



## La localizzazione dei terminali per il trasporto combinato strada-ferrovia: un'applicazione dei modelli di *facility location* e di *optimal location*

### Locating combined road-railway transport terminals: an application for *facility location* and *optimal location* models

Dott. Ingg. Cristiana PICCIONI(\*), Federico ANTONIAZZI(\*\*), Prof. Ing. Antonio MUSSO(\*)

**SOMMARIO** – Il presente articolo affronta lo studio della localizzazione dei terminali per il trasporto intermodale, sia in relazione alla domanda potenziale che alla configurazione della rete distributiva. In particolare, vengono dapprima presentate alcune metodologie esistenti ed ormai consolidate che affrontano l'analisi degli aspetti localizzativi degli impianti a servizio dell'intermodalità. Tra queste il modello di Weber, la teoria delle aree di mercato ed il modello di *facility location* permettono di valutare la localizzazione ottimale rispetto alla domanda potenziale; il modello di *optimal location* consente, invece, di progettare una rete *hub and spoke* dedicata al trasporto combinato realizzando importanti economie di scala. A conclusione della trattazione teorica viene proposta un'applicazione dei modelli di *facility location* ed *optimal location*, la cui area di studio include i terminali italiani intermodali compresi nell'area di influenza del Corridoio V della rete di trasporto TEN-T.

#### 1. Premessa

Il processo di globalizzazione che negli ultimi anni ha investito i mercati economici internazionali, ha inevitabilmente coinvolto l'industria del trasporto delle merci il cui ruolo, all'interno dell'intero sistema logistico-produttivo, è significativo ai fini della definizione del costo finale e, conseguentemente, del prezzo di vendita del bene prodotto. In tale contesto, infatti, il raggiungimento delle economie di scala nei differenti settori della produzione industriale - verosimilmente attribuibile allo sviluppo dell'automazione nelle singole fasi di processo e ad una più efficace specializzazione e parcellizzazione della forza lavoro - ha indotto a ricercare opportune economie nell'erogazione dei servizi di logistica distributiva; tutto questo al fine di garantire la copertura di aree di merca-

**SUMMARY** - The paper focuses on the analysis of the intermodal freight terminals location according to the potential transport demand as well as the distribution network structure. In this context, the main methodologies and models dealing with the facilities location problem are presented. In particular, the Weber model, the market areas theory and the *facility location* model allow to evaluate the best location according to potential demand; moreover, the *optimal location* model allows to design a *hub and spoke* network, dedicated to the combined transport, reaching important economies of scale. Finally, an application of both the *facility location* and *optimal location* models, related to the Italian intermodal freight terminals included in the influence area of the TEN-T network Corridor V, is carried out.

#### 1. Foreword

The globalisation process, which in recent years has involved international economic markets, has inevitably also affected the freight transport industry whose role within the whole logistic-manufacturing system is significant in terms of defining the final cost and, consequently, the final selling price of goods. In such a scenario, in fact, achieving economies of scale in different sectors of industrial manufacturing - reasonably due to the development of the automation of single phases of the process and to a more effective specialisation of the human resources - has led to a search for adequate economies of scale for what concern the distribution of logistics services, in order to guarantee coverage of increasingly broader market segments, compliant with pre-set levels of service and without compromising the entire distribution cycle's efficiency.

The pursuance of technical and economic efficiency in the provision of logistics services and freight transport requires "complex" (multimodal) cycles; such cycles call for the use of different modes of transport, each utilised within its own interval of economic efficiency (expressed in terms of time and costs). In the multimodal sequence, the transfer of goods from one mode of transport to another occurs with handling and possible transformation of

(\*) "Sapienza" Università di Roma, DITS - Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade.

(\*\*) "Sapienza" Università di Roma, DITS - Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade; Université Lumière Lyon 2 (LET); Réseau Ferré de France.

to sempre più estese, nel rispetto di prestabiliti livelli di servizio e senza compromettere l'efficienza dell'intero ciclo di distribuzione.

Il perseguimento dell'efficienza tecnica ed economica nella produzione di servizi di logistica e trasporto delle merci, richiede l'impiego di cicli "complessi" (plurimodali) che, nello spostamento Origine – Destinazione, presuppongono l'impiego di modalità differenti di trasporto, ognuna utilizzata all'interno del proprio intervallo di convenienza economica (espressa in termini di tempi e costi). Nella sequenza plurimodale il trasferimento di merce da una modalità di trasporto all'altra avviene con movimentazione ed eventuale trasformazione (rottura di carico) della merce. In tale contesto, il trasporto intermodale - la cui peculiarità è il trasferimento di Unità di Trasporto Intermodale (ad es. container, casse mobili o semirimorchi) tra differenti modalità di trasporto senza manipolazione della merce e quindi in assenza di rotture di carico - offre migliori prestazioni in termini di efficienza complessiva, considerando, cioè, gli aspetti economici [1] e prestazionali, nonché le minori esternalità ambientali [2] e sociali.

A tal proposito è, inoltre, interessante sottolineare come, in ambito trasportistico, il significato di efficienza stia assumendo negli anni connotazioni più complesse, che portano ad una maggiore sensibilizzazione verso i fattori che concorrono a determinare le esternalità negative derivanti dal trasporto (incidentalità, inquinamento ambientale ed acustico, congestione e contributo all'effetto serra) e la cui effettiva valutazione permetterebbe di stimare, con maggiore realistica, i costi totali del trasporto. In tale ambito, il trasporto ferroviario, in un'ottica di ottimizzazione dei carichi sia a peso che a volume, oltre a consentire di trasportare a costi unitari inferiori comporta un minore impatto ambientale in termini di consumi energetici ed emissioni inquinanti; ecco quindi che, non solo in relazione agli aspetti economici ma anche ai fini della sostenibilità ambientale e sociale del trasporto, l'impiego del trasporto combinato strada-ferrovia, nel quale la copertura della tratta primaria è affidata alla modalità su ferro, offre concrete opportunità di sviluppo, in termini di competitività, dell'intermodalità terrestre rispetto al trasporto tutto-strada.

Nonostante tali premesse, le fonti statistiche [3] evidenziano come, a scala europea, il trasporto delle merci venga effettuato prevalentemente con la modalità stradale, la cui quota parte rappresenta circa il 77% delle tonnellate-km<sup>(1)</sup> complessivamente trasportate all'interno dell'Unione Europea (Eurostat, 2008). Analogamente, anche nei

goods (load breakdown). In such a context, intermodal transport - whose distinctive feature is the transfer of Intermodal Transport Units (e.g. containers, swap bodies or semi-trailers) between different modes of transport without manipulation of goods and in absence of any load breakdown - provides better performance in terms of overall efficiency when considering, in other words, the economical [1] and performance aspects as well as the lower environmental [2] and social impacts.

With regards to this aspect, it is also interesting to underline how, in transportation sector, efficiency has acquired more complex meanings which have led to a greater awareness of factors contributing to the negative external impacts of transport (accidentality, environmental pollution, congestion and contribution to the greenhouse effect); the effective evaluation of such externalities would allow a more realistic estimation of the total costs of transport. In this context, railway transport, in terms of optimising loads by both weight and volume, allows transport at lower unit costs, also implying lower environmental impacts in terms of energy consumption and polluting emissions. Consequently, the use of combined road-railway transport, where the primary segment is covered by railway, offers real development opportunities, in terms of intermodal competition compared to all-road transport, not only from an economical perspective but also from the environmental and social sustainability point of view.

Nevertheless, statistical evidence [3] shows how, on a European scale, goods are predominantly transported by road, with approximately a 77% incidence of tonnage-km<sup>(1)</sup> transported across the European Union (Eurostat, 2008). Similarly, combined road-railway transport plays a marginal role within domestic markets; in Italy, freight transport by railway, of which 40% of tonnage and tonnage-km are produced by combined transport [4], represents 11,6% of the total transfer of goods (tonnage-km); in France 15%, whilst in Germany it reaches approximately 22%. A simple comparison of data between Italy and Northern Europe is however of little significance also because in the latter, a volume of intermodal transport also travels through waterways<sup>(2)</sup> (in Germany 12,4%, in France 3,4%) [5].

A plausible explanation for the resistance towards ground intermodality is due to the fact that it is not possi-

<sup>(1)</sup> Si sottolinea il fatto che, sebbene la maggior parte delle statistiche sul traffico merci utilizzi tale unità di misura, quest'ultima presenta il limite di non essere particolarmente descrittiva dal punto di vista economico. Ad es., il costo del trasporto di un carico da 25 t con un autoarticolato che viaggia su un percorso di 1000 km non è comparabile con il costo del trasporto di 1000 spedizioni, ognuna di 250 kg, effettuate con 1000 veicoli commerciali leggeri lungo uno spostamento di 100 km. In entrambi i casi, però, le t-km trasportate risultano uguali.

<sup>(1)</sup> It should be noted that despite the fact that the majority of statistics on goods transport traffic uses such unit of measure, it has the limit of not being particularly descriptive from an economical point of view. For example, the cost of transporting a 25 ton load with an articulated lorry travelling over a 1,000 km route is not comparable with the cost of transporting 1,000 shipments, 250 kg each, with 1,000 commercial light vehicles over a 100 km distance. In both cases however, the tonnage/km is the same.

<sup>(2)</sup> In Italy, the Po-Veneto waterway network, with a commercial length of 564 km, carries commodity traffic flows not exceeding 0.1 % (source: *Internal Regional Navigation Agency*).

mercati interni il ruolo del trasporto combinato ferro-gomma è pressoché marginale; in Italia il trasporto delle merci su ferrovia, di cui circa il 40% delle tonnellate e delle tonnellate-km prodotte è relativo al trasporto combinato [4], rappresenta l'11,6% della totalità del "lavoro di trasferimento" (tonnellate-km) compiuto. In Francia la relativa quota è pari al 15% mentre in Germania si attesta intorno al 22%. Il mero confronto dei dati relativi all'Italia con quelli dei paesi del Nord Europa è comunque poco significativo anche in ragione del fatto che, in questi ultimi, una quota parte della intermodalità è realizzata anche attraverso la modalità fluviale<sup>(2)</sup> (in Germania è il 12,4%, in Francia il 3,4% [5]).

Una spiegazione plausibile circa la resistenza allo sviluppo dell'intermodalità terrestre risiede nella impossibilità di prescindere da una serie di politiche ed interventi di tipo infrastrutturale ed organizzativo. Tali elementi, infatti, solo se pianificati e progettati in ottica sistemica [6], sono in grado di supportare il funzionamento del sistema distributivo intermodale ed offrire, quindi, una concreta alternativa all'esclusiva modalità stradale, in relazione a:

- *tempo di ciclo*, in termini di intervallo temporale tra presa e consegna della merce, considerando anche i tempi necessari al trasbordo;
- *puntualità*, in termini di rispetto dei tempi nella presa e nella consegna al cliente (intermedio o finale);
- *livello di servizio*, in termini di erogazione del servizio nel rispetto del livello di qualità atteso dal cliente e, quindi, degli impegni contrattuali siglati.

Nell'ambito degli interventi di natura strategica a supporto del trasporto intermodale delle merci, la localizzazione dei terminali intermodali costituisce un elemento chiave per la definizione e lo sviluppo delle dinamiche del mercato del trasporto e della distribuzione delle merci. Tali nodi, infatti, pur rappresentando dei punti di discontinuità della rete infrastrutturale, se ben distribuiti sul territorio di riferimento (in termini di densità e gerarchia) e progettati con opportuni layout e requisiti funzionali, consentono di incrementare l'efficienza dell'intera catena logistica e distributiva consentendo, inoltre, di realizzare attività a valore aggiunto (ad es. gestione e monitoraggio dei flussi merci sulla rete, movimentazione e trasporto delle merci ad elevata densità di valore, assemblaggio componenti, imballaggio, etc.).

Stante l'importanza di quanto finora sottolineato, il presente lavoro si propone di affrontare lo studio della localizzazione degli impianti per il trasporto intermodale, sia in relazione alla domanda potenziale che alla configurazione della rete distributiva.

<sup>(2)</sup> In Italia, la rete idrovia riva padano-veneta, la cui lunghezza ai fini commerciali è di 564 km, movimentata flussi di traffico merci di poco superiori allo 0,1 % (fonte: Agenzia Regionale Navigazione Interna).

ble to leave aside a series of infrastructural and organisational policies and interventions. Such elements, in fact, are capable of supporting the intermodal distribution system's functioning only if planned and designed in a systemic context [6] providing, thus, a real alternative to road transport dominance in relation to:

- *cycle time*, in terms of the time slot between goods collection and delivery, also considering the necessary time for transshipment;
- *punctuality*, in terms of respecting times for collection and delivery to the final or intermediate customer;
- *level of service*, in terms of provision of service respecting customer quality expectation levels and, therefore, subscribed contractual obligations.

In the context of strategic interventions in support of freight intermodal transport, location of dedicated terminals is a key element for defining and developing the dynamics of the transport and goods distribution market. Such nodes, in fact, whilst representing points of discontinuity in the infrastructure network, if well distributed across the territory (in terms of density and hierarchy) and designed with suitable layouts and according to functional requirements, allow increases in efficiency to the entire logistics chain, also prompting value added activities (e.g. management and monitoring of the goods flow over the network, handling and transport of goods with a high density value, components assembly, packaging etc.).

Given the importance of what underlined up to this point, this paper focuses on the study of intermodal transport terminal location, both in terms of the potential demand and of the distribution network configuration.

In particular, an overview of existing and already consolidated methodologies focusing on the analysis of intermodal facility location issues is firstly presented. On the one hand, the Weber model, the theory of market areas and the *facility location* model allow assessing optimal location in relation to potential demand within the considered catchment area. The *optimal location* model allows, on the other hand, designing a *hub and spoke* network dedicated to combined transport, also achieving substantial economies of scale. Finally, to complete the theoretical discussion, an application for the *facility location* and *optimal location* models is proposed where the focus is on the Italian intermodal terminals belonging to Corridor V of the TEN-T network (see. EC, *TEN-T priority axes and projects*, 2005).

## 2. Location of Intermodal terminals

The construction of intermodal centres (terminals, logistics platforms, freight villages, etc.) necessarily assumes a "consumption" of resources. Among these, the most important ones, as the land resources, increase according to the planned different functional areas and, therefore, to the entire structure complexity. With regards

In particolare, viene dapprima presentata una rassegna delle metodologie esistenti ed ormai consolidate che affrontano l'analisi degli aspetti localizzativi degli impianti a servizio dell'intermodalità. Tra queste il modello di Weber, la teoria delle aree di mercato ed il modello di *facility location* permettono di valutare la localizzazione ottimale rispetto alla domanda potenziale nel bacino in esame; il modello di *optimal location* consente, invece, di progettare una rete *hub and spoke* dedicata al trasporto combinato realizzando importanti economie di scala. A complemento della trattazione teorica viene, infine, proposta un'applicazione dei modelli di *facility location* ed *optimal location*, la cui area di studio comprende i terminal italiani intermodali interessati dalla realizzazione del Corridoio V della rete TEN-T (cfr. EC, *TEN-T priority axes and projects*, 2005).

## 2. La localizzazione dei terminali intermodali

La realizzazione di poli intermodali (terminali, piattaforme logistiche, interporti, etc.) presuppone, necessariamente, un "consumo" di risorse, prime fra tutte quelle territoriali, la cui entità aumenta in funzione delle differenti aree funzionali previste per l'opera in progetto e, quindi, della complessità dell'intera struttura. A tal proposito si consideri ad esempio l'interporto – concetto tipicamente italiano (Legge 240/1990) del quale si è trovato successivamente riscontro nella terminologia internazionale di settore [7] – che oltre a svolgere funzione di nodo di interscambio, può ospitare servizi tecnici ed amministrativi oltre alle sedi delle imprese operanti nel trasporto combinato, e per la cui realizzazione è richiesta una superficie indicativa dell'ordine dei 500.000 m<sup>2</sup>, ben maggiore di quanto necessario per un centro merci o un terminal intermodale<sup>(3)</sup>.

A prescindere dalla tipologia dell'opera di progetto, l'inserimento di un impianto intermodale produce comunque molteplici impatti, sia sul territorio oggetto di intervento che sulle aree circostanti; tali impatti, in via del tutto schematica, possono essere ricondotti principalmente alle due classi seguenti:

- *ambientale*, in termini di inquinamento (atmosferico e idrico), rumore, interferenza paesaggistica, etc.;
- *trasportistico*, in termini di modifica della domanda di trasporto e di redistribuzione dei flussi di traffico sulla rete.

In riferimento a quest'ultimo aspetto, è importante sottolineare il fatto che la funzione svolta da un nodo intermodale va interpretata a diverse scale territoriali; l'ana-

lisi, freight villages for example – a typically Italian concept (Law 240/1990) which only recently found its translation within the international literature [7] – may host, besides a node interchange function, also technical and administration services in addition to the headquarters of companies operating in combined transport. But, for the development of such facility an approximate area of about 500,000 m<sup>2</sup> is required, much more than what is required for a hub or an intermodal terminal<sup>(3)</sup>.

Regardless of the nature of the designed facility, the inclusion of an intermodal one has multiple ways of impacting both on the intervention and on surrounding areas; such forms of impact can be briefly summarised into the following two main categories:

- *environmental*, in terms of pollution (atmospheric and water), noise, landscape intrusion, etc.;
- *transportation*, in terms of the transport demand alteration and the redistribution of traffic flow on the network.

With reference to the latter, it is important to underline that an intermodal node's function should be interpreted on several territorial scales; the analysis conducted on a national or regional level, in fact, allows to highlight the role played by a terminal as a node for attracting and distributing the flows of goods as well as an interchange for traffic flows in favour of railways. At a local level, however, the presence of a facility for combined transport induces a growth in traffic volumes on the secondary network links (at origin and destination) or over the infrastructure roadways which connect the intermodal centres to load origin and destination points (factories, warehouses, depots etc.).

On a planning level, the effect on a local scale cannot be ignored as it defines the degree of accessibility to nodes and, therefore, to the intermodal services, significantly affecting not only time and costs of accessing the intermodal network, but also the efficiency of the entire combined transport cycle. With regards to the latter, it should be recalled how numerous protests against intermodal node projects resulted from the lack of design and construction of dedicated access roads; an example is the Segrate terminal, constructed in 1990 and yet in function only since 2002, following the development of a local roadway system by the boroughs of Milan and Segrate. Viceversa, the good level of territorial accessibility of some intermodal terminals contributes to making combined transport more efficient, removing important quotas of long distance heavy traffic from the main road arteries; in case of the Busto Arsizio terminal, for example, such quo-

<sup>(3)</sup> In realtà non esistono indicazioni specifiche desumibili dalla letteratura di settore [8]; in riferimento al trasporto combinato, alcuni parametri infrastrutturali sono definiti in: UN/ECE (2010), *European Agreement on important international combined transport lines and related installations (AGTC)*, Geneva.

<sup>(3)</sup> In fact no specific indications exist which can be inferred from sector literature [8]; with reference to combined transport, some infrastructure parameters are defined in: UN/ECE (2010), *European Agreement on important international combined transport lines and related installations (AGTC)*, Geneva.

lisi condotta a livello nazionale o regionale, infatti, consente di evidenziare il ruolo svolto dal terminal in termini di polo attrattore e distributore dei flussi delle merci nonché di interscambio dei flussi di traffico veicolare a favore della ferrovia. A livello locale, invece, la presenza di un impianto per il trasporto combinato induce una crescita dei volumi di traffico veicolare sulle relazioni secondarie (iniziali e finali) della rete ovvero sulle infrastrutture varie che collegano i centri intermodali ai luoghi di origine e destinazione dei carichi (industrie, magazzini, depositi, etc.).

Ai fini pianificatori, l'effetto a scala locale rappresenta un aspetto non trascurabile poiché definisce il grado di accessibilità ai nodi e, quindi, ai servizi intermodali, condizionando in modo significativo non solo i tempi, ovvero i costi di accesso alla rete intermodale, ma anche l'efficienza dell'intero ciclo del trasporto combinato. A tal proposito si ricorda come numerose contestazioni a progetti di nodi intermodali siano derivate proprio dalla mancata progettazione e realizzazione di una viabilità d'accesso dedicata; un esempio al riguardo è il terminal di Segrate, realizzato nel 1990 ed entrato in funzione solo nel 2002, in seguito alla realizzazione di un sistema di viabilità locale attuato dai comuni di Milano e Segrate. Viceversa, il buon livello di accessibilità territoriale di alcuni terminal intermodali concorre a rendere più efficiente il trasporto combinato sottraendo alle principali direttrici viarie quote importanti di traffico pesante a lunga percorrenza; per il terminal di Busto Arsizio, ad esempio, tali quote sono dell'ordine di 240.000 veicoli/anno<sup>(4)</sup> [9].

Considerando, inoltre, che la realizzazione di un terminale intermodale persegue obiettivi di medio e lungo periodo, per i quali non è sempre possibile definire a priori le relazioni ferroviarie da attivare (soprattutto in un mercato europeo ampliato a 27 paesi e concorrenziale come quello attuale) risulta evidente la necessità di istituire un programma di pianificazione strategica che consideri, seppur nei limiti delle capacità previsionali, l'evoluzione delle dinamiche territoriali ed economiche. In tal senso un esempio di attenta pianificazione strategica è rappresentato dall'interporto Quadrante Europa di Verona, progettato dal Consorzio ZAI (Zona Agricolo-Industriale, costituito da Provincia, Comune e Camera di Commercio di Verona) ed approvato con Piano Particolareggiato dalla Regione Veneto. L'interporto (fig. 1), esteso su una superficie<sup>(5)</sup> di circa 2.500.000 m<sup>2</sup> e realizzato per fornire numerosi servizi logistici tradizionali ed a valore aggiunto, gode di un'ottima accessibilità, essendo direttamente collegato (attraverso un sistema di raccordi e strade complanari) alle due direttrici autostradali A22 del Brennero (Nord-Sud) ed A4 della Serenissima (Est-Ovest) ed all'omologo tracciato ferroviario (Brennero, Bologna, Milano, Venezia) nonché all'aeroporto Valerio Catullo di Verona [10].

tas are about 240,000 vehicles/year<sup>(4)</sup> [9].

Considering, in addition, that the development of an intermodal transport terminal pursues medium to long term objectives, for which it is not always possible to define in advance the railway connections to be activated (especially in a broad competitive market such as today's the 27 European market), the need to implement a strategic planning program which considers the evolution of territorial and economical dynamics is evident. Accordingly, an example of careful strategic planning is Verona's "Quadrante Europa", designed by the ZAI Consortium (an industrial-agricultural zone, belonging to the Province, Borough and Verona Chamber of Commerce) and approved according to a detailed plan of the Veneto Region. The freight village (fig. 1), which covers an area<sup>(5)</sup> of approximately 2,500,000 m<sup>2</sup> and developed to supply numerous types of conventional and value added logistics services, is characterised by excellent accessibility as it is directly connected (through a system of junctions and coplanar roads) to the two A22 Brenner (North-South) and A4 Serenissima (East-West) motorways and to the railway line (Brenner, Bologna, Milan, Venice) as well as Verona's "Valerio Catullo" airport [10].

In order to enhance the freight village's function also in terms of river and sea intermodality, a future link of the facility to the river-sea channel which runs from Milan towards Rovigo and reaching the East Po Region has been additionally planned; such a development will complete the wide range of distribution services offered by integrating all possible modal combinations.

Therefore, the assessment of terminal accessibility, as a function of the logistics and transport market's current and planned framework and following the evolution of territorial dynamics, becomes an essential criterion for careful planning of an intermodal network.

For this aim, operational research tools which allow optimal location over the network's graph through models and resolving algorithms and due considering certain objective functions are highly appropriate, meaning by a graph a suitable transport network scheme which uses selected nodes and link defined as relevant in the modelling process.

Following the identification of possible sites to be used as intermodal nodes, a system of connections among different terminals constituting the network graph is designed.

As previously underlined, for intermodal transport to be competitive it is essential to reduce total logistics costs, also providing competitive transit times, prices and performance (additionally in terms of *safety* and *security*)

<sup>(4)</sup> Transiti in ingresso/uscita (circa 400-500 veicoli/giorno).

<sup>(5)</sup> In un'ottica di medio-lungo periodo, è prevista l'espansione a 4,2 milioni di m<sup>2</sup> (fonte: Ferrovie dello Stato, ottobre 2009).

<sup>(4)</sup> In/out flow (approximately 400-500 vehicles /day).

<sup>(5)</sup> From a medium to long term perspective, an expansion to 4.2 million m<sup>2</sup> (source: "Ferrovie dello Stato", October 2009).





Fig. 1 - Accessibilità dell'Interporto Verona Quadrante Europa [10]. Accessibility of the Verona "Quadrante Europa" freight village [10].

Al fine di potenziare la funzionalità dell'interporto anche in termini di intermodalità fluviale e marittima, inoltre, previsto un futuro collegamento della struttura con il canale fluvio-marittimo che da Milano si snoda verso Rovigo arrivando al Po di Levante; una tale opera consentirà di completare il ventaglio di offerta distributiva integrando tutte le possibili combinazioni modali.

Si può, pertanto, affermare che la valutazione dell'accessibilità ai terminali, in funzione dell'assetto attuale e previsto del mercato della logistica e del trasporto ed in considerazione dell'evoluzione delle dinamiche territoriali, diviene un criterio imprescindibile per un'attenta pianificazione di un rete distributiva di tipo intermodale.

A tal fine ben si prestano gli strumenti propri della ricerca operativa, che attraverso modelli e algoritmi risolutivi e nel rispetto di determinate funzioni obiettivo, consentono di determinare localizzazioni ottimali sul grafo della rete, intendendo con grafo un'opportuna schematizzazione della rete di trasporto attraverso la rappresentazione di nodi ed archi rilevanti ai fini del processo di modellizzazione.

Dall'individuazione dei possibili siti da destinare a centro intermodale discende la progettazione di una siste-

compared to all-road transport.

In such a context, implementing a *hub and spoke* network for combined road-railway transport provides an interesting opportunity as it allows noticeable economies of scale by concentrating traffic in specific primary nodes from which as many radial connections as the secondary nodes stem. Such a network configuration implies, in fact, a significant reduction in transport costs over primary connections due to the concentration of arriving/departing traffic flows from/to certain dominant nodes (*hubs*), as well as the possibility of optimising the secondary and/or local distribution phase, offering a better coverage of the influential areas where the principal markets are focused on. With such a configuration, a "multiplying effect" occurs through which, given an equal number of *OD* pairs, a greater number of  $N_c$  connections arises compared to a *point-to-point* type configuration [11] according to the following formula:

$$N_c = \frac{n(n+1)}{2}$$

ma di collegamenti tra i differenti terminal che compongono il grafo della rete.

Come già ampiamente sottolineato, per poter essere competitivo il trasporto intermodale deve poter ridurre i costi logistici totali al fine di proporre tempi, tariffe e prestazioni concorrenziali (anche in termini di *safety* e *security*) rispetto alla modalità tutto-strada.

In tale ottica, l'implementazione di una rete di tipo *hub and spoke* per il trasporto combinato strada-ferrovia si propone come un'opportunità interessante poiché, prevedendo la concentrazione dei traffici in alcuni nodi principali dai cui si innestano tanti collegamenti radiali quanti sono i nodi secondari, consente il raggiungimento di apprezzabili economie di scala. Tale configurazione di rete comporta, infatti, una riduzione significativa dei costi di trasporto sui collegamenti primari, in ragione della massificazione dei flussi di traffico in arrivo/partenza da/verso alcuni nodi egemoni (*hub*), oltre alla possibilità di ottimizzare la fase di distribuzione secondaria e/o locale ed offrire, inoltre, una migliore copertura delle aree di influenza su cui insistono i principali mercati di riferimento. Con una configurazione di questo tipo si genera, infatti, un "effetto moltiplicatore" attraverso il quale, a parità di numero  $n$  di coppie OD, si realizza un numero maggiore di connessioni  $N_c$  rispetto ad una configurazione di tipo *point-to-point* [11], secondo la seguente espressione:

$$N_c = \frac{n(n+1)}{2}$$

In tabella 1 si riporta l'effetto incrementale determinato da una configurazione *hub and spoke* al variare del numero delle coppie di nodi [12].

TABELLA 1 – TABLE 1  
EFFETTO MOLTIPLICATORE [12]  
MULTIPLYING EFFECT [12]

Numero di coppie OD <i>Number of OD pairs</i>	Numero di connessioni <i>Number of connections</i>
2	3
6	21
10	55
50	1.275
75	2.850
100	5.050

Funzionale all'implementazione di una strategia di tipo *hub and spoke*, la fase successiva a quella di estrazione del grafo della rete richiede la razionalizzazione della rete distributiva ovvero l'attribuzione di una connotazione gerarchica ai terminali compresi nell'area di studio che vengono così classificati in nodi principali e secondari.

Table 1 shows the incremental effect determined by a *hub and spoke* configuration upon variation of the number of node pairs [12].

Functional to the implementation of a *hub and spoke* type strategy, the phase subsequent to the definition of the network graph requires the distribution network to be rationalised or better to assign a hierarchic connotation to the terminals within the study area that are, therefore, classified into primary and secondary nodes.

With reference to such type of distribution network, an application for the *optimal location* model will be also proposed.

### 3. An overview of existing methodologies

The analysis of industrial and commercial facilities location is widely covered especially within operational research which, with the necessary tools, allows the study of a wide number of case studies on the location of production plants, warehouses, service centres etc.

As an example, this paper provides an overview in the models which are more appropriate for the study of intermodal terminal location, where solutions to the problem have to be found through a primary objective function expressed in terms of minimisation of the travel distance and, therefore, of the cost of transport.

In the context of classic industry location theory, the *Weber* model [13] is universally acknowledged. Amongst spatial type models, *Nierat's* approach to market areas [14] provides interesting elements for the definition of the location criteria of an intermodal node.

On the one hand, with reference to facility location choices, the *facility location* model, both in its classic form as in its various adaptations, provides a satisfactory solution to the problem. On the other hand, as regards the design of an efficient distribution network, the *p-median* model [15], based on a fixed number of facilities all having the same opening cost, is a valuable reference point within the scientific literature. Deriving from such a model, *Racunica* and *Winter* [16] provide a variant, known as *optimal location*, which allows planning of a *hub and spoke* network by taking possible economies of scale into consideration. Such a formulation, besides having a theoretical value, will also be functional to the development of the applied part of the present paper.

#### 3.1. The Weber model and the theory of market areas

*Alfred Weber* was the first to propose a "pioneering" approach aimed at defining industrial location choices based on the following concepts:

- *transport costs* which, depending on distance, play a "geographical role" and through which *isodapane*

In riferimento a tale tipologia di network distributivo verrà proposta, più avanti, un'applicazione del modello di *optimal location*.

### 3. Una rassegna delle metodologie esistenti

Il tema della localizzazione di impianti industriali e commerciali - strutture indicate nella letteratura di riferimento con il termine anglosassone di *facilities* - è ampiamente trattato soprattutto nel campo della ricerca operativa, i cui strumenti consentono di affrontare lo studio di un'ampia casistica di tematiche inerenti all'ubicazione di impianti produttivi, magazzini, centri di servizio, etc.

A titolo esemplificativo appare utile proporre in questa sede una rassegna dei modelli che meglio si prestano allo studio delle localizzazione dei terminali intermodali, la cui soluzione al problema è ricercata attraverso una funzione obiettivo principale espressa in termini di minimizzazione della distanza dello spostamento e, quindi, del costo del trasporto.

Nell'ambito della teoria classica della localizzazione delle attività industriali, è universalmente noto il modello di *Weber* [13]. Tra i modelli di tipo spaziale, anche l'approccio delle aree di mercato proposto da *Nierat* [14] fornisce spunti interessanti per la definizione dei criteri localizzativi di un nodo intermodale.

In riferimento alla scelta localizzativa degli impianti, il modello di *facility location*, sia nella formulazione classica che nei molteplici adattamenti, è quello che meglio si presta ad una soddisfacente risoluzione del problema. Per quanto riguarda, invece, la progettazione di un'efficiente rete distributiva, il modello della *p-mediana* [15], basato su un numero fisso di impianti aventi tutti lo stesso costo di apertura, rappresenta un valido riferimento nella letteratura di settore. Da quest'ultimo modello deriva la variante proposta da *Racunica e Winter* [16], nota con il nome di *optimal location*, che consente di progettare una rete distributiva di tipo *hub and spoke* tenendo conto delle possibili economie di scala. Tale formulazione oltre ad avere valenza teorica sarà funzionale allo sviluppo della parte applicativa del presente lavoro.

#### 3.1. Il modello di Weber e la teoria delle aree di mercato

Ad *Alfred Weber* va il merito di aver proposto un approccio "pionieristico", volto alla definizione delle scelte localizzative degli impianti produttivi sulla base dei concetti di:

- *costo del trasporto* che, dipendendo dalla distanza, svolge un "ruolo geografico" ed attraverso il quale vengono definite le *curve isodapane*<sup>(6)</sup>;

*curves*<sup>(6)</sup> are defined;

- *agglomeration cost savings*, meaning the advantages deriving from a polarised form of location of enterprises on the territory.

In particular, the *Weber* model focuses on industrial location in relation to primary material supply sources and the distribution points of goods, with the goal of minimising transport costs between industry and its related supply and distribution channels.

The analytical formula of the model is the following<sup>(7)</sup>:

$$v(SWP) = \min \sum_{i \in S} w_i [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]^{1/2}$$

by which, on the plane  $(x,y)$ , it is possible to determine the point with the co-ordinates minimising the distance from the demand points with co-ordinates  $(x_i, y_i)$ , with weight  $w_i$  relative to the unit cost of transport.

From a design point of view, the model actually presents some limitations due to its functional structure, in particular:

1. it considers space isotropic and isomorphic;
2. it assumes a regime of perfect competition;
3. it considers transport costs as a linear function of distance;
4. it allows determination of a single and absolute optimal location without considering existing terminals and the effective availability of other sites.

However, despite the above considerations, the validity of such a tool for the definition of location policies aimed at satisfying the requirements of the analysis context (production environment, logistic and transport services, catchment areas etc.) remains unvaried [17].

In the context of market area theories, the models proposed by *NIERAT* [14] and by *MUSSO and MALAVASI* [18], analyse the convenience of modal alternatives available (all-road or combined), from the point of view of a transport operator. It should be noted, in fact, that within an intermodal cycle, the total cost of transport is calculated by adding the road access and egress cost to such nodes to the cost of the railway section connecting the two terminals, where the former cost, because of the numerous empty returns and the incidence of fixed costs over short distances, is generally higher than the cost of all-road transport.

In such a context, comparing respectively the general cost of road transport with the cost of combined transport [19], it is possible to determine the area of influence of an

<sup>(6)</sup> Definite come il luogo dei punti che collegano tutti i siti produttivi caratterizzati dallo stesso costo totale del trasporto, calcolato rispetto al centro di un'area di mercato.

<sup>(6)</sup> Defined as the location of points connecting all production sites characterised by the same total transport, calculated in relation to the centre of a market area.

<sup>(7)</sup> SWP: *Single Facility Weber Problem*.



- *economie di agglomerazione*, intendendo con queste i vantaggi derivanti dal posizionamento di tipo polarizzato delle imprese sul territorio.

In particolare, il modello di *Weber* è finalizzato allo studio della localizzazione degli impianti industriali rispetto alle fonti di approvvigionamento delle materie prime e ai punti di distribuzione delle merci, avendo come obiettivo la minimizzazione del costo del trasporto tra l'industria ed i rispettivi canali di approvvigionamento e di distribuzione.

L'espressione analitica del modello è la seguente<sup>(7)</sup>:

$$v(SWP) = \min \sum_{i \in S} w_i [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]^{1/2}$$

con la quale, nel piano  $(x,y)$ , è possibile determinare il punto le cui coordinate minimizzano la distanza dai punti di domanda di coordinate  $(x_p, y_p)$ , con peso  $w_i$  relativo al costo unitario del trasporto.

Da un punto di vista progettuale il modello presenta, in realtà, alcune limitazioni insite nella sua struttura funzionale; infatti:

1. considera lo spazio isotropico e isomorfo;
2. ipotizza un regime di concorrenza perfetta;
3. considera i costi del trasporto funzione lineare della distanza;
4. consente la determinazione di una sola localizzazione ottimale, in senso assoluto, senza considerare i terminali preesistenti e l'effettiva disponibilità di altri siti.

A fronte di tali esemplificazioni, però, la validità di tale strumento quale ausilio alla definizione di politiche localizzative atte a soddisfare le esigenze del contesto in esame (tessuto produttivo, servizi di logistica e trasporto, bacini di consumo, etc.), rimane comunque invariata [17].

Nell'ambito della teoria delle aree di mercato, i modelli proposti da NIERAT [14] e da MUSSO e MALAVASI [18], analizzano la convenienza delle alternative modali disponibili (tutto-strada o combinato), dal punto di vista di un operatore del trasporto. Si rammenta, infatti, che nel ciclo intermodale il costo totale del trasporto è calcolato sommando al costo della tratta ferroviaria che collega i due terminali il costo su strada di accesso ed egresso a tali nodi, dove quest'ultima voce di costo, a causa dei numerosi ritorni a vuoto e dell'incidenza dei costi fissi sulle brevi distanze, è generalmente superiore al costo del trasporto tutto-strada.

In tale contesto, confrontando, rispettivamente, il costo generalizzato del trasporto della modalità stradale con quello del trasporto combinato

intermodal transport terminal in relation to the potential catchment area.

With reference to fig. 2, having represented the area of influence by graphical means<sup>(8)</sup> and in the simplified hypothesis that the total road transport cost for a generic travel activity can be only expressed as a function of distance, the cost of transport can be represented on a Cartesian plane  $(x,z)$  through the projection of two conic areas whose aperture is inversely proportional to the kilometric road cost, given the hypothesis of a fixed railway transport cost (segment  $BE$ ) and attribution of a higher cost to road transport sections in case of intermodal transport.

In summary, in case of road transport, the cost function is represented by the greater of the two conic areas. For combined transport, instead, the cost function is given by the sum of two costs: the first is the cost of the road transport section travelled to reach terminal  $(OA)$  to which, respectively, the railway transport section cost  $(AB)$  connecting the two terminals and the costs of transfer of goods are added; the second cost is related to the transfer between the terminal  $(B)$  and the final destination  $(D)$ . The intersection between the two conic areas, where present, gives rise to areas whose projection on the Cartesian plane  $(x,y)$  identifies the areas of convenience of combined transport compared to all-road transport. In fact, this is the plan  $(x,y)$  related to the physical travel area: for example, for a transport company that must transfer goods between point of origin  $A$  and point of destination  $M$ , combined transport is not competitive, since the area of influence of the interchange terminal  $B$  does not include any of the freight's two points of origin and destination.

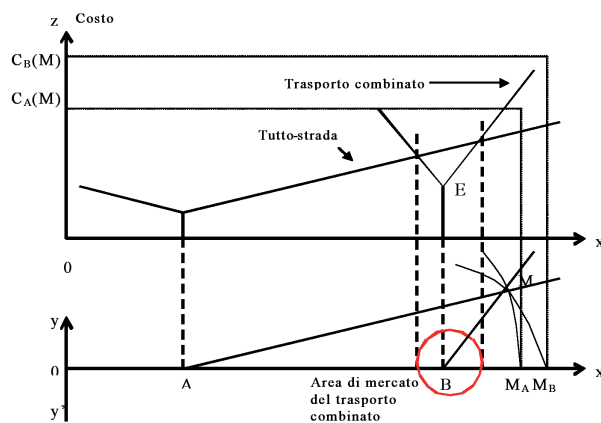


Fig. 2 – La teoria delle aree di mercato [19]. The theory of market areas [19].

<sup>(7)</sup> SWP: Single Facility Weber Problem.

<sup>(8)</sup> Using tools and methods belonging to analytical geometry.

[19] è possibile determinare l'area di influenza di un terminale intermodale rispetto al potenziale bacino d'utenza.

In riferimento alla fig. 2, rappresentata l'area di influenza per via grafica<sup>(8)</sup> e nell'ipotesi semplificativa che il costo stradale per un generico spostamento possa esprimersi esclusivamente in funzione della distanza, il costo del trasporto può essere rappresentato nel piano cartesiano  $(x,z)$  attraverso la proiezione di due superfici coniche la cui apertura è inversamente proporzionale al costo chilometrico stradale, stante l'ipotesi di aver fissato il costo del trasporto ferroviario (segmento  $BE$ ) e di attribuire un costo superiore alle tratte su gomma nel caso del trasporto intermodale.

In sintesi, nel caso stradale la funzione di costo è rappresentata dalla maggiore tra le due superfici coniche. Per il combinato, invece, la funzione di costo è data dalla somma di due contributi: il primo dei quali considera il costo della tratta su gomma percorsa per accedere al terminal ( $OA$ ) a cui si sommano, rispettivamente, il costo della tratta ferroviaria ( $AB$ ) di collegamento tra i due terminali ed i costi di movimentazione della merce; il secondo è invece relativo al costo dello spostamento tra il terminal ( $B$ ) e la destinazione finale ( $D$ ). L'intersezione tra le due superfici coniche, ove esistente, genera delle superfici la cui proiezione sul piano cartesiano  $(x,y)$  individua le aree di convenienza del trasporto combinato rispetto al tutto-strada. Proprio tale piano  $(x,y)$  è, infatti, riferito allo spazio fisico dello spostamento: ad esempio, per un'impresa di trasporto che deve trasferire merce tra il punto origine  $A$  ed il punto destinazione  $M$ , il trasporto combinato non risulta essere competitivo, poiché l'area di influenza del terminale di interscambio  $B$  non include nessuno dei due punti di origine e destinazione del carico.

### 3.2. Il modello di facility location

A partire dai punti di domanda identificati come nodi della rete, il modello di *facility location* identifica la localizzazione in grado di minimizzare una determinata funzione obiettivo, relativa ad es. al costo di accessibilità ed all'eventuale costo di investimento iniziale, nel rispetto di alcuni vincoli, quali ad es. la capacità dei terminali e il soddisfacimento dell'intera domanda di trasporto.

La formulazione analitica del modello è la seguente [15]:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_u \sum_v c_{vu} y_{vu} + \sum_u f_u x_u \\ \sum_u y_{vu} = 1 \\ \sum_v d_v y_{vu} \leq k_u x_u \\ y_{vu} \leq x_u \\ x_u \in \{0,1\}, 0 \leq y_{vu} \leq 1 \end{aligned}$$

<sup>(8)</sup> impiegando strumenti e metodi propri della geometria analitica.

### 3.2. The facility location model

Starting from the demand points identified as network nodes, the *facility location* model identifies locations capable of minimising a specific objective function, relative for example to the access cost and to the potential initial investment cost, respecting certain constraints, such as, for example, terminal capacity and meeting the entire demand for transport.

The analytical formulation of the model is as follows [15]:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_u \sum_v c_{vu} y_{vu} + \sum_u f_u x_u \\ \sum_u y_{vu} = 1 \\ \sum_v d_v y_{vu} \leq k_u x_u \\ y_{vu} \leq x_u \\ x_u \in \{0,1\}, 0 \leq y_{vu} \leq 1 \end{aligned}$$

where:

- $u \in U$  is the number of possible sites (*facilities*);
- $v \in V$  is the number of demand points (*customers*);
- $d_v$  customer demand  $v$ ;
- $y_{vu}$  part of customer demand  $v$  at terminal  $u$ ;
- $c_{vu}$  customer  $v$  allocation cost at terminal  $u$ ;
- $f_u$  terminal  $u$  activation cost;
- $k_u$  capacity of terminal  $u$ ;
- $x_u$  qualitative dichotomic variable (with value 0 if terminal inactive and 1 if active);

and where the constraints associated with the model respectively imply, in order, the following:

1. the total demand of each customer has to be met;
2. an inactive terminal ( $x = 0$ ) should not meet any demand, whilst an active terminal ( $x = 1$ ) should meet demand equal to maximum its own capacity equal to  $k$ ;
3. the part of customer demand on a terminal should always fall within 0 (where the terminal is inactive or the customer turns to other terminals) and 1 (in case all that customer's demand is met over that active terminal).
4. The model's application procedure is divided in the following phases:
  - development of the transport network's graph;
  - identification of origin/destination nodes (centroids) and quantification of current and future freight transport demand;
  - identification of possible sites for the activation of an intermodal terminal and definition of their character-

essendo:

- $u \in U$  insieme dei possibili siti (*facilities*);
- $v \in V$  insieme dei punti di domanda (clienti);
- $d_v$  domanda relativa al cliente  $v$ ;
- $y_{vu}$  parte della domanda del cliente  $v$  sul terminale  $u$ ;
- $c_{vu}$  costo di allocazione del cliente  $v$  al terminale  $u$ ;
- $f_u$  costo di attivazione del terminale  $u$ ;
- $k_u$  capacità del terminale  $u$ ;
- $x_u$  variabile qualitativa dicotomica (con valore 0 se il terminale non è attivo e 1 se è attivo);

e dove i vincoli associati al modello, considerati nell'ordine, implicano rispettivamente che:

1. l'intera domanda di ciascun cliente debba essere soddisfatta;
2. un terminale non attivo ( $x = 0$ ) non soddisfi alcuna domanda, mentre un terminale attivo ( $x = 1$ ) soddisfi al massimo una domanda uguale alla propria capacità  $k$ ;
3. la parte di domanda di un cliente su un terminale sia sempre compresa tra 0 (nel caso il terminale non sia attivo o il cliente si rivolga ad altri terminali) e 1 (nel caso il cliente veda soddisfatta tutta la propria domanda su quel terminale attivo).

La procedura di applicazione del modello si articola nelle seguenti fasi:

1. costruzione del grafo della rete di trasporto;
2. individuazione dei nodi di origine/destinazione (centroidi) e quantificazione della domanda di trasporto attuale e futura;
3. individuazione dei possibili siti per l'attivazione di un terminale intermodale e definizione delle loro caratteristiche (ad es. capacità ed investimento iniziale richiesto);
4. applicazione del modello ed analisi dei risultati.

In particolare, il processo di selezione delle possibili località deriva da indicazioni desunte dagli attori coinvolti (ad es. operatori del settore, decisori pubblici, etc.) in relazione ai siti per i quali, oltre all'esistenza di un'effettiva superficie disponibile<sup>(9)</sup>, sia possibile definire a priori le caratteristiche dei nodi in termini di costo e capacità delle singole proposte progettuali. In tal senso il modello si configura, quindi, come una procedura di scelta tra progetti alternativi permettendo, altresì, di valutare anche la pertinenza economica di più siti contemporaneamente.

<sup>(9)</sup> Come già sottolineato (cfr. paragrafo 2) la disponibilità di suolo è un elemento che condiziona la scelta localizzativa. In un'ottica di pianificazione delle risorse territoriali, e quindi di salvaguardia dei paesaggi agricoli, opportune strategie volte alla riqualificazione funzionale e/o ampliamento di aree già compromesse e/o in uso possono rappresentare delle valide opportunità per lo sviluppo di nodi a servizio dell'intermodalità.

istics (for example capacity and initial investment required);

- model application and result analysis.

In particular, the potential location selection process follows indications coming from the involved actors (for example sector operators, public decision makers, etc.) in relation to the sites where, besides providing an effective available area<sup>(9)</sup>, it is possible to define *a priori* the node features in terms of cost and capacity of the different design proposals. Accordingly, the model is arranged as a selection procedure amongst alternative projects thus additionally allowing the assessment of the cost effectiveness of more sites at the same time.

Once the origin/destination nodes and potential sites have been defined, the development of the transport network graph allows calculation of the client/terminal allocation cost matrix, by applying different cost functions depending on the chosen transport mode [20].

The estimation of the current and future demand vector generally derives from statistical sampling research and application of freight demand models which consider the possible transport modal choices as a function of the production typology.

Once the client/terminal cost matrix has been developed and knowing respectively the demand vector as well as the costs and capacity of different sites, it is possible to apply the *facility location*<sup>(10)</sup> model whose output is the optimal distribution of demand over the different sites. More precisely, resolution to the problem consists in the activation of a number of sites sufficient to met the total demand, under the maximum capacity constraint of each site and minimising the total access and construction cost of different facilities.

In such way, a classification of different location hypotheses is obtained according to a technical-economic efficiency criterion.

### 3.3. The optimal location model with economies of scale

Functional to the development of the application phase, described hereafter, is the formulation of the *optimal location* model for a *hub and spoke* network proposed by *Racunica* and *Winter* (2005), which does not take the

<sup>(9)</sup> As above described, the land resources availability affects the location choice. From a planning point of view, also considering the preservation of rural zones, proper strategies aimed at improving the functional use of built-up areas can represent valuable opportunities for developing facilities dedicated to inter-modal transport.

<sup>(10)</sup> Amongst resolving algorithms, the *Dantzig-Hitchcock* is the best known (source [8]).

Una volta definiti i nodi di origine/destinazione ed i possibili siti, la costruzione del grafo della rete di trasporto consente di calcolare la matrice dei costi di allocazione clienti/terminali, attraverso l'applicazione di differenti funzioni di costo a seconda della modalità di trasporto prescelta [20].

La stima del vettore di domanda, attuale e futura, deriva generalmente da indagini campionarie di tipo statistico e dall'applicazione di modelli di previsione della domanda merci che considerano le possibili scelte modali in funzione della tipologia di produzione.

Costruita, quindi, la matrice dei costi clienti/terminali e noti, rispettivamente, il vettore di domanda nonché costi e capacità dei differenti siti, è possibile applicare il modello di *facility location*<sup>(10)</sup>, il cui output è la ripartizione ottimale della domanda sui diversi siti. Più precisamente, la risoluzione del problema consiste nell'attivazione di un numero di siti sufficienti a soddisfare l'intera domanda, sotto il vincolo di capacità massima di ciascun sito e minimizzando il costo totale di accesso e di costruzione dei diversi impianti.

In tal modo si ottiene, quindi, una classificazione delle differenti ipotesi localizzative secondo un criterio di efficienza tecnico-economica.

### 3.3. Il modello di optimal location con economie di scala

Funzionale allo sviluppo della fase applicativa, descritta nel prosieguo del presente documento, è la formulazione del modello di *optimal location* per una rete *hub and spoke* proposta da *Racunica e Winter* (2005), la quale non considera il vincolo di capacità dei terminali.

La formulazione analitica del modello è la seguente:

$$\begin{aligned} \min_{x,z} F(x,z) &= \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} \sum_{l \in N} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{j \in N} f_j z_j \\ \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} x_{ijkl} &= d_{il}, \forall (i,l) \in W, \\ \sum_{j \in N} x_{ijkl} &\leq Q_{il} z_k, \forall k \in H, (i,l) \in W, \\ \sum_{k \in N} x_{ijkl} &\leq Q_{il} z_j, \forall j \in H, (i,l) \in W, \\ x_{ijkl} &\geq 0, \forall j \in H, \forall k \in H, (i,l) \in W, \\ 0 \leq z_j &\leq 1, \forall j \in N, \\ z_j &\in \{0,1\}, \forall j \in N, \end{aligned}$$

terminal capacity constraint into consideration.

The analytical formulation of the model is as follows:

$$\begin{aligned} \min_{x,z} F(x,z) &= \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} \sum_{l \in N} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{j \in N} f_j z_j \\ \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} x_{ijkl} &= d_{il}, \forall (i,l) \in W, \\ \sum_{j \in N} x_{ijkl} &\leq Q_{il} z_k, \forall k \in H, (i,l) \in W, \\ \sum_{k \in N} x_{ijkl} &\leq Q_{il} z_j, \forall j \in H, (i,l) \in W, \\ x_{ijkl} &\geq 0, \forall j \in H, \forall k \in H, (i,l) \in W, \\ 0 \leq z_j &\leq 1, \forall j \in N, \\ z_j &\in \{0,1\}, \forall j \in N, \end{aligned}$$

where:

- $N$  is the group of nodes representing the terminals;
- $H$  is the sub-group of potential *hubs*, belonging to  $N$ ;
- $d$  is the demand vector belonging to group  $W$  of the OD matrix pairs;
- $x$  is the flow variable over the arcs;
- $z$  is a qualitative dichotomic variable (with a value 0 if the terminal is inactive and 1 if it is active);
- $Q_{il}$  is a constant, by definition greater or equal to the demand variable  $d$ ;
- $c_{ijkl}$  the travel cost;
- $f_j$  the cost required to convert a terminal into a *hub*.

In relation to the constraints associated with the model, the first requires the demand to be met, whilst the second and third imply the opening of a *hub* ( $j$  and  $k$  respectively) whenever the flow through the counterpart node, whether upstream or downstream, is different from zero.

In addition, in order to take the economies of distance generated within *hub and spoke* networks, a factor of  $\alpha$  ranging from 0 to 1 is introduced, such that:

$$c_{ijkl} = c_{ij} + \alpha c_{jk} + c_{kl}$$

This implies that the cost related to the distance should be less over the connection between *hubs* (achievement of "economies of distance") whilst the marginal cost remains constant upon variation of the flow (absence of economies of scale).

An OD connection can be achieved both through a direct link as well as through a *hub and spoke* type connection where flows are firstly directed towards a main *hub* (connected to other *hubs* with *shuttle* type connections) and from here onwards towards the final destinations. In order to take into account the possible economies of scale

<sup>(10)</sup> Tra gli algoritmi risolutivi il più noto è quello denominato *Dantzig-Hitchcock* (fonte [8]).

essendo:

- $N$  l'insieme dei nodi che rappresentano i terminal;
- $H$  il sottoinsieme degli *hub* potenziali, appartenenti ad  $N$ ;
- $d$  il vettore di domanda appartenente all'insieme  $W$  delle coppie della matrice OD;
- $x$  la variabile di flusso sugli archi;
- $z$  una variabile qualitativa dicotomica (avente valore 0 se il terminale non è attivo e 1 se è attivo);
- $Q_{it}$  una costante, per definizione maggiore o uguale al vettore di domanda  $d$ ;
- $c_{ijkl}$  il costo del percorso;
- $f_j$  il costo necessario a convertire un terminal in *hub*.

In relazione ai vincoli associati al modello, il primo impone la soddisfazione della domanda, mentre il secondo ed il terzo vincolo implicano l'apertura di un *hub* ( $j$  e  $k$  rispettivamente) qualora il flusso attraverso l'omologo nodo a monte o a valle sia diverso da zero.

Inoltre, al fine di tener conto delle economie di distanza generate nelle reti *hub and spoke* si introduce un fattore  $\alpha$  compreso tra 0 e 1, tale che:

$$c_{ijkl} = c_{ij} + \alpha c_{jk} + c_{kl}$$

Questo implica che il costo relativo alla distanza sia inferiore sul collegamento tra *hub* (realizzazione di "economie di distanza") mentre il costo marginale rimanga costante al variare del flusso (assenza di economie di scala).

Poiché un collegamento OD può essere realizzato sia attraverso una relazione diretta sia attraverso un collegamento di tipo *hub and spoke*, nel quale i flussi vengono dapprima convogliati verso un *hub* principale (connesso ad altri *hub* con collegamenti di tipo *shuttle*) e da qui verso le destinazioni finali, per tenere conto delle possibili economie di scala - e quindi considerare una diminuzione del costo marginale a fronte dei volumi trasportati - appare utile introdurre una segmentazione della rete in funzione della tipologia di collegamento<sup>(11)</sup> (fig. 3).

In particolare:

- i collegamenti diretti, ovvero quelli realizzati senza transitare attraverso un *hub*, non presentano economie di scala ed i costi associati variano linearmente con la distanza;
- i collegamenti tra *hub* presentano economie di scala

– and therefore consider a reduction in the marginal cost based on the transported volumes – it is useful to introduce a segmentation of the network as a function of the type of connection<sup>(11)</sup> (fig. 3).

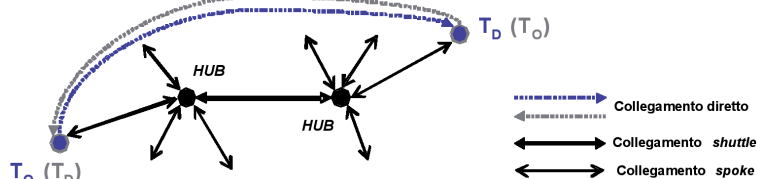


Fig. 3 – Configurazione di tipo Hub and Spoke [16]. A Hub and Spoke type configuration [16].

In particular:

- the direct connections, that are realised without transiting through a *hub*, do not offer economies of scale and the associated costs vary linearly with distance;
- connections between *hubs* provide significant economies of scale, since over such routes (primary transport) train composition is fixed; consequently the marginal cost decreases as the good flows crossing the *hub*<sup>(12)</sup> increases;
- connections between a *hub* and the final destination terminal (secondary transport) may also offer economies of scale, albeit in a reduced scale compared to primary connections.

Based on this segmentation, the objective function can therefore be rewritten in the following manner:

$$\Psi(x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} c_{ij} \sum_{k \in H} x_{ijk} + \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} c_{jk}^1(x) + \sum_{k \in H} \sum_{l \in N} c_{kl}^2(x)$$

where the cost functions  $c^1(x)$  and  $c^2(x)$ , relative respectively to the connection between hubs and between hubs and final destination, are non linear;

The reformulated problem therefore becomes:

$$\min_{x, \hat{x}, z} F(x, \hat{x}, z) = \Psi(x) + \sum_{(i,j) \in W \setminus H} \hat{c}_{ij} \hat{x}_{ij} + \sum_{j \in H} f_j z_j$$

<sup>(11)</sup> The proposed configuration is very similar to the classic single car transportation configuration with the shunting stations performing a hub function.

<sup>(12)</sup> O'KELLY and BRYAN (1998) tackled the problem of location by introducing economies of scale (reduction of the marginal cost as increases in volumes are handled). The main studies conducted in this sense initially referred to air passenger traffic flows; later on, the general validity of the models and algorithms used in air transport was also proven in the freight ground transport and telecommunication sectors. With reference to this see: J. LIU, C.L. LI, C.Y. CHAN, *Mixed truck delivery systems with both hub-and-spoke and direct shipment*, Transportation Research Part E 39 (2003) 325–339.

<sup>(11)</sup> La configurazione proposta è del tutto simile a quella classica del trasporto a carro singolo con le stazioni di smistamento che svolgono la funzione di hub.



importanti, poiché su tali tratte (trasporto primario) la composizione dei treni è bloccata; ne consegue che il costo marginale diminuisce all'aumentare del flusso di merce che attraversa e che, quindi, viene distribuita attraverso l'hub<sup>(12)</sup>;

- i collegamenti tra un hub e ed il terminal di destinazione finale (trasporto secondario) possono anch'essi presentare economie di scala, anche se in misura decisamente inferiore rispetto ai collegamenti primari.

Per quanto appena detto, la funzione obiettivo può quindi essere riscritta nel modo seguente:

$$\Psi(x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} c_{ij} \sum_{k \in H} \sum_{l \in N} x_{ijkl} + \sum_{j \in H} \sum_{k \in H} c_{jk}^1(x) + \sum_{k \in H} \sum_{l \in N} c_{kl}^2(x)$$

dove le funzioni di costo  $c^1(x)$  e  $c^2(x)$ , relative rispettivamente al collegamento tra hub e quello tra hub e destinazione finale, sono non lineari;

Il problema riformulato diviene pertanto:

$$\text{Min}_{x, \hat{x}, z} F(x, \hat{x}, z) = \Psi(x) + \sum_{(i,l) \in W/H} \hat{c}_{il} \hat{x}_{iill} + \sum_{j \in H} f_j z_j$$

rispetto al quale si sostituisce, al secondo vincolo originale, il seguente:

$$\sum_{j \in H} \sum_{k \in H} x_{ijkl} + \hat{x}_{iill} = d_{il}, \forall (i,l) \in W$$

lasciando invariati gli altri vincoli.

Per determinare le funzioni di costo non lineari è necessario ricorrere ad una calibrazione su valori reali, che permettano di determinare il punto di equivalenza tra i due tipi di funzioni di costo (lineare e non) ovvero il punto di intersezione oltre il quale si raggiunge la convenienza del trasporto transitando via hub (fig. 4).

Ai fini della calibrazione, gli autori introducono la seguente funzione:

$$c_{jk}^1 = a_{jk}^1 \left( \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl} \right)^{0.5} = \bar{c}_{jk} \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl}$$

nella quale:

$\bar{c}_{jk}$  indica il costo associato al collegamento diretto tra due hub ( $j$  e  $h$ ) appartenenti al sottoinsieme  $H$  dei potenziali hub;

<sup>(12)</sup> O'KELLY e BRYAN (1998) hanno affrontato il problema della localizzazione introducendo le economie di scala (decremento del costo marginale all'aumentare del volume trattati). I principali studi condotti in tal senso hanno fatto inizialmente riferimento ai flussi di traffico aereo passeggeri; si è poi dimostrata la validità generale dei modelli e degli algoritmi utilizzati nel trasporto aereo anche nel settore del trasporto terrestre delle merci e delle telecomunicazioni. Al riguardo si veda: J. LIU, C.L. LI, C.Y. CHAN, *Mixed truck delivery systems with both hub-and-spoke and direct shipment*, Transportation Research Part E 39 (2003) 325-339.

in relation to which, at the second original constraint, the following is replaced,:

$$\sum_{j \in H} \sum_{k \in H} x_{ijkl} + \hat{x}_{iill} = d_{il}, \forall (i,l) \in W$$

leaving the other constraints unvaried.

In order to determine the non linear cost functions, it is necessary to make a calibration on real values which allows the definition of the point of equivalence between two types of cost functions (linear and non linear), that is the point of intersection beyond which the cost-effectiveness of the transport via hub is reached (fig. 4).

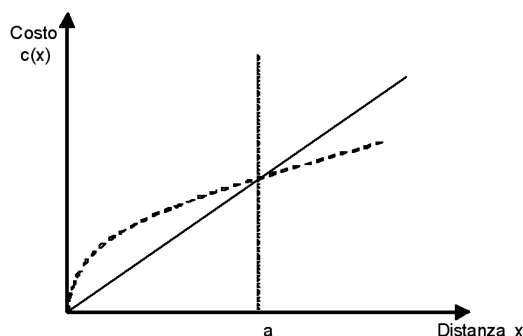


Fig. 4 - Andamento della funzione di costo lineare (collegamento diretto) e non (H and S) [16]. Linear (direct connection) and non liner (H and S) cost function trend [16].

With reference to calibration, the authors introduce the following function:

$$c_{jk}^1 = a_{jk}^1 \left( \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl} \right)^{0.5} = \bar{c}_{jk} \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl}$$

where:

$\bar{c}_{jk}$  is the cost associated to the direct connection between two hubs ( $j$  and  $h$ ) belonging to the sub-group  $H$  of the potential hubs;

$\bar{x}_{jk} = \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl}$  is the minimum flow required (in tons) in order to make a shuttle type service between two hubs competitive.

The calibration result provides the following expression for the non linear cost function, relative to the connection between two hubs,;

$$c_{jk}^1 = a_{jk}^1 \left[ \sum_{(i,l) \in W} x_{ijkl} \right]^{0.5} \quad \forall (j,k) \in H^2$$

In the same way, the non linear cost function between hubs and final destination is defined by the following expression:

$\bar{x}_{jk} = \sum_{(i,l) \in W} \bar{x}_{ijkl}$  indica il flusso minimo necessario (tonnellate) per rendere competitivo un servizio di tipo *shuttle* tra due *hub*.

Il risultato della calibrazione fornisce per la funzione di costo non lineare, relativa al collegamento tra due *hub*, la seguente espressione:

$$c_{jk}^1 = a_{jk}^1 \left[ \sum_{(i,l) \in W} x_{ijkl} \right]^{0.5} \quad \forall (j,k) \in H^2$$

Analogamente, la funzione di costo non lineare tra *hub* e destinazione finale viene esplicitata attraverso l'espressione seguente:

$$c_{kl}^2 = a_{kl}^2 \left[ \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} x_{ijkl} \right]^{0.6} \quad \forall (k,l) \in H \times N$$

Si noti, in particolare, come la funzione di costo  $c_{kl}^2$  sia caratterizzata da un'esponente maggiore rispetto alla  $c_{jk}^1$ , a sottolineare l'esistenza di economie di scala inferiori nella distribuzione secondaria (tra *hub* e destinazione finale)<sup>(13)</sup>.

Vi è, inoltre, da sottolineare che il principale limite di tale modello è attribuibile alla sua elevata complessità matematica: nel caso di una rete di vaste dimensioni (ad esempio a scala europea) il numero di soluzioni possibili cresce in maniera esponenziale e la risoluzione matematica del modello richiede notevoli capacità computazionali. Per ovviare a questo problema la maggior parte dei modelli pre-seleziona il sottoinsieme degli *hub* potenziali  $H$  a scapito, però, di una perdita di affidabilità connessa ai possibili errori compiuti nella procedura di aggregazione [21].

In sintesi, i modelli fin qui proposti, che affrontano il problema della scelta della localizzazione ottimale di un impianto intermodale, presentano un ordine di complessità crescente, funzione del livello di realistica da conseguire e della disponibilità di dati statistici (affidabili ed omogenei) a supporto del processo di simulazione. In tabella 2 si propone un quadro riassuntivo degli strumenti introdotti nelle sezioni precedenti, evidenziandone, rispettivamente, le finalità ed i punti di forza e di debolezza associati al loro possibile impiego.

Ai fini del presente studio, per la successiva fase di simulazione si è fatto riferimento ai modelli di *facility location* ed *optimal location*, che, adottati con alcune ipotesi semplificative che, tuttavia, non ne inficiano la descrittività, consentono di delineare una plausibile soluzione sia per una rete intermodale di tipo *point-to-point* che di tipo *hub and spoke*.

<sup>(13)</sup> Nel collegamento tra *hub* si fa riferimento ad una composizione bloccata dei treni, in modo da eliminare i costi di smistamento (*shunting costs*). Nella distribuzione secondaria, invece, le necessarie attività di trasformazione e/o consolidamento dei carichi implicano maggiori costi di movimentazione dei carichi [16].

$$c_{kl}^2 = a_{kl}^2 \left[ \sum_{i \in N} \sum_{j \in H} x_{ijkl} \right]^{0.6} \quad \forall (k,l) \in H \times N$$

Particularly, it should be noted how the cost function  $c_{kl}^2$  is characterised by a greater index compared to  $c_{jk}^1$ , underlining the existence of economies of scale which are lower with regards to the secondary distribution (between *hub* and final destination)<sup>(13)</sup>.

It should also be noted that the main weakness of such model is attributable to its elevated mathematical complexity: in case of a very large network (e.g. on a European scale) the number of possible solutions increases exponentially and the mathematical resolution of the model requires significant computational skills. In order to resolve this problem, the majority of models pre-selects the subgroup of the potential *hubs*  $H$  to the detriment, however, of a loss in reliability connected to possible errors occurring during the aggregation procedure [21].

In summary, the proposed models, tackling the problem of optimal location choice for an intermodal facility, show increasing levels of complexity according to the level of feasibility to be achieved and the availability of statistical data (reliable and homogeneous) supporting the simulation process. In table 2, an overview of tools introduced in the previous paragraphs is provided, highlighting respectively the aims, strengths and weaknesses associated with their possible use.

For the purpose of the present study, the following simulation phase refers to *facility location* and *optimal location* models. Such models have been adopted with certain simplified hypotheses, do not, however, invalidate their descriptive aspect, allowing definition of a plausible solution both for *point-to-point* as for a *hub and spoke* intermodal networks typology.

#### 4. Applying facility location and optimal location models to Italian terminals located within the influence area of the Corridor V of the TEN – T network.

The development of the TEN – T network (*Trans-European Network*) reflects a community transport strategy whose area of territorial intervention, besides at a European level, has also impacts on national and local level. Within such strategy, the improvement of accessibility and modal re-balancing (in favour of alternative modes to all-road transport) are two main goals aimed at develop-

<sup>(13)</sup> In relation to connections amongst hubs, fixed train composition is referred to in order to eliminate shunting costs. Within secondary distribution, however, the necessary load transformation and/or consolidation actions imply greater handling costs [16].

TABELLA 2 – TABLE 2

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI MODELLI LOCALIZZATIVI  
 MAIN CHARACTERISTICS OF LOCATION MODELS

Modello <i>Model</i>	Finalità <i>Aim</i>	Punti di forza <i>Strong points</i>	Punti di debolezza <i>Weak points</i>
Weber, aree di mercato <i>Weber, market areas</i>	Localizzazione ottimale in una data area <i>Optimal location in a specified area</i>	Semplicità computazionale, non necessita di banca dati estesa <i>Computational simplicity, does not require a broad database</i>	Risultati di larga massima. Prescinde dalla rete di trasporto esistente <i>Very rough results. No relation with the existing transport network</i>
<i>Facility location</i>	Localizzazione ottimale sul grafo rispetto alla domanda potenziale <i>Optimal location on the graph relative to potential demand</i>	Risultati apprezzabili in termini di efficienza tecnico-economica <i>Significant results in terms of technical-economical efficiency</i>	Media complessità computazionale. Necessità di fonti statistiche dettagliate <i>Average computational complexity. Need for detailed statistical sources</i>
<i>P-mediana, Optimal location</i>	Progettazione di una rete di trasporto per un operatore di trasporto intermodale <i>Design of a transport network for an intermodal transport operator</i>	Risultati apprezzabili in termini di efficienza tecnico-economica <i>Significant results in terms of technical-economical efficiency</i>	Elevata complessità computazionale. Necessità di fonti statistiche dettagliate <i>Very high computational complexity. Need for detailed statistical sources</i>

#### 4. L'applicazione dei modelli di *facility location* e di *optimal location* ai terminal italiani ubicati nell'area di influenza del Corridoio V della rete TEN – T

La realizzazione e lo sviluppo della rete TEN – T (*Trans-European Network*) risponde ad una strategia comunitaria di politiche dei trasporti il cui ambito di intervento territoriale, oltre al contesto europeo investe, necessariamente, le scale territoriali nazionali e locali. In tale strategia, il miglioramento dell'accessibilità ed il riequilibrio modale (a favore di modalità alternative al tutto-strada) rappresentano due obiettivi principali ed al tempo stesso sostanziali ai fini di uno sviluppo quanto più equilibrato del mercato economico e del tessuto sociale nazionale ed europeo. La promozione e l'espansione di infrastrutture a supporto dell'integrazione modale dell'intera rete TEN-T non può prescindere, quindi, dalla realizzazione di opportuni nodi di interscambio modale che, svolgendo il ruolo di poli connettori tra le differenti componenti di offerta di infrastrutture e servizi di logistica e trasporto, supportano la gestione dei flussi di traffico merci in un'ottica di ottimizzazione ed efficienza produttiva.

Il territorio italiano, oltre che dalla rete delle Autostrade del Mare, è interessato dalla realizzazione di quattro Corridoi (rispettivamente il Corridoio I, Berlino – Palermo; il V, Lisbona – Kiev; l'VIII, Bari – Varna ed il Corridoio dei Due Mari, Genova – Rotterdam), inseriti in altrettanti Progetti Prioritari riguardanti la rete TEN-T (fig. 5).

Poiché l'area della Pianura Padana è interessata dall'at-

ting a well balanced commercial market as well as the national and European social structure. The promotion and expansion of infrastructures supporting modal integration of the entire TEN-T network cannot therefore forego the construction of appropriate modal interchange nodes which, by fulfilling the function of connecting different components of the infrastructures and services supply, support the management of freight traffic flows from the optimisation and production efficiency point of view.

The Italian territory, being marked by the development of the "Motorways of the Seas" network, will also be crossed by four Corridors (respectively Corridor I, Berlin – Palermo; Corridor V, Lisbon – Kiev; Corridor VIII, Bari – Varna and the Corridor of the Two Seas, Genoa – Rotterdam), belonging to as many Priority Projects concerning the TEN-T network (fig. 5).

Since the area of the Po Valley is crossed by three Corridors, of which Corridor V constitutes a main axis, it appears useful to propose an application for *facility* and *optimal location* models by selecting the zone of influence of Corridor V as study area and by considering the Italian intermodal terminals located in such a area, in order to identify a possible *hub and spoke* network configuration dedicated to combined road-railway transport.

As previously underlined, the *facility location* model has the advantage of providing results which can be considered sufficiently reliable if compared to the required level of computation complexity. The *optimal location* model, against a rising level of complexity according to

traversamento di tre Corridoi, di cui il V costituisce un asse portante, è apparso utile proporre un'applicazione dei modelli di *facility location* ed *optimal location* scegliendo come area di studio proprio la zona di influenza del Corridoio V e considerando i terminali intermodali italiani ubicati in tale area, al fine di individuare una possibile configurazione di rete di tipo *hub and spoke* dedicata al trasporto combinato strada-ferrovia.

Come già sottolineato, il modello di *facility location* presenta il vantaggio di fornire un risultato che può ritenersi sufficientemente affidabile rapportato ad una complessità di calcolo non troppo elevata. Il modello di *optimal location*, a fronte di una complessità crescente all'aumentare delle dimensioni della rete considerata, può, comunque, essere applicato in modo soddisfacente adottando i seguenti accorgimenti semplificativi:

1. poiché le economie di scala, rappresentate da funzioni non lineari, rendono il problema estremamente complesso dal punto di vista matematico, al fine di semplificare la trattazione, senza però compromettere la significatività del modello, non verranno considerate le relazioni tra nodi secondari e destinazioni finali;
2. il sottoinsieme degli hub potenziali può essere preselezionato applicando il modello di *facility location* per aree omogenee [17]: in questo caso la scelta dell'hub principale viene determinata aprioristicamente per una data zona; in un secondo tempo si applica, poi, il modello di *optimal location* al fine di determinare la localizzazione ottimale dei nodi secondari.

E' importante sottolineare che tale procedura non conduce alla soluzione ottima del problema ma fornisce soluzioni soddisfacenti che ben si prestano all'analisi ed alla simulazione di contesti reali. Gli operatori di trasporto combinato, infatti, sviluppano le proprie strategie commerciali principalmente per aree geografiche, scegliendo una localizzazione primaria in funzione del bacino di utenza principale e, solo in seguito, estendono la propria rete attivando nuove relazioni verso altri hub e/o nodi secondari.

Il processo di simulazione, condotto utilizzando congiuntamente il software di pianificazione Transcad ed un foglio di calcolo Excel, è stato articolato nelle fasi descritte qui di seguito. In primo luogo è stata condotta un'analisi della domanda di trasporto intermodale delle merci; in particolare, quale fonte dati si è fatto riferimento all'inda-



Fig. 5 - Corridoi plurimodali della rete TEN-T che interessano il territorio italiano [22]. *TEN-T network multimodal corridors crossing the Italian territory* [22].

the increase of the network size, can however be applied in a satisfactory way by adopting the following simplified application:

1. since the economies of scale, represented by non linear functions, make the problem extremely complex from a mathematical point of view, in order to simplify treatment without, however, compromising the model's significance, the relations between secondary nodes and final destinations will not be considered;
2. the sub-group of potential hubs can be pre-selected by applying the *facility location* model for homogeneous areas [17]: in this case the choice of main hub is determined in advance for a given area; subsequently the *optimal location* model is applied in order to determine optimal location of secondary nodes.

It is important to underline that such a procedure does not lead to the optimal problem solution but provides satisfactory solutions which are best suited to the analysis and simulation of real cases. Combined transport operators, in fact, develop their commercial strategies mainly by geographical areas, choosing primary locations according to the main catchment area and, later, extending their network by activating new connections towards other hubs and/or secondary nodes.

The simulation process, conducted by combining the use of Transcad planning software and an Excel sheet, was performed in the following phases. Firstly an analysis of intermodal freight transport demand was conducted



gine CAFT<sup>(14)</sup> [23] inerente al traffico di attraversamento delle Alpi. A partire da tali dati sono state ricostruite le matrici Origine/Destinazione della domanda di trasporto combinato relativa ai principali Paesi dell'Europa del Nord (prevalentemente Germania, Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo) ed all'Italia. In riferimento al territorio italiano, si è stimata la domanda di trasporto intermodale strada-ferro focalizzando l'attenzione sulle province interessate dalla realizzazione del Corridoio V. Tale stima fornisce un quadro descrittivo dell'incidenza dei flussi, in origine e destinazione, sull'area di studio e risulta comunque funzionale alla successiva fase di simulazione (tabella 3).

TABELLA 3 – TABLE 3

FLUSSI DI TRASPORTO COMBINATO DA/VERSO  
LE PROVINCE ITALIANE INTERESSATE DAL CORRIDOIO V [23] - COMBINED TRANSPORT TRAFFIC FLOW  
FROM/TO THE ITALIAN PROVINCES CROSSED BY  
CORRIDOR V [23]

NUTS	Provincia	Origine Origin [kt]	Destinazione Destination [kt]	Totale Total [kt]
IT207	Brescia	75.28	-	75.28
IT205	Milano	759.26	830	1.589.26
IT115	Novara	944.17	1.293.37	2.237.54
IT326	Padova	378.48	470.11	848.59
IT401	Piacenza	72.36	-	72.36
IT111	Torino	228.37	-	228.37
IT324	Treviso	186.19	-	186.19
IT201	Varese	1.111.52	1.811.36	2.922.88
IT325	Venezia		392.88	392.88
IT114	Verbania	63.2	-	63.2
IT321	Verona	191.72	194.5	386.22
IT322	Vicenza	185.05	100.64	285.69

In particolare, le province di Varese e Novara, seguite da Milano e Padova sono quelle che, in termini di generazione ed attrazione di traffico merci transalpino, svolgono un ruolo significativo. Seguono, con minori entità ed una certa asimmetria nei flussi, le province di Verona e Vicenza ed infine tutte le altre per le quali si stimano, esclusiva-

and the CAFT<sup>(14)</sup> [23] study on traffic crossing the Alps was utilised as a source of data. Starting from such data, the combined transport Origin/Destination matrixes relative to the main countries in Northern Europe (mainly Germany, Belgium, The Netherlands and Luxembourg) and Italy were reconstructed. With reference to the Italian territory, the intermodal road-railway transport demand was estimated by focusing on the provinces to be crossed by Corridor V. Such estimate provides a descriptive overview of the impact of traffic flows on the study area at origin and destination, resulting also functional to the following simulation phase (table 3).

In particular, the provinces of Varese and Novara, followed by Milan and Padua, have played the most significant role in terms of generating and attracting transalpine freight traffic. The provinces of Verona and Vicenza have marked lower values and a certain asymmetry in terms of traffic flows; finally, concerning the remaining provinces outbound (Torino, Treviso, Verbania and Piacenza) and inbound (Venice) traffics have been estimated.

Once the demand was assessed, the *facility location* model was then applied in order to determine the optimal location of an intermodal hub. In particular, once the transport network graph (road and railway) was developed, the main existing and planned (referred to as *candidates*) intermodal nodes were located on it without imposing any kind of preference amongst them. The problem of location was resolved by setting transport cost minimisation as the objective function which actually is representative of the terminal accessibility cost. The simulation model's output, whose formulation is based upon a "greedy" type heuristic resolving algorithm<sup>(15)</sup>, allowed identification of Alessandria as the best location site for the main terminal (fig. 7). More specifically, it is possible to refer to the Alessandria shunting node which is currently at not more than 40-45% of its capacity<sup>(16)</sup>. According to this result, it is possible to reasonably state that, given the evolution trend of both long range (towards the new Eastern European markets and Russia) and

<sup>(14)</sup> Poiché è un'indagine che viene condotta ogni cinque anni, i flussi di traffico ad oggi disponibili sono quelli relativi all'anno 2004. I dati sul trasporto ferroviario vengono richiesti alle società di trasporto e integrati da un'indagine sul trasporto combinato. Il CAFT 2004 ha consentito di individuare i volumi approssimativi dei trasporti di merci su strada e rotaia, oltre alle matrici O/D riferite al sistema NUTS.

<sup>(14)</sup> Since it is a research conducted every five years, traffic flow data available to date is relative to 2004. Data on railway traffic is requested to transport companies and combined with research on combined transport. The CAFT 2004 study allowed determination of the approximate volumes of road and railway commodity transport, as well as the O/D Matrixes referring to the NUTS system.

<sup>(15)</sup> Heuristic models such as "greedy" models do not lead to the optimal solution to the problem but on the other hand to a reasonable solution considered as admissible. The solution is gradually built up, after the algorithm has selected and assessed the individual elements by use of a mechanism which does not return upon itself (the elements once evaluated do not come back into play).

<sup>(16)</sup> Source: project "Port-Net: Promoting interregional co-operation of ports and multimodal transport structures in the EU".



mente, flussi in uscita (Torino, Treviso, Verbania e Piacenza) o in entrata (Venezia).

Stimata la domanda da soddisfare è stato, quindi, applicato il modello di *facility location* per l'individuazione della localizzazione ottimale di un hub intermodale. In particolare, una volta costruito il grafo della rete di trasporto (stradale e ferroviario), su questo sono stati inseriti i principali nodi intermodali esistenti e previsti (definiti *candidati*) senza imporre alcuna preferenza tra questi. Il problema della localizzazione è stato risolto avendo fissato come funzione obiettivo la minimizzazione del costo del trasporto che, di fatto, diviene rappresentativo del costo di accessibilità ai terminali. L'output del modello di simulazione, la cui formulazione si basa su un algoritmo risolutivo euristico di tipo greedy<sup>(15)</sup>, ha permesso di determinare il sito di Alessandria quale migliore localizzazione per il terminal principale (fig. 7). Più precisamente, si può far riferimento al nodo di Alessandria smistamento che, attualmente, risulta essere utilizzato non oltre il 40-45% della propria capacità<sup>(16)</sup>. Alla luce di tale risultato si può verosimilmente affermare che, stante il trend evolutivo sia dei flussi di traffico di lungo raggio (verso i nuovi mercati dell'Europa dell'Est e la Russia) che di quelli di medio e corto raggio (da Torino in direzione Est e da Genova/Savona verso Nord), l'area di Alessandria può intercettare e gestire entrambi, svolgendo la duplice funzione di punto di accesso alle reti internazionali e terminal di smistamento intermodale (*gateway*) [8].

Poiché il software di simulazione lavora con una formulazione senza vincolo di capacità, per tener conto della possibile saturazione dell'impianto, è stato necessario procedere con successive iterazioni del modello, aggiungendo ogni volta un ulteriore nodo,

<sup>(15)</sup> Il metodo euristico come quello *greedy* non conduce all'ottimo del problema, bensì ad una buona soluzione ritenuta ammissibile. La soluzione si costruisce gradualmente, dopo che l'algoritmo ha scelto e valutato i singoli elementi con un meccanismo che non ritorna su se stesso (gli elementi una volta valutati non rientrano più in gioco).

<sup>(16)</sup> Fonte: progetto "Port-Net: Promoting interregional co-operation of ports and multi-modal transport structures in the EU".

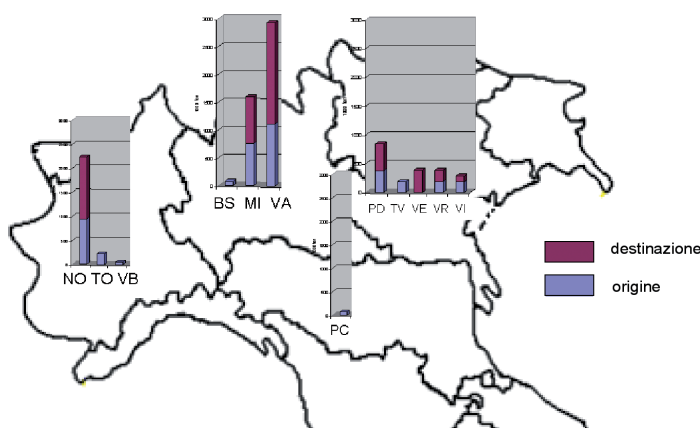


Fig. 6 - Stima della domanda di trasporto combinato attraverso le Alpi (aggregazione provinciale). Estimation of transalpine combined transport traffic (by province).



Fig. 7 - Soluzione ottimale del modello di facility location. Optimal solution for the facility location model.

medium to short range traffic flows (from Turin towards the East and from Genoa/Savona heading North), the Alessandria area can intercept and manage both, playing a dual role as an access point to international networks and as an intermodal shunting terminal (*gateway*) [8].

Since the simulation software runs with a formulation which lacks any capacity constraint, in order to take the facility's possible saturation into account, it was necessary to proceed with subsequent iterations of the model by adding an additional node every time, in order to determine, for a *point-to-point* network, the combination of optimal sites upon variation of the potential demand.

al fine di determinare, per una rete di tipo *point-to-point*, le combinazioni di siti ottimali al variare della domanda potenziale.

I risultati del processo iterativo sono riportati in tabella 4.

TABELLA 4 – TABLE 4

ITERAZIONI DEL MODELLO DI FACILITY LOCATION  
ITERATIONS OF THE FACILITY LOCATION MODEL

Numero di terminali Number of terminals	Collegamento diretto - Facility location Direct Connection – Facility location
1	Alessandria
2	Brescia - Milano
3	Milano - Piacenza - Verona
4	Brescia - Milano - Piacenza - Verona
5	Brescia - Chivasso - Milano - Novara - Verona
6	Brescia - Chivasso - Milano - Novara - Piacenza - Verona

Ciò significa che per una domanda di trasporto prossima alla capacità del terminal di Alessandria, la soluzione ottimale prevede l'attivazione contestuale dei due terminal di Brescia e Milano<sup>(17)</sup> per poi considerare, in funzione del possibile incremento dei flussi, l'attivazione successiva di nodi intermodali aggiuntivi.

La successiva fase di simulazione è stata sviluppata applicando il modello di *optimal location*, ottenuto come variante del *facility location*, avendo imposto il vincolo di mantenere Alessandria come nodo principale e chiedendo al software di calcolare una successione di siti su cui attivare il collegamento con l'hub, in funzione della distribuzione territoriale della domanda (fig. 8).

Le soluzioni che forniscono la combinazione ottimale dei collegamenti secondari afferenti l'hub principale di Alessandria è riportata in tabella 5.

The results of the iterative process are shown in table 4.

This means that for a transport demand close to the capacity of the Alessandria terminal, the optimal solution foresees the activation, at the same time, of the two Brescia and Milan terminals<sup>(17)</sup> to subsequently consider the following activation of additional intermodal nodes according to possible increase in traffic flows.

The following simulation phase was developed by applying the *optimal location* model obtained as a variant of the *facility location* model, having set a constraint to keep Alessandria as main node and asking the software to calculate a series of sites where the connection with the hub should be activated depending on the territorial distribution of demand (fig. 8).

The solutions providing the optimal combination of secondary connections leading to the main hub in Alessandria are shown in table 5.

The *facility location* model, on the one hand, provides the solution which minimises access costs in absolute terms as a function of the territorial location of the demand attraction/generation points. The *optimal location* model, on the other hand, allows minimisation of cost once the main *hub* has been fixed: in such a case the solution is stable, in other words, once

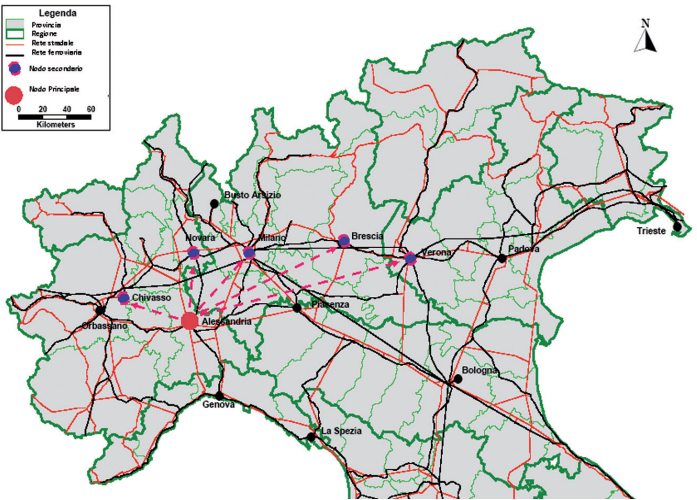


Fig. 8 - Soluzioni del modello di *optimal location*. Optimal location model solutions.

<sup>(17)</sup> Si intende il terminal Hupac di Busto Arsizio (242.800 m<sup>2</sup>) che negli ultimi anni ha raddoppiato la propria capacità ricettiva (cfr. F. DALLARI, S. CURI, *Quadro competitivo del sistema logistico in Lombardia*, Liuc Papers n. 223, 12/2008).

<sup>(17)</sup> The case of the Hupac terminal in Busto Arsizio (242.800 m<sup>2</sup>) which in recent years has doubled its receiving capacity (see F. DALLARI, S. CURI, "Overview of Competition in the Lombardy Logistics System", Liuc Papers n. 223, 12/2008).

TABELLA 5 – TABLE 5

ITERAZIONI DEL MODELLO DI *OPTIMAL LOCATION*  
 ITERATIONS OF THE *OPTIMAL LOCATION* MODEL

Numero di terminali <i>Number of terminals</i>	Collegamento Hub and Spoke – Optimal location <i>Hub and Spoke connection – Optimal location</i>
1	Alessandria
2	Alessandria - Brescia
3	Alessandria - Brescia - Novara
4	Alessandria - Brescia - Novara - Verona
5	Alessandria - Brescia - Milano - Novara - Verona
6	Alessandria - Brescia - Chivasso - Milano - Novara - Verona

Il modello di *facility location* presenta, quindi, la soluzione che minimizza il costo di accessibilità in termini assoluti in funzione della localizzazione territoriale dei poli di attrazione/generazione di domanda; il modello di *optimal location* permette, invece, di minimizzare il costo di accessibilità una volta che l'*hub* principale è stato fissato: in tal caso la soluzione è stabile ovvero fissato il nodo principale, l'aggiunta di nuove connessioni di tipo *spoke*, non modifica la configurazione precedentemente raggiunta. Questo rende il modello di *optimal location* preferibile rispetto a quello di *facility location* oltre al fatto che, come già precedentemente sottolineato, rispetto ad una rete di tipo *point-to-point* la configurazione *hub and spoke* presenta un più elevato grado di connessione della rete; ciò comporta, quindi, a parità di numero di nodi, la possibilità di coprire un numero più elevato di aree di mercato rispetto ad una rete composta di tipo *point-to-point*.

Al fine di determinare il numero ottimale di nodi secondari supplementari per configurare la rete *hub and spoke*, quest'ultima soluzione è stata, poi, confrontata con la soluzione "collegamento diretto".

Naturalmente, il collegamento diretto è quello che presenta una maggiore convenienza per il cliente finale, poiché non vi sono attese ai terminali di transito e la merce non subisce cicli intermedi di movimentazione; il confronto, però consente di evidenziare la convergenza delle due soluzioni al crescere del numero di terminali.

In particolare, a partire da una rete composta da 4 nodi, il costo di accessibilità per le due tipologie di collegamento diviene comparabile; sono comunque necessari 6 terminali per arrivare ad una configurazione di rete *hub and spoke* che non sia penalizzante in termini di costo di accessibilità rispetto ad una rete *point-to-point* (fig. 9). Ciò può tradursi nel fatto che, all'aumentare del numero di nodi della rete, il cliente finale vedrà ridotto il proprio costo di accessibilità, ovvero di trasporto, in ragione dell'in-

the main node has been fixed, adding new *spoke* connections does not modify the configuration previously achieved. This makes the *optimal location* model preferable compared to the *facility location* model also considering that, as previously underlined, if compared to a *point-to-point* network, the *hub and spoke* configuration presents a higher level of network interconnection. Therefore, with number of nodes being equal, there is the possibility of covering a greater number of market areas compared to a *point-to-point* network.

In order to determine the optimal number of additional secondary nodes to configure a *hub and spoke* network, this latter solution was then compared with the "direct connection" one.

Naturally, the direct connection provides the greatest advantages for the final customer, as there are no waiting times at the transit terminals and goods do not undergo intermediate movement cycles; the comparison, however, highlights the convergence of the two solutions with an increasing number of terminals.

More specifically, starting from a network composed of four nodes, the access cost for the two types of connections becomes comparable; 6 terminals are however necessary in order to obtain a *hub and spoke* configuration which does not have a negative effect on access costs compared to a *point-to-point* network (fig. 9). This may have the effect that, as the number of nodes in a network increases, the final customer will see his access costs reduce, and therefore transportation costs, in virtue of the increasing chances that he may find himself near an active terminal.

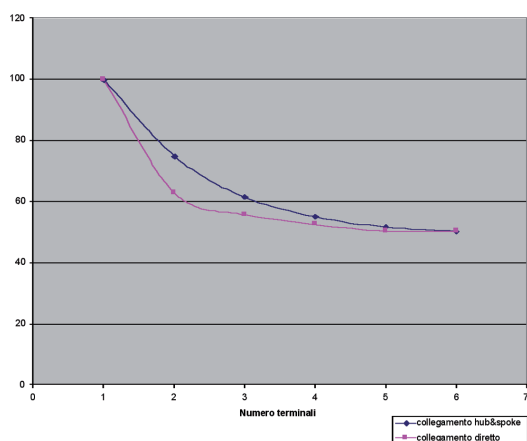


Fig. 9 – Indice del costo di accessibilità al variare del numero di terminali attivi, per tipo di collegamento. *Access cost index upon variation in the number of active terminals, by type of connection.*

cremento della possibilità che egli possa trovarsi nelle vicinanze di un terminal attivo.

In tal modo si è arrivati a dimensionare una possibile configurazione *hub and spoke* che coniuga le esigenze del cliente finale, in termini di minimizzazione del costo di accessibilità, con quelle dell'operatore del trasporto combinato; quest'ultimo, infatti, configura la propria rete a partire da un nodo principale per poi sviluppare collegamenti aggiuntivi in funzione della localizzazione delle aree di domanda dei propri clienti. Tutto questo al fine di realizzare un bilancio globale di efficienza che, riducendo quanto più possibile l'impedenza del trasporto per accedere al terminale, permetta, al contempo, il raggiungimento di economie di scala attraverso una configurazione gerarchica della rete distributiva.

## 5. Conclusioni

Lo studio della localizzazione dei nodi di interscambio svolge un ruolo essenziale per il potenziamento dell'intermodalità terrestre, al cui interno il trasporto combinato strada-ferrovia può offrire ampi margini di competitività, rispetto al trasporto tutto-strada.

In relazione a questa tematica, il presente lavoro è stato articolato in modo da fornire una prima trattazione teorica, in cui vengono sinteticamente descritte le metodologie esistenti finalizzate all'analisi degli aspetti localizzativi dei nodi di interscambio a servizio del trasporto merci. Sono stati, quindi, applicati in serie i due modelli descritti, volti a definire possibili configurazioni per una rete intermodale, la cui area di intervento include i terminali italiani interessati dal Corridoio V della rete TEN-T.

I risultati ottenuti consentono di trarre alcuni interessanti spunti di riflessione. In primo luogo, l'applicazione del modello di *facility location* ha permesso di determinare il sito di Alessandria quale ubicazione ottimale per un hub intermodale, rispetto ad potenziale bacino di riferimento per il trasporto combinato. A tal proposito, l'output del modello ha evidenziato alcuni importanti elementi rivelatisi coerenti con le misure effettivamente programmate da RFI a supporto degli interventi infrastrutturali dedicati all'intermodalità ed alla logistica distributiva. Si sottolinea, infatti, che RFI sta concentrando numerosi investimenti destinati all'ampliamento ed al potenziamento dell'impianto di smistamento di Alessandria<sup>(18)</sup>. In particolare, il progetto prevede la realizzazione di un nodo di interscambio suddiviso in diverse aree funzionali (distripark, piazzale stoccaggio, magazzino e terminal *gateway*), ed il contestuale collegamento di tale area con i porti di Genova

In this way, a possible *hub and spoke* configuration is defined combining the final customer's requirements, in terms of minimising access costs, with the combined transport operator's needs; the latter, in fact, configures his network starting from a main node and later develops additional connections according to the customers demand areas location. This is performed in order to achieve an overall efficiency balance which, by reducing the impedance of transport accessing the terminal as much as possible, at the same time, allows achievement of economies of scale through a hierarchic configuration of the distribution network.

## 5. Conclusions

The study of freight terminals location plays an essential role in enhancing intermodal transport, within which combined road-railway solutions can provide a wide scope for competitiveness compared to all-road transport.

With regards to this topic, the present study was structured with the aim of providing an initial theoretical analysis where existing methodologies, focusing on the analysis of facility location aspects, are briefly described in relation to the freight transport. The two models described, which aim to define possible configurations for an intermodal network, whose area of intervention includes the Italian terminals crossed by Corridor V of the TEN-T network, were applied in series.

The achieved results provide some interesting points for discussion. Firstly, application of the *facility location* model allowed identification of the Alessandria facility as an optimal location for an intermodal hub compared to the potential catchment area for combined transport. With regards to this point, the model's output highlighted some important elements which proved to be coherent with the actions effectively planned by RFI in support of the infrastructure developments dedicated to intermodal transport and logistics. It is worth of mentioning that RFI is concentrating investments on the expansion and enhancement of the Alessandria<sup>(18)</sup> shunting facilities. In particular, such a project foresees the development of an interchange node divided into various functional areas (distripark, stocking area, warehouse and terminal *gateway*), and the simultaneous connection of that area with the ports of Genoa Voltri and Savona Vado. In such way, the facility, besides playing the role of

<sup>(18)</sup> Risale al maggio 2008 la firma del protocollo d'intesa per la "Realizzazione e gestione dell'hub di Alessandria e relativi interventi sulla viabilità d'accesso", siglato dalle Ferrovie dello Stato con le Regioni Piemonte e Liguria, le Province di Alessandria, Genova e Savona, i Comuni di Alessandria e Genova e le Autorità portuali di Genova e Savona.

<sup>(18)</sup> In May 2008 a protocol agreement for the "Construction and management of the Alessandria hub and related interventions on access traffic" was signed by the Italian State Railways and the Regions of Piedmont and Liguria, the provinces of Alessandria, Genoa and Savona, the Municipalities of Alessandria and Genoa and the Port Authorities of Genoa and Savona.

Voltri e Savona Vado. In tal modo l'impianto, oltre ad assumere il ruolo di un polo logistico integrato, verrebbe ad assumere anche l'importante funzione di retroporto a servizio dei due scali liguri<sup>(19)</sup>, con l'attivazione di un servizio ferroviario di tipo *shuttle*, a supporto di una strategia di sviluppo del traffico container che porterebbe, così, ad un riequilibrio dei flussi di traffico nell'area del Mediterraneo, attualmente concentrati nei porti che si affacciano sul Mare del Nord (Rotterdam, Anversa ed Amburgo).

In secondo luogo, la successiva applicazione del modello di *optimal location* ed il confronto tra le soluzioni dei due modelli, hanno mostrato quali fossero, una volta prefissato l'hub di Alessandria, il numero e la localizzazione ottimale degli hub secondari da destinare al trasporto combinato strada-ferrovia: si tratta in particolare dei nodi di Brescia, Novara, Chivasso, Milano e Verona per i quali si ipotizzerebbe un'attivazione in fasi successive, in funzione del modello di business intrapreso dall'operatore del trasporto combinato.

Con l'approccio metodologico utilizzato, ci si è proposti di effettuare una simulazione che, a fronte di una complessità computazionale non troppo elevata (e comunque gestibile attraverso l'uso di uno strumento software<sup>(20)</sup> ampiamente diffuso), fornisse una soluzione soddisfacente, in termini di possibili soluzioni distributive di tipo *point-to-point* e *hub and spoke* da adottare al variare della domanda di trasporto merci.

Questo contributo diviene, infine, un'ulteriore occasione per sottolineare il ruolo che i modelli svolgono nel supportare il processo decisionale inerente ad una qualunque scelta strategica. Nel caso specifico dell'applicazione proposta, il processo di valutazione è stato incentrato esclusivamente sul principio di efficacia tecnico-economica. Infatti, sebbene la scelta della soluzione migliore non possa prescindere dal considerare anche criteri di natura diversa (quali ad es. l'inserimento urbanistico e/o territoriale, l'impatto ambientale e sulla collettività), in un primo approccio di tipo analitico ed in un'ottica di sviluppo della competitività del trasporto intermodale, il criterio di efficacia tecnico-economica riveste, comunque, un ruolo prevalente.

Sviluppi futuri della ricerca verranno indirizzati verso l'implementazione di un modello di localizzazione che consideri la componente dell'organizzazione logistica delle imprese, in termini di razionalizzazione dei flussi merci, ed al contempo integri il costo di accessibilità ai terminali con le altre voci componenti il costo logistico totale.

#### Nota

Il presente articolo è frutto di un lavoro comune in stretta collaborazione tra gli autori, che ha consentito di

un integrated logistics hub, would take on the key function of a back-port servicing the two Liguria ports<sup>(19)</sup>, by activating a *shuttle* type railway service, in support of container traffic development. Such strategies would, therefore, lead to a re-balancing of traffic flow within the Mediterranean region, currently concentrated in the ports facing the North Sea (Rotterdam, Antwerp and Hamburg).

Secondly, the following application of the *optimal location model* and the comparison between the solutions offered by the two models, allowed identification, once the Alessandria hub was designated, of the number and optimal location of the secondary hubs to be utilised for combined road-railway transport: more specifically the nodes of Brescia, Novara, Chivasso, Milan and Verona for which later activation is supposed, according to the combined transport operator's business model.

By using a methodological approach, the authors' aim was to conduct a simulation which, with a limited computational complexity (yet perfectly manageable by use of popular software applications<sup>(20)</sup>), would provide a satisfactory solution in terms of possible *point-to-point* and *hub and spoke* distribution solutions to be adopted upon variation of the freight transport demand.

Finally, this contribution provides a further opportunity to underline the role that models play in supporting the decision process within the context of any strategic choice. In the specific case of the proposed application, the assessment process was focused exclusively on the principle of technical-economic efficiency. In fact, although the choice of the best solution cannot forgo, taking into consideration criteria of a different nature (such as the urban and/or territorial context, impacts on the environment and community), in an first analytical approach and in the context of developing competition in intermodal transport, the criterion of technical-economic efficiency takes on, however, a dominant role.

Future developments of this research will move towards implementing a location model which will consider the component relating to companies' logistical organisation, in terms of rationalising freight traffic flows and, at the same time, integrating terminal access costs with other components of the total logistics cost.

#### Note

The present paper is the result of a close collaboration between authors which allowed development of an

<sup>(19)</sup> Duplice ruolo di struttura ricettiva e di riordino delle merci containerizzate provenienti dai porti liguri, da inoltrare in Europa, e di allestimento dei carichi nave (ex-port) da avviare ai due scali.

<sup>(20)</sup> Uso congiunto del software di pianificazione Transcad e del foglio di calcolo di Excel.

<sup>(19)</sup> Double role of receptive structure and arrangement of the container freights coming from Ligurian harbours, to be sent to Europe, and setting up of nautical loads.

<sup>(20)</sup> Integrated use of Transcad planning software and an Excel work sheet.



sviluppare una visione d'insieme della tematica trattata. Si precisa, inoltre, che l'ing. PICCIONI ha redatto il capitolo 3 ed ha contribuito con l'ing. ANTONIAZZI, che ha redatto il capitolo 4, alla redazione del capitolo 2. Il Prof. MUSSO ha contribuito all'individuazione dell'approccio metodologico ed alla stesura dell'articolo nel suo insieme.

overall view of the discussed topics. It should also be noted that Eng. PICCIONI contributed to Chapter 3 and Chapter 2, the latter jointly with Eng. ANTONIAZZI, who contributed to Chapter 4. Prof. MUSSO contributed to specifying the methodological approach and to writing the article overall.

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] F. RUSSO (2001), *"Trasporto intermodale delle merci"*, in Introduzione alla tecnica dei trasporti e del traffico con elementi di economia dei trasporti, a cura di G.E. CANTARELLA, UTET, Torino.
- [2] PACT (2003), *"CO<sub>2</sub> reduction through Combined Transport"*, Summary Report, ([www.uirr.com](http://www.uirr.com)).
- [3] UIRR Statistics 2008, ([www.uirr.com](http://www.uirr.com)).
- [4] Ministero Infrastrutture e Trasporti (2009), *"Conto Nazionale dei Trasporti 2007-2008"*.
- [5] EC – Eurostat (2008), *"Statistics on transports"* (<http://ec.europa.eu/Eurostat>).
- [6] C. PICCIONI (2004), *"Analisi del sistema distributivo di un'azienda di logistica"*, Tesi di Master Universitario di II livello in "Supply Chain Management", Facoltà di Ingegneria, Università di Brescia.
- [7] United Nations/Economic Commission for Europe (UN/ECE), European Conference of Ministers of Transport (ECMT), European Commission (EC) (2001), *"Terminology on combined transport"*, United Nations, New York and Geneva.
- [8] B. DALLA CHIARA (2009), *"Sistemi di trasporto intermodali: progettazione ed esercizio"*, Edizione Egaf.
- [9] *"Lavori in corso e progetti di infrastrutture strategiche per lo sviluppo della Lombardia"*, [www.infrastrutture.org/intermobilita.asp](http://www.infrastrutture.org/intermobilita.asp).
- [10] Consorzio ZAI (2008), *"Guida Interporto Quadrante Europa"*, ([www.quadranteeuropa.it](http://www.quadranteeuropa.it)).
- [11] A. MUSSO, C. PICCIONI (2007), *"Lezioni di teoria dei sistemi di trasporto"*, Edizioni Ingegneria 2000, Roma.
- [12] W. SONG, Y. MA (2006), *"Hub-and-Spoke system in air transportation and its implications to regional economic development"*, Chinese Geographical Science 2006 16(3) 211–216.
- [13] G. GHIANI, G. IMPROTA (2002), *"Localizzazione di terminali di trasporto"*, in S. PALLOTTINO, A. SCIAMACHEN (a cura di) *"Scienze delle decisioni per i trasporti"*, Collana Trasporti, Franco Angeli, Milano.
- [14] P. NIERAT (1991), *"Aires de marché des centres de transbordement rail-route: pertinence de la théorie spatiale"*, Les Cahiers Scientifiques du Transport, 25/1991.
- [15] A. SASSANO (2004), *"Modelli e algoritmi della ricerca operativa"*, Franco Angeli, Milano.
- [16] I. RACUNICA, L. WINTER (2005), *"Optimal location of intermodal freight hubs"*, Transportation Research Part B: Methodological, 39, 5, pp.453-477.
- [17] F. ANTONIAZZI (2007), *"La localizzazione degli impianti per il trasporto intermodale"*, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria dei Sistemi di Trasporto, Università di Roma La Sapienza. Vincitrice della borsa di studio "Caruso" del CIFI per l'a.a. 2007/2008.
- [18] A. MUSSO, G. MALAVASI (1993), *"Un nuovo approccio per la valutazione dei limiti di convenienza del trasporto combinato"*, Ingegneria Ferroviaria, Aprile 1993.
- [19] A. MUSSO, G. MALAVASI (1993), *"Dove e perché localizzare gli interporti"*, Trasporti industriali e movimentazione, n. 418, Dicembre 1993.
- [20] F. RUSSO (2005), *"Sistemi di trasporto merci: approcci quantitativi per il supporto alle decisioni di pianificazione strategica tattica ed operativa a scala nazionale"*, Franco Angeli, Milano.
- [21] S. LIMBOURG, B. JOURQUIN (2007), *"Rail-Road terminal locations: aggregation errors and best potential locations on large networks"*, European Journal of Transport and Infrastructure Research EJTI 7, n. 4, pp.317-334.
- [22] DG Mobility and Transport (2008), TEN-T: Implementation of the Priority Projects, Progress Report.
- [23] CAFT data (2004), *Survey on Cross Alpine Freight Transport*.

Sommaire

LA LOCALISATION DES TERMINAUX POUR LE TRANSPORT COMBINÉ ROUTE - CHEMIN DE FER: EXEMPLE D'APPLICATION DES MODÈLES DE *FACILITY LOCATION* ET DE *OPTIMAL LOCATION*

Le présent écrit affronte l'étude de la localisation des terminaux pour le transport inter modal, en relation à la demande potentielle et à la configuration du réseau de distribution. En particulier, certaines méthodologies existantes, et désormais consolidées, sont présentées d'abord, méthodologies qui affrontent l'analyse des aspects localisateurs des infrastructures au service de l'inter modalité. Parmi ces-là le modèle de Weber, la théorie des aires de marché et le modèle de *facility location* permettent d'évaluer la localisation optimum par rapport à la demande potentielle; le modèle de *optimal location* permet par contre de développer un réseau *hub and spoke* dédié au transport combiné, tout en réalisant des importantes économies d'échelle. A conclusion de l'exposition théorique, une application des modèles de *facility location* et de *optimal location* est proposée, dont l'aire d'étude inclut les terminaux inter modaux italiens compris dans la zone d'influence du Couloir V du réseau de transport TEN-T.

Zusammenfassung

LOKALISIERUNG DER KOMBIVERKEHRSBAHNHÖFEN. ANWENDUNG DER *FACILITY LOCATION* UND *OPTIMAL LOCATION* MODELLEN

Lokalisierung der Kombiverkehrsbahnhöfen in Beziehung zur Angebot, Nachfrage und Verteilungsnetzgestaltung. Vorstellung von bekannten Methoden, die die obengennanten Problemen lösen können. In mitten von ihnen das Webersche Modell, die Theorie der Markträumen, das *facility location* Modell: alle diese die optimale Lokalisierung in Abhängigkeit der potenzielle Nachfrage erlauben. Das *Optimal Location Modell* erlaubt dazu die Gestaltung einer *Hub and Spoke* Netz die dem Kombiverkehr gewidmet ist. Beispiele von diesen Modellen und Vorschläge für italienischen Kombiverkehrsbahnhöfen die im Korridor V der TET-T sich befinden.



**SIM ACEI<sup>®</sup> v5**

**SIMULATORE DI APPARATI CENTRALI ELETTRICI A ITINERARI PER LA FORMAZIONE DEL PERSONALE**



**FORMAZIONE MOVIMENTO**



**ISTRUZIONE MANUTENTORI**



**TRASPORTO FERROVIARIO**



**TRASPORTO URBANO**

**STRUMENTI SOFTWARE INNOVATIVI AL SERVIZIO DELLA FORMAZIONE E DELL'INGEGNERIA**



**SHRAIL S.R.L. 20143 — MILANO VIA F. OLGATI, 26**  
**TEL. (+39)-02-58110934 FAX (+39)-02-58100320**  
**E-MAIL: INFO@SHRAIL.IT WWW.SHRAIL.IT**