



## **IL SISTEMA AEROPORTUALE SICILIANO: UN CASO DI STUDIO DI RIPARTIZIONE DELLA DOMANDA DI TRASPORTO AEREO**

### **Renato Lamberti**

Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti"  
Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
Via Claudio, 21 80125 Napoli  
Tel: +39 081.7683355 - Fax: +39.081.2390366  
Email: rlambert@unina.it

### **Vittorio de Riso di Carpinone**

Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti"  
Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
Via Claudio, 21 80125 Napoli  
Tel: +39 081.7683349 - Fax: +39.081.2390366  
Email: vderiso@inwind.it

### **Elpidio Romano**

Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "Luigi Tocchetti"  
Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
Via Claudio, 21 80125 Napoli  
Tel: +39 081.7683349 - Fax: +39.081.2390366  
Email: elromano@unina.it

# IL SISTEMA AEROPORTUALE SICILIANO: UN CASO DI STUDIO DI RIPARTIZIONE DELLA DOMANDA DI TRASPORTO AEREO

RENATO LAMBERTI - Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti – Università di Napoli

VITTORIO DE RISO DI CARPINONE – Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti –  
Università di Napoli

ELPIDIO ROMANO - Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti – Università di Napoli

## SOMMARIO

L'obiettivo dello studio è l'analisi di fattibilità di una terza infrastruttura aeroportuale della regione Sicilia, nel quadro di una integrazione sistemica con le infrastrutture esistenti. A tale scopo è stata utilizzata, in maniera innovativa, una procedura basata su metodi razionali sotto il profilo matematico in grado di analizzare ciascun intervento di progetto, mediante la valutazione quantitativa degli effetti che ciascuno di essi produce.

L'analisi è stata sviluppata attraverso fasi consecutive, relativamente indipendenti:

1. La prima fase ha riguardato la schematizzazione del bacino di traffico (zonizzazione) afferente ciascun aeroporto siciliano esistente;
2. La seconda fase ha simulato il comportamento degli utenti del trasporto aereo nella scelta tra alternative di spostamento competitive (costituite dagli aeroporti dell'area di studio); questa fase è stata sviluppata attraverso un ciclo di analisi, iterativo, cosiddetto di *Trial and Error*, costituito dalla:
  - 2.1. specificazione del modello: è stata utilizzata una tipologia di modelli matematici, definiti di *utilità aleatoria*, la cui forma funzionale è stata individuata ipotizzando un particolare comportamento di scelta dei viaggiatori aerei, nei confronti di diverse alternative aeroportuali interessanti la regione siciliana;
  - 2.2. la calibrazione del modello, consistente nella determinazione dei coefficienti incogniti che lo caratterizzano mediante la lettura interpretativa dell'attuale assetto;
  - 2.3. la validazione del modello, che verifica la riproducibilità della realtà comportamentale dei viaggiatori; in altre parole è stata controllata, mediante opportuni test statistici, la capacità del modello di simulare la attuale ripartizione di utenti tra le infrastrutture aeroportuali esistenti;
3. Successivamente alla costruzione del modello ed alla sua verifica di funzionalità, garantita dalla suddetta "attività" di validazione, lo stesso modello comportamentale è stato applicato ipotizzando alcuni scenari progettuali alternativi (nuovo aeroporto); sono stati quindi verificati gli effetti della distribuzione di traffico tra le infrastrutture aeroportuali a servizio dell'area di studio, potendo effettuare una prima valutazione, di massima, circa la scelta della localizzazione ottimale di un nuovo aeroporto.

## ABSTRACT

The subject of the present paper concerns the feasibility study of a new airport infrastructure located in southern Sicily. The new infrastructure should be complied

with actual infrastructures existing in Sicily. A new procedure based on rational mathematical methods has been used in this study. The procedure is able to analyze each one of the possible location hypothesized evaluating the effects that each one of them has on the other infrastructures.

The analyses has been developed in independent phases:

1. The first phase concerns the search of the catchment area for each of the current Sicilian airports;
2. The second is a simulation of the behavior of the air transport passengers among the different possible airport locations of the study area. This phase has been developed through a cyclic analyses called *Trial and Error*:
  - 2.1. Specification of the model: a mathematical kind of model called aleatory utility has been used. Its functional form has been determined under the hypothesis of a particular choice model among the different airports existing in Sicily for air passengers.
  - 2.2. The model calibration, consisting in the evaluation of the unknown coefficients;
  - 2.3. The model validation; it has been checked with statistic tests the capability of the model to simulate the actual passenger sharing among the existing infrastructures;
3. Finally, the same behavior model has been applied under the hypothesis of different scenarios (new possible locations). The effects of the traffic sharing have been verified among the infrastructures available in the catchment area and it has been possible to give an evaluation of the location in which to build the new infrastructure.

## **1. PREMESSA**

La Sicilia è un'isola ben "agganciata" alla terraferma attraverso collegamenti per via di mare, di terra ed aerea. In particolare, per quanto riguarda i legami marittimi, dal porto di Palermo sono disponibili collegamenti giornalieri a frequenza singola con Cagliari, Genova, Livorno e Napoli. Collegamenti di linea regolari vengono attuati con Malta, le isole Eolie e l'isola di Ustica.

Dal porto di Milazzo, è possibile raggiungere le isole Eolie mentre quello di Messina è frequentemente collegato con Villa S. Giovanni e Reggio Calabria. Sulla costa occidentale, i porti di Trapani e Marsala sono dedicati prevalentemente al traffico di cabotaggio con le isole Egadi, fatta eccezione per i collegamenti stagionali con Tunisi e Cagliari.

Sul versante orientale dell'isola non sono attivi collegamenti di linea; tuttavia, è particolarmente sviluppato il traffico merci, soprattutto per quello che riguarda gli oli minerali, che fa capo alle raffinerie della zona compresa fra Catania ed Augusta.

La costa a sud non prevede collegamenti con il continente ma solo con le isole di Linosa, Lampedusa e Pantelleria, attraverso la struttura portuale di Porto Empedocle, vicino Agrigento.

I collegamenti ferroviari sono legati alla spola dei traghetti fra Reggio Calabria e Villa S. Giovanni.

Per quanto riguarda invece i collegamenti per via aerea, questi vengono effettuati prevalentemente dagli aeroporti di Palermo e Catania. Esistono altre infrastrutture aeroportuali, ma sono relative prevalentemente a realtà locali, come le isole di Pantelleria e Lampedusa, oppure Trapani. Quest'ultimo aeroporto in particolare, pur

localizzato sulla terraferma, ha un traffico passeggeri molto basso (dell'ordine dei 50.000 passeggeri anno). Esso risulta, infatti, in diretta concorrenza con Palermo, come si vedrà nel seguito.

Dall'analisi di accessibilità agli aeroporti esistenti, è possibile individuare un'ampia zona, facente capo alla provincia di Agrigento e a parte delle province di Caltanissetta ed Enna, che risulta al di fuori di intervalli temporali di accessibilità normali, che sono dell'ordine, massimo, di 90 minuti.

Questa considerazione, unita al fatto che i collegamenti marittimi da porto Empedocle per il continente sono di fatto inesistenti, ha portato alla considerazione di esaminare la fattibilità di un'infrastruttura aeroportuale nella Sicilia centro meridionale, al fine di migliorare la mobilità di una delle aree più depresse del meridione.

## 2. ORGANIZZAZIONE DELLO STUDIO

La prima fase è stata quella di simulare, con modelli matematici, gli aspetti rilevanti del funzionamento del sistema di offerta, costituito dalle componenti fisiche ed organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto nella regione.

I modelli matematici dei sistemi di offerta di trasporto utilizzano da un lato la teoria dei grafi e delle reti per rappresentare la struttura topologica e funzionale del sistema e dall'altro i risultati di diverse discipline dell'ingegneria per descrivere le "prestazioni" e le interazioni degli elementi che lo compongono. Questi, che rappresentano i servizi con delle reti, ossia con insiemi di nodi, di archi e di funzioni di costo che esprimono a loro volta quello generalizzato di trasporto, percepito dagli utenti in funzione delle caratteristiche fisiche e funzionali delle infrastrutture e dei servizi medesimi, nonché dei flussi di traffico e degli eventuali fenomeni di congestione che essi flussi possono causare, hanno una duplice funzione: la rappresentazione schematica del funzionamento del servizio offerto agli utenti e gli impatti per l'ambiente esterno, nonché la possibilità di rivelare, mediante modelli di interazione domanda – offerta noti con il nome di modelli di assegnazione, i flussi che interessano ciascuna componente del sistema di trasporto.

La costruzione del modello di rete si articola in due fasi:

- la prima consiste nella cosiddetta "*delimitazione dell'area di studio*", nella quale vengono precisati i confini all'interno dei quali si trova il sistema di trasporto, oggetto dell'analisi, e nei quali si ritiene che possano esaurirsi, in via potenziale, gli effetti di un qualsiasi intervento; infatti, il grado di incisività dell'intervento dipenderà anche da altri fattori oltre l'accessibilità quali l'offerta disponibile sul sito in esame in termini di destinazioni, le tariffe, ecc. Nel caso in esame l'area di studio è stata determinata attraverso un'analisi razionale di tipo matematico. In altri termini considerando come punto centrale ciascun aeroporto esistente della regione, sono stati aggregati tutti i territori accessibili a ciascuno di essi in un raggio di 90 minuti/auto; oltre tale limite il mezzo aereo incomincia a perdere di competitività sulle altre modalità, che possono risultare più appetibili sui lunghi spostamenti, che un aereo è destinato a ricoprire, soprattutto in considerazione del perditempo delle operazioni di accettazione del passeggero, attesa al gate, controlli, ecc. che vanno a sommarsi al tempo di accesso all'infrastruttura. L'aggregazione dei comuni è stata effettuata utilizzando opportuni modelli di simulazione tipo *autoroute* in grado di determinare, nota ciascuna relazione origine – destinazione, il tempo minimo di percorrenza utilizzando le infrastrutture disponibili. I tempi di accesso sono stati

calcolati sulla base del percorso più veloce effettuabile in auto dai residenti del bacino da tutti i comuni con più di 5.000 abitanti e dalle località di maggiore rilievo turistico. I comuni sono quindi stati differenziati in almeno tre categorie, a seconda delle fasce orarie necessarie per l'accesso all'infrastruttura: da 0 a 30 min, da 30 a 60 min. e da 60 a 90 min. Sono state assunte come ipotesi del modello le velocità medie di percorrenza delle strade riportate nella tabella che segue e distinte per categoria;

	<b>Normale</b>	<b>Lenta</b>	<b>Urbana</b>	<b>Urbana-</b>
<b>Autostrada</b>	110	82	-	-
<b>Doppia carreggiata</b>	100	74	60	48
<b>Statale</b>	85	50	40	31
<b>Statale stretta</b>	64	48	32	24
<b>Provinciale</b>	48	35	28	21
<b>Altre Strade</b>	40	31	24	18

- la fase successiva è consistita nella “*costruzione del modello di rete*”, nella quale le infrastrutture di trasporto rilevanti sono schematizzate da un insieme di nodi ed archi; a quest'ultimi è associato un *costo generalizzato* di spostamento, rappresentativo delle “disutilità” che l'utente percepisce nell'effettuazione delle scelte di trasporto, e, più in particolare, nella scelta del percorso. In altri termini, il costo di trasporto di un arco riflette le diverse voci di costo sopportate dagli utenti per percorrere l'arco stesso (rappresentativo di un collegamento tra due posizioni spazio – temporali differenti, per esempio l'elemento fisico costituito da un tronco di strada). Le componenti del costo di trasporto sono, in generale, grandezze non omogenee, per esempio, il tempo di percorrenza, il costo monetario, le frequenze dei voli disponibili in ciascuno degli aeroporti esistenti. Per ragioni di praticità, allora, è stato necessario ridurre il costo anzidetto ad un'unica grandezza scalare, mediante l'uso di coefficienti moltiplicativi  $\beta$  di omogeneizzazione, il cui valore può essere stimato mediante opportuni modelli matematici, in una fase di studio nota come *calibrazione* e che è stata analizzata nel prossimo capitolo.

### **3. DELIMITAZIONE DEI BACINI DI UTENZA POTENZIALI E SCELTA DELLE POSSIBILI LOCALIZZAZIONI DA ANALIZZARE**

Come accennato al punto precedente, tale fase dello studio è stata effettuata con un modello di tipo *autoroute*, che fornisce le distanze e i tempi di percorrenza fra due località distinte.

Il primo *step* è consistito nella determinazione delle isocrone 30-60-90 relative ai tre aeroporti esistenti di Palermo, Catania e Trapani.

Le osservazioni che nascono da questo studio sono molteplici. In primo luogo, un'ampia area della Sicilia Centro Meridionale, costituita nella sua interezza dalla provincia di Agrigento e parte delle province di Caltanissetta e Enna, risulta al di fuori delle isocrone 90. Il baricentro di quest'area “sguarnita” è la zona di Licata; esso

tuttavia include anche la città di Agrigento.

Dal punto di vista dell'accessibilità agli aeroporti, il bacino di Catania è il più grande dei tre aeroporti considerati. D'altro canto, il bacino dell'aeroporto di Trapani è sostanzialmente incluso in quello di Palermo, fatta eccezione per la zona meridionale del bacino medesimo, che si estende verso oriente grazie alla presenza della SS 115.

E' possibile dunque formulare le due ipotesi localizzative che sono state esaminate con maggiore dettaglio.

La prima è ovviamente quella di Licata. Licata è situata in corrispondenza del baricentro geometrico dell'area al di fuori delle isocrone e quindi appare opportuno almeno considerare di poter ricoprire quest'area con un aeroporto, che avrebbe il minor grado di sovrapposizione possibile con le isocrone degli altri aeroporti. La scelta è dettata pertanto da considerazioni di tipo geometrico.

Al confine dell'area al di fuori delle isocrone, verso occidente, è situata la seconda alternativa di studio: Agrigento. La città di Agrigento, capoluogo di provincia, non è situata nel baricentro dell'area non coperta dalle isocrone, ma ha un numero di abitanti residenti, anche nei comuni vicini, molto superiore rispetto a quelli di Licata. Questo naturalmente genera l'opportunità di "catturare" maggior traffico, a causa della ridotta (praticamente nulla) distanza fra l'infrastruttura ed un'area densamente popolata. Difatti, l'utente Agrigentino, qualora venisse messo di fronte all'alternativa Palermo – Licata, dovrebbe pesare in qualche misura (misure che saranno illustrate più avanti) la distanza fra le due alternative e la possibilità di usufruire di un maggior numero di destinazioni e tariffe migliori su Palermo. E' evidente che, qualora la localizzazione risultasse Agrigento e non Licata, il peso della distanza scenderebbe a zero.

Sono state esaminate, in via preliminare, anche altre possibilità. Una di esse è quella relativa a Gela. Pur sottolineando l'ottima situazione orografica della zona (Gela è localizzata al centro di una pianura, e quindi non vi sarebbero ostacoli naturali lungo le traiettorie di avvicinamento e decollo), è necessario notare che le sue isocrone si sovrapporrebbero quasi completamente a quelle di Catania, generando un caso simile a quello di Trapani-Palermo. Gela è inoltre dotata di una serie di collegamenti stradali con il resto dell'isola perlomeno buoni, e lo sviluppo dell'infrastrutturazione stradale non potrà far altro che migliorare l'accessibilità di Gela alle altre infrastrutture aeroportuali dell'isola, particolarmente con Catania.

Si ricorda che l'individuazione di una certa ipotesi localizzativa e del suo possibile bacino di utenza avvengono attraverso la definizione di centroidi d'area. Pertanto, tutte le caratteristiche di traffico vengono determinate in relazione al centroide, anche se la localizzazione esatta dell'infrastruttura può non coincidere con il centroide stesso.

#### **4. ANALISI QUANTITATIVA DELLA DOMANDA DI TRASPORTO. METODOLOGIA OPERATIVA**

Individuata l'area di studio, coincidente con l'intera Regione Siciliana, è necessario, per facilitare la modellizzazione dello spostamento al suo interno, discretizzare il problema, suddividendo l'area di studio in "zone di traffico" (le 9 Province siciliane). In ciascuna di esse sono si possono individuare dei nodi ideali (ulteriori centroidi), approssimativamente coincidenti con il baricentro delle attività (Capoluoghi di Provincia), nei quali si ipotizza inizi e/o termini lo spostamento da e verso ciascun aeroporto dell'area.

Ciò fatto è possibile costruire il modello comportamentale che si articola, come detto, in una successione di fasi lavorative che consistono nella sua specificazione, ovvero nella determinazione del formalismo matematico capace di riprodurre la scelta degli utenti, nella calibrazione, ossia nella determinazione su base statistica utilizzando dati reali di spostamento dei coefficienti incogniti del modello, ed infine nella verifica della riproducibilità del reale comportamento dei viaggiatori aerei dell'area (validazione del modello). Bisogna considerare, peraltro, che il processo di costruzione-calibrazione-validazione potrebbe produrre risultati distanti dalla realtà esaminata; è necessario, pertanto, iterare la procedura fin quando non si giunge ad una accettabile qualità statistica del modello, ovvero la sua capacità riproduttiva dei dati reali disponibili.

#### 4.1. Specificazione del Modello

Ciascuno spostamento è il risultato di numerose scelte compiute dagli utenti del servizio di trasporto. Nel caso dei viaggiatori aerei le scelte ineriscono "il fare o meno uno spostamento per un certo motivo, in una certa fascia oraria e verso quale destinazione (aeroporto)".

Partendo da questi presupposti, molti dei modelli matematici utilizzati per simulare la domanda di spostamento tentano di riprodurre i comportamenti di scelta degli utenti, mediante modelli, appunto, comportamentali. A questa famiglia appartengono i modelli di utilità aleatoria, i quali si basano sulla ipotesi che ogni utente, eventualmente appartenente ad una classe di utenti omogenea dal punto di vista comportamentale, sia un decisore razionale, ovvero un massimizzatore dell'utilità relativa alle proprie scelte.

Nel caso di studio è stato messo a punto un modello del tipo *Nested Logit*, appartenente alla suddetta classe. In particolare per ciascuna alternativa di scelta (uno degli aeroporti dell'area di studio) è stata definita una funzione di utilità percepita dipendente dalle caratteristiche (attributi delle alternative):

- Tempo di spostamento, indicato con l'abbreviazione **TT** (*Travel Time*), ovvero il tempo impiegato per raggiungere ciascun aeroporto Siciliano dai capoluoghi di Provincia (espresso in minuti);
- Tariffa del biglietto aereo, (**FARE**) per l'insieme dei voli disponibili in ciascun aeroporto, calcolata mediante dati ufficiali (espressa in lire italiane);
- Frequenza dei voli disponibili da e verso ciascun aeroporto dell'area (**FREQ.**), espressa in numero di voli al giorno.

È stato provato, da alcuni studi di ricerca, che le caratteristiche considerate rilevanti nel compimento della scelta tra diversi aeroporti a servizio di un'area, sono proprio quelle elencate.

Ciascun attributo è stato moltiplicato per coefficienti incogniti ( $\beta_i$ ), da determinarsi nella fase di calibrazione, caratterizzanti il "peso" che ciascun utente attribuisce a ciascuno di essi.

È verosimile attendersi che per le diverse tipologie di viaggiatori aerei (turisti o viaggiatori di affari o altro) il comportamento di scelta sia diverso. Questo si traduce in un diverso valore dei coefficienti ( $\beta_i$ ) del modello per ciascuna categoria di utenti:

Il controllo di quanto detto rivestirà un ruolo importante nella fase di validazione del modello.

I modelli per la domanda di spostamenti aerei simulano la quantità media di spostamenti, con le loro caratteristiche rilevanti aventi come Origine o Destinazione gli aeroporti della Sicilia, in un determinato periodo di riferimento. Il sistema di modelli

simula il flusso di domanda di spostamenti emessi o generati da ciascuna provincia siciliana (zone dell'area di studio), nel periodo di riferimento, e la ripartisce fra i diversi aeroporti dell'area di studio.

La sequenza di sottomodelli è la seguente:

$$d_{od}^c[s, h, aereo] = n^c[o] \cdot p_d^c[s, h]$$

$$n^c[o] = n_{occ.}^c \cdot \alpha_i^c, \text{ costituisce il } \mathbf{modello\ di\ generazione};$$

$$p_i^c = \frac{\exp\left[\frac{V_i^c}{\theta_0}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{V_j^c}{\theta_0}\right]}, \text{ rappresenta il } \mathbf{modello\ di\ distribuzione}$$

inoltre:

- $\alpha_i$  è la percentuale di spostamenti, per un determinato motivo, compiuti dagli utenti della categoria  $c$ ;
- $c$  rappresenta la categoria di utenti omogenea dal punto di vista del comportamento di scelta: viaggiatori italiani (**DISC. FARE**), turisti stranieri (**INTL. DI LINEA**), viaggiatori che pagano una tariffa piena (**FULL FARE**) e viaggiatori charter (**CHARTER**);
- $o, d$  rappresentano, rispettivamente, il luogo di origine e di destinazione dello spostamento;
- $s$ , costituisce il motivo dello spostamento, diversificato in ragione delle diverse categorie di utenti e quindi del diverso comportamento degli stessi.

Il primo sottomodello costituisce il modello di *emissione o di generazione*, il quale fornisce il numero medio di spostamenti “rilevanti” effettuati nel periodo di riferimento ( $h$ ), per il motivo  $s$  dal generico utente appartenente alla categoria  $c$  con origine nella zona  $o$ . Gli *spostamenti rilevanti* possono essere tutti gli spostamenti effettuati per un certo motivo, ad esempio viaggi turistici ovvero d'affari.

Il modello utilizzato è appartenente alla categoria dei cosiddetti *modelli descrittivi*.

Ci sono alcune ipotesi assunte alla base dell'analisi:

- 1 Il numero di passeggeri in partenza è identico al numero di quelli in arrivo: l'analisi delle serie storiche dei dati, relativi agli aeroporti siciliani, dimostra l'attendibilità di tale ipotesi;
- 2 Il numero di viaggi generati per provincia è dato dal prodotto di un fattore di generazione per il numero di occupati della provincia. Tale fattore è stato determinato rapportando il numero di passeggeri aerei totali rilevati in Sicilia (escluso la domanda charter, che è l'unica disaggregata dalle statistiche ENAC, [1]) al numero di occupati totali in Sicilia. In questo modo si è ottenuto un indice “numero di spostamenti per occupato” su base regionale, e quindi valido per tutta la Sicilia, che fotografa la situazione allo stato attuale. Detto fattore può essere variabile in funzione del tempo, proprio in quanto legato all'incremento o decremento economico del territorio. Si è quindi formulata l'ipotesi semplificativa che vi sia proporzionalità diretta tra i viaggi in aereo e la sola parte produttiva della popolazione.

Il numero di passeggeri generati per ciascuna categoria di spostamenti aerei è stato determinato come segue (determinazione del coefficiente  $\alpha_i$ ):



- Passeggeri per il motivo turistico: differenziato tra viaggiatori che si spostano all'interno dei confini nazionali (**DISC. FARE**) e quelli che sono diretti o originati da paesi stranieri (indifferente, per l'ipotesi 1) (**INTL. DI LINEA**). E' stata considerata che una percentuale pari al 90% del numero totale di spostamenti aerei, interessanti l'area di studio, possa rappresentare il numero di spostamenti turistici: per essi è stato stimato, confrontando i dati statistici degli aeroporti siciliani degli ultimi anni, che il 95% si sposta avendo come origine/destinazione una località italiana, il 5% si sposta da o verso località straniere; il restante 10%, del totale, caratterizzerà gli spostamenti per lavoro. Questa ripartizione è il risultato di un'analisi condotta su diversi aeroporti e per diverse tipologie di collegamenti aerei, che ha dimostrato come, mediamente il 10% del carico pagante, su ciascun aereo, sia rappresentato da viaggiatori che pagano la tariffa piena e che quindi si muovono indipendentemente dalla tariffa [2, 3,4].
- Passeggeri per motivi di lavoro (**FULL FARE**); come spiegato precedentemente rappresenta il 10% degli spostamenti aerei complessivi interessanti, in origine o destinazione, l'area di studio;
- Passeggeri charter (**CHARTER**); questo numero è stato determinato conducendo un'analisi statistica sui dati ufficiali (ENAC) degli aeroporti della Sicilia esistenti.

Il *modello di distribuzione* è del tipo *Nested Logit*. Nel seguito si riporta la formulazione matematica del modello, ovvero la espressione dell'utilità associata a ciascuna alternativa, la probabilità di scelta di uno degli aeroporti della Regione:

$$V_i^c = \beta_1^c * TT_i + \delta * \log \sum_{i=1}^n \exp(\beta_2^c * Fare_i + \beta_3^c * Freq_i)$$

$$p_i^c = \frac{\exp\left[\frac{V_i^c}{\theta_0}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{V_j^c}{\theta_0}\right]}$$

dove  $c$  rappresenta la categoria di utenti omogenea dal punto di vista del comportamento di scelta: viaggiatori italiani (**DISC. FARE**), turisti stranieri (**INTL. DI LINEA**), viaggiatori d'affari (**FULL FARE**) e viaggiatori charter (**CHARTER**);

$i$  rappresenta uno degli aeroporti siciliani;  $\delta = \frac{\theta}{\theta_0}$ , con  $\theta$  e  $\theta_0$ , coefficienti del modello

Logit.

In particolare è possibile rendersi conto, dalle tabelle 1, 2 e 3 che seguono, del valore degli attributi caratterizzanti ciascuna alternativa di scelta, nella situazione attuale (anno 2000).

#### 4.2 Calibrazione del Modello.

La calibrazione del modello di scelta consiste, come detto, nell'ottenere delle stime dei coefficienti  $\beta$  (costo dello spostamento) e del parametro  $\theta$  (stabilità rispetto alla massimizzazione), sulla base delle scelte realmente effettuate dagli utenti. Ciò si ottiene utilizzando opportuni modelli statistici (detti di *Massima verosimiglianza*). Nella tabella 4 sono riportati i risultati della fase di calibrazione relativa ai pesi caratterizzanti ciascun attributo per le diverse categorie di utenti:

Destinazione	Attributi Aeroporto di Palermo											
ANNO 2000	TT (Travel Time; min.)									Freq. (Voli/sett.)	Fare (lire Ital.)	
Province	AG	CL	CT	EN	ME	PA	RG	SR	TP			
TT (APT - Prov.)												
<b>BOLOGNA</b>											4	661.500
<b>FIRENZE</b>											1,86	545.000
<b>LAMPEDUSA</b>											2	289.000
<b>MALTA</b>											0,15	311.000
<b>MILANO LINATE</b>											6	723.000
<b>MILANO MXP</b>											6	787.000
<b>NAPOLI</b>	90	112	164	115	174	29	202	192	48	2	370.000	
<b>PANTELLERIA</b>											1	300.000
<b>PARIGI CDG</b>											0,15	800.000
<b>PISA</b>											1	535.000
<b>ROMA</b>											17	504.000
<b>TORINO</b>											3,2	733.500
<b>TUNISI</b>											0,58	495.000
<b>VENEZIA</b>											3	651.000
<b>VERONA</b>											1	600.000

**Tabella 1 - Valore degli attributi rilevanti per l'alternativa aeroporto di Palermo.**

Destinazione	Attributi Aeroporto di Catania											
ANNO 2000	TT (Travel Time; min.)									Freq. (Voli/sett.)	Fare (lire Ital.)	
Province	AG	CL	CT	EN	ME	PA	RG	SR	TP			
TT (APT - Prov.)												
<b>AMSTERDAM</b>											0,43	664.000
<b>BARI</b>											0,86	530.000
<b>BOLOGNA</b>											4	628.000
<b>BRUXELLES</b>											0,58	500.000
<b>FIRENZE</b>											1	590.000
<b>LONDRA</b>											1	742.000
<b>MALTA</b>											2	311.000
<b>MILANO LINATE</b>	98	66	13	51	67	132	76	48	186	10	572.000	
<b>MILANO MXP</b>											7	810.000
<b>MONACO</b>											0,43	678.000
<b>NAPOLI</b>											5	484.000
<b>PARIGI (CDG)</b>											2	659.000
<b>PISA</b>											1	570.000
<b>ROMA</b>											23	490.000
<b>TORINO</b>											3	729.000
<b>VENEZIA</b>											5	711.000
<b>VERONA</b>											2,7	628.000

**Tabella 2 - Valore degli attributi rilevanti per l'alternativa aeroporto di Catania.**

Destinazione	Attributi Aeroporto di Trapani											
ANNO 2000	TT (Travel Time; min.)									Freq. (Voli/sett.)	Fare (lire Ital.)	
Province	AG	CL	CT	EN	ME	PA	RG	SR	TP			
TT (APT - Prov.)												
<b>PANTELLERIA</b>	92	127	195	136	205	76	217	227	28	0,72	340.000	
<b>ROMA</b>											2,5	380.000

**Tabella 3 - Valore degli attributi rilevanti per l'alternativa aeroporto di Trapani.**

	DISC. FARE	INTL. LINEA	FULL FARE	CHARTER
<i>Prima Dominante</i>	FARE	FARE	TT	FARE
<i>Seconda Dominante</i>	FREQ.	FREQ.	FREQ.	FREQ.
<i>Terza Dominante</i>	TT	TT		TT

**Tabella 4 - Importanza relativa degli attributi per ciascuna categoria di utenti aventi una diversa dimensione di scelta**

### 4.3 Validazione (verifica di significatività).

L'operazione di validazione, ossia la verifica della significatività del modello a riprodurre fedelmente, le scelte effettuate da un campione di utenti, è articolata utilizzando diversi test statistici. Sono stati compiuti, in questa fase, una serie di test statistici, formali ed informali (verifica dei segni attesi dei coefficienti del modello), tendenti a verificare la “bontà” del modello costruito.

Un primo test effettuato è quello, informale, sui segni dei coefficienti  $\beta$  calibrati; l'attesa è che i coefficienti di attributi corrispondenti a costi o a disutilità quali tempo di viaggio, costo monetario, disponibilità, abbiano segno negativo e, analogamente, che quelli relativi ad attributi di convenienza quali le frequenze dei voli, siano positivi. Detto test ha dato, ovviamente, esito positivo.

Segni errati dei coefficienti indicano che, probabilmente, vi sono degli errori in fase di specificazione del modello ossia nella misurazione di ciascuna variabile. I test statistici che sono stati utilizzati sono:

- il test del rapporto di verosimiglianza sui vettori dei coefficienti;
- il test  $\rho^2$  (rho quadrato) sulla bontà dell'accostamento del modello alla realtà.

Il primo verifica la cosiddetta ipotesi nulla secondo la quale tutti i coefficienti sono eguali a zero ovvero che il modello non fornisca nessuna ulteriore informazione rispetto all'ipotesi di equiprobabilità delle scelte (con  $\beta$  tutti nulli), contro l'ipotesi alternativa che ciò non sia vero; la forma della funzione statistica è la seguente:

$$LR = -2 \cdot [\log L(0) - \log L(\beta)].$$

Il test  $\rho^2$  è una misura normalizzata nell'intervallo (0,1) della capacità del modello a riprodurre le scelte osservate:

$$\rho^2 = 1 - \frac{\log L(\beta)}{\log L(0)}.$$

La statistica  $\rho^2$  vale "0" se  $L(\beta)=L(0)$ , vale "1" se il modello fornisce una probabilità pari ad "1" di osservare la scelta effettivamente fatta da ogni utente del campione. Nel caso in esame il valore di  $\rho^2$  ha raggiunto il valore di 0,4267, a testimonianza di una ragionevole “capacità” del modello a riprodurre le scelte degli utenti di trasporto aereo. E' appena il caso di ricordare che valori di  $\rho^2$  dell'ordine di 0,4 sono giudicati perlomeno buoni dalla letteratura internazionale [5].

Ricordiamo, inoltre, che il valore nullo dei coefficienti  $\beta$  è indicativo della equiprobabilità di scelta delle alternative di trasporto aereo (i diversi aeroporti della

Regione Sicilia), ovvero della impossibilità di percepire la diversità delle alternative disponibili.

Un ulteriore test consentirà di controllare, in seguito alla determinazione dei flussi passeggeri, realizzata come si dirà nel paragrafo successivo, che la differenza tra il numero medio di passeggeri rilevato mediante indagini statistiche e quello simulato sia quanto più piccolo possibile.

#### **4.4 Analisi dell'interazione domanda – offerta e modelli di assegnazione.**

I modelli di assegnazione ad una rete simulano l'interazione domanda - offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti su ciascun elemento del sistema di offerta (singolo aeroporto). In generale i flussi sugli archi sono il risultato del comportamento di scelta degli utenti che dipende dai costi che si determinano sulla rete (tempo di spostamento, costi monetari ecc.); nel contempo, questi costi, per effetto della congestione, possono dipendere dai flussi. Si può così determinare una condizione di mutua dipendenza tra costi e flussi sugli archi della rete, la quale può risolversi mediante l'utilizzo di opportuni modelli matematici. La formulazione di questo problema è realizzata combinando il modello di offerta e quello di domanda, descritti nei capitoli precedenti.

La procedura di assegnazione dipende dalla specificazione di alcune funzioni e modelli. Le funzioni di costo definite sugli archi della rete e che esprimono, come detto, le prestazioni del sistema in termini di tempo di viaggio, possono distinguersi in: dipendenti dai flussi sugli stessi archi (caso di reti congestionate) ovvero come indipendenti dai flussi d'arco (caso di reti non congestionate). I modelli di scelta del percorso, che rappresentano l'elemento di interazione tra domanda ed offerta, possono appartenere alla categoria dei modelli deterministici, in cui si assume che l'utilità percepita sia una costante e che gli utenti scelgano l'itinerario di minimo costo, o alla categoria dei modelli di tipo comportamentale, in cui si assume che l'utilità sia una variabile aleatoria e che gli utenti possano scegliere alternative anche di costo non minimo.

Nel caso specifico è stato fatto riferimento a modelli di assegnazione deterministici su reti non congestionate. Infatti è stato ipotizzato che gli utenti scelgano il percorso di minimo costo percepito per raggiungere da qualsiasi punto dell'area di studio un aeroporto a servizio della stessa.

#### **4.5 Stima della ripartizione dei flussi.**

Per quanto affermato, in assenza di dipendenza tra costi e flussi di percorso (reti non congestionate), sono stati utilizzati i modelli di assegnazione a costi costanti o di carico della rete (*Network Loading*): modello che consente di determinare, con estrema facilità, il numero di viaggiatori che utilizzano gli aeroporti siciliani.

Noti, infatti, i costi di percorso, le frequenze dei collegamenti aerei disponibili da ciascun aeroporto siciliano e le tariffe praticate, e quindi le probabilità di scelta degli stessi aeroporti, è bastato moltiplicare la domanda complessiva di spostamento aereo (*modello di generazione*) per le suddette probabilità ottenendo il numero di viaggiatori giornalieri che utilizza ciascuna alternativa aeroportuale. Questi valori sono stati confrontati con i dati statistici di traffico per ciascuno di essi. Il risultato, come può notarsi, dalla tabella che segue, è una corretta capacità del modello a simulare il comportamento di scelta dei viaggiatori siciliani:

Dall'analisi della tabella 5. emergono alcune linee di commento. L'aeroporto di Palermo assorbe completamente il traffico generato dalla sua provincia e quasi tutto quello di Trapani e Agrigento. Fa eccezione, per quanto riguarda Trapani, una parte dei passeggeri *full fare*, "allettati" dal basso tempo di accesso all'infrastruttura rispetto a Palermo mentre per quanto riguarda Agrigento, un'aliquota significativa dei *full fare* va su Catania poiché le destinazioni sono maggiori. La presenza dei *discount fare* di Enna e Caltanissetta su Palermo, più distante rispetto a Catania, può spiegarsi con i prezzi inferiori ottenibili a Palermo rispetto a Catania.

Aldilà di Enna e Caltanissetta, il tempo di accesso favorisce decisamente Catania rispetto a qualunque altra ipotesi.

Per quanto riguarda Trapani, a causa delle poche destinazioni disponibili, esso "cattura" solo una piccola parte del suo bacino naturale.

I risultati complessivi riguardanti la validazione del modello sono rappresentati in tab. 5: le differenze percentuali fra i valori osservati e quelli simulati sono inferiori al 2%.

APT	PALERMO (CINISI)				TRAPANI (BIRGI)				CATANIA (S. GIORGIO)			
	DISC. FARE	INTL. LINEA	FULL FARE	CHARTER	DISC. FARE	INTL. LINEA	FULL FARE	CHARTER	DISC. FARE	INTL. LINEA	FULL FARE	CHARTER
AG	446.222	20.685	36.518	126.056	985	-	19	0	0	2.852	15.768	1.643
CL	306.312	0	0	0	1.778	-	0	0	7.631	16.617	36.926	5.088
CT	0	0	0	0	0	-	0	0	1.217.265	64.067	142.370	105.035
EN	140.859	0	0	0	134	-	0	0	16.537	8.291	18.425	15.839
ME	0	0	0	0	0	-	0	0	724.921	38.154	84.786	288.764
PA	1.150.443	60.550	134.555	286.829	0	-	0	0	0	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	-	0	0	373.917	19.680	43.733	25.700
SR	0	0	0	0	0	-	0	0	454.302	23.911	53.135	77.713
TP	466.969	24.578	10.085	53.951	18	-	44.533	17	0	0	0	0
TOT.	3.264.612				47.483				3.883.066			
%	45,372%				0,660%				53,968%			
Valori reali	3.200.858				28.312				3.957.561			
% reali	44%				1%				55%			

Tabella 5 - Confronto tra la ripartizione reale e da modello tra gli aeroporti della Sicilia

## 5. PREVISIONE DELLA DOMANDA DI TRAFFICO AEREO NEL NUOVO ASSETTO

### 5.1 Stima dei parametri caratteristici del futuro interscambio passeggeri e merci

In questa fase di studio sono stati individuati quei parametri che caratterizzano la minore o maggiore propensione del bacino di traffico di generare e/o attrarre spostamenti sul trasporto aereo.

In particolare sono stati utilizzati dati storici riguardanti alcuni indici statistici:

- residenti;
- addetti, differenziati per ciascun settore di attività;
- attivi;

- arrivi turistici nazionali ed internazionali nelle diverse strutture ricettive dell'area di studio;
  - altre variabili da queste derivate;
- Oltre a queste variabili ne sono state considerate delle altre relative a caratteristiche dimensionali, funzionali e di traffico degli aeroporti.

## 5.2 Stima della futura domanda di trasporto aereo.

L'applicazione congiunta del modello di generazione/attrazione messo a punto nella fase precedente e del modello di distribuzione (*Nested Logit*), calibrato sulla rilevazione dell'attuale comportamento di scelta degli utenti del trasporto aereo, con l'aggiunta di alternative ipotetiche di trasporto aereo, la cui fattibilità tecnico – economica – ambientale sarà delineata nei paragrafi che seguono, ha consentito la determinazione della futura domanda di trasporto aereo (flussi di utenti) in un determinato intervallo temporale (tipicamente l'ora di punta).

Pertanto, è stata ipotizzata e verificata l'ipotesi di intervento caratterizzante la realizzazione e la funzionalità di un terzo aeroporto nella Sicilia Centro – Meridionale per ciascuna delle due alternative ed in corrispondenza di uno scenario caratterizzato dal fatto di avere almeno 4 destinazioni nazionali con frequenza doppia. Infatti, per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, mentre l'ipotesi di frequenza singola sarebbe troppo cautelativa e comunque non in grado di produrre ricavi efficaci una volta varata (si veda a tal proposito la situazione di Trapani, che ha un numero di destinazioni basso, tab. 5), uno scenario caratterizzato da frequenze maggiori appare certamente ottimistico in rapporto all'apertura di una situazione ex novo quale quella della previsione di un aeroporto nella Sicilia Centro Meridionale.

Nelle tabelle che seguono si riportano i valori degli attributi caratterizzanti le due alternative aeroportuali ipotizzate.

I valori delle tariffe, naturalmente al momento inesistenti, sono stati stimati sulla base di percorrenze omologhe partendo da altri aeroporti della Sicilia. Le possibili alternative di destinazione sono state invece scelte in funzione delle tratte maggiormente frequentate dai passeggeri in partenza ed arrivo da altri aeroporti siciliani.

L'applicazione del modello *Nested Logit*, con le alternative di trasporto aereo elencate, Palermo, Catania, Trapani ed uno dei due aeroporti di possibile nuova realizzazione (Agrigento o Licata), ciascuno caratterizzato dall'insieme degli attributi rappresentati, ha fornito i seguenti risultati in termini di flussi di viaggiatori aerei attratti da ciascun aeroporto, all'anno 2000.

Destinazione	Attributi Aeroporto di Agrigento										Freq. (Voli/sett.)	Fare (lire Ital.)
	TT (Travel Time; min.)											
ANNO 2000	AG	CL	CT	EN	ME	PA	RG	SR	TP			
Province												
TT (APT - Prov.)												
<b>NAPOLI</b>											2	450.000
<b>MI (LIN)</b>	10	64	103	67	165	109	116	144	109	2	700.000	
<b>MI (MXP)</b>										2	700.000	
<b>ROMA</b>										5	600.000	

**Tabella 7 - Attributi rilevanti per l'alternativa di realizzazione dell'aeroporto nella località di Agrigento**

Destinazione	Attributi Aeroporto di Licata										Freq. (Voli/sett.)	Fare (lire Ital.)	
ANNO 2000	TT (Travel Time; min.)												
Province	AG	CL	CT	EN	ME	PA	RG	SR	TP				
TT (APT - Prov. )													
NAPOLI												2	450.000
MI (LIN)	37	49	114	72	165	135	82	138	143			2	700.000
MI (MXP)												2	700.000
ROMA												5	500.000

**Tabella 8 - Attributi rilevanti per l'alternativa di realizzazione dell'aeroporto nella località di Licata**

	PALERMO (CINISI)				TRAPANI (BIRGI)				CATANIA (S. GIORGIO)				AGRIGENTO			
	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER
AG	151.450	20.685	0	38.310	0	-	0	0	0	2.852	0	0	295.757	-	52.305	89.389
CL	315.721	0	0	0	0	-	0	0	0	16.617	36.891	4.807	0	-	35	281
CT	0	0	0	0	0	-	0	0	1.217.265	64.067	142.370	105.035	0	-	0	0
EN	140.978	0	0	0	0	-	0	0	16.552	0	18.425	15.838	0	-	0	0
ME	0	0	0	0	0	-	0	0	724.921	38.154	84.786	288.764	0	-	0	0
PA	1.150.443	60.550	134.555	286.829	0	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
RG	0	0	0	0	0	-	0	0	373.917	19.680	43.733	25.700	0	-	0	0
SR	0	0	0	0	0	-	0	0	454.302	23.911	53.135	77.713	0	-	0	0
TP	466.987	24.578	3.864	53.968	0	-	50.754	1	0	0	0	0	0	-	0	0
TOT.	2.848.917				50.755				3.849.431				437.768			
%	39,641%				0,706%				53,562%				6,091%			

**Tabella 9 - Flusso di viaggiatori aerei con l'ipotesi di realizzazione del nuovo aeroporto ad Agrigento (anno 2000)**

	PALERMO (CINISI)				TRAPANI (BIRGI)				CATANIA (S. GIORGIO)				LICATA			
	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER	DOM.	TUR.	BUS.	CHARTER
AG	445.904	20.685	0	25.540	1.302	-	0	0	0	2.852	0	0	0	-	52.305	102.159
CL	222.017	0	0	0	1.705	-	0	0	0	16.617	36	1.526	91.999	-	36.890	3.562
CT	0	0	0	0	0	-	0	0	1.217.265	64.067	142.370	105.035	0	-	0	0
EN	140.820	0	0	0	177	-	0	0	16.533	8.291	18.425	15.839	0	-	0	0
ME	0	0	0	0	0	-	0	0	724.921	38.154	84.786	288.764	0	-	0	0
PA	1.150.443	60.550	134.555	286.829	0	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
RG	0	0	0	0	0	-	0	0	373.917	19.680	43.732	25.700	0	-	1	0
SR	0	0	0	0	0	-	0	0	454.302	23.911	53.135	77.713	0	-	0	0
TP	466.949	24.578	5.890	53.948	37	-	48.728	20	0	0	0	0	0	-	0	0
TOT.	3.038.710				51.969				3.817.567				286.915			
%	42,233%				0,722%				53,057%				3,988%			

**Tabella 10.: Flusso di viaggiatori aerei con l'ipotesi di realizzazione del nuovo aeroporto a Licata (anno 2000)**

Occorre a questo punto illustrare i risultati ottenuti.

Entrambe le alternative esaminate presentano, ovviamente, valori nulli in corrispondenza dei passeggeri dei voli internazionali di linea in quanto non sono previsti voli di questo tipo.

L'alternativa Agrigento sostanzialmente attrae traffico dalla sua provincia. Fanno eccezione una parte dei viaggiatori *discount fare*, circa un terzo, ancora attratti dalle

tariffe di Palermo, leggermente inferiori rispetto ad Agrigento. Rispetto alla situazione attuale quindi, l'alternativa Agrigento attrae traffico da un bacino che in una situazione di "non intervento" farebbe riferimento all'aeroporto di Palermo.

Abbastanza simili sono i risultati ottenuti per Licata. Rispetto all'ipotesi Agrigento, c'è una maggiore influenza su Caltanissetta, più vicina rispetto ad Agrigento, mentre la relativa lontananza da Agrigento fa sì che il peso del TT ridistribuisca su Palermo i viaggiatori *discount fare*. Rispetto all'ipotesi Agrigento, l'ipotesi Licata attrae un volume di traffico inferiore.

La "sottrazione" di domanda dagli altri aeroporti non deve far pensare che la nuova infrastruttura della Sicilia Centro Meridionale, qualora realizzata, debba "vivere" solo grazie a questo fenomeno. La redistribuzione, è generata dall'ipotesi che il nuovo aeroporto, una volta aperto, si porti subito ad una situazione di regime, con un traffico potenziale passeggeri che è quello generato in tutta la Sicilia, e quindi quello gravitante sugli aeroporti attualmente esistenti. L'incremento di domanda, rispetto alla situazione attuale, generato dalla nuova infrastruttura sarà invece generato negli anni a venire.

Per quanto riguarda l'aeroporto di Trapani, rispetto alla distribuzione ottenuta sullo "status quo", esso rimane sostanzialmente invariato rispetto a tutte le alternative.

## 6. CONCLUSIONI

L'oggetto del lavoro presentato in queste pagine è l'applicazione di una metodologia di analisi della domanda, applicata nella generalità dei casi alle infrastrutture di trasporto terrestri, agli aeroporti. In particolare, essa è stata applicata ad un caso pratico, per l'ipotesi di realizzazione di un nuovo aeroporto nella Sicilia centro meridionale, nel quadro di una integrazione sistemica con le infrastrutture esistenti. L'analisi è stata sviluppata in fasi, tutte descritte nel testo del presente lavoro, e i risultati ottenuti confortano, in prima analisi e dal punto di vista quantitativo, la scelta della fattibilità di un aeroporto ex novo nell'area oggetto di studio.

### Bibliografia

- [1] ENAC "Statistiche dell'aviazione civile" dal 1990 al 2000;
- [2] Romano E. de Riso V. Tocchetti A. "*A methodology for air route planning: the case NAP-New York*", Atti del IV convegno ATRG 2000, Amsterdam, 2-5 luglio 2000;
- [3] Ashford N Benchman M. "*Passengers' choice of airport: an application of the multinomial logit model*", Transportation Research Record n. 1147 pagg. 1-5;
- [4] GESAC, dati statistici relativi agli anni precedenti al 1999;
- [5] Cascetta E. *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*, Utet Torino, 1998.