

# MODELLIZZAZIONE DI FLUSSI DI TRAFFICO<sup>1</sup>

Roberto GABRIELLI(\*), Alessandra GUIDAZZI (\*),  
Vittorio MANIEZZO (\*\*), Matteo ROFFILLI (\*\*)

(\*) Servizio Pianificazione Territoriale, Provincia Forlì-Cesena  
Email: gabrielli.roberto@provincia.fc.it, guidazzi.alessandra@provincia.fc.it

(\*\*) Dipartimento di Scienze dell'Informazione, Università di Bologna, via Mura Anteo Zamboni 7, Bologna,  
Email: vittorio.maniezzo@unibo.it, roffilli@csr.unibo.it

## Riassunto

L'applicazione qui descritta riguarda un modello simulativo-previsionale dei flussi di traffico sulla rete stradale della provincia di Forlì-Cesena. Abbiamo infatti definito e calibrato un modello che, basandosi su rilevazioni di flussi di traffico effettuate sulla rete stradale, su una matrice origine/destinazione (OD) relativa alla provincia e sulle caratteristiche fisiche degli archi stradali, permette di identificare dei flussi stradali compatibili con le osservazioni sperimentali. Questo stesso modello, con parametri calibrati per la rete provinciale, è stato poi utilizzato a fronte di variazioni strutturali della rete per prevedere le nuove disposizioni dei flussi. L'applicativo comprende anche un modulo di revisione della matrice OD che permette di aggiornarne i valori in funzione di rilevamenti recenti di flussi stradali in archi specifici della rete.

## Abstract

*We present an application implementing an original traffic flow simulation and forecast model for the road network of the Forlì-Cesena province. We defined and calibrated a model, which makes use of traffic counts collected on some network arcs, of an origin/destination (OD) matrix of the province and of physical characteristics of networks arcs, and permits to identify traffic flows compatible with actual counts. This same model, after the calibration of its parameters for the province network, has also been utilized for forecasting new flows following structural variations of the network. The application also contains an OD matrix refinement module which permits to update matrix entries as a function of the actual traffic counts.*

## 1. Problematica/Obiettivo

Gli organi di governo locale si caratterizzano sempre più per le funzioni di pianificazione e controllo di processi attivi sul territorio. Le attività di governance, soprattutto a livello locale, fanno infatti riferimento esplicito a processi georeferenziati, processi che a loro volta si sviluppano sfruttando infrastrutture dislocate nel territorio stesso. La categoria elettiva di infrastrutture di questo tipo sono le reti tecnologiche (reti viarie, fognarie, telefoniche, di distribuzione di acqua, gas, elettricità, di raccolta rifiuti, di trasporto persone, ecc.). Su tutte queste strutture gli enti di governo locale sono chiamati o a una gestione diretta o a un controllo della gestione effettuata da società terze. E' di importanza fondamentale per le attività di gestione e controllo delle reti la disponibilità di strumenti di modellistica che supportino sia interrogazioni sull'esistente che possibilità di simulazione e ottimizzazione in fase previsionale.

A fronte di un'ovvia esigenza di strumenti di questo tipo si deve però constatare una loro scarsa diffusione sul mercato. La ragione di questa lacuna è da individuarsi nell'elevata sofisticazione

---

<sup>1</sup> Questa ricerca è stata parzialmente finanziata dal fondo Ser.in.ar. per il progetto di ricerca "Ottimizzazione di reti tecnologiche".

delle competenze e tecnologie informatiche necessarie per il loro sviluppo, competenze che a volte richiedono di superare lo stato dell'arte della ricerca informatica.

Infatti, per la semplice memorizzazione e utilizzo dei dati di base è necessario sfruttare sistemi GIS, o comunque sistemi in grado di gestire efficientemente strutture dati multidimensionali e garantire un'efficace resa grafica degli elementi memorizzati. Su questa base bisogna poi gestire gli elementi topologici caratteristici delle reti per poter poi adire alle strutture modellistiche e agli algoritmi matematici che realizzano in pratica la simulazione e l'ottimizzazione.

Il sistema qui riportato corrisponde al primo risultato applicativo di una collaborazione avviata fra Università di Bologna e Provincia di Forlì-Cesena che ha come obiettivo generale quello di definire un'infrastruttura architeturale in grado di permettere l'utilizzo di avanzate tecniche algoritmiche su dati in possesso degli enti di governo locale del nostro territorio e di validare questo risultato in alcuni contesti applicativi specifici.

L'infrastruttura su cui si poggiano le diverse applicazioni è data da *Ertha*. *Ertha* è un GIS *open source* sviluppato presso l'Università di Bologna, il cui modulo base può essere arricchito di funzionalità aggiuntive, specifiche per settori applicativi diversi. In particolare, è possibile utilizzare un'estensione per applicazioni di gestione di reti tecnologiche, chiamata *Ertha.net*. Questo contributo presenta alcuni risultati conseguenti allo sviluppo e alla validazione del modulo del pacchetto *Ertha.net* per la modellizzazione e previsione dei flussi di traffico.

Nello specifico, l'applicazione qui descritta riguarda un modello simulativo- previsionale dei flussi di traffico sulla rete stradale della provincia di Forlì-Cesena. Il settore è particolarmente sensibile in quanto nei principali atti legislativi comunitari in materia ambientale si trovano dieci criteri chiave per la sostenibilità che devono essere rispettati da Piani e programmi di sviluppo nazionali e territoriali. La Provincia di Forlì – Cesena per adeguarsi ai criteri della sostenibilità ambientale, nella redazione del nuovo Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale ha sottolineato alcune strategie di governo del territorio. La sostenibilità delle previsioni inserite nel P.T.C.P. rispetto al sistema della mobilità riguarda in primo luogo la congestione da traffico della rete viaria esistente, ed in secondo luogo alla temporalità degli interventi strutturanti la rete stradale.

Le componenti principali che incidono in questo settore sensibile, sono le infrastrutture viarie esistenti e di progetto, i poli funzionali e gli ambiti produttivi sovracomunali come origine del traffico per spostamenti casa-lavoro e verso i principali attrattori di popolazione e i centri urbani, per i quali viene stimata una sensibile crescita negli anni.

Sulla base di rilevazioni effettuate sulla rete stradale è stato possibile calibrare un modello che, partendo da una matrice origine/destinazione (OD) relativa alla provincia e dalle caratteristiche fisiche degli archi stradali, permette di identificare dei flussi stradali compatibili con le osservazioni sperimentali. Questo stesso modello, con parametri calibrati per la rete provinciale, può poi essere utilizzato a fronte di variazioni strutturali della rete per prevedere le nuove disposizioni dei flussi.

Data la parziale inattendibilità dai dati di base sulla matrice OD, dovuta sia all'invecchiamento dei dati stessi sia all'aleatorietà intrinseca al processo di acquisizione, abbiamo poi realizzato un modulo aggiuntivo di raffinamento della matrice che, partendo dalla matrice originale e dai dati di flusso rilevati sugli archi stradali, porta alla definizione di una nuova matrice compatibile con i flussi osservati.

Il contributo è organizzato come segue. Nel capitolo 2 illustriamo le basi algebriche e metodologiche dei nostri moduli, mentre nel capitolo 3 descriviamo gli aspetti rilevanti dell'applicativo e alcuni risultati computazionali ottenuti con il suo utilizzo.

## **2. Metodologia**

L'obiettivo di modellare i flussi stradali sulla rete esistente e quindi prevedere quelli conseguenti a interventi infrastrutturali futuri è stato perseguito come segue. Siamo partiti dalla rete stradale urbana ed extraurbana della provincia, integrata con i principali archi di accesso alla provincia. La rete è sovrapposta ad una zonizzazione territoriale che scompone l'area di interesse in 52 zone,

ciascuna corrispondente ad una riga / colonna di una matrice OD, identificata a seguito di un'indagine del 1991 e poi ricalibrata nel 1999. Abbiamo quindi sovrimposto alla rete i 100 punti, georeferenziati, in cui sono stati acquisiti dati sui flussi di traffico. Il risultato è illustrato in figura 1.

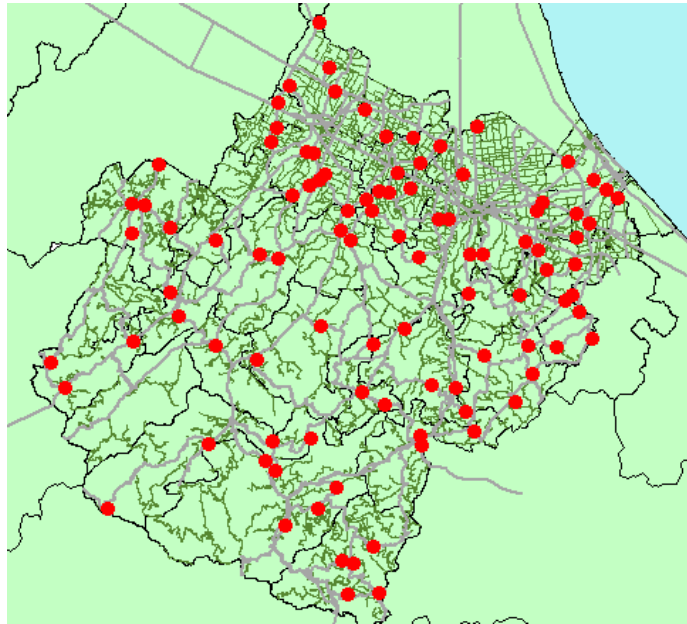


Fig. 1 – La rete stradale utilizzata nell'applicazione e i punti di rilevamento

L'uso di Ertha.net ha permesso l'identificazione di parametri topologici quali i nodi di incidenza degli archi stradali, completa della zona OD di appartenenza di ciascuno, e l'identificazione degli archi adiacenti ai punti di rilevamento. Abbiamo quindi distribuito i dati di ogni riga / colonna della matrice OD sui vertici delle zone di competenza, permettendo l'identificazione di flussi veicolari da zona a zona. Questi dati sono stati sfruttati da un algoritmo per l'assegnamento dei flussi di traffico agli archi stradali basato su un problema flusso massimo a costo minimo con capacità (MFMC). Formalmente, il problema risolto può essere formulato come segue. La rete stradale è stata modellizzata tramite un grafo  $G = (V, A)$ , in cui  $A$  è l'insieme degli archi stradali e  $V$  l'insieme dei relativi estremi. Per ogni arco  $(ij) \in A$  sono specificati vari parametri, quali la lunghezza  $l_{ij}$ , la larghezza  $w_{ij}$ , la capacità  $u_{ij}$ , la pendenza, la tortuosità ecc. Questi parametri sono utilizzati dall'algoritmo di assegnamento per calcolare il costo generalizzato di percorrenza dell'arco, e quindi l'assegnamento a costo globale minimo, ottenendo così per ogni arco  $(ij) \in A$  una stima del  $f_{ij}$  flusso. Per gli archi di un sottinsieme  $A'$ ,  $A' \subseteq A$ , è anche disponibile la rilevazione sperimentale dei flussi.

Per ogni riga  $k$  della matrice OD vengono calcolati i flussi verso tutte le destinazioni risolvendo il problema che segue.

$$(MFMC_k) \quad \min \quad \sum_{(ij) \in A} c_{ij} f_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in \delta(i)} f_{ji} - \sum_{j \in \delta(i)} f_{ij} = b(i) \quad i \in V \quad (2)$$

$$0 \leq f_{ij} \leq u_{ij} \quad (ij) \in A \quad (3)$$

Dove  $b(i)$  rappresenta il deficit al nodo (positivo se appartenente alla zona origine e negativo se a una zona destinazione) e  $\delta(i)$  rappresenta l'intorno del nodo  $i$ .

Il costo  $c_{ij}$  è un costo generalizzato correlato al tempo di percorrenza dell'arco, dato il flusso corrente. Deriva da una valutazione istantanea di una funzione non lineare dei flussi stessi.

L'assegnamento è quindi funzione di parametri specificati per gli archi, quali lunghezza o capacità, che vengono ridefiniti dinamicamente a seguito dell'equilibratura dei flussi derivanti da coppie OD diverse.

L'assegnamento globale viene poi individuato componendo i flussi calcolati da ogni origine per tutte le destinazioni.

### 2.1 Calibrazione

Avendo a disposizione dei rilevamenti effettivi, abbiamo quindi proceduto alla calibrazione del nostro modello. In particolare, abbiamo confrontato i flussi previsti sugli archi in cui avevamo dei rilevamenti effettivi con i dati risultanti dai rilevamenti.

Abbiamo quindi interconnesso alle routine di simulazione un modello che permettesse di adeguare i costi generalizzati di percorrenza degli archi così come percepiti dai guidatori, vincolando – salvo poi rilassarli in modo Lagrangiano – i flussi simulati ai flussi rilevati.

Più in dettaglio, il modello algebrico utilizzato è il seguente.

La calibrazione vuole far tendere il valore previsto  $f_{ij}$  al valore rilevato  $\bar{f}_{ij}$ . Ai vincoli del problema MFMC vengono quindi aggiunti i vincoli  $f_{ij} - \bar{f}_{ij} = 0$ , immediatamente rilassati in modo

Lagrangiano e aggiunti alla funzione obiettivo come un termine  $\sum_{(ij) \in A} \lambda_{ij}(f_{ij} - \bar{f}_{ij})$  dove le  $\lambda_{ij}$  sono le penalità lagrangiane, definite per ogni  $(ij) \in A$  con la convenzione che  $\lambda_{ij} = 0$  se  $(ij) \in A \setminus A'$ , mentre può essere diverso da 0 solo per gli archi in  $A'$ .

Questo permette anche di associare ad ogni arco delle penalità definite dall'utente, che composte a quelle lagrangiane consentono all'utente di interagire con il processo di ottimizzazione controllandone il risultato al livello del singolo arco.

Un'ottimizzazione basata su subgradiente permette comunque di ottimizzare le penalità lagrangiane, che verranno poi composte con quelle definite dall'utente definendo ad ogni iterazione del subgradiente un problema di assegnamento del traffico che viene risolto dal modulo di simulazione.

### 2.2 Raffinamento matrice OD

Come accennato nell'introduzione, abbiamo dovuto affrontare il problema dell'utilizzo di una matrice OD datata come supporto alle simulazioni. Questo introduceva degli errori a priori, per eliminare i quali si è reso necessario l'aggiornamento sostanziale della matrice OD. Dato che una nuova campagna di rilevamento era fuori dalle nostre possibilità, abbiamo ridefinito quella a nostra disposizione sulla base dei rilevamenti di traffico più recenti. Questo è stato realizzato come segue.

La ricerca della nuova matrice OD è stata formalizzata come un problema di ottimizzazione ai minimi quadrati con vincoli. I dati utilizzati sono: i percorsi  $P$  da ogni origine a ogni destinazione, calcolati nella fase di simulazione come soluzione al problema MFMC, la matrice OD vecchia,  $OD_{old}$ , l'assegnamento di ogni arco ai percorsi  $A_p$ , l'insieme  $F = \{\bar{f}_{ij}\}$  dei flussi campionati per ogni arco in  $A'$  e un limite inferiore  $L_p$  e superiore  $U_p$  al flusso ammissibile in ogni percorso  $p \in P$ .

I flussi di traffico indotti in ogni arco del grafo stradale corrispondono all'applicazione della matrice OD all'assegnamento di ogni arco ai percorsi:  $OD * A_p$ .

La nuova matrice OD è calcolata in modo da minimizzare la differenza quadratica con  $OD_{old}$  e contemporaneamente la differenza dei flussi  $f_{ij}$  indotti in ogni arco di  $A'$  con  $\bar{f}_{ij}$ , rispettando i vincoli  $U_p$  e  $L_p$ .

Formalmente il problema risolto è:

$$\min \quad (OD - OD_{old})^2 + \gamma (OD * A_p - \bar{F})^2 \quad (4)$$

$$s.t. \quad L_p \leq OD \leq U_p \quad p \in P. \quad (5)$$

Tramite il parametro operativo  $\gamma$  è inoltre possibile pesare in modo diverso i due obiettivi in modo da rispecchiare la fiducia che l'utilizzatore ha nell'attendibilità dei valori.

Il metodo utilizzato per la soluzione si basa sull'algoritmo per l'ottimizzazione non lineare Levenberg-Marquardt. In particolare, abbiamo integrato il pacchetto software LEVMAR che, oltre a essere *free e open source*, ha dimostrato buona efficienza computazionale. La libreria LEVMAR, sviluppata in C/C++, gestisce numeri a precisione singola o doppia, jacobiani analitici e approssimati oltre che fornire una versatile interfaccia per sistemi di ottimizzazione numerica fortemente ottimizzati come LAPACK. La scelta di LEVMAR come *core* computazionale ha permesso di raggiungere, su problemi della rete stradale in analisi, tempi di calcolo dell'ordine di decine di secondi su comuni Pentium 4.

Al termine dell'ottimizzazione la nuova matrice OD è post-processata in modo da ottenere flussi di traffico a valori interi. Questo risultato è ottenuto arrotondando tutti i valori all'intero più prossimo. Considerando che gli scarti di arrotondamento sono distribuiti in modo normale con media zero il flusso totale all'interno del grafo non cambia.

### 3. L'applicativo e i risultati

L'applicativo è stato progettato come estensione funzionale del GIS della provincia. E' un applicativo autonomo che importa da ArcView i dati di interesse ed esporta verso ArcView i risultati, che quindi possono essere inseriti nei consueti tematismi della provincia, oltre che essere visualizzati e gestiti nell'applicativo. I dati sono letti e scritti direttamente su *shapefile*, per cui non è richiesta nessuna interazione diretta con ArcView.

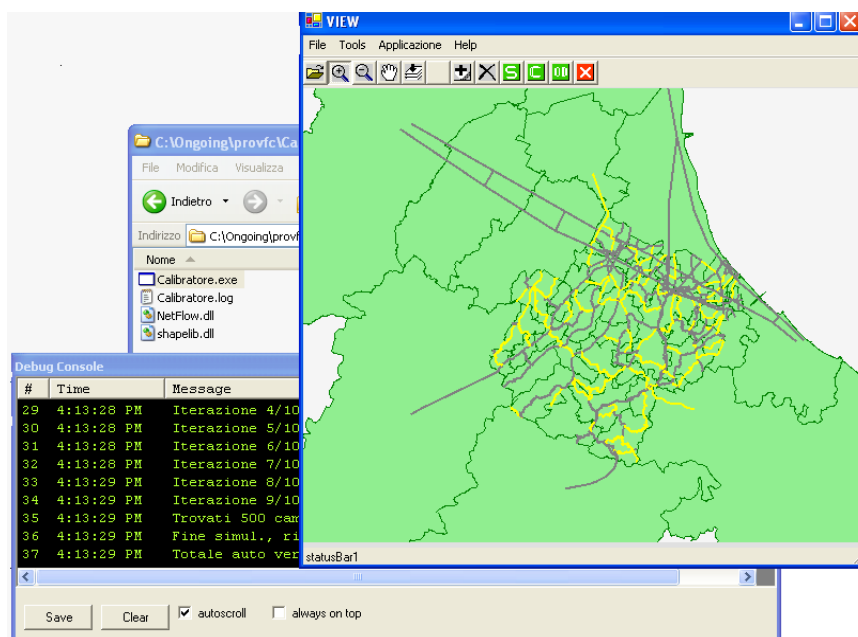


Fig. 2 – L'interfaccia dell'applicativo

L'applicativo, attualmente in stato di prototipo avanzato, è stato sviluppato in C# e C++ su piattaforma .net e gira su qualunque macchina windows con installato il framework .net.

Il codice non è ancora ingegnerizzato, ma funzionalmente è completo ed in grado di supportare analisi di interesse concreto. La figura 2 ne mostra l'interfaccia utente.

La prima applicazione è stata effettuata all'interno del lavoro di redazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, *in itinere*, ed ha riguardato la previsione dei flussi di traffico a fronte degli scenari infrastrutturali previsti dal Piano nei prossimi 20 anni. Per conformare un sistema infrastrutturale viario che supporti ed incrementi lo schema relazionale interno/esterno al territorio Provinciale e nello stesso tempo valuti gli effetti in termini di volumi di traffico e gli impatti che le

infrastrutture viarie hanno sul territorio, è stato infatti necessario creare un apposito modello di simulazione.

Abbiamo calibrato l'assegnamento sulla base dei dati del 2003, effettuando poi previsioni per gli anni 2005, 2010, 2015, 2020 e 2025. Ogni scenario temporale prospettato è l'espressione di un sistema endogeno di recapiti provinciali nonché delle singole capacità di ogni ambito territoriale a generare nuove attrattività e/o potenziare quelle già esistenti, e conseguentemente aumentare la domanda di mobilità nonché i volumi di traffico interni al territorio provinciale.

Gli scenari delineati assumono una "domanda ipotizzata" corrispondente ad un incremento del traffico veicolare medio annuo, stabilito mediante valutazione sul sistema viario attinente della sua evoluzione temporale. Le simulazioni eseguite non hanno fatto giocare politiche od elementi che incentivino il trasporto pubblico poiché in questa fase non se ne sono ancora realizzate le condizioni; ci si è riferiti esclusivamente alla rete viaria modificata secondo le previsioni del Piano, in una sequenza temporale definita, in rapporto alla matrice degli spostamenti Origine e Destinazione opportunamente ricalibrata. La modifica della rete stradale è stata fatta attraverso l'individuazione di nuovi assi stradali previsti e di progetto mentre gli interventi di riqualificazione e/o potenziamento degli assi viari esistenti è stato identificato attribuendo all'infrastruttura stradale la nuova larghezza di carreggiata. Tale modificazione permette al modello di ricalcolare la capacità di portata di traffico dell'infrastruttura stessa. I risultati ottenuti, dall'applicazione del modello di simulazione negli scenari presi a riferimento, hanno permesso la costruzione dei seguenti indicatori:

- "Valutazioni delle emissioni in atmosfera" (scenario al 2005 e al 2025);
- "Valutazione degli impatti derivanti da inquinamento acustico" (scenario al 2005);
- "Valutazione della congestione del sistema infrastrutturale viario" (scenari al 2005, 2010, 2015, 2020 e 2025);
- "Tempi di percorrenza" (scenario al 2025);

La stima degli impatti ambientali generati dallo schema di mobilità, attuale ed in evoluzione, e della sua prestazione in termini di accessibilità territoriale che questi indicatori rappresentano, hanno giocato un ruolo rilevante per la Valutazione di Sostenibilità Ambientale e Territoriale delle scelte insediative ed infrastrutturali del Piano provinciale e costituiscono un riferimento essenziale per la valutazione delle scelte operate dalla pianificazione strutturale comunale. Nello specifico della valutazione della domanda globale di mobilità generata dal sistema territoriale l'analisi finale dei risultati della simulazione rimarca l'urgenza di affiancare al sistema infrastrutturale politiche modali più articolate e complesse (centri logistici, incentivazione dell'utilizzo del trasporto pubblico, fibre ottiche, etc.), poiché la sola nuova infrastrutturazione viaria e/o gli ammodernamenti stradali saranno in grado di garantire un compiuto assolvimento della domanda di mobilità espressa dal territorio provinciale.

## **Bibliografia**

Ertha GIS (2005), <http://astarte.csr.unibo.it/ertha>

Fisher M.L.(1981) The Lagrangean relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science*, 27(1):1-18.

Levenberg K.. A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2(2):164-168, Jul. 1944.

Lourakis M.I.A., levmar: Levenberg-Marquardt non-linear least squares algorithms in {C}/{C}++, <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>, Jul. 2004,

Marquardt D.W.. An Algorithm for the Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 11(2):431-441, Jun. 1963.