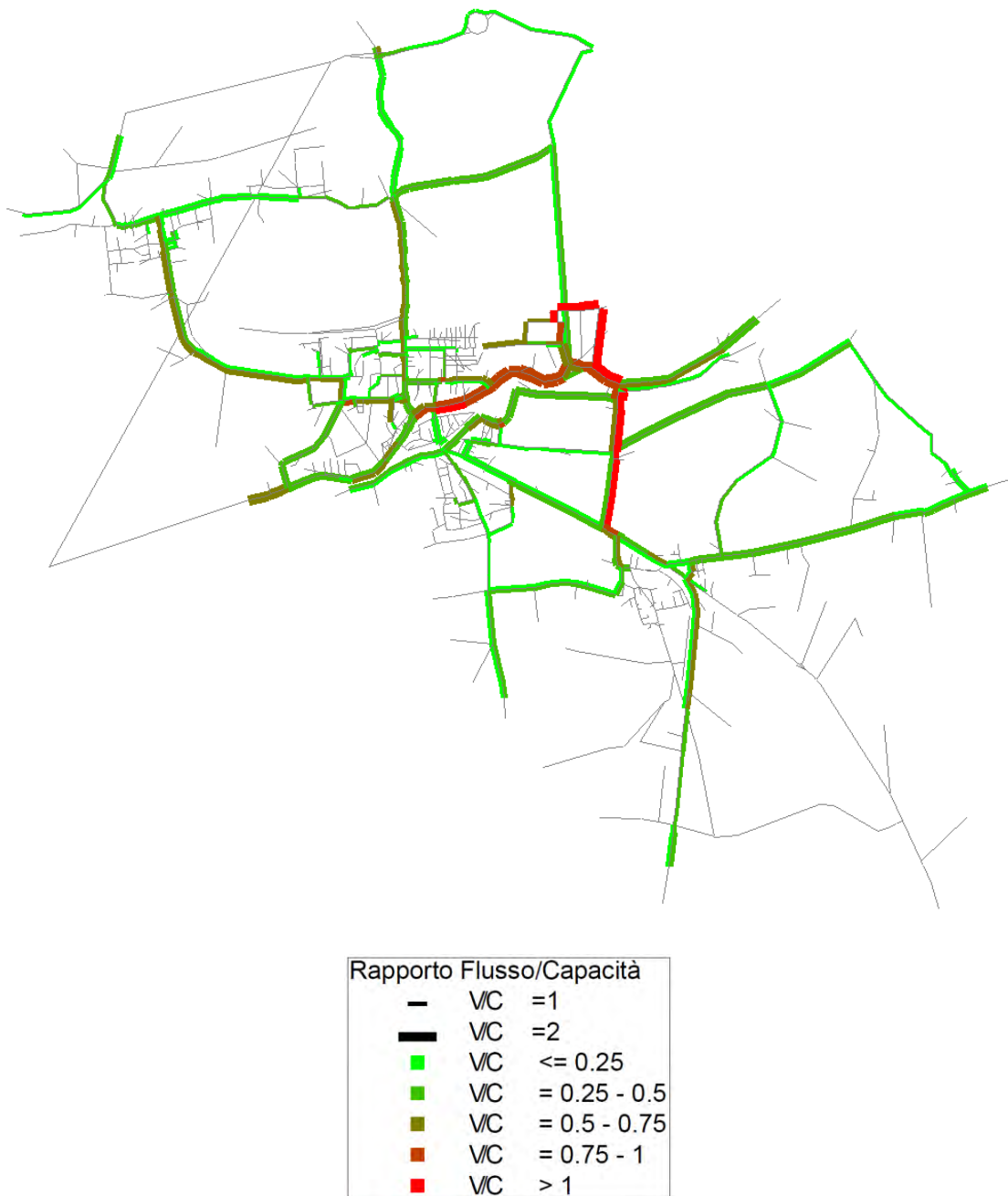


Figura 3-50: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della mattina

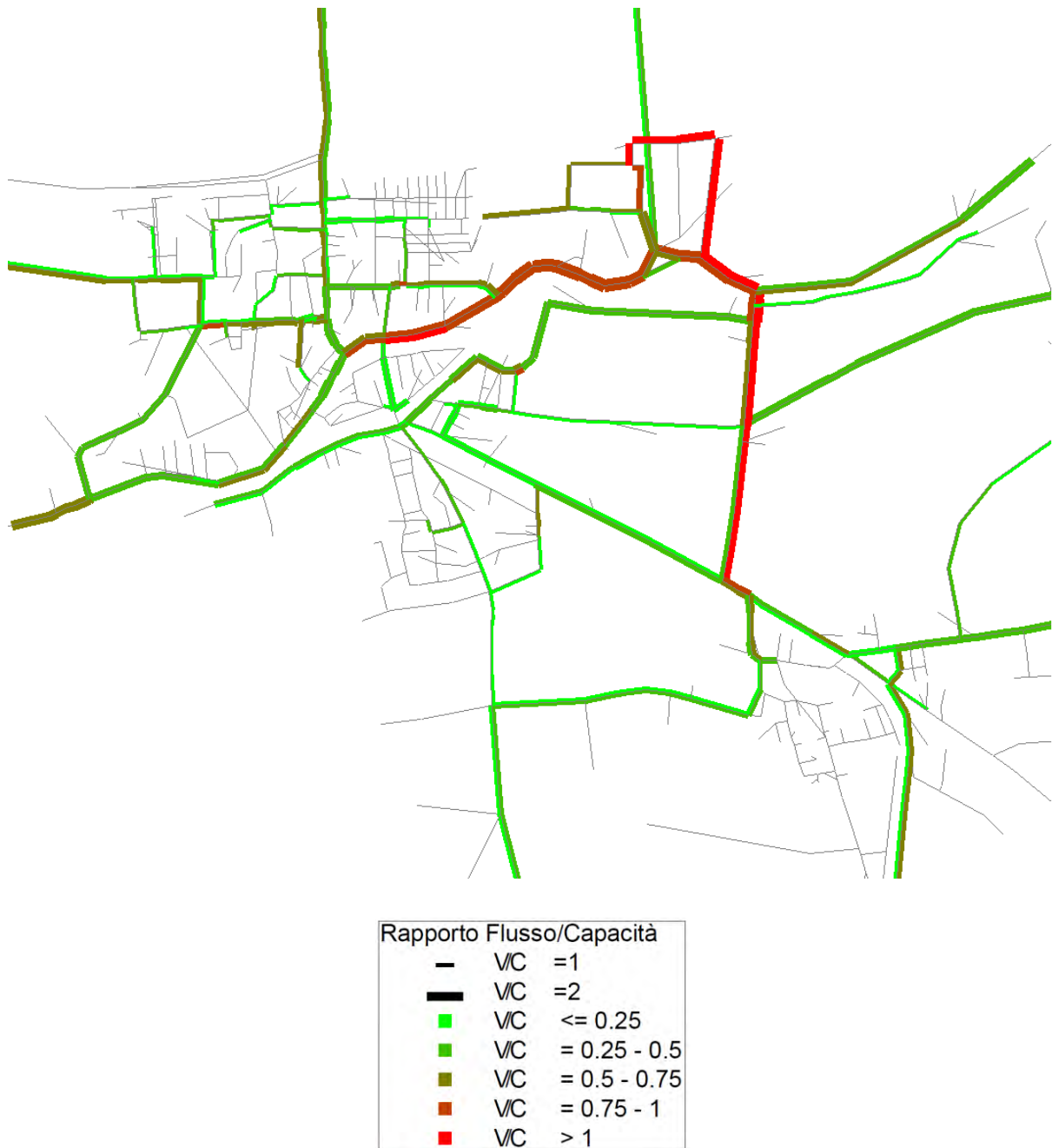


Figura 3-51: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo

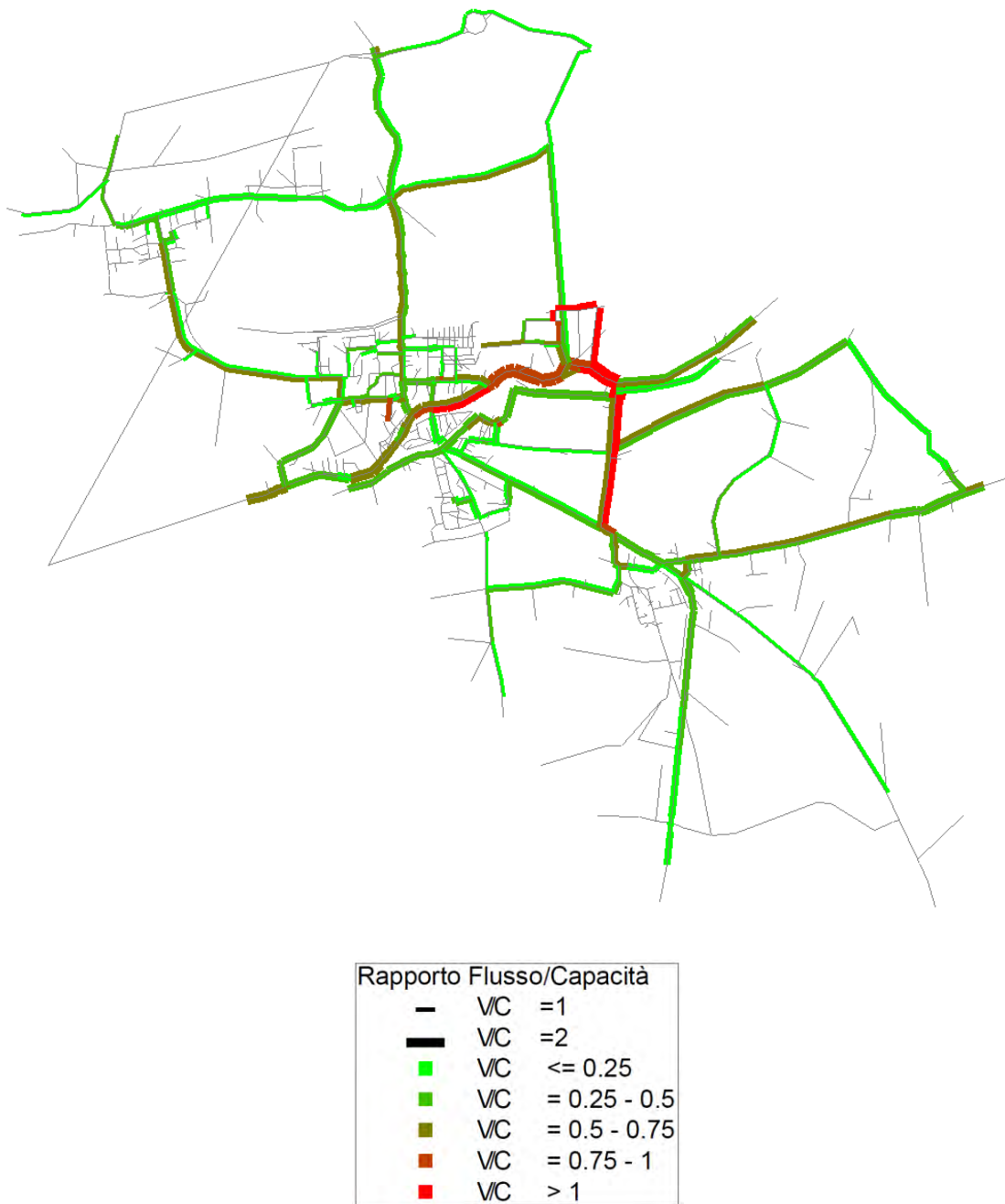


Figura 3-52: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della sera

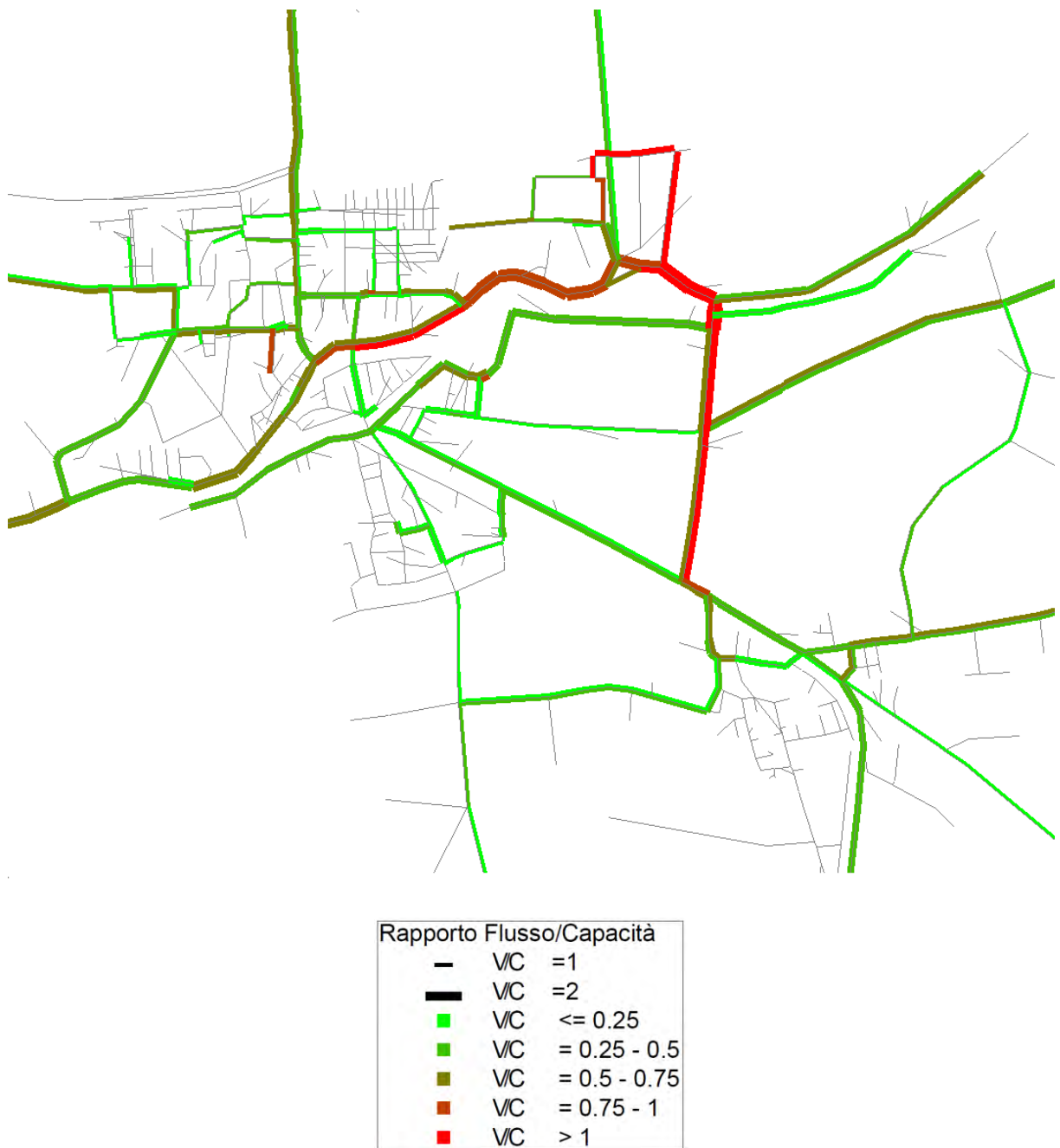


Figura 3-53: flussogramma relativo allo scenario 100409 per il periodo di punta della sera – particolare del centro di Dolo

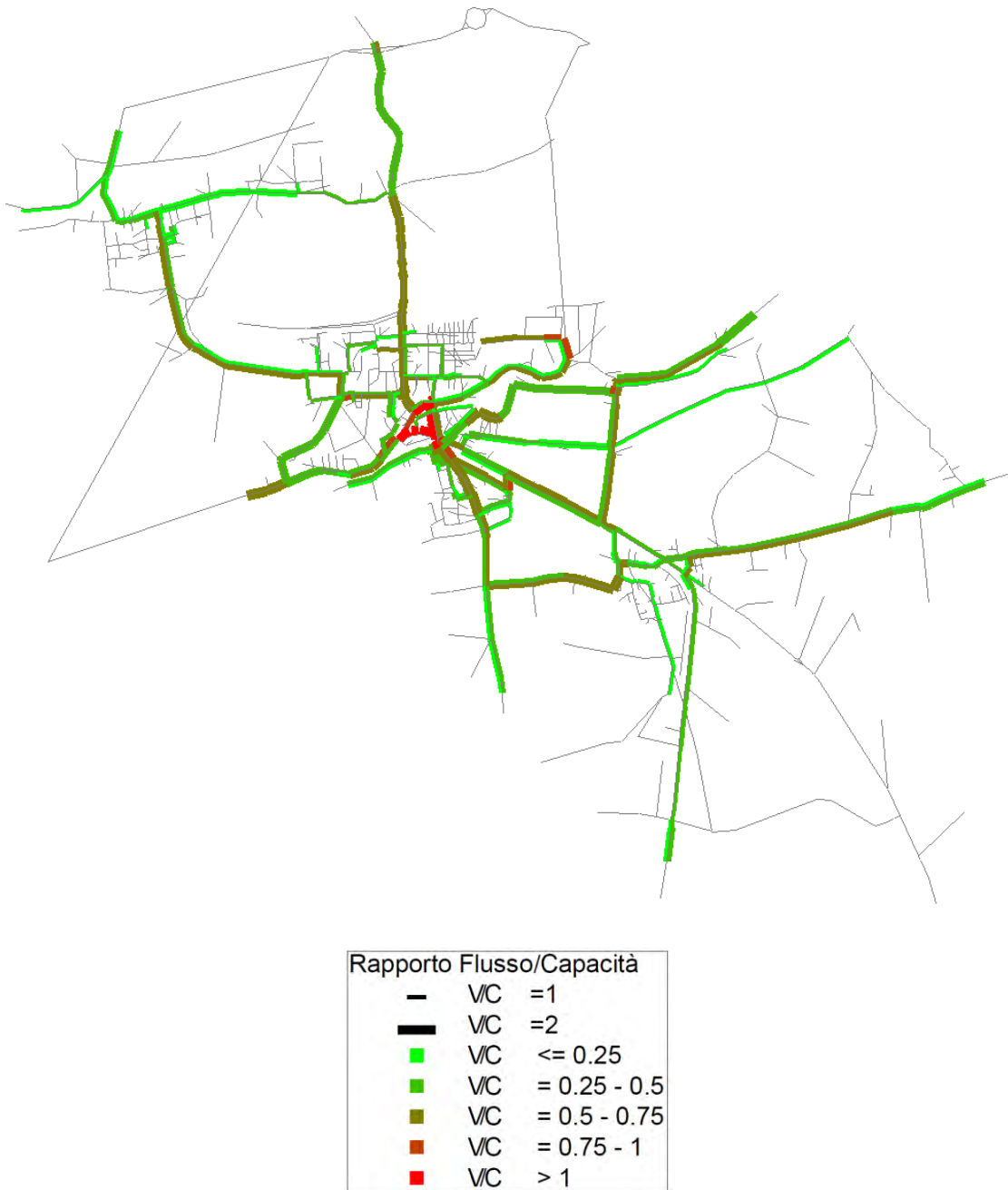


Figura 3-54: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della mattina

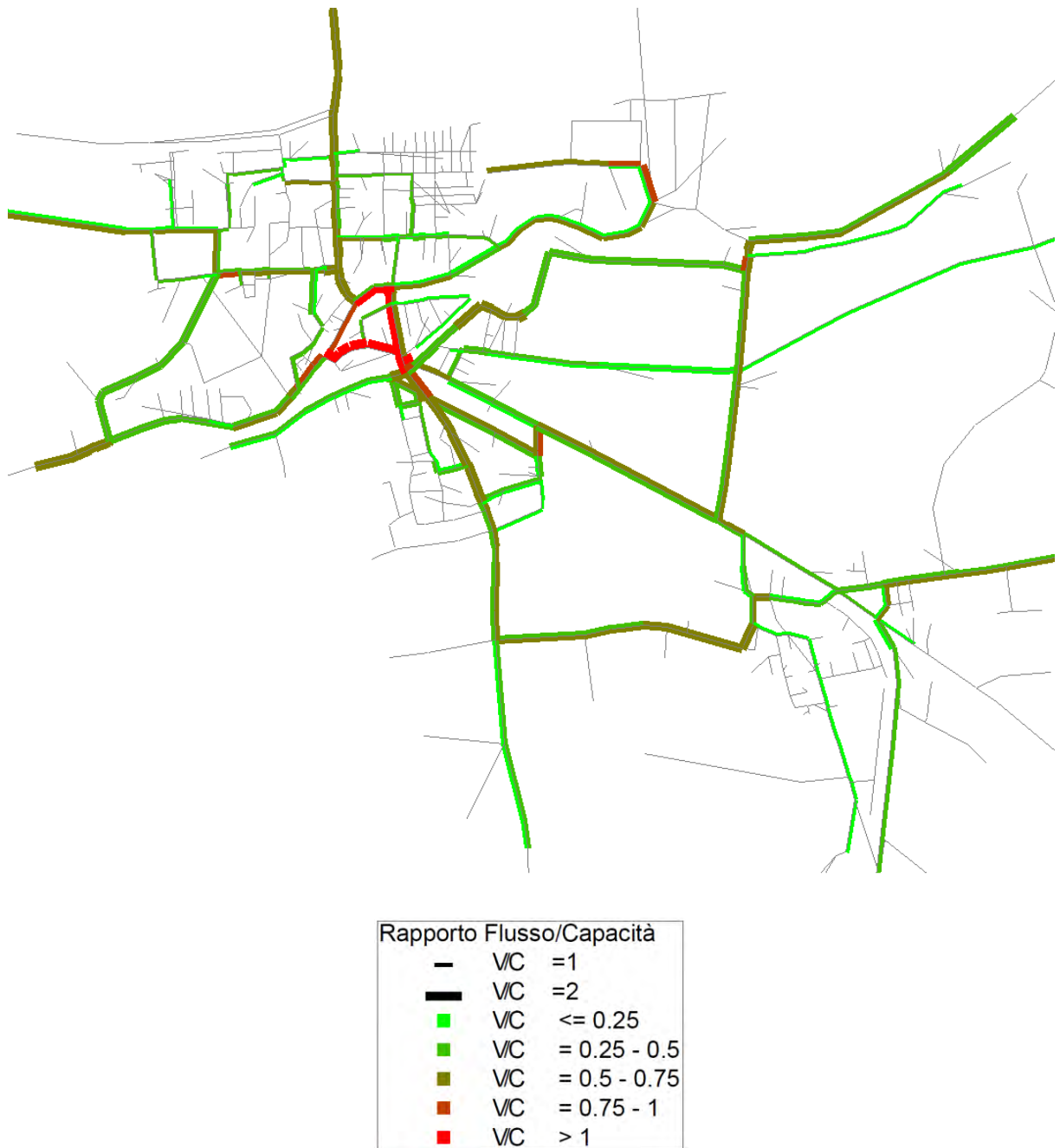


Figura 3-55: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo

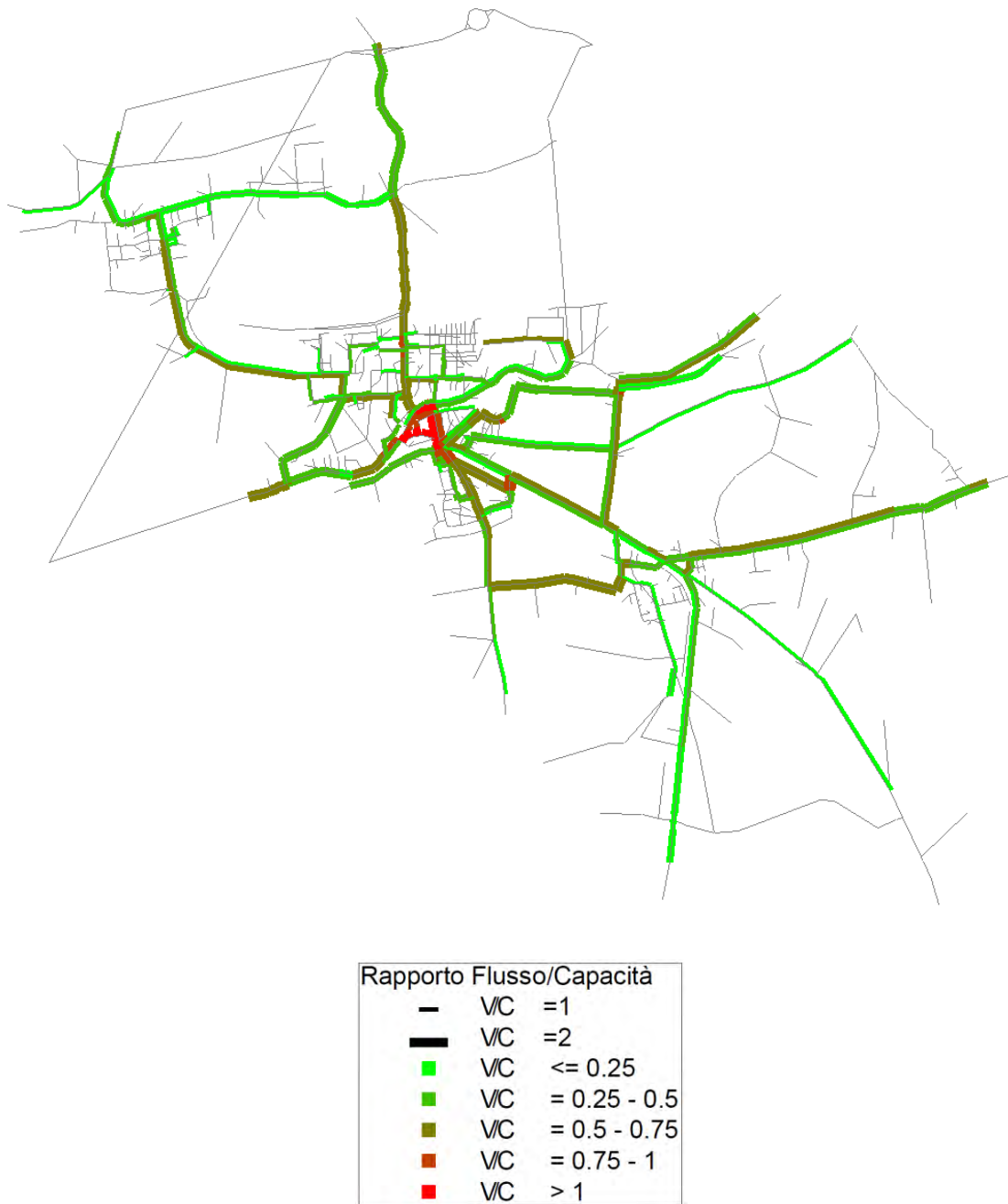


Figura 3-56: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della sera

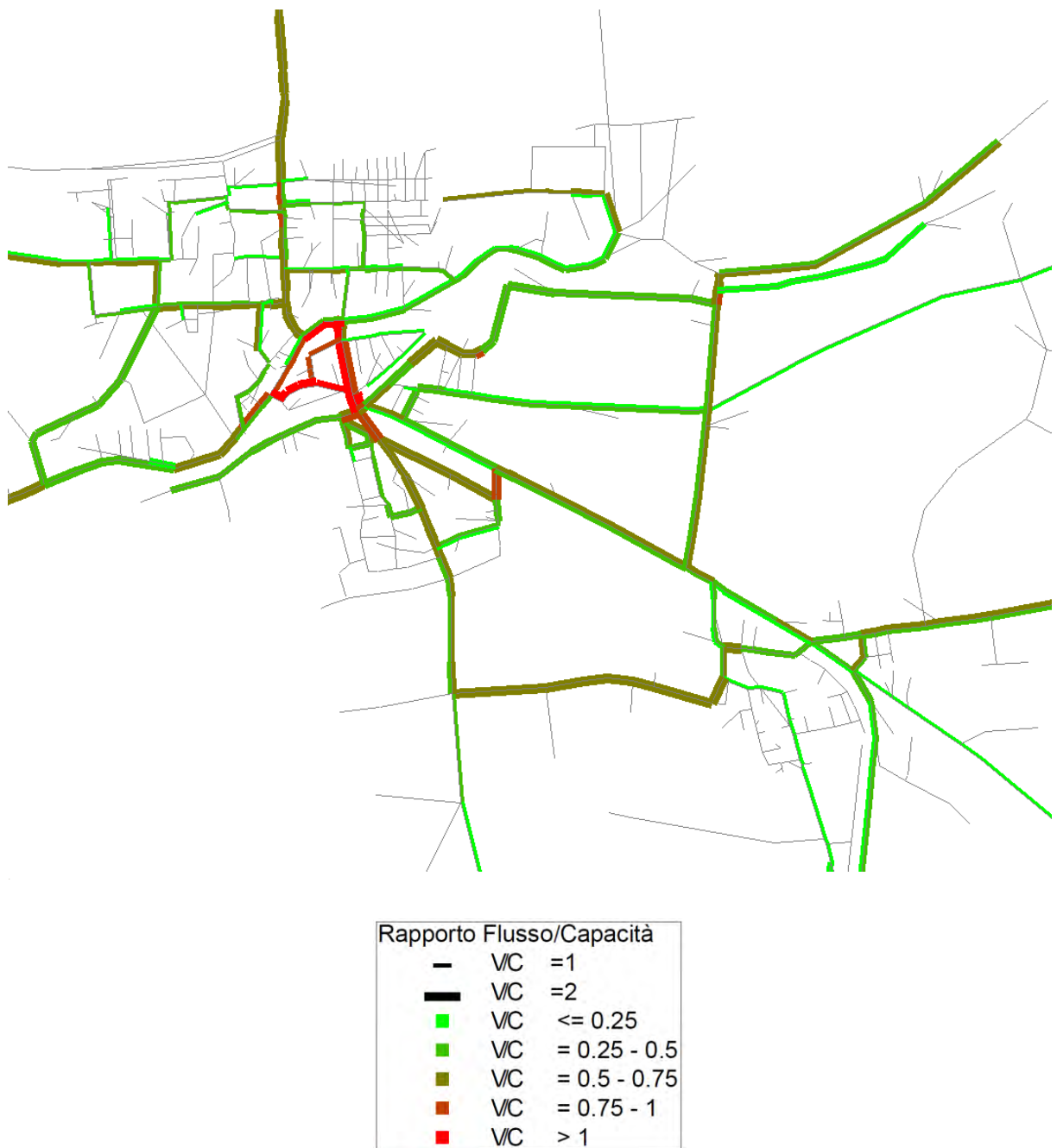


Figura 3-57: flussogramma relativo allo scenario 200131 per il periodo di punta della sera – particolare del centro di Dolo

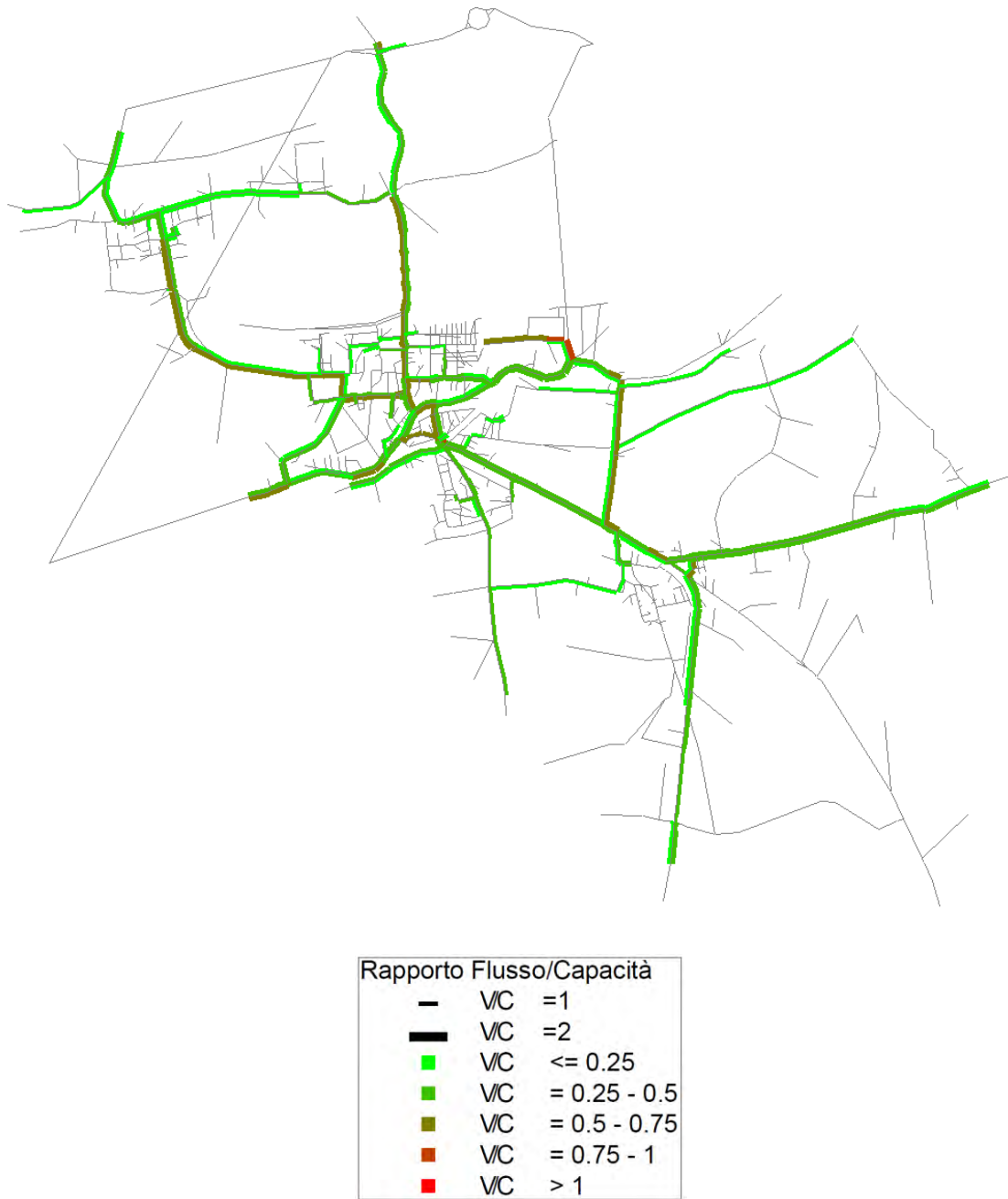


Figura 3-58: flussogramma relativo allo scenario caratterizzato dalla rimozione del cut-link numero 110106 per il periodo di punta della mattina

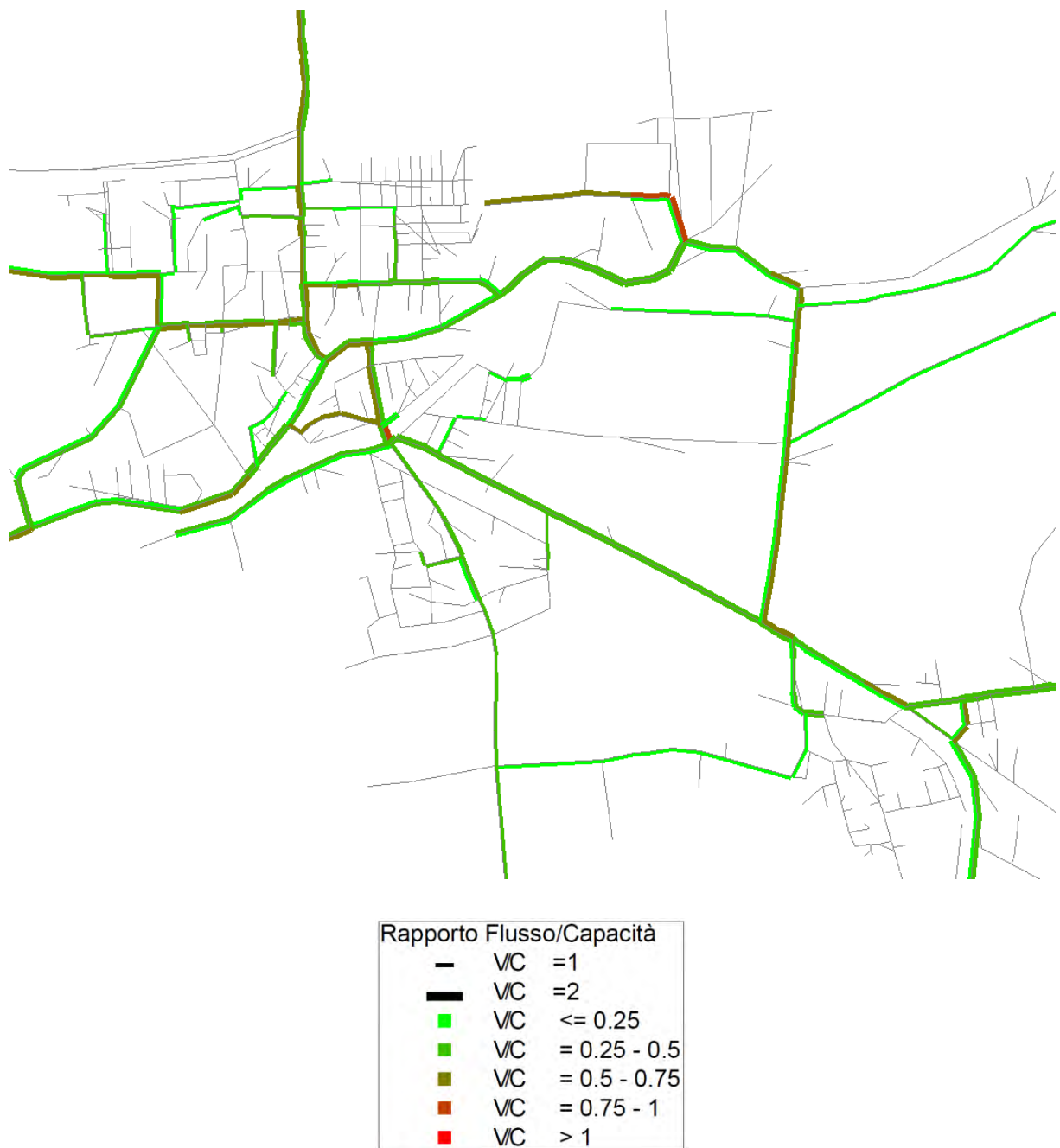


Figura 3-59: flussogramma relativo allo scenario caratterizzato dalla rimozione del cut-link numero 110106 per il periodo di punta della mattina – particolare del centro di Dolo

3.6.4 Confronto tra i Modelli

Dal confronto dei risultati prodotti dal modello a domanda variabile e dal modello a domanda fissa possono essere tratte delle considerazioni di rilievo.

Per quanto concerne i non cut-link (Grafico 3-54 e Grafico 3-55) emerge che l'utilizzo del modello a domanda fissa, pur lasciando invariato l'ordine in termini di importanza relativa degli archi, porta a sovrastimare l'incremento del costo totale di rete per tutti gli scenari di danno. Questo è dovuto al fatto che attraverso il primo metodo la domanda è invariante rispetto all'assetto e alle prestazioni della rete, ovvero non si ridistribuisce, come avviene nella realtà, in seguito ad un adattamento della struttura spaziale e temporale delle attività alle nuove condizioni. Utilizzando il modello Activity-Based alcuni individui decidono di cambiare la destinazione dei tour per motivi non sistematici e le catene di spostamenti connessi a quelli sistematici, individuando nuovi percorsi di costo minimo. Tutto ciò si riflette in una differente redistribuzione dei flussi (Figura 3-60 e Figura 3-61), differenti livelli di congestione e differenti valori degli indicatori.

Nel caso dei cut-link (Grafico 3-56 e Grafico 3-57) si osserva invece che il modello a domanda fissa produce una diminuzione maggiore del costo totale di rete rispetto al modello a domanda variabile solamente per lo scenario 110106; negli altri casi invece si nota un effetto opposto. Questo comportamento è dovuto al fatto che la domanda insoddisfatta stimata dal modello Activity-Based è maggiore per l'arco 110106 e minore per tutti gli altri scenari (analogamente a quanto avviene per i non cut-link). Perciò in questi casi, utilizzando un modello che non considera i cambiamenti sulla domanda di trasporto indotti dalle variazioni delle condizioni di servizio della rete, si è portati a sottostimare l'importanza di questo tipo di archi.

Sulla base di questo confronto emergono chiaramente le potenzialità del modello Activity-Based nello studio della variazione della domanda indotta da variazioni nell'assetto della rete (rimozione di un solo arco dalla rete). Attraverso questo metodo è infatti possibile simulare i cambiamenti nella struttura delle attività giornaliere degli utenti prodotti dal peggioramento delle prestazioni della rete viaria, rendendo concreta l'interazione tra domanda e offerta. Come si è osservato, l'analisi degli indicatori e dei flussogrammi calcolati

a partire dai risultati di tale modello non può prescindere dallo studio delle variazioni nello schema delle attività degli utenti.

Le modifiche osservate in questo caso di studio riguardano sia la dimensione temporale che la dimensione spaziale; gli utenti infatti possono decidere di modificare il periodo in cui effettuare delle attività, le destinazioni degli spostamenti da compiere e i percorsi da utilizzare, pur essendo vincolati a svolgere le attività scolastiche e lavorative in specifiche zone e momenti della giornata. Il modello a domanda fissa invece considera, in maniera irrealistica, che la domanda non subisca modifiche di questo tipo, ma che gli utenti possano solamente modificare i loro percorsi, simulati nel processo di assegnazione alla rete.

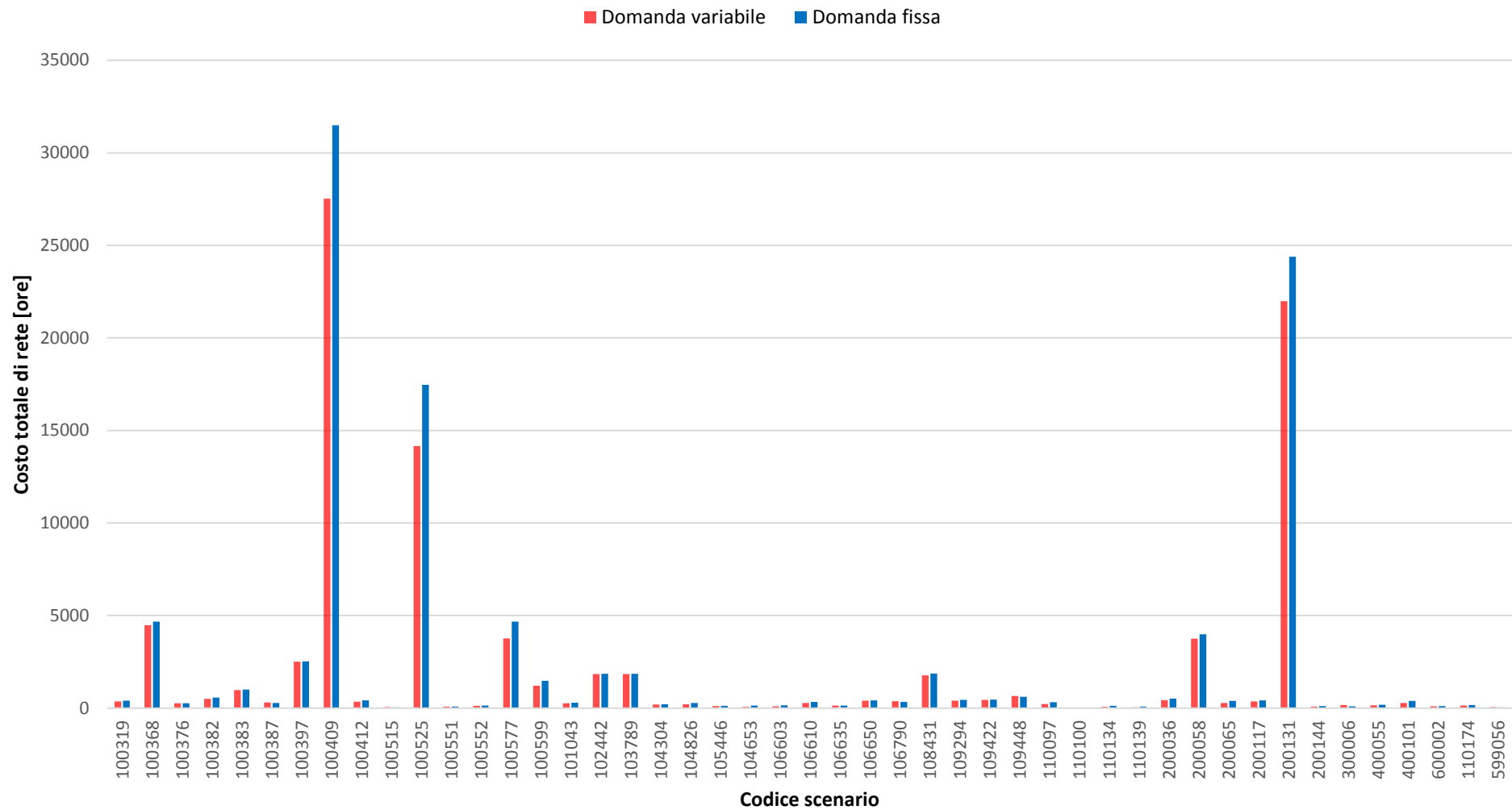


Grafico 3-54: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di variazione del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale per i non cut-link

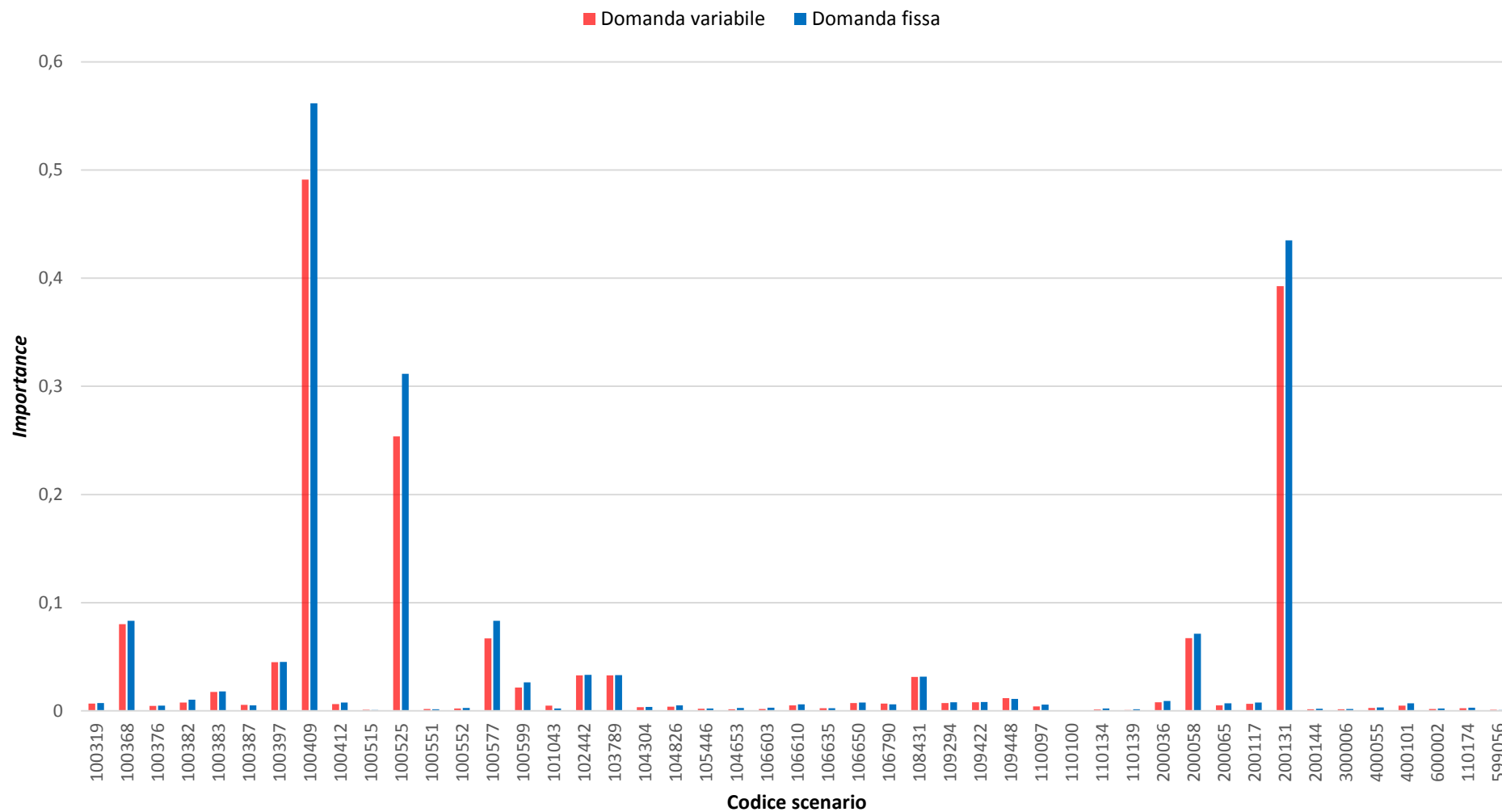


Grafico 3-55: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di valori assunti dall'indicatore Importance per i non cut-link

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

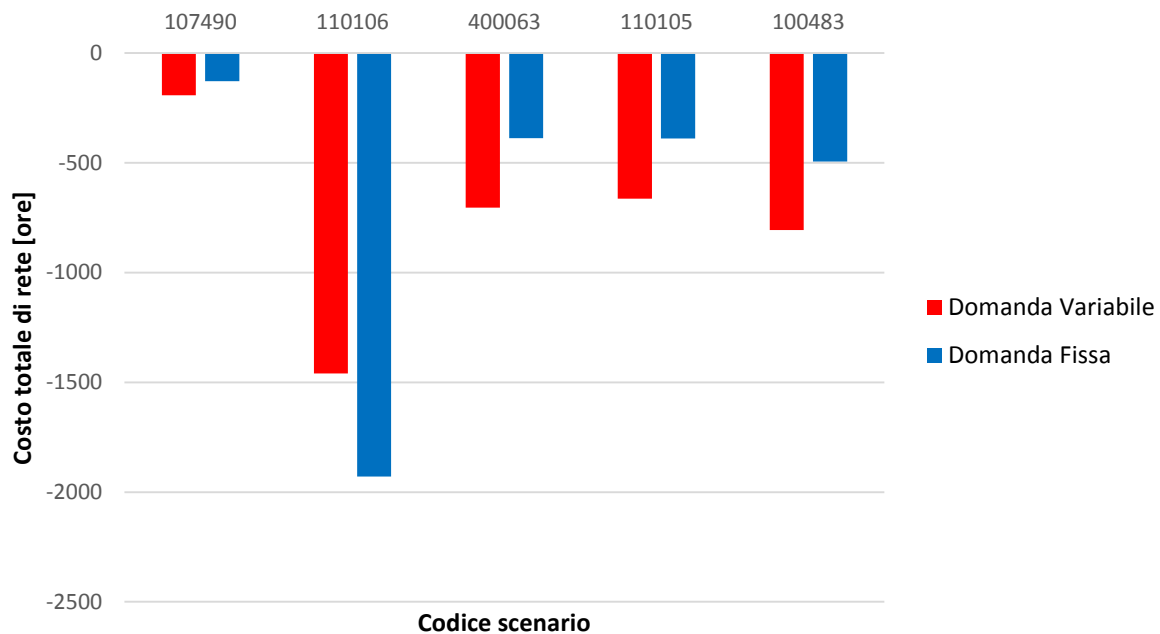


Grafico 3-56: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di variazione del costo totale di rete rispetto allo scenario iniziale per i cut-link

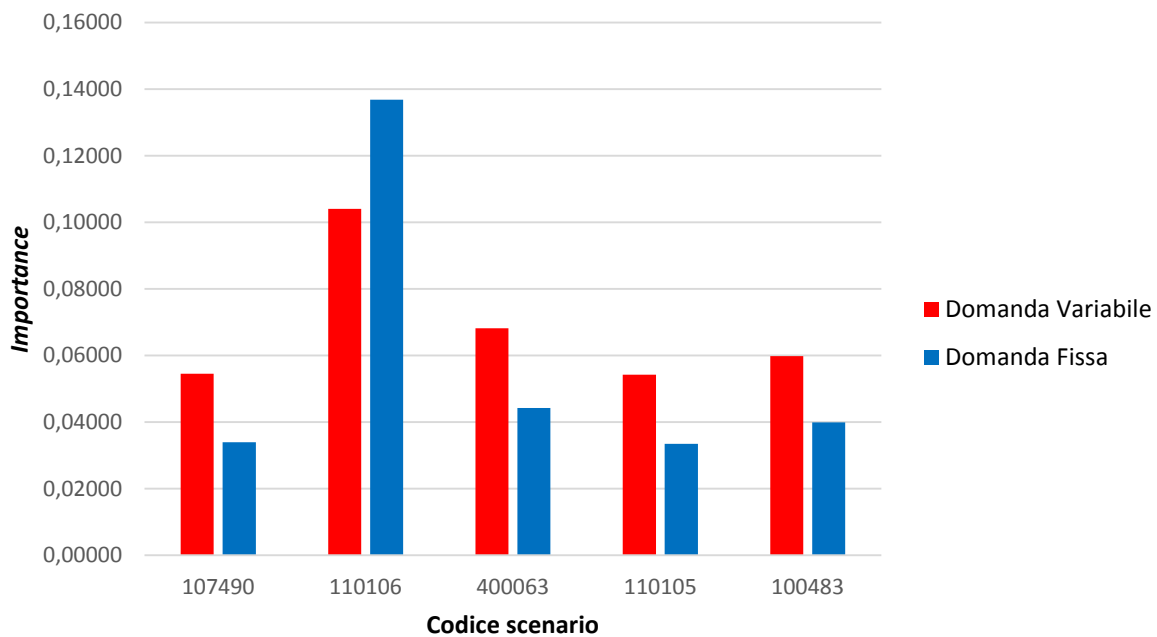


Grafico 3-57: confronto tra il modello a domanda variabile ed il modello a domanda fissa in termini di valori assunti dall'indicatore Importance per i cut-link

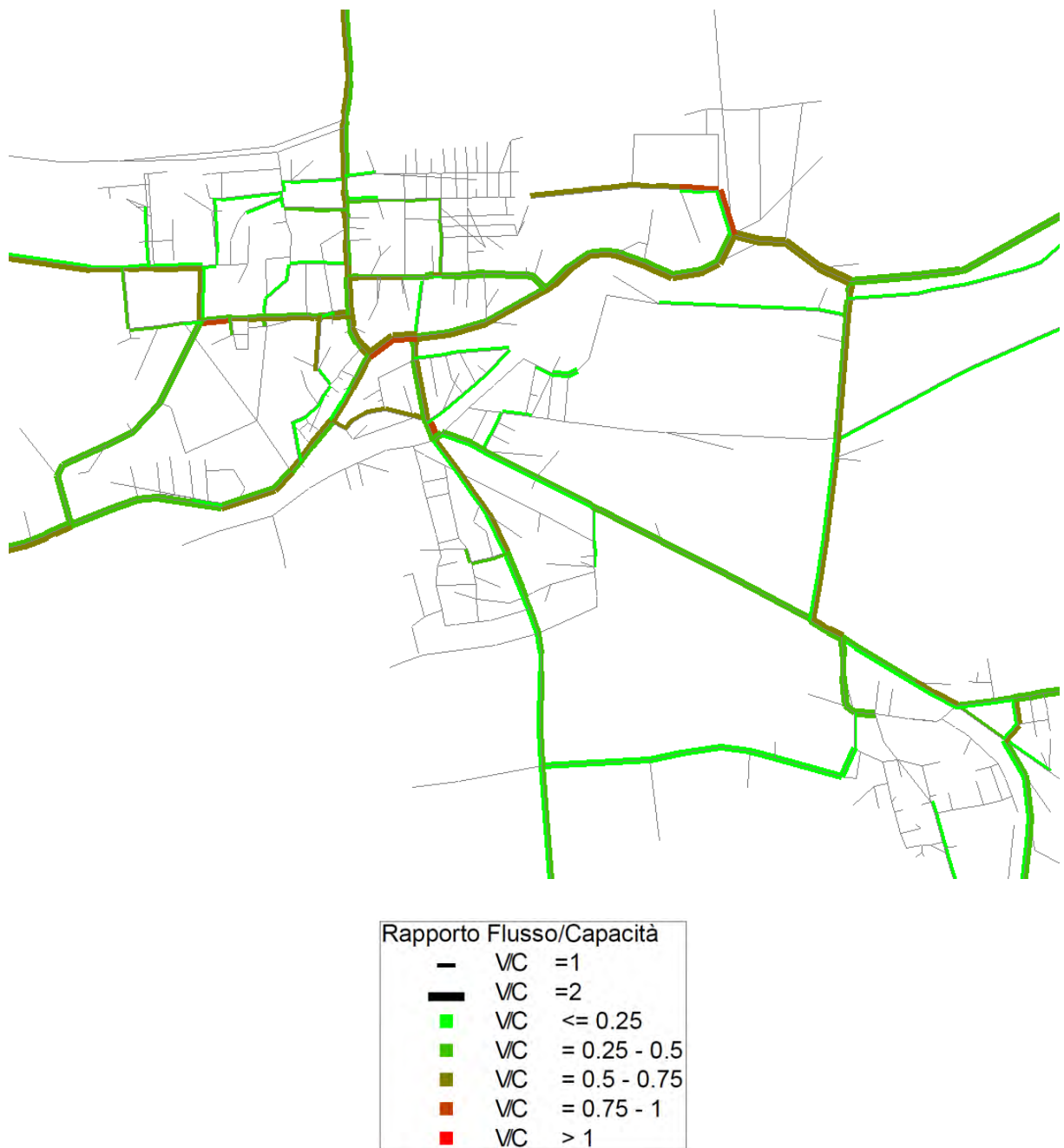


Figura 3-60: flussogramma relativo allo scenario 400063 per il periodo AM ottenuto dall'applicazione del modello a domanda variabile— particolare del centro di Dolo

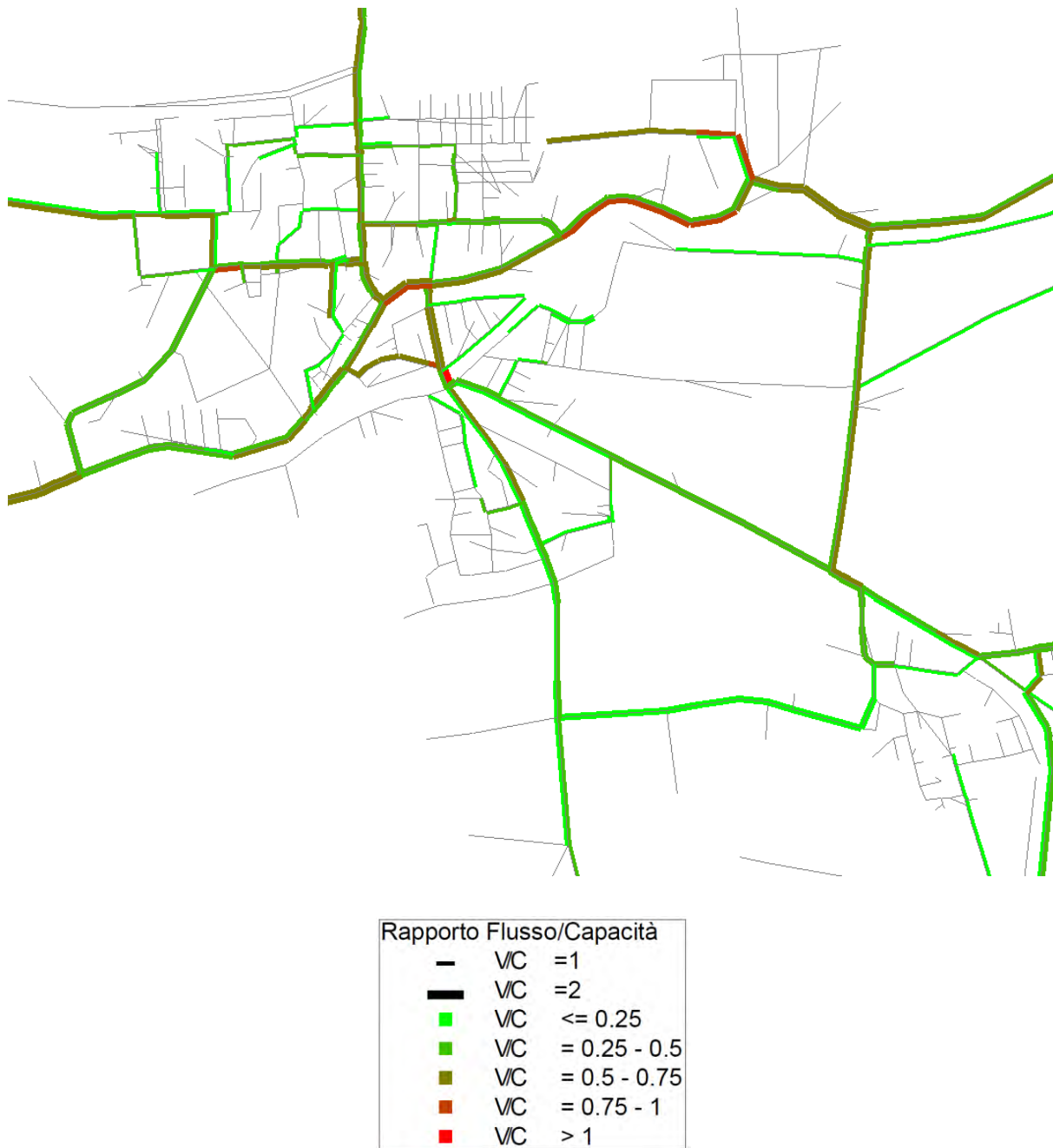


Figura 3-61: flussogramma relativo allo scenario 400063 per il periodo AM ottenuto dall'applicazione del

modello a domanda fissa— particolare del centro di Dolo

4 Conclusioni e Sviluppi Futuri

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di analizzare l'effetto della variazione della domanda nello studio della vulnerabilità di una rete di trasporto. L'analisi è stata condotta in rapporto alla rete viaria del comune di Dolo, in provincia di Venezia, utilizzando un modello di tipo Activity-Based per modellare la complessa interazione tra il sistema della domanda e quello dell'offerta.

Questo approccio permette di modellare la sequenza di attività compiute da ogni singolo individuo della popolazione residente nell'area di studio per una generica giornata lavorativa. A fronte delle grandi potenzialità esistenti nella descrizione degli spostamenti, questa struttura modellistica necessita di un'elevata quantità di dati di dettaglio e presenta un costo computazionale molto elevato rispetto al modello a quattro stadi.

L'analisi della vulnerabilità è stata compiuta adottando un approccio del tipo *full scan approach*, eliminando uno alla volta alcuni archi della rete preventivamente selezionati e quantificando gli impatti sulla rete con alcuni indicatori di vulnerabilità. Tra i numerosi indicatori presenti in letteratura sono stati considerati: la variazione del tempo totale speso in rete (1) e dell'accessibilità (2) di alcune zone tra la situazione iniziale e la condizione di

rete danneggiata, l'importanza di un link (3), e diversi indicatori per quantificare le variazioni nella matrice degli spostamenti. Per ogni scenario così ottenuto sono stati utilizzati sia il modello Activity-Based (a domanda variabile) sia un modello a domanda fissa, mettendone a confronto i risultati ottenuti rispetto allo scenario iniziale di riferimento.

Dall'analisi dei risultati sulla rete è emerso che il modello Activity-Based consente di simulare le scelte degli utenti rispetto alle attività da compiere, alla loro localizzazione spaziale e temporale, modificando l'assetto degli spostamenti necessari per compiere tali attività, in analogia a quanto avviene nella realtà. Tale modello è risultato in grado di cogliere le variazioni della domanda di mobilità dovute alla riduzione dell'accessibilità di alcune zone e al peggioramento dei livelli di servizio della rete dovuta all'eliminazione di un arco. In particolare, confrontando i risultati con quelli ottenuti adottando il modello a domanda fissa, è emerso che per i non cut-link quest'ultimo porta a sovrastimare l'incremento del costo totale di rete per tutti gli scenari di danno, mentre per i cut-link si è portati a sottostimarne l'importanza.

Il presente lavoro di tesi rappresenta una valutazione preliminare delle potenzialità del modello Activity-Based per la stima della domanda di mobilità e delle sue dinamiche, in particolare in rapporto allo studio della vulnerabilità di una rete di trasporto. Alla luce di quanto osservato questa tipologia di modello di domanda può rappresentare uno strumento di grande interesse per valutare correttamente gli effetti a medio e lungo termine del complesso processo di interazione tra domanda e offerta, intesa nel senso ampio di sistema dei trasporti e delle attività insediate nel territorio.

In tal senso da questo lavoro di tesi sono emersi diversi aspetti rispetto ai quali sviluppare lo studio della vulnerabilità di una rete di trasporto :

- Analisi di dettaglio della variazione della domanda. Attraverso le sequenze di attività stimate dal modello è possibile valutare i cambiamenti nelle scelte di mobilità effettuate dal singolo utente.
- Elaborazione di un modello più ampio, che permetta di considerare più dettagliatamente gli spostamenti con origine esterna all'area di studio.

- Sviluppo e calibrazione di un modello Activity-Based che consideri parametri caratteristici della realtà italiana, sia in termini di popolazione che di mobilità; possibili miglioramenti possono riguardare l'inserimento di altri modi di trasporto oppure una dettagliata valutazione delle relazioni inter-personali all'interno di una famiglia.
- Applicazione dei risultati del modello Activity-Based per analisi di micro-simulazione del traffico, al fine di migliorare le relative stime della domanda.
- Simulazione della chiusura al traffico di più archi contemporaneamente, valutando gli effetti sinergici dovuti a questa tipologia di scenario.
- Valutazione degli effetti dovuti alla variazione delle caratteristiche del sistema delle attività, come, ad esempio, la riduzione dell'attrattività di una zona per effetto del danneggiamento degli edifici presenti (ad esempio causa evento sismico).

5 Bibliografia

- Altay, N. & Green, W.G.I., 2006. OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175, pp.475–493.
- Appunti, 2014. Appunti del Corso di Pianificazione dei Trasporti, prof. C.Meneguzzer, Università degli Studi di Padova, A.A. 2013/2014.
- Appunti, 2013. Appunti del Corso di Sistemi di Trasporto, prof. C.Meneguzzer, Università degli Studi di Padova, A.A. 2012/2013.
- Argyroudis, S. a., Pitilakis, K.D. & Anastasiadis, a. I., 2005. Roadway Network Seismic Risk Analysis in Urban Areas: The case of Thessaloniki-Greece. *Proceedings of the International Symposium of GEOLINE*. Available at: http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/congres/geoline/GEOLINE2005_S13_pp_1-9_Argyroudis.pdf.
- Argyroudis, S. & Pitilakis, K., 2011. Seismic risk performance of urban transportation systems considering site effects and interaction with the built environment. In Tokyo Institute of Technology, ed. *8th International Conference on Urban Earthquake Engineering*. Tokyo, Japan.
- ATC, 1999. Earthquake damage evaluation data for California. Technical report ATC-13.
- Balijepalli, C. & Oppong, O., 2014. Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *JOURNAL OF TRANSPORT OF GEOGRAPHY*, 39, pp.145–155. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.025>.
- Bell, M.G.H., 2000. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34, pp.533–545.

- Berdica, K., 2002. An introduction to road vulnerability : what has been done , is done and should be done. *Transport Policy*, 9, pp.117–127.
- Bhat, C.R. et al., 2003. *Guidebook on Activity-Based Travel Demand Modeling for Planners - Product 4080-P3*,
- Bifulco, G.N., Carteni, A. & Papola, A., 2010. An activity-based approach for complex travel behaviour modelling. *European Transport Research Review*, 2(4), pp.209–221. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12544-010-0040-3>.
- Bocchini, P. & Frangopol, D.M., 2011. A stochastic computational framework for the joint transportation network fragility analysis and traffic flow distribution under extreme events. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 26, pp.182–193.
- Bocchini, P. & Frangopol, D.M., 2012. Optimal Resilience- and Cost-Based Postdisaster Intervention Prioritization for Bridges along a Highway Segment. *Journal of Bridge Engineering*, 17(1), pp.117–129.
- Bowman, J.L., 1995. *Activity Based Travel Demand Model System with Daily Activity Schedules*. Massachusetts Institute of Technology.
- Bowman, J.L. et al., 2006. The Sacramento Activity-Based Travel Demand Model: Estimation And Validation Results. In *European Transport Conference*. Strasbourg, France, pp. 1–31.
- Bowman, J.L. & Bradley, M.A., 2005. Disaggregate Treatment of Purpose, Time of Day and Location in an Activity-Based Regional Travel Forecasting Model. In *European Transport Conference*. Strasbourg, France.
- Bradley, M.A., Bowman, J.L. & Lawton, T.K., 1999. A Comparison of Sample Enumeration and Stochastic Microsimulation for Application of Tour-Based and Activity-Based Travel Demand Models. In *European Transport Conference*. Cambridge, UK.
- Bu, F. & Xie, Q., 2010. Research on emergency evacuation traffic trip generation forecasting based on Logistic regression. In *IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences, ICEMMS 2010*. pp. 504–507.
- Cairns, S., Atkins, S. & Goodwin, P., 2002. Disappearing traffic? The story so far. *Proceedings of the ICE - Municipal Engineer*, 151(1), pp.13–22. Available at: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/muen.2002.151.1.13>.
- Chang, L., 2012. *Transportations Systems Modeling and Applications in Earthquake Engineering*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Chang, L., Elnashai, A.S. & Spencer, B.F., 2011. Post-earthquake modelling of transportation networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, (March 2015), pp.1–19. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2011.574810>.

- Chang, S.E. & Nojima, N., 2001. Measuring post-disaster transportation system performance : the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective. *Transportation Research Part A*, 35, pp.475–494.
- Chang, S.E., Shinozuka, M. & Moore II, J.E., 2000. Probabilistic Earthquake Scenarios: Extending Risk Analysis Methodologies to Spatially Distributed Systems. *Earthquake Spectra*, 16(3), pp.557–572.
- Chen, A. et al., 2007. Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*, 7, pp.241–256.
- Chen, Y.B. et al., 2012. Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty. *Transportation Research Part A*, 46(3), pp.501–516. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.018>.
- Cho, S. et al., 2000. Analyzing transportation reconstruction networks strategies: A full cost approach. *Review of Urban and Regional Development Studies*, 12(3), pp.229–249.
- Cho, S. et al., 2001. Integrating transportation network and regional economic models to estimate the costs of a large earthquake. *Journal of Regional Science*, 41(1), pp.39–65. Available at: <http://www.usc.edu/sppd/eqloss/nsfreport.pdf>.
- Cho, S. et al., 2001. Integrating Transportation Network and Regional Economic Models to Estimate the Costs of a Large Urban Earthquake. *Journal of Regional Science*, 41(1), pp.39–65. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/0022-4146.00206>.
- Citilabs, 2015. Citilabs. , p.<http://www.citilabs.com/>.
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L. & Alçada-Almeida, L., 2012. Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: the design of urban evacuation plans. *Journal of Transport Geography*, 22, pp.206–218. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966692312000105>.
- Cui, J., An, S. & Zhao, M., 2014. A Generalized Minimum Cost Flow Model for Multiple Emergency Flow Routing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- D'Este, G.M. & Taylor, M.A.P., 2001. Modelling network vulnerability at the level of the nationale strategic transport network. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4(2).
- Das, R. & Hanaoka, S., 2014. Relief inventory modelling with stochastic lead-time and demand. *European Journal of Operational Research*, 235(3), pp.616–623.
- Decò, A., Bocchini, P. & Frangopol, D.M., 2013. A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42, pp.1469–1487.
- Dehghani, M.S., Flintsch, G. & McNeil, S., 2014. Impact of Road Conditions and Disruption Uncertainties on Network Vulnerability. *Journal of Infrastructure Systems*, pp.1–8.

- Dong, Y. & Frangopol, D.M., 2015. Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties. *Engineering Structures*, 83, pp.198–208. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029614006555>.
- Dong, Y., Frangopol, D.M. & Saydam, D., 2014. Sustainability of Highway Bridge Networks Under Seismic Hazard. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(1), pp.41–66. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632469.2013.841600>.
- El-rashidy, R.A. & Grant-muller, S.M., 2014. An assessment method for highway network vulnerability. *JOURNAL OF TRANSPORT OF GEOGRAPHY*, 34, pp.34–43. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.10.017>.
- Evans, S.P., 1976. Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment. *Transportation Research*, 10, pp.37–57.
- FEMA, 2003. HAZUS-MH technical manual.
- FEMA, 2009. *National Bridge Inventory*, Federal highway administration.
- Fiedrich, F., Gehbauer, F. & Rickers, U., 2000. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 35, pp.41–57.
- Finanze, D., 2015. Dipartimento delle Finanze del Ministero dell'Economia e delle Finanze. , p.http://www1.finanze.gov.it/analisi_stat/index.php?
- Frangopol, D.M. & Bocchini, P., 2012. Bridge network performance, maintenance and optimisation under uncertainty: accomplishments and challenges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(4), pp.341–356. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2011.563089>.
- Galindo, G. & Batta, R., 2013. Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), pp.201–211.
- Gao, X. & Sun, D., 2012. Assessment of Road Damage and Schedule Study of Road Repair after Earthquake. *World Automation Congress Proceedings, 2012 World Automation Congress, WAC 2012; Puerto Vallarta; Mexico; 24 June 2012 through 28 June 2012; Code 94214*.
- Giovinazzi, S. & Nicholson, A., 2010. Transport Network Reliability in Seismic Risk Analysis and Management. In *14th European Conference on Earthquake Engineering*. Ohrid, Macedonia, p. 933.
- Giuliano, G. et al., 2010. Estimating Freight Flows for Metropolitan Area Highway Networks Using Secondary Data Sources. *Networks and Spatial Economics*, 10(1), pp.73–91. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11067-007-9024-9>.

- Giuliano, G. & Golob, J., 1998. Impacts of the Northridge Earthquake on Transit and Highway Use. *Journal of Transportation and Statistics*, 1(2), pp.1–20.
- Gordon, P., 2001. Assembling and Processing Freight Shipment Data : Developing a GIS-Based Origin-Destination Matrix for Southern California Freight Flows Department of Economics University of Southern California. *Development*, pp.1–71.
- Goretti, a. & Sarli, V., 2006. Road Network and Damaged Buildings in Urban Areas: Short and Long-term Interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(2), pp.159–175. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10518-006-9004-3>.
- Ham, H., Kim, T.J. & Boyce, D., 2005a. Assessment of economic impacts from unexpected events with an interregional commodity flow and multimodal transportation network model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(10), pp.849–860. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856405000327>.
- Ham, H., Kim, T.J. & Boyce, D., 2005b. Implementation and estimation of a combined model of interregional, multimodal commodity shipments and transportation network flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(1), pp.65–79. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261504000402>.
- Hsu, T.-P. & Jung, W.-S., 2004. The More Reliable Path for Post Great Earthquake Traffic Management. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control*. Taipei, Taiwan.
- Hunt, J.D., Brownlee, A.T. & Stefan, K.J., 2002. Responses to centre street bridge closure - Where the “disappearing” travelers went. *Transportation Research Record*, 1807, pp.51–58.
- Husdal, J., 2004. Reliability and vulnerabbility versus costs and benefits.
- ISTAT, 2015. Censimento dell'industria e dei servizi. , p.<http://dati-censimentoindustriaeservizi.istat.it>.
- Jenelius, E., 2007. Incorporating Dynamics and Information in a Consequence Model for Road Network Vulnerability Analysis. In *The Third International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*. The Hague, The Netherlands.
- Jenelius, E., 2009. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 17(3), pp.234–244. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.06.002>.
- Jenelius, E., 2010. User inequity implications of road network vulnerability. *Journal of Transport and Land Use*, 2, pp.57–73.
- Jenelius, E. & Mattsson, L., 2015. Computers , Environment and Urban Systems Road network vulnerability analysis: Conceptualization , implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, pp.136–147. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.02.003>.

- Jenelius, E. & Mattsson, L., 2012. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions : A grid-based approach with case study. *Transportation Research Part A*, 46(5), pp.746–760. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.003>.
- Jenelius, E., Petersen, T. & Mattsson, L., 2006. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A*, 40, pp.537–560.
- JICA & IMM, 2004. The Study on A Disaster Prevention / Mitigation Basic Plan in Istanbul including Seismic Microzonation in the Republic of Turkey.
- Jones, P., Koppelman, F. & Orfeuil, J.-P., 1990. Activity Analysis: State-of-the-Art and Future Directions. In A. Gower, ed. *Developments in Dynamic and Activity-based Approaches to Travel Analysis*.
- Jotshi, A., Gong, Q. & Batta, R., 2009. Dispatching and routing of emergency vehicles in disaster mitigation using data fusion. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43, pp.1–24.
- Kamel, N.M.O. & Loukaitou-Sideris, A., 2004. Residential Assistance and Recovery Following the Northridge Earthquake. *Urban Studies*, 41.
- Kim, T.J., Ham, H. & Boyce, D.E., 2002. Economic impacts of transportation network changes: Implementation of a combined transportation network and input-output model. *Papers in Regional Science*, 81(2), pp.223–246.
- Kim, Y. & Spencer, B.F., 2008. Seismic Loss Assessment and Mitigation for Critical Urban Infrastructure Systems. *Report No. NSEL-007, Newmark Structural Engineering Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL*, (January).
- Kiremidjian, A. et al., 2007. Seismic Risk Assessment of Transportation Network Systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(3), pp.371–382. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632460701285277>.
- Kiremidjian, A., Williams, M. & Fan, Y.Y., 2006. *PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING Highway Demonstration Project*,
- Knoop, V., Zuylen, H.J. Van & Hoogendoorn, S., 2008. The Influence of Spillback Modelling when Assessing Consequences of Blockings in a Road Network. *EJTIR*, 8(4), pp.287–300.
- Knoop, V.L. et al., 2012. Link-level vulnerability indicators for real-world networks. *Transportation Research Part A*, 46(5), pp.843–854. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.004>.
- Lee, Y.-J. et al., 2011. Post-hazard flow capacity of bridge transportation network considering structural deterioration of bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(7-8), pp.509–521. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2010.493338>.

- Luathep, P. et al., 2011. Large-scale road network vulnerability analysis: a sensitivity analysis based approach. *Transportation*, 38, pp.799–817.
- Mackie, K. & Stojadinović, B., 2004a. Fragility curves for reinforced concrete highway overpass bridges. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada.
- Mackie, K. & Stojadinović, B., 2004b. Residual displacement and post-earthquake capacity of highway bridges. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada.
- Mackie, K.R. & Stojadinović, B., 2006. Post-earthquake functionality of highway overpass bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(1), pp.77–93. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/eqe.534>.
- Mansouri, B., Nourjou, R. & Hosseini, K. a, 2008. Comprehensive GIS-based solution for road blockage due to seismic building collapse in Tehran. In *14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- McNally, M.G. & Rindt, C., 2008. The Activity-Based Approach. *Center of Activity System Analysis - UC Irvine*. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/86h7f5v0>.
- Meloni, I. & Spissu, E., 2003. L'approccio Activity-Based alla domanda di mobilità. In *XXIV Conferenza Italiana di Scienze Regionali*. Perugia, Italia.
- Menoni, S., 2001. Chains of damages and failures in a metropolitan environment: some observations on the Kobe earthquake in 1995. *Journal of hazardous materials*, 86(1-3), pp.101–119. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11532361>.
- Miller, M. et al., 2014. Estimating probabilistic impacts of catastrophic network damage from earthquakes using an activity-based travel model. *Transportation Research Board*.
- Miller, M., 2014. *Seismic risk assessment of complex transportation networks*. Stanford University.
- Moriarty, K.D., Ni, D. & Collura, J., 2007. *Modeling Traffic Flow under emergency evacuation situations: Current practice and future directions*, Washington D.C.
- Najafi, M., Eshghi, K. & Dullaert, W., 2013. A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase. *Transportation Research Part E*, 49(1), pp.217–249.
- Najafi, M., Eshghi, K. & De Leeuw, S., 2014. A dynamic dispatching and routing model to plan/ re-plan logistics activities in response to an earthquake. *OR Spectrum*, 36(2), pp.323–356.
- Nakanishi, H., Matsuo, K. & Black, J., 2013. Transportation planning methodologies for post-disaster recovery in regional communities: the East Japan Earthquake and tsunami

2011. *Journal of Transport Geography*, 31, pp.181–191. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966692313001336>.
- Nariyuki, Y., Hirao, K. & Fukui, Y., 2004. Discriminant analysis of street-blockades in Kobe city due to the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada.
- Nojima, N. & Sugito, M., 2000. Simulation and evaluation of post-earthquake functional performance of transportation network. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Earthquake Commission, Wellington, New Zealand*.
- Ortuzar, D. & Willumsen, L.G., 2011. *MODELLING TRANSPORT 4th Edition* Wiley, ed.,
- Padgett, J.E. & DesRoches, R., 2007. Bridge Functionality Relationships for Improved Seismic Risk Assessment of Transportation Networks. *Earthquake Spectra*, 23(1), pp.115–130. Available at: <http://earthquakespectra.org/doi/abs/10.1193/1.2431209>.
- Pitilakis, K.D. & Kakderi, K.G., 2011. Seismic risk assessment and management of lifelines, utilities and infrastructures. *5Th International Conference on Earthquake Geo Technical Engineering*, p.28.
- Putnam, S.H., 1983. *Integrated Urban Models: Policy Analysis of Transportation and Land Use* P. Ltd, ed., London.
- Reddy, K.H. & Chakroborty, P., 1999. Procedure to estimate the origin-destination matrix from marginal trip totals and ordinal information on matrix elements. *Transportation Planning and Technology*, 22(4), pp.247–270. Available at: <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/03081069908717631&magic=crossref|D404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3>.
- Reggiani, A., Nijkamp, P. & Lanzi, D., 2015. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.012>.
- Rossi, R. et al., 2012. Planning and management of actions on transportation system to address extraordinary events in post-emergency situations. A multidisciplinary approach. *European Transport/Trasporti Europei*, 51(2), p.—.
- Rupi, F. et al., 2015. Ranking links in a road transport network : a practical method for the calculation of link importance. *Transportation Research Procedia*, 5, pp.221–232. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2015.01.003>.
- Rupi, F. et al., 2014. The Evaluation of Road Network Vulnerability in Mountainous Areas : A Case Study. *Networks and Spatial Economics*.

- Sacramento Area Council of Governments with assistance from D K S Associates-Bradley Research and Consulting, 2008. *Sacramento Activity-Based Travel Simulation Model (SACSIM07): MODEL REFERENCE REPORT*,
- Salman, F.S. & Gül, S., 2014. Deployment of field hospitals in mass casualty incidents. *Computers & Industrial Engineering*, 74, pp.37–51. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835214001314>.
- Schweier, C. & Markus, M., 2006. Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(2), pp.177–192.
- Scott, D.M. et al., 2006. Network Robustness Index : A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *JOURNAL OF TRANSPORT OF GEOGRAPHY*, 14, pp.215–227.
- Shan, R. et al., 2012. Comparison of Trip Generation Results from Activity-based and Traditional Four-Step Travel Demand Modeling: A Case Study of Tampa, Florida. In *2012 Conference of the Transportation Association of Canada*. Fredericton, New Brunswick. Available at: <http://transportationassociation.ca/english/annualconference/tac2012/docs/session18/shan.pdf>.
- Sheu, J.-B., 2007. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E*, 43(6), pp.687–709.
- Sheu, J.-B., 2010. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. *Transportation Research Part E*, 46(1), pp.1–17.
- Sheu, J.-B., 2014. Post-disaster relief–service centralized logistics distribution with survivor resilience maximization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 68, pp.288–314.
- Shinozuka, M. et al., 2005. *Socio-Economic Effect of Seismic Retrofit Implemented on Bridges in the Los Angeles Highway Network*, Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=918484>.
- Shiraki, N. et al., 2007. System risk curves: Probabilistic performance scenarios for highway networks subject to earthquake damage. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(1), pp.43–54. Available at: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2007\)13:1\(43\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:1(43)).
- Sisiopiku, V.P., 2007. Application of traffic simulation modeling for improved emergency preparedness planning. *Journal of Urban Planning and Development*, 331(1), pp.51–60.
- Sivakumar, A., 2007. MODELLING TRANSPORT : A Synthesis of Transport Modelling. , (September), p.28. Available at: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/50669701.PDF>.

- Stergiou, E.C. & Kiremidjian, A.S., 2010. Risk assessment of transportation systems with network functionality losses. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), pp.111–125. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732470802663839>.
- Stevanovic, A. & Nadimpalli, B., 2010. Seismic Vulnerability and Emergency Response Analyses of UDOT Lifelines.
- Syner-G D1.1, 2009. *Deliverable 1.1 - Syner-G Work plan*, Available at: <http://www.vce.at/SYNER-G/>.
- Syner-G D3.7, 2011. *Deliverable 3.7 - Fragility functions for roadway system elements*, Available at: <http://www.vce.at/SYNER-G/>.
- Syner-G D4.7, 2012. *Deliverable 4.7 - Prototype Framework for Integration of Physical and Socio-economic Models for Estimating Shelter Needs and Health Impacts in Earthquake Disasters*, Available at: <http://www.vce.at/SYNER-G/>.
- Syner-G D5.1, 2011. *Deliverable 5.1 - Systemic vulnerability and loss for building aggregates in urban scale*, Available at: <http://www.vce.at/SYNER-G/>.
- Syner-G D5.5, 2012. *Deliverable 5.5 - Systemic vulnerability and loss for transportation systems*, Available at: <http://www.vce.at/SYNER-G/>.
- Syner-G D6.1, 2013. *D6.1 - Application and validation study to the city of Thessaloniki (Greece)*,
- Syner-G D6.2, 2013. *D6.2 - Application and validation study to the city of Vienna (Austria)*,
- Syner-G D6.3, 2012. *D6.3 - Application and validation study to a motorway system (Italy)*,
- Taylor, M.A.P., 2008. Critical Transport Infrastructure in Urban Areas: Impacts of Traffic Incidents Assessed Using Accessibility-Based Network Vulnerability Analysis. *Growth and Change*, 39(4), pp.593–616.
- Taylor, M.A.P., 2012. Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks. *Transportation Research Part A*, 46(5), pp.761–771. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.008>.
- Taylor, M.A.P., 2007. The Assessment of the Regional Network Vulnerability : The Case Study of The Green Triangle Region. In *29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR)*. Transport System Centre, University of South Australia, Adelaide, Australia.
- Taylor, M.A.P. & D'Este, G.M., 2003. Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical elements of transport infrastructure. In *26th Australasian Transport Research Forum*. Wellington, New Zealand.

- Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. & D'Este, G.M., 2006. Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. *Networks and Spatial Economics*, 6, pp.267–291.
- Torbol, M. & Shinozuka, M., 2014. The directionality effect in the seismic risk assessment of highway networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(2), pp.175–188. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2012.716069>.
- Tung, P.T., 2004. *Road vulnerability assessment for earthquakes – A case of study of Lalitpur, Kathmandu - Nepal*. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Wang, H., Du, L. & Ma, S., 2010. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transportation Research Part E*, 69, pp.160–179.
- Wang, Z. et al., 2015. Recent Advances in Modeling the Vulnerability of Transportation Networks. , pp.1–9.
- Wegener, M., 2004. Overview oh land-use transport models. In P. Science, ed. *Transport Geography and Spatial Systems. Handbook 5 of the Handbook in Transport*. Kidlington, UK, pp. 127–146.
- Xie, C. & Turnquist, M.A., 2009. Integrated evacuation network optimization and emergency vehicle assignment. *Transportation Research Record*, 2091, pp.79–90.
- Ye, M. et al., 2012. Methodology and its application for community-scale evacuation planning against earthquake disaster. *Natural Hazards*, 61(3), pp.881–892.
- Yi, W. & Özdamar, L., 2007. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), pp.1177–1193.
- Zhang, L. et al., 2013. Large-Scale Agent-Based Transport Simulation in Shanghai, China. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2399, pp.34–43. Available at: <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2399-04>.
- Zhou, Y. et al., 2004. Seismic risk assessment of retrofitted transportation systems. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada.
- Zhou, Y., Banerjee, S. & Shinozuka, M., 2010. Socio-economic effect of seismic retrofit of bridges for highway transportation networks: a pilot study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), pp.145–157. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732470802663862>.
- Zhu, S. & Levinson, D., 2008. Planned and Unplanned Disruptions to Transportation Networks. *Minnesota Department of Transportation Office of Investment management Research Services Section*. Available at: <http://www.lrrb.org/pdf/TRS0803.pdf>.

Vulnerabilità di una rete di trasporto. Analisi dell'effetto della variazione della domanda di mobilità mediante un modello Activity-Based

Zolfaghari, M.R. & Moghesi, M., 2012. Probabilistic Seismic Damage Assessment for Urban Transportation Network. In *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal.