

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM - Trasporti

TESI DI LAUREA

in

Pianificazione dei Trasporti

**LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IN UNA RETE
STRADALE: UN'APPLICAZIONE ALLA RETE
PROVINCIALE DI BOLZANO**

CANDIDATO
Marco Donzelli

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Federico Rupi

CORRELATORI:
Dott. Ing. Antonio Danesi
Dott. Ing. Guido Rossi

Anno Accademico 2009/10

Sessione III

INDICE

INTRODUZIONE	3
1. IL RISCHIO PER LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO	7
1.1 Tipologie di incidenti	7
1.2 L'equazione del rischio	9
1.3 Valutazione della pericolosità	13
2. VULNERABILITA' ED ESPOSIZIONE DI UNA RETE STRADALE	17
2.1 Definizioni di vulnerabilità	17
2.2 Valutazione della vulnerabilità	23
2.3 Definizioni di esposizione	30
2.4 Valutazione dell'esposizione	32
3. ANALISI DEL RISCHIO PER UNA RETE STRADALE EXTRAURBANA	35
3.1 Introduzione	35
3.2 Approccio metodologico proposto	36
3.2.1 Analisi della rete in condizioni normali di esercizio	38
3.2.2 Calcolo degli indici di vulnerabilità	39
3.2.3 Valutazione dell'esposizione	44
3.2.4 Costruzione di una scala di ranking	47
3.3 Applicazione con il software di pianificazione CUBE	48

4. APPLICAZIONE ALLA RETE PROVINCIALE DI BOLZANO	51
4.1 Introduzione	51
4.2 Analisi del territorio e della rete stradale	52
4.3 I modelli di trasporto per l'analisi della rete stradale della Provincia di Bolzano	56
4.3.1 La rete di trasporto della Provincia di Bolzano	57
4.3.2 La domanda di trasporto della Provincia di Bolzano	59
4.3.3 I modelli di assegnazione	64
4.4 Il caso dell'interruzione degli archi	67
4.4.1 Matrice unitaria e rete non congestionata (TON)	68
4.4.2 Matrice O/D e rete congestionata (DUE)	69
4.5 Il caso della riduzione di capacità degli archi	82
4.6 Confronto dei risultati	85
CONCLUSIONI	91
BIBLIOGRAFIA	95

INTRODUZIONE

Nell'arco degli ultimi vent'anni le tematiche concernenti l'affidabilità e la vulnerabilità delle infrastrutture stradali sono divenute sempre più oggetto di considerevole attenzione. È infatti opinione condivisa che disastri e rischi di origine naturale e antropica che colpiscano le arterie di comunicazione abbiano gravissime ricadute sia sul territorio che sulla popolazione insediata.

Inoltre il sistema dei trasporti rientra a pieno titolo nella categoria delle *lifelines*, ovvero si configura come un sistema a rete che per sua natura collega vari ambiti spaziali garantendo una moltitudine di servizi essenziali ed indispensabili per la sopravvivenza della popolazione, non ultimo la possibilità di portare soccorso nelle località interessate da disastri naturali o da attentati.

Vista l'importanza della rete dei trasporti, garantire la sua funzionalità è di centrale interesse sia dal punto di vista degli utilizzatori del sistema che da quello dei gestori, sia pubblici che privati. Per questi ultimi è poi fondamentale avere a disposizione degli strumenti che consentano di gestire con efficacia le limitate risorse finanziarie disponibili per ridurre per quanto possibile la vulnerabilità.

Tutto ciò fa capire quanto sia importante lo sviluppo di una metodologia che consenta di valutare il rischio a cui è soggetta una rete di trasporto e di classificare i vari elementi che la compongono in funzione della loro maggiore o minore propensione a rispondere ai danni (naturali e non) che potrebbero essere perpetrati dall'esterno sul sistema.

Un tale studio potrebbe avere molteplici sviluppi ed essere utilizzato negli ambiti più disparati, come ad esempio all'interno dei Piani di Protezione Civile nei quali deve essere indicata la viabilità di emergenza. Altro obiettivo potrebbe poi essere quello di identificare i tronchi maggiormente vulnerabili all'interno di una rete al fine di fornire un ordine di priorità nell'allocazione delle risorse finanziarie destinate agli interventi di manutenzione.

Scopo di questo studio è stato quindi quello di sviluppare innanzitutto una serie di indicatori per la valutazione del rischio e delle sue componenti e poi una metodologia che consentisse la loro valutazione allo scopo di costruire una graduatoria dei vari elementi di una rete in funzione della loro propensione a mantenere la loro funzionalità in presenza di eventi calamitosi.

Nel capitolo 1 viene affrontata un'analisi del concetto di rischio, individuando quali possono essere i principali dissesti che possono compromettere la funzionalità delle infrastrutture viarie e introducendo i fattori che contribuiscono alla determinazione del rischio, ovvero la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.

Nel secondo capitolo vengono descritte le principali metodologie per la valutazione del rischio presenti in bibliografia e gli indicatori di vulnerabilità ed esposizione a cui fanno riferimento.

Nel capitolo 3 viene invece introdotta una nuova metodologia, studiata per essere applicata nella valutazione del rischio nei confronti di eventi generici nelle reti stradali.

Infine nel capitolo 4 viene presentata un'applicazione della metodologia introdotta nel capitolo 3, che ha consentito l'analisi del rischio nei confronti dei dissesti di tipo idrogeologico nella rete stradale della Provincia Autonoma di Bolzano.

1. IL RISCHIO PER LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

1.1 Tipologie di incidenti

Un incidente che interessa un'infrastruttura viaria è un evento che, direttamente o indirettamente, può portare a una riduzione dell'efficienza della rete.

Tali eventi possono essere suddivisi seguendo differenti classificazioni. Considerando le cause che possono portare ad eventi rischiosi, possono essere diversificati in:

- *eventi naturali*, (come ad esempio terremoti, alluvioni) direttamente legati a fattori non controllabili a priori;
- *eventi antropici*, ovvero causati dall'attività umana.

Si potrebbe ancora considerare lo stesso sistema dei trasporti come una delle possibili cause del rischio: ad esempio, l'ammaloramento delle strutture e delle sovrastrutture può portare, in situazioni estreme, al collasso delle vie. Il

trasporto di materiali pericolosi (Hazmat) può essere considerato come un esempio controverso: esso infatti comporta l'esposizione a rischio non solo dell'infrastruttura stessa, ma anche delle aree vicine, della popolazione, dell'ambiente.

Se invece si classificano gli eventi in base alla loro probabilità di accadimento si può parlare di:

- *eventi ordinari*, come l'allagamento delle sede stradale o ferroviaria;
- *eventi eccezionali*, ad esempio le alluvioni, i terremoti, le frane.

Gli eventi possono essere, ancora, suddivisi in:

- *prevedibili*, come ad esempio manifestazioni meteorologiche particolarmente intense, che risultano essere prevedibili anche con largo anticipo grazie allo sviluppo di tecnologie avanzate nel campo della meteorologia; è quindi possibile porre in atto tutte le misure cautelative necessarie per la salvaguardia della popolazione e dei beni;
- *imprevedibili*, i fenomeni legati a movimenti della crosta terrestre, come ad esempio i terremoti o le eruzioni vulcaniche che sono ancora difficilmente prevedibili e conseguentemente risulta difficile riuscire a mettere in moto con sufficiente anticipo tutte le misure di soccorso necessarie.

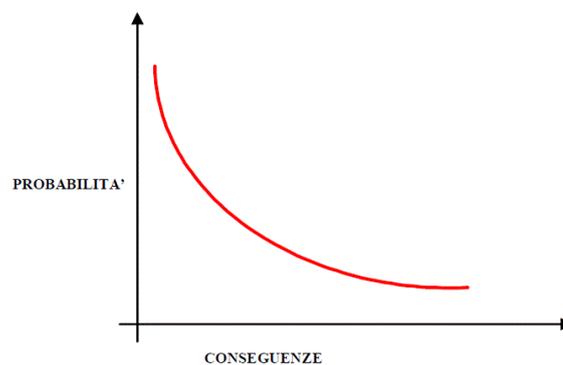
1.2 L'equazione del rischio

Generalmente per studiare un qualsiasi fenomeno che potrebbe implicare conseguenze negative per la vita e la salute delle persone o anche per l'ambiente e le strutture si fa riferimento al concetto di rischio.

Lo studio sistematico dei rischi ai quali possono essere esposte le infrastrutture di trasporto è infatti uno strumento indispensabile se si vuole garantire il livello di servizio di una data rete.

La definizione di rischio riguarda la combinazione di due elementi: (1) la probabilità che un evento occorra e (2) le conseguenze negative (costi) causate allorché ciò si verifichi. I due fattori, come è facilmente intuibile, sono fra loro legati da una relazione di inversa proporzionalità: eventi più probabili solitamente comportano conseguenze meno pesanti, mentre gli eventi rari sono generalmente più disastrosi.

Figura 1 Curva del rischio



Un modo per poter spiegare tale concetto è l'analisi della cosiddetta *curva di rischio* (fig.1); in questa ad eventi con probabilità di accadimento elevate

corrispondono conseguenze trascurabili e viceversa. Sono eventi con alta probabilità, ad esempio, le congestioni stradali, che in genere non determinano gravi conseguenze; eventi a minore probabilità sono lo sversamento di sostanze pericolose, i terremoti, le alluvioni, che, come noto, generano conseguenze ben più gravi.

Quando si parla di affidabilità di una rete di trasporto intendiamo la capacità, che essa dovrebbe mantenere per un dato periodo di tempo, di continuare ad offrire le prestazioni al livello di servizio che le erano state attribuite in fase di progettazione. Chiaramente maggiore sarà il rischio al quale l'infrastruttura di trasporto viene esposta minore sarà il livello di affidabilità che essa sarà capace di garantire. Risulta quindi di fondamentale importanza poter non soltanto definire il concetto di rischio, ma anche quantificarlo in qualche modo.

Il *rischio* R può essere definito in generale come l'entità del danno atteso in una data area in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso. Esso è considerato in generale come il prodotto di tre fattori distinti: la *pericolosità*, o probabilità di accadimento dell'evento, il valore (*esposizione*) degli elementi a rischio, e la *vulnerabilità* degli elementi a rischio.

In maniera analoga l'United Nations Disaster Relief Coordination Office definisce:

- la *pericolosità* (P) come la probabilità che l'evento accada in un certo intervallo di tempo e in una zona tale che potrebbe influenzare l'elemento a rischio;

- la *vulnerabilità* (V) come il grado di perdita, che può essere espresso in una scala da zero, che significa nessun danno, a uno, che significa perdita totale. Tale perdita si può produrre su un certo elemento o su un gruppo di elementi esposti a rischio al seguito del verificarsi di un evento calamitoso;
- l'*esposizione* (E), o anche il valore dell'elemento a rischio, che rappresenta il valore degli elementi a rischio in una determinata area, come, ad esempio, la popolazione, le proprietà, i servizi pubblici, le attività economiche a rischio. Tale valore può essere espresso in termini monetari o in termini di quantità delle entità esposte.

Seguendo la definizione suddetta, il rischio totale può essere espresso mediante la seguente equazione:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

Si può anche valutare il *danno potenziale* D (o Magnitudo), che esprime l'entità potenziale delle perdite nel caso in cui si verifichi l'evento temuto. Il danno può essere espresso da:

$$\text{Danno} = \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

Sulla base di queste definizioni il rischio insistente sulle infrastrutture di trasporto può essere valutato per fasi successive stimando la pericolosità, l'esposizione e la vulnerabilità e poi combinando queste quantità.

Un approccio di tale tipo è riscontrabile nel lavoro di Cafiso e altri (2001). Gli autori, per diverse tipologie di rischio (sismico, vulcanico, idrogeologico, incendi, etc) e mediante l'ausilio di strumenti GIS, valutano attraverso tre successive fasi, la pericolosità, l'esposizione e la vulnerabilità di infrastrutture stradali, per arrivare infine a una valutazione del rischio totale sulle strade della provincia di Catania. Ciò viene fatto mediante la sovrapposizione di tre cartografie di sintesi e arrivando in tale modo alla determinazione di diverse classi di rischio.

Tabella 1 Fasi della valutazione del rischio

FASI	SOTTOFASI	STRUMENTI	ELABORATI FINALI
PERICOLOSITA'	Distinte in base alle tipologie di rischio cui è esposto il territorio	Dati storici Carte geologiche Studi specifici Monitoraggi	Carta della pericolosità
ESPOSIZIONE	Esposizione diretta	TGM Flusso di traffico orario	Carta dell'esposizione delle lifelines
	Esposizione indiretta	Popolazione Manufatti Beni	
VULNERABILITA'	Vulnerabilità di rete	Indicatori e indici di vulnerabilità	Carta della vulnerabilità delle lifelines
	Vulnerabilità funzionale		
	Vulnerabilità strutturale		

Nella tabella 1 si sintetizzano le tre fasi predette, gli strumenti utilizzati in ciascuna e gli elaborati di sintesi che dovrebbero produrre. Dei tre momenti si parlerà in maniera più approfondita nei successivi paragrafi.

1.3 Valutazione della pericolosità

La pericolosità è una misura capace di valutare il livello di attesa rispetto al verificarsi di un determinato evento e cerca di stabilirne l'entità, ovvero la magnitudo, nonché la definizione spaziale e temporale dello stesso. Uno studio approfondito della pericolosità dovrebbe essere in grado di stabilire dove, come e con quali conseguenze si potrà verificare un determinato evento.

Una prima e semplice valutazione della pericolosità in un'area può essere fatta elencando tutti i possibili eventi pericolosi che possono interessare il sistema dei trasporti, e in un secondo momento specificando dove e come questi eventi potrebbero verificarsi.

Questo può essere fatto utilizzando principalmente due metodologie (Cova & Conger, 2004). Si possono identificare i rischi potenziali in una regione e sovrapporre tali rischi con la rete stradale, identificando in questo modo i punti dove la rete è soggetta ad un evento rischioso, oppure si può focalizzare l'attenzione su un singolo collegamento della rete ed elencare per questo tutti i possibili eventi ai quali può essere soggetto.

L'obiettivo è comunque la realizzazione di una *mappa del rischio*, nella quale i diversi elementi vengono segnalati e evidenziati in maniera differente in base al rischio che insiste su di esse. Per far ciò si possono, anche in questo caso, identificare due tipologie di approccio. Nella prima, attraverso equazioni che descrivono il fenomeno, viene ricostruito il modello che governa il processo fisico allo studio. Altrimenti la valutazione della pericolosità può essere fatta attraverso

la ricostruzione della serie di dati storici che hanno interessato una determinata area; in questo modo si arriva a determinare, attraverso relazioni empiriche, le condizioni che possono portare al verificarsi dell'evento. In realtà le differenze tra questi due approcci spesso non sono molto evidenti.

Quello che appare chiaro è che per arrivare a una valutazione della pericolosità insistente sulla rete stradale si rende necessaria una collaborazione con tecnici del settore, i quali arriveranno a determinare tutte le dimensioni coinvolte nell'analisi della pericolosità, di cui le più importanti sono la scala spaziale e la scala temporale dell'evento.

La tabella 2 è stata realizzata per alcune tipologie di eventi, e suggerisce, a seconda degli stessi, i dati e le elaborazioni che possono essere utilizzate per arrivare alla realizzazione di una *carta finale della pericolosità*, nella quale il territorio analizzato è suddiviso in diverse aree in funzione della pericolosità che le caratterizza.

La scala di rappresentazione delle carte di pericolosità viene valutata a seconda dell'estensione del territorio in esame, dipende da essa anche il livello di dettaglio e di informazioni rappresentabili. All'interno della carta le diverse parti del territorio sono distinte in base alle classi di pericolosità che le contraddistinguono.

Tabella 2 Valutazione della pericolosità

EVENTI	DATI UTILIZZABILI	ELABORAZIONI FINALI	
PERICOLOSITA' SISMICA	Dati serie storiche eventi	Carta macrozonazione sismica Carta microzonazione sismica	
	Caratteristiche sismologiche e sismogenetiche del territorio		
	Caratteristiche geologiche e geomeccaniche del terreno		
PERICOLOSITA' VULCANICA	Dati serie storiche eventi	Carta della pericolosità vulcanica	
	Carte geologiche		
	Studi geologici		
	Fotografie aeree		
PERICOLOSITA' IDROGEOLOGICA	FRANE	Dati serie storiche eventi	Carta suscettibilità alla frana
		Carte geologiche	
		Studi del terreno	
	Fotogrammetrie		
	Ispezioni e monitoraggi		
	Analisi di stabilità dei pendii		
INONDAZIONI	Dati serie storiche eventi	Carta della suscettibilità a esondazioni	
	Diagrammi statistici e distribuzione spaziale degli eventi		
VALANGHE	Dati serie storiche eventi	Carta della suscettibilità a valanghe	
	Carte topografiche		
	Fotografie aeree		
	Carte geologiche		
	Carta della vegetazione		
	Carte meteo e precipitazioni nevose		
	Studi e monitoraggi sul sito		

2. VULNERABILITA' ED ESPOSIZIONE DI UNA RETE STRADALE

Il successivo passo per arrivare a una definizione completa del rischio è la valutazione della vulnerabilità e dell'esposizione di ogni elemento della rete.

In particolare lo studio della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto costituisce un tema importante e di crescente interesse. È infatti opinione condivisa che disastri e rischi di origine naturale e antropica che colpiscono le arterie di comunicazione abbiano gravissime ricadute sia sul territorio che sulla popolazione insediata.

2.1 Definizioni di vulnerabilità

La vulnerabilità di un dato elemento può essere associata al grado di perdita che questo subisce in seguito al verificarsi di un evento dannoso di una data magnitudo. Essa valuta quindi la propensione degli elementi o dei sistemi complessi a subire danni in relazione alle proprie caratteristiche intrinseche.

Secondo questa definizione la vulnerabilità può essere espressa in una scala che va da 0 (nessun danno) ad 1 (perdita totale).

Cafiso e altri (2001) differenziano la vulnerabilità per quanto riguarda il rischio sismico in due tipologie:

- *vulnerabilità diretta*: misura la propensione di un singolo elemento, semplice o complesso a subire danni, o collassare a seguito dell'evento calamitoso;
- *vulnerabilità indotta*: si riferisce agli effetti della crisi dell'organizzazione del territorio.

A queste definizioni di vulnerabilità *DeAndrea* e *Condorelli* (2006) ne aggiungono altre, che distinguono la:

- *vulnerabilità differita*: in riferimento agli effetti che si manifestano in una fase successiva all'evento, che creano disagi dovuti all'impossibilità di usufruire di alcune infrastrutture, delle proprie abitazioni, o ancora dall'interruzione di diverse attività produttive e lavorative dell'area;
- *vulnerabilità funzionale*: che si riferisce ai danni, valutabili anche nel lungo periodo, che derivano dalla mancata funzionalità di alcuni elementi;
- *vulnerabilità socioeconomica*: la quale deriva direttamente dalle condizioni sociali, economiche, politiche che caratterizzano il territorio colpito dall'evento; tali condizioni infatti determinano le modalità e i tempi di ripresa delle aree interessate da eventi disastrosi.

In ogni caso, gli autori tendono a sottolineare come la vulnerabilità si riferisca unicamente alle caratteristiche intrinseche dell'infrastruttura. In questo modo si opera una netta distinzione tra caratteristiche dell'area di studio, che sono direttamente relazionate alla pericolosità, e caratteristiche di un manufatto, che determinano invece la vulnerabilità.

Altri autori, sempre in riferimento agli eventi sismici, differenziano tra:

- *vulnerabilità intrinseca*: si riferisce a valori caratteristici degli elementi che costituiscono l'infrastruttura;
- *vulnerabilità estrinseca*: valuta la vulnerabilità di elementi che non fanno parte del solido stradale, ma il cui collasso, data la vicinanza a quest'ultimo, può compromettere la stabilità della strada, o causarne la chiusura.

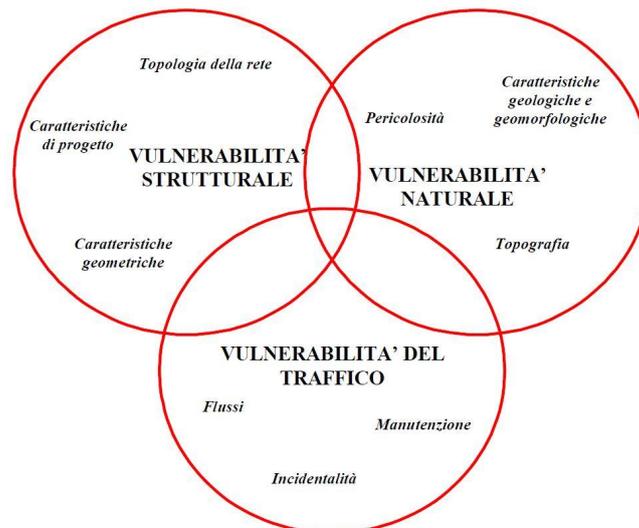
Entrambe le tipologie sono relative ad una vulnerabilità strutturale, perché riferite alle caratteristiche strutturali del solido stradale e dei manufatti prospicienti ad esso.

Per quanto riguarda la vulnerabilità di una rete di trasporto ancora non è possibile individuare una definizione che sia comunemente accettata. Ciò che invece appare chiaro, e che viene riportato da diversi autori, è che gli studi sulla vulnerabilità di una rete dovrebbero concentrarsi più sulle conseguenze dell'evento, che sull'evento in sé.

Husdal (2004) identifica tre tipologie di vulnerabilità a cui può essere soggetta una rete stradale (fig. 2):

- *vulnerabilità strutturale*: si riferisce alla strada in sé stessa e quindi alle sue caratteristiche costruttive, in termini, ad esempio, di larghezza, di caratteristiche geometriche e di progetto, di presenza e caratteristiche delle opere d'arte (ponti, gallerie, ecc.);
- *vulnerabilità naturale*: si riferisce alle caratteristiche del territorio attraversato dalla strada e ai rischi naturali che lo contrassegnano;
- *vulnerabilità relativa al traffico o generata dal traffico*: si riferisce alle caratteristiche che descrivono il flusso di traffico e le condizioni risultanti al variare di quest'ultimo in particolari situazioni (ore di punta, particolari giorni della settimana, durante le operazioni di manutenzione, ecc.).

Figura 2 La vulnerabilità secondo Husdal



Una rete stradale può essere soggetta ed esposta contemporaneamente a queste tre tipologie di vulnerabilità che possono interagire tra di loro, e aumentare conseguentemente il livello di vulnerabilità globale. In particolare Husdal differenzia il concetto di vulnerabilità da quello di affidabilità: se infatti l'affidabilità attiene al funzionamento degli archi che compongono la rete, e può essere vista come una misura del grado di stabilità della rete stessa, la vulnerabilità invece è legata alle conseguenze date dal collasso o dal malfunzionamento di un arco; in questo senso la vulnerabilità viene vista come una semplice misura delle conseguenze.

Altri autori non stabiliscono invece una differenza così netta tra *affidabilità* e vulnerabilità. Berdica (2002) intende per vulnerabilità di un sistema di trasporto l'affidabilità, ovvero la possibilità di poter garantire l'utilizzo della rete sotto determinate condizioni e in un dato periodo di tempo (*serviceability*). In questo senso misure dell'affidabilità di una rete possono rappresentare uno strumento per valutare la vulnerabilità della rete stessa, e l'affidabilità viene vista come un complemento della vulnerabilità.

Inoltre Berdica definisce la vulnerabilità come la suscettibilità di una rete di trasporto agli incidenti, dove per incidente si intende un evento che può direttamente o indirettamente causare una diminuzione dell'affidabilità.

Taylor e D'Este (2004) legano poi il concetto di vulnerabilità ancora a quello di *accessibilità*, intesa come la possibilità di raggiungere tutte le zone a partire da una determinata origine (accessibilità attiva). La vulnerabilità in questo

modo può essere definita in termini di qualità globale di accesso da un dato nodo ad altre parti della rete.

Anche questi Autori, come d'altronde Husdal, Cafiso, D'Andrea e Condorelli, rimarcano la differenza esistente tra vulnerabilità e affidabilità. Essi infatti legano il concetto di vulnerabilità alle conseguenze dell'evento, mentre il concetto di affidabilità è legato alla probabilità che l'evento possa accadere. In questo senso l'affidabilità, interpretata come probabilità che un evento si verifichi, può anche essere intesa come pericolosità e risulta essere qualcosa di differente rispetto alla vulnerabilità, la quale viene invece valutata in termini di debolezza dell'elemento.

Jenelius e altri (2006) riportano infine il concetto di vulnerabilità a quello di *criticità* dei diversi componenti che costituiscono la rete. Maggiore è la criticità di un elemento del sistema (arco o nodo) e maggiore sarà il danno causato all'intero sistema dall'interruzione dello stesso elemento. Attraverso opportuni indicatori può essere poi valutata l'esposizione dei nodi e degli archi di una rete di trasporto.

Riassumendo, esistono diverse interpretazioni del concetto di vulnerabilità. In particolare, se consideriamo una scala di analisi decrescente si può parlare di vulnerabilità di una regione, di vulnerabilità di un'intera rete, di vulnerabilità di elementi che costituiscono la rete (archi, nodi) e di vulnerabilità dovuta alle caratteristiche progettuali di un particolare manufatto (ponti, gallerie, rilevati, etc).

2.2 Valutazione della vulnerabilità

La vulnerabilità nei sistemi di trasporto su strada può essere vista come la loro sensibilità agli incidenti, che può portare a una più o meno marcata diminuzione dell'efficienza e dell'affidabilità di una rete stradale.

In letteratura sono state proposte parecchie definizioni e metodologie per il calcolo della vulnerabilità. Da una prima analisi si evince che esse possono essere divise essenzialmente in due macro-gruppi: (1) quelle che considerano solo il sistema dell'offerta e (2) quelle che invece considerano anche l'interazione domanda-offerta.

Secondo il primo approccio la vulnerabilità di una rete può essere associata al livello di accessibilità: in questo modo le misure di accessibilità possono fornire una valutazione della vulnerabilità. Le procedure analitiche proposte individuano così l'affidabilità delle connessioni e i punti di debolezza della rete.

Nel secondo caso invece viene considerata l'affidabilità dei tempi di viaggio. Ad esempio per Taylor ed altri (2004) una misura della vulnerabilità è rappresentata dalla variazione del costo generalizzato di trasporto, tra due nodi della rete quando un arco della rete smette di funzionare; in questo caso per costo generalizzato si intende una misura della disutilità creata dal collasso dell'arco, come l'aumento di distanze di percorrenza, del tempo di viaggio, del costo di trasporto, ecc.

In questo modo, considerando una rete di N nodi e E archi, nel caso del collasso di un arco vengono calcolate le variazioni dei tempi di percorrenza tra i diverse coppie O/D della rete; ad ogni nodo centroide viene quindi associato un valore, pesato in funzione degli spostamenti generati dal nodo stesso. Il risultato dello studio è quindi una matrice dove per ogni nodo centroide viene mostrata la perdita di accessibilità al nodo stesso in caso di collasso di un arco. Nel caso specifico dello studio la perdita di accessibilità è valutata come :

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ijrs}$$

dove:

- v_{ijrs} è la differenza del costo generalizzato di trasporto, dal nodo i al nodo j quando l'arco e_{rs} non è più funzionante;
- d_{ij} sono gli spostamenti tra i e j .
- v_{ijrs} a sua volta è dato dalla formula:

$$v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - e_{rs})]$$

rappresentante la differenza del costo di trasporto lungo il percorso tra i e j nel caso di rete intatta e nel caso di rete funzionante senza l'arco e_{rs} .

Il problema viene affrontato in maniera analoga da Jenelius e altri (2006) nell'analisi della rete stradale della Svezia del Nord: anche in questo caso si suppongono interruzioni localizzate di alcuni archi della rete e vengono

conseguentemente valutate le variazioni di accessibilità. In questo caso l'attenzione viene concentrata sia sulla valutazione dell'importanza rivestita dall'arco all'interno della rete, sia dall'esposizione dei diversi nodi centroidi. Nello specifico l'importanza dell'arco viene valutata determinando la sommatoria degli incrementi dei tempi di viaggio da ogni nodo pesati in base agli spostamenti generati dallo stesso nodo verso il nodo di destinazione. L'esposizione del comune invece viene valutata sempre in base agli incrementi del tempo di viaggio che il comune deve subire a causa della chiusura di uno o più archi, e pesata attraverso gli spostamenti generati da quel comune. In questo modo importanza ed esposizione vengono interpretati come indici di vulnerabilità, sia del nodo che del collegamento. La base dalla quale vengono dedotte le misure di importanza e di esposizione è data dalla formula:

$$\Delta c_{ij}^k = c_{ij}^k - c_{ij}^0$$

dove c_{ij}^k e c_{ij}^0 rappresentano il costo di trasporto da un nodo i a un nodo j rispettivamente nel caso in cui un elemento della rete k sia interrotto e nella situazione iniziale di normale funzionamento della rete.

Oltre all'aumento di costo c'è però un'altra più gravosa conseguenza che deve essere considerata: quando un elemento k viene chiuso, potrebbe succedere che la rete si trovi ad essere divisa in due parti disconnesse. Il tempo di viaggio tra i nodi delle diverse parti diventa così infinito, con la conseguenza che una parte della domanda risulta essere insoddisfatta.

Per tenere in conto questo fatto viene allora introdotto il concetto di *domanda insoddisfatta* u_{ij}^k :

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

dove x_{ij} rappresenta la domanda di trasporto da i a j . Quindi la domanda insoddisfatta sarà uguale alla domanda di trasporto nel caso in cui l'arco interrotto determini un incremento del tempo di viaggio infinito.

Jenelius distingue allora tra collegamenti che non determinano la separazione della rete in due parti (*non-cut links*) e collegamenti che, quando interrotti, determinano la separazione di una rete in due parti distinte (*cut links*). Le misure basate sull'incremento del tempo di viaggio vengono limitate ai *non-cut links*, mentre quelle basate sulla domanda insoddisfatta vengono definite per tutti i collegamenti.

Nel caso di interruzione di un *non-cut link*, se ne può valutare l'importanza attraverso la seguente formula:

$$\text{Importance}_{\text{net}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^k - c_{ij}^0)}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad k \in E^{nc}$$

dove:

- k è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;

- w_{ij} rappresentano i pesi che possono essere attribuiti per poter valutare l'importanza che i singoli nodi rivestono all'interno della rete;
- E^{nc} rappresenta l'insieme dagli archi che non determinano l'interruzione dei collegamenti tra alcune coppie O/D della rete.

Se i pesi sono posti tutti uguali allora tutte le origini e le destinazioni all'interno della rete godono della stessa importanza. Un approccio di questo tipo rientra appieno nella prospettiva di "uguali opportunità", secondo la quale tutte le strade sono ugualmente importanti, indipendentemente da quanto vengono utilizzate: le strade infatti sono un bene pubblico e devono garantire a tutte le persone, ovunque esse si trovino, la medesima possibilità di spostarsi. Diversamente si potrebbero invece assegnare pesi differenti a seconda dell'effettivo utilizzo delle varie infrastrutture, stimato ad esempio attraverso il TGM. In questo modo si farebbe certamente una valutazione meno "democratica" ma sicuramente più orientata a criteri di funzionalità e economicità.

Nel caso di un "cut link" viene valutata l'esposizione della rete facendo riferimento alla domanda non soddisfatta. La formula utilizzata in questo caso è:

$$\text{Importance}_{\text{net}}^{\text{uns}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^k}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}} \quad k \in E^c$$

dove:

- k è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;

- u_{ij}^k è la domanda insoddisfatta per effetto dell'interruzione dell'arco k ;
- x_{ij} rappresenta la domanda di trasporto da i a j ;
- E^c rappresenta l'insieme dagli archi che determinano l'interruzione dei collegamenti tra alcune coppie O/D della rete.

Gli indici di vulnerabilità proposti da Taylor e deEste (2004) e da Jenelius e altri (2006) rappresentano in qualche modo misure di vulnerabilità funzionale di una rete stradale, in quanto valutano le conseguenze, in termini di aumento dei tempi di percorrenze, o delle distanze, dovute al mancato funzionamento di un elemento della rete.

La valutazione della vulnerabilità strutturale di tronchi stradali, ma anche di singoli manufatti, può essere fatta anche da un punto di vista qualitativo. Mentre un'analisi di tipo quantitativo tende ad individuare indicatori e valori numerici che restituiscano un valore di vulnerabilità di un elemento, le analisi qualitative, invece, consentono di esprimere un giudizio sulla vulnerabilità.

Uno strumento spesso utilizzato per le analisi qualitative sono le checklist. Una metodologia per l'analisi speditiva della vulnerabilità ed eventi sismici è identificata nel lavoro di Cafiso e altri (1999) dove la vulnerabilità di un tronco stradale è data dalla combinazione tra vulnerabilità strutturale dei componenti (V_s), e vulnerabilità funzionale (V_f). In particolare, per la determinazione della vulnerabilità strutturale, sono realizzate schede di valutazione per ponti e viadotti, rilevati, trincee e gallerie, sulla base degli elementi più importanti che sono

coinvolti nel fenomeno, e in base a queste, viene espresso un giudizio di vulnerabilità. La vulnerabilità funzionale, invece, dipende dalle possibili alternative al tronco stradale individuabili nella rete e dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura stradale. Sulla base di tali assunzioni la vulnerabilità globale di un tronco stradale sarà data da:

$$V_g = V_s \times (G \times R_e)$$

dove:

- V_g è la vulnerabilità globale del tronco stradale;
- V_s è la vulnerabilità strutturale determinata in base a check-list;
- G sono le caratteristiche geometriche;
- R_e è una misura dei percorsi alternativi al tronco considerato.

L'infrastruttura viaria viene considerata come un sistema complesso dato dall'unione di più componenti, ciascuno con le proprie caratteristiche di vulnerabilità. Componenti di una infrastruttura viaria sono i rilevati, le trincee, i ponti, i viadotti e le gallerie; vengono considerati inoltre come componenti tutte quelle opere aggiuntive indispensabili per la stabilità e il buon funzionamento dell'infrastruttura (opere di contenimento, di drenaggio, ecc.). Per ciascuno di questi componenti vengono individuati degli elementi determinanti per la valutazione della vulnerabilità; tra questi ve ne sono alcuni comuni a tutti, come la tipologia costruttiva, l'età, lo stato di manutenzione, i materiali utilizzati, etc. In

base alla valutazione degli elementi determinati che viene fatta per ogni componente, si effettua infine il giudizio di vulnerabilità, attribuendo in maniera schematica classi di vulnerabilità per ogni elemento.

2.3 Definizioni di esposizione

Lo studio dell'esposizione permette di individuare aree particolarmente sensibili per la presenza di persone, manufatti, beni, ecc.. La distribuzione di tali elementi a rischio chiaramente non è uniforme nel territorio, risulta maggiore dove maggiore è la densità della popolazione, o dove maggiore è la concentrazione di particolari manufatti (per esempio nelle aree industriali).

Popolazione, manufatti e beni non possiedono lo stesso grado di priorità, infatti la salvaguardia della vita umana possiede sempre un'importanza maggiore. Per manufatti si intendono tutte le opere realizzate dall'uomo, tali opere vanno studiate in termini di funzionalità, ovvero valutando la funzione e l'importanza che esse hanno nell'area in esame. Per beni si intendono invece l'insieme delle risorse necessarie per lo svolgimento della vita quotidiana (energia elettrica, acqua, merci di produzione, ecc).

L'analisi dell'esposizione della popolazione risulta essere il passo maggiormente difficile da svolgere. Infatti la popolazione non può essere

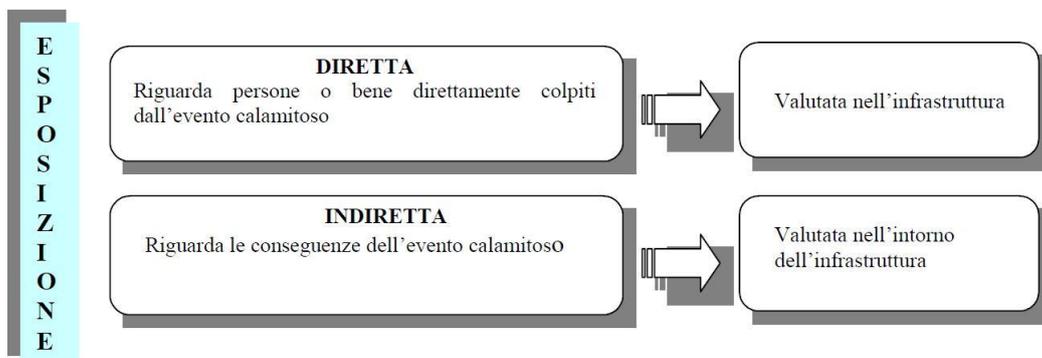
considerata come un'entità statica, in quanto essa possiede una sua dinamicità, data dalla possibilità di spostarsi nel territorio.

Il sistema dei trasporti, e quindi la rete stradale, è costituito da infrastrutture sulle quali si muovono le persone, oltre che i beni. Per questa ragione oltre ad essere manufatti esposti a rischio espongono la popolazione che li utilizza.

In riferimento all'esposizione (fig. 3) per un sistema dei trasporti, si può quindi distinguere tra:

- *esposizione diretta*, quando a subire danni sono gli utenti che utilizzano una strada che riporta danni in seguito al verificarsi dell'evento, cioè persone o beni direttamente colpiti dall'evento calamitoso;
- *esposizione indiretta*, in quanto un'infrastruttura di trasporto è profondamente legata al territorio che serve. In particolare un sistema dei trasporti inefficiente genera diverse conseguenze, per esempio danni economici, impossibilità di spostarsi o ritardi nell'erogazione dei soccorsi durante le emergenze.

Figura 3 L'esposizione nel sistema dei trasporti



2.4 Valutazione dell'esposizione

Per la valutazione dell'*esposizione diretta* di una infrastruttura stradale si può far riferimento al *traffico giornaliero medio* (Cafiso ed altri 2006) che dovrebbe essere in grado di rappresentare le condizioni ordinarie della circolazione. Chiaramente, maggiore è il valore del traffico giornaliero medio, maggiore è l'esposizione dell'infrastruttura in esame. All'arco stradale in questione si può quindi associare un indice di esposizione direttamente proporzionale al valore del TGM che lo caratterizza.

L'*esposizione indiretta* si può invece valutare utilizzando un parametro assegnato al ramo della rete in funzione del numero di persone potenzialmente colpite dalla mancata funzionalità del ramo (Cafiso ed altri 2001).

Infine, è auspicabile arrivare alla definizione di un indice complessivo, per ogni arco o tronco della rete, direttamente proporzionale sia ai valori dell'esposizione diretta che a quelli dell'esposizione indiretta dell'arco stesso.

Nella tabella 3 vengono riassunte le metodologie per la valutazione dell'esposizione e i dati necessari per ottenerla.

Tabella 3 Metodi di valutazione dell'esposizione diretta ed indiretta

VALUTAZIONE ESPOSIZIONE		
Tipologie di esposizione	INDIRETTA	DIRETTA
Dati utilizzabili	Popolazione residente Manufatti Beni	TGM Flusso orario
	Calcolo di un indice di esposizione di ogni centro	Suddivisione in classi di esposizione in base al valore del TGM o del Flusso Orario
Fasi della valutazione	Individuazione delle lifelines di collegamento tra centri	Attribuzione a ogni tronco della rete di un valore di esposizione in base alla classe di appartenenza
	Attribuzione a ogni ramo della rete di un indice di esposizione dato dalla sommatoria dei carichi dei centri urbani serviti dal ramo	

3. ANALISI DEL RISCHIO PER UNA RETE STRADALE EXTRAURBANA

3.1 Introduzione

Scopo di questo studio è lo sviluppo di una metodologia per la valutazione del rischio nei confronti di un evento calamitoso generico che insiste sugli archi di una rete stradale, che può essere valutato attraverso la nota relazione:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

La rete stradale viene quindi analizzata nella sua interezza, a prescindere dal livello e dalla tipologia di rischio a cui può essere esposta.

Partendo da queste considerazioni, il concetto di vulnerabilità utilizzato in questo lavoro può essere associato a quello di *importanza* di un arco stradale, in analogia con quanto fatto da Jenelius ed altri (2006) nell'analisi di una rete stradale localizzata nel Nord della Svezia:

$$\text{Vulnerabilità} = \text{Importanza}$$

L'importanza fa riferimento alle conseguenze date dalla chiusura di un arco stradale valutate nel territorio di riferimento. Per conseguenze si intende l'incremento dei tempi di percorrenza tra le diverse coppie O/D. In questo senso appare chiaro che l'importanza di un arco è connessa sia alla topologia della rete, ovvero al grado di connessione dell'arco, che all'esistenza di percorsi alternativi che non comprendono quell'arco.

Per quanto riguarda l'esposizione faremo invece riferimento al lavoro di Cafiso ed altri (1999), mirato alla valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture stradali. Distingueremo pertanto tra l'esposizione diretta, che coinvolge direttamente gli utenti che utilizzano un particolare elemento del sistema di trasporto (arco o nodo), e indiretta, che valuta le conseguenze che vengono generate sul territorio attraversato.

3.2 Approccio metodologico proposto

La metodologia proposta si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. studio del territorio e della pericolosità insistente nelle varie zone;
2. analisi della rete stradale;
3. calcolo degli indici di vulnerabilità per ogni arco della rete;

4. calcolo dei valori di esposizione per ogni arco della rete;
5. realizzazione di una graduatoria degli archi della rete stradale in funzione del livello di rischio che li caratterizza.

La prima fase è rappresentata da una analisi delle caratteristiche del territorio. Andranno identificati innanzitutto i nodi di riferimento, ovvero i centri abitati all'interno di un territorio, e successivamente sarà necessario analizzare i rischi che insistono su di esso. In questa fase risulterà fondamentale potersi interfacciare con gli specialisti del settore. In particolare potranno essere utilizzate cartine di pericolosità, ove già presenti, o si potranno svolgere analisi di dettaglio più specifiche.

Il passo immediatamente successivo è l'analisi della rete stradale di riferimento dell'area di studio. Sarà quindi necessario rappresentare il sistema infrastrutturale attraverso un grafo stradale. In questa fase è necessario procedere alla classificazione funzionale della rete stradale distinguendo tra viabilità principale e viabilità secondaria. Ad ogni arco della rete deve poi essere associata una funzione di costo che consenta di effettuare le procedure di assegnazione della domanda alla rete di trasporto.

Infine si procederà al calcolo degli indicatori di vulnerabilità ed esposizione per ogni arco della rete e, incrociando i risultati così ottenuti con quelli riguardanti la pericolosità ricavati con le analisi territoriali, si potrà valutare il rischio per ogni arco della rete in esame.

3.2.1 Analisi della rete in condizioni normali di esercizio

L'analisi dello stato di fatto è il punto di partenza di ogni processo di pianificazione. Durante questa fase vengono raccolti i dati sul sistema di trasporto e sul sistema delle attività che con esso interagisce. Tale fase è infatti finalizzata alla costruzione di un modello matematico che, calibrato sulla situazione attuale, possa consentire la simulazione degli effetti e degli impatti generati dal verificarsi di eventi calamitosi.

Per ogni analisi è necessaria in generale la formulazione di tre modelli: il modello dell'offerta, costituito dalla rete di trasporto, il modello della domanda, che fornisce l'insieme degli spostamenti aventi origine e/o destinazione all'interno del confine del sistema, e infine il modello di assegnazione che simula l'interazione tra i due modelli precedenti e permette il calcolo dei flussi sugli archi della rete, grandezze fondamentali per valutare gli impatti e le prestazioni del sistema di trasporto.

L'analisi della rete in condizioni di normale funzionamento è stata necessaria per determinare un indicatore sintetico che sarà alla base di tutte le valutazioni successive, ovvero il *costo totale* di spostamento della rete non danneggiata:

$$C^{undamaged} = \sum_i f_i \cdot c_i$$

dove:

É i è l'indice che indica il generico arco della rete;

È f_i è il flusso che percorre l'arco i ;

È c_i è il costo generalizzato che percepiscono gli utenti nel percorrere l'arco i .

Tale costo è la somma di tutti i costi generalizzati di viaggio (costo monetario, tempo di viaggio, τ) sostenuti dagli utenti del sistema ed esprime la disutilità complessiva che questi percepiscono nell'effettuare i propri spostamenti nella configurazione di rete considerata.

3.2.2 Calcolo degli indici di vulnerabilità

L'indice di vulnerabilità proposto per l'analisi risponde all'esigenza primaria di definire una classifica degli archi della rete. In questo senso l'arco più vulnerabile sarà anche quello più importante, ovvero quello che, a causa di una sua interruzione, comporta i danni (costi) maggiori al sistema di cui fa parte.

La definizione dell'importanza gerarchica di un arco j avviene quindi attraverso la valutazione del *differenziale di costo*:

$$\Delta C_j = C^j - C^{undamaged}$$

dove:

- j è l'indice dell'arco bidirezionale di cui si vuole valutare la vulnerabilità;

- C^j è il costo totale della rete in condizioni degradate, ovvero nella situazione in cui l'arco j viene interrotto;
- $C^{undamaged}$ è il costo totale della rete in condizioni normali.

Pertanto, una volta costruita la rete di riferimento, mediante un procedimento iterativo viene calcolato l'incremento dei tempi di percorrenza causati dalla chiusura di ogni singolo arco e, sulla base di questo valore, si valuta l'importanza (o la vulnerabilità) dell'arco considerato all'interno della rete.

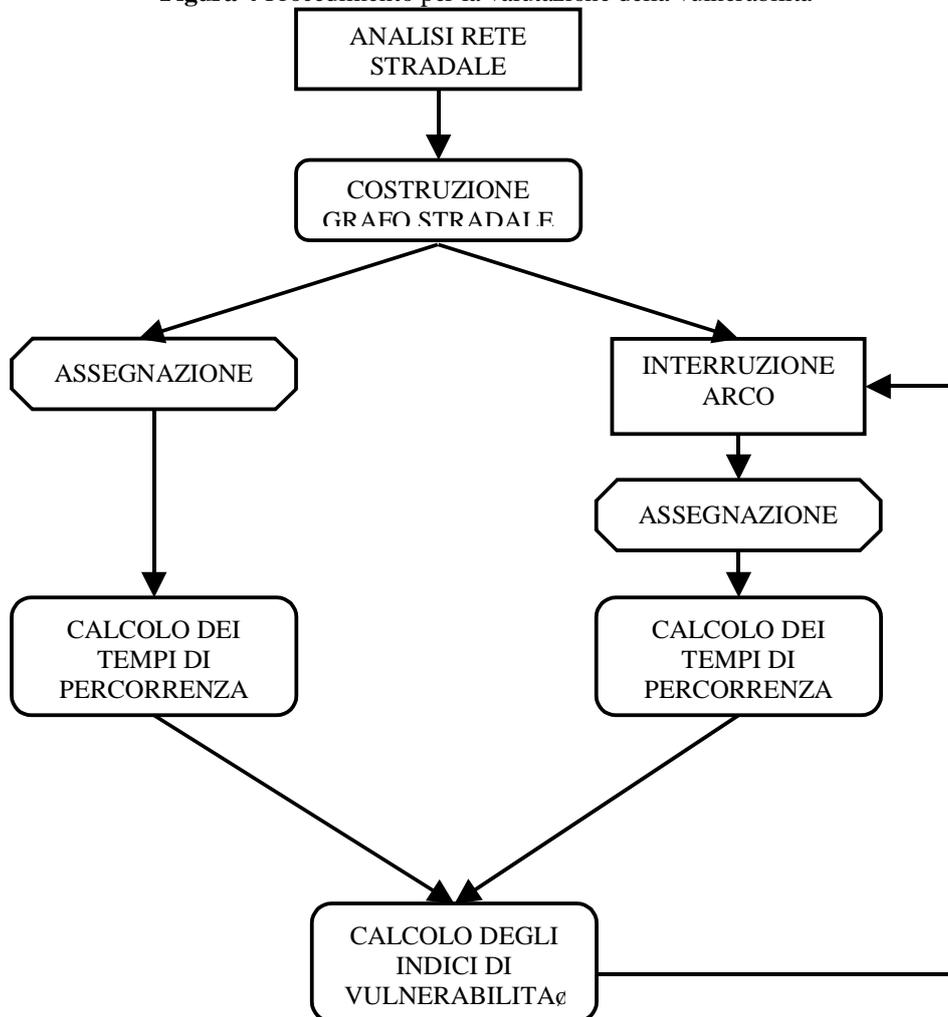
Il procedimento seguito può essere riassunto nelle seguenti fasi (fig. 4):

1. si costruisce la matrice dei tempi di percorrenza per tutti i centroidi O/D in condizioni di normale funzionamento (nessun arco interrotto), mediante un algoritmo di assegnazione della domanda di spostamento alla rete di trasporto;
2. si interrompe un arco alla volta;
3. si riapplica l'algoritmo di assegnazione ottenendo la matrice dei tempi di percorrenza quando l'arco è interrotto;
4. si calcolano gli indici di vulnerabilità associati all'arco interrotto;
5. si ripetono i passi da 2 a 4 per tutti gli altri archi della rete.

Il risultato dell'analisi sarà quindi una rete stradale dove ogni arco sarà caratterizzato da un valore dell'indice di vulnerabilità; quest'ultimo può essere

anche letto come un indice di priorità o importanza per la realizzazione di interventi.

Figura 4 Procedimento per la valutazione della vulnerabilità



Un primo indicatore di importanza dell'arco j può essere ottenuto semplicemente normalizzando il valore del differenziale di costo ottenuto interrompendo l'arco stesso:

$$\text{Importanza}(j) = \frac{\Delta C_j}{\Delta C_{\max}}$$

dove:

- j è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;
- ΔC_j è il differenziale di costo dovuto all'interruzione dell'arco in esame;
- ΔC_{\max} è il differenziale di costo massimo rilevato tra tutti gli archi della rete.

Gli indici di importanza così calcolati variano da 0 a 1, dove 0 indica che una chiusura dell'arco non comporta sostanziali differenze di costo percepito dagli utenti, mentre 1 corrisponde alla condizione di massimo disturbo per gli utenti.

Tale indicatore dipende dalla presenza di collegamenti alternativi e dalle loro caratteristiche geometriche e funzionali. Se ad esempio ci si trova in un contesto territoriale montagnoso (come quello oggetto della nostra analisi), la rete in esame presenta un basso grado di connessione e una configurazione topologica a pettine, tale da non consentire un vero e proprio funzionamento a maglia. Ciò implica che la disattivazione di un arco può spesso determinare una perdita totale di connessione fra distinte parti della rete. Una tale configurazione non permette quindi una valutazione della vulnerabilità basata solo sul differenziale di costo.

Esistono archi la cui chiusura comporta che alcune coppie O/D non siano più collegate (*cut links*); in questo caso il costo totale della rete danneggiata tende convenzionalmente all'infinito (in quanto i tempi di percorrenza tra le coppie O/D non connesse si possono assumere infiniti). Questi archi in conseguenza degli

effetti che producono sulla rete presentano un grado di criticità molto alto e non possono essere trattati allo stesso modo degli altri archi. La loro interruzione infatti comporta che una certa quota della domanda di spostamento non venga assegnata con il conseguente isolamento di alcune zone.

L'importanza dei *cut links* viene allora posta convenzionalmente uguale a I :

$$\text{Importanza}(j) = 1 \quad \text{se} \quad j = \text{cut_link}$$

dove il valore I indica che l'importanza di quell'arco è massima, in quanto una sua interruzione impedisce a un certo numero di utenti del sistema di spostarsi.

Per entrambe le tipologie di arco (*cut links* e *non-cut links*) si è poi deciso di pesare gli indicatori di importanza con i flussi simulati che percorrono gli archi stessi: maggiore è il volume di spostamenti che mediamente interessa un arco, maggiore è la sua importanza all'interno della rete. Si introduce quindi l'indicatore di *importanza globale*:

$$\text{Importanza_Globale}(j) = \frac{1}{k} \left(\frac{THM_j}{\xi} \right)^\alpha + \frac{k-1}{k} (\text{Importanza}(j))^\beta$$

dove:

- j è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;
- THM_j è il traffico orario medio rilevato sull'arco in esame;

- ξ è un valore di soglia posto pari a 3000 veicoli/h, valore che corrisponde al massimo traffico orario bidirezionale che generalmente caratterizza una strada extraurbana ad una corsia per senso di marcia;
- $k > 0$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ sono coefficienti di calibrazione.

3.2.3 Valutazione dell'esposizione

Per il calcolo dell'esposizione diretta E_d si considerano due contributi:

- *esposizione degli utenti* E_{ut} : fa riferimento al flusso che percorre l'arco considerato in un determinato intervallo temporale, ad esempio pari ad un'ora (THM), che ci fornisce un'indicazione sul numero di utenti che potrebbero essere colpiti da un evento calamitoso:

$$E_{ut}(j) = \begin{cases} 1 & \text{se } THM_j \geq \delta \\ \frac{THM_j}{\delta} & \text{se } THM_j < \delta \end{cases}$$

dove:

- j è l'arco di cui si sta valutando l'esposizione;
- THM_j è il flusso orario bidirezionale medio sull'arco j ;
- δ è un valore di soglia corrispondente a quel valore del flusso oltre il quale l'esposizione è considerata intollerabile. Viene posto pari a 3000

veicoli/h, valore che corrisponde al massimo traffico orario bidirezionale che generalmente caratterizza una strada extraurbana ad una corsia per senso di marcia. Assume valori compresi tra 0 e 1; 0 quando il flusso sull'arco è praticamente trascurabile; 1 quando il flusso è pari a quello massimo previsto.

- *esposizione infrastrutturale* E_{inf} : fa riferimento al danno monetario potenziale, che è una misura del valore della struttura dell'elemento considerato. È un valore normalizzato fra 0 e 1 a seconda dei dati infrastrutturali posseduti e viene posto uguale per tutti gli archi della rete (ad esempio al valore 1) nel caso non si abbiano a disposizione sufficienti informazioni per calcolarlo.

L'esposizione diretta risulta quindi dalla relazione:

$$E_d(j) = \frac{1}{m} [E_{ut}(j)] + \frac{m-1}{m} [E_{inf}(j)]$$

con $m > 0$.

L'esposizione indiretta E_i è invece calcolata in riferimento alla domanda non assegnata per effetto della chiusura di un arco, con il conseguente isolamento di alcune zone. Può essere calcolata attraverso la seguente relazione:

$$E_i(j) = \frac{d_j^{non_ass}}{d_{max}^{non_ass}}$$

dove:

- j è l'arco di cui si sta valutando l'esposizione;

- d_j^{nonass} è la domanda che risulta essere non assegnata per effetto della chiusura dell'arco j ;
- d_{max}^{nonass} è il valore massimo della domanda non assegnata.

In questo modo per i vari archi viene calcolata l'esposizione indiretta che varia da 0 a 1: tanto maggiore è il valore dell'esposizione indiretta e tanto maggiore è la domanda non assegnata per effetto della chiusura dell'arco. Vale in particolare 1 se l'interruzione impedisce al più alto numero di utenti del sistema di spostarsi; vale 0 nel caso in cui l'arco sia un non cut link.

L'esposizione totale si trova componendo le due relazioni precedenti attraverso la relazione seguente:

$$E(j) = \frac{1}{l} [E_i(j)] + \frac{l-1}{l} [E_d(j)]$$

dove:

- j è l'arco di cui si sta valutando l'esposizione;
- $l > 0$ è un coefficiente di calibrazione.

3.2.4 Costruzione di una scala di ranking

Calcolati i valori della vulnerabilità e dell'esposizione per ogni arco della rete è possibile valutare il *danno* (o la *magnitudo*), che esprime l'entità potenziale delle perdite nel caso in cui si verifichi l'evento temuto (in questo caso l'interruzione dell'arco):

$$Danno = Vulnerabilità \times Esposizione$$

Se non si è in possesso di dati relativi alla probabilità di accadimento associata a un certo fenomeno (pericolosità), questa misura consente comunque di effettuare una prima classificazione degli archi della rete: essa equivale infatti al rischio nell'ipotesi che la probabilità di accadimento dell'evento calamitoso sia uguale in tutta l'area di studio nel periodo di riferimento considerato.

Se si dispone invece di tutte le informazioni necessarie alla valutazione del rischio:

$$Rischio = Pericolosità \times Vulnerabilità \times Esposizione$$

si ha la possibilità di individuare una graduatoria che tenga conto sia degli aspetti funzionali legati all'infrastruttura che di quelli probabilistici legati agli eventi naturali o antropici che possono compromettere la funzionalità della rete.

In ogni caso il risultato finale che si ottiene dall'analisi di rischio proposta consente all'utilizzatore finale di avere a disposizione un *indice di priorità* da utilizzare come guida nella scelta dell'allocazione delle risorse (finanziarie e non) e nell'effettuazione degli interventi di messa in sicurezza.

3.3 Applicazione con il software di pianificazione CUBE

Nell'ambito delle operazioni da svolgere per l'applicazione della metodologia suddetta si è manifestata l'esigenza della scelta di uno strumento che consentisse non solo di gestire la notevole quantità di dati, ma anche di elaborare gli stessi e fornirne un'utile rappresentazione.

La scelta è così ricaduta sul software di pianificazione *Cube* di Citilabs. Esso infatti offre un'ottima integrazione tra strumenti per la previsione della domanda e per la simulazione del traffico ed i sistemi GIS.

Come ogni software di pianificazione dei trasporti *Cube* incorpora metodologie per la previsione e la simulazione di spostamenti, nonché per valutazioni di natura ambientale. Esso consente essenzialmente di:

- costruire e modificare una rete di trasporto che simuli il funzionamento del sistema analizzato;
- analizzare la situazione attuale e valutare gli attributi che caratterizzano il sistema (attributi di livello di servizio, esternalità, \dots);
- formulare progetti alternativi e valutarne gli effetti;
- confrontare i piani alternativi.

Il software risulta inoltre essere completamente "aperto", nel senso che il suo linguaggio di programmazione garantisce totale flessibilità e permette di

integrare applicazioni esterne o programmi sviluppati dall'utente, rendendo in questo modo estremamente semplice lo sviluppo di modelli personalizzati.

Questa proprietà ci ha permesso di implementare la nostra metodologia all'interno del software, in modo tale da consentirne una semplice applicazione.

Il software ci ha poi consentito attraverso una delle sue estensioni (*Cube Analyst*) di aggiornare la matrice O/D. La matrice degli spostamenti è infatti una delle componenti più importanti in un modello di traffico, poiché è alla base della previsioni future e di quasi tutte le analisi comparative, e per questo deve essere il più possibile accurata e corretta.

Cube Analyst utilizza tecniche matematiche per determinare le matrici di spostamento con i dati a disposizione ed i dati di conteggio: spostamenti generati ed attratti determinati da indagini in loco, conteggi di traffico lungo sezioni stradali, movimenti o dati di percorso che identificano gli itinerari usati per spostarsi dalle origini alle destinazioni. Un elemento chiave è la possibilità data all'utente di pesare la qualità dei dati a disposizione, così da definire intervalli di tolleranza per le varie tipologie di informazioni usate.

Il software si serve in pratica di un indicatore di massima verosimiglianza per stimare i valori di domanda. Tali valori sono quelli che meglio corrispondono ai dati introdotti ed ai relativi pesi qualitativi.

4. APPLICAZIONE ALLA RETE PROVINCIALE DI BOLZANO

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene presentato lo studio effettuato per la valutazione del rischio idrogeologico della rete stradale della Provincia Autonoma di Bolzano. L'attività, svolta per conto dell'Ufficio Geologia e Prove Materiali del Dipartimento Opere Pubbliche della Provincia di Bolzano, si inserisce all'interno del progetto PARAMount, del quale è stata sviluppata la parte relativa alla valutazione del rischio per le infrastrutture stradali.

Nello specifico il progetto PARAMount (imProved Accessibility: Reliability and security of Alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate) ha come scopo l'individuazione e la mitigazione dei pericoli naturali lungo le arterie di comunicazione.

In linea con il programma di cooperazione "ALPINE SPACE" che intende rafforzare l'immagine dello spazio alpino risolvendo i problemi legati all'accessibilità e ai trasporti, valorizzando la diversità del patrimonio naturale e culturale e salvaguardando la popolazione e le infrastrutture dai rischi naturali, il

progetto intende affrontare la problematica dell'accessibilità delle zone alpine tramite lo sviluppo di protocolli che consentano la gestione della sicurezza e l'ottimizzazione delle risorse ad essa destinate sulle arterie di comunicazione, la riduzione dei costi diretti ed indiretti nel caso di catastrofe, la previsione dei rischi e la programmazione di misure di messa in sicurezza sia temporanee che permanenti.

4.2 Analisi del territorio e della rete stradale

La Provincia di Bolzano che confina a nord e ad est con il Tirolo austriaco, ad ovest con il cantone svizzero dei Grigioni e a sud con la provincia di Trento, per la sua posizione al centro delle Alpi ed in particolare grazie al passo del Brennero, il più basso dell'intero arco alpino, si presenta come un fondamentale snodo viario per il collegamento tra l'Italia e l'Europa Centrale.

Per quanto riguarda le principali arterie di comunicazione (fig. 5), la Provincia è attraversata da:

- l'Autostrada A22 del Brennero, che fa parte della Strada Europea E45, da Karesuando (in Svezia) ad Agrigento (in Sicilia);
- la Strada Statale 12 dell'Abetone e del Brennero;

- la Strada Statale 38 òdello Stelvioö dalla Valtellina fino a Bolzano, con alcune ramificazioni (ad esempio la nuova super-strada Me-Bo);
- la Strada Statale 41 ödi Val Monasteroö da Sluderno fino al confine svizzero presso Tubre;
- la Strada Statale 40 ödi Resiaö da Spondigna di Sluderno fino al confine austriaco presso il passo Resia di Curon Venosta;
- la Strada Statale 49 ödella Pusteriaö da Bressanone fino al confine austriaco di Prato alla Drava.

Dal 1998 tutte le Strade Statali sono passate sotto la proprietà e la gestione diretta della Provincia Autonoma, anche se hanno mantenuto la loro denominazione di "Strade Statali".

Tabella 4 Estensione della rete per unità di superficie e per tipo di strada

STRASSENARTEN	Kilometer Chilometri	Prozentuelle Verteilung Composizione percentuale	km je 1.000 km² Fläche km per 1.000 km² di territorio	TIPO DI STRADA
Autobahnen	133	1,6	18,0	Autostrade
Staatsstraßen	788	9,4	106,5	Strade statali
Landesstraßen	1.274	15,2	172,2	Strade provinciali
Gemeindestraßen mit Wartung der Provinz	512	6,1	69,2	Strade comunali in manuten- zione della Provincia
Gemeindestraßen	2.186	26,0	295,4	Strade comunali
Forststraßen	3.514	41,8	474,8	Strade forestali
Insgesamt	8.407	100,0	1.136,0	Totale
Eisenbahnlinien	287	-	38,8	Rete ferroviaria

Quelle: Amt für raumbezogene und statistische Informatik

Fonte: Ufficio informatica geografica e statistica

La dotazione infrastrutturale è poi completata da strade di livello provinciale e comunale. In tabella 4 è riportata l'estensione per unità di superficie delle strade della Provincia disaggregate per categoria; vista la finalità del nostro

studio, sono state considerate le infrastrutture fino a livello delle Strade Provinciali.

In relazione alle proprie caratteristiche geomorfologiche, la Provincia di Bolzano si sviluppa per la totalità della sua estensione su un territorio montagnoso difficilmente attraversabile. Gli indicatori riportati in tabella 5 evidenziano infatti che la dotazione infrastrutturale provinciale è inferiore al valore medio nazionale, sia per quanto riguarda i km di strada, che per i km di rete ferroviaria. Ciò vuol dire che in generale la Provincia di Bolzano dispone di un numero di strade inferiori rispetto a quelle delle altre province italiane.

Tabella 5 Confronto tra la dotazione infrastrutturale della Provincia di Bolzano e la media nazionale

	Bezugsjahr Anno di riferimento dati	Südtirol Alto Adige	Italien Italia	
Straßennetz				La rete stradale
Gemeindestraßen in km je 100 km ² Fläche (a)	1999	8,4	22,2	km di strade comunali per 100 km ² di superficie territoriale (a)
Landesstraßen in km je 100 km ² Fläche	2004	16,3	50,3	km di strade provinciali per 100 km ² di superficie territoriale
Straßen von gesamtstaatlichem Interesse in km je 100 km ² Fläche	2004	-	5,7	km di strade di interesse nazionale per 100 km ² di superficie territoriale
Autobahnen in km je 1.000 km ² Fläche	2005	15,8	21,8	km di autostrade per 1.000 km ² di superficie territoriale
Lokale Einrichtungen der Verkehrsbetriebe je 100 km ² Fläche	2001	20,2	44,4	Unità locali dei trasporti terrestri per 100 km ² di superficie territoriale
Beschäftigte der Verkehrsbetriebe je 100 km ² Fläche	2001	131,7	79,2	Addetti dei trasporti terrestri per 100 km ² di superficie territoriale
Fahrzeuge je 100 Einwohner	2006	69	79	Veicoli ogni 100 abitanti
Eisenbahnnetz				La rete ferroviaria
Eisenbahnnetz der FS in km je 1.000 km ² Fläche	2005	30,1	53,7	km di rete ferroviaria FS per 1.000 km ² di superficie territoriale
Bahnhöfe je 100 km Eisenbahnnetz der FS	2005	14,3	14,9	Stazioni ferroviarie per 100 km di rete ferroviaria FS

(a) Die Erhebung zu den Gemeindestraßen, die in allen italienischen Gemeinden durchgeführt wurde, wird seit dem Jahr 2000 nur mehr in den Provinzhauptstädten durchgeführt. Deshalb sind nach 1999 keine Daten zu den Gemeindestraßen mehr verfügbar.
L'indagine sulle strade comunali, svolta su tutti i comuni italiani, è stata sostituita nel 2000 da quella relativa ai soli comuni capoluogo di provincia. Ciò ha comportato la mancanza di informazioni sulle strade comunali negli anni successivi al 1999.

Inoltre la rete, sempre in relazione al contesto territoriale montagnoso, presenta un basso grado di connessione e una configurazione topologica òa pettineò o comunque tale da non consentire un vero e proprio funzionamento òa magliaò. Ciò implica che il danneggiamento di un'infrastruttura può spesso determinare una perdita totale di connessione fra distinte parti della rete.

4.3 I modelli di trasporto per l'analisi della rete stradale della Provincia di Bolzano

Come descritto nel capitolo 3 il procedimento proposto per la valutazione del rischio prevede di utilizzare modelli tipici della Teoria dei Sistemi di Trasporto ed in particolare:

- un *modello di offerta di trasporto*, costituito dalla rete, che è data da un grafo e da un vettore di funzioni di costo. Un grafo è costituito da una coppia di insiemi: l'insieme dei nodi, che rappresentano posizioni spazio-temporali delle unità di traffico nel sistema, l'insieme degli archi, che rappresentano invece l'esistenza di una relazione spazio-temporale fra i nodi. Le funzioni di costo sono associate agli archi della rete e servono ad indicare il costo (generalizzato), in termini monetari o monetizzabili (carburante, pedaggi, biglietti, tempo speso, etc.), associato alla percorrenza dell'elemento considerato da parte dell'utente;
- un *modello di domanda di trasporto*, che consenta di stimare l'insieme di spostamenti aventi origine e/o destinazione all'interno del confine del sistema. La domanda di trasporto è rappresentata matematicamente dalla cosiddetta matrice Origini-Destinazioni (O-D), che considera la caratterizzazione della domanda per motivo dello spostamento, intervallo temporale di effettuazione, origine, destinazione e modo di trasporto;
- un *modello di assegnazione*, che sia in grado di rappresentare, in modo statico o dinamico, deterministico o stocastico, l'interazione tra la domanda e l'offerta e

quindi l'assegnazione della matrice O-D alla rete. Il risultato del processo è la configurazione dei flussi sugli archi della rete.

4.3.1 La rete di trasporto della Provincia di Bolzano

Il modello di offerta utilizzato consiste nel grafo della rete (fig. 6) che è stato fornito dai tecnici della Provincia Autonoma di Bolzano. Esso è composto da:

- 1.398 archi bidirezionali;
- 794 nodi non centroidi;
- 277 nodi centroidi (zone).

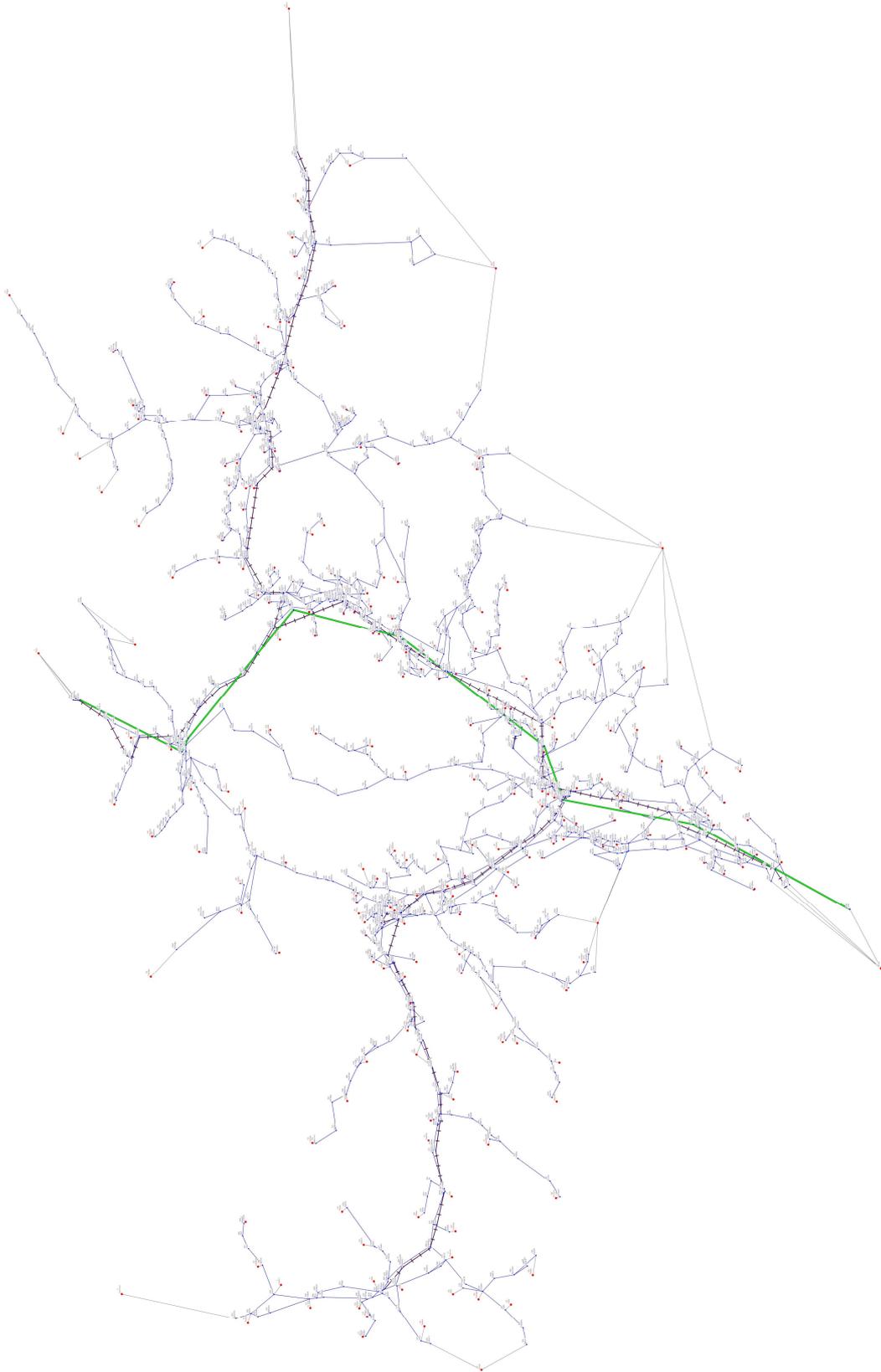
Ad ogni arco della rete è stata poi associata una funzione di costo di tipo BPR che consente di valutare il tempo medio di percorrenza di un arco in funzione del flusso che lo percorre (funzione di costo separabile):

$$t_R = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{f}{C} \right)^\beta \right]$$

dove:

- t_0 è il tempo di percorrenza a flusso nullo;
- f è il flusso che percorre l'arco;

Figura 6 Il grafo della rete stradale della Provincia di Bolzano



Downloaded by [IP: 193.50.135.100] at 11:00 08 February 2016

10/10/16

- C è la capacità dell'arco, ovvero il valore massimo del flusso, oltre il quale il rischio di instabilità diviene inaccettabile;
- α e β sono delle costanti di calibrazione.

Ad ogni arco della rete sono state quindi associate informazioni relative alle caratteristiche geometriche e funzionali, come ad esempio il numero di corsie per senso di marcia, la capacità, la velocità a flusso libero, necessarie per l'utilizzo delle suddette funzioni di costo.

Altri dati che sono stati associati agli archi del grafo sono i flussi medi giornalieri (TGM) rilevati o stimati dai tecnici della Provincia su alcune sezioni delle strade di loro competenza. Queste informazioni sono state utilizzate sia in fase di stima della domanda di trasporto, sia per il calcolo degli indicatori di vulnerabilità ed esposizione. Infatti esse costituiscono, seppure in maniera molto limitata, le uniche informazioni che ci sono state fornite circa la domanda di spostamento all'interno della Provincia di Bolzano.

4.3.2 La domanda di trasporto della Provincia di Bolzano

Non essendoci state fornite informazioni circa le origini e le destinazioni degli spostamenti che interessano la Provincia di Bolzano è stato necessario costruire ex novo, attraverso un modello matematico, la matrice O/D relativa ai nodi centroidi della rete di trasporto analizzata.

In realtà la costruzione della matrice esulava dagli intenti dello studio, tuttavia si è resa necessaria la sua determinazione per poter mettere in pratica e testare la procedura sviluppata.

È stato quindi utilizzato un *modello deterministico* di tipo *gravitazionale*, che fornisce il numero medio di spostamenti giornalieri tra una determinata coppia O/D:

$$d_{OD} = k_{OD} \frac{M_O \cdot M_D}{L_{OD}}$$

dove:

- M_O è un attributo di generazione proprio dell'origine O ;
- M_D è un attributo di attrazione proprio della destinazione D ;
- L_{OD} è un attributo di costo, rappresentato dalla distanza tra l'origine e la destinazione dello spostamento;
- k_{OD} è una costante di calibrazione.

Come attributo di generazione e di attrazione di una determinata zona si è deciso di utilizzare un unico valore, corrispondente alla somma tra il numero complessivo di abitanti e il numero di posti letto alberghieri disponibili (dati ISTAT). Questa quantità infatti fornisce una stima, almeno in prima approssimazione, della capacità che ciascun centroide possiede di generare o di

attrarre spostamenti in funzione della popolosità dell'area che ad esso afferisce.

Per la generica zona i risulta quindi:

$$M_i = M_O = M_D = n_{\text{abitanti}} + n_{\text{posti letto alberghieri}}$$

Il fattore k_{OD} è stato introdotto per far sì che il numero complessivo di spostamenti ottenuto con il modello gravitazionale fosse uguale a quello che si realizza effettivamente nella Provincia di Bolzano. Quest'ultimo è stato stimato ipotizzando che ad ogni abitante e ad ogni posto letto corrispondessero due spostamenti giornalieri e che gli spostamenti di attraversamento dell'area di studio fossero concentrati solamente sull'asse Nord-Sud, ovvero sulla A22 del Brennero. Di questi ultimi infatti era nota l'entità, sulla base dei dati forniti dalla società concessionaria (Autostrada del Brennero s.p.a.).

Poiché, come detto, si disponeva dei flussi misurati o stimati dai tecnici della Provincia su alcuni archi della rete, la matrice O/D così ricavata è stata infine corretta con i conteggi di traffico attraverso la procedura di $\hat{\theta}$ matrix estimation. Per la correzione si è deciso di utilizzare i dati derivanti da campagne di monitoraggio.

La correzione della domanda attraverso i conteggi di traffico è in pratica il procedimento inverso all'assegnazione, che prevede, nota la domanda tra le varie coppie O/D, di trovare i flussi sui vari archi della rete:

$$\underline{f} = \underline{M} \cdot \underline{d} = \underline{AP} \cdot \underline{d}$$

dove:

- \underline{f} è il vettore dei flussi sugli archi della rete;
- \underline{M} è la matrice di assegnazione;
- \underline{A} è la matrice di incidenza archi-itinerari;
- \underline{P} è la matrice di probabilità, che riporta la percentuale di domanda tra la coppia O/D che percorre il generico itinerario;
- \underline{d} è il vettore di domanda tra le varie coppie O/D.

Se si conoscono i flussi su l archi della rete, si può infatti riscrivere l'equazione matriciale precedente per i soli archi per i quali i conteggi sono disponibili:

$$\underline{f}'_l = \underline{f}_l + \underline{e} = \underline{M}_l \cdot \underline{d} + \underline{e}$$

dove:

- \underline{f}'_l è il vettore dei flussi rilevati su l archi della rete;
- \underline{f}_l è il vettore dei flussi stimati dal modello sugli l archi della rete;
- \underline{M}_l è la matrice di assegnazione relativa ai soli archi considerati;

• \underline{e} è il vettore degli scarti tra i flussi rilevati e i flussi stimati dal modello.

Il vettore degli scarti \underline{e} può essere interpretato come la somma algebrica tra i vettori \underline{e}^{SIM} ed \underline{e}^{OBS} . Il primo è il vettore degli scarti di assegnazione, che tiene conto degli errori che si introducono utilizzando un modello di assegnazione per ottenere i flussi stimati; il secondo invece è il vettore degli scarti di misura, dovuto al fatto che i rilievi di traffico, come tutte le misure, sono sempre affetti da errori che dipendono fra l'altro dalla tecnica utilizzata (conteggi manuali, automatici, \dots) e dal periodo di analisi considerato.

Il vettore di domanda si stima infine attraverso lo *stimatore di massima verosimiglianza*:

$$\underline{d}^* = \operatorname{argmin} \left[\sigma_1 \cdot \operatorname{dist}(\underline{f}_l', \underline{M}_l \cdot \underline{d}) + \sigma_2 \cdot \operatorname{dist}(\underline{d}', \underline{d}) \right]$$

Il vettore \underline{d}^* è quindi quello che, in relazione ai pesi σ_1 e σ_2 , è più vicino alla stima a priori della domanda \underline{d}' ottenuta con il modello gravitazionale e che contemporaneamente, una volta assegnato alla rete, produce dei flussi $\underline{M}_l \cdot \underline{d}^*$ i più vicini a quelli misurati \underline{f}_l' .

I coefficienti σ_1 e σ_2 sono stati introdotti in modo tale da consentire l'attribuzione di un peso differente a ciascuno dei due contributi della funzione. Nel nostro caso si è deciso di assegnare la massima affidabilità ai flussi rilevati \underline{f}_l' ($\sigma_1 = 1$) e di considerare invece poco attendibile la matrice di domanda di partenza \underline{d}' ($\sigma_2 = 0$). In questo modo l'algoritmo di correzione della matrice può

modificare la matrice O/D liberamente, ponendosi come unico obiettivo quello di ottenere i flussi considerati attendibili su alcuni archi della rete.

Per stimare la matrice di assegnazione è stato utilizzato un modello di assegnazione di tipo DUE e lo stimatore \underline{d}^* è stato ottenuto risolvendo un problema di massimizzazione vincolata, una volta esplicitata la funzione di distanza *log-likelihood*:

$$\text{dist}(\underline{f}', \underline{M}_l \cdot \underline{d}) = \ln L(\underline{f}', \underline{M}_l \cdot \underline{d}) = \sum_{l=1, \dots, L} (\underline{f}'_l \cdot \ln(\underline{M}_l \cdot \underline{d}) - (\underline{M}_l \cdot \underline{d})) + K$$

$$\text{dist}(\underline{d}', \underline{d}) = \ln L(\underline{d}', \underline{d}) = \sum_{l=1, \dots, L} (\underline{d}'_l \cdot \ln(\underline{d}) - (\underline{d})) + K$$

dove la costante K indica i termini della sommatoria che non dipendono dal vettore incognito di domanda \underline{d} e che quindi non sono rilevanti ai fini del problema di massimizzazione.

4.3.3 I modelli di assegnazione

I modelli di assegnazione della domanda a una rete di trasporto simulano l'interazione domanda-offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti e le prestazioni per ciascun elemento del sistema di offerta come risultato dei flussi di domanda O/D, dei comportamenti di scelta del percorso e delle reciproche interazioni tra domanda e offerta.

Si è deciso di considerare un modello di assegnazione di tipo deterministico, ovvero di assumere che tutti gli utenti del sistema percepiscano, per ciascun itinerario, la stessa disutilità, pari al valor medio del costo generalizzato di viaggio. I due modelli utilizzati sono quindi stati il modello Tutto o Niente (TON) e il modello di Equilibrio Deterministico (DUE).

Con il modello *TON* si fa l'ipotesi che la rete sia non congestionata (rapporto flusso / capacità: $\frac{f}{C} \leq 0,4$); in questo modo si può assumere che i costi siano costanti ed indipendenti dai flussi e si assegna tutta la domanda d_{OD} all'itinerario di minimo costo congiungente la coppia *O/D*. Il costo sul generico arco della rete viene in questo caso assunto pari al tempo medio di percorrenza a flusso nullo (ipotesi ammissibile considerando la rete scarica e quindi non congestionata):

$$t_R^{TON} = t_0 = \frac{L}{v_0}$$

dove:

- t_0 è il tempo di percorrenza a flusso nullo;
- v_0 è la velocità di percorrenza a flusso nullo;
- L è la lunghezza dell'arco.

Con il *DUE* si ipotizza invece che i costi sui vari archi dipendano dai flussi che percorrono gli archi stessi ovvero che la rete sia congestionata (rapporto

flusso / capacità: $\frac{f}{C} > 0,4$) e si assegna la domanda d_{OD} in modo tale che il costo dello spostamento sostenuto da ogni utente su tutti gli itinerari alternativi utilizzati che congiungono la coppia O/D risulti uguale e in ogni caso non superiore al costo di qualsiasi altro itinerario non utilizzato collegante la stessa coppia (1° principio di Wardrop). In questo caso il costo sul generico arco è stato assunto pari al tempo di percorrenza stimato con la funzione di costo di tipo BPR:

$$t_R^{DUE} = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{f^{DUE}}{C} \right)^\beta \right]$$

In particolare si è deciso di distinguere tra:

- strade a carreggiate separate: $t_R^{DUE} = t_0 \left[1 + \left(\frac{f^{DUE}}{C} \right)^3 \right];$
- strade a singola carreggiata: $t_R^{DUE} = t_0 \left[1 + 3 \cdot \left(\frac{f^{DUE}}{C} \right)^6 \right].$

Nel caso del DUE i risultati sono chiaramente più attendibili di quelli ottenibili con il modello TON, in quanto l'ipotesi che la rete sia non congestionata non è realistica.

L'output di tutti i modelli di assegnazione è il vettore dei flussi sugli archi da cui è possibile, attraverso le funzioni di costo, risalire al vettore dei costi sugli archi. La componente i -esima del vettore rappresenta il costo unitario sostenuto dal singolo utente nel percorrere l'arco i -esimo: da questa quantità, non dai flussi,

è possibile risalire al costo totale sopportato da tutti gli utenti della rete. Tale quantità costituisce spesso un indicatore di rete da utilizzare nella fase di confronto di scenari alternativi.

4.4 Il caso dell'interruzione degli archi

La metodologia per la valutazione del rischio nei confronti dei dissesti di tipo idrogeologico presentata nel capitolo 3 può essere riassunta come segue:

1. si costruisce la matrice dei tempi di percorrenza per tutti i centroidi O/D in condizioni di normale funzionamento (nessun arco interrotto), mediante un algoritmo di assegnazione della domanda di spostamento alla rete di trasporto;
2. si interrompe un arco alla volta;
3. si riapplica l'algoritmo di assegnazione ottenendo la matrice dei tempi di percorrenza quando l'arco è interrotto;
4. si ripetono i passi da 2 e 3 per tutti gli altri archi della rete.
5. si calcolano gli indici di vulnerabilità, esposizione e rischio associati ad ogni arco della rete.

Il risultato finale dell'analisi è quindi una rete stradale dove ogni arco è caratterizzato da un valore di rischio.

Nel seguito si vedrà come la metodologia proposta sia stata applicata in maniera differente allo stesso caso di studio, partendo di volta in volta da ipotesi più o meno semplificative circa la domanda di trasporto della Provincia di Bolzano e il modello di scelta di assegnazione adoperato per valutare i flussi e i costi sui vari elementi della rete.

Per il calcolo degli indicatori presentati al capitolo 3 è stato necessario assegnare dei valori ai *coefficienti di calibrazione*; si è deciso pertanto di specificare le forme funzionali degli indici di vulnerabilità ed esposizione nel modo seguente:

$$V(j) = \frac{1}{3} \left(\frac{THM_j}{3000} \right) + \frac{2}{3} (\text{Importanza}(j))$$

$$E_d(j) = \frac{1}{2} [E_{ut}(j)] + \frac{1}{2} [E_{inf}(j)]$$

$$E(j) = \frac{1}{3} [E_i(j)] + \frac{2}{3} [E_d(j)]$$

4.4.1 Matrice unitaria e rete non congestionata (TON)

Se non si conosce la domanda che insiste su un territorio si può in prima approssimazione utilizzare una matrice fittizia, i cui elementi d_{ij} sono tutti uguali

a I , con l'eccezione di quelli sulla diagonale (spostamenti intrazonali) che sono assunti nulli:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } i \neq j \\ 0 & \text{se } i = j \end{cases}$$

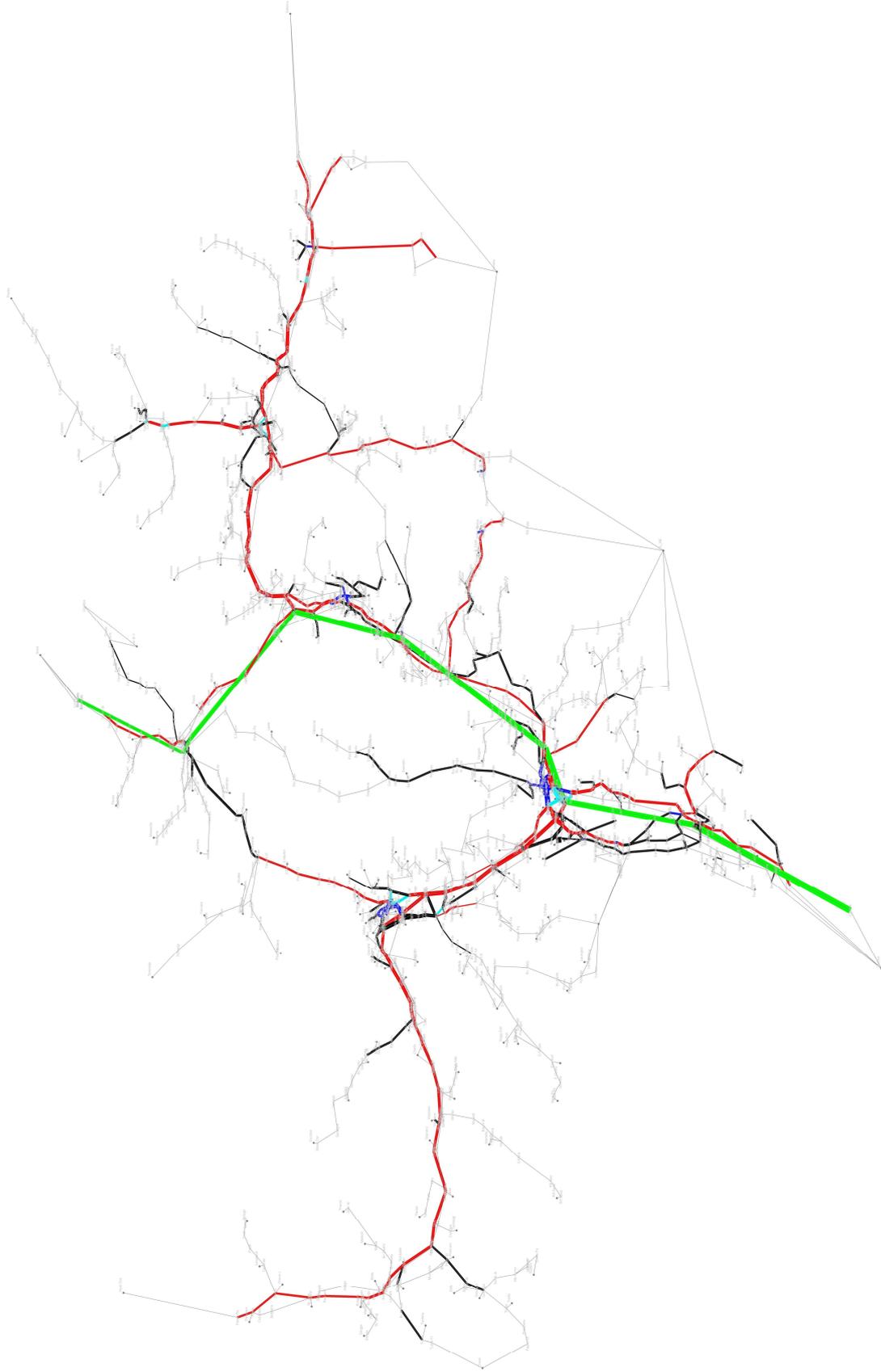
Lavorando con una matrice fittizia δ unitaria si può poi assumere che la rete sia non congestionata e quindi risulta ammissibile e computazionalmente vantaggioso utilizzare un modello di assegnazione di tipo TON per stimare i flussi che percorrono gli archi della rete.

Un'analisi siffatta non è certamente accurata per una valutazione numerica corretta degli indicatori introdotti, ma permette, in caso di una grave carenza di informazioni di partenza circa il sistema studiato, di effettuare perlomeno un'analisi dal punto di vista dell'offerta di trasporto. Gli indici di importanza così calcolati offrono infatti una misura del grado di connessione e dell'accessibilità potenziale della rete di trasporto.

4.4.2 Matrice O/D e rete congestionata (DUE)

Per realizzare la classificazione degli archi in funzione del livello di rischio che li caratterizza si è deciso di procedere utilizzando la matrice di domanda ottenuta con il modello gravitazionale e poi corretta tramite la procedura di matrix estimation e il modello di assegnazione di tipo DUE.

Figura 6 Flussogramma



UNIVERSITÀ DI TRIESTE - S.p.A. - COMPTON INFORMATION

UNIVERSITÀ DI TRIESTE - S.p.A. - COMPTON INFORMATION

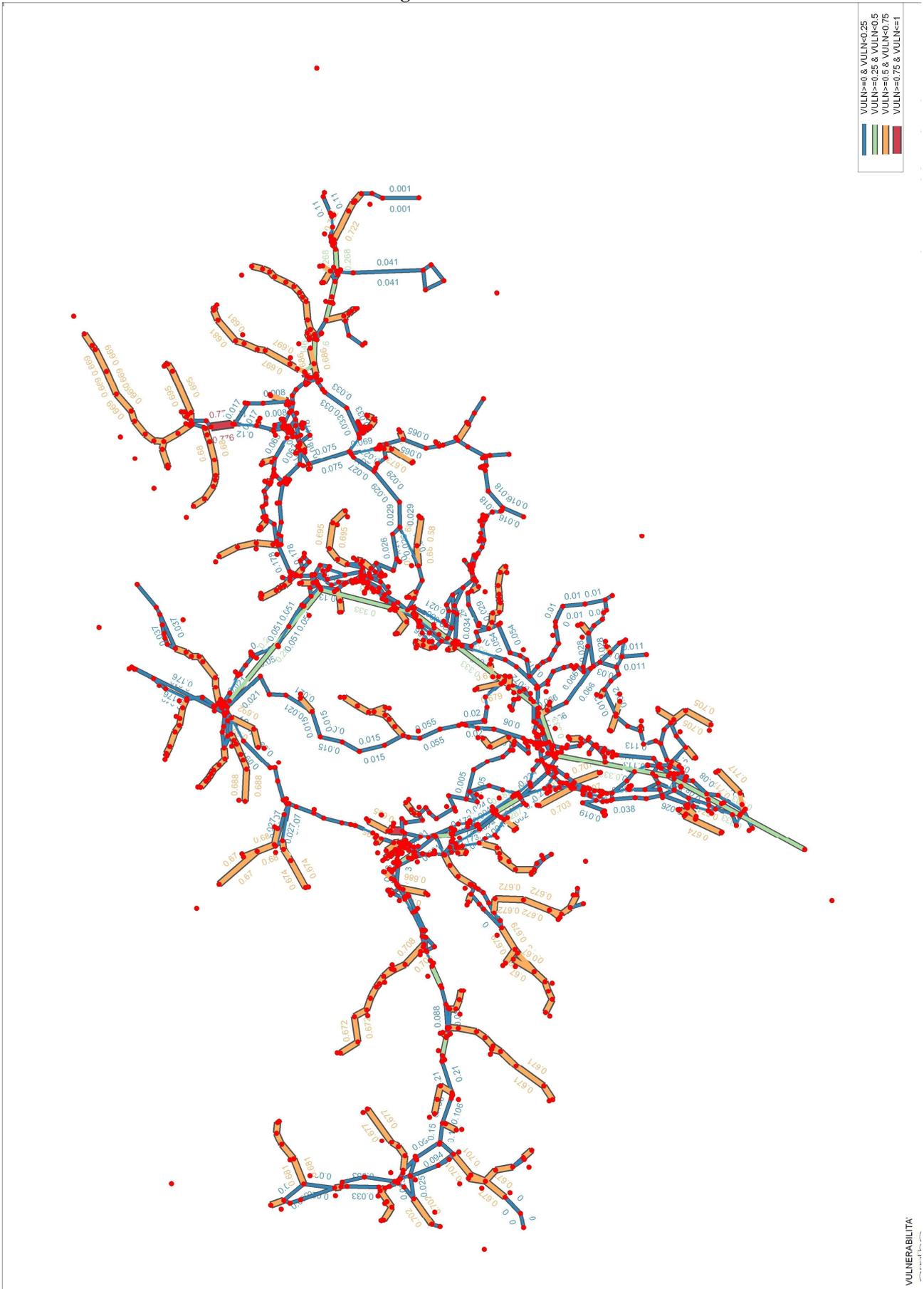
In questo modo i risultati ottenuti non solo tengono conto degli aspetti relativi all'accessibilità, propri del sistema dell'offerta di trasporto, ma considerano anche l'effettivo grado di utilizzazione del sistema, stimato sulla base dei dati di domanda contenuti nella matrice O/D.

In figura 6 è stato riportato il flussogramma ottenuto con l'assegnazione di tipo DUE e relativo alla rete in condizioni non danneggiate. Sui vari archi sono stati tracciate delle barre di spessore proporzionale ai flussi orari che li percorrono. I colori delle barre identificano le strade a seconda della tipologia:

- VERDE: autostrade;
- ROSSO: strade statali;
- NERO: strade provinciali;
- BLU e AZZURRO: strade comunali principali.

Come si può osservare i flussi più elevati si riscontrano sulle strade che percorrono le vallate principali o che si immettono in esse, mentre la restante parte della rete risulta essere poco trafficata. La conformazione montagnosa della Provincia infatti fa sì che questi tratti risultino dei passaggi obbligati, dei veri e propri colli di bottiglia.

Figura 7 Vulnerabilità



In figura 7 sono stati rappresentati i vari archi in funzione del valore dell'indicatore di vulnerabilità calcolato. Sono state distinte quattro *classi di vulnerabilità*, ognuna identificata da un colore differente:

- BLU: vulnerabilità bassa, compresa tra 0 e 0,25;
- AZZURRO: vulnerabilità moderata, compresa tra 0,25 e 0,5;
- ARANCIONE: vulnerabilità alta, compresa tra 0,5 e 0,75;
- ROSSO: vulnerabilità molto alta, compresa tra 0,75 e 1.

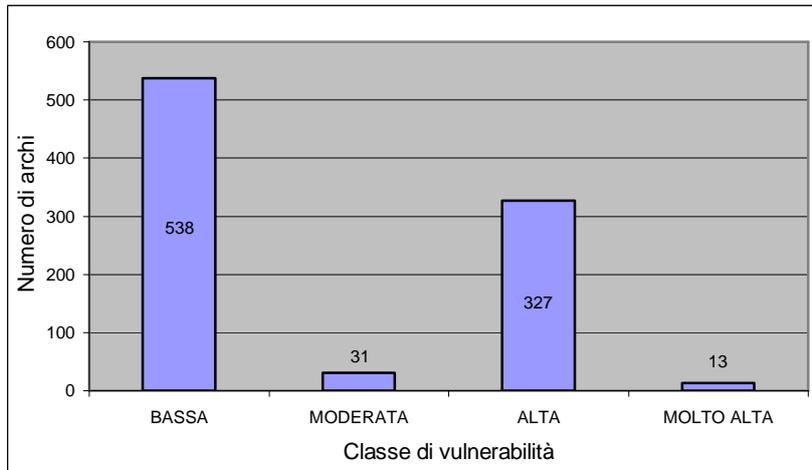
Come si evince dal grafico le strade più vulnerabili sono anche quelle che attraversano le zone più isolate della rete. Spesso esse rappresentano l'unico percorso che collega tali zone alle altre della rete e questo spiega perché la vulnerabilità, ovvero il danno derivante da un'interruzione, sia molto alta.

Nella tabella 6 e nel grafico 1 viene proposta una sintesi dei risultati ottenuti.

Tabella 6 Distribuzione degli archi a seconda della classe di vulnerabilità

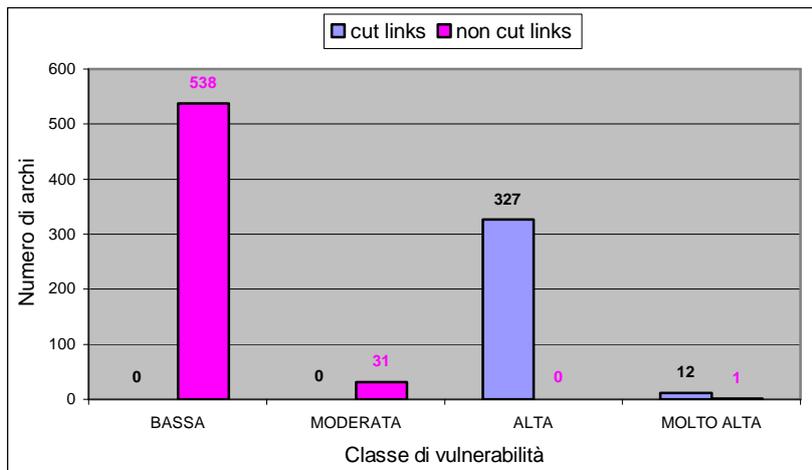
CLASSE DI VUNERABILITA'	INTERVALLO VALORI	NUMERO DI ARCHI	NUMERO DI CUT LINKS	NUMERO DI NON CUT LINKS
BASSA	$V < 0,25$	538	0	538
MODERATA	$0,25 < V < 0,50$	31	0	31
ALTA	$0,50 < V < 0,75$	327	327	0
MOLTO ALTA	$0,75 < V < 1$	13	12	1

Grafico 1 Distribuzione degli archi a seconda della classe di vulnerabilità



Vi è una divisione netta tra cut links e non cut links in base all'indice di vulnerabilità (grafico 2). Infatti, per come questo è stato costruito, la possibilità che alcune zone si trovino ad essere isolate rispetto al resto della rete ha un peso preponderante nella valutazione della vulnerabilità. Per questo motivo ai non cut links è associato un livello di vulnerabilità basso o moderato, in quanto per essi il differenziale di costo generalizzato non assume in generale valori molto alti in relazione al costo totale della rete.

Grafico 2 Distribuzione degli archi disaggregati tra cut links e non cut links a seconda della classe di vulnerabilità

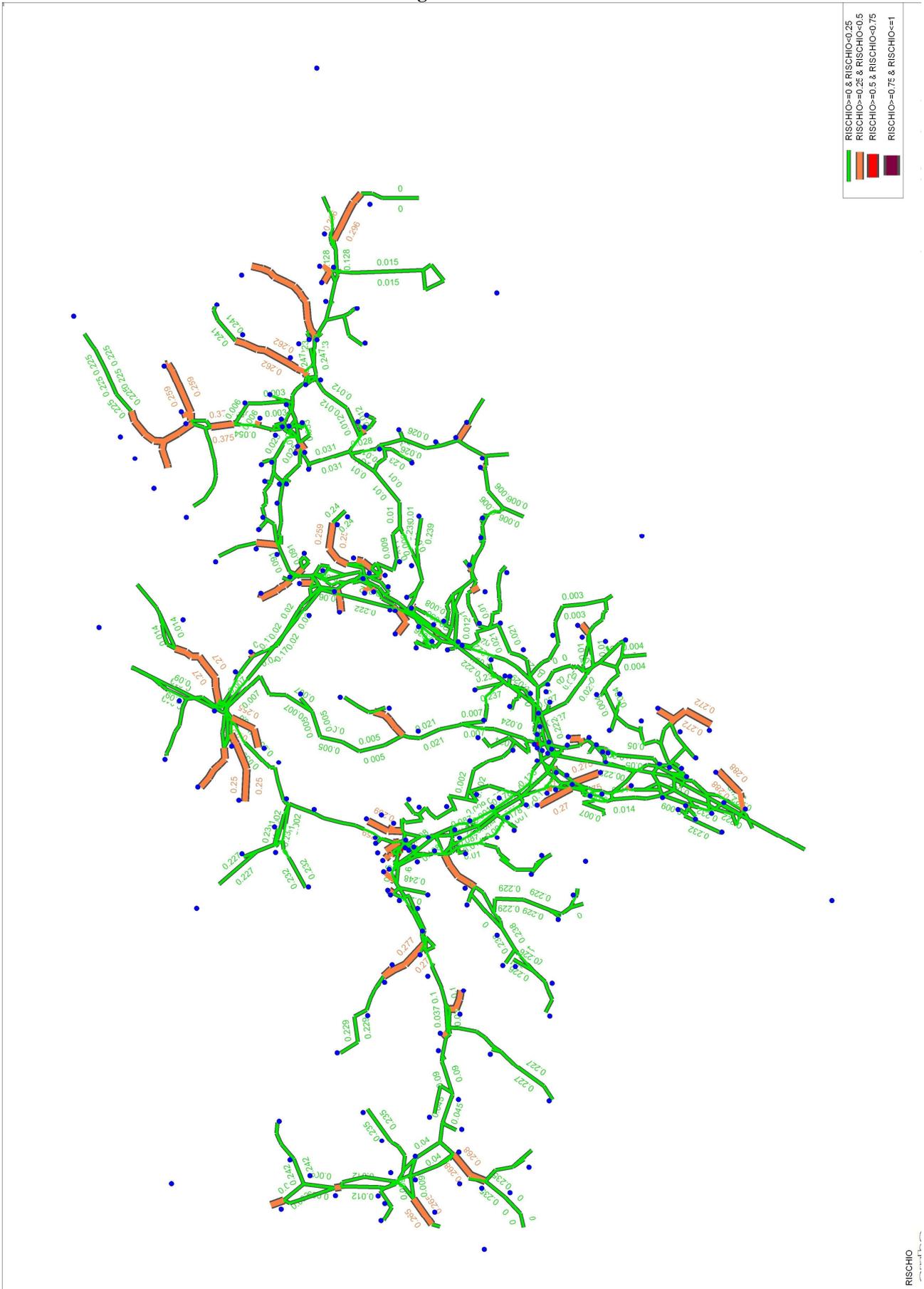


È poi possibile osservare che gli archi molto vulnerabili sono spesso anche quelli meno trafficati, infatti ci sono 237 cut links che hanno vulnerabilità minore di 1. Ciò vuol dire che nella valutazione dell'indicatore di vulnerabilità il traffico orario medio, stimato con l'assegnazione o ricavato tramite campagne di monitoraggio, ha un peso ridotto. D'altronde non bisogna nemmeno dimenticare che il THM è stato considerato in questa fase principalmente per poter calibrare l'indice di vulnerabilità ed ottenere dei valori più aderenti alla realtà. Il traffico orario viene infatti fondamentalmente utilizzato per la valutazione dell'esposizione diretta, come descritto nel capitolo 3.

Il rischio associato ai vari elementi della rete è raffigurato invece in figura 8; ai vari archi è stato associato un *livello di rischio* identificato da un colore diverso a seconda del valore dell'indicatore trovato:

- VERDE: rischio basso (nessun intervento necessario), tra 0 e 0,25;
- ROSA: rischio medio (monitoraggio e interventi di mitigazione del rischio), tra 0,25 e 0,5;
- ROSSO: rischio alto (interventi di messa in sicurezza), tra 0,5 e 0,75;
- BORDEAUX: rischio intollerabile (interventi immediati di messa in sicurezza e eventuale chiusura al traffico), tra 0,75 e 1.

Figura 8 Rischio



Occorre comunque precisare che questo valore dovrebbe essere più adeguatamente riferito al danno (o alla magnitudo), secondo la definizione introdotta nel Capitolo 1. Infatti per il calcolo si è assunto che la pericolosità fosse ovunque costante e presa pari a 1 per semplicità.

Inoltre esso si può riferire al danno operante, in quanto anche l'esposizione infrastrutturale, che è una misura del valore della struttura dell'elemento considerato, è stata posta uguale a 1. Il rischio qui calcolato esprime quindi l'entità delle perdite che subiscono gli utenti del sistema ed è una misura del disagio che un'interruzione della viabilità comporta, sia in termini di aumento dei tempi di viaggio che in termini di diminuzione dell'accessibilità.

Ciò non toglie in ogni caso che se si avessero a disposizione informazioni più accurate circa la distribuzione della pericolosità sul territorio si potrebbe facilmente arrivare ad una valutazione esatta del rischio che colpisce le infrastrutture della Provincia di Bolzano con la medesima metodologia fin qui descritta.

Nella tabella 7 e nel grafico 3 viene infine proposta una sintesi dei risultati. Come si può constatare solo 2 archi cadono nella fascia alta e necessitano quindi di un immediato intervento di messa in sicurezza. Questi sono due cut links che si trovano rispettivamente vicino a Bolzano e a Merano e costituiscono degli snodi essenziali per il traffico della Provincia.

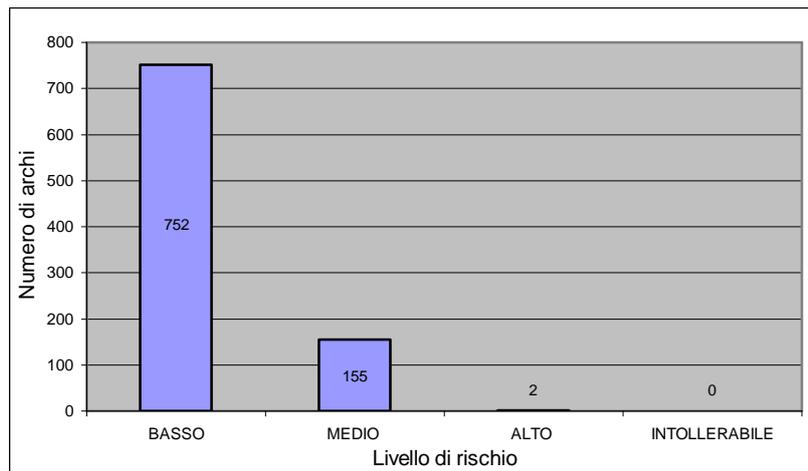
La maggior parte degli archi analizzati sono caratterizzati invece da livelli di rischio tollerabili: gli interventi di messa in sicurezza quindi non sono per essi

irrinunciabili; anzi la decisione se disporre o meno dei provvedimenti di mitigazione non solo deve tenere conto delle ovvie ragioni di sicurezza e salvaguardia della vita, ma specialmente delle disponibilità finanziarie dell'Amministrazione che è incaricata di farsi carico dei lavori.

Tabella 7 Distribuzione degli archi a seconda del livello di rischio riscontrato

LIVELLO DI RISCHIO	INTERVALLO VALORI	NUMERO DI ARCHI
BASSO	$R < 25\%$	752
MEDIO	$25\% < R < 50\%$	155
ALTO	$50\% < R < 75\%$	2
INTOLLERABILE	$75\% < R < 100\%$	0

Grafico 3 Distribuzione degli archi a seconda del livello di rischio riscontrato



I risultati trovati sono dipendenti dai valori delle costanti di calibrazione che compaiono nella forma funzionale degli indicatori di vulnerabilità ed esposizione. In particolare il coefficiente k , che compare nell'espressione della vulnerabilità, è stato oggetto di un'analisi di sensitività, volta a stabilire in che modo e in che quantità modificandone il valore variasse l'indicatore di rischio associato a ciascun arco.

Inizialmente è stato utilizzato un indicatore sintetico di rete: il *rischio totale*, ottenuto come somma dei rischi associati ad ogni arco della rete:

$$R_{tot} = \sum_i R_i$$

dove R_i è il rischio associato all'arco i .

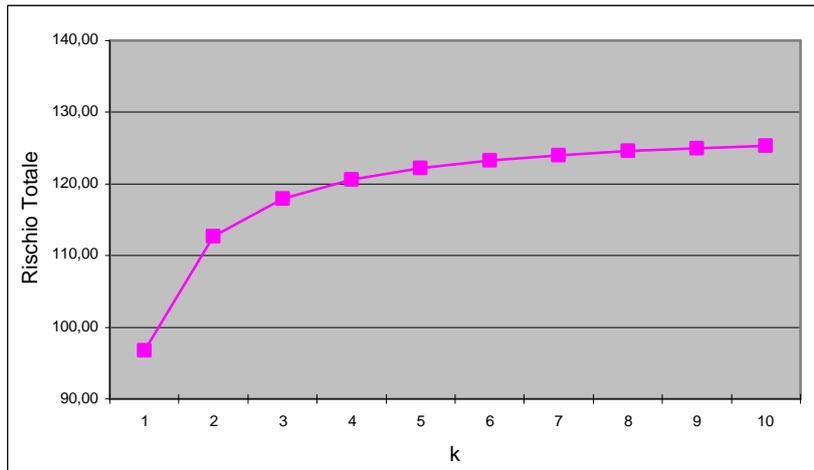
Poi sono state fatte delle analisi sul rischio associato a ciascun arco, che hanno portato a risultati analoghi a quelli già trovati per il rischio totale.

In tabella 8 sono riportati i valori di rischio totale ottenuti facendo variare k , nel grafico 4 poi sono stati riprodotti i risultati ottenuti. È così stato possibile osservare come cambia il rischio totale in funzione di k : la curva presenta un andamento crescente e concavo, inizialmente ripido ($k = 1 \div 5$), che poi si dispone parallelamente ad un asintoto orizzontale. L'indicatore rischio totale è poco sensibile alle variazioni del coefficiente di calibrazione k per valori superiori a 5.

Tabella 8 Valori del rischio totale in funzione della costante k

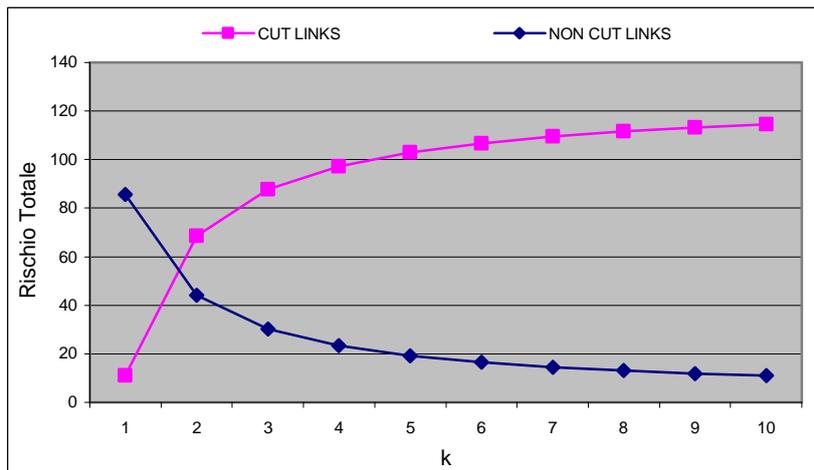
k	Rischio totale
1	96,78
2	112,66
3	117,95
4	120,60
5	122,18
6	123,24
7	124,00
8	124,57
9	125,01
10	125,36

Grafico 4 Andamento del rischio totale in funzione della costante k



La curva descritta può anche essere vista come la somma della curva che si ottiene considerando i soli cut links e di quella che si ottiene considerando invece i non cut links, riportate nel grafico 5. Le due curve peraltro presentano un andamento discorde: la prima si comporta allo stesso modo di quella che si ottiene considerando indistintamente tutti gli archi, la seconda invece presenta un andamento decrescente e convesso.

Grafico 5 Andamento del rischio totale in funzione della costante k per i cut links e i non cut links



In altre parole i cut links hanno per valori bassi di k un peso molto scarso nel computo del rischio totale, in quanto il contributo dell'importanza (che per

essi è assunta massima) nell'espressione della vulnerabilità, è limitato. Al contrario il peso dei non cut links è molto alto perché essi sono in numero maggiore rispetto ai cut links. Diversamente se k cresce i rapporti si invertono, in quanto diventa preponderante il valore dell'importanza nel calcolo della vulnerabilità e quindi del rischio.

Pertanto ipotizzando un elevato valore di k si assume che la vulnerabilità sia legata maggiormente all'importanza dell'arco e si attribuisce un peso minore all'influenza del THM che peraltro compare anche nell'espressione dell'esposizione. Nondimeno ciò comporta che il valore della vulnerabilità sia fondato quasi esclusivamente su una misura teorica di importanza e che sia trascurato il contributo del THM, che è un dato oggettivo cui è opportuno assegnare un peso non trascurabile.

La scelta del valore $k = 3$ rappresenta pertanto un buon compromesso tra l'esigenza di considerare l'importanza come un fattore preponderante nel calcolo della vulnerabilità e quella di conservare un legame con la realtà fisica del problema utilizzando il THM per ponderare i risultati, soprattutto in considerazione dei problemi relativi alla stima della domanda di trasporto.

4.5 Il caso della riduzione di capacità degli archi

Non sempre è lecito ammettere che a seguito di un dissesto idrogeologico una strada risulti interrotta e quindi inutilizzabile. Molto spesso infatti, per ragioni economiche e per consentire comunque l'accessibilità delle varie zone, si preferisce continuare ad utilizzare ancora l'infrastruttura, anche se danneggiata, magari limitando la velocità dei veicoli che la percorrono o riducendo la sua capacità.

Peraltro non tutti i dissesti sono uguali e quelli più frequenti, come detto, sono quasi sempre quelli meno intensi, che consentono rapidi interventi manutentivi, i quali possono essere condotti anche consentendo il parziale utilizzo dell'infrastruttura colpita attraverso la istituzione di un *senso unico alternato* quando questo intervento sia possibile.

Si è quindi deciso di applicare la stessa metodologia per la valutazione del rischio utilizzata nel caso dell'interruzione degli archi anche al caso della riduzione di capacità. Per fare questo è stato però necessario introdurre delle piccole modifiche al procedimento.

In particolare si è assunto che la riduzione di capacità comportasse in ogni caso la istituzione di un *senso unico alternato* sull'arco bidirezionale colpito dal dissesto idrogeologico. Ciò è stato possibile introducendo a metà dell'arco danneggiato un semaforo, che consentisse il passaggio dei veicoli in una sola direzione per volta.

Nelle funzioni di costo dell'arco danneggiato è stato pertanto introdotto un ulteriore costo generalizzato, che è stato posto pari al tempo di attesa ad un'intersezione semaforizzata.

Per il calcolo di questa ulteriore voce di costo si è deciso di utilizzare la *formula di Akcelik*, che fornisce una stima del tempo di attesa tw_a ad un'intersezione per i veicoli appartenenti al gruppo di corsie a :

$$tw_a = 0,5 \frac{T_c(1-\mu_a)^2}{1-\mu_a X_a} \quad X_a \leq 0,5$$

$$tw_a = 0,5 \frac{T_c(1-\mu_a)^2}{1-\mu_a X_a} + 900T \left\{ X_a - 1 + \left[(X_a - 1)^2 + \frac{8(X_a - 0,5)}{\mu_a S_a T} \right]^{0,5} \right\} \quad 0,5 < X_a \leq 1$$

dove:

- $X_a = \frac{f_a}{Q_a}$ è il rapporto flusso / capacità;
- T_c è la lunghezza del ciclo assunta pari a 120 sec;
- μ_a è il rapporto tra il verde effettivo e la lunghezza del ciclo assunto pari a 0,5;
- S_a è il flusso di saturazione assunto pari a 3600 veic/h;
- $Q_a = \mu_a \cdot S_a$ è la capacità assunta pari a 1800 veic/h.

Per il calcolo del tempo di percorrenza tr_a si è fatto invece ancora riferimento alle funzioni di costo di tipo BPR, già utilizzate nel caso di

interruzione degli archi. Ai fini del calcolo è stato poi considerato il costo medio complessivo pari alla somma del tempo di attesa e di percorrenza così calcolati.

Il procedimento per la valutazione del rischio utilizzato in questo caso prevede quindi i seguenti passi:

1. si costruisce la matrice dei tempi di percorrenza per tutti i centroidi in condizioni di rete non perturbata, mediante un algoritmo di assegnazione della domanda di spostamento alla rete di trasporto di tipo DUE;
2. si introduce un tempo di attesa tw_a ad un arco alla volta;
3. si riapplica l'algoritmo di assegnazione DUE ottenendo la matrice dei tempi di percorrenza quando sull'arco vige il senso unico alternato;
4. si calcolano gli indici di vulnerabilità associati all'arco danneggiato;
5. si ripetono i passi da 2 a 4 per tutti gli altri archi della rete.

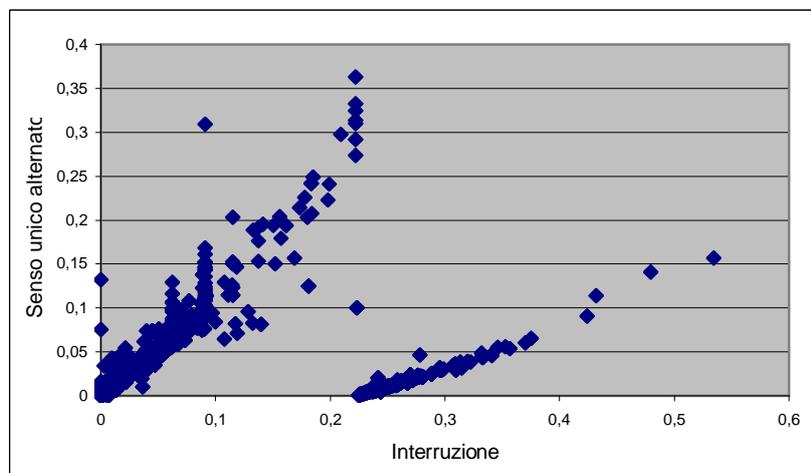
Il risultato dell'analisi è lo stesso ottenuto nel caso dell'interruzione, ovvero una rete stradale dove ad ogni arco è stato associato un valore dell'indice di vulnerabilità. Questo valore poi, integrato da quelli di esposizione e pericolosità, ha consentito il calcolo del rischio nei confronti dei dissesti idrogeologici associato ad ogni infrastruttura della rete stradale della Provincia di Bolzano.

4.6 Confronto dei risultati

In questo paragrafo viene effettuato un confronto tra i risultati ottenuti nel caso di interruzione degli archi e in quello di riduzione della capacità.

Nel grafico 6 sono stati riportati i valori di rischio riscontrati nei due casi: ad ogni arco corrisponde infatti un punto, la cui ascissa rappresenta il valore del rischio nel caso di interruzione dell'arco mentre l'ordinata rappresenta il valore del rischio nel caso di riduzione della capacità. Come si può osservare i punti sono disposti in due gruppi distinti, uno che può essere considerato distribuito attorno ad una retta uscente dall'origine degli assi e un altro che invece segue ancora un andamento rettilineo ma che non passa per l'origine.

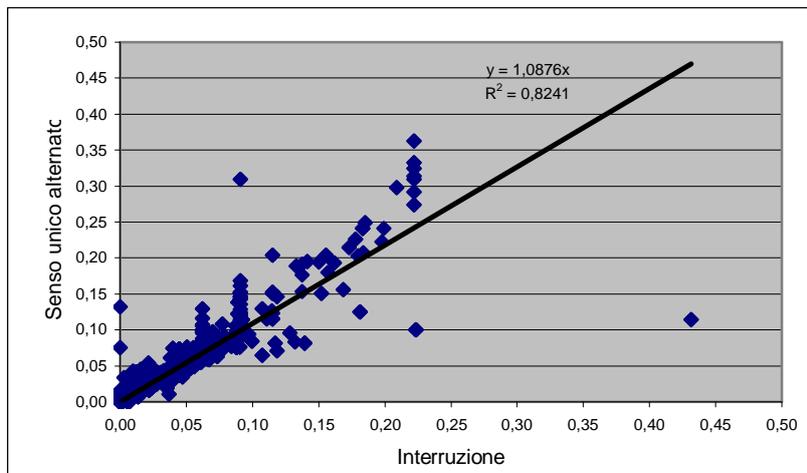
Grafico 6 Confronto tra il rischio ottenuto in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità



I due diversi gruppi sono associati ai due diversi tipi di arco che possiamo distinguere in caso di interruzione degli archi, ovvero i cut links e i non cut links. Se infatti si rappresenta lo stesso diagramma disaggregando però nel caso di non cut links e cut links si ritrovano gli stessi andamenti descritti in precedenza.

Nel caso dei non cut links in particolare (grafico 7) i punti si dispongono attorno a una retta che ha un andamento molto vicino a quello della bisettrice del primo quadrante ($y = x$). Inoltre il coefficiente di correlazione è alto ($R^2 = 0,82$) e ciò è un'ulteriore conferma del fatto che i valori di rischio riscontrati per i vari archi in caso di interruzione e di senso unico alternato sono molto simili.

Grafico 7 Confronto tra il rischio ottenuto in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità per i non cut links



Nel caso dei non cut links cioè le due metodologie conducono a risultati assolutamente concordanti. In questo senso si può dire che in una rete così estesa l'interruzione di un arco, se non implica l'isolamento di una certa zona, non comporta in generale un disagio all'utenza molto diverso rispetto a quello che si avrebbe nel caso in cui si continuasse ad utilizzare l'infrastruttura in regime di senso unico alternato. In alcuni casi poi il disagio in caso di interruzione risulta essere addirittura inferiore rispetto a quello che si avrebbe per una diminuzione della capacità. Ciò perché il tempo in attesa risulta essere in alcuni casi maggiore rispetto al tempo che si impiegherebbe a percorrere un percorso alternativo.

Per i cut links (grafico 8) invece il caso della riduzione di capacità comporta sempre danni inferiori al sistema, in quanto il contributo dell'esposizione indiretta si annulla, non essendoci più delle coppie O/D che rimangono isolate (grafico 9)

Grafico 8 Confronto tra il rischio ottenuto in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità per i cut links

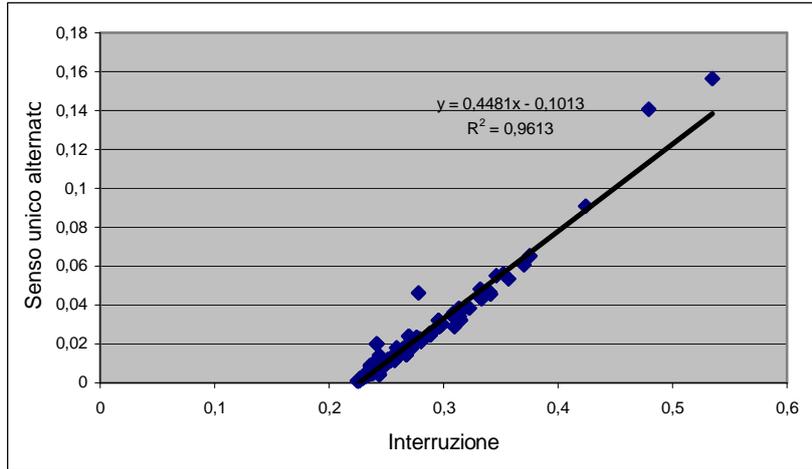
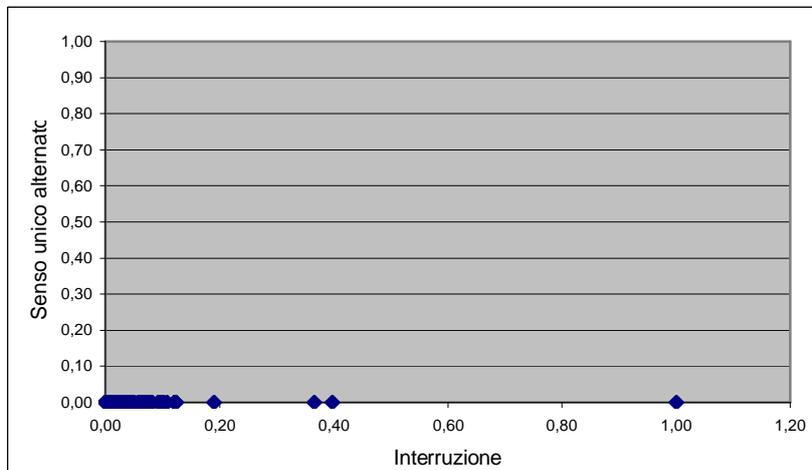


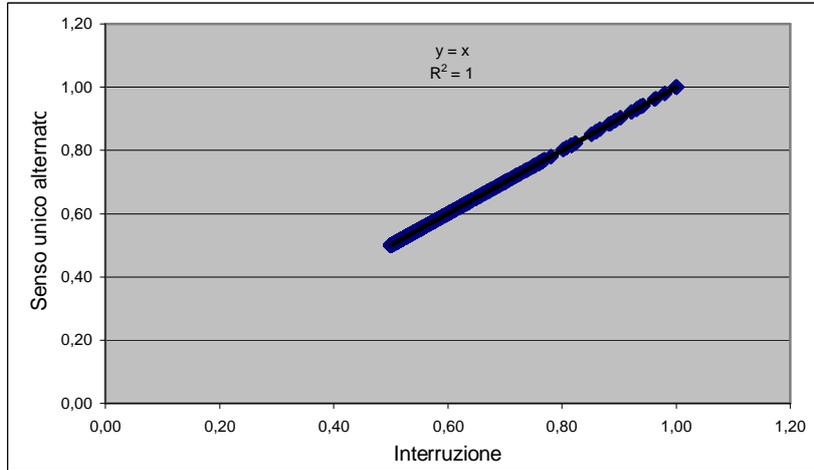
Grafico 9 Confronto tra l'esposizione indiretta ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità



Per quanto riguarda l'esposizione diretta questa si mantiene invariata (grafico 10) in entrambi i casi (sia per i cut links che per i non cut links). Infatti i dati usati per il calcolo sono gli stessi in entrambi i casi, in quanto il valore del

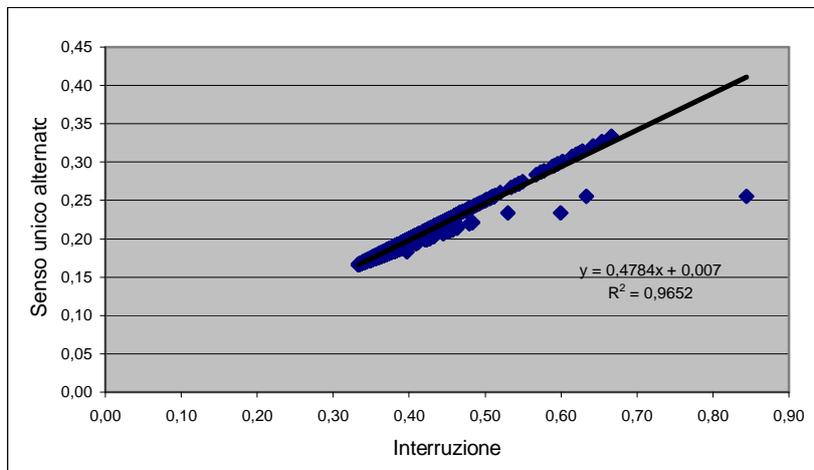
bene (espresso dall'esposizione) è lo stesso in ogni caso, indipendentemente dall'evento che potrebbe verificarsi sull'infrastruttura.

Grafico 10 Confronto tra l'esposizione diretta ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità



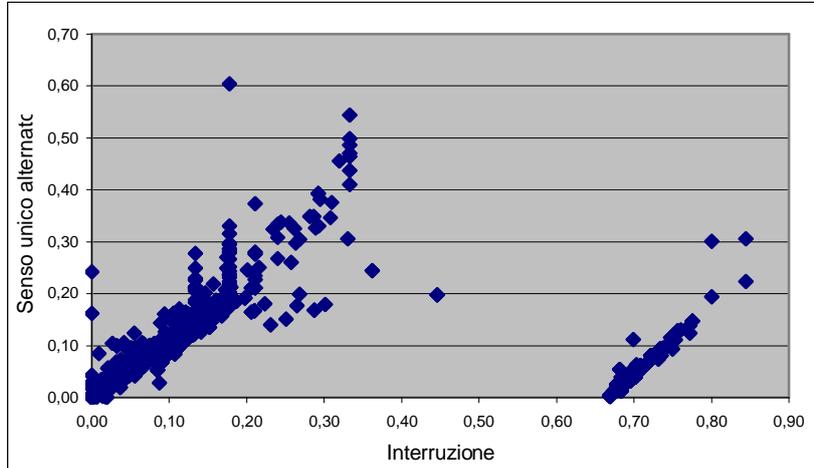
Per quanto detto l'esposizione complessiva è circa la stessa sia in caso di interruzione che in caso di riduzione della capacità (grafico 11). L'unica differenza sta nel fatto che l'esposizione indiretta nei cut links è diversa nei due casi e questo spiega il perché i punti non siano tutti esattamente allineati lungo una retta.

Grafico 11 Confronto tra l'esposizione ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità



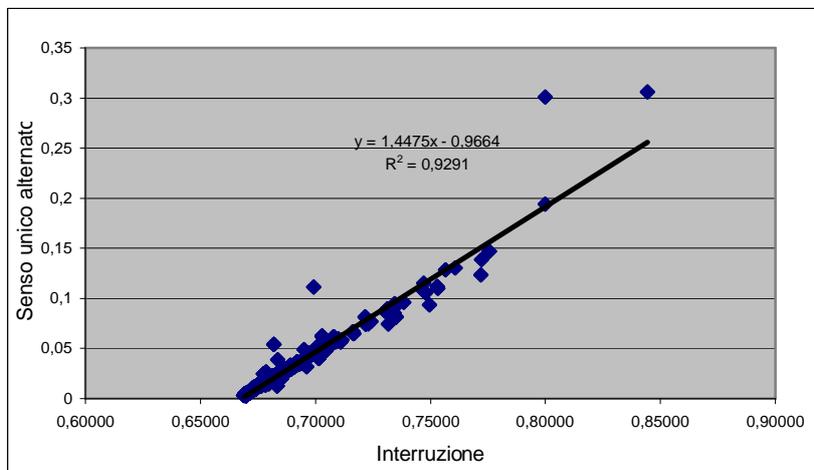
Per quanto riguarda la vulnerabilità (grafico 12) vale un discorso analogo a quello già fatto per il rischio.

Grafico 12 Confronto tra la vulnerabilità ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità



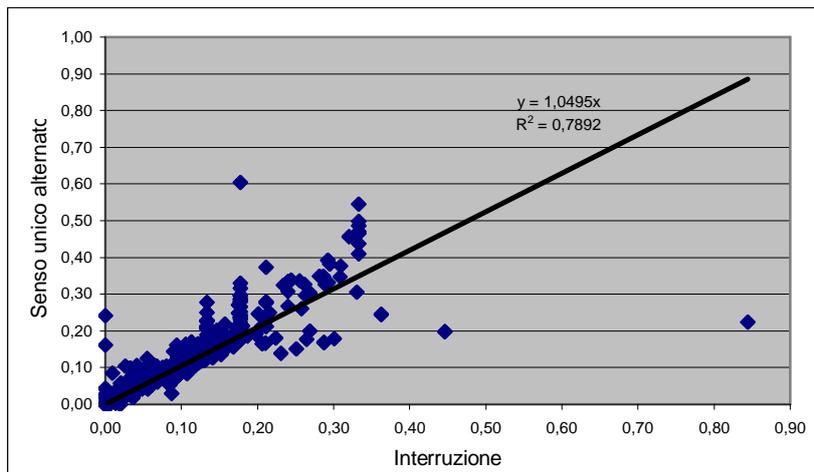
In questo caso la forte variazione che si ha per i cut links tra l'indicatore trovato nel caso dell'interruzione e quello relativo al caso della riduzione di capacità (grafico 13) è dovuta al fatto che nel primo caso questi archi vengono posti tutti in testa alla graduatoria con un indicatore di importanza pari a 1, mentre nel secondo caso questo non accade più, in quanto la differenziazione tra cut e non cut links di fatto non sussiste più.

Grafico 13 Confronto tra la vulnerabilità ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità per i cut links



Pertanto, per quanto riguarda i non cut links (grafico 14), i punti si trovano ad essere allineati lungo la bisettrice del quadrante. Le variazioni che si riscontrano sono deboli e ciò è un'ulteriore conferma al fatto che le due metodologie forniscono per i non cut links risultati analoghi.

Grafico 14 Confronto tra la vulnerabilità ottenuta in caso di interruzione e in caso di riduzione della capacità per i non cut links



CONCLUSIONI

Il tema dell'affidabilità e della vulnerabilità delle infrastrutture stradali in condizioni di emergenza ha acquisito negli ultimi decenni un'importanza sempre maggiore. Le metodologie per la previsione del rischio proposte in letteratura però sono varie e spesso legate a un livello di conoscenza della rete difficilmente ottenibile. Molti degli indici topologici per la valutazione della vulnerabilità, ad esempio, hanno alla base l'enumerazione di tutti gli itinerari che collegano le coppie *od* della rete in esame, problema questo difficilmente affrontabile, se non in reti di piccole dimensioni, ben diverse da quelle che si incontrano nei più frequenti casi di studio.

In questa tesi invece è stata proposta una metodologia che ha il vantaggio di basarsi su tecniche di analisi convenzionali e risulta pertanto applicabile a reti reali. La costruzione dei classici modelli di domanda, offerta e assegnazione è infatti la base per il calcolo di indicatori che consentono un'immediata classificazione degli archi in base alla loro criticità nei confronti di rischi di qualsiasi natura che potrebbero comprometterne la funzionalità.

Il lavoro è stato sviluppato per fasi: nella prima parte si è introdotto il problema del rischio attraverso l'analisi dello stato dell'arte e si sono presentate le

principali ricerche presentate negli ultimi anni, mentre nella seconda parte si è introdotta una nuova metodologia e se ne è presentata una applicazione a un caso di studio reale.

Nel capitolo 1 è stato quindi introdotto il problema del rischio nei confronti di eventi calamitosi per le infrastrutture viarie procedendo a una classificazione degli incidenti che possono comprometterne la funzionalità. In seguito è stato introdotto il concetto di rischio, soffermandosi sulla definizione delle varie componenti che concorrono alla sua determinazione: la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.

Nel capitolo 2 è stata sviluppata un'analisi critica della bibliografia esistente: in particolare ci si è soffermati sulle definizioni di vulnerabilità e di esposizione e sono state descritte alcune delle procedure e delle metodologie proposte per la valutazione di queste due quantità. Si è messo così in evidenza come il concetto di vulnerabilità non fosse in realtà definito in maniera univoca e come le metodologie per la sua valutazione cambiassero anche sostanzialmente a seconda di come veniva intesa la vulnerabilità dai diversi autori.

Il capitolo 3 è invece dedicato allo studio di una nuova metodologia per la previsione del rischio: in sostanza sono stati presentati alcuni nuovi indicatori per la valutazione della vulnerabilità e dell'esposizione e sono stati descritti i passi da seguire per arrivare ad una loro determinazione. In particolare la vulnerabilità associata ad un arco è stata riferita alla sua importanza all'interno della rete, valutandone le ripercussioni che una sua interruzione comporta agli utenti del sistema. Le conseguenze della chiusura di un arco sono state in particolare

valutate sulla base dell'incremento di costo generalizzato di viaggio, che misura il costo complessivo che un dissesto all'interno della rete causa a tutti gli utenti del sistema.

L'esposizione è stata distinta in due contributi: l'esposizione diretta, che riguarda gli utenti che utilizzano una strada danneggiata in seguito al verificarsi dell'evento, cioè persone o beni direttamente colpiti dall'evento calamitoso, e l'esposizione indiretta, che valuta le conseguenze indirette sul territorio servito da un'infrastruttura, per esempio danni economici, impossibilità di spostarsi o ritardi nell'erogazione dei soccorsi durante le emergenze. L'esposizione diretta viene calcolata sulla base del flusso che percorre la strada, mentre quella indiretta è legata al numero di spostamenti non più consentiti per effetto dell'interruzione di un arco. La chiusura di un arco infatti potrebbe rendere impossibili i collegamenti tra alcune coppie O/D. Questi archi che, in conseguenza degli effetti che producono sulla rete, sono chiamati cut links, presentano un grado di criticità molto alto e non possono essere trattati allo stesso modo degli altri archi. La loro interruzione infatti comporta che una certa quota della domanda di spostamento non venga assegnata con il conseguente isolamento di alcune zone.

Nel capitolo 4 la metodologia elaborata è stata applicata ad un caso reale: la valutazione del rischio per le strade della rete della Provincia di Bolzano. È stato così possibile costruire una graduatoria dei vari archi in funzione del rischio previsto.

Infine i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati applicando una metodologia leggermente diversa. In pratica è stata simulata una

riduzione di capacità dell'arco colpito da un dissesto idrogeologico, attraverso l'istituzione di un senso unico alternato. Le due metodologie sono risultate in generale analoghe per quanto riguarda la valutazione del rischio, ma hanno fornito conclusioni differenti per quanto riguarda i cut links. Infatti la riduzione della capacità non rende più impossibili i collegamenti tra le coppie O/D e quindi non esistono più i cut links.

La metodologia proposta ha fornito risultati soddisfacenti e l'ampio di base sviluppato risulta essere, già allo stato dell'arte, solido e facilmente adoperabile per analisi sulle reti di trasporto stradali anche di grosse dimensioni.

Ulteriori ricerche e approfondimenti sono però sicuramente necessari: sarebbe importante ad esempio specificare meglio la forma funzionale degli indicatori, calibrando i coefficienti che pesano il contributo dei vari termini.

Una maggiore attenzione dovrebbe poi essere dedicata all'analisi della rete, in modo tale da descrivere quale sia il livello di dettaglio ottimale per l'effettuazione delle analisi di vulnerabilità e per individuare quali siano gli elementi o le funzioni accessori che debbano essere segnalati e di cui si debba tenere conto (stazioni dei pompieri, ospedali, safelines, í).

BIBLIOGRAFIA

Baughen K. J., Constantinou C. C., Sepanenko A. S., *Understanding resiliency and vulnerability in transportation network design*

Berdica K., *An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*, Transport Policy 9, 2002

Cafiso S., Condorelli A., D'Andrea A., *Evaluation of seismic risk on road infrastructures*, PIARC XXI World Road Congress, Kuala Lumpur, 1999

Cafiso S., Colombritta R., D'Andrea A., Mussumeci G., Colombritta E., Condorelli A., *Un modello GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile*, Atti XI Convegno Nazionale SIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie "Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell'ambiente e di contributo per la protezione civile", Verona, Italy, 2001

Cascetta E., *Modelli per i sistemi di trasporto*, UTET, 2006

D'Andrea A., Condorelli A., a cura di, *Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie*, Comitato Tecnico 3.2 "Gestione dei rischi legati alle strade", Associazione Nazionale della Strada, AIPCR, Comitato Nazionale Italiano, XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre 2006

Di Gangi M., Luongo S., *Transportation network vulnerability indicators for risk evaluation and exposure reduction*, Association for European Transport and contributors, 2005

Erath A., Axhausen K. W., *New practices in vulnerability assessment*

Ferrari P., *Fondamenti di pianificazione dei trasporti*, Pitagora ed., 2001

Husdal J., *Reliability and vulnerability versus costs and benefits*

Lamanna F., *Time-related analysis of small world and scale free transportation networks*

Jenelius E., Mattsson L., *Developping a methodology for a road network vulnerability analysis*, 1st Seminar Nectar Cluster, Molde University College, Molde, Norway, 2006

Jenelius E., Petersen T., Mattsson L., *Importance and exposure in road network vulnerability analysis*, Transportation Research Part A, 2006

Jenelius E., *Redundancy importance: links as rerouting alternatives during road network disruptions*, International Conference on Evacuation Modeling and Management, 2010

Melis D., *Sviluppo di una metodologia per la valutazione della vulnerabilità di una rete stradale*

Russo F., Vitetta A., *Risk evaluation in a transportation system*, Modelli e metodi per l'analisi delle reti di trasporto in condizioni di emergenza: contribute metodologici ed applicativi

Sohn J., *Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach*, Transportation Research Part A 40, pp. 491-506, 2006

Taylor M. A. P., D'Este G. M., *Critical infrastructure and transport network vulnerability: developping a method for diagnosis and assessment*, 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability, Queenston and Christchurch, New Zealand, pp. 96-102, 2004