

VGR 2002
Convegno nazionale

**Valutazione e gestione del rischio
negli Insediamenti Civili e Industriali
Pisa, 15-17 Ottobre 2002**

**PROGETTO TRAMP
SVILUPPO E APPLICAZIONE DI METODI
PER L'ANALISI PREVENTIVA DEL RISCHIO
E L'ASSEGNAZIONE DEGLI ITINERARI**

Roberto Maja, Luca Studer, Gabriella Sala, Giovanni Vescia, Giovanna Marchionni
Politecnico di Milano – Dip. IN.D.A.CO.
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano

La presente memoria descrive l'impostazione e i risultati ottenuti fino al momento attuale dallo studio di fattibilità di un sistema telematico finalizzato a conseguire una maggiore sicurezza nel trasporto di merci pericolose con la modalità stradale.

Dopo un brevissimo inquadramento del progetto si fornisce una descrizione dell'ipostazione metodologica del sistema, che si basa sull'impiego dell'Analisi a Molti Obiettivi.

La parte centrale del lavoro è consistita nella impostazione e nell'implementazione di una procedura automatica per l'analisi del rischio associato al trasporto di merci pericolose lungo vari itinerari alternativi e per l'individuazione dell'itinerario a costo minimo.

Il testo si chiude con un esempio applicativo che illustra brevemente il funzionamento della procedura automatica.

1. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO

Il progetto TRAMP (Telecontrollo del Rischio nell'Autotrasporto di Merci Pericolose) consiste nello studio di fattibilità di un sistema telematico per il monitoraggio del trasporto su strada delle merci pericolose ai fini della prevenzione del rischio e della predisposizione delle operazioni di soccorso in caso di eventi incidentali. All'interno del progetto è possibile individuare due attività principali:

1. analisi preventiva del rischio associato a un viaggio e assegnazione dell'itinerario che minimizza tale indice,
2. monitoraggio e supervisione in tempo reale del veicolo e del carico trasportato durante lo svolgimento del viaggio stesso.

Il progetto si inserisce nell'ambito della ricerca "Mappatura del sistema plurimodale dei trasporti - Progetto pilota per un sistema di telecontrollo dei carichi pericolosi", finanziata dal CNR-GNDRCIE (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici) per conto del Dipartimento della Protezione Civile, in corso presso il Politecnico di Milano.

Le due attività sopra indicate, seppur separate da un'impostazione metodologica differente, risultano strettamente correlate all'interno del Sistema di Controllo preposto al monitoraggio e alla gestione dei carichi trasportanti merce pericolose strutturato su due livelli:

- livello istituzionale, gestito da **Centrali di Controllo e Coordinamento (CCC)**, con funzione di previsione e prevenzione del rischio e di supporto alla gestione delle emergenze,
- livello operativo, con delega per il controllo continuo durante il trasporto e per l'assistenza ai conducenti, affidato a **Centrali Operative Periferiche (COP)** presenti nelle aziende di trasporto o in apposite società di servizio.

L'attività 2 pone particolare attenzione agli aspetti tecnologici del sistema deputato ad acquisire ed elaborare le informazioni relative al compimento dell'attività di trasporto vera e propria ed è oggetto di una memoria separata che ne descrive i contenuti e i risultati [11].

La prima attività riguarda gli aspetti modellistici e di analisi delle componenti di rischio nel trasporto di merci pericolose, con lo scopo di specificare le funzioni di prevenzione da affidare alla Centrale di Controllo e Coordinamento del sistema, traducendole da indicazioni teoriche in valutazioni quantitative trasportabili in azioni pratiche.

Sulla base di questa impostazione, la funzione principale della CCC è quella di valutare preventivamente il rischio associato a ogni trasporto di merci pericolose e di fornire al vettore indicazioni finalizzate alla minimizzazione del rischio stesso. Tali indicazioni riguardano in particolare l'itinerario da seguire, la tempistica del viaggio ed eventuali raccomandazioni, divieti o obblighi supplementari.

L'analisi finalizzata alla definizione dell'itinerario a rischio minimo è stata strutturata su due fasi:

- la prima si basa sull'individuazione dei dati necessari partendo dagli strati cartografici disponibili, sulla definizione dei diversi fattori che concorrono a caratterizzare il rischio e sulla capacità di rappresentare questi fattori mediante elementi georeferenziati;
- la successiva riguarda l'elaborazione di questi stessi dati e la loro organizzazione in una procedura di valutazione e minimizzazione del rischio che sia gestita da un programma di calcolo automatico.

Per ottenere questi risultati è stata definita e sviluppata una metodologia basata su due elaborazioni successive: la prima procedura (IPM) è finalizzata alla generazione di un insieme di itinerari alternativi, la seconda consiste nell'applicazione di una Analisi Multicriteria appositamente concepita per la valutazione degli itinerari stessi in base ai criteri di rischio ben determinati.

L'effettuazione di queste procedure richiede una certa quantità di dati alcuni dei quali variabili in termini sia temporali sia spaziali; questo ha fatto nascere l'esigenza di interporre fra dati e analisi del rischio un modello di analisi e previsione del traffico con la conseguente necessità di:

- reperire e organizzare le informazioni relative all'infrastruttura su un grafo e modellizzare tutti gli aspetti che rientrano nell'analisi del rischio; la determinazione dello stato del traffico e dei tempi di percorrenza in fase di pianificazione può essere affrontata con un processo di assegnazione, che indica qual è lo stato di carico e di congestione della rete in un certo periodo di riferimento, il che comporta necessariamente anche la modellizzazione della domanda;
- disporre di un sistema per il monitoraggio in tempo reale dei carichi insistenti sulla rete: questo presuppone non solo un sistema di rilievo continuo del traffico, o comunque dei mezzi trasportanti merce pericolosa, ma anche una struttura di calcolo e di rappresentazione molto potente a causa della numerosità delle informazioni da trattare.

Nel seguito della memoria si descrive l'impostazione metodologica delle procedure implementate e se ne illustra successivamente il funzionamento mediante un esempio applicativo.

La scarsità dello spazio disponibile impedisce di fornire una descrizione esaustiva dell'architettura del sistema di monitoraggio e dei suoi principi di funzionamento. Indicazioni di dettaglio in merito al progetto TRAMP in particolare e ai problemi associati al trasporto di merci pericolose in generale sono riportate rispettivamente nei testi [10] e [13] e negli altri testi citati nella bibliografia, ai quali si rimanda.

2. IMPOSTAZIONE METODOLOGICA

Come è stato precedentemente indicato, l'individuazione da parte della CCC di itinerari a minimo rischio da indicare a chi esegue il trasporto dovrebbe avvenire in due fasi:

- definizione di un insieme di percorsi alternativi significativamente dissimili, in modo da poter disporre di un insieme sufficientemente esteso di possibilità da valutare successivamente,
- analisi dei percorsi definiti nella fase precedente per costruire un elenco ordinato contenente gli itinerari che soddisfano alcuni criteri di compatibilità tra la merce trasportata e l'ambiente attraversato.

Per l'esecuzione della prima fase si è ravvisato lo strumento più adatto nell'*Iterative Penalty Method* (IPM). Per la seconda fase, dopo una serie di valutazioni comparate dei metodi disponibili, la scelta è caduta

sull'*Analisi a Molti Attributi* (AMA), in quanto è risultato l'unico metodo correttamente formulato dal punto di vista teorico in modo adeguato alle esigenze di questa applicazione. Esso infatti permette di:

- considerare la presenza simultanea di stime qualitative e quantitative dei criteri;
- tenere conto del conflitto in modo esplicito senza occultarlo;
- consentire la partecipazione delle diverse parti coinvolte non fingendo che la fase decisionale sia oggettiva, ma gestendone la soggettività in modo trasparente e ripercorribile;
- prevedere l'eliminazione successiva delle alternative.

Oltre ai vantaggi sopra indicati si sottolinea un altro importante aspetto dell'AMA: essa permette di ottenere una classificazione delle alternative in ordine di preferenza. Nella fattispecie di questa applicazione, ciò significa che se durante un viaggio un veicolo avesse la necessità di cambiare itinerario (a causa, per esempio, del mutamento di alcune condizioni del traffico o di altri fenomeni rilevanti), sarebbe possibile fornire immediatamente una scelta alternativa senza dover ripetere la procedura di valutazione.

Una volta compiuta l'analisi metodologica sopra citata, è stata implementata una serie di procedure informatizzate che permette di eseguire in modo automatico la quasi totalità delle operazioni che, nelle ipotesi del progetto, dovranno in futuro essere svolte dalla CCC.

Nel seguito della memoria vengono descritti i passi da seguire per ottenere una valutazione del rischio associato a ogni trasporto su strada e, di conseguenza, gli itinerari più adatti al trasporto stesso. In sintesi, la procedura si articola sui punti seguenti:

- generazione delle alternative mediante l'IPM;
- definizione delle caratteristiche degli indicatori da utilizzare nell'AMA;
- costruzione della matrice di valutazione e del vettore dei pesi;
- ordinamento delle alternative;
- analisi di sensitività.

3. ITERATIVE PENALTY METHOD

L'impiego di un metodo di valutazione multiattributi presuppone di avere preliminarmente individuato un insieme di itinerari alternativi da sottoporre all'analisi per la scelta finale; di tale insieme possono far parte percorsi proposti alla CCC dall'azienda di trasporto, in quanto già abitualmente utilizzati o più conosciuti dai conducenti. In ogni caso è opportuno che non si sottopongano alla valutazione di rischio itinerari che non sarebbe possibile in seguito proporre alle aziende di trasporto, in quanto anti-economici.

Per questi motivi, l'insieme delle alternative deve essere numericamente limitato e garantire già in questa prima fase l'esclusione di percorsi che, rispetto al più breve o più veloce, impongano una penalizzazione nei costi superiore ad un certo limite (variabile anche rispetto al grado di pericolosità della merce: per merci molto pericolose si può accettare una penalizzazione maggiore in nome della sicurezza e dell'interesse pubblico). Come criterio economico si può utilizzare il tempo di percorrenza presunto, attribuito in base alla velocità commerciale media (associabile alla tipologia stradale e alle condizioni tipiche del traffico) e alla lunghezza degli archi. Pertanto, tra gli itinerari che uniscono un'origine con una destinazione vengono individuati quelli che sono caratterizzati:

- da un costo che si discosta da quello dell'itinerario ottimo in misura inferiore ad una certa soglia;
- dalla maggiore dissimilarità spaziale, cioè dal minor numero possibile di archi in comune.

Il metodo permette cioè di individuare un insieme di alternative, tutte economicamente accettabili ma il più possibile differenti spazialmente tra loro. La dissimilarità degli itinerari si rivela particolarmente utile nel problema dell'instradamento delle merci pericolose, per diversi motivi:

- la CCC ha anche il compito di verificare che, prima o durante il viaggio, alcuni impedimenti imprevisti come incidenti o lavori non limitino o rendano inopportuna la percorrenza di un arco stradale: avere a disposizione itinerari alternativi, con rischio e lunghezza leggermente superiori e già valutati in anticipo, ma che in quel momento non presentano impedimenti, permette di fornire immediatamente indicazioni alternative, giovando molto alla velocità e all'efficienza della soluzione del problema;
- se diversi mezzi che trasportano merci incompatibili tra di loro devono effettuare il viaggio tra la stessa coppia origine/destinazione, in tempi ed orari molto ravvicinati, la possibilità di avere a disposizione itinerari che tengono il più possibile gli automezzi lontani tra loro contribuisce in modo determinante all'abbassamento del rischio totale associato ad entrambi i viaggi,
- l'utilità del modello aumenta in modo più marcato quando i mezzi sono numerosi: la possibilità di instradarli su diversi percorsi dissimili contribuisce al raggiungimento dell'equità spaziale del rischio, "spal-

mando” quest’ultimo in una zona territoriale più vasta; in questo modo si contribuisce ad abbassare il rischio per i ricettori esterni, che vengono coinvolti da un minor numero di passaggi di merci pericolose.

- se alcuni fenomeni atmosferici avversi rendono pericoloso il transito in determinati archi del percorso, diventa importante poter deviare l’itinerario dell’automezzo e fargli percorrere archi sufficientemente lontani dai primi, in modo da portarlo all’esterno della zona interessata dall’evento senza provocare un aumento incontrollato del tempo e della lunghezza del viaggio.

Per raggiungere i due scopi dell’efficienza economica e della dissimilarità spaziale, si è individuato il metodo denominato IPM (Iterative Penalty Method), che coniuga l’efficacia alla maggiore semplicità di impiego, come è stato verificato con test e prove sperimentali. Esso è stato definito e applicato nell’ambito del trasporto di merci pericolose da Johnson et al. nel 1992 [XX]; tra le applicazioni più interessanti sono da citare quelle di Ruphail et al. nel 1995 [XX] e di Erkut et al. Del 1997 [XX].

L’impostazione dell’IPM si basa su una sequenza di iterazioni in cui viene impiegato un algoritmo di ricerca del percorso di costo minimo all’interno di una rete viaria. La procedura prevede che, a partire dalla seconda iterazione, ad ogni passo si proceda incrementando di una percentuale fissa le impedenze degli archi individuati in quello precedente.

Questo accorgimento viene introdotto per avere a disposizione, come risultato finale, una serie di percorsi differenti l’uno dall’altro in modo significativo per soddisfare le esigenze sopra evidenziate.

Per quanto riguarda il processo della penalizzazione, sono da tenere in considerazione alcuni aspetti importanti:

- la penalizzazione può riguardare gli archi, i nodi, o contemporaneamente gli archi e i nodi di un percorso già individuato nell’iterazione precedente;
- il tipo di penalizzazione può essere di natura additiva (si somma all’impedenza una quantità fissa) o moltiplicativa (si moltiplica l’impedenza per un coefficiente maggiore dell’unità);
- la quantità fissa (o il coefficiente di penalizzazione) influenza notevolmente il risultato ottenuto: più sono elevati i valori in questione e più rapidamente si ottengono percorsi dissimili; tuttavia potrebbe capitare di ottenere un aumento sensibile della lunghezza dei percorsi rispetto all’itinerario che minimizza la distanza tra due punti;
- la penalizzazione può riguardare tanto l’ultimo percorso trovato, quanto tutti gli altri individuati in precedenza.

Uno dei vantaggi dell’IPM è la semplicità d’impiego, ma esistono anche alcuni aspetti negativi da non trascurare:

- l’arbitrarietà delle scelte relative al tipo e alla modalità di penalizzazione;
- la possibilità che nella computazione possano verificarsi errori di calcolo legati all’instabilità numerica di determinate operazioni.

4. ANALISI MULTI ATTRIBUTO

Si tratta di un sistema di supporto alle decisioni che permette di valutare una serie di alternative secondo diversi criteri, di caratteristiche anche disomogenee e di tipo quantitativo o qualitativo. Lo strumento fondamentale di analisi è una matrice di decisione in cui le righe sono relative alle alternative in esame e le colonne ai criteri di giudizio; l’elemento generico della matrice è costituito dalla misura della rispondenza dell’alternativa *i*-esima al criterio *j*-esimo, cioè dalla misura del contributo che quell’alternativa dà al raggiungimento dell’obiettivo di cui il criterio di valutazione rappresenta lo strumento interpretativo.

La molteplicità dei criteri di giudizio permette il raggiungimento di un sistema di obiettivi, in cui nell’applicazione in oggetto possono trovare luogo aspetti sia di tipo economico (tempo, costo), sia relativi alle infrastrutture, sia all’ambiente, sia alla popolazione. Ai diversi obiettivi è possibile attribuire un peso, rappresentativo dell’importanza che il decisore attribuisce a ognuno di essi: in questo modo è possibile compiere un’analisi in cui privilegiare, a seconda dell’interesse pubblico ritenuto preminente o anche del rischio specifico, una o l’altra delle componenti appena citate.

Il passo finale è l’interpretazione della matrice di decisione, tramite opportuni metodi, per stilare una graduatoria delle alternative o individuare quelle preferibili.

Il metodo presenta anche il vantaggio di prestarsi alla futura inclusione di ulteriori criteri di giudizio, non appena saranno disponibili dati attualmente mancanti (ad esempio sulla geologia dei terreni), tramite l’aggiunta di una o più colonne alla matrice di decisione.

L’esistenza di più criteri significa che non esiste, in generale, una singola strada migliore tra origine e destinazione: dall’analisi può uscire l’indicazione di un itinerario che, sinteticamente, risulta il più soddisfacente.

te rispetto al maggior numero di criteri pesati, ma si può ottenere anche solo un certo numero di percorsi dominanti o ritenuti accettabili dal punto di vista del rischio. In quest'ultimo caso l'effetto dell'analisi è l'eliminazione delle alternative non accettabili e il complementare riconoscimento di un insieme accettabile.

Questa flessibilità d'uso del metodo consente sia di indicare all'autotrasportatore quale percorso egli debba seguire nel trasporto per massimizzare la sicurezza, sia di valutare l'accettabilità dell'itinerario già seguito o proposto dal trasportatore stesso.

Una volta proposto (o accettato) l'itinerario tramite l'analisi a priori, la CCC può come già detto verificare la percorribilità dell'itinerario stesso o il mutamento delle condizioni di rischio ad esso associate utilizzando dati istantanei o aggiornati in tempo reale. In questo caso è importante che la CCC abbia a disposizione non solo l'itinerario migliore, ma anche una serie di alternative da utilizzare (anche solo per tratte parziali) per indicare ai veicoli quali archi possano essere percorsi, nel caso in cui l'itinerario già autorizzato presenti un rischio aumentato.

4.1. Definizione degli indicatori

Nel definire gli indicatori si è concentrata l'attenzione sul controllo dei fattori capaci di influenzare la probabilità di accadimento di un evento dannoso o la gravità delle sue conseguenze. In particolare sono stati considerati i seguenti aspetti:

- l'uso del suolo;
- la popolazione;
- le condizioni meteorologiche;
- l'incidentalità intrinseca di ogni strada;
- il traffico;
- il tempo di percorrenza.

L'uso degli indicatori comporta i seguenti vantaggi:

- dirigono la raccolta delle informazioni e le rendono accessibili;
- forniscono misure quantificabili che risultano molto utili per il supporto alle decisioni;
- permettono raffronti;
- permettono di misurare l'efficacia e di valutare i progressi derivanti da qualsiasi azione;
- consentono la valutazione di componenti ambientali non misurabili;
- consentono l'integrazione e la comparazione tra vari aspetti.

Per ognuno degli indici utilizzati in questo lavoro, si sono compiute le seguenti azioni:

- verifica dell'eventuale influenza di un indice considerato sulla probabilità d'accadimento di un sinistro o sulle conseguenze da esso derivanti;
- definizione di tutti gli scenari coinvolti nello studio;
- espressione di un giudizio sulla pericolosità di ogni scenario generato;
- definizione di una rappresentazione sintetica dei giudizi espressi.

In generale per tutti gli indicatori si sono considerati i seguenti giudizi qualitativi, in ordine crescente di pericolosità: pochissimo, poco, discreto, molto, moltissimo.

4.2. Costruzione della matrice delle alternative

Una volta generato un numero sufficiente di percorsi alternativi tra i quali effettuare la scelta e descritti tutti gli indicatori che rappresentano i principali aspetti che influenzano il rischio associato al trasporto di merci pericolose, non rimane che abbinare a ciascun itinerario generato, uno e un solo valore che descrive la prestazione del percorso rispetto ad ogni indicatore utilizzato. Tale valore non sarà altro che un elemento $g_i(i)$ che andrà a riempire la matrice di valutazione, punto di partenza per il processo di valutazione delle alternative che porterà alla scelta dell'itinerario a rischio minimo.

Gli indici di rischio utilizzati in questo studio sono riconducibili a misure di tipo areale o lineare. Per associare a ciascun percorso la prestazione di ogni indicatore è necessario realizzare una serie d'intersezioni spaziali. Esse riguardano gli itinerari stessi e gli strati cartografici georeferenziati relativi ad ogni indicatore. Allo scopo di rendere più semplice questo tipo d'operazione è stato necessario tradurre i giudizi qualitativi in valori numerici secondo quanto riportato nella Tabella 1.

Come risultato di ogni intersezione si ottengono la lunghezza di ogni arco facente parte di ogni itinerario generato e un numero rappresentativo del rischio associato all'arco stesso per ogni indicatore. Per ottenere un valore significativo per tutto l'itinerario è necessario aggregare i dati di ogni percorso.

Giudizio espresso	Valore numerico
Pochissimo	1
Poco	2
Discreto	3
Molto	4
Moltissimo	5

Tabella 1 - Valori numerici associati alla scala di giudizio qualitativa.

Gli indicatori di tipo areale considerati nell'analisi sono:

- uso del suolo,
- popolazione,
- probabilità degli eventi meteorologici,
- conseguenze delle condizioni meteo.

Effettuando un'intersezione spaziale in ambiente GIS tra tutti i percorsi generati e gli strati informativi degli indicatori è possibile associare ad ogni arco stradale l'indice di rischio dell'area da esso attraversata.

Per aggregare queste informazioni e ottenere un indice totale per l'intero percorso, si è quantificata una media pesata dei singoli archi utilizzando la seguente formula:

$$I_{TOT} = \frac{\sum_i^n (I_i * L_i)}{\sum_i^n L_i}$$

Dove:

- I_{TOT} : indice totale dell'itinerario che rappresenta la prestazione d'ogni itinerario per l'indicatore in considerazione;
- I_i : indice dell'arco pari a quello dell'area attraversata;
- L_i : lunghezza dell'arco i -esimo;
- n : numero degli archi che compongono l'itinerario.

I dati derivanti dalle intersezioni sono raggruppati in modo che per ogni arco stradale siano riportati un codice distintivo (A_{ij}), il valore dell'indicatore di rischio ad esso associato (ottenuto dall'intersezione spaziale) (I_{ij}) e la sua lunghezza (L_{ij}). Utilizzando i dati riportati, si calcola (con la media pesata) la prestazione complessiva I_{toti} per ogni alternativa e per ogni indicatore.

Tra gli indicatori descritti, quelli che esprimono il loro giudizio direttamente sugli archi stradali sono il traffico e l'incidentalità. La procedura d'intersezione spaziale è ora di tipo lineare, ma concettualmente rimane identica alla precedente.

Anche per questi indicatori è stata calcolata una media pesata ottenendo un'unica valutazione per l'intero percorso. La formula impiegata è la stessa usata per l'intersezione di tipo areale.

L'unico indicatore per il quale non è ancora possibile esprimere un giudizio qualitativo è il tempo di percorrenza. Esso è stato ricavato utilizzando la seguente formula:

$$Tempo [h] = \frac{Lunghezza\ arco [km]}{Velocità\ commerciale [km/h]}$$

Il tempo totale è dato dalla sommatoria dei tempi necessari per percorrere ogni arco stradale che costituisce il percorso. Nella matrice delle alternative la prestazione dell'indicatore tempo di percorrenza è rappresentata direttamente con una previsione dello stesso espressa in ore.

4.3. Valutazione delle alternative

Costruita la matrice di valutazione, per individuare l'itinerario a rischio minimo che collega un'origine con una destinazione mediante l'analisi a molti attributi sono stati sviluppati i seguenti punti:

- stima della funzione d'utilità per i singoli attributi;
- stima dell'utilità complessiva e assegnazione dei pesi ad ogni indicatore;
- analisi di sensitività e valutazione dei risultati ottenuti.

Durante la realizzazione dei primi due punti dell'analisi risulta d'importanza determinante il ruolo del decisore, in quanto introduce elementi di soggettività che influenzano in modo decisivo l'ordinamento finale delle alternative. Considerando quest'aspetto, durante tutte le fasi del processo decisionale che richiedono l'interazione con il decisore si è lasciata la possibilità all'utente di poter variare qualsiasi giudizio espresso; inoltre si è prestata particolare attenzione a rendere semplice l'approccio dell'utente al processo decisionale, garantendo che tutte le informazioni siano fornite in modo chiaro e completo.

Le funzioni d'utilità per tutti gli indicatori considerati non possono essere reperite in letteratura. Esse devono essere costruite interagendo con il decisore. Successivamente è necessario verificarne la consistenza, cioè controllare che, preso un punto qualsiasi sulla funzione di utilità, l'utilità letta e quella espressa dal decisore coincidano.

Anche in questa fase del lavoro, si è lasciata all'utente la possibilità di esprimere la propria sensibilità rispetto agli argomenti trattati; infatti sono state individuate sei funzioni di utilità per soddisfare tutti i differenti possibili approcci rispetto al rischio associato al trasporto di merci pericolose.

Un comportamento del decisore propenso al rischio è rappresentato da una funzione di utilità convessa, un comportamento avverso da una funzione concava, mentre la completa indifferenza al rischio è definita con una retta inclinata di 45°.

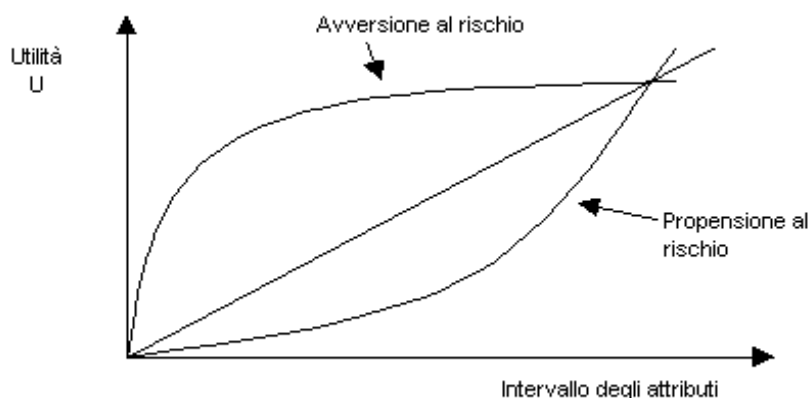


Figura 1 - Funzioni di utilità che rappresentano l'avversione e la propensione al rischio.

L'intervallo degli attributi per gli indicatori considerati nello studio è compreso tra i valori uno e cinque. Al primo corrisponde la situazione meno pericolosa (e, quindi, quella che comporterebbe la massima soddisfazione), all'ultimo lo scenario peggiore (tale valore lascerà il decisore completamente insoddisfatto). La funzione di utilità che meglio rappresenta questi indicatori è monotona decrescente ed ha, come estremi, i seguenti punti: $u(5) = 0$ e $u(1) = 1$.

A questo punto è lasciata all'utente la possibilità di scegliere tra le varie funzioni che reputa migliore.

Una volta ricavate le funzioni di utilità per tutti gli indicatori considerati, è necessario trovare un metodo per ordinare le alternative in esame. Per fare ciò è necessario ricavare l'utilità complessiva, applicando la proprietà di addittività alle utilità relative dei singoli attributi.

Definiti i pesi da associare a ogni criterio è possibile calcolare la prestazione complessiva J_{TOT} , relativa a ogni alternativa, come la somma pesata delle sue prestazioni rispetto ai singoli criteri.

$$J_{TOT} = J_1 * w_1 + J_2 * w_2 + \dots + J_n * w_n$$

Dove:

- J_{TOT} = prestazione complessiva dell'alternativa;
- J_i = criteri (indicatori);
- w_i = pesi attribuiti agli indicatori.

I pesi w_i permettono di assegnare un'importanza relativa ai criteri. L'insieme dei pesi viene rappresentato tramite un vettore L . Esso dovrebbe essere fornito dal decisore perché deve rispettare la struttura delle sue preferenze. Per rendere il metodo trasparente è prevista la possibilità per il decisore di modificare di volta in volta i valori dei pesi.

Calcolata la prestazione complessiva J_{TOT} per ogni alternativa è possibile, infine, individuare il percorso migliore scegliendo quello caratterizzato dal valore massimo

4.4. Analisi di sensitività

Un processo decisionale è influenzato dall'incertezza e dalla soggettività dei giudizi espressi dal decisore. Pur essendo un metodo matematicamente rigoroso, anche nell'analisi a molti criteri classica ci sono alcuni elementi di soggettività non trascurabili.

L'attribuzione dei pesi, per esempio, influenza notevolmente l'ordinamento finale delle alternative. Per questo motivo è necessario analizzare questo aspetto, cercando di comprendere come le valutazioni del decisore condizionano il processo decisionale. Di conseguenza, si è svolta un'analisi di sensitività sui pesi attribuiti a ogni indicatore cercando i valori che comportano un *rank reversal* nell'ordinamento delle alternative. L'impostazione dell'analisi consiste nel fare variare uno per volta i pesi attribuiti a ogni indicatore, imponendo agli altri un peso uguale al complementare (1meno il peso dell'indicatore in considerazione) diviso 8 (il numero degli indicatori rimanenti).

Utilizzando il metodo della bisezione sono stati individuati gli intervalli di variazione dei pesi che portano alla scelta di ogni alternativa.

Dall'analisi dei risultati si possono ottenere importanti informazioni, infatti vengono evidenziate le alternative dominate, ovvero quelle che per qualsiasi combinazione dei pesi da assegnare non risulterebbero mai essere le migliori e che devono essere eliminate perché inefficienti. L'analisi di sensitività evidenzia inoltre quali sono gli indicatori per i quali la scelta del peso da attribuire risulta particolarmente delicata, perché una piccola variazione del peso ad essi assegnato comporta grandi variazioni del risultato finale (questi indicatori vengono chiamati a elevata sensitività). Gli indicatori che non cambiano mai l'ordinamento per qualsiasi valore del peso ad essi attribuito vengono chiamati a sensitività nulla e in questo caso la scelta del peso da attribuire loro non risulta minimamente critica.

L'analisi di sensitività è stata svolta solamente sui pesi da assegnare durante il calcolo della funzione di utilità complessiva perché risulta essere la componente dello studio dove la soggettività assume un'importanza dominante.

5. SPERIMENTAZIONE

Per rendere più chiara la procedura spiegata nei precedenti capitoli, si mostra un esempio applicativo che descrive tutte le operazioni che un utente deve compiere per determinare il percorso a rischio minimo. Nell'esempio si fa riferimento ad un trasporto che deve svolgersi all'interno della regione Lombardia, tra le città di Milano e Cremona.

La prima operazione è la compilazione della maschera "Caratteristiche del trasporto" nella quale vanno inserite le seguenti informazioni:

- origine del viaggio: Milano;
- destinazione del viaggio: Cremona;
- tipo di sostanza trasportata: appartenente alla classe A (Sostanze gassose e solide infiammabili, esplosive e comburenti, sostanze poco esplosive, gas compressi);
- ora di partenza: 16.00.

Una volta inseriti questi dati, l'utente ha la possibilità di variare i giudizi di pericolosità espressi per ogni indicatore; per l'esempio in questione si sono utilizzati quelli preimpostati dalla procedura.

Ricevute le informazioni necessarie il software calcola in modo automatico tutti gli indicatori di rischio e li visualizza su carte tematiche in ambiente GIS Arcview.

Il secondo passo da compiere per continuare l'analisi è quello di generare un numero desiderato di percorsi che collegano l'origine con la destinazione del viaggio in considerazione. Questa operazione è svolta dal software utilizzando in modo completamente automatico l'Iterative Penalty Method. Prima di iniziare la generazione dei percorsi è necessario inserire le seguenti informazioni:

- numero di itinerari che si desidera generare: 4;
- percentuale di penalizzazione da assegnare agli archi già utilizzati da altri percorsi: 10%.

Si ottengono quindi gli itinerari alternativi oggetto della valutazione.

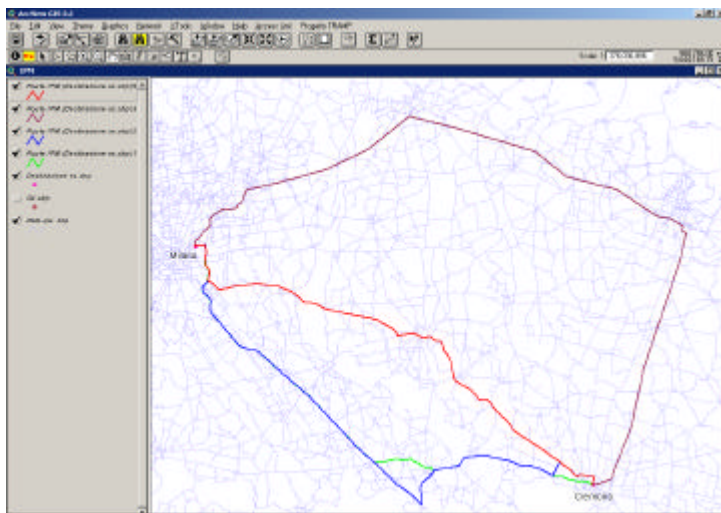


Figura 2 - Visualizzazione dei quattro itinerari generati.

Generati i percorsi, il software interseca automaticamente gli itinerari con gli strati cartografici, assegnando in questo modo ad ogni arco stradale utilizzato un valore numerico che mostra la prestazione dell'arco stesso per ogni indicatore di rischio. I dati così ottenuti sono aggregati al fine di rappresentare per ogni indicatore e per ogni percorso la prestazione complessiva. In questo modo è possibile costruire la matrice delle alternative ed iniziare la fase di valutazione.

Alternative	Tempo di percorrenza	Tenuta di strada	Visibilità	Uso del suolo	Meteo Conseguenze	Rischio di incidente	Rischio di mortalità	Traffico	Popolazione
ALT1	1,63967	2,98645	2,83370	1,84844	3,70934	3,29041	4,27943	3,75975	2,33194
ALT2	1,72695	2,92580	2,77286	3,50899	3,70009	3,53210	4,13942	3,95712	2,92866
ALT3	1,84858	2,52400	2,52400	4,00016	2,60569	3,17301	3,59617	3,10219	3,25328
ALT4	1,81598	2,45236	1,85987	3,93856	4,09630	4,87433	3,96618	4,15557	2,92914

Tabella 2 - Matrice delle alternative.

Il primo passo della fase di valutazione è quello di stimare la funzione di utilità per i singoli attributi chiedendo all'utente di scegliere tra alcune differenti funzioni di utilità quella che meglio rappresenta la propria sensibilità verso gli argomenti trattati. Per l'esempio in oggetto si è scelta la funzione di utilità A per tutti gli indicatori, rappresentando quindi un comportamento completamente razionale del decisore, infatti essa ha un andamento linearmente decrescente dal valore 1 in corrispondenza dell'origine al valore nullo in corrispondenza del valore 5 degli attributi.

Per quanto riguarda l'indicatore tempo di percorrenza, viene richiesto all'utente di inserire la percentuale del tempo minimo di viaggio che, incrementata allo stesso, rende inaccettabile la scelta del percorso. Per l'esempio in oggetto si è scelto di considerare inaccettabile un tempo di viaggio doppio di quello minimo: la percentuale inserita è quindi il 100%.

Applicate le funzioni di utilità a tutti gli indicatori, si ottiene una nuova matrice i cui elementi non rappresentano più la prestazione di ogni alternativa rispetto ad ogni indicatore, ma il livello di soddisfazione del decisore derivante dalla prestazione stessa.

Alternative	Tempo di percorrenza	Tenuta di strada	Visibilità	Uso del suolo	Meteo Conseguenze	Rischio di incidente	Rischio di mortalità	Traffico	Popolazione
ALT1	1,00000	0,50339	0,54158	0,78789	0,32267	0,42740	0,18014	0,31006	0,66701
ALT2	0,94676	0,51855	0,55679	0,37275	0,32498	0,36698	0,21515	0,26072	0,51783
ALT3	0,87259	0,61900	0,61900	0,24996	0,59858	0,45675	0,35096	0,47445	0,43668
ALT4	0,89247	0,63691	0,78503	0,26536	0,22592	0,03142	0,25846	0,21111	0,51771

Tabella 3 - Matrice delle prestazioni.

Analizzando la Tabella 3 si può notare che nessuna delle alternative risulta essere dominata, quindi tutte devono essere considerate nella fase di valutazione.

Una volta ricavata la matrice di valutazione con le utilità, si deve trovare un metodo per ordinare le alternative in esame. Per fare questo è necessario calcolare l'utilità complessiva J_{TOT} di ogni alternativa, applicando una somma pesata alle prestazioni rispetto a tutti gli indicatori rischio considerati.

Anche durante questa operazione l'utente deve esprimere le proprie preferenze assegnando i pesi ad ogni criterio. Per questo esempio è stato attribuito a tutti i criteri il medesimo peso.

Alternative	Tempo di percorrenza	Tenuta di strada	Visibilità	Uso del suolo	Meteo Conseguenze	Rischio di incidente	Rischio di mortalità	Traffico	Popolazione
Pesi	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,112

Tabella 4 - Vettore dei pesi per ogni indicatore.

Calcolando in questo modo la prestazione complessiva J_{TOT} di ogni alternativa è possibile determinare facilmente il percorso meno pericoloso scegliendo tra quelli a disposizione quello con la J_{TOT} maggiore. Per l'esempio in esame il percorso meno pericoloso risulta essere il primo itinerario generato dall'algoritmo IPM.

Alternative	Vettore degli ordinamenti
ALT1	0,52682
ALT2	0,45345
ALT3	0,51969
ALT4	0,42503

Tabella 5 - Vettore degli ordinamenti per le alternative in esame.

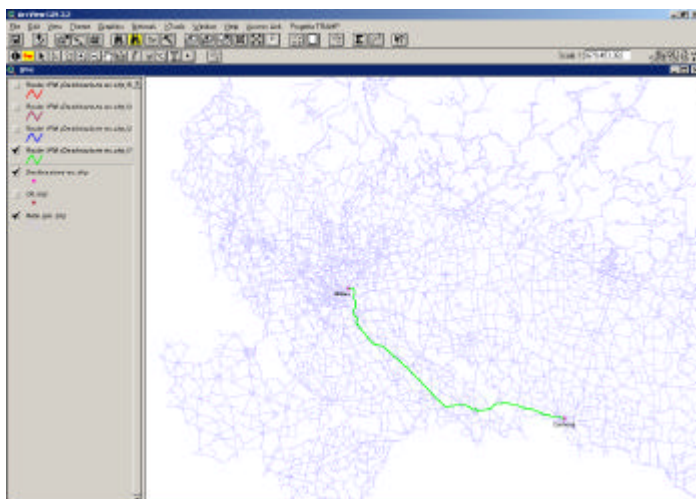


Figura 3 - Alternativa 1, percorso a rischio minimo.

Per valutare come la soggettività delle scelte del decisore influenza l'ordinamento finale delle alternative, si è eseguita un'analisi di sensitività sui pesi attribuiti ad ogni indicatore, segnalando i valori che comportano un *rank reversal* dell'ordinamento finale. Nella tabella 6 sono riassunti i risultati ottenuti per l'esempio in oggetto.

Analizzando i dati riportati nella Tabella 6, si può notare che l'alternativa 2 pur non essendo dominata, per l'analisi svolta non risulta mai la migliore. Gli indicatori tenuta di strada e visibilità hanno un'elevata sensitività, la scelta del peso da attribuire a tali indicatori è quindi critica, gli altri indicatori considerati nel no-

stro studio, pur non essendo a sensitività nulla, hanno valori molto bassi e non causano particolari problemi nell'attribuzione del peso.

Indicatori	Int. 1	Alt. Scelta	Int. 2	Alt. Scelta	Int. 3	Alt. Scelta
Tempo di percorrenza	0-0.06	Alt 3	0.06-1	Alt 1		
Tenuta di strada	0-0.161	Alt 1	0.161-0.858	Alt 3	0.858-1	Alt 4
Visibilità	0-0.183	Alt 1	0.183-0.434	Alt 3	0.434-1	Alt 4
Uso del suolo	0-0.1	Alt 3	0.1-1	Alt 1		
Meteo conseguenze	0-0.132	Alt 1	0.132-1	Alt 3		
Rischio di incidente	0-0.28	Alt 1	0.28-1	Alt 3		
Rischio di mortalità	0-0.145	Alt 1	0.145-1	Alt 3		
Traffico	0-0.146	Alt 1	0.146-1	Alt 3		
Popolazione	0-0.084	Alt 3	0.084-1	Alt 1		

Tabella 6 - Analisi di sensitività sui pesi.

6. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] Akgun V., Erkut E., Batta R., On finding dissimilar paths, *Research report 97/3*, Faculty of business, University of Alberta, Edmonton, Canada, 1997
- [2] CNR Unità Operative linea E: Di Cave S., Donat S., Leonelli P., Maschio G., Mazzarotta B., Mengoli P., Pòdestà C., Spadoni G., Relazioni Semestrali sullo Stato di Avanzamento e Relazioni Finali, CNR, GNDRCIE - Linea E, Roma, Varie annualità
- [3] Economic Commission for Europe-Inland Transport Committee UN, European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR) and protocol of signature.
- [4] Federchimica, Prevenzione e gestione delle emergenze nel trasporto dei prodotti chimici, Progetto Responsible Care, 1994.
- [5] Federchimica, SET (Servizio Emergenze Trasporti) Manuale Operativo, CEFIC, 1997.
- [6] Johnson P.E., Joy D.S., Clarke D.B., Jacobi J.M., HIGHWAY 3.01 - An Enhanced Highway Routing Model: Program - Description, Methodology, and Revised User's Manual, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-12124, Oak Ridge, TN, 1992
- [7] Leonelli P., Spadoni G., Ottimizzazione del trasporto di sostanze pericolose mediante minimizzazione del rischio indotto, *Seminario interno GNDRCIE*, aprile 1998.
- [8] Maja R., Vescia G. (2000), La sicurezza nel trasporto delle merci pericolose: coordinamento delle informazioni e prevenzione del rischio, *Trasporti & Trazione*, N° 4/00, Milano, 2000, pag. 121-132
- [9] Maja R., Studer L., Vescia G., Marchionni G., Progetto TRAMP - Sperimentazione del prototipo degli apparati tecnologici di bordo, *Convegno nazionale VGR 2002 Valutazione e gestione del rischio negli Insediamenti Civili e Industriali*, Pisa, 15-17 ottobre 2002
- [10] Mazzarotta B., Sviluppo di Linee Guida per la valutazione del rischio nel trasporto di sostanze pericolose, *Seminario interno GNDRCIE*, aprile 1998.
- [11] Mengoli P., Maja R., Progetto pilota del sistema TRAMP - Relazione Finale 1998, Progetto di massima del sistema, Relazione interna del CNR per l'anno di ricerca 1998, Roma, 2000, Contributo di Ricerca Contratto CNR GNDRCIE 98.00545.PF37 del 9/9/98.
- [12] Ministero dei Trasporti e della Navigazione - Servizio di Pianificazione e Programmazione, Le politiche per l'innovazione tecnologica: telematica al servizio del trasporto merci pericolose, *Appendice A 12.3 al capitolo 12 del Nuovo Piano Generale dei Trasporti e della Logistica - Documento tecnico*, Roma, 2000.
- [13] Pivi M., Maja R., Struttura e organizzazione del trasporto di merci pericolose nell'ottica della prevenzione del rischio, *Trasporti & Trazione*, N° 5, 1999.
- [14] Ruphail N.M., Ranjithan S.R., ElDessouki W, Smith T, Brill E.D, A decision support system for dynamic pre-trip route planning. Application of advanced technologies, *Transportation Engineering: Proceedings of The Fourth International Conference*, pp. 325-329, 1995