

## Il trasporto merci attraverso le Alpi Svizzere: evoluzione prevedibile con un nuovo modello di ripartizione modale

### *Freight transport through the Swiss Alps: evolution as determined by application of a new model of modal split*

Prof. Ing. Paolo FERRARI<sup>(\*)</sup>

**Sommario** - Questo articolo presenta un modello dinamico di ripartizione modale della domanda in un sistema plurimodale di trasporto delle merci. Esso è stato elaborato per studiare l'evoluzione del trasporto merci attraverso le Alpi Svizzere, il quale è stato caratterizzato negli ultimi decenni da profonde trasformazioni tecnologiche e altrettante profonde modifiche della ripartizione modale fra ferrovia a carro completo, trasporto stradale e trasporto intermodale. Per conoscere le caratteristiche dinamiche del sistema il modello prende in esame una sequenza di epoche, in ciascuna delle quali è nota la domanda che usa ciascun modo di trasporto. Viene quindi definita una mappa, di cui vengono stimati i parametri, la quale fornisce l'evoluzione nel tempo della domanda su ciascun modo di trasporto. Utilizzando le sequenze dei valori di domanda sui tre modi di trasporto attraverso le Alpi Svizzere negli anni fra il 1984 e il 2011, il modello ha permesso di conoscere l'evoluzione dei costi di trasporto su ciascuno dei tre modi in questo periodo di tempo, e di prevedere l'evoluzione della ripartizione modale negli anni futuri, nell'ipotesi che le caratteristiche dinamiche del sistema non subiscano sostanziali modifiche.

#### 1. Introduzione

Una parte notevole del traffico merci fra l'Italia e l'Europa centro-settentrionale viaggia attraverso le gallerie stradali del Gran San Bernardo, del Sempione, del Gottardo e del San Bernardino, e le due gallerie ferroviarie del Sempione e del Gottardo nelle Alpi Svizzere. Questo traffico utilizza tre modi di trasporto: il trasporto ferroviario a carro completo, il trasporto stradale ed il trasporto intermodale. Negli ultimi trenta anni si è verificato un notevole incremento del volume di traffico merci attraverso questi valichi alpini, ed allo stesso tempo una straordinaria evoluzione della ripartizione della domanda fra i tre modi di trasporto. Nel 1980 sono transitate 16.8 milioni di tonnellate di merci, e solo il 7% ha utilizzato il trasporto stradale, mentre il 93% ha utilizzato la ferrovia,

**Abstract** - The paper presents a dynamic model of demand modal split in a multimodal freight transport system. It has been devised in order to study the evolution of freight transport through the Swiss Alps, which in the last decades has undergone profound technological transformations, as well as marked modifications in the demand split among wagonload rail, road haulage and intermodal transport. The model determines the dynamic characteristics of the transport system by analyzing a sequence of times, for each of which the demand using the various transport modes is known. Then a map is defined and its parameters estimated, which gives the evolution over time of the demand for each transport mode. By using the sequence of the yearly transport demand values of the three modes through the Swiss Alps from 1984 to 2011, the model enables determining the evolution of transport costs of each mode during this time period and forecasting the future evolution of the modal split, under the hypothesis that the dynamic characteristics of the system remain substantially unchanged.

#### 1. Introduction

A substantial part of the freight traffic between Italy and Central-Northern Europe travels through the road tunnels of Great St. Bernard, Simplon, Gotthard and San. Bernardino, and the two rail tunnels of Simplon and Gotthard in the Swiss Alps. This traffic uses three transport modes: wagonload rail, road haulage and intermodal transport. A substantial increase in the freight traffic volumes through these Alpine passes has come about over the last thirty years, along with an extraordinary evolution of the demand split among the three transport modes. In 1980, 16.8 million tons of freight were hauled, only 7% of them using road haulage, while 93% used railways, essentially wagonload services. Instead, by 2011 the traffic volume had reached 40.2 million tons, with only 19% of it carried by wagonload rail, while 36% used road haulage and 45% intermodal transport [2], [7], [14].

This evolution of modal split has come about as a con-

(\*) Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale

(\*) University of Pisa – Department of Civil and Industrial Engineering.

essenzialmente il trasporto ferroviario a carro completo. Nel 2011 il volume di traffico ha raggiunto 40.2 milioni di tonnellate, e di questo solo il 19% è stato trasportato dalla ferrovia a carro completo, mentre il 36% ha utilizzato il trasporto stradale, ed il 45% il trasporto intermodale [2], [7], [14].

Questa evoluzione della ripartizione modale è stata la conseguenza delle grandi trasformazioni tecnologiche ed organizzative del trasporto stradale e del trasporto intermodale, che hanno dato luogo a costi generalizzati del trasporto percepiti dagli utenti come notevolmente inferiori a quelli del trasporto ferroviario a carro completo. Definiamo *costo generalizzato* di un modo di trasporto in una certa epoca, date le caratteristiche degli utenti e quelle tecnologiche ed organizzative del modo di trasporto, una grandezza che sintetizza la disutilità complessivamente percepita da ciascun utente, riguardante i vari attributi del trasporto: spesa monetaria, onere del tempo di viaggio, flessibilità del modo di trasporto, affidabilità, sicurezza, etc. D'ora in avanti per brevità sostituiamo la parola costo a costo generalizzato.

E' opportuno notare che il costo considerato in questo articolo è solo quello percepito dagli utenti, perché da esso dipende la ripartizione modale. Non si considerano quindi i costi esterni, i quali rappresentano il danno sociale dovuto all'inquinamento, alla congestione, al rumore, agli incidenti dovuti al traffico, perché essi non influenzano la ripartizione modale. E' anche utile tener presente che lo studio della evoluzione della ripartizione modale basata sul numero di tonnellate trasportate è importante dal punto di vista trasportistico, ma non dà informazioni circa l'evoluzione del peso economico dei vari modi di trasporto, poiché il tipo di merce trasportata da ciascuno di essi varia nel tempo.

L'elevato costo del trasporto ferroviario a carro completo percepito dagli utenti, paragonato a quello degli altri due modi di trasporto, è la conseguenza della complessità del sistema, in cui esiste un gran numero di località in cui i carri singoli vengono caricati dagli utenti e successivamente trasferiti dall'Azienda ferroviaria, mediante una rete di treni raccoglitori a scala locale, a centri di smistamento. Qui i carri vengono selezionati per destinazione, quindi trasportati al centro di smistamento di destinazione, dove i carri vengono di nuovo separati e raggruppati in treni raccoglitori per la destinazione finale. Quando il numero dei centri di raccolta è numeroso, molti di essi danno luogo a meno di un carro al giorno, per cui occorre attendere che un certo numero di centri di raccolta dia luogo complessivamente ad un numero di carri sufficiente per formare un treno raccoglitore per il trasferimento ad un centro di smistamento. Una situazione analoga si verifica per il trasferimento dei carri dal centro di smistamento di destinazione ai punti di arrivo finali. Tutto ciò allunga e rende incerti i tempi di consegna delle merci, con grave danno per gli utenti. Questi infatti, secondo una inchiesta effettuata dal Directorate-General for Energy and Transport della Comunità Europea

*sequence of the great technological and organizational changes made to road haulage and intermodal transport, which have given rise to generalized transport costs perceived by users as considerably less than those of wagonload services. We define generalized cost of a transport mode at a certain time, given certain user characteristics and technological and organizational features of the transport mode, as the overall disutility perceived by each user with regard to the various transport attributes: monetary expense, travel time, the flexibility, reliability, and safety of the transport mode, and so forth. For the sake of brevity, we shall henceforth refer to this simply as cost instead of generalized cost.*

*It should be highlighted that the cost considered here is only that perceived by users, as it is a determinant of the modal split. Thus, external costs, which represent the societal and environmental impact of freight traffic (pollution, congestion, noise, accidents, etc.), are not taken into account, as they do not affect the modal split. It is also worthwhile pointing out that, although studying the modal split in terms of the number of tons carried is important from the transportation point of view, it does not provide any information about the evolution of the economic weight of the various transport modes, given that the type of freight carried by each varies over time.*

*The high cost perceived by users of wagonload services, as compared to the other two transport modes, is a consequence of the complexity of the system. Individual wagons are loaded by customers at collection points, and then transferred by the rail company, utilizing a network of local trains, to marshalling yards. Here the wagons are sorted according to destination, assembled in long convoys and transferred to destination hubs, where the wagons are once again split and reassembled in local trains to the final destination. When several collection points are used, many of them produce less than one wagon a day, so it becomes necessary to wait for a certain number of collection points to accumulate enough wagons to form a collecting train for transfer to a marshalling yard. A similar situation occurs for shunting the wagons from the destination marshalling yard to the final arrival points. The entire process increases delivery times, making them uncertain, with considerable detriment to users. Indeed, according to a survey carried out by the Directorate-General for Energy and Transport of the European Commission [6], customers perceive "that rail services are inefficient, expensive, time consuming and unreliable. Conversely, road haulage is seen to be flexible, efficient and comparatively inexpensive".*

*In order to address these issues, rail companies have been progressively modifying the organization of wagonload transport: they have begun to impose higher costs on users who produce a daily number of wagons below a certain threshold and offer better service to those who exceed this threshold. At the same time, the marshalling yards that work far below capacity are being eliminated and activities concentrated in a few, very efficient hubs. Some hubs have eliminated shunting humps by introducing di-*

[6], hanno "la percezione che i trasporti ferroviari siano inefficienti, costosi, lenti e inaffidabili. Al contrario, il trasporto stradale è visto come flessibile, efficiente, ed al confronto economico".

Per far fronte a questi inconvenienti le Imprese ferroviarie hanno progressivamente modificato l'organizzazione del trasporto a carro completo, imponendo costi più elevati agli utenti che offrono un numero giornaliero di carri al disotto di una certa soglia, ed offrendo un servizio più efficiente a quelli che superano questa soglia. Contemporaneamente vengono eliminati i centri di smistamento che operano molto al disotto della loro capacità, concentrando l'attività in un numero limitato di centri molto efficienti. In alcuni di questi le selle di lancio per lo smistamento dei carri sono state eliminate, introducendo lo smistamento diretto delle unità di traffico fra treni. Questi provvedimenti danno luogo ad una modifica della distribuzione dei costi di trasporto a carro completo nella popolazione degli utenti, alcuni dei quali percepiscono un costo alquanto superiore rispetto al passato, e tendono quindi ad utilizzare un diverso modo di trasporto, mentre altri percepiscono un costo notevolmente inferiore. Il risultato è una diminuzione nel tempo della proporzione di utenti del trasporto a carro completo, accompagnato da una diminuzione del costo di questo modo di trasporto mediamente percepito.

Il trasporto intermodale utilizza la ferrovia solo per il trasferimento delle merci mediante treni navetta tra copie di terminal, mentre la raccolta e la consegna a livello locale, che costituisce il punto debole del trasporto a carro completo, è affidata al molto più flessibile ed efficiente trasporto stradale. Il trasporto intermodale attraverso le Alpi Svizzere ebbe inizio nel 1969, quando la società HUPAC diede luogo ad un collegamento fra Milano-Rogoredo e Colonia. Ma il salto di qualità del servizio si ebbe a cominciare dal 1978, quando la stessa HUPAC costruì il terminal di Busto Arsizio, dando inizio nel 1990 ad un servizio con treni navetta fra questo terminal e Colonia. Infine nel 2005 ha iniziato l'attività il nuovo terminal di Busto Arsizio-Gallarate [9]. Queste iniziative hanno rappresentato negli ultimi trenta anni importanti innovazioni tecnologiche ed organizzative del trasporto intermodale attraverso le Alpi Svizzere, con la conseguenza di ridurre i costi di trasporto ed aumentare la domanda.

Come si è visto, il trasporto stradale ha svolto un ruolo molto modesto nel trasporto delle merci attraverso le Alpi Svizzere fino al 1980 a causa delle pessime condizioni della rete stradale. L'apertura all'esercizio nel 1980 della galleria stradale del Gottardo, lunga 16,918 m, ha dato luogo ad un collegamento autostradale rapido fra Chiasso e Basilea, e quindi fra l'Italia e l'Europa centro-settentrionale. A partire da quella data, come conseguenza della netta diminuzione del costo del trasporto stradale, le tonnellate di merci che hanno attraversato su strada le Alpi Svizzere sono andate progressivamente aumentando, raggiungendo nel 2000 8.9 milioni di tonnellate, pari al 31% del totale su tutti i modi di trasporto. Questo incremento ha preoccupato la Confe-

*rect shunting of the load units between trains. These measures have caused a change in the distribution of wagonload transport costs to users: some perceive a somewhat greater cost than in the past, and thus tend to switch to a different transport mode, whereas others perceive a substantially lower cost. The result is a decrease over time in the proportion of wagonload customers, along with a decrease in the cost of this transport mode they perceive on average.*

*Intermodal transport uses rail only to transfer freight between pairs of terminals by means of shuttle trains, while local collection and delivery, which represent the weak links in wagonload transport, are left to the more flexible and efficient road haulage. Intermodal transport through the Swiss Alps started in 1969, when the HUPAC Company established a connection between Milan-Rogoredo and Cologne. The final stage in its growth came in 2005, when the new terminal at Busto Arsizio-Gallarate became operative [9]. These enterprises have represented important technological and organizational innovations for intermodal transport through the Swiss Alps in the last thirty years, with consequently decreased transport costs and increased demand.*

*As mentioned, the role of road haulage through the Swiss Alps was quite minor until 1980. This was due to the very poor conditions of the road network. The opening of the Gotthard tunnel in 1980 established a rapid connection between Chiasso and Basel, and thus between Northern Italy and Central-Northern Europe. Starting from this date, as a consequence of the substantial decrease in road transport costs, the number of tons carried by road through the Swiss Alps progressively increased, reaching 8.9 million in 2000, which represented 31% of the total freight carried by all transport modes at the time. This increase worried the Swiss Confederation because of the damage caused by road traffic to the Alpine environment. So, as of January 1, 2001 a tax, which varies according to vehicle weight and emissions level, has been imposed on road freight traffic travelling through Swiss territory. Since its inception, this tax has been progressively increased, causing a considerable slow down in the growth of freight traffic volume measured in terms of the number of vehicles passing through the Swiss Alps, though much less in terms of the number of tons of freight, because carriers have responded to the tax by using higher capacity vehicles, increasing the fill rate, and reducing empty runs. The effects of this can be seen in fig. 1, which shows the sharp variation starting in 2001 of the increasing trend in the average number of tons carried by single vehicles, which increased from 7.8 tons in 2001 to 11.5 in 2010 [4]. Moreover, imposed constraints on the length of driver rest times, linked to the use of the chronotachograph, have favoured so-called rolling roads, whereby full road vehicles, possibly accompanied by their drivers, are carried by train. These services have increased considerably in recent years, for example between Novara and Freiburg.*

*However, the variations in transport costs due to techno-*

derazione Elvetica, a causa degli effetti dell'inquinamento dovuto al traffico stradale sull'ambiente alpino. Così, a partire dal 1 gennaio 2001 è stata istituita una tassa sul traffico pesante nel territorio Svizzero, la quale varia in dipendenza del peso del veicolo e del livello di emissione. La tassa è andata progressivamente aumentando nel tempo, ed ha prodotto un sensibile rallentamento dell'aumento del volume di traffico merci in termini di veicoli transitati attraverso le Alpi Svizzere, molto meno in termini di tonnellate trasportate, poiché gli spedizionieri hanno reagito all'imposizione della tassa impiegando veicoli di maggiore capacità, aumentandone il tasso di riempimento, e riducendo i viaggi a vuoto. L'effetto di questa reazione è visibile in fig. 1, la quale mostra la brusca variazione, a partire dal 2001, del trend di crescita del numero medio di tonnellate trasportate per veicolo, le quali sono aumentate da 7.8 nel 2001 a 11.5 nel 2010 [4]. Inoltre i vincoli orari sul riposo degli autisti connessi al cronotachigrafo ha favorito i servizi di autostrada ferroviaria, in cui veicoli stradali completi, possibilmente accompagnati dagli autisti, vengono trasportati da un treno. Questi servizi sono notevolmente cresciuti negli ultimi anni, per esempio fra Novara e Friburgo.

Si deve tuttavia osservare che, insieme con l'evoluzione dei costi di trasporto dovuta alle trasformazioni tecnologiche ed organizzative dei tre modi di trasporto, un ruolo importante nella evoluzione della ripartizione modale è svolto dal ritardo con cui gli utenti si trasferiscono da un modo di trasporto ad un altro percepito come più conveniente, per scarsa fiducia nelle future possibilità di un nuovo modo di trasporto, per le difficoltà di adeguare ad esso la propria organizzazione logistica, in genere per inerzia. Per esempio, nel corso di una indagine eseguita in Gran Bretagna nel 1999 e nel 2000, molte aziende intervistate circa la possibilità che utilizzino nel futuro un tradizionale trasporto ferroviario, hanno dichiarato che occorrono oltre cinque anni per ristrutturare le proprie strutture logistiche, abituate da lungo tempo al trasporto stradale, affinché possano trasferirsi su un diverso modo di trasporto [16].

L'evoluzione della ripartizione modale del trasporto delle merci attraverso le Alpi Svizzere negli ultimi trenta anni rappresenta un'importante occasione per lo studio dinamico della ripartizione modale delle merci in un'epoca caratterizzata da notevoli trasformazioni tecnologiche ed organizzative. Il trasporto delle merci è un sistema complesso, con un gran numero di componenti che interagiscono fra loro. La riduzione dei costi di un modo di trasporto, causata dalle modifiche tecnologiche ed organizzative, produce la reazione degli altri modi di trasporto che a loro volta modificano le proprie caratteristiche allo

logical and organizational transformations of the three transport modes are not the only factor in play. An important role in the evolution of the modal split has also been played by the delay with which users shift from one transport mode to another perceived as more suitable. Such lag is due to number of factors, including scarce confidence in the future possibilities of a new transport mode, difficulties in adapting their logistical organizations, and simple inertia, in general. For instance, many companies interviewed during a survey conducted in Great Britain in 1999 and 2000, regarding the possibility of using a traditional rail service in the future "were keen to point out that it would take considerably longer than 5 years to restructure logistical systems to become truly rail friendly, because the processes of restructuring are lengthy and there have been several decades of adaptation to the flexibility of road haulage" [16].

The evolution of the freight transport modal split through the Swiss Alps represents an important opportunity for studying the dynamics of freight modal split in a time characterized by considerable technological and organizational change. Freight transport is a complex system, with a great number of components interacting with each other. A decrease in the cost of one transport mode, due to technological and organizational improvements, will prompt reactions on the part of the other transport modes, which in turn modify their characteristics in order to reduce costs. Studying the dynamics of the modal split enables us to define the evolution over time of the trip costs of each of the three transport modes through the Swiss Alps as perceived by users over the last thirty years, as well as the effects of user lags in switching transport mode on the evolution of the modal split. Moreover, this study enables evaluating the dynamic characteristics of the multimodal transport sys-

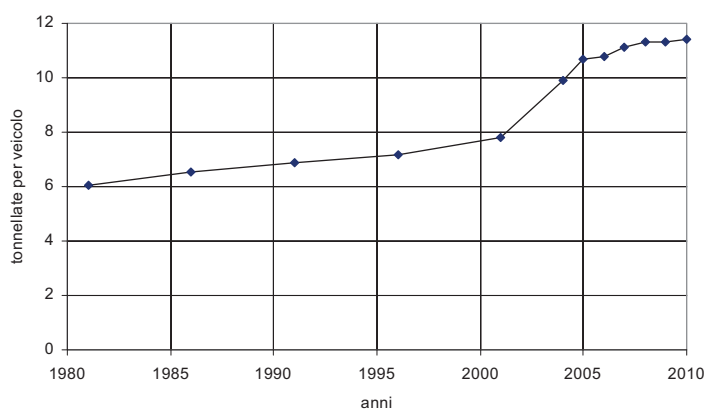


Fig. 1 – Andamento del numero medio di tonnellate trasportate da un veicolo merci stradale attraverso le Alpi Svizzere tra il 1981 e il 2010. Si nota la brusca discontinuità dopo l'anno 2000, conseguenza della imposizione della tassa sul traffico pesante, come è spiegato nel testo.

Fig. 1 – Pattern of the average number of tons carried by individual freight road vehicles through the Swiss Alps between 1981 and 2010. As explained in the text, a sharp discontinuity is evident after year 2000 in consequence to the imposition of the Swiss freight traffic tax.



scopo di ridurre i costi. Lo studio dinamico della ripartizione modale permette di ottenere la conoscenza della evoluzione dei costi dei tre modi di trasporto attraverso le Alpi Svizzere nell'ultimo trentennio, come percepiti dagli utenti, ed anche una valutazione dell'effetto che il ritardo nel trasferimento da un modo di trasporto ad un altro ha avuto nella evoluzione della ripartizione modale. Inoltre questo studio consente di valutare le caratteristiche dinamiche del sistema di trasporto plurimodale nel periodo considerato, e di fare previsioni circa la evoluzione della ripartizione modale nel prossimo futuro, nell'ipotesi che queste caratteristiche dinamiche si mantengano sostanzialmente inalterate.

Questo studio non può tuttavia essere condotto utilizzando i modelli abitualmente impiegati per studiare la ripartizione modale del trasporto delle merci [1], [3], [5], [11], [12], [13], [15], per diverse ragioni: a) essi sono modelli statici, i quali non considerano l'evoluzione nel tempo dei costi dovuta alle modifiche tecnologiche ed organizzative dei modi di trasporto, e d'altra parte non tengono conto del ritardo nella risposta degli utenti; b) essi stimano i costi del trasporto sulla base della ripartizione modale osservata, trascurando il fatto che, a causa del ritardo nella risposta degli utenti, la ripartizione modale osservata è diversa da quella che si otterrebbe sulla base dei costi percepiti dagli utenti; c) essi definiscono il costo del trasporto come funzione degli attributi di ciascun modo di trasporto: però mentre alcuni di essi, per esempio la spesa monetaria ed il tempo di viaggio sono facilmente misurabili, la valutazione di altri, come la flessibilità, l'affidabilità, la sicurezza, è molto più difficile ed incerta, poiché dipende fra l'altro in modo sostanziale dall'esperienza e dalle caratteristiche psicologiche di ciascun utente.

Questa memoria propone quindi un modello diverso, il quale è descritto nelle Sezioni 2 e 3, ed è quindi applicato nella Sezione 4 allo studio della dinamica della evoluzione dei costi del trasporto e della ripartizione modale delle merci attraverso le Alpi Svizzere fra il 1984 e il 2011. Tale studio permette di fare una previsione circa la futura evoluzione della ripartizione modale nell'ipotesi che la dinamica del sistema rimanga sostanzialmente invariata nel prossimo futuro. Infine alcune considerazioni riassuntive e conclusive sono espone nella Sezione 5.

## 2. Un modello di competizione fra modi di trasporto delle merci

Consideriamo due centroidi ubicati nei baricentri di due territori abbastanza ampi, fra i quali esiste interscambio di merci, le quali vengono trasportate da  $n$  modi che competono fra loro. Il sistema di trasporto è schematicamente rappresentato da un grafo formato da  $n$  archi, ciascuno dei quali collega i due centroidi ed è percorso da un modo di trasporto. Il comportamento del sistema è studiato nel corso di una sequenza  $\Sigma$  di tempi  $t$  separati da intervalli temporali unitari (per esempio un anno).

Sia  $T$  il numero di tonnellate di merci scambiate fra i

tem in the period under examination, and to make forecasts about the future evolution of the modal split, clearly under the hypothesis that the dynamic characteristics remain substantially unchanged.

Such a study cannot however be conducted with the models usually employed in modal split research [1], [3], [5], [11], [12], [13], [15]. This is for various reasons: a) they are static models, and hence, on the one hand, do not consider the evolution over time of costs due to technological and organizational changes in the transport modes, and on the other, they do not take into account delays in users' reactions; b) they estimate transport costs on the basis of the observed modal split, neglecting the fact that, as a consequence of user reaction delays, the observed modal split differs from that which would be obtained based on the costs perceived by users; c) they define transport cost as a function of the attributes of each transport mode, but while some (e.g., monetary expense and travel time) can be measured easily, others, such as flexibility, reliability and safety, are much more difficult to assess, because they substantially depend on the experience and psychological characteristics of each user, amongst other things.

Thus, this paper presents a different model, which is illustrated in Sections 2 and 3 and then applied in Section 4 to the study of the dynamic evolution of transport costs and freight modal split across the Swiss Alps between 1984 and 2011. This study moreover enables us to make forecasts about the future evolution of the modal split, under the hypothesis that the system dynamics remains substantially unchanged. Lastly, a brief summary of the main points is presented and some conclusions are put forward in Section 5.

## 2. A model of competition among freight transport modes

Consider two centroids located in the barycentres of two rather large territories, between which there is exchange of freight carried by  $n$  transport modes in competition with each other. The transport system is represented schematically by a graph formed by  $n$  links, each of which connects the two territories and is travelled by a transport mode. The behaviour of the system is studied during a time sequence  $\Sigma$ , measured in unit time intervals (e.g. one year). Let  $T$ , which we shall call transport demand, be the amount of freight (in tons) exchanged between the two territories in one unit time at time  $t$ , and carried overall by the  $n$  transport modes. Each ton is transported between two points located at a certain distance in the two territories, and is thus characterized by a transport distance, as well as the type of freight hauled. We assume that any transport mode can carry any type of freight across any distance between the two territories, even if we should actually consider that some types of freight (e.g., some foodstuffs, in particular liquids) can be carried only by road haulage.

We suppose that the transport demand increases over time at rate  $r$ , tending to an asymptotic value  $K$ . Rate  $r$  de-

due territori nell'unità di tempo al tempo  $t$  e trasportate complessivamente dagli  $n$  modi di trasporto. Denominiamo  $T^t$  domanda di trasporto. Ciascuna tonnellata deve essere trasportata fra due punti ubicati ad una certa distanza nei due territori, ed è pertanto caratterizzata da una propria distanza di trasporto, oltre che dal tipo di merce. Supponiamo che ciascun modo di trasporto sia in grado di trasportare qualsiasi tipo di merce a qualsiasi distanza tra i due territori, anche se occorre considerare che esistono alcune categorie di merci, per esempio alcuni prodotti alimentari, in particolare liquidi, che possono essere trasportate solo dal trasporto stradale.

Riteniamo che la domanda di trasporto aumenti nel tempo con tasso  $r^t$ , tendendo ad un valore asintotico  $K$ . Il tasso  $r^t$  diminuisce al crescere della domanda, tendendo ad annullarsi quando la domanda si avvicina a  $K$ . Detto  $\bar{r}$  il valore iniziale di  $r^t$ , corrispondente al valore nullo della domanda, si ha:

$$r^t = \bar{r} \left[ 1 - \frac{T^t}{K} \right] \quad (1)$$

da cui segue la mappa che determina la legge di variazione della domanda di trasporto nel tempo:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - \frac{T^t}{K} \right) \right] \quad (2)$$

Detta  $X_i^t$  l'aliquota di  $X^t$  che utilizza il modo  $i$ , si ha che la domanda di trasporto per il modo  $i$  al tempo  $t$  è  $X_i^t T^t$ .

Il costo del trasporto di 1 tonnellata di merce scambia fra i due territori col modo  $i$  al tempo  $t$  varia in dipendenza della distanza di trasporto e della diversa percezione degli utenti, e anche della natura della merce: infatti, per esempio, il valore e la dispersione dei tempi di viaggio hanno grande importanza se la merce è costituita da componenti destinati ad un processo di produzione just-in-time, mentre l'importanza è molto minore per prodotti destinati a magazzini gestiti in modo tradizionale. Il costo è pertanto una variabile aleatoria, distribuita nell'insieme prodotto cartesiano dell'insieme degli utenti e di quello delle tonnellate di merci, essendo ciascuna tonnellata caratterizzata dalla natura merceologica e dalla distanza di trasporto. Riteniamo che questa variabile aleatoria sia distribuita secondo la legge di probabilità di Weibull, la cui media  $C_i^t$ , data la distanza fra i due centroidi, è funzione della domanda  $X_i^t T^t$  che utilizza il modo  $i$  al tempo  $t$ . Indichiamo con  $c_i^t(\cdot)$  il legame funzionale fra  $C_i^t$  e  $X_i^t T^t$ , per cui  $c_i^t(X_i^t T^t) = C_i^t$ . La funzione  $c_i^t(\cdot)$ , positiva per valori positivi dell'argomento e monotonicamente crescente, è denominata *funzione di costo*: essa è diversa per ciascun modo di trasporto e per ciascun tempo della sequenza  $\Sigma$ , a causa delle modifiche nel tempo delle caratteristiche tecnologiche e organizzative. Ciascuna  $c_i^t(\cdot)$  è associata all'arco  $i$  che unisce i due centroidi e percorso dal modo  $i$ . Diciamo che la funzione  $c_i^{t_2}(\cdot)$  al tempo  $t_2$  è minore di quella  $c_i^{t_1}(\cdot)$  al tempo  $t_1$  se, per qualsiasi  $x > 0$  risulta  $c_i^{t_2}(x) < c_i^{t_1}(x)$ .

Se ciascun utente scegliesse per la spedizione di 1 tonnellata di merce al tempo  $t+1$  il modo di trasporto che

creases as demand increases and tends to zero when the demand approaches  $K$ . By denoting  $\bar{r}$  as the starting value of  $r^t$ , corresponding to zero demand, we have:

$$r^t = \bar{r} \left[ 1 - \frac{T^t}{K} \right] \quad (1)$$

whence we derive the map determining the law of variation of transport demand over time:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - \frac{T^t}{K} \right) \right] \quad (2)$$

By denoting  $X_i^t$  as the proportion of  $X^t$  that uses mode  $i$ , the transport demand on mode  $i$  at time  $t$  is expressed by  $X_i^t T^t$ .

The cost of transferring 1 ton of freight between the two territories by mode  $i$  at time  $t$  varies depending on the transport distance and different users' perceptions, as well as on the type of freight. This can be understood by considering, for instance, that the value and the dispersion of trip time has great importance if the freight is made up of items for a just-in-time production process, while such factors are much less important if the freight is destined for traditionally managed warehouses. Cost is thus a random variable, distributed in the Cartesian product of the set of users and the set of freight tons, where each ton is characterized by its freight type and the transport distance. We assume that this random variable is distributed according to the Weibull probability law, and that its average  $C_i^t$ , given the distance between the two centroids, is a function of the demand  $X_i^t T^t$  that uses mode  $i$  at time  $t$ . We denote by  $c_i^t(\cdot)$  the functional link between  $C_i^t$  and  $X_i^t T^t$ , so that  $c_i^t(X_i^t T^t) = C_i^t$ . Function  $c_i^t(\cdot)$ , which is positive for positive values of the argument and monotonically increasing, is called the cost function: it is different for each transport mode and for each time in sequence  $\Sigma$ , due to the changes over time in their technological and organizational characteristics. Each  $c_i^t(\cdot)$  is associated to the link,  $i$ , that connects the two centroids and is travelled by mode  $i$ . We say that function  $c_i^{t_2}(\cdot)$  at time  $t_2$  is less than  $c_i^{t_1}(\cdot)$  at time  $t_1$  if, for each  $x > 0$  we have  $c_i^{t_2}(x) < c_i^{t_1}(x)$ .

If each user chose to ship one ton of freight at time  $t+1$  via the transport mode that maximizes utility, estimated as the opposite of the transport cost perceived at time  $t$ , the probability  $P_i^{t+1}$  of using mode  $i$  at time  $t$  would be:

$$P_i^{t+1} = P \left[ -c_i^t(X_i^t T^t) + \varepsilon_i > -c_j^t(X_j^t T^t) + \varepsilon_j, \forall j \in (1..n), i \neq j \right] \quad (3)$$

As the residuals  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  are Weibull random variables with null mean, we have [3]:

$$P_i^{t+1} = \frac{\exp \left[ -\alpha c_i^t(X_i^t T^t) \right]}{\sum_{j=1}^n \exp \left[ -\alpha c_j^t(X_j^t T^t) \right]} \quad (4)$$

where  $\alpha$  is the multiplicative parameter of the Weibull variable. As the variance of the Weibull variable is  $\pi^2/(6\alpha^2)$ , we should actually consider  $\alpha$  to be different at the various

massimizza la sua utilità, stimata come l'opposto del costo del trasporto percepito al tempo  $t$ , la probabilità  $P_i^{t+1}$  di utilizzare il modo  $i$  al tempo  $t+1$  sarebbe data da:

$$P_i^{t+1} = P \left[ -c_i^t(X_i^t T^t) + \varepsilon_i > -c_j^t(X_j^t T^t) + \varepsilon_j, \forall j \in (1..n), i \neq j \right] \quad (3)$$

Poiché i residui  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_j$  sono variabili aleatorie di Weibull a media nulla, si ha [3]:

$$P_i^{t+1} = \frac{\exp[-\alpha c_i^t(X_i^t T^t)]}{\sum_{j=1}^n \exp[-\alpha c_j^t(X_j^t T^t)]} \quad (4)$$

dove  $\alpha$  è il parametro moltiplicativo della variabile di Weibull. Poiché la varianza della variabile di Weibull è  $\pi^2 / (6\alpha^2)$ , dobbiamo ritenere che  $\alpha$  sia diverso nei diversi tempi di  $\Sigma$ ,  $\alpha = \alpha'$  dato che le modifiche tecnologiche ed organizzative producono variazioni non solo delle medie dei costi, ma anche della loro dispersione, pure ritenendo che essa sia la stessa per tutti i modi di trasporto.

Indichiamo con  $\bar{X}_i^t$  la frazione della domanda  $T^{t+1}$  che utilizzerebbe il modo  $i$  al tempo  $t+1$  se ciascun utente scegliesse il modo di trasporto che massimizza la sua utilità, dove l'apice  $t$  di  $\bar{X}_i^t$  indica che l'utilità è stimata come l'opposto del costo percepito al tempo  $t$ . Considerando che  $\bar{X}_i^t$  coincide con la probabilità  $P_i^{t+1}$ , si ha:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-\alpha' c_i^t(X_i^t T^t)]}{\sum_{j=1}^n \exp[-\alpha' c_j^t(X_j^t T^t)]} \quad (5)$$

Quindi, se ciascun utente scegliesse il modo di trasporto che massimizza la sua utilità, si avrebbe  $X_i^{t+1} = \bar{X}_i^t$ , e la differenza fra le frazioni di domanda che usano il modo  $i$  ai tempi  $t$  e  $t+1$  sarebbe  $X_i^{t+1} - X_i^t = \bar{X}_i^t - X_i^t$ . A causa del ritardo con cui gli utenti trasferiscono la loro scelta da un modo di trasporto ad un altro percepito come più conveniente, solo una parte di essi abbandona il modo di trasporto utilizzato al tempo  $t$ .

Si ha quindi che  $X_i^{t+1} - X_i^t$  è solo una frazione di  $\bar{X}_i^t - X_i^t$ :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta [\bar{X}_i^t - X_i^t] \quad (6)$$

dove il coefficiente  $0 < \beta < 1$ , che supponiamo costante, rappresenta l'aliquota degli utenti che avrebbero convenienza a cambiare modo di trasporto, i quali si trasferiscono sul modo più conveniente nell'unità di tempo. Esso è una misura della rapidità con cui gli utenti cambiano modo di trasporto: più alto è  $\beta$ , più rapidi sono gli utenti.

Per calcolare  $\bar{X}_i^t$  mediante la (5) sarebbe necessario conoscere per ciascun tempo  $t$  della sequenza  $\Sigma$  e per ciascun modo  $i$  di trasporto il valore assunto dalle rispettive funzioni di costo in corrispondenza del valore della domanda che usa il modo  $i$  al tempo  $t$ . Allo scopo di evitare il compito estremamente arduo di stimare le funzioni  $c_i^t$  per tutti i modi di trasporto e per tutti i tempi della sequenza  $\Sigma$ , introduciamo per ciascun modo di trasporto  $i$  una funzione  $\varphi_i$  la quale, data la successione durante  $\Sigma$

times in  $\Sigma$ ,  $\alpha = \alpha'$  because the technological and organizational modifications cause variations not only in the average of the costs, but also in their dispersion. However, we consider to be the same for all transport modes.

We denote by  $\bar{X}_i^t$  the fraction of the demand  $T^{t+1}$  that would use mode  $i$  at time  $t+1$  if each user chose the transport mode that would maximize his utility, where apex  $t$  means that the utility is estimated as the opposite of the perceived cost at time  $t$ . By considering that  $\bar{X}_i^t$  coincides with probability  $P_i^{t+1}$ , we have:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-\alpha' c_i^t(X_i^t T^t)]}{\sum_{j=1}^n \exp[-\alpha' c_j^t(X_j^t T^t)]} \quad (5)$$

Thus, if each user chose the transport mode that maximizes utility, we would have  $X_i^{t+1} = \bar{X}_i^t$ , and the difference between the demand fractions using mode  $i$  at times  $t$  and  $t+1$  would be  $X_i^{t+1} - X_i^t = \bar{X}_i^t - X_i^t$ . Because of the delay with which users switch from one transport mode to another deemed more suitable, only some of them will abandon the mode they are using at time  $t$ .

Thus,  $X_i^{t+1} - X_i^t$  is only a fraction of  $\bar{X}_i^t - X_i^t$ :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta [\bar{X}_i^t - X_i^t] \quad (6)$$

where coefficient  $\beta$ ,  $0 < \beta < 1$ , which we suppose to be constant, represents the fraction of users deeming it advantageous to change transport mode and actually do switch to the most suitable mode in a unit time. It is a measure of the speed with users change transport mode: the higher  $\beta$  is, the quicker users are to switch.

In order to compute  $\bar{X}_i^t$  via Eq. (5) we would need to know, for each time  $t$  in sequence  $\Sigma$  and for each transport mode, the values of the respective cost functions corresponding to the demand value that uses mode  $i$  at time  $t$ . With the aim of avoiding the very hard task of estimating function  $c_i^t$  for all transport modes and for all times in sequence  $\Sigma$ , we introduce for each mode  $i$  a function  $\varphi_i$  that, given the sequence of functions  $\varphi_i$  and the demand values  $X_i^t T^t$  during  $\Sigma$ , assumes in correspondence to each  $X_i^t T^t$  the value  $\alpha' c_i^t(X_i^t T^t)$  from function  $c_i^t$  and parameter  $\alpha'$ :

$$\varphi_i(X_i^t T^t) = \alpha' c_i^t(X_i^t T^t) \quad (7)$$

We call  $\varphi_i$  the dynamic cost function and assume that it is a monotonically increasing relation between cost multiplied by  $\alpha'$  and the traffic volume for each transport mode. It is associated to the link  $i$  connecting the two centroids and is travelled by mode  $i$ , just as the usual cost functions. However, while the latter define the relation between cost and traffic volume at a given time, given the technological and organizational characteristics of the transport mode, function  $\varphi_i$  takes into account their evolution over time, which determines the evolution of both the cost function and parameter  $\alpha'$ , and defines the relation between costs multiplied by  $\alpha'$  and the traffic volumes in the successive times in sequence  $\Sigma$ . Thus, while the usual cost functions are estimated on the basis of the modal split at a given

delle funzioni  $\alpha'c_i^t$  e dei valori di domanda  $X_iT^t$ , assume in corrispondenza di ciascun  $X_iT^t$  il valore  $\alpha'c_i^t(X_iT^t)$  derivante dalla funzione  $c_i^t$  e dal parametro  $\alpha'$ :

$$\varphi_i(X_iT^t) = \alpha'c_i^t(X_iT^t) \quad (7)$$

Chiamiamo  $\varphi_i$  funzione di costo dinamica. Supponiamo che essa sia una relazione monotona crescente fra costo, moltiplicato per  $\alpha'$ , e volume di traffico per ciascun modo di trasporto, associata all'arco  $i$  che unisce i due centroidi e percorso dal modo  $i$ , come le usuali funzioni di costo. Ma, mentre queste ultime definiscono la relazione fra costo e volume di traffico in una determinata epoca, date le caratteristiche tecnologiche e organizzative del modo di trasporto, la funzione  $\varphi_i$  tiene conto della loro evoluzione nel tempo, la quale determina l'evoluzione sia delle funzioni di costo che del parametro  $\alpha'$ , e definisce la relazione fra costi moltiplicati per  $\alpha'$  e volumi di traffico verificatisi nei successivi tempi di  $\Sigma$ . Pertanto, mentre le usuali funzioni di costo vengono stimate sulla base della ripartizione modale in una data epoca, la stima della funzione  $\varphi_i$  richiede la conoscenza della serie delle ripartizioni modali nei successivi istanti di  $\Sigma$ , come vedremo nella prossima Sezione. E' implicita in questa definizione della funzione  $\varphi_i$  la condizione che, se in un tempo  $t_2$  la domanda  $X_iT^t$  assume lo stesso valore che in un tempo  $t_1$  precedente, poiché il valore di  $\varphi_i$  rimane lo stesso, anche la funzione  $\alpha'c_i^t$  al tempo  $t_2$  è la stessa che al tempo  $t_1$ :  $\alpha^2c_i^{t_2} = \alpha^1c_i^{t_1}$ . Ciò significa che, se un periodo di incremento della domanda caratterizzato da una diminuzione delle funzioni  $\alpha'c_i^t$  è seguito da un periodo di diminuzione della domanda, durante quest'ultimo le funzioni  $\alpha'c_i^t$  aumentano. Ciò è una conseguenza della diminuzione sia dell'impegno tecnologico e organizzativo, sia della dispersione della distribuzione dei costi, le quali producono l'aumento rispettivamente di  $c_i^t$  e di  $\alpha'$ .

Diciamo, analogamente a quanto si è detto per le funzioni  $c_i^t$ , che una funzione  $\alpha^2c_i^{t_2}$  al tempo  $t_2$  è minore di quella  $\alpha^1c_i^{t_1}$  al tempo  $t_1$  se per qualsiasi  $x > 0$  risulta  $\alpha^2c_i^{t_2}(x) < \alpha^1c_i^{t_1}(x)$ . Ciò si verifica per esempio se una diminuzione nel tempo della funzione di costo si accompagna ad un aumento della dispersione dei costi intorno al valore medio.

Nella fig. 2 è rappresentata la funzione  $\varphi_i$  nel caso a) in cui la diminuzione nel tempo delle funzioni  $\alpha'c_i^t$  si

time, estimation of function  $\varphi_i$  requires knowing the sequence of the modal split in the successive times in  $\Sigma$ , as we will see in the next Section. This definition of function  $\varphi_i$  implies that if demand  $X_iT^t$  takes on the same value at time  $t_2$  as in the preceding time,  $t_1$ , since the value of  $\varphi_i$  remains the same, function  $\alpha'c_i^t$  at time  $t_2$  is also the same as at time  $t_1$ :  $\alpha^2c_i^{t_2} = \alpha^1c_i^{t_1}$ . This means that, if a period of increasing demand, characterized by a decrease in the functions  $\alpha'c_i^t$ , is followed by a period of decreasing demand, functions  $\alpha'c_i^t$  increase in the latter period. This a consequence of decreases in both the technological and organizational commitment and the dispersion of the cost distribution, which lead to increases in  $c_i^t$  and in  $\alpha'$ , respectively.

Just as for function  $c_i^t$ , we state that a function  $\alpha^2c_i^{t_2}$  at

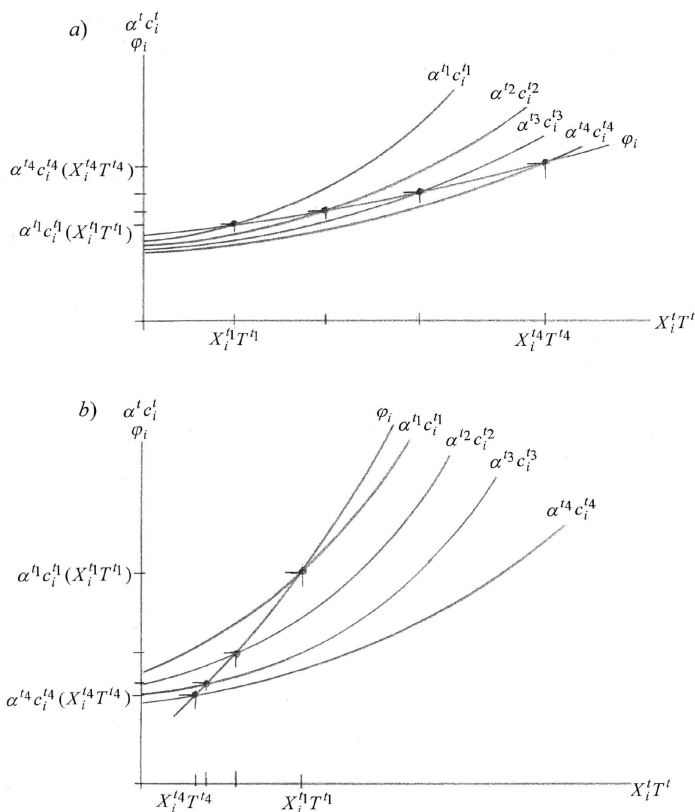


Fig. 2 – Funzione di costo dinamica  $\varphi_i(X_iT^t)$  nel caso a) in cui la domanda  $X_iT^t$  aumenta nel tempo (per  $t_4 > t_1$  si ha  $X_i^4T^4 > X_i^1T^1$ ), e nel caso b) in cui diminuisce (per  $t_4 > t_1$  si ha  $X_i^4T^4 < X_i^1T^1$ ), mentre in entrambi i casi le funzioni  $\alpha'c_i^t(X_iT^t)$  diminuiscono nel tempo (per qualsiasi  $x$  e per  $t_2 > t_1$  si ha  $c_i^{t_2}(x) < c_i^{t_1}(x)$ ).

Fig. 2 – Dynamic cost function  $\varphi_i(X_iT^t)$  in case a) in which demand  $X_iT^t$  increases over time (for  $t_4 > t_1$ , we have  $X_i^4T^4 > X_i^1T^1$ ), and case b) in which it decreases (for  $t_4 > t_1$ , we have  $X_i^4T^4 < X_i^1T^1$ ), while in both cases functions  $\alpha'c_i^t(X_iT^t)$  decrease over time (for any  $x$  and for  $t_2 > t_1$ , we have  $c_i^{t_2}(x) < c_i^{t_1}(x)$ ).



accompagna ad un aumento della domanda, e nel caso b) in cui invece la diminuzione si accompagna ad una diminuzione della domanda. Dalla figura si nota che, se in un punto qualsiasi della funzione  $\varphi_i$  il suo coefficiente angolare è (caso a) minore di quello della funzione  $\alpha c_i^t$  passante per quel punto, la diminuzione nel tempo delle funzioni  $\alpha c_i^t$  si accompagna ad un aumento della domanda (ovvero l'aumento delle funzioni  $\alpha c_i^t$  si accompagna ad una diminuzione della domanda). Al contrario, se il coefficiente angolare di  $\varphi_i$  è (caso b) maggiore di quello di  $\alpha c_i^t$ , la diminuzione delle funzioni  $\alpha c_i^t$  si accompagna ad una diminuzione della domanda (ovvero l'aumento delle funzioni  $\alpha c_i^t$  si accompagna ad un aumento della domanda). La precedente osservazione consente di verificare, avendo calcolato con la tecnica illustrata nella prossima Sezione le espressioni delle funzioni  $\varphi_i$  per i vari modi di trasporto, se le modifiche tecnologiche ed organizzative di ciascun modo di trasporto stanno producendo una diminuzione o un aumento nel tempo delle funzioni  $\alpha c_i^t$ . Infatti se, dato un punto qualsiasi di  $\varphi_i$ , si ritiene che la funzione  $\alpha c_i^t$  passante per quel punto abbia un coefficiente angolare maggiore di quello di  $\varphi_i$ , si può pensare che l'evoluzione del modo di trasporto segua il caso a), altrimenti esso si sta evolvendo secondo il caso b). E poiché l'evoluzione nel tempo della domanda per ciascun modo di trasporto è nota, si può dedurre se l'evoluzione tecnologica ed organizzativa sta producendo una diminuzione o un aumento delle funzioni  $\alpha c_i^t$ .

Poiché, come si è già detto in precedenza, la varianza del residuo aleatorio di  $C_i^t$  è  $\pi^2/(6\alpha^2)$ , si ha che  $\alpha$  ha dimensione inversa a quella di  $C_i^t$ , per cui  $\varphi_i(X_i^t T) = \alpha C_i^t$  è senza dimensione. L'espressione analitica di  $\varphi_i$  dipende dalla evoluzione delle funzioni di costo durante la sequenza temporale  $\Sigma$ : essa dipende quindi dal particolare caso studiato. Noi qui supponiamo che  $\varphi_i$  sia una funzione polinomiale del secondo ordine monotonamente crescente della domanda  $X_i^t T$ , i cui coefficienti possono essere stimati, con la tecnica illustrata nella Sezione successiva, conoscendo le sequenze delle frazioni di domanda che hanno utilizzato i diversi modi di trasporto durante  $\Sigma$ . Si ha cioè:

$$\varphi_i(X_i^t T) = a_{i,1} + a_{i,2} X_i^t T + a_{i,3} (X_i^t T)^2 \quad (8)$$

Note le funzioni  $\varphi_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , sostituendo la (7) nella (5) si ha:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-\varphi_i(X_i^t T)]}{\sum_{j=1}^n \exp[-\varphi_j(X_j^t T)]} \quad (9)$$

Detto  $X^t$  il vettore le cui componenti sono  $X_i^t$ ,  $i=1, \dots, n$ , dato il vettore iniziale  $X^0$  ed il valore iniziale  $T^0$  della domanda, la sequenza  $\{X^t\}$  dei vettori  $X^t$  si calcola, tenendo conto della (6), attraverso la ripetuta applicazione della mappa:

$$X^{t+1} = X^t + \beta [\bar{X}^t (X^t T^t) - X^t] \quad (10)$$

time  $t^2$  is less than  $\alpha^1 c_i^{t^1}$  at time  $t^1$  if for each  $x > 0$  we have  $\alpha^2 c_i^{t^2}(x) < \alpha^1 c_i^{t^1}(x)$ . This occurs, for instance, if a decrease over time in the cost function is accompanied by an increase in the dispersion of costs around their average value.

Figure 2 shows function  $\varphi_i$  for case a) in which the decrease over time in functions  $\alpha c_i^t$  is accompanied by an increase in demand, and case b) in which the decrease is instead accompanied by a decrease in demand. Note that in the figure, if at any point of function  $\varphi_i$ , its angular coefficient is less than that of function  $\alpha c_i^t$  passing through that point (case a), the decrease over time in functions  $\alpha c_i^t$  is accompanied by an increase in demand (or an increase in functions  $\alpha c_i^t$  is accompanied by a decrease in demand). Conversely, if the angular coefficient of  $\varphi_i$  is greater than that of  $\alpha c_i^t$  (case b), the decrease in functions  $\alpha c_i^t$  is accompanied by a decrease in demand (or the increase in functions  $\alpha c_i^t$  is accompanied by an increase in demand). This observation enables us to verify, after computing the expressions for functions  $\varphi_i$  (as shown in the next Section), whether the technological and organizational modifications to each transport mode are causing a decrease or an increase in functions  $\alpha c_i^t$ . Indeed, given any point of  $\varphi_i$ , if we think that function  $\alpha c_i^t$  passing through this point has an angular coefficient greater than that of  $\varphi_i$ , we can assume that the transport mode is evolving according to case a), otherwise its evolution is consistent with case b). And, since the evolution over time of demand for each transport mode is known, we can determine whether the technological and organizational evolution is causing an increase or a decrease in functions  $\alpha c_i^t$ .

Since, as previously stated, the variance of the random residuals of  $C_i^t$  is  $\pi^2/(6\alpha^2)$ , it follows that the dimensions of  $\alpha$  are the inverse of those of  $C_i^t$ , so that  $\varphi_i(X_i^t T) = \alpha C_i^t$  is dimensionless. The analytical expression for  $\varphi_i$  depends on the evolution of the cost functions over the time sequence  $\Sigma$ , hence it depends on the particular case under examination. Herein we suppose that  $\varphi_i$  is a monotonically increasing second order polynomial function of demand  $X_i^t T$ , whose coefficients can be estimated, as shown in the next Section, if one knows the sequence of the fractions of demand that have used the various transport modes during  $\Sigma$ . Thus we have:

$$\varphi_i(X_i^t T) = a_{i,1} + a_{i,2} X_i^t T + a_{i,3} (X_i^t T)^2 \quad (8)$$

If we know functions  $\varphi_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , by substituting Eq. (7) into Eq. (5), we obtain:

$$\bar{X}_i^t = \frac{\exp[-\varphi_i(X_i^t T)]}{\sum_{j=1}^n \exp[-\varphi_j(X_j^t T)]} \quad (9)$$

By denoting  $X^t$  as the vector whose components are  $X_i^t$ ,  $i=1, \dots, n$ , given initial vector  $X^0$  and initial value  $T^0$  of demand, the sequence  $\{X^t\}$  of vectors  $X^t$  is computed, taking into account Eq. (6), by iterated application of the map:

$$X^{t+1} = X^t + \beta [\bar{X}^t (X^t T^t) - X^t] \quad (10)$$

dove  $\bar{X}^t$  è il vettore le cui componenti sono date dalla (9), mentre i successivi valori  $T$  sono generati dalla mappa (2) partendo da  $T^0$ .

Se la sequenza  $\{X^t\}$  converge verso un punto di equilibrio, esso è il punto fisso  $X^*$  della mappa (10) quando  $T$  assume il valore asintotico  $K$ . Detto  $\bar{X}(X^*K)$  il vettore le cui componenti sono date dalla (8) quando  $T=K$  e  $X^t=X^*$ , ponendo nella (10)  $X^{t+1}=X^t=X^*$  e  $T=K$ , si ha:

$$X^* = \bar{X}(X^*K) \quad (11)$$

la quale definisce  $X^*$  come punto di equilibrio stocastico della rete formata dagli  $n$  archi che connettono i due centroidi, a ciascuno dei quali è associata una funzione  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Tenendo presente che  $\alpha'$  è proporzionale all'inverso della deviazione standard  $\sigma_c$  dei costi,  $\alpha' = \pi/(\sqrt{6}\sigma_c)$ , la successione dei valori  $q_i(X_i^t T) = \alpha' c_i^t(X_i^t T)$ , calcolati attribuendo a  $X_i^t$  e a  $T$  i valori assunti in corrispondenza dei diversi tempi  $t$  della sequenza  $\Sigma$ , fornisce, a meno di una costante di proporzionalità, l'evoluzione nel tempo del rapporto fra costo medio di trasporto di 1 t di merce e deviazione standard dei costi, definendo quindi la funzione del tempo  $\psi_i(t) = q_i(X_i^t T) = \alpha' c_i^t(X_i^t T)$ .

### 3. Stima dei parametri del modello

Supponiamo di conoscere la sequenza delle frazioni di domanda  $\hat{X}_i$  che utilizzano i vari modi di trasporto, rilevate in una successione  $\Sigma$  abbastanza lunga di tempi  $t$ , ad intervalli, per esempio, di un anno. Utilizziamo questa sequenza per stimare i valori del parametro  $\beta$  e dei coefficienti delle funzioni polinomiali  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , in modo che i valori  $X_i^t$  generati dalla mappa (8) siano il più possibile vicini agli  $\hat{X}_i$ .

Supponiamo nota la mappa (2) della domanda e quindi, a partire da un valore iniziale  $T^0$ , la sequenza  $\{T\}$  dei valori della domanda di trasporto, durante intervalli temporali unitari, nei successivi tempi della sequenza  $\Sigma$ . Indichiamo con  $\alpha_i$  il vettore dei coefficienti della funzione polinomiale  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Assegnati il valore del parametro  $\beta$  e quelli dei vettori  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , la ripetuta applicazione della mappa (10) calcola, a partire da  $T^0$  e da un vettore iniziale  $X^0$ , la sequenza  $\{X^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta\}$  dei vettori  $X^t$  nei successivi tempi della sequenza  $\Sigma$ . Siano  $\hat{X}_i$  e  $X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  i valori rispettivamente misurati e calcolati della frazione di domanda che utilizza il modo  $i$  al tempo  $t$ . Il valore di  $\beta$  ed i vettori  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , che minimizzano la somma degli scarti quadratici  $[\hat{X}_i - (X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)]^2$  per tutti gli  $i=1, \dots, n$  e per tutti i tempi della sequenza  $\Sigma$  vengono assunti come stima di  $\beta$  e degli  $\alpha_i$ .

La stima è quindi ottenuta risolvendo il seguente problema:

$$\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta} \Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta) \quad (12)$$

dove:

$$\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta) = \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \Sigma} [\hat{X}_i^t - (X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)]^2 \quad (13)$$

where  $\bar{X}^t$  is the vector whose components are given by Eq. (9), while the sequence of  $T$  values are generated by iterated application of map (2) starting with  $T^0$ .

If sequence  $\{X^t\}$  converges towards an equilibrium point, this is the fixed point  $X^*$  of map (10) when  $T$  assumes the asymptotic value  $K$ . By denoting  $\bar{X}(X^*K)$  as the vector whose components are given by Eq. (8) when  $T=K$  and  $X^t=X^*$ , and putting  $X^{t+1}=X^t=X^*$  and  $T=K$  in Eq. (10), we have:

$$X^* = \bar{X}(X^*K) \quad (11)$$

which defines  $X^*$  as the stochastic equilibrium point of the network formed by the  $n$  links connecting the two centroids, to each of which a function  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$  is attributed. If we consider that  $\alpha'$  is proportional to the inverse of the standard deviation  $\sigma_c$  of the costs,  $\alpha' = \pi/(\sqrt{6}\sigma_c)$ , then the sequence of values  $q_i(X_i^t T) = \alpha' c_i^t(X_i^t T)$ , computed by assigning the values corresponding to the various times in sequence  $\Sigma$  to  $X_i^t$  and  $T$ , furnishes the evolution over time of the ratio between the average transport cost of 1 ton of freight and the standard deviation of costs, minus a proportionality constant. Thus, the function of time  $\psi_i(t) = q_i(X_i^t T) = \alpha' c_i^t(X_i^t T)$  is defined.

### 3. Estimating the model parameters

Let us now assume that the sequences of demand fractions  $\hat{X}_i$  for the various transport modes are known - surveyed in a rather long sequence  $\Sigma$  of times  $t$ , at an interval, say, of 1 year. We can now use this sequence to estimate the value of parameter  $\beta$  and the coefficients of polynomial functions  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , in such a way that the values  $X_i^t$  generated by map (10) are as close as possible to  $\hat{X}_i$ .

Let us moreover assume that map (2) of the demand is also known, and hence, starting with an initial value  $T^0$ , so is sequence  $\{T\}$  of the values of transport demand during unit time intervals in the successive times of sequence  $\Sigma$ . We denote by  $\alpha_i$  the vector of the coefficients of polynomial function  $q_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Having assigned the value of parameter  $\beta$  and vectors  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , iterated application of map (10), starting with  $T^0$  and an initial vector  $X^0$ , computes the sequence  $\{X^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta\}$  of vectors  $X^t$  in the successive times of  $\Sigma$ . Let  $\hat{X}_i$  and  $X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  respectively be the surveyed and computed values of the demand fraction that uses mode  $i$  at time  $t$ . The values of  $\beta$  and the vectors  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, n$  that minimize the sum of the square deviations  $[\hat{X}_i - (X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)]^2$  for all  $i=1, \dots, n$  and for all times in sequence  $\Sigma$  are assumed as estimations of  $\beta$  and of  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Thus, the estimates are obtained by solving the following problem:

$$\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta} \Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta) \quad (12)$$

where:

$$\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta) = \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \Sigma} [\hat{X}_i^t - (X_i^t | \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)]^2 \quad (13)$$

Non riusciamo a definire l'espressione analitica di  $\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)$ , mentre il suo valore per ogni set di  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  può essere calcolato usando la mappa (10). Il problema (12) può quindi essere risolto utilizzando l'algoritmo del semplice discendente di Nelder e Mead [10], il quale non richiede l'espressione analitica della funzione da minimizzare, poiché è un processo iterativo in ciascun passo del quale il valore della funzione da minimizzare corrispondente ad un dato set di variabili viene calcolato. Una sintetica descrizione delle principali fasi dell'algoritmo è data in [8].

In genere la funzione  $\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)$  ha numerosi punti di minimo locale, ed è possibile che l'algoritmo si arresti in qualcuno di essi che non sia il minimo globale. Pertanto, partendo da condizioni iniziali diverse, si possono ottenere punti di minimo diversi, corrispondenti a diversi set di  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$ . Si assume come stima dei parametri del modello il set che corrisponde al più piccolo dei punti di minimo.

Le stime dei vettori  $\alpha_i, i=1, \dots, n$ , definiscono le funzioni di costo dinamiche  $\varphi_i$  relative al periodo di tempo rappresentato dalla sequenza  $\Sigma$ . Introduciamo queste funzioni  $\varphi_i$  nella (9), calcoliamo le componenti  $\bar{X}_i^t$  del vettore  $\bar{X}^t$ , e quindi mediante la mappa (10) la sequenza degli  $\bar{X}_i^t$ , partendo da una domanda iniziale  $T^0$  e da un vettore iniziale  $X^0$ . Se gli  $X_i^t$  così calcolati concordano abbastanza bene con gli  $\bar{X}_i^t$ , misurati, si possono ritenere valide le ipotesi del modello, ed in particolare che le funzioni  $\psi_i(t) = \varphi_i(X_i^t, T)$  indichino, a meno di una costante di proporzionalità, l'evoluzione nel tempo del rapporto fra i costi dei vari modi di trasporto mediamente percepiti dagli utenti e la dispersione dei costi. Si deve tuttavia osservare che, poiché i valori di  $\bar{X}_i^t$  dati dalla (9) non variano se a tutte le  $\varphi_i$  si aggiunge una stessa costante arbitraria, i valori di  $\varphi_i(X_i^t, T)$  e  $\psi_i(t)$  non sono significativi, mentre lo sono le loro differenze.

Nell'ipotesi che le funzioni  $\alpha'c'_i$  evolvano nel tempo in modo che i valori  $\alpha'c'_i(X_i^t, T)$  nei tempi  $t$  successivi a quelli della sequenza  $\Sigma$  continuino ad essere prossimi a quelli  $\varphi_i(X_i^t, T)$  delle funzioni  $\varphi_i$ , queste ultime possono essere utilizzate per calcolare, mediante la (9) e la (10), la futura evoluzione della ripartizione della domanda fra gli  $n$  modi di trasporto.

#### 4. L'applicazione del modello al traffico merci attraverso le Alpi Svizzere

Il modello descritto nelle precedenti Sezioni è stato applicato all'analisi della evoluzione nel tempo della ripartizione modale del trasporto delle merci attraverso le Alpi Svizzere, utilizzando i dati raccolti annualmente da ALPINFO fra il 1984 e il 2011 [2]. Questi forniscono il numero di milioni di tonnellate di merci attraverso i valichi stradali e ferroviari trasportate dalla ferrovia a carro completo, dal trasporto stradale e dal trasporto intermodale. Denominiamo modo 1 il trasporto ferroviario a carro completo, modo 2 il trasporto stradale, modo 3 il trasporto intermodale. Attraverso le Alpi Svizzere transita gran parte del traffico merci fra l'area nord-occidentale dell'Italia e quella formata dalla Svizzera tedesca, la Germania occidentale, il Belgio e l'Olanda, con una distanza media

We cannot define the analytic expression for  $\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)$ , whereas its value for each set of  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$  can be computed by using map (10). Problem (12) can thus be solved by using the downhill simplex algorithm proposed by NELDER and MEAD [10], which does not require the analytic expression of the function, because it is an iterative process each pass of which computes the value of the function corresponding to a given set of variables. A summary presentation of the algorithm is given in [8].

In general, function  $\Phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)$  has many local minimum points, and it is possible that the algorithm stops at some point that is not the global minimum. Thus, starting with different initial conditions, we can obtain different minimum points corresponding to different sets of  $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta$ . We assume as estimations of the model parameters the set corresponding to the least of the minimum points.

The estimates of vectors  $\alpha_i, i=1, \dots, n$ , define the dynamic cost functions  $\varphi_i$  corresponding to the time period represented by sequence  $\Sigma$ . Introducing these functions  $\varphi_i$  into Eq. (9), we compute the components  $\bar{X}_i^t$  of vector  $\bar{X}^t$ , and hence the sequence of  $\bar{X}_i^t$ , by using map (10), starting with an initial demand  $T^0$  and an initial vector  $X^0$ . If the thusly computed  $X_i^t$  are rather close to the surveyed  $\bar{X}_i^t$ , the model hypotheses would seem to be valid: in particular that the functions  $\psi_i(t) = \varphi_i(X_i^t, T)$  represent, minus a proportionality constant, the evolution over time of the ratio between the average perceived costs of the various transport modes and the costs dispersion. However, it should be stressed that, since the values of  $\bar{X}_i^t$  given by Eq. (9) do not vary if the same constant is added to all  $\varphi_i$ , the values of  $\varphi_i(X_i^t, T)$  and  $\psi_i(t)$  are not meaningful, whereas their differences are.

Under the hypothesis that functions  $\alpha'c'_i$  evolve over time in such a way that the values  $\alpha'c'_i(X_i^t, T)$  in times  $t$  subsequent to sequence  $\Sigma$  continue to be near those  $\varphi_i(X_i^t, T)$  of functions  $\varphi_i$ , the latter can, by using Eq. (9) and Eq. (10), be employed to compute the future evolution of the demand split among the  $n$  transport modes.

#### 4. Application of the model to freight traffic through the Swiss Alps

The model presented in the previous Sections has been applied to an analysis of the evolution over time of the modal split of freight traffic through the Swiss Alps, by using the data recorded yearly by ALPINFO between 1984 and 2011 [2], which provide the number of million freight tons carried through the Swiss Alps by wagonload rail, road haulage and intermodal transport. We denote by mode 1 wagonload rail transport, mode 2 road haulage and mode 3 intermodal transport. A substantial part of the freight traffic between North-Western Italy and the area formed by German Switzerland, Western Germany, Belgium and Netherlands passes through the Swiss Alps, with an average transport distance of 850 km, computed as the ratio between the total t-km and the total tons carried between these two areas (determined by processing EUROSTAT data). Thus, 850 km is the value we can attribute to the dis-

di trasporto di circa 850 km, calcolata come rapporto fra il totale delle t-km e quello delle tonnellate di merce trasportata fra queste due aree, risultante dai dati EUROSTAT opportunamente elaborati. Pertanto 850 km è il valore che si può attribuire alla distanza fra i centroidi rappresentativi di queste due aree, anche se dobbiamo assumere questo valore con una certa cautela, data l'ampiezza delle aree.

Nella fig. 3 sono riportati i valori annui della domanda complessivamente trasportata dai tre modi in entrambe le direzioni nel periodo considerato, interpolati con la curva i cui punti sono stati generati dalla mappa (2), con un valore asintotico  $K=55 \cdot 10^6$  tonnellate ed un tasso annuo  $\bar{r}=0.065$ , partendo dal valore iniziale  $T^0=16,7 \cdot 10^6$  tonnellate registrato nel 1984.

Utilizzando le sequenze delle frazioni di domanda  $\hat{X}_i$  trasportate annualmente da ciascuno dei tre modi di trasporto, sono stati stimati, col procedimento illustrato nella precedente Sezione, il parametro  $\beta$  ed i coefficienti delle funzioni di costo dinamiche  $\varphi_i$ ,  $i=1, 2, 3$  le quali si è supposto essere, come si è detto, polinomi del secondo ordine. Si è così stimato che  $\beta=0.042$ , mentre la stima dei coefficienti ha dato luogo alle seguenti espressioni delle funzioni  $\varphi_i(X_i^t T)$ :

$$\begin{aligned} \text{modo 1 } \varphi_1(X_1^t T) &= 0.3796 - 0.0105X_1^t T^t + 0.4412(X_1^t T^t)^2 \\ \text{modo 2 } \varphi_2(X_2^t T) &= 0.1822 - 0.1806X_2^t T^t + 0.0168(X_2^t T^t)^2 \\ \text{modo 3 } \varphi_3(X_3^t T) &= -0.1824 - 0.0296X_3^t T^t + 0.0038(X_3^t T^t)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Attribuendo alle funzioni  $\varphi_i$  nella (9) le espressioni (14) e ponendo  $\beta=0.042$  nella (10), quest'ultima fornisce la sequenza delle stime delle frazioni di domanda  $X_i^t$  che utilizzano i tre modi di trasporto, a partire da valori iniziali  $T^0$  e  $X^0$  coincidenti con quelli misurati nel 1984. Le traiettorie nel piano  $(X_i^t, t)$  delle tre sequenze così calcolate sono riportate nella figura 4, sovrapposte ai punti corrispondenti ai valori  $\hat{X}_i$  misurati. Le differenze  $|X_i^t - \hat{X}_i|$  sono abbastanza modeste e di tipo aleatorio, il che consente di ritenere che il modello interpreta abbastanza bene la dinamica del sistema.

Nell'ipotesi che le funzioni di costo  $c_i^t$  e le dispersioni  $\pi/(\sqrt{6}\alpha)$  evolvano in modo che i prodotti  $\alpha c_i^t(X_i^t T)$  nei tempi successivi alla sequenza  $\Sigma$  continuino ad essere prossimi a quelli dati dalle espressioni (14) delle funzioni  $\varphi_i$ , queste ultime possono essere utilizzate per calcolare, mediante la (9) e la (10), la prosecuzione oltre  $\Sigma$  delle sequenze  $[X_i^t]$ ,  $i=1,2,3$ , e quindi l'evoluzione nel tempo della ripartizione della domanda fra i tre modi di trasporto. La prosecuzione oltre  $\Sigma$  delle traiettorie nel piano  $(X_i^t, t)$  delle sequenze  $[X_i^t]$ ,  $i=1,2,3$  è riportata nella fig. 4 fino all'anno 2048, nel quale sono raggiunti valori molto prossimi a quelli asintotici, mentre è poco probabile che oltre di es-

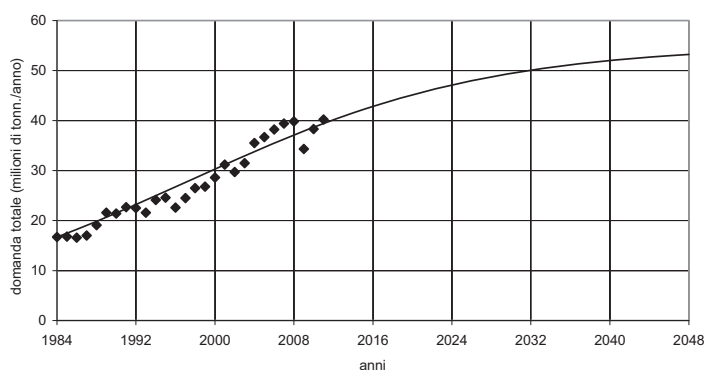


Fig. 3 – Andamento della domanda di trasporto attraverso le Alpi Svizzere in funzione del tempo.

Fig. 3 – Pattern of transport demand through the Swiss Alps as a function of time.

tance between the centroids of these two areas, though this value should be assumed with a certain degree of caution, given the size of the two areas.

Figure 3 shows the yearly values of demand carried over-all by the three transport modes in both the directions in the period under examination, interpolated by a curve whose points have been generated by map (2), with an asymptotic value  $K=55 \cdot 10^6$  tons and a yearly rate  $\bar{r}=0.065$ , starting with the initial value of  $T^0=16,7 \cdot 10^6$  tons recorded in 1984.

By using the sequences of the demand fractions carried yearly by each transport mode, we have estimated, through the procedure shown in the previous Section, parameter  $\beta$  and the coefficients of the dynamic cost functions  $\varphi_i$ ,  $i=1, 2, 3$  taken to be second order polynomials, as previously mentioned. In this way, we have estimated that  $\beta=0.042$ , while estimation of the coefficients furnishes the following expressions for functions  $\varphi_i(X_i^t T)$ :

$$\begin{aligned} \text{modo 1 } \varphi_1(X_1^t T) &= 0.3796 - 0.0105X_1^t T^t + 0.4412(X_1^t T^t)^2 \\ \text{modo 2 } \varphi_2(X_2^t T) &= 0.1822 - 0.1806X_2^t T^t + 0.0168(X_2^t T^t)^2 \\ \text{modo 3 } \varphi_3(X_3^t T) &= -0.1824 - 0.0296X_3^t T^t + 0.0038(X_3^t T^t)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

By assigning expressions (14) to functions  $\varphi_i$  in Eq. (9), and putting  $\beta=0.042$  in Eq. (10), the latter furnishes the sequence of estimates of the demand fractions  $X_i^t$  that use the three transport modes, starting with the initial values  $T^0$  and  $X^0$ , which are those recorded in 1984. The trajectories in the plane  $(X_i^t, t)$  of the resulting three sequences are shown in figure 4, superimposed on the points corresponding to the recorded values  $\hat{X}_i$ . The differences  $|X_i^t - \hat{X}_i|$  are rather small and random, indicating that the model explains the system dynamics quite well.

Let us now assume that the cost functions  $c_i^t$  and dispersions  $\pi/(\sqrt{6}\alpha)$  evolve over time in such a way that the products  $\alpha c_i^t(X_i^t T)$ , in times subsequent to sequence  $\Sigma$  continue to be close to those given by expressions (14) for functions  $\varphi_i$ . In this case, the expressions for  $\varphi_i$  can, via



so la dinamica del sistema in esame rimanga sostanzialmente inalterata.

Dalla fig. 4 si osserva che la traiettoria relativa al modo **1** è monotonamente decrescente, tendendo al valore asintotico  $X_1^* = 0.059$ , nettamente inferiore al valore iniziale  $X_1^0 = 0.659$ . La traiettoria del modo **2** ha un andamento monotonamente crescente fino a raggiungere il valore di 0.358 nell'anno 2012, molto prossimo al valore asintotico  $X_2^* = 0.361$ , alquanto maggiore del valore iniziale  $X_2^0 = 0.144$ . Questo andamento della traiettoria del modo **2** è da ritenersi una conseguenza della imposizione, a partire dal 2001, della tassa sul traffico stradale pesante nel territorio Svizzero e degli altri provvedimenti, di cui si è parlato nella Sezione 1. La traiettoria del modo **3** ha un andamento monotonamente crescente fino al valore asintotico  $X_3^* = 0.580$ , notevolmente maggiore del valore iniziale  $X_3^0 = 0.197$ , ed anche del valore 0.446 raggiunto nel 2012. Quindi, se le funzioni  $\varphi_i$  continueranno ad avere le espressioni (14), nei prossimi anni è da attendersi una ulteriore consistente diminuzione della frazione di domanda sulla ferrovia a carro completo, ed un consistente aumento di quella trasportata dal trasporto intermodale, mentre quella che usa il trasporto stradale non dovrebbe subire sostanziali variazioni.

La fig. 5 riporta l'andamento delle funzioni  $\varphi_1(X_i^t T)$ ,  $\varphi_2(X_i^t T)$  e  $\varphi_3(X_i^t T)$ . E' da notare che, come si è detto nella precedente Sezione, poiché i valori di  $\bar{X}_i^t$ ,  $i=1,2,3$ , non variano se a tutte le  $\varphi_i(X_i^t T)$  si aggiunge una stessa costante arbitraria, i valori di  $\varphi_i(X_i^t T)$ , e quindi anche quelli di

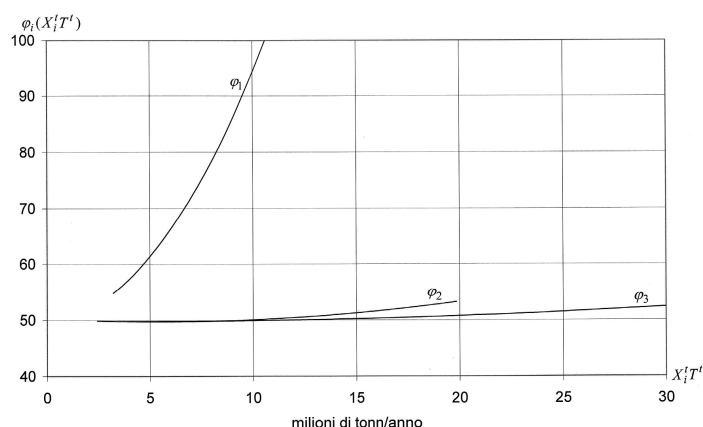


Fig. 5 – Andamento delle funzioni di costo dinamiche  $q_i(X_i^t T)$  per i tre modi di trasporto.

Fig. 5 – Pattern of the dynamic cost functions  $q_i(X_i^t T)$  for the three transport modes.

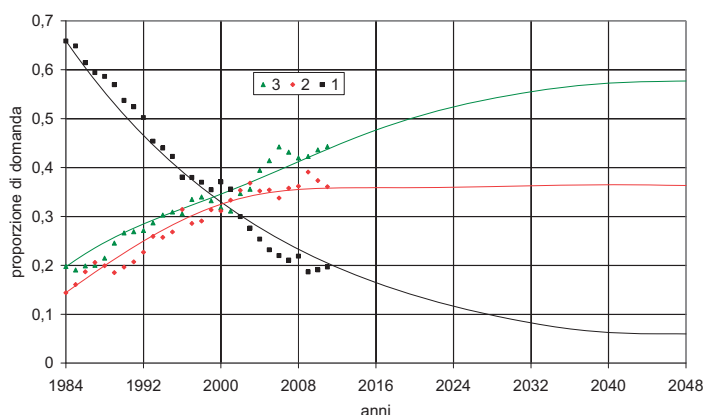


Fig. 4 – Traiettorie della ripartizione modale del traffico merci attraverso le Alpi Svizzere.

Fig. 4 – Trajectories of the modal split of freight traffic through the Swiss Alps.

Eqs. (9) and (10), be used to compute the sequel of sequence  $\{X_i^t\}$ ,  $i=1,2,3$ , in times beyond  $\Sigma$ , and thus the evolution over time of the demand split amongst the three transport modes. The sequel beyond  $\Sigma$  of the trajectories in plane  $(X_i^t, t)$  of sequences  $\{X_i^t\}$ ,  $i=1,2,3$  is shown in figure 4 up to the year 2048, where values very close to the asymptotic ones are reached, and beyond which it is rather unlikely that the dynamics of the system will remain unchanged.

Figure 4 shows that the trajectory relative to mode **1** is monotonically decreasing, tending to the asymptotic value  $X_1^* = 0.059$ , decidedly less than the initial value  $X_1^0 = 0.659$ . The trajectory of mode **2** is monotonically increasing as far as the value 0.358, reached in the year 2012, very close to the asymptotic value of  $X_2^* = 0.361$  and quite a bit greater than the initial value of  $X_2^0 = 0.144$ . This pattern of the trajectory of mode **2** can quite likely be interpreted as the consequence of the 2001 imposition of the road freight tax in Switzerland, and the other measures discussed in Section 1. The trajectory of mode **3** is monotonically increasing as far as the asymptotic value of  $X_3^* = 0.580$ , considerably greater than both the initial value of  $X_3^0 = 0.197$  and the value of 0.446 reached in 2012. Thus, if functions  $\varphi_i$  maintain expressions (14) in the future, we should expect further considerable decreases in coming years in the demand fraction using wagonload rail transport, and a substantial increase in that carried by intermodal transport, with no substantial variation in the fraction of road haulage.

Figure 5 shows patterns of functions  $\varphi_1(X_i^t T)$ ,  $\varphi_2(X_i^t T)$  and  $\varphi_3(X_i^t T)$ . It should be noted that, as stated in the

$\psi_i(t)$ , non sono significativi, mentre lo sono le loro differenze: per una migliore visione delle curve della fig. 5, in quest'ultima i valori delle  $\varphi_i$  sono stati aumentati di 50 rispetto a quelli forniti dalle (14).

Tenendo presente quanto si è detto nella Sezione 2, si può ritenere che gli elevati valori dei coefficienti angolari di  $\varphi_i(X_i^*T)$  indicano che una diminuzione delle funzioni di costo ed un aumento della dispersione dei costi si è accompagnato alla diminuzione nel tempo della domanda sul trasporto ferroviario a carro completo. Questo è una conseguenza del comportamento delle Aziende ferroviarie le quali, come si è evidenziato nella Sezione 1, tendono a migliorare l'organizzazione del trasporto a carro completo dando luogo ad una modifica della distribuzione dei costi di trasporto nella popolazione degli utenti, alcuni dei quali percepiscono un costo alquanto superiore rispetto al passato, e tendono quindi ad utilizzare un diverso modo di trasporto, mentre altri percepiscono un costo notevolmente inferiore. Il risultato è una diminuzione nel tempo della proporzione di utenti del trasporto a carro completo, accompagnato da una diminuzione delle funzioni di costo di questo modo di trasporto. Al contrario i modesti valori dei coefficienti angolari di  $\varphi_2(X_2^*T)$  e  $\varphi_3(X_3^*T)$  indicano che la diminuzione delle funzioni di costo e l'aumento della dispersione dei costi per il trasporto stradale e per quello intermodale si è accompagnato ad un aumento della domanda per questi due modi di trasporto.

La fig. 6 riporta la traiettoria della sequenza dei valori di  $\psi_1(t)$  negli anni compresi fra il 1984 e il 2048, mentre nella fig. 7 sono rappresentate le analoghe traiettorie per le funzioni  $\psi_2(t)$  e  $\psi_3(t)$ .

La traiettoria di  $\psi_1(t)$  è monotonicamente decrescente, tendendo al valore asintotico 55.037; la traiettoria di  $\psi_2(t)$  è per un brevissimo tratto lievemente decrescente, quindi cresce monotonicamente fino al valore asintotico 53.512, mentre quella di  $\psi_3(t)$  è sempre monotonicamente crescente fino al valore asintotico 52.740. Si osserva che i valori di  $\psi_1(t)$  sono notevolmente maggiori di quelli di  $\psi_2(t)$  e di  $\psi_3(t)$ . Poiché  $\alpha'$  è lo stesso per tutti i tre modi di trasporto, ciò significa che i costi della ferrovia a carro completo sono notevolmente supe-

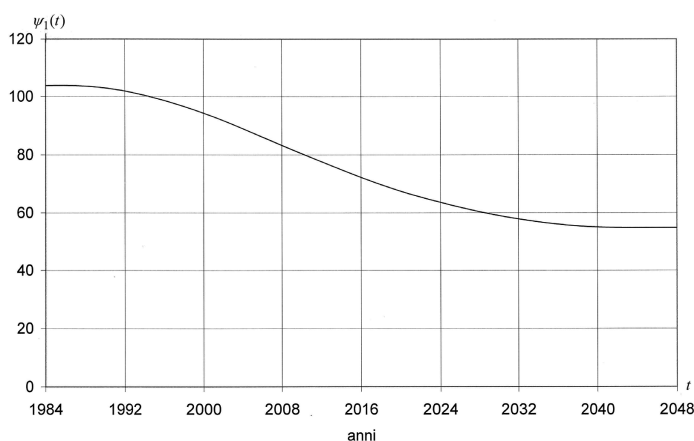


Fig. 6 – Andamento della funzione  $\psi_1(t)$ .

Fig. 6 – Pattern of function  $\psi_1(t)$ .

previous Section, since the values of  $\bar{X}_i$ ,  $i=1,2,3$  do not change if the same arbitrary constant is added to all  $\varphi_i(X_i^*T)$ , the values of  $\varphi_i(X_i^*T)$ , and thus also of  $\psi_i(t)$ , are not meaningful, whereas their differences are. For a better understanding of the curves in figure 5, their values have been increased by 50 with respect to those given by Eqs. (14).

Recalling what has been presented in Section 2, it seems safe to conclude that the high values of the angular coefficients of  $\varphi_i(X_i^*T)$  indicate that for wagonload rail transport a decrease in the cost functions and an increase in the cost

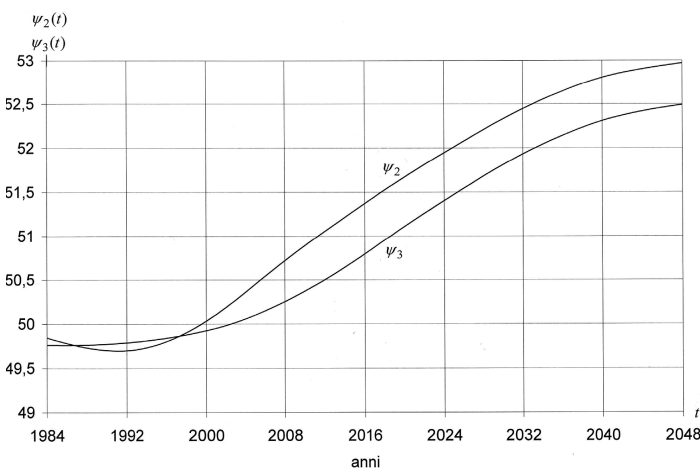


Fig. 7 – Andamento delle funzioni  $\psi_2(t)$  e  $\psi_3(t)$ .

Fig. 7 – Pattern of functions  $\psi_2(t)$  and  $\psi_3(t)$ .

riori a quelli relativi agli altri due modi di trasporto, in particolare nella parte iniziale delle traiettorie, e ciò nonostante l'aliquota di domanda sulla ferrovia a carro completo è stata maggiore di quella su strada e sul trasporto intermodale fino al 2000. Questo risultato è dovuto al fatto che, ai tempi in cui il trasporto stradale e quello intermodale hanno cominciato ad affermarsi, la domanda di trasporto delle merci utilizzava esclusivamente il trasporto ferroviario a carro completo, e gran parte di essa ha continuato ad utilizzarlo ancora per lungo tempo nonostante gli utenti percepissero che fosse più costoso degli altri due modi, a causa del ritardo con cui, per i motivi illustrati nella Sezione 1, avviene il trasferimento da un modo di trasporto ad un altro percepito come più conveniente. Infatti il valore di  $\beta=0.042$  indica che annualmente, nel periodo di tempo considerato, solo il 4.2% della domanda che utilizzava il trasporto a carro completo, e che avrebbe avuto convenienza ad usare un altro modo di trasporto, si è spostata su quest'ultimo.

La traiettoria di  $\psi_2(t)$  si mantiene in un primo tratto al di sotto di quella di  $\psi_3(t)$ , quindi a partire circa dal 2000 sia il valore che la derivata di  $\psi_2(t)$  superano quelli di  $\psi_3(t)$ : ciò significa che intorno al 2000 gli utenti hanno iniziato a percepire che il costo del trasporto stradale superava quello del trasporto intermodale e cresceva più rapidamente. Questo fatto è da attribuire in parte ai fenomeni di congestione causati dalla decisione di non costruire un secondo foro per la galleria del Gottardo, in parte alla tassa imposta sul traffico pesante. E' cioè una conseguenza della politica della Confederazione Elvetica di tenere sotto controllo il traffico stradale delle merci. L'aumento nel tempo di  $\psi_3(t)$  è una conseguenza dei fenomeni di congestione dovuti all'aumento di domanda sul trasporto intermodale.

L'evoluzione futura ora descritta, sia dei costi che della ripartizione modale, è il risultato della conoscenza del parametro  $\beta$  e delle funzioni di costo dinamiche, cioè delle caratteristiche dinamiche del sistema, ricavate dallo studio della ripartizione modale durante un lungo precedente periodo di tempo. Se nel futuro la tecnologia e/o l'organizzazione dei modi di trasporto si modificassero, così da causare una sostanziale variazione delle attuali caratteristiche dinamiche, la futura evoluzione dei costi e della ripartizione modale sarebbe diversa da quella precedentemente stimata, e potrebbe essere conosciuta solo procedendo alla valutazione delle nuove caratteristiche dinamiche del sistema.

## 5. Conclusioni

L'evoluzione della ripartizione modale del trasporto delle merci attraverso le Alpi Svizzere è un caso molto interessante per studiare la dinamica di un sistema di trasporto delle merci, perché nell'ultimo trentennio si è verificata una straordinaria evoluzione nella ripartizione della domanda fra i tre modi di trasporto che attraversano le Alpi Svizzere, insieme con un notevole incremento del

dispersion occurred, along with a decrease over time in the transport demand. This is a consequence of the behaviour of the rail companies, which, as highlighted in Section 1, have sought to improve the organization of wagonload services, giving rise to modifications in the distribution of transport costs within the user population, some of whom perceive much higher costs than previously, and thus tend to use a different transport mode, while others perceive a much lower cost. The result is a decrease over time in the proportion of wagonload users, along with a decrease in the cost functions of this transport mode. Conversely, the low values of the angular coefficients of  $\varphi_2(X_2^*T)$  and  $\varphi_3(X_3^*T)$  show that the decrease in the cost functions and the increase in the cost dispersion were accompanied by an increase in demand for mode 2 and mode 3.

Figure 6 shows the trajectory of the sequence of values  $\psi_1(t)$  in the years from 1984 to 2011, while figure 7 shows the corresponding trajectories for functions  $\psi_2(t)$  and  $\psi_3(t)$ .

The trajectory of  $\psi_1(t)$  is monotonically decreasing, tending to the asymptotic value 55.037; the trajectory of  $\psi_2(t)$  decreases slightly for a very short stretch, then increases monotonically as far as an asymptotic value of 53.512, while that of  $\psi_3(t)$  is consistently monotonically increasing as far as the asymptotic value of 52.740. Note that the values of  $\psi_1(t)$  are considerably greater than those of  $\psi_2(t)$  and  $\psi_3(t)$ . As  $\alpha$  is the same for all three transport modes, this means that the costs of wagonload rail transport are considerably greater than those of the other two modes, particularly in the initial part of the trajectories, despite the demand fraction for wagonload rail transport being greater than for road haulage and intermodal transport up to the year 2000. This result is due to the fact that at the time road haulage and intermodal transport were beginning to be successful, freight demand was using exclusively wagonload rail transport, and a considerable proportion of such demand has continued to do so, despite users perceiving it to be costlier than the other two modes. This is consequence of the delay with which users switch from one transport mode to another deemed more suitable, as discussed in Section 1. Indeed, the value  $\beta=0.042$  shows that, in the overall time period under exam, only 4.2% of the demand that used wagonload rail transport and would have found it advantageous to change to another mode, actually did switch to it each year.

In a first stretch, the trajectory of  $\psi_2(t)$  remains below that of  $\psi_3(t)$ , then from 2000, both the values and the derivatives of  $\psi_2(t)$  exceed those of  $\psi_3(t)$ : this means that around the year 2000 users began to perceive that the cost of road haulage exceeded that of intermodal transport and was rising more quickly. This fact can likely be attributed, in part, to the congestion phenomena caused by the decision not to build the second Gotthard tunnel, and in part to the tax imposed on road freight traffic. It is therefore a consequence of the policy decisions of the Swiss Confederation to curb freight road traffic. The increase over time at  $\psi_3(t)$  is a consequence of the congestion phenomena due to the increase in demand for intermodal transport.

volume di traffico complessivo. Questa evoluzione è il risultato delle trasformazioni tecnologiche ed organizzative dei tre modi di trasporto, e del modo con cui gli utenti hanno percepito e valutato gli effetti di queste trasformazioni.

Per studiare l'evoluzione nel tempo della ripartizione modale del trasporto delle merci attraverso le Alpi Svizzere, in questo articolo è stato proposto un modello, il quale parte dalla considerazione che la definizione della dinamica di un sistema di trasporto plurimodale richiede la conoscenza della evoluzione del sistema durante una sequenza  $\Sigma$  di tempi  $t$ , in ciascuno dei quali è nota la frazione di domanda che usa ciascun modo di trasporto. Il modello assume che le caratteristiche dinamiche fondamentali di un sistema di trasporto plurimodale sono: a) le funzioni di costo dinamiche  $\varphi_i$ , cioè le relazioni, per ciascun modo di trasporto  $i$ , fra costo mediamente percepito dagli utenti e domanda di trasporto nei vari tempi della sequenza  $\Sigma$ ; b) l'aliquota  $\beta$  degli utenti che avrebbero convenienza a cambiare modo di trasporto, i quali si trasferiscono sul modo più conveniente nell'unità di tempo. Viene quindi costruita una mappa, di cui vengono stimati i parametri, la quale fornisce l'evoluzione nel tempo della domanda su ciascun modo di trasporto.

L'applicazione del modello allo studio della evoluzione della ripartizione modale delle merci attraverso le Alpi Svizzere, considerando una sequenza  $\Sigma$  di 28 anni, dal 1984 al 2011 ha prodotto i seguenti risultati:

a) Il costo del trasporto ferroviario a carro completo nella parte iniziale della sequenza  $\Sigma$  è notevolmente superiore a quello degli altri due modi di trasporto, e ciò nonostante la frazione di domanda che lo utilizza è anch'essa molto più alta di quella degli altri due modi. Questo apparente paradosso è dovuto al fatto che, ai tempi in cui il trasporto stradale e quello intermodale hanno cominciato ad affermarsi, la domanda di trasporto delle merci utilizzava esclusivamente il trasporto ferroviario a carro completo, e gran parte di essa ha continuato ad utilizzarlo ancora per lungo tempo, nonostante che gli utenti percepissero che fosse molto più costoso degli altri due modi, a causa del ritardo con cui essi si spostano da un modo di trasporto ad un altro percepito come più conveniente. Infatti il modello ha calcolato che mediamente in un anno solo il 4.2% della domanda che utilizzava il trasporto ferroviario a carro completo, e che avrebbe avuto convenienza ad usare un altro modo di trasporto, si è spostata su quest'ultimo nel corso della sequenza temporale  $\Sigma$ .

b) Il costo del trasporto ferroviario a carro completo è andato diminuendo notevolmente nel corso della sequenza  $\Sigma$ , insieme con un aumento della dispersione dei costi ed una diminuzione della proporzione del volume di traffico su questo modo di trasporto. Questo è una conseguenza del comportamento delle Aziende ferroviarie le quali tendono a migliorare l'organizzazione del trasporto a carro completo dando luogo ad una modifica della di-

*The resulting evolution of both costs and modal split is based on our knowledge of the dynamic characteristics of the system, in particular, parameter  $\beta$  and the dynamic cost functions, estimated via the modal split analysis regarding a long time period in the past. If in the future the technology and/or the organization of the transport modes change, so as to cause a variation in their dynamic characteristics, the future evolution of both costs and modal split will be different from those previously estimated, and can be determined only by evaluating the new dynamic characteristics.*

## 5. Conclusions

*The evolution of freight transport modal split through the Swiss Alps is a very interesting case study for understanding the dynamics of freight transport. Indeed, apart from a considerable increase in the total freight traffic volume, an extraordinary evolution has occurred over the last thirty years in the demand split among the three transport modes passing through the Swiss Alps. Such evolution is the result of the technological and organizational changes implemented on the three transport modes, as well as the way in which users have perceived, evaluated and acted upon the effects of these changes.*

*With the aim of studying the evolution over time of the freight transport modal split through the Swiss Alps, this paper has presented a model whose point of departure is that definition of the dynamics of a multimodal transport system requires knowing the system's evolution during a sequence  $\Sigma$  of times  $t$ , specifically, knowing the fraction of demand that uses each transport mode at each time  $t$ . The model assumes that the fundamental dynamic characteristics of any multimodal transport system are: a) the dynamic cost functions,  $\varphi_i$ , that is to say, the relations between the costs perceived on average by users and the transport demand at various times in sequence  $\Sigma$  for each transport mode  $i$ ; b) the fraction  $\beta$  of users for whom changing transport mode would be advantageous who actually do shift to a more suitable transport mode per unit time. A map whose parameters are estimated is then defined, which furnishes the evolution over time of the demand for each transport mode. Application of the model to the evolution of freight modal split through the Swiss Alps, considering a sequence  $\Sigma$  of 28 years, from 1984 to 2011, has furnished the following results:*

*a) In the early part of sequence  $\Sigma$ , the costs associated to wagonload rail transport are much higher than those of the other two transport modes; despite this, the fraction of demand is also much higher than the other two modes. This is due to the fact that, at the time when road haulage and intermodal transport were beginning to become successful, freight demand used solely wagonload rail transport, and a large part of these users continued to use it, despite their perceiving the associated costs to be greater than the other two modes. This apparent paradox is a consequence of the delay with which users switch from one transport mode to another deemed more suitable. Indeed,*



istribuzione dei costi di trasporto nella popolazione degli utenti, alcuni dei quali percepiscono un costo alquanto superiore rispetto al passato, e tendono quindi ad utilizzare un diverso modo di trasporto, mentre altri percepiscono un costo notevolmente inferiore. Il risultato è una diminuzione nel tempo della proporzione di utenti del trasporto a carro completo, accompagnato da una diminuzione delle funzioni di costo di questo modo di trasporto.

c) Il costo sia del trasporto stradale che di quello intermodale si è sempre mantenuto al di sotto di quello del trasporto ferroviario a carro completo. Nei primi anni della sequenza  $\Sigma$  il costo del trasporto stradale è stato inferiore a quello del trasporto intermodale, quindi a partire dall'anno 2000 lo ha superato e lo scarto fra i due costi è andato aumentando nel tempo. Ciò significa che intorno al 2000 gli utenti hanno iniziato a percepire che il costo del trasporto stradale superava quello del trasporto intermodale e cresceva più rapidamente. Questo fatto è da attribuire in parte ai fenomeni di congestione stradale causati dalla decisione di non costruire un secondo foro per la galleria del Gottardo, in parte alla tassa sul traffico pesante imposta in Svizzera a partire dal 2001. E' cioè una conseguenza della politica della Confederazione Elvetica di mantenere sotto controllo il traffico stradale delle merci.

d) L'aliquota di domanda che utilizza il trasporto ferroviario a carro completo è andata diminuendo durante l'intera sequenza temporale  $\Sigma$ , ed il modello stima che la diminuzione proseguirà anche nel futuro, con un valore asintotico uguale a 0.059, nettamente inferiore al valore iniziale della sequenza  $\Sigma$ , uguale a 0.659.

e) L'evoluzione della aliquota di domanda sul trasporto stradale calcolata dal modello ha un andamento monotonicamente crescente fino a raggiungere nell'anno 2012 un valore molto prossimo al valore asintotico 0.361, alquanto più alto del valore iniziale della sequenza  $\Sigma$ , uguale a 0.144. L'andamento della aliquota di domanda sul trasporto intermodale è monotonicamente crescente fino al valore asintotico 0.580, notevolmente superiore al valore iniziale della sequenza  $\Sigma$ , uguale a 0.197.

Quindi, se le caratteristiche dinamiche del sistema ricavate dal modello attraverso l'analisi della evoluzione della ripartizione modale durante la sequenza temporale  $\Sigma$  rimanessero sostanzialmente inalterate nel futuro, nei prossimi anni è da prevedere una ulteriore consistente diminuzione della frazione di domanda sulla ferrovia a carro completo, un consistente aumento di quella trasportata dal trasporto intermodale, mentre quella che utilizza il trasporto stradale non dovrebbe subire sostanziali variazioni.

L'evoluzione futura così prevista è il risultato della conoscenza del parametro  $\beta$  e delle funzioni di costo dinamiche, cioè delle caratteristiche dinamiche del sistema, ricavate dallo studio della ripartizione modale durante un lungo precedente periodo di tempo. Se nel fu-

the model has calculated that of the demand that was employing wagonload rail transport and would have found it advantageous to use another transport mode, each year only 4.2% on average actually switched to the latter during sequence  $\Sigma$ .

b) During sequence  $\Sigma$  the cost of wagonload transport has been decreasing substantially, while the associated costs dispersion has increased and the proportion of traffic volume has decreased. This a consequence of the behaviour of rail companies, which have improved the organization of wagonload transport resulting in a modification of the costs distribution amongst the user population in such a way that some users perceive quite higher costs than previously, and thus tend to use another transport mode, while others perceive considerably lower costs. The result is a decrease over time in the proportion of wagonload transport users, along with a decrease in the cost functions of this transport mode.

c) The costs associated to both road haulage and intermodal transport have remained consistently below those of wagonload rail transport. In the first years of sequence  $\Sigma$  the cost of road haulage was lower than intermodal transport's. Then, in 2000, the cost of road haulage surpassed that of intermodal transport and the cost difference between the two modes has been increasing ever since. This means that around the year 2000 users began to perceive that the cost of road haulage exceeded that of intermodal transport and was also rising more quickly. This fact can be attributed in part to the congestion caused by the decision not to build the second Gotthard tunnel, and in part to the Swiss tax imposed on road freight traffic starting in 2001, both of which were consequences of policy decisions of the Swiss Confederation to contain road freight traffic.

d) The proportion of demand using wagonload rail transport has been decreasing throughout the entire sequence  $\Sigma$ , and the model estimates that this decrease will continue in the future, with an asymptotic value of 0.059, decidedly lower than the initial value of 0.659.

e) The evolution of the demand proportion for road haulage estimated by the model is monotonically increasing up to the year 2000, when a value very close to the asymptotic value of 0.361 is reached, quite a bit higher than the initial value of 0.144. The demand proportion of intermodal transport is monotonically increasing as far as the asymptotic value 0.580, which is markedly greater than the initial value of 0.197.

Thus, if the dynamic characteristics estimated by the model through the analysis of the evolution of the modal split over the time sequence  $\Sigma$  remain substantially unchanged in coming years, we can foresee further considerable decreases in the demand fraction for wagonload rail transport, and a substantial increase in that carried by intermodal transport, with no substantial variation for the road haulage fraction.

The evolution thusly estimated relies on knowledge of parameter  $\beta$  and the dynamic cost functions, that is, the

turo la tecnologia e l'organizzazione dei modi di trasporto si modificassero, così da causare una sostanziale variazione delle attuali caratteristiche dinamiche, la futura evoluzione dei costi e della ripartizione modale sarebbe evidentemente diversa da quella precedentemente stimata, e potrebbe essere conosciuta solo procedendo alla valutazione delle nuove caratteristiche dinamiche del sistema.

*dynamic characteristics of the system obtained by studying the evolution of the modal split during an extended period of past time. If in coming years the technology and/or organization of the transport mode were to be modified, the future evolution of the costs and the modal split would be quite different from that estimated herein, and could be determined only by evaluating the new dynamic characteristics.*

## BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] ABDELWAHAB W. and SARGIOUS M. (1992), "Modelling the demand for freight transport", *Journal of Transport Economics and Policy*, 49-70.
- [2] ALPINFO (1984-2011), "Traffico merci attraverso le Alpi".
- [3] CASCETTA E. (2001), "Transportation System Engineering: Theory and MethodS", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- [4] DATEC: Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (2011), "Rapporto sul trasferimento del traffico".
- [5] DE JONG G. and BEN-AKIVA M. (2007), "A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice", *Transpn. Res. B* 41, 950-965.
- [6] European Commission (2001), "A study of single wagonload rail traffic", Symonds Group Ltd, East Grinstead, U.K.
- [7] EUROSTAT Statistics (1991-2009), <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/>
- [8] FERRARI P. (2002), "Road network toll pricing and social welfare", *Transpn. Res. B* 36, 471-483.
- [9] HUPAC (2008), "40 years Hupac: 1967-2007", From road to rail, [www.hupac.ch/downdoc](http://www.hupac.ch/downdoc)
- [10] NELDER J. A. and MEAD R. (1965), "A simplex method for function minimization", *Computer Journal* IV, 308-313.
- [11] NOROJONO O. and JOUNG W. (2003), "A stated preference freight mode choice model", *Transportation Planning and Technology* 26, 195-212.
- [12] NUZZOLO A. and RUSSO F. (1995), "A disaggregate freight modal choice model", *Proceedings of the 7<sup>th</sup> WCTR*, .
- [13] RUSSO F. (2005), "Sistemi di trasporto merci", Franco Angeli, Milano.
- [14] USTE: Ufficio Federale dello Sviluppo Territoriale (2001). "Attraverso le Alpi", Berna.
- [15] WINSTON C. (1983), "The demand for freight transportation: models and applications", *Transpn. Res. A*, 419-427.
- [16] WOODBURN A.G. (2003), "A logistical perspective on the potential for modal shift of freight from road to rail in Great Britain", *International Journal of Transport Management* 1, 237-245.

### Sommaire

#### LE TRANSPORT DES MARCHANDISES À TRAVERS LES ALPES SUISSES: ÉVOLUTION PRÉVISIBLE AVEC UN NOUVEAU MODÈLE DE RÉPARTITION MODALE

Cet article présente un modèle dynamique de répartition modale de la demande dans un système plurimodal de transport des marchandises. Ce modèle a été élaboré pour étudier l'évolution du transport des marchandises à travers les Alpes Suisses, et qui est caractérisé dans les dernières décennies par des profondes transformations technologiques et autant de profondes modifications de la répartition modale entre chemin de fer et char complet, transport routier et transport intermodal. Pour connaître les caractéristiques dynamiques du système ce modèle prend en examen une séquence d'époques, étant bien connue dans chacune desquelles la demande relative à chaque moyen de transport. Un plan est donc mis à point, du quel on estime les paramètres, et qui fournit l'évolution dans le temps de la demande relative à chacun des moyen de transport. En utilisant les séquences des valeurs de la demande sur trois moyen de transport à travers les Alpes Suisses dans les années entre 1984 et 2011 le modèle a permis de connaître l'évolution des coûts de transport sur chacun des trois moyens dans cette intervalle temporelle, et de prévoir l'évolution de la répartition modale dans les années futures, dans l'hypothèse que les caractéristiques dynamiques du système ne subissent pas des modifications substantielles.

### Zusammenfassung

#### GÜTERVERKEHR DURCH SCHWEIZERISCHEN ALPEN

Es wird ein numerisches Modell der Modalverteilung entwickelt, das die Nachfrage an Güterverkehr in einem mehrmodalen System erfasst. Die Forschungsbestrebung war der Güterverkehrsverlauf durch die schweizerischen Alpen, der während der letzten Jahrzehnten hervorragende Veränderungen im Feld der Technik und der Modalverteilung zwischen Straßen und Bahnen beweist hat.

Das Modell erfasst eine Reihe von Zeitabschnitten, in denen die Nachfrage für jedes Verkehrssystem bekannt ist. Es wird damit ein rechnerischer Plan gearbeitet, der den Entwicklungsverlauf für jedes Transports typ aufweist. Für den Zeitabschnitt 1984-2011 wurden damit die Transportkosten berechnet und dazu die Modalverteilungen der nächsten Jahren; was aber zur Annahme von keiner wesentlichen Veränderung der System Merkmalen untersteht.

