

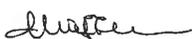
UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Carmen Forciniti 

LA MODELLAZIONE DELLE INTERAZIONI TRA IL SISTEMA
TERRITORIALE E IL SISTEMA DEI TRASPORTI

Tesi di Dottorato in Tecnologie e Pianificazione Ambientale
Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche
Ciclo XXV (2009-2012)
S.S.D. ICAR 05-Trasporti (08/A3)

Cordinatore: prof. Renato S. Olivito 

Tutor: ing. Gabriella Mazzulla 

INDICE

Introduzione	1
Capitolo 1 – Lo studio delle interazioni fra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti	
1.1 Generalità	15
1.2 L’influenza delle variazioni del sistema territoriale sul sistema dei trasporti	18
1.3 L’influenza di variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale	22
1.4 L’accessibilità: un elemento chiave della relazione tra sistema territoriale e sistema dei trasporti	23
1.4.1 Il concetto di accessibilità	23
1.4.2 Misure di accessibilità	25
1.5 Tendenze della ricerca	30
Capitolo 2 – I modelli per la simulazione delle interazioni trasporti-territorio	
2.1 Generalità	33
2.2 Modelli di interazione trasporti-territorio	35
2.3 Modelli per valutare l’influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti	40
2.4 Modelli per valutare l’influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale	44

Capitolo 3 – I modelli operativi integrati per la simulazione delle interazioni trasporti-territorio

3.1 Generalità	53
3.2 Descrizione dei modelli operativi integrati selezionati	55
3.2.1 Il modello ITLUP	55
3.2.2 Il modello MEPLAN	56
3.2.3 Il modello TRANUS	57
3.2.4 Il modello MUSSA	58
3.2.5 Il modello NYMTC-LUM	59
3.2.6 Il modello UrbanSim	60
3.3 Confronto tra i modelli operativi integrati selezionati	61

Capitolo 4 – Le tecniche di analisi spaziale

4.1 Generalità	65
4.2 Autocorrelazione spaziale	66
4.2.1 Definizione di autocorrelazione spaziale	66
4.2.2 Misure globali di autocorrelazione spaziale	69
4.2.3 Misure locali di autocorrelazione spaziale	70
4.3 Eterogeneità spaziale	72
4.3.1 Definizione di eterogeneità spaziale	72
4.3.2 Modelli di regressione per classi di dati	73
4.3.3 Modelli di regressione multilivello	73
4.3.4 Modelli di regressione geograficamente pesata	74
4.4 Problema dell'unità areale modificabile	77

Capitolo 5 – I modelli ad equazioni strutturali

5.1 Generalità	79
----------------	----

5.2	Caratteristiche dei modelli SEM	80
5.3	Metodi di specificazione del modello	84
5.4	Metodi di calibrazione del modello	86
5.5	Metodi di validazione del modello	88
5.6	Analisi fattoriale	91
Capitolo 6 – Il caso di studio		
6.1	Generalità	97
6.2	L'area urbana Cosenza – Rende	98
6.3	Analisi ed elaborazione dei dati relativi all'area di studio	101
6.3.1	Costruzione del GIS	101
6.3.2	Analisi delle caratteristiche demografiche	104
6.3.3	Analisi delle caratteristiche socio-economiche	107
6.3.4	Analisi del patrimonio edilizio	111
6.3.5	Analisi delle infrastrutture di trasporto	115
6.3.6	Analisi della mobilità sistemica	118
6.3.7	Analisi dell'accessibilità	121
Capitolo 7 – Valutazione dell'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti		
7.1	Generalità	131
7.2	Applicazione delle tecniche di associazione spaziale	132
7.2.1	Statistiche globali di associazione spaziale	132
7.2.2	Statistiche locali di associazione spaziale	137
7.3	Applicazione delle tecniche di eterogeneità spaziale	143
7.3.1	Studio e definizione del modello di regressione GWR	143
7.3.2	Calibrazione del modello GWR e analisi dei risultati	145

7.3.3 Confronto tra il modello di regressione globale OLS e il modello di regressione locale GWR	153
7.4 Applicazione della tecnica di modellazione SEM	156
7.4.1 Studio e definizione del modello	156
7.4.2 Calibrazione del modello e analisi dei risultati	158
Capitolo 8 – Valutazione dell’influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale	
8.1 Generalità	163
8.2 Delimitazione dell’area di influenza	164
8.3 Analisi dei cambiamenti avvenuti nel sistema territoriale	167
8.3.1 Variazione della superficie edificata	167
8.3.2 Stima della variazione della popolazione	177
Considerazioni conclusive	181
Riferimenti bibliografici	187

INTRODUZIONE

Fin dall'antichità, il legame fra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti è stato sempre molto forte. La necessità di spostarsi ha portato l'uomo a collocare la propria dimora in prossimità delle vie di comunicazione sia naturali, come i fiumi e i mari, sia artificiali, come strade e ferrovie, a seconda del periodo storico.

Le prime civiltà della storia sorsero, infatti, sulle rive dei fiumi Tigri ed Eufrate, in Mesopotamia, sia per la particolare fertilità del terreno sia per la possibilità di spostamento offerta dai corsi d'acqua. Anche gli antichi Egizi costruirono i propri insediamenti lungo le sponde di un fiume, il Nilo, sfruttando sia i benefici offerti all'agricoltura sia il corso d'acqua come via di comunicazione e di trasporto dei materiali utilizzati nelle loro imponenti costruzioni.

Un ulteriore caso in cui risulta chiaro il legame trasporti-territorio già presente nell'antichità è rappresentato dalla civiltà dei Fenici. Questo popolo localizzò i propri insediamenti sulle coste orientali del Mediterraneo, nei pressi dell'attuale Libano. I fenici erano abili navigatori e riuscirono a sfruttare le potenzialità del mare come via di comunicazione, portando le proprie merci sulle coste dell'intero Mediterraneo.

In seguito, anche gli antichi Greci utilizzarono il mare come via di navigazione per sviluppare i propri traffici. Lungo le coste del Mediterraneo, soprattutto in Italia, realizzarono porti in prossimità dei quali si svilupparono città fiorenti.

Con i Romani il sistema dei trasporti terrestri assume un ruolo rilevante per la diffusione della civiltà. Infatti, durante l'Impero Romano fu costruita una fitta rete di strade che collegava Roma con tutte le regioni dell'Impero. Oltre a favorire le attività commerciali, questa rete stradale favorì la nascita di nuovi insediamenti. Questi centri in pochi anni divennero delle vere e proprie città grazie alla loro posizione strategica.

La tendenza a localizzare le città in corrispondenza delle grandi vie di comunicazione si è conservata anche nella storia più recente. Mentre in passato le vie di comunicazione principali erano soprattutto fiumi e mari poiché non erano ancora stati inventati mezzi di trasporto terrestri a motore, con la Rivoluzione Industriale e l'invenzione della locomotiva a vapore la ferrovia diventò la principale via di comunicazione. Nel XIX secolo, furono costruite numerose città industriali lungo la rete ferroviaria che rappresentava la via per distribuire le merci prodotte. Oltre all'aspetto più propriamente economico, soprattutto nel XX secolo, la ferrovia ha favorito la nascita di centri urbani a partire da piccole aggregazioni di case localizzate in prossimità della stazione, fenomeno che manifesta in che misura il sistema dei trasporti possa influenzare la localizzazione delle residenze.

Con la rapida diffusione delle automobili, anche la rete stradale ha assunto un ruolo decisivo nella localizzazione delle abitazioni. Ai giorni nostri, un forte potere attrattivo per la localizzazione delle residenze è la presenza di una strada che permetta di raggiungere i luoghi in cui si svolgono le principali attività della giornata tipo di un individuo, quali lavoro, studio o acquisti. La presenza di residenze rende la zona attrattiva per la localizzazione di attività commerciali e di servizi. La necessità di raggiungere le attività dislocate in diverse zone comporta la generazione di spostamenti per superare le distanze esistenti grazie all'utilizzo delle infrastrutture del sistema dei trasporti.

Il legame tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti può essere rappresentato come una relazione ciclica, come dimostrato da studi empirici presenti in letteratura. In altri termini, i cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale influenzano le caratteristiche del sistema dei trasporti e viceversa. La distribuzione delle attività residenziali, industriali o commerciali nell'area urbana determina la localizzazione di attività umane quali lavoro, shopping, istruzione, tempo libero. A loro volta, le attività umane distribuite nello spazio producono la generazione di spostamenti per

superare la distanza esistente tra i luoghi in cui sono localizzate le diverse attività. L'offerta di trasporto permette di superare queste distanze e può essere misurata in termini di accessibilità, che determina le scelte di localizzazione delle attività (residenziali ed economiche) e, di conseguenza, produce variazioni nell'assetto del sistema territoriale. In altri termini, gli interventi effettuati sul sistema dei trasporti influenzano non solo il comportamento degli utenti del sistema di trasporto (e quindi la domanda di trasporto) ma anche la futura localizzazione delle residenze e delle attività.

In questo lavoro, saranno analizzate le interazioni fra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti, assumendo come area di studio l'area urbana formata da Cosenza e Rende in Calabria. Il lavoro è organizzato in otto capitoli.

I primi tre forniscono un inquadramento generale della tematica di ricerca e l'analisi della letteratura scientifica. Infatti, prima di affrontare il caso di studio, è necessario studiare nel dettaglio tutti gli aspetti che caratterizzano il fenomeno delle interazioni trasporti-territorio svolgendo un'approfondita analisi dei lavori esistenti nella letteratura riguardante l'argomento.

Nel dettaglio, il primo capitolo fornisce nella prima parte le informazioni generali sul processo che regola le interazioni tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti, definendo le variabili che entrano in gioco. Per prima cosa, viene proposta la definizione dei due sistemi e successivamente l'analisi delle variabili fondamentali. Il sistema territoriale, indicato spesso con l'espressione *land use* (uso del territorio), comprende tutte le attività umane che si svolgono nello spazio, quali la residenza e le attività economiche in generale. L'assetto delle attività è funzione della distribuzione spaziale delle stesse e delle caratteristiche del territorio. Il sistema dei trasporti può essere definito come l'insieme delle componenti e delle loro reciproche relazioni che realizzano la produzione e il consumo del servizio di trasporto in un certo ambiente. Dagli studi svolti nel corso degli anni sulle dinamiche urbane è emerso che i due sistemi sono mutuamente interconnessi e si influenzano reciprocamente.

Diverse sono le variabili territoriali che influenzano il sistema dei trasporti e, nello specifico, i comportamenti di viaggio degli utenti del sistema dei trasporti. Prima fra tutte, la densità abitativa, che influenza il numero di spostamenti effettuati, la lunghezza percorsa durante il singolo spostamento e la scelta del modo di trasporto utilizzato. Infatti, nelle città compatte, cioè con

densità elevata, si effettua un numero minore di spostamenti caratterizzati da lunghezze inferiori rispetto alle città che presentano bassi valori di densità. Inoltre, la densità influenza anche la scelta del modo di trasporto. Nelle città con elevata densità abitativa, la popolazione preferisce spostarsi utilizzando i sistemi di trasporto collettivo oppure mezzi non motorizzati. Un'altra variabile che influenza i comportamenti di viaggio è la struttura del quartiere. Nei quartieri tradizionali si registra un numero maggiore di spostamenti effettuati a piedi rispetto al caso dei quartieri sub-urbani. Questo fenomeno, però, non sempre si verifica ma varia a seconda del caso di studio e delle variabili considerate, come ad esempio la localizzazione del quartiere. Infine, nelle città di grandi dimensioni, la maggior parte degli spostamenti si realizza utilizzando i mezzi di trasporto collettivo. In realtà, questo dipende anche dalla disponibilità del servizio, nettamente superiore nelle città di grandi dimensioni e più densamente abitate.

L'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale è difficile da quantificare perchè induce cambiamenti nell'assetto del territorio che avvengono molto lentamente e che non sono direttamente osservabili. Sperimentalmente si è visto che la realizzazione di una nuova infrastruttura ha comportato la nascita di insediamenti urbani, lungo il suo tracciato nel caso di un'infrastruttura stradale, e in corrispondenza delle stazioni nel caso di un'infrastruttura ferroviaria.

Nel primo capitolo viene definito anche il concetto di accessibilità, che rappresenta un elemento chiave della relazione tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti. Nonostante sia un aspetto fondamentale in molti campi di studio, l'accessibilità è spesso un concetto abbastanza difficile e complesso da comprendere, per cui è difficile darne una definizione universale. Nello studio delle interazioni trasporti-territorio, l'accessibilità può essere definita come la misura in cui i due sistemi permettono ad un singolo o ad un gruppo di individui di partecipare ad attività localizzate sul territorio mediante uno o più modi di trasporto. Le variabili che influenzano l'accessibilità possono essere raggruppate in quattro componenti fondamentali, tra le quali esistono relazioni reciproche: componente territoriale, componente trasportistica, componente temporale e componente individuale. Teoricamente, una misura di accessibilità dovrebbe comprendere tutte le componenti e le rispettive variabili. Nella pratica, le misure di accessibilità si concentrano su una o più

componenti di accessibilità, a seconda dello scenario analizzato. Generalmente le misure di accessibilità possono essere classificate in quattro categorie: misure *infrastructure-based* (basate sulle infrastrutture), misure *location-based* (basate sull'ubicazione delle attività), misure *person-based* (basate sulle percezioni degli individui) e misure *utility-based* (basate sull'utilità).

Il secondo capitolo riguarda lo studio dei modelli di interazione trasporti-territorio, noti come modelli LUTI (Land Use-Transport Interaction), presenti in letteratura. I modelli per la simulazione delle interazioni che avvengono tra il sistema territoriale e quello dei trasporti si differenziano in base alle variabili considerate per modellare il fenomeno, oppure in base alla metodologia di analisi utilizzata. I modelli trattati in questo lavoro sono stati divisi in tre gruppi fondamentali: modelli di interazione trasporti-territorio, che studiano le relazioni reciproche tra le variabili dei due sistemi; modelli per valutare l'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti e modelli per valutare l'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale.

Alla base dei modelli di interazione trasporti-territorio si possono individuare cinque approcci teorici.

Il primo approccio è basato sulla teoria dell'economia urbana e i primi contributi sono stati sviluppati già a partire dal XIX secolo. Successivamente questi modelli sono stati modificati estendendo i concetti di base verso forme più complete di programmazione basate sulle reti e sulla massimizzazione dell'utilità.

Il secondo approccio è quello seguito nel modello di Lowry, che rappresenta proprio il capostipite della famiglia dei modelli LUTI. Il modello originale considera la distribuzione spaziale della popolazione e delle attività economiche, gli schemi di distribuzione delle merci e l'uso del territorio.

In base al terzo approccio, la localizzazione delle attività viene descritta tramite l'ottimizzazione di una funzione obiettivo in cui compaiono i costi di trasporto e le variabili delle attività residenziali ed economiche. Questa formulazione è stata possibile grazie allo sviluppo di programmi matematici.

Il quarto approccio teorico è rappresentato dai modelli spaziali multisettoriali basati su strutture Input-Output e utilizzati nell'ambito dei problemi di localizzazione delle attività produttive e residenziali.

L'ultimo approccio è quello basato sulla microsimulazione, secondo il quale alcuni attributi del viaggio o le specifiche scelte di viaggio sono generati casualmente in accordo con una predefinita funzione di distribuzione di probabilità, al fine di ottenere una rappresentazione dettagliata degli spostamenti o delle attività incluse in un viaggio.

I modelli per valutare l'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti considerati in questo capitolo sono stati classificati in funzione della metodologia di analisi applicata. Una tecnica utilizzata spesso per stimare l'influenza delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio è il modello di regressione. Ad esempio, applicando la regressione lineare, a partire da variabili socio-demografiche, economiche, territoriali e relative alla dotazione infrastrutturale è stato stimato il numero di spostamenti emessi suddivisi, in base al modo di trasporto utilizzato, in spostamenti non motorizzati e spostamenti motorizzati. Oltre alla tecnica di regressione, un altro approccio seguito per studiare le interazioni trasporti-territorio da alcuni autori è rappresentato dalla tecnica di modellazione ad equazioni strutturali (SEM, Structural Equation Modelling). Anche in questo caso, le variabili coinvolte sono relative alle caratteristiche socio-demografiche ed economiche della popolazione, alle caratteristiche di uso del territorio e alla dotazione infrastrutturale. Nella maggior parte dei casi, l'analisi mostra una forte influenza delle variabili di uso del territorio sui comportamenti di viaggio, soprattutto quando sono oggetto di studio gli spostamenti sistematici come quelli casa-lavoro.

I modelli per valutare l'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale sono focalizzati sulla determinazione dell'accessibilità, intesa come fattore che interviene nella determinazione dei cambiamenti della localizzazione delle attività e della domanda di trasporto. Infatti, quando in una zona si realizza un intervento migliorativo nel sistema dei trasporti anche l'accessibilità migliora, per cui la zona diventa più attrattiva come destinazione dello spostamento o come zona residenziale o industriale in relazione al tipo di intervento effettuato. In questi modelli, le misure di accessibilità sono incluse nella determinazione della localizzazione delle attività. Anche questa categoria di modelli è stata analizzata in base alla metodologia seguita. In letteratura i modelli che stimano l'influenza dei trasporti sul territorio sono presenti in numero inferiore rispetto a quelli che

stimano l'influenza del territorio sui trasporti, in quanto la modellazione dell'impatto dei trasporti sulle variabili territoriali richiede il coinvolgimento di un gran numero di variabili appartenenti a diversi settori. L'approccio più utilizzato è la teoria dell'utilità casuale, in cui si ipotizza che l'utente in un insieme di alternative scelga quella che gli permette di massimizzare la propria utilità. I risultati dei modelli per la localizzazione della residenza basati su questo approccio mostrano che i fattori che incidono maggiormente sulla scelta della residenza sono le caratteristiche del sistema dei trasporti e l'accessibilità della zona di residenza verso la zona in cui è localizzato il posto di lavoro. Oltre ai modelli di utilità casuale, per stimare l'impatto dei trasporti sulle variabili territoriali in letteratura sono presenti anche modelli di regressione in cui viene stimata l'accessibilità in funzione di variazioni della popolazione. Per tenere in considerazione la variazione spaziale delle variabili che non vengono considerate nella regressione ordinaria, in letteratura sono stati proposti anche modelli di regressione spaziale, come la regressione geograficamente pesata (GWR, Geographically Weighted Regression) per determinare la variazione di superficie edificata in funzione di variabili di accessibilità e territoriali.

Il terzo capitolo riguarda i modelli operativi integrati per valutare le interazioni trasporti-territorio, che permettono di trattare un gran numero di variabili relative non solo al sistema territoriale e al sistema dei trasporti, ma anche al mercato immobiliare e al mercato del lavoro. In particolare, alcuni modelli operativi integrati, rappresentativi della serie di approcci usati più comunemente nella pratica, saranno analizzati e confrontati tra loro.

Dopo aver effettuato l'analisi dei lavori presenti in letteratura, il quarto e il quinto capitolo presentano le basi teoriche delle tecniche utilizzate per studiare le interazioni trasporti-territorio in riferimento al caso di studio considerato. In particolare, il capitolo quattro illustra le tecniche di analisi spaziale che permettono di studiare la forma dell'eventuale aggregazione spaziale delle variabili e l'entità delle relazioni spaziali che intercorrono tra di esse. Per descrivere e modellare i dati, l'analisi spaziale è affiancata alle tecniche di statistica spaziale, che comprendono formulazioni e relazioni basate su reali misure spaziali di superficie, lunghezza, prossimità, orientamento. Queste tecniche sono sempre più utilizzate nel campo della geografia, della pianificazione territoriale e dei trasporti. Tra le diverse

tecniche di statistica spaziale, ne sono state individuate tre che rappresentano quelle più importanti: autocorrelazione spaziale (spatial autocorrelation), eterogeneità spaziale (spatial heterogeneity) e problema dell'unità areale modificabile (Modifiable Areal Unit Problem, MAUP).

L'autocorrelazione spaziale è la tendenza delle variabili di mostrare un certo grado di variazione sistematica nello spazio, e si verifica in quanto i fenomeni che avvengono nel mondo reale sono caratterizzati dalla presenza di ordine, schemi e concentrazioni sistematiche piuttosto che da schemi casuali. Di conseguenza, la presenza di autocorrelazione spaziale comporta l'insorgere di una relazione di dipendenza tra i diversi valori della stessa variabile e viene meno l'ipotesi di osservazioni indipendenti generalmente assunta nelle statistiche tradizionali non spaziali. Applicando le statistiche di autocorrelazione spaziale è possibile individuare la dipendenza esistente tra i valori di una variabile localizzati in punti vicini, o individuare schemi sistematici nei valori di una variabile attraverso la localizzazione di ciascuno di essi su una mappa in base a fattori comuni. L'autocorrelazione spaziale può essere modellata mediante uno specifico tipo di modelli di regressione, noti con il nome di modelli di auto-regressione spaziale. Prima di avviare il processo di modellazione del fenomeno, è opportuno eseguire un'analisi spaziale esplorativa dei dati, nota con l'acronimo ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis), che è una raccolta di tecniche per visualizzare le distribuzioni spaziali, identificare localizzazioni atipiche, individuare schemi di associazione spaziale e aggregazioni di valori simili. Le misure di autocorrelazione spaziale si dividono in misure globali, riferite al fenomeno nella sua interezza, e misure locali, che si focalizzano su ciascuna delle unità spaziali nelle quali è suddivisa l'area di studio.

L'eterogeneità spaziale si ha quando la relazione che lega la variabile dipendente e le variabili indipendenti non è univoca ma varia nello spazio. La presenza o meno di eterogeneità spaziale nella distribuzione dei valori delle variabili viene valutata mediante indici e statistiche applicate ai risultati ottenuti da tecniche statistiche non spaziali. Se questi indici presentano valori diversi da quelli di riferimento, le variabili considerate sono soggette all'eterogeneità spaziale. Tra i diversi modelli di eterogeneità spaziale è possibile distinguere tre modelli di rilevante importanza: modelli di regressione per classi di dati (*switching regressions*), modelli di regressione

multilivello (*multilevel models*) e modelli di regressione geograficamente pesata (Geographically Weighted Regression, GWR). Queste tecniche di regressione spaziale permettono di tenere in considerazione la variazione dei valori delle variabili tra le unità spaziali in cui viene divisa l'area oggetto di studio. Di conseguenza, portano a risultati diversi da quelli che si ottengono applicando tecniche di regressione non spaziale.

Il problema dell'unità areale modificabile è una potenziale fonte di errore nelle analisi spaziali perché si utilizzano quasi sempre fonti di dati aggregati, cioè dati riferiti ad unità areali come sezioni censuarie o zone di traffico. Poiché i confini delle unità spaziali possono essere arbitrari, è possibile avere conseguenze sull'unicità dei risultati dell'analisi. In altri termini, per la stessa popolazione oggetto di studio si possono ottenere diversi risultati a seconda della definizione spaziale dei confini di ciascuna unità territoriale.

Il quinto capitolo riguarda i modelli ad equazioni strutturali (SEM, Structural Equation Modelling), che sono modelli di regressione multivariati. La tecnica di modellazione SEM permette di spiegare la relazione esistente tra le variabili indipendenti (esogene) e le variabili dipendenti (endogene). Le variabili del modello possono essere osservate oppure latenti, cioè non osservate direttamente ma definite a partire dalle variabili osservate. Inoltre, le variabili possono influenzarsi reciprocamente l'una l'altra, sia direttamente sia attraverso altre variabili che fungono da intermediarie.

I modelli ad equazioni strutturali sono chiamati anche modelli ad equazioni simultanee poiché sono composti di tre gruppi di equazioni che vengono stimate contemporaneamente: un modello di misura per le variabili endogene, un modello di misura per le variabili esogene e un modello strutturale. Il modello così definito prende il nome di “modello SEM a variabili latenti”.

Il modello di misura si utilizza per specificare le variabili latenti (non osservate) come funzioni lineari di altre variabili nel sistema, che assumono il ruolo di “indicatori” delle variabili latenti. Il modello di misura per le variabili endogene e quello per le variabili esogene permettono di determinare rispettivamente le variabili endogene latenti e le variabili esogene latenti.

Il modello strutturale serve per rappresentare le relazioni tra le variabili esogene e quelle endogene. In generale, è usato per individuare l'influenza delle variabili esogene sulle variabili endogene e le influenze casuali reciproche tra le variabili esogene.

Nel modello SEM è possibile fare distinzione tra effetti “diretti”, “indiretti” e “totali”. Gli effetti “diretti” sono gli effetti che una variabile produce su un'altra. Gli effetti “indiretti” sono quelli che si hanno tra due variabili per mezzo di una o più variabili che intervengono da intermediarie. Gli effetti “totali” non sono altro che la somma di effetti diretti e indiretti e rappresentano l'effetto complessivo di una variabile indipendente su una dipendente. Molto spesso gli effetti “totali” portano a risultati nettamente differenti da quelli ottenuti considerando solo gli effetti “diretti”, in quanto riproducono meglio la complessità del fenomeno oggetto di studio.

Il modello SEM nel suo complesso è stimato usando l'analisi della covarianza. I parametri del modello sono determinati in modo tale che varianze e covarianze della variabile stimata dal modello siano il più vicino possibile ai valori di varianze e covarianze del campione osservato.

La diffusione in commercio di software per l'applicazione dei modelli SEM ha favorito il crescente interesse verso questa tecnica utilizzata attualmente per studiare diversi fenomeni, tra cui le interazioni trasporti-territorio.

Nella definizione del modello SEM, si può applicare una particolare tecnica, l'analisi fattoriale, che permette di definire le variabili latenti da considerare nel sistema. Infatti, l'analisi fattoriale è una tecnica di analisi dei dati che permette di individuare uno o più fattori latenti che riassumono le similarità che accomunano una serie di variabili.

L'analisi fattoriale può essere impiegata sia in un momento esplorativo per identificare le variabili latenti sottostanti un gruppo di indicatori, sia in un approccio confermativo per verificare se un gruppo di indicatori sia effettivamente in grado di spiegare la variabile latente a cui si riferisce.

A differenza dei due capitoli precedenti che illustrano le tecniche di analisi che saranno utilizzate nel seguito, il sesto capitolo espone nel dettaglio il caso di studio, l'area urbana formata da Cosenza e Rende, in riferimento alla quale si vogliono determinare le interazioni trasporti-territorio. Nella prima parte vengono fornite informazioni riguardanti le tappe fondamentali della crescita urbana delle due città per comprendere appieno la struttura della conurbazione. Entrambi i comuni presentano l'antico centro urbano in collina e l'insediamento moderno nella valle del Crati. Proprio l'insediamento moderno è uno spazio continuo urbanizzato, in cui non è facile distinguere i confini tra

le due città e che rappresenta il costituente fondamentale dell'area urbana. Nella zona più settentrionale del territorio di Rende sorge l'Università della Calabria, che ricopre un ruolo fondamentale all'interno dell'area urbana Cosenza-Rende. La sua istituzione, avvenuta nei primi anni '70, ha avviato un forte processo di espansione edilizia nel comune di Rende ma ha anche indotto una forte spinta alla crescita dell'intera conurbazione. Infatti, la richiesta di alloggi da parte della popolazione universitaria ha prodotto un consistente sviluppo edilizio nelle aree circostanti ed in generale nella conurbazione. Inoltre, la presenza dell'Università influenza notevolmente la mobilità sia in termini di spostamenti interni all'area urbana sia in termini di spostamenti in entrata.

L'analisi e l'elaborazione dei dati relativi all'area di studio saranno condotte utilizzando dati provenienti da diverse fonti, quali dati provenienti dai Censimenti effettuati dall'Istituto Italiano di Statistica (Istat), dati cartografici georeferenziati, dati provenienti da indagini effettuate sulla popolazione, dati geografici estratti da aerofotogrammetrie della zona oggetto di studio. Avendo a disposizione dati con caratteristiche molto diverse tra loro, l'analisi sarà supportata dall'utilizzo di un GIS appositamente implementato. Il GIS, infatti, permette di organizzare dati provenienti da diverse fonti in livelli o *layers*, che possono essere sovrapposti in modo da ottenere nuove informazioni.

Nel GIS saranno inseriti i dati relativi alla popolazione e alle abitazioni e i dati relativi alle attività economiche riferiti all'anno 2001 forniti dall'Istat suddivisi per sezioni censuarie. La cartografia relativa ai dati Istat fornisce la delimitazione delle sezioni censuarie, ma non dà informazioni sulla presenza di elementi puntuali, come edifici e infrastrutture, per cui nel GIS saranno aggiunte anche alcune cartografie che fanno parte della Carta Tecnica Regionale (CTR) della Regione Calabria, relative agli anni 1998 e 2008. A partire dalla cartografia tecnica, utilizzando gli strumenti offerti dal GIS, sarà costruita la rete stradale dell'intera area urbana, schematizzata mediante un insieme di archi. Infine, nel database saranno inseriti i dati e la cartografia definiti dal progetto "Corine Land Cover" elaborato nell'anno 2006, che fornisce indicazioni riguardo all'uso e alla copertura del suolo.

L'analisi dell'area di studio sarà articolata in più fasi. La prima riguarda l'analisi delle caratteristiche demografiche, in termini di popolazione

residente, caratteristiche dei nuclei familiari e densità di popolazione per sezione censuaria. Successivamente, saranno analizzate le caratteristiche socio-economiche in termini di popolazione residente occupata, non occupata e disoccupata e in termini di posti di lavoro suddivisi per settori economici.

Dopo questa prima caratterizzazione riguardante soprattutto la popolazione residente, verrà effettuata l'analisi del patrimonio edilizio utilizzando sia alcuni dati forniti dal Censimento sia i risultati delle analisi spaziali condotte con il GIS. L'area urbana sarà caratterizzata in termini di numero di abitazioni totali, numero di abitazioni occupate da residenti e non, numero di abitazioni vuote, superficie totale delle abitazioni e densità di abitazioni per unità di superficie. Inoltre, verrà effettuata una stima della variazione di superficie occupata da edifici registrata in 10 anni sovrapponendo le cartografie relative agli anni 1998 e 2008.

Analizzando le infrastrutture di trasporto, l'area urbana Cosenza-Rende rappresenta uno dei punti cruciali del sistema stradale e ferroviario della Calabria. In questa analisi, saranno considerate le principali vie di comunicazione sia stradali che ferroviarie, che permettono i collegamenti con i comuni posti a nord e sud dell'area urbana e con le coste tirrenica e ionica. Inoltre, saranno individuati i terminal di trasporto collettivo, quali stazioni ferroviarie e piazzali autobus, e i principali svincoli stradali a servizio dell'area urbana.

L'analisi della mobilità sistematica sarà condotta considerando gli spostamenti effettuati per motivi di studio o lavoro effettuati dalla popolazione residente forniti dall'Istat. Questi spostamenti sono stati suddivisi in spostamenti interni, con destinazione all'interno dell'area urbana, e spostamenti esterni, con destinazione esterna all'area di studio.

Infine, verrà effettuata l'analisi dell'accessibilità dell'area urbana Cosenza-Rende utilizzando il GIS, mediante il quale i dati sono elaborati sfruttando le relazioni spaziali esistenti tra di essi. In particolare, l'accessibilità sarà valutata separatamente sia in riferimento ai nodi di trasporto, sia in relazione ai servizi offerti da ciascuna sezione censuaria.

L'accessibilità ai nodi di trasporto sarà studiata svolgendo un'analisi spaziale basata sul tempo di viaggio in auto impiegato per raggiungere, a partire dalla zona di residenza, i terminal dei trasporti collettivi (come le autostazioni e le stazioni ferroviarie) e gli svincoli stradali e autostradali. Il

tempo di viaggio in auto verrà calcolato utilizzando gli strumenti forniti dal GIS per l'analisi della rete stradale e considerando le velocità medie di percorrenza su ciascun arco della rete.

L'accessibilità ai servizi si riferisce all'accessibilità di ogni sezione censuaria verso luoghi di lavoro, uffici pubblici, negozi e aziende distribuiti nell'area urbana. Per stimare l'accessibilità ai servizi sarà elaborata una misura di accessibilità di tipo gravitazionale, in base alla quale l'accessibilità è direttamente proporzionale al numero di posti di lavoro della zona di destinazione dello spostamento e inversamente proporzionale alla distanza da superare per raggiungere la destinazione.

Gli ultimi due capitoli riguardano la valutazione delle interazioni trasporti-territorio riferite all'area di studio.

Nel capitolo sette sarà svolta la valutazione dell'influenza delle variabili del sistema territoriale sui comportamenti di viaggio della popolazione residente nell'area urbana. Saranno applicate sia tecniche di statistica spaziale sia tecniche di modellazione SEM.

L'applicazione delle tecniche di statistica spaziale sarà articolata in due fasi successive. Inizialmente saranno applicate le tecniche di associazione spaziale per individuare l'eventuale presenza e l'entità di aggregazioni di valori simili della variabile relativa al numero di spostamenti emessi da ciascuna sezione censuaria. L'analisi sarà condotta sia a livello globale sia a livello locale. Mediante l'applicazione delle tecniche globali di associazione spaziale sarà valutata la presenza o meno di schemi di associazione spaziale. In seguito, saranno applicate le tecniche locali di associazione spaziale per valutare l'entità e la posizione di eventuali aggregazioni di valori simili, in quanto le tecniche globali non forniscono queste informazioni.

In un secondo momento, la modellazione sarà condotta applicando un modello di regressione non spaziale e un modello di regressione geograficamente pesata (GWR), utilizzando le stesse variabili esplicative, per stimare il numero di spostamenti sistematici effettuati dalla popolazione residente per ciascuna sezione censuaria per motivi di studio e lavoro. I risultati del modello non spaziale saranno confrontati con quelli del modello spaziale per determinare quale dei due si adatta meglio ai dati.

La valutazione dell'influenza delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio sarà condotta applicando anche le tecniche di modellazione ad

equazioni strutturali. Il modello proposto avrà quattro variabili latenti esogene, relative al sistema territoriale, e una variabile latente endogena, che rappresenta i comportamenti di viaggio. Le variabili latenti saranno definite sulla base di una serie di indicatori osservati direttamente a partire da dati Istat e da elaborazioni in ambiente GIS. Un aspetto importante dell'analisi effettuata mediante le tecniche di modellazione SEM è l'individuazione degli eventuali effetti indiretti dovuti alle relazioni esistenti tra le variabili latenti esogene. Infatti, considerando gli effetti totali (ottenuti sommando gli effetti diretti con quelli indiretti) è possibile ottenere risultati diversi rispetto a quelli ottenuti a partire dall'analisi dei soli effetti diretti.

Il capitolo otto presenta la valutazione dell'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale, condotta considerando un caso pratico, cioè valutando gli effetti che si sono avuti sul territorio in seguito alla realizzazione di una nuova infrastruttura viaria all'interno dell'area urbana Cosenza-Rende.

L'approccio seguito non sarà di tipo modellistico ma quantitativo. Infatti, si procederà in primo luogo alla delimitazione dell'area di influenza della nuova infrastruttura e, successivamente, saranno rilevate le variazioni delle variabili territoriali registrate in questa area nell'arco di tempo intercorso tra l'anno in cui è iniziata la costruzione della strada e l'anno in cui la strada è stata ultimata. Nello specifico, sarà condotta l'analisi della variazione della superficie edificata confrontando l'ammontare di superficie edificata prima e dopo la realizzazione dell'infrastruttura. Utilizzando il GIS, saranno sovrapposte e confrontate le cartografie dell'area urbana relative all'anno 1998 (prima della realizzazione dell'opera) e all'anno 2008 (dopo il completamento e l'apertura al traffico di buona parte della strada). Per ciascuna categoria di edifici (residenziali, industriali e altri edifici) sarà determinata la variazione in termini di superficie occupata. Successivamente, nota la variazione della superficie occupata da edifici, sarà possibile elaborare una stima della variazione di abitanti tra il 1998 e il 2008. L'analisi sarà condotta per sezione censuaria, elaborando i dati della superficie occupata solo dagli edifici residenziali, in quanto l'obiettivo è fornire una stima della popolazione residente.

Infine, in coda agli otto capitoli, è collocata la sezione contenente le considerazioni conclusive dedotte al termine del lavoro svolto.

CAPITOLO 1

LO STUDIO DELLE INTERAZIONI FRA IL SISTEMA TERRITORIALE E IL SISTEMA DEI TRASPORTI

1.1 Generalità

La configurazione delle aree urbane può essere concepita come il risultato delle interazioni che avvengono tra il sistema dei trasporti e il sistema territoriale. I due sistemi sono mutuamente interconnessi e si influenzano reciprocamente.

Il sistema dei trasporti può essere definito come l'insieme delle componenti e delle loro reciproche relazioni che realizzano la produzione e il consumo del servizio di trasporto in un certo ambiente. Alcune delle componenti del sistema dei trasporti sono gli utenti del servizio (che possono essere persone e/o merci), le infrastrutture, i mezzi usati per il trasporto (veicoli) o per la produzione del servizio, e sono legate da una serie di relazioni.

In generale, il sistema dei trasporti può essere a sua volta scomposto in due sottosistemi: il sottosistema di domanda, costituito dagli utenti del servizio con le loro caratteristiche, e il sottosistema di offerta, costituito dalle componenti sia fisiche (come veicoli e infrastrutture) che organizzative (come organizzazione della circolazione o definizione delle linee e degli orari dei

trasporti collettivi) che contribuiscono a produrre il servizio. Domanda e offerta interagiscono fortemente tra di loro.

Gli elementi del sistema urbano non inclusi nel sistema dei trasporti costituiscono l'ambiente esterno, denominato sistema territoriale. I due sistemi interagiscono fortemente tra di loro (Cascetta, 1998).

Il sistema territoriale è spesso individuato con l'espressione *land use* (uso del territorio), legata al concetto che nello spazio urbano si svolge una grande varietà di attività umane. L'assetto delle attività è funzione della distribuzione spaziale delle stesse e delle caratteristiche del territorio.

Le teorie sulle interazioni trasporti-territorio sono focalizzate soprattutto sulle decisioni riguardanti la localizzazione e la mobilità di attori privati, quali famiglie e industrie, in risposta ai cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale e nel sistema dei trasporti a livello urbano e regionale.

Dagli studi svolti nel corso degli anni sulle dinamiche urbane, è emerso che le decisioni di viaggio e di localizzazione di residenze e attività si influenzano l'un l'altra e che è necessario coordinare la pianificazione territoriale con quella dei sistemi di trasporto.

Si può assumere che esista una relazione ciclica tra il sistema dei trasporti e il sistema territoriale (Fig. 1.1). Questa relazione può essere sintetizzata come segue (Wegener & Fürst, 1999):

- la distribuzione degli “usi del territorio” (come attività residenziali, industriali o commerciali) nell'area urbana determina la localizzazione delle attività umane (come lavoro, shopping, istruzione, tempo libero);
- la distribuzione delle attività umane nello spazio comporta la generazione di spostamenti per superare la distanza esistente tra i luoghi in cui sono ubicate le diverse attività;
- la distribuzione delle infrastrutture del sistema dei trasporti crea opportunità per le interazioni spaziali e può essere misurata in termini di accessibilità;
- la distribuzione dell'accessibilità nello spazio determina le scelte di localizzazione e i risultati dei cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale.

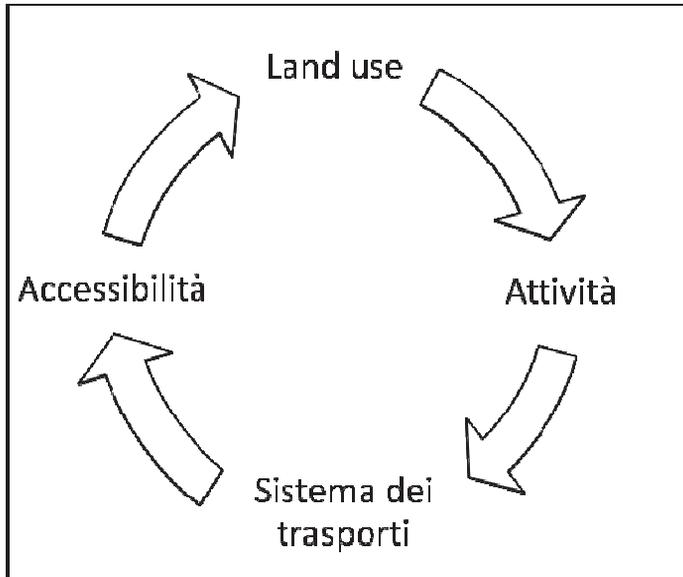


Fig. 1.1 - Relazione ciclica tra il sistema dei trasporti e il sistema territoriale.

L'analisi delle interazioni trasporti-territorio comporta il reperimento e l'elaborazione di un'imponente mole di dati relativi al territorio oggetto di studio, quali dati sulla popolazione, sulle attività economiche e sui trasporti, aventi riferimenti spaziali. Per la manipolazione di questi dati possono essere utilizzate le tecniche di analisi spaziale. L'obiettivo dell'analisi spaziale è studiare le forme di aggregazione spaziale dei fenomeni e le loro relazioni nello spazio. Infatti, mediante queste tecniche è possibile fare osservazioni oggettive sulla distribuzione spaziale dei dati, come valutare se la distribuzione è casuale o presenta una forma aggregata, stabilire le cause della distribuzione spaziale, verificare se i valori osservati sono sufficienti per analizzare il fenomeno.

Con lo sviluppo delle tecnologie informatiche, uno strumento sempre più utilizzato per l'analisi delle interazioni trasporti-territorio è rappresentato dai Sistemi Informativi Geografici (GIS, Geographic Information System). Uno degli scopi principali di un GIS è offrire strumenti concettuali e metodologici per studiare analiticamente le relazioni nello spazio. Infatti, con un GIS è possibile riunire, memorizzare, modificare e rappresentare, con i relativi riferimenti geografici, dati provenienti da diverse fonti. Inoltre, sono disponibili operatori per elaborazioni ed analisi spaziali sul database, con la

possibilità di generare nuove informazioni a partire da quelle memorizzate mediante la sovrapposizione automatica dei livelli geografici, la generazione di aree di rispetto o di influenza, l'analisi delle reti. In altri termini, un GIS integra le operazioni che è possibile effettuare sui dati con i vantaggi della rappresentazione dei dati e dell'analisi geografica offerti dalle mappe (Okunuki, 2001).

1.2 L'influenza delle variazioni del sistema territoriale sul sistema dei trasporti

In letteratura esistono numerosi studi riguardanti l'effetto del sistema territoriale sul sistema dei trasporti e, in particolare, sui comportamenti di viaggio. Questo fenomeno è dovuto alla necessità di trovare soluzioni efficaci per migliorare le condizioni di mobilità nei centri urbani, divenute insostenibili a causa della crescita incontrollata degli insediamenti urbani. Lo studio dell'influenza del *land use* sui comportamenti di viaggio è focalizzato soprattutto sullo studio di possibili interventi sulle variabili territoriali che possano influenzare positivamente le variabili del sistema dei trasporti. Ad esempio, è interessante analizzare in che modo i cambiamenti della conformazione dello spazio urbano possono influire sui comportamenti di viaggio in modo tale da ridurre le problematiche del traffico urbano, come la congestione.

Questi studi riguardano l'analisi degli effetti che variazioni del *land use* possono causare su variabili del sistema dei trasporti come generazione degli spostamenti, lunghezza degli spostamenti o scelta del modo di trasporto.

La maggior parte di essi mira ad investigare la relazione fra il volume di trasporto urbano e la densità degli insediamenti. L'ipotesi più accreditata dai ricercatori è che vi sia una forte dipendenza fra la densità e gli spostamenti. Quindi, il ritorno alla città compatta dovrebbe comportare la diminuzione del numero e della lunghezza degli spostamenti.

Uno degli studi più importanti a sostegno di questa tesi (Newman & Kenworthy, 1989) considera 32 città appartenenti a quattro continenti diversi. L'analisi dei dati mostra che vi è correlazione statistica negativa fra la densità residenziale e il consumo pro-capite di energia per lo spostamento. Uno studio simile, ma condotto considerando solo città americane (Cervero, 1996),

mostra che più è alta la densità, considerando anche i diversi usi del territorio e la struttura del quartiere, più diminuiscono il numero di auto possedute, il numero di spostamenti e le distanze percorse per gli spostamenti sistematici. Risultati simili anche per uno studio inglese (Hillman & Whalley, 1983). Da un'indagine sui comportamenti di viaggio è emerso che le distanze medie percorse in auto in aree a bassa densità abitativa sono pari quasi al doppio delle distanze percorse in aree ad alta densità.

D'altra parte, questa stretta dipendenza tra densità e spostamenti motorizzati viene messa in discussione da altri studi. Ad esempio, Holz-Rau & Kutter (1995) e Holz-Rau (1997) hanno messo a confronto diversi quartieri urbani della città tedesca di Stoccarda aventi diversi valori di densità residenziale. Dai risultati ottenuti, è evidente che le distanze percorse pro-capite dipendono solo in parte dalla densità. Infatti, gli spostamenti per il motivo lavoro dipendono dalla distanza dal centro della città, dove sono concentrati la maggior parte dei posti di lavoro; mentre gli spostamenti effettuati per acquisti dipendono dall'offerta di negozi al dettaglio.

Dall'elaborazione dei dati di mobilità dell'area metropolitana di Monaco (Kagermeier, 1997) risulta che la densità ha un impatto poco rilevante sulle distanze percorse, ma un ruolo decisivo è giocato dalle distanze fra il centro della città e le zone secondarie.

L'analisi della letteratura riguardante la dipendenza fra densità e spostamenti mostra in definitiva che la densità influenza gli spostamenti se entrano in gioco anche altre variabili legate allo schema spaziale della città e alla disponibilità di carburante a prezzi convenienti.

Un'altra variabile del sistema dei trasporti che risulta generalmente dipendente dalla densità della popolazione è l'utilizzo dei mezzi di trasporto collettivo. In letteratura sono presenti numerosi studi che sostengono che la densità urbana è positivamente correlata con l'uso dei mezzi di trasporto collettivo e negativamente correlata con il possesso dell'automobile e l'uso del mezzo di trasporto privato. Kitamura et al. (1997) hanno trovato che la densità della popolazione è legata alla percentuale di spostamenti effettuati utilizzando i trasporti collettivi, anche se la scelta del modo di trasporto dipende dalle caratteristiche socio-economiche degli utenti. Ci sono anche altri studi in cui non è stata trovata una significativa relazione fra la densità

urbana e l'utilizzo dei trasporti collettivi, se non vengono considerati altri fattori come le variabili socio-economiche o l'offerta di trasporto pubblico.

Di particolare rilevanza è anche lo studio dell'influenza della densità dei posti di lavoro sulle scelte di viaggio. Senza dubbio, gli spostamenti effettuati per il motivo lavoro sono influenzati dalla localizzazione della residenza e del posto di lavoro, sia in termini di distanza da percorrere sia in termini di mezzo di trasporto utilizzato. Ad esempio, se il luogo di lavoro si trova in centro città, un lavoratore che risiede in periferia deve effettuare uno spostamento più lungo rispetto ad un lavoratore che vive in centro, e viceversa. I ricercatori si chiedono quindi se è meglio proporre uno schema di città in cui le diverse attività sono ben integrate per ridurre la lunghezza e il numero di spostamenti. Alcuni studi (Ewing, 1995; Miller & Ibrahim, 1998) hanno mostrato che le distanze percorse sono debolmente influenzate dal mix bilanciato di residenze e luoghi di lavoro. Altri, invece, mostrano che questa relazione esiste e non può essere trascurata (Holz-Rau & Kutter, 1995).

Un dibattito acceso riguarda la possibilità che la struttura del quartiere possa influenzare o meno la scelta dell'utente di effettuare uno spostamento a piedi o usando un mezzo non motorizzato. Molti studi americani mostrano che nei quartieri tradizionali, realizzati nel periodo antecedente la Seconda Guerra Mondiale, si effettua una percentuale maggiore di spostamenti a piedi o con i mezzi pubblici rispetto a quanto avviene nei quartieri standard suburbani realizzati nel dopoguerra (Friedman et al., 1994). In altri studi però non risulta una netta dipendenza fra struttura del quartiere e comportamenti di viaggio senza che siano considerate altre variabili, come quelle socio-economiche, o senza che vi sia un mix di attività diverse nello stesso quartiere (Handy, 1995). Risultati analoghi si hanno per le città europee (Holz-Rau & Kutter, 1995).

Holtzclaw (1994) ha valutato l'influenza delle caratteristiche del quartiere sull'utilizzo dell'auto privata e sui costi di trasporto in genere. Le variabili considerate riguardano sia la struttura del quartiere sia le caratteristiche socio-economiche delle famiglie residenti. I risultati hanno mostrato che l'uso dell'auto diminuisce all'aumentare della densità residenziale e dei servizi di trasporto collettivo.

In definitiva, la struttura del quartiere rappresenta sicuramente un fattore che influenza i comportamenti di viaggio, ma l'entità di questa influenza varia

a seconda dei casi analizzati e a seconda delle altre variabili territoriali e socio-economiche che vengono considerate.

Oltre alla struttura fisica del quartiere, un altro aspetto che può influenzare i comportamenti di viaggio è la localizzazione del quartiere all'interno della città e rispetto alla rete stradale o ai nodi di trasporto pubblico. Infatti, ci si aspetta che in un quartiere ben connesso alla rete stradale vi sia un elevato numero di auto e un elevato numero di spostamenti in auto, mentre in un quartiere caratterizzato dalla presenza di fermate di mezzi pubblici il numero di spostamenti in auto sia molto inferiore.

A questo riguardo, uno studio effettuato sull'area urbana di San Francisco (Kitamura et al., 1997) mostra che la distanza da casa alla più vicina fermata dell'autobus o stazione ferroviaria influenza la scelta del modo di trasporto. Infatti, la percentuale di spostamenti in auto diminuisce man mano che si riduce anche la distanza dalle fermate dei mezzi pubblici. A livello europeo, Spence & Frost (1995) hanno registrato che nella città di Londra le distanze percorse per gli spostamenti sistematici aumentano linearmente con la distanza dal centro della città; in altre città invece risulta che la lunghezza degli spostamenti sistematici raggiunge un valore massimo ad una certa distanza dal centro città per poi diminuire.

Un'altra relazione di difficile interpretazione è quella tra la dimensione della città e i comportamenti di viaggio. Risulta difficile quantificare questa relazione in quanto nella sua valutazione intervengono anche altri fattori. Da diversi studi condotti considerando città europee emerge che il consumo di energia pro-capite per gli spostamenti e le distanze medie sono più bassi nelle grandi regioni metropolitane (Banister, 1992). Inoltre, esiste una forte correlazione fra la dimensione della città e l'utilizzo dei sistemi di trasporto collettivo (Apel, 1992), spiegabile con il fatto che nelle grandi città i trasporti collettivi sono più efficienti. Per le città americane sono stati ottenuti risultati differenti. Nella maggior parte dei casi non risulta una chiara relazione tra la dimensione della città e le variabili del sistema dei trasporti.

1.3 L'influenza delle variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale

In letteratura, gli studi che trattano l'impatto del sistema dei trasporti sul sistema territoriale sono in numero molto inferiore rispetto a quelli che trattano l'impatto nella direzione opposta. Questo può essere dovuto al fatto che i cambiamenti del *land use* provocati da variazioni del sistema dei trasporti avvengono molto più lentamente rispetto ai cambiamenti dei comportamenti di viaggio provocati da variazioni del sistema territoriale. Inoltre, i cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale non dipendono solo dalle variabili dei trasporti ma anche da altri fattori difficili da isolare, quali variazioni dell'andamento demografico, condizioni economiche, cambiamenti dello stile di vita, sviluppo tecnologico.

Tra i primi studi riguardanti l'impatto del sistema dei trasporti su quello territoriale si colloca quello condotto da Hansen nel 1956 per la città americana di Washington. L'autore osservò che vi era correlazione fra accessibilità dei luoghi di lavoro e sviluppo delle zone residenziali, in quanto le zone della città che presentavano migliore accessibilità avevano maggiore possibilità di sviluppo e una maggiore densità abitativa.

In ambito europeo, Kreibich (1978) ha analizzato i cambiamenti avvenuti negli insediamenti urbani dopo l'apertura del sistema ferroviario metropolitano di Monaco in Germania. Egli registrò che i centri abitati situati lungo la linea ferroviaria e più prossimi a Monaco presentavano un aumento del tasso di crescita delle aree residenziali.

A partire da diversi studi condotti sull'impatto del sistema ferroviario sulle variabili territoriali in Nord America, Miller et al. (1998) osservarono che l'impatto sul *land use* risulta essere esiguo e concentrato in corrispondenza delle stazioni suburbane.

Oltre all'impatto comportato da variazioni "fisiche" del sistema dei trasporti, è interessante anche studiare l'impatto che può avere la scelta modale sul sistema territoriale. Pharoah & Apel (1995) hanno confrontato diverse città europee osservando che le politiche di promozione per l'utilizzo dei trasporti pubblici hanno effetti positivi sullo sviluppo economico della città. D'altro canto, gli effetti negativi delle politiche restrittive nei confronti

dell'uso dell'auto, che di solito comportano il pagamento di pedaggi, non sono chiaramente visibili.

La ricerca riguardante la valutazione dell'impatto del sistema dei trasporti sul territorio è in continua evoluzione. Inoltre, buona parte dei lavori finora condotti sull'argomento presentano problemi metodologici in quanto non sempre è possibile isolare l'impatto dei trasporti da tutti gli altri fattori che intervengono nei processi evolutivi delle aree urbane.

1.4 L'accessibilità: un elemento chiave della relazione tra sistema territoriale e sistema dei trasporti

1.4.1 Il concetto di accessibilità

L'accessibilità è un'importante caratteristica delle aree urbane e rappresenta l'elemento chiave per valutare le influenze reciproche tra il sistema territoriale e quello dei trasporti quando si verificano dei cambiamenti nell'assetto delle aree urbane. Infatti, nel corso degli anni, i ricercatori hanno elaborato diversi indici di accessibilità per descrivere le relazioni reciproche fra trasporti e territorio (Dong et al., 2006).

Nonostante sia usata in numerosi campi scientifici, come la pianificazione dei trasporti, la pianificazione urbanistica e la geografia, l'accessibilità è spesso un concetto abbastanza difficile e complesso da comprendere. In letteratura, esistono numerose definizioni di accessibilità, tra cui "il potenziale di opportunità di interazione" (Hansen, 1959), "la facilità con cui ogni attività può essere raggiunta da una certa localizzazione usando un particolare sistema di trasporto" (Dalvi & Martin, 1976), "la facoltà degli individui di decidere se partecipare o meno alle diverse attività localizzate sul territorio" (Burns, 1979) e "i benefici forniti dal sistema land use/trasporti" (Ben-Akiva & Lerman, 1979).

L'accessibilità dipende dall'assetto del territorio, dalle caratteristiche del sistema dei trasporti e dalle caratteristiche degli utenti che si spostano.

È possibile distinguere tra accessibilità "attiva", che misura la facilità con cui i residenti di quella zona possono raggiungere le diverse attività presenti nel territorio circostante, e accessibilità "passiva", che misura la facilità con

cui le diverse attività (produttive, commerciali, sociali) presenti in una zona possono essere raggiunte da utenti residenti nel territorio circostante.

Come già detto in precedenza, le misure di accessibilità possono essere anche viste come indicatori dell'impatto che variazioni del sistema territoriale e dei trasporti possono avere sulla società in generale. In questa ottica, l'accessibilità può essere definita come la misura in cui *land use* e sistema dei trasporti permettono ad un singolo o ad un gruppo di individui di partecipare ad attività localizzate sul territorio mediante uno o più modi di trasporto.

L'accessibilità può essere valutata utilizzando diverse formulazioni, in cui entrano in gioco numerose variabili relative al contesto di riferimento. Come indicato da Geurs & van Wee (2004), le variabili che influenzano l'accessibilità possono essere raggruppate in quattro componenti fondamentali: componente territoriale, componente trasportistica, componente temporale e componente individuale.

La componente territoriale riguarda il sistema del *land use* che comprende le possibilità offerte ad ogni destinazione in termini di quantità, qualità e distribuzione spaziale di attività, quali opportunità di lavoro, negozi, strutture sanitarie e luoghi di aggregazione sociale, la richiesta di usufruire di queste attività a partire dalle zone di origine e, infine, il confronto tra domanda e offerta.

La componente dei trasporti descrive il sistema dei trasporti, valutando la disutilità per un individuo di coprire la distanza tra origine e destinazione usando uno specifico modo di trasporto. Include il tempo impiegato (tempo di viaggio, di attesa e impiegato per parcheggiare), i costi sostenuti per effettuare il trasporto e la valutazione complessiva dello spostamento (affidabilità del servizio, livello di comfort, rischio di incidenti, ecc.). Questa disutilità può essere ottenuta dal confronto tra domanda e offerta di trasporto.

La componente temporale riguarda i vincoli temporali imposti sia alle attività, come la disponibilità delle attività a differenti momenti della giornata, sia agli individui, come la disponibilità di tempo per svolgere determinate attività lavorative e relazionali.

La componente soggettiva comprende gli aspetti che caratterizzano il singolo individuo come i bisogni (che dipendono dall'età, dalle disponibilità economiche, dalla situazione familiare), le capacità (che dipendono dalle condizioni psicologiche dell'individuo, dalla disponibilità di mezzi di

trasporto) e le opportunità (che dipendono dal reddito, dal budget disponibile per gli spostamenti, dal livello di istruzione).

Tra le variabili appartenenti a queste componenti esistono relazioni reciproche. Ad esempio, la distribuzione delle attività (componente territoriale) è un importante fattore nella determinazione della domanda di trasporto (componente dei trasporti). Inoltre, la distribuzione delle attività può introdurre restrizioni temporali (componente temporale) e influenzare le opportunità a disposizione della popolazione (componente individuale). Allo stesso tempo, la componente individuale interagisce con le altre componenti, in quanto i bisogni e le capacità di un individuo possono influenzare la valutazione del tempo, del costo di trasporto, delle attività più importanti da svolgere.

D'altra parte, anche l'accessibilità può influenzare le sue componenti mediante un processo retroattivo. Infatti, l'accessibilità, intesa come fattore localizzativo di residenze e industrie, influenza la domanda di trasporto, le occasioni economiche e sociali per la popolazione e il tempo necessario per svolgere le attività.

1.4.2 Misure di accessibilità

Teoricamente, una misura di accessibilità dovrebbe comprendere tutte le componenti e le rispettive variabili. Nella pratica, le misure di accessibilità si concentrano su una o più componenti di accessibilità, a seconda dello scenario analizzato. Come riportato in letteratura (Geurs & van Wee, 2004), si possono distinguere quattro scenari: misure *infrastructure-based* (basate sulle infrastrutture), misure *location-based* (basate sull'ubicazione delle attività), misure *person-based* (basate sulle percezioni degli individui) e misure *utility-based* (basate sull'utilità).

Le misure di accessibilità *infrastructure-based* analizzano il livello di servizio, reale o simulato, delle infrastrutture di trasporto. Alcune misure di questo tipo sono il livello di congestione, il tempo di viaggio e la velocità media alla quale è possibile viaggiare sull'infrastruttura stradale considerata. Il vantaggio che si trae dall'uso di queste misure è la possibilità di confrontare diversi casi, in quanto sono di facile interpretazione. Di contro, le misure *infrastructure-based* non considerano le variabili territoriali e non tengono

conto dei vincoli temporali e delle caratteristiche del singolo individuo, e questo limite influenza fortemente la definizione di accessibilità. Infatti, queste misure di accessibilità ignorano i potenziali impatti che il sistema territoriale può avere sui trasporti, come l'impatto delle variazioni della velocità media di viaggio sulla dispersione urbana. Inoltre, le misure basate sulle infrastrutture non valutano correttamente l'impatto che l'accessibilità stessa può avere sulle dinamiche del sistema territoriale, che influenzano a loro volta la distribuzione spaziale delle attività. Di conseguenza, possono condurre a considerazioni spaziali se, nel contesto analizzato, si prevedono cambiamenti dell'assetto del sistema territoriale. Per le loro caratteristiche, queste misure sono solitamente utilizzate nella pianificazione dei trasporti ipotizzando che il sistema territoriale resti immutato.

Le misure di accessibilità *location-based* si riferiscono al posto in cui si trovano l'individuo che deve spostarsi e l'attività che deve essere raggiunta, e definiscono il livello di accessibilità delle attività distribuite spazialmente. Una misura di questo tipo è il numero di posti di lavoro localizzati all'interno di un raggio di 30 metri a partire dalla posizione di origine. Alcune misure più complesse considerano esplicitamente il limite oltre il quale non è più possibile partecipare alle attività introducendo il concetto di competizione. Le misure basate sulla posizione sono usate soprattutto nella pianificazione urbana.

È possibile distinguere tra misure basate sulla distanza e misure di accessibilità potenziale.

Le misure basate sulla distanza, chiamate anche misure di connettività, sono le misure di accessibilità *location-based* più semplici e sono spesso usate nella pianificazione territoriale per definire la distanza massima e il tempo di viaggio fino a una data destinazione o ad una infrastruttura di trasporto. Mediante la definizione di isocrone si determina il numero di opportunità che è possibile raggiungere all'interno di un dato tempo di viaggio, di una distanza fissata o di un costo massimo, oppure si determina il tempo impiegato (valore totale o medio) per accedere ad un fissato numero di opportunità. Queste misure sono di facile comprensione ed interpretazione in quanto non fanno ipotesi sulla percezione da parte del singolo individuo del sistema territoriale, dei trasporti e della loro interazione. Di contro, queste misure presentano alcune carenze. Infatti, le misure basate sulla distanza, pur

considerando elementi del sistema territoriale e di quello dei trasporti, trascurano l'effetto combinato trasporti-territorio. Inoltre, non tengono conto della percezione e delle preferenze degli individui, per cui le opportunità risultano tutte ugualmente desiderabili indipendentemente dalla tipologia. Di conseguenza, queste misure non sono utili nella stima dei cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale e in quello dei trasporti.

Le misure di accessibilità potenziale, chiamate anche misure gravitazionali, stimano il livello di accessibilità dalla zona di origine i verso le opportunità di tutte le altre zone n .

Le misure gravitazionali di accessibilità derivano dai modelli gravitazionali di interazione spaziale, in base ai quali il potenziale di opportunità tra due posti è positivamente correlato all'attrattività del posto e negativamente correlato ai costi di trasporto da sostenute per recarsi da un posto all'altro (Hansen, 1959).

L'accessibilità potenziale assume la seguente formulazione:

$$A_i = \sum_{j=1}^n D_j e^{-\beta c_{ij}} \quad (1.1)$$

dove A_i è l'accessibilità della zona i verso tutte le opportunità D_j della zona j , c_{ij} è il costo di trasporto tra i e j e β è un parametro relativo ai costi. La funzione di costo usata (o di impedenza) ha una forte influenza sul risultato della misura di accessibilità. Per ottenere risultati accettabili, la funzione di costo deve essere scelta con criterio e i parametri della funzione devono essere stimati utilizzando dati empirici recenti relativi ai comportamenti di viaggio nell'area di studio.

La funzione di impedenza più utilizzata è la funzione esponenziale negativa, che è anche la più adatta a rappresentare i comportamenti di viaggio (Handy & Niemeier, 1997).

Le misure di accessibilità potenziale sono di facile comprensione e superano alcuni limiti delle misure basate sulla distanza. Infatti, le misure potenziali valutano l'effetto combinato trasporti-territorio e includono ipotesi sulle percezioni degli utenti del sistema dei trasporti usando una funzione

pesata delle distanze. Non considerano, però, gli effetti della competizione e i vincoli temporali.

Per includere nella valutazione dell'accessibilità anche gli effetti della competizione, alcuni autori hanno modificato le misure di accessibilità potenziale. Tra i diversi approcci proposti vi è un approccio basato sul bilanciamento dei fattori del modello di interazione spaziale doppiamente vincolato (Wilson, 1970, 1971). Il bilanciamento dei fattori a_i e b_j garantisce che l'intensità dei flussi con origine nella zona i e destinazione nella zona j sia uguale al numero di attività nelle zone i e j . Ad esempio, il numero di lavoratori della zona i dovrà essere uguale al numero di posti di lavoro della zona j . I fattori di bilanciamento di questo modello possono essere interpretati come misure di accessibilità che tengono in conto gli effetti della competizione. Essi assumono le seguenti forme:

$$a_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{b_j} D_j e^{-\beta c_{ij}} \quad (1.2)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} O_i e^{-\beta c_{ij}} \quad (1.3)$$

I fattori di bilanciamento sono dipendenti l'uno dall'altro per cui devono essere stimati mediante un procedimento iterativo che permette di considerare la competizione tra domanda e offerta di opportunità. Queste misure di accessibilità, però, oltre ad essere di difficile interpretazione, sono anche complesse da ottenere proprio a causa del procedimento iterativo necessario per stimarle.

Le misure di accessibilità *person-based* studiano l'accessibilità a livello individuale, valutando, ad esempio, il numero e il tipo di attività alle quali il singolo individuo può partecipare in un determinato periodo di tempo. Questo tipo di misure si basa sui concetti di geografia spazio-temporale e valuta le limitazioni che possono influire sulla libertà di azione dell'individuo sul territorio. Queste misure seguono un approccio disaggregato, ma non includono gli effetti della competizione tra le attività. Inoltre, è abbastanza complesso determinare queste misure di accessibilità in quanto richiedono dati ad alto livello di disaggregazione.

Le misure di accessibilità *utility-based* valutano i benefici che le persone possono trarre dall'accesso alle attività distribuite sul territorio. Questo tipo di misura è comparso per la prima volta in studi di carattere economico.

La teoria dell'utilità, alla base di queste misure, indirizza la scelta dell'utente tra diverse potenziali alternative, tutte in grado di soddisfare lo stesso bisogno. Inoltre, può essere usata per modellare i comportamenti di viaggio e i benefici che ciascun utente può trarre dal sistema dei trasporti.

In letteratura vi sono due tipi di misure di accessibilità *utility-based*. Il primo approccio è basato sulla teoria dell'utilità casuale, e l'accessibilità è valutata usando il logaritmo del denominatore del modello Logit multinomiale (Ben-Akiva & Lerman, 1985):

$$A_i = \ln \left(\sum_{k=1}^m e^{V_k} \right) \tag{1.4}$$

$$A_i = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\sum_{k=1}^m e^{V_k} \right) \tag{1.5}$$

dove A_i è la massima utilità attesa e V_k sono le componenti trasportistiche, temporali e spaziali dell'utilità.

Il secondo approccio è basato sul modello di entropia doppiamente vincolato. L'accessibilità può essere calcolata utilizzando le seguenti espressioni (Martínez, 1995; Martínez & Araya, 2000):

$$A_i = -\frac{1}{\beta} \ln(a_i) \tag{1.6}$$

$$A_j = -\frac{1}{\beta} \ln(b_j) \tag{1.7}$$

$$A_{ij} = -\frac{1}{\beta} \ln(a_i b_j) \tag{1.8}$$

che rappresentano rispettivamente l'utilità relativa agli spostamenti generati (A_i), agli spostamenti attratti (A_j) e agli spostamenti tra le zone i e j (A_{ij}), per una data configurazione del sistema dei trasporti.

Nelle formulazioni viste, le misure di accessibilità *utility-based* permettono di includere tutte le componenti fondamentali eccetto i vincoli temporali. Tuttavia, in letteratura sono presenti anche studi in cui si cerca di considerare sia la componente spaziale sia quella temporale, come in Miller (1999), il quale ha elaborato una misura di utilità spazio-temporale considerando il tempo disponibile per partecipare alle attività come variabile all'interno della funzione di utilità. In questo caso, però, si possono avere problemi con la componente personale, in quanto risulta difficile reperire i dati necessari per calibrare il modello a livello individuale.

Dopo aver analizzato le diverse misure di accessibilità, non è possibile stabilire quale sia la misura migliore, perché ogni situazione richiede un approccio diverso. È, però, possibile individuare dei criteri per valutare gli aspetti positivi e quelli negativi delle misure di accessibilità che valgono in contesti diversi.

1.5 Tendenze della ricerca

L'analisi del sistema integrato trasporti-territorio, come visto nei paragrafi precedenti, permette di ottenere interessanti risultati riguardanti le dinamiche che interessano lo sviluppo dell'ambiente insediativo e può risultare utile per indirizzare e controllare questi processi. Infatti, considerare l'intero sistema delle relazioni tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti è utile per progettare più consapevolmente gli interventi sia sui trasporti sia sul territorio. In questo modo, quando si va a progettare un intervento sui trasporti si è in grado di valutare le possibili ricadute sul territorio in termini di miglioramento del livello di servizio delle infrastrutture e, in generale, di benefici (diretti e indiretti) per la collettività. D'altro canto, interventi di pianificazione del territorio possono essere attuati nella consapevolezza delle possibili ricadute che questi possono avere sul sottosistema dei trasporti in generale.

L'obiettivo principale è individuare delle linee di intervento nella pianificazione del territorio per poter modificare i comportamenti di viaggio in modo tale da provocare la riduzione di congestione e inquinamento nelle aree urbane.

Ad oggi, la ricerca è orientata verso lo sviluppo di modelli e software che possano essere usati per la simulazione degli effetti delle scelte di

pianificazione sia sul territorio sia sul sistema dei trasporti, in modo tale da orientare lo sviluppo del territorio verso forme più compatibili con il benessere della collettività.

Attualmente, risultano ancora non pienamente sviluppati gli aspetti legati al complesso di interazioni trasporti, territorio, consumi energetici e impatto ambientale. Possibili orientamenti futuri della ricerca sono indirizzati verso lo studio degli effetti che le politiche di riduzione dell'auto come mezzo di trasporto possono avere sulle condizioni ambientali.

CAPITOLO 2

I MODELLI PER LA SIMULAZIONE DELLE INTERAZIONI TRASPORTI-TERRITORIO

2.1 Generalità

Le variazioni del sistema territoriale possono avere effetti sulla domanda di trasporto che, allo stesso tempo, può comportare modifiche del sistema dei trasporti, con conseguenti variazioni dell'accessibilità (attiva e passiva). Nel lungo periodo, ciò induce una redistribuzione degli insediamenti residenziali e produttivi che ha effetti sulla domanda di trasporto.

Pertanto, le politiche di pianificazione dei trasporti influenzano non solo il comportamento degli utenti del sistema dei trasporti, ma anche quello delle persone nella futura localizzazione delle residenze o delle attività economiche. La domanda e l'offerta di trasporto sono influenzate tra loro attraverso un processo di *feedback*. Questo aspetto è stato trattato negli anni tramite il modello dei trasporti tradizionale, detto "modello a quattro stadi" in quanto costituito da quattro sottomodelli. Tale sistema di modelli è costituito da un modello di generazione degli spostamenti, un modello di distribuzione degli spostamenti, un modello di scelta modale e un modello di scelta del percorso. L'interazione tra domanda e offerta di trasporto avviene mediante il modello di assegnazione dei flussi alla rete. In questo sistema di modelli non viene considerato l'impatto che il sistema dei trasporti ha sul *land use*, ma

territorio e offerta di trasporto sono ipotizzati invariabili. In realtà, miglioramenti nel sistema dei trasporti, quali l'introduzione di nuove infrastrutture o il potenziamento di quelle già esistenti, possono incrementare l'accessibilità di alcune zone del territorio che, di conseguenza, diventano più attrattive per la localizzazione delle attività residenziali ed economiche.

Negli anni si sono sviluppati diversi modelli che affrontano questa problematica e che sono noti come modelli LUTI (Land Use-Transport Interaction), cioè modelli di interazione trasporti-territorio.

I modelli per la simulazione delle interazioni che avvengono tra il sistema territoriale e quello dei trasporti hanno l'obiettivo di stimare le relazioni reciproche tra i due sistemi. In letteratura esistono numerosi modelli riguardanti le interazioni trasporti-territorio. Essi si differenziano in base alle variabili considerate per modellare il fenomeno oppure in base alla metodologia di analisi scelta. Alcuni studi presenti in letteratura propongono modelli che non studiano l'intero processo di interazione tra i due sistemi ma più semplicemente solo l'influenza del sistema territoriale su quello dei trasporti o viceversa.

Da quando lo studio delle interazioni trasporti-territorio ha assunto particolare importanza, i ricercatori hanno mostrato maggiore interesse nell'analisi dell'influenza di variazioni del sistema territoriale sui comportamenti di viaggio proponendo modelli sempre più evoluti. La ricerca in questo campo è volta soprattutto alla comprensione delle dinamiche urbane. In altri termini, gli studi proposti hanno l'obiettivo di comprendere come e in che misura il sistema territoriale può incidere sui comportamenti di viaggio. L'individuazione di queste tendenze permette poi di indirizzare le politiche urbane verso la riduzione dell'uso del mezzo di trasporto privato a favore dei trasporti collettivi e degli spostamenti pedonali. Queste politiche tendono, in primo luogo, a diminuire i problemi di inquinamento atmosferico e acustico che interessano la maggior parte delle città di grandi dimensioni, favorendo una migliore fruizione del territorio.

La relazione inversa, cioè l'influenza di variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale, risulta, invece, meno esplorata. Ciò è dovuto, come detto in precedenza, al fatto che gli effetti di variazioni del sistema dei trasporti sul territorio avvengono molto lentamente per cui sono osservabili non nell'immediato ma nel corso di decenni. Inoltre, risulta difficile

determinare con chiarezza gli effetti prodotti da variazioni del sistema dei trasporti in quanto le modifiche dell'assetto territoriale sono causate anche da altri fattori, primi fra tutti l'andamento demografico e socio-economico.

2.2 Modelli di interazione trasporti-territorio

Gli approcci proposti in letteratura per la simulazione delle interazioni trasporti-territorio sono molteplici e derivano dal modo in cui le variabili di sistema sono definite, oltre che dalle teorie su cui essi si basano.

I modelli LUTI possono essere raggruppati in due grandi classi: quella dei modelli dinamici e quella dei modelli statici (o modelli d'equilibrio).

I "modelli dinamici" (Wegener, 1998; Simmonds, 2000) simulano le interazioni territoriali per una successione temporale di periodi di riferimento (tipicamente per una successione di anni) e consentono di tenere conto esplicitamente dell'inerzia con cui avvengono le modifiche del sistema urbano (ad esempio i movimenti della popolazione e la variazione del valore dei terreni e degli immobili). Lo sviluppo di questi modelli è stato favorito soprattutto dal continuo sviluppo delle tecnologie informatiche, per cui la maggior parte dei modelli dinamici sono software commerciali che permettono di modellare le interazioni trasporti-territorio oppure estensioni di sistemi informativi territoriali.

Un esempio è costituito dallo studio effettuato da Shaw & Xin (2003). Questi autori non hanno proposto un vero e proprio modello ma un GIS temporale che permette di svolgere analisi esplorative dei dati (EDA, Explorative Data Analysis) per esaminare interattivamente l'interazione fra trasporti e territorio. Gli autori sostengono che utilizzando un GIS tradizionale è possibile misurare le variabili territoriali considerando una determinata suddivisione spaziale, ad esempio la suddivisione in sezioni censuarie, e un istante di tempo fissato. In un GIS spazio-temporale, invece, è possibile valutare come una grandezza varia nel tempo e nello spazio. Questo studio propone un'estensione del classico GIS che tiene conto della componente temporale e aggiunge funzioni che integrano i dati temporali con quelli spaziali. In questo modo il GIS diventa in grado di analizzare le interazioni fra trasporti e territorio dal punto di vista spazio-temporale. Gli schemi spazio-temporali e le statistiche ottenute da questo processo di analisi esplorativa

interattiva possono essere usate per valutare le ipotesi e modificare la struttura dei modelli esistenti.

La maggior parte dei modelli di interazione trasporti-territorio presenti in letteratura rientra nella classe dei “modelli d’equilibrio”. A differenza dei modelli dinamici, quelli statici o di equilibrio (Mackett, 1983; Echenique, 1985; de la Barra, 1989; Andersting e Mattson, 1991) fissano un orizzonte temporale in cui si assume che gli effetti di variazioni del sistema, quali ad esempio la realizzazione di una nuova infrastruttura di trasporto o di un nuovo insediamento residenziale e/o produttivo, si siano completamente manifestati. Per tale orizzonte temporale si analizza quindi la configurazione del sistema in cui le variabili endogene (di cui si vogliono simulare le reciproche interazioni) sono in equilibrio.

Dal punto di vista teorico, è possibile individuare cinque approcci che costituiscono la base dei modelli di interazione trasporti-territorio.

I primi contributi alla comprensione delle interazioni trasporti-territorio sono basati sulla **teoria dell’economia urbana**, di cui Von Thunen (1826) è riconosciuto come il pioniere. Il modello di Von Thunen, inizialmente pensato per spiegare la distribuzione territoriale di produzioni agricole differenti, ha assunto valenza più generale in ambito urbano per la definizione della localizzazione delle residenze e delle attività economiche.

In seguito, Wingo (1961) e Alonso (1964) hanno applicato la teoria economica neoclassica alla localizzazione delle attività e, in particolare, delle attività residenziali, sulla base del processo di compensazione del mercato immobiliare. Secondo questo approccio si assume che gli individui massimizzino la propria utilità scegliendo una localizzazione ottima per la loro residenza, che a sua volta dipende dal compromesso tra il prezzo degli immobili e i costi di trasporto. In questi modelli compare una funzione di bid-rent (funzione del mercato degli affitti) che descrive quanto ciascuna famiglia sia disposta a pagare per vivere in un certo luogo. Successivamente Anas (1984) e Kim (1989) hanno esteso questi concetti a forme più complete di programmazione basate sulle reti e sulla massimizzazione dell’utilità.

Tra i modelli di interazione trasporti-territorio presenti in letteratura basati sulla massimizzazione dell’utilità, molto rappresentativo è il modello proposto da Cascetta et al. (2002a), che segue un approccio comportamentale di equilibrio. Si definisce comportamentale in quanto la domanda di mobilità e

la distribuzione sul territorio delle residenze e delle attività economiche dipende dal comportamento di famiglie, imprenditori e lavoratori. È di equilibrio perchè analizza il sistema trasporti-territorio nel momento in cui le diverse componenti sono in equilibrio, trascurando le configurazioni transitorie.

Il sistema di modelli proposto da questi autori è costituito da tre sottomodelli. Il primo è un modello del sistema dei trasporti che, nota la distribuzione sul territorio di attività economiche e residenze, stima la domanda di mobilità e le prestazioni dell'offerta di trasporto (come costo generalizzato di trasporto e accessibilità). Il modello del sistema dei trasporti è costituito a sua volta da diversi sottomodelli. Le scelte di viaggio sono simulate mediante un modello ad aliquote parziali (Cascetta, 1998); le prestazioni dell'offerta, invece, sono stimate mediante modelli di rete. L'interazione tra domanda e offerta è simulata mediante modelli di assegnazione di equilibrio stocastico.

Il secondo è un modello di localizzazione delle residenze che, per un'assegnata configurazione del sistema dei trasporti, noti i prezzi e le superfici degli immobili e la localizzazione delle attività economiche di base, stima il numero di residenti in ogni zona in base alla categoria socio-economica. Il modello di localizzazione delle residenze è di tipo comportamentale. Si ipotizza che ciascun occupato sceglie la propria residenza in funzione delle convenienze localizzative di ciascuna zona e delle caratteristiche dell'offerta di trasporto. La funzione di utilità dipende dalle prestazioni del sistema dei trasporti (stimate mediante il modello dei trasporti), da attributi di attrattività e socio-economici della zona.

L'ultimo è un modello di localizzazione delle attività economiche non di base (servizi privati e attività commerciali) che, per un'assegnata configurazione del sistema di trasporto e di distribuzione spaziale delle residenze e delle attività di base (industrie e servizi pubblici), fornisce il numero di addetti per i diversi settori economici in ogni zona. A differenza di quanto avviene nel processo di distribuzione delle attività di base sul territorio, che dipende da indirizzi di pianificazione territoriale stabiliti dalle Amministrazioni Pubbliche o da fattori localizzativi macro-aziendali, la distribuzione delle attività non di base dipende dalle scelte degli imprenditori e segue perciò uno schema comportamentale. La funzione di utilità tiene

conto delle prestazioni del sistema dei trasporti, in termini di accessibilità attiva e passiva, di attributi di attrattività della zona e di variabili ombra dipendenti dalle caratteristiche della zona nel contesto urbano.

Un secondo approccio è quello seguito nel **modello di Lowry** (1964), che rappresenta proprio il capostipite della famiglia dei modelli LUTI. Questo modello di interazione spaziale si basa sull'assunzione che il luogo di lavoro determina la localizzazione della residenza e che la popolazione residente determina la localizzazione delle attività legate ai servizi. Il modello originale considera la distribuzione spaziale della popolazione, delle attività economiche, gli schemi di distribuzione delle merci e l'uso del territorio. L'approccio consiste nel legare insieme due modelli di interazione spaziale. Uno di questi modelli assegna gli occupati ad un set predefinito di zone sulla base dei livelli di impiego offerti. Le famiglie degli occupati sono definite tramite un appropriato rapporto di attività (il rapporto tra la popolazione totale e gli occupati totali). Esiste poi una domanda di servizi da parte degli occupati e delle famiglie che viene considerata in un secondo modello di interazione spaziale che assegna l'offerta di servizi nelle stesse zone. Il modello di Lowry integra la teoria della base economica con la teoria dei modelli gravitazionali. Essendo il primo nel suo genere, il modello di Lowry presenta diversi limiti. Ad esempio la popolazione non è differenziata in categorie ma considerata in modo aggregato nelle varie zone della città. Inoltre, manca la simulazione del processo di compensazione del mercato immobiliare.

A partire dal modello di Lowry, sono state effettuate numerose sperimentazioni. In particolare, il modello è stato sviluppato dapprima in una chiave statica e, successivamente, in una chiave quasi-dinamica e dinamica, sulla base del principio di massimizzazione dell'entropia di Wilson (1970). Per prima cosa, è stata introdotta una misura dell'attrattività delle zone residenziali, che rappresenta le caratteristiche del luogo. Gli utenti sono stati divisi a seconda del reddito e le abitazioni sono state classificate in base alla tipologia e alle variazioni di prezzo. Inoltre, sono stati individuati quattro tipi di comportamento nella scelta della residenza. In questo modo il modello considera le differenti forme di interazione spaziale e gli effetti dei cambiamenti che si hanno nel tempo dei costi associati al trasporto e dell'attrattività delle zone. Il modello di Wilson, tuttavia, spiega la relazione

reciproca fra trasporti e territorio fissando le caratteristiche delle zone e i costi di trasporto.

L'introduzione nei modelli di interazione trasporti-territorio di elementi innovativi è stata possibile grazie allo sviluppo di programmi matematici. Seguendo questo terzo approccio, la localizzazione delle attività è stata descritta tramite l'**ottimizzazione di una funzione obiettivo** in cui compaiono i costi di trasporto e le variabili delle attività residenziali ed economiche. Questa funzione è soggetta a vincoli che assicurano che la capacità delle zone non sia superata e che le attività siano tutte localizzate. In particolare, Herbert e Stevens (1960) hanno introdotto l'uso di modelli di programmazione lineare per la localizzazione delle residenze, in cui si considera la funzione di bid-rent. Tali modelli sono stati estesi da Harris (1962) e Wheaton (1974) che hanno sviluppato modelli di programmazione non-lineare includendo i costi del trasporto nella funzione obiettivo. Modelli più recenti basati sui metodi di ottimizzazione vincolata sono stati proposti da Boyce (1986, 1990).

Un quarto approccio è rappresentato dai modelli spaziali multisetoriali basati su strutture **Input-Output**. Questi modelli sono utilizzati nell'ambito dei problemi di localizzazione delle attività produttive e residenziali per rappresentare l'economia del sistema spaziale e la formazione dei prezzi.

Un ultimo approccio è quello basato sulla simulazione micro-analitica, nota con il nome di **microsimulazione**. Con l'avvento di strumenti di calcolo sempre più potenti e meno costosi, la microsimulazione è diventata, negli ultimi anni, una tecnica di analisi sempre più utilizzata. Secondo questo approccio, alcuni attributi del viaggio o le specifiche scelte di viaggio sono generati casualmente in accordo con una predefinita funzione di distribuzione di probabilità, al fine di ottenere una rappresentazione dettagliata degli spostamenti o delle attività incluse in un viaggio. Dall'analisi di questa rappresentazione è possibile valutare l'influenza dei miglioramenti del sistema dei trasporti sulle scelte localizzative. Il metodo di simulazione generalmente utilizzato è il metodo Monte Carlo. Le tecniche di microsimulazione sono alla base di numerosi modelli che simulano il processo decisionale degli utenti riproducendo le loro scelte riguardo viaggi e attività e di modelli di interazione trasporti-territorio (Wegener, 1982; Mackett, 1990).

2.3 Modelli per valutare l'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti

Gli studi presenti in letteratura riguardanti l'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti e, in particolare, sui comportamenti di viaggio, riguardano diversi aspetti del fenomeno e possono essere organizzati in più modi. Nella maggior parte dei casi, i modelli sono classificati in base alla metodologia di analisi adoperata (ad esempio, modello di regressione, simulazione, ecc.). oppure al motivo dello spostamento (ad esempio, alcuni studi si concentrano esclusivamente sugli spostamenti casa-lavoro, o sugli spostamenti casa-acquisti, ecc.). Altri parametri di classificazione dei modelli sono le variabili esplicative scelte per modellare il fenomeno e la natura e il livello di dettaglio dei dati (i modelli possono essere aggregati o disaggregati).

In questo caso, i modelli riguardanti l'influenza territoriale sul sistema dei trasporti sono stati classificati in funzione della metodologia di analisi applicata.

Yoon et al. (2009) hanno proposto un lavoro in cui sono stati elaborati tre set di modelli che utilizzano il metodo della regressione per la stima dell'influenza delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio. I modelli sono stati calibrati a partire da un'indagine svolta a livello nazionale in California e ad alcune variabili relative alle attività economiche. L'analisi è stata svolta a due diversi livelli di aggregazione spaziale. Una prima analisi è stata svolta considerando i dati relativi alle zone censuarie, mentre la seconda analisi riguarda unità spaziali più piccole come i quartieri. Confrontando i due casi, è stato possibile valutare l'impatto del livello di aggregazione spaziale sulla capacità esplicativa del modello. Le variabili considerate nei tre set di modelli per valutare la domanda di spostamento sono: variabili socio-demografiche, variabili di densità delle abitazioni e delle attività economiche, variabili relative alle infrastrutture. Il primo set di modelli stima il numero di spostamenti non motorizzati. Con diversi modelli sono stati stimati gli spostamenti effettuati da un qualunque membro della famiglia e gli spostamenti effettuati dai componenti adulti in possesso della patente di guida. Nel primo caso risulta che gli spostamenti motorizzati aumentano nel caso in cui in famiglia non ci sono figli piccoli, mentre diminuiscono nelle zone con basse densità di residenze e con grandi strade di comunicazione. Nel caso

degli spostamenti non motorizzati effettuati da un membro adulto della famiglia si hanno gli stessi risultati anche se alcune variabili relative all'influenza delle infrastrutture stradali hanno un peso maggiore. In questo primo set di modelli non si registrano variazioni significative cambiando la scala di riferimento. Il secondo set stima gli spostamenti effettuati utilizzando i mezzi di trasporto collettivo. Nel caso delle sezioni censuarie il numero di spostamenti dipende dal reddito e dal numero di componenti della famiglia. Inoltre, dall'analisi emerge che gli spostamenti sono più numerosi nelle zone più densamente abitate. L'influenza delle infrastrutture è complessa e dipende anche dalle densità abitative ed economiche. Considerando i quartieri si hanno risultati diversi a seconda della zonizzazione scelta per effetto del problema dell'unità areale modificabile (MAUP, Modifiable Areal Unit Problem). L'ultimo set di modelli valuta il tempo impiegato per spostamenti effettuati in auto solo dal conducente. Il tempo di viaggio per famiglia aumenta all'aumentare del reddito e del numero di componenti della famiglia. Mantenendo costanti le variabili socio-economiche, il tempo di viaggio diminuisce se la famiglia risiede in una zona densamente abitata. Considerando la suddivisione in quartieri, questa relazione diventa più forte.

In molti studi presenti in letteratura è emerso che le persone che risiedono in quartieri residenziali (caratterizzati da alta densità abitativa, elevata accessibilità, usi del territorio diversi, rete stradale rettilinea) effettuano un numero maggiore di spostamenti a piedi rispetto a coloro che vivono in quartieri sub-urbani. Da qui emerge la possibilità di poter controllare le scelte di viaggio e di mobilità, come la scelta dell'ubicazione della residenza, agendo sulla configurazione dell'ambiente residenziale.

Nel lavoro proposto da Cao et al. (2009), si è indagato sulla relazione esistente tra le caratteristiche dei quartieri residenziali e quelle degli spostamenti motorizzati effettuati per motivi diversi dal "lavoro", utilizzando l'auto o i mezzi di trasporto collettivo, e non motorizzati. Lo studio è stato condotto utilizzando i dati ottenuti da un'indagine effettuata su un campione di quartieri situati nella California settentrionale. Il modello elaborato è una regressione apparentemente non correlata (SURE, Seemingly Unrelated Regression Equations). I risultati del modello mostrano che la scelta della residenza e la possibilità di effettuare uno spostamento offerta dal sistema dei trasporti influenzano la generazione degli spostamenti effettuati con le tre

modalità di trasporto considerate. Inoltre, le caratteristiche del quartiere influenzano i comportamenti di viaggio anche dopo che la scelta della residenza è avvenuta, soprattutto in termini di scelta modale. Di conseguenza, è possibile controllare la scelta del modo di trasporto (spingendo gli utenti verso modi di trasporto non motorizzati) andando ad agire sulla struttura del quartiere.

Secondo alcuni autori la densità urbana è uno dei più importanti indicatori per studiare la domanda di trasporto in ambito urbano. Peng & Lu (2007) hanno condotto analisi spaziali utilizzando un GIS. L'obiettivo dello studio proposto è analizzare le caratteristiche della densità urbana e le sue variazioni spaziali considerando come caso di studio due città cinesi con diverse caratteristiche. Sono stati individuati due tipi di densità, semplice e composta. Appartengono al gruppo delle "densità semplici" la densità della popolazione, la densità di occupazione e la densità di reddito. Sono "densità composte" la densità di posti di lavoro, la densità di scuole e la densità di negozi, ciascuna commisurata al numero di abitazioni. Le variabili della domanda di trasporto considerate sono generazione dello spostamento, modo di trasporto scelto, distanza e tempo di viaggio. L'analisi è stata svolta considerando prima le densità semplici e dopo quelle composte, relazionate in entrambi i casi alle variabili della domanda di trasporto. Mediante l'applicazione delle tecniche di interpolazione spaziale effettuate con il GIS, è stato possibile ottenere delle superfici continue che rappresentano la distribuzione dei valori delle densità semplici. Le densità composte sono state trasformate in superfici continue mediante l'applicazione del principio di massimizzazione dell'entropia. L'area di studio è stata suddivisa in unità spaziali secondo una griglia a maglia quadrata di dimensioni predefinite. In questo modo per ogni unità spaziale è stato possibile individuare un valore univoco per ciascuna variabile della domanda di trasporto e per ciascuna variabile di densità. Le relazioni tra le variabili dei trasporti e le densità sono state rappresentate nel piano cartesiano ed è stato visto che le diverse densità hanno effetti sulle variabili della domanda di trasporto. Ad esempio, all'aumentare della densità di popolazione aumenta il numero di spostamenti ma diminuisce la distanza percorsa. Inoltre, è emerso che le due città presentano comportamenti diversi, forse dovuti alle loro caratteristiche.

Alcuni autori hanno applicato la tecnica di modellazione ad equazioni strutturali (SEM, Structural Equation Modelling) allo studio delle interazioni trasporti-territorio. Questa tecnica è stata utilizzata per la prima volta nel campo dei trasporti negli anni '80 ma le applicazioni riguardanti le interazioni trasporti-territorio sono poche. Ad esempio, Bagley & Mokhtarian (2002) hanno esaminato la relazione che lega il tipo di quartiere residenziale ai comportamenti di viaggio dei residenti, considerando anche variabili demografiche e variabili relative allo stile di vita dei residenti. I dati utilizzati sono stati raccolti nel 1993 e riguardano la popolazione residente in cinque quartieri dell'area metropolitana di San Francisco. Lo studio dimostra che le variabili attitudinali e di stile di vita, insieme alle variabili relative all'uso del territorio, hanno un forte impatto sulla domanda di trasporto.

Simma & Axhausen (2003) hanno elaborato un modello SEM per valutare come le caratteristiche personali degli individui e la struttura spaziale del territorio influenzano i comportamenti di viaggio. In particolare, hanno studiato le misure di accessibilità. I modelli sono basati sui dati derivati da un'indagine sui trasporti svolta in Austria nel 1992. I risultati di questo studio mostrano il ruolo chiave che hanno variabili come il possesso dell'automobile e lo stato occupazionale sulla determinazione del livello osservato di spostamenti. La variabile spaziale più importante è il numero di servizi che possono essere raggiunti da una famiglia. I risultati mostrano, inoltre, che la struttura spaziale non ha un effetto rilevante sui problemi di circolazione stradale, ma allo stesso tempo forniscono utili suggerimenti per provvedimenti da adottare per risolvere il problema del traffico in ambito urbano.

Abreu e Silva et al. (2006) hanno analizzato la relazione tra uso del territorio e caratteristiche socio-economiche, localizzazione della residenza e comportamenti di viaggio. Il modello SEM proposto è basato sui dati relativi all'area metropolitana di Lisbona. Le scelte riguardanti i comportamenti di viaggio si basano su alcune variabili come il tempo totale di viaggio, il numero di spostamenti da effettuare e la distanza dello spostamento utilizzando tre diversi modi di trasporto, il possesso dell'automobile e il possesso di un abbonamento per i mezzi pubblici. Le variabili di uso del territorio sono state determinate mediante l'utilizzo del GIS. L'analisi mostra una forte influenza delle variabili di uso del territorio sui comportamenti di

viaggio, soprattutto nel caso di spostamenti sistematici come quelli casa-lavoro. Infatti, le distanze percorse per effettuare questi spostamenti tendono ad essere più brevi per i residenti dei quartieri tradizionali. Inoltre, queste distanze influenzano il numero di automobili e di abbonamenti dei mezzi pubblici posseduti in famiglia. Anche in questo caso, se si considerano le variabili attitudinali e di stile di vita, si ottengono risultati simili a quelli ottenuti da Bagley & Mokhtarian (2002).

Van Acker et al. (2007) hanno proposto un modello SEM basato sui dati di un'indagine sui trasporti svolta in Belgio (2001-2002). È stato seguito un approccio a due livelli per misurare l'influenza delle caratteristiche socio-economiche e delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio. Dai risultati è emerso che i comportamenti di viaggio sono influenzati, oltre che dalle caratteristiche territoriali, dalla condizione sociale dell'intervistato in maniera rilevante. Infatti, ad una condizione sociale elevata corrisponde un comportamento di viaggio più complesso.

Questa rassegna di modelli mostra l'interesse sempre crescente nell'analisi dell'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti. Si cerca, infatti, di individuare le variabili che più influenzano i comportamenti di viaggio e, soprattutto, la ripartizione tra i modi di trasporto. Questo è dovuto in parte al fatto che le politiche territoriali e dei trasporti sono volte alla diminuzione dell'uso dell'auto in ambito urbano per favorire la riduzione degli impatti sull'ambiente e il miglioramento della qualità della vita delle persone. Si tende, quindi, ad indirizzare la ricerca verso l'individuazione delle relazioni tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti che possano condurre all'orientamento della domanda di trasporto verso la scelta dei modi di trasporto non motorizzati e dei trasporti collettivi.

2.4 Modelli per valutare l'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale

I cambiamenti che avvengono nel sistema dei trasporti, come la costruzione di una nuova infrastruttura o l'ampliamento di una esistente, possono influenzare la localizzazione delle residenze e delle attività che a loro volta influenzano la domanda di trasporto da e per una certa zona.

Il fattore che interviene nella determinazione dei cambiamenti della localizzazione delle attività e della domanda di trasporto è l'accessibilità, che può essere misurata mediante una funzione in cui compaiono variabili di attrattività della zona di destinazione (ad esempio, il numero di posti di lavoro per gli spostamenti per il motivo casa-lavoro) e variabili di costo relative al sistema dei trasporti (ad esempio, il tempo di viaggio o la distanza da percorrere per spostarsi dalla zona di origine a quella di destinazione). Quando in una zona si realizza un intervento migliorativo nel sistema dei trasporti anche l'accessibilità migliora, per cui la zona diventa più attrattiva come destinazione dello spostamento o come zona residenziale o industriale in relazione al tipo di intervento effettuato.

Il sistema delle attività e il sistema dei trasporti interagiscono tra loro in maniera dinamica. In altri termini, l'accessibilità riferita ad un certo periodo di tempo influenza la localizzazione delle attività nel periodo di tempo successivo. Questo avviene in quanto un cambiamento nel sistema dei trasporti ha un effetto immediato sulla domanda degli spostamenti ma influenza i flussi economici nel periodo successivo a quello di riferimento. Al contrario, i cambiamenti nel sistema delle attività hanno effetti immediati sul sistema dei trasporti.

Per valutare l'interazione trasporti/territorio mediante i modelli di trasporto e di *land use*, le misure di accessibilità sono incluse nella determinazione della localizzazione delle attività. Generalmente si assume che le famiglie tendono a localizzare la propria residenza in zone che presentano elevata accessibilità verso attività come lavoro e shopping, mentre le industrie si localizzano in zone con alta accessibilità al mercato del lavoro. Nei modelli in cui sono considerati esplicitamente il mercato immobiliare e quello fondiario, i fattori che determinano l'accessibilità assumono un ruolo determinante sui prezzi di vendita e di affitto (Iacono et al., 2008).

In letteratura sono presenti studi in cui sono stati calibrati modelli di utilità casuale come il modello di interazione trasporti-territorio proposto da Still et al. (1999), che ha lo scopo di valutare l'impatto che i cambiamenti del sistema dei trasporti comportano sull'uso del territorio. In particolare, lo studio riguarda la città di Edimburgo (Scozia) e quantifica l'influenza che cambiamenti del sistema dei trasporti, quali l'introduzione del pagamento di una tassa di accesso al centro della città e la realizzazione di una nuova linea

ferroviaria, possono avere sul territorio nel suo complesso. Per far ciò sono state applicate tre tecniche differenti: il metodo Delphi, un modello statico per valutare le variazioni territoriali e un modello integrato trasporti-territorio.

Il metodo Delphi è un metodo d'indagine iterativo che si svolge attraverso più fasi di espressione e valutazione delle opinioni di un gruppo di esperti. Esso ha l'obiettivo di far convergere l'opinione più completa e condivisa in un'unica "espressione". Solitamente viene applicato per valutare l'impatto di nuove tecnologie nel campo dei trasporti. Questo metodo è stato applicato per valutare quale possa essere la distribuzione della popolazione, dei posti di lavoro e delle attività economiche in un arco temporale di 15 anni in seguito alla realizzazione dei due interventi sul sistema dei trasporti. Il modello statico per valutare i cambiamenti del territorio utilizzato in questo studio è indicato con l'acronimo LUCI (Land Use Change Indicator) ed è stato proposto da Simmonds nel 1991. Il modello determina la localizzazione delle attività in funzione dei cambiamenti dell'accessibilità. Il modello LUCI non tiene in considerazione la componente temporale. Il terzo modello utilizzato è il DELTA, un modello operativo integrato trasporti-territorio elaborato da Simmonds (1999). Questo modello permette di ottenere la previsione dello sviluppo dei processi urbani, i cambiamenti demografici ed economici, le scelte di localizzazione, le variazioni della qualità dell'area urbana e del mercato del lavoro. I risultati ottenuti dall'applicazione dei tre modelli sono stati confrontati. La differenza più evidente è che i tre metodi usano approcci diversi per cui risulta che l'impatto del sistema dei trasporti sul territorio si distribuisce spazialmente seguendo schemi differenti. A parere degli autori, il modello che fornisce i risultati più esaustivi è il modello operativo integrato di interazione trasporti-territorio.

Il modello basato sulla teoria dell'utilità casuale proposto da Cascetta et al. (2002a) permette di simulare le scelte di localizzazione della residenza e delle attività economiche tramite due distinti sottomodelli. Sono state considerate solo le attività economiche non di base, come commercio e servizi, in quanto le attività di base, quali industrie e amministrazioni pubbliche, solitamente vengono localizzate in base ad indirizzi di pianificazione territoriale definiti e a fattori localizzativi aziendali. I dati utilizzati derivano da indagini sulla mobilità effettuate nella città di Napoli nel 1998 e dal Censimento della popolazione condotto dall'Istat nel 1991. Il modello di localizzazione delle

residenze fornisce il numero di residenti in ogni zona divisi per categoria di reddito. Si ipotizza un'assegnata configurazione del sistema di offerta di trasporto e la conoscenza della distribuzione sul territorio delle attività economiche, dei prezzi degli immobili e delle superfici immobiliari disponibili. Il modello di localizzazione delle attività economiche fornisce il numero di addetti per i diversi settori economici di ogni zona per un'assegnata configurazione del sistema di offerta di trasporto e nota la distribuzione spaziale delle residenze e delle attività economiche di base. I risultati hanno mostrato l'importanza delle variabili di disponibilità di superfici e dei prezzi degli immobili. Inoltre, hanno rilevato l'importanza del sistema dei trasporti nelle scelte localizzative, soprattutto nel caso delle residenze, in base all'accessibilità del posto di lavoro e dei servizi e in base alla soddisfazione dell'utenza nei confronti dell'offerta di trasporto.

Per quantificare la misura in cui le variabili del sistema dei trasporti influenzano la scelta della residenza, Kim et al. (2005) hanno svolto un'indagine SP (Stated Revealed o preferenze dichiarate) nella contea di Oxfordshire (UK). L'indagine, svolta nel 2002, è stata usata per stimare un modello Nested Logit per valutare l'intenzione di cambiare residenza e, in caso in cui si decide di cambiare casa, la scelta di localizzazione della residenza. In altri termini, al primo livello il modello stima la probabilità di cambiare o meno casa, al secondo livello stima la scelta della residenza. I risultati del modello relativo all'intenzione di cambiare residenza mostrano che i fattori del sistema dei trasporti hanno un ruolo importante. Infatti, la probabilità di cambiare casa aumenta se crescono il tempo e il costo dello spostamento verso il luogo di lavoro e se aumenta il costo di trasporto per raggiungere il più vicino supermercato. I risultati del modello per la localizzazione della residenza mostrano che i fattori che più incidono sulla scelta della residenza sono le caratteristiche del sistema dei trasporti e l'attrattività della zona come residenza. Infatti, gli individui preferiscono localizzare la propria residenza in zone in cui vi è la combinazione di tempi ridotti per gli spostamenti sistematici, costi ridotti di trasporto, bassa densità e presenza di scuole di buona qualità.

In letteratura molti studi hanno trattato la relazione esistente tra variazioni di accessibilità, dovute a cambiamenti avvenuti nel sistema dei trasporti, e variazione della popolazione, urbanizzazione e sviluppo economico.

Nuzzolo e Coppola (2006) hanno studiato la distribuzione dei residenti e delle industrie sul territorio in relazione a cambiamenti dell'accessibilità indotti da interventi nel sistema dei trasporti e hanno proposto un sistema di modelli per la localizzazione delle residenze e delle attività economiche. Il caso di studio è la regione Campania per cui la scala di analisi non corrisponde ad un contesto urbano ma ad una intera regione in cui si alternano zone densamente urbanizzate e zone rurali. L'obiettivo fondamentale di questo studio è quantificare la relazione esistente tra la variazione di accessibilità e le variazioni di popolazione e occupati nei diversi settori economici. A questo scopo sono state definite una misura di accessibilità attiva, intesa come l'accessibilità dei residenti verso i posti di lavoro, e una misura di accessibilità passiva, cioè l'accessibilità delle attività economiche da parte dei residenti. Dall'analisi della relazione esistente tra accessibilità attiva e distribuzione della popolazione risulta che nelle zone in cui si sono verificati forti aumenti di accessibilità si sono registrati anche notevoli incrementi di popolazione. Da questa analisi emerge che la popolazione preferisce risiedere in zone caratterizzate da buona accessibilità. La relazione tra attività economiche e accessibilità passiva risulta più complessa. Infatti, il numero di negozi al dettaglio aumenta all'aumentare dell'accessibilità, mentre nelle zone in cui si è verificata una diminuzione dell'accessibilità si è registrato l'aumento dei servizi sia pubblici che privati. Di conseguenza, la localizzazione delle attività del settore dei servizi non è correlata alla localizzazione della popolazione.

Il sistema di modelli proposto da questi autori è costituito da due sottomodelli entrambi comportamentali e basati sulla teoria dell'utilità casuale. Il modello di localizzazione delle residenze fornisce il numero di residenti in ogni zona dell'area di studio in funzione delle caratteristiche della zona e dell'offerta di trasporto. Il modello di localizzazione delle attività economiche stima il numero di occupati in un determinato settore economico per ciascuna zona dell'area di studio.

Come detto in precedenza, la realizzazione di nuove infrastrutture di trasporto in ambito urbano può comportare cambiamenti nel sistema territoriale e, soprattutto, nella distribuzione delle residenze. Ad esempio, la realizzazione di nuove linee metropolitane ha comportato importanti modifiche nell'assetto della città di Napoli (Pagliara & Papa, 2011). In questo

studio, sono state considerate 16 stazioni metropolitane aperte tra il 2000 e il 2008 nella città di Napoli. Mediante l'utilizzo di un GIS, per ciascuna stazione è stata definita un'area di influenza, raggruppando le sezioni censuarie che ricadono nel raggio di 500 metri dalla stazione e ipotizzando che la stazione è raggiungibile a piedi in circa 7 minuti. Con il GIS, è stata analizzata la variazione del valore degli immobili nelle aree di influenza delle stazioni. In particolare, è stato osservato che il prezzo degli immobili ha subito un aumento in tutta la città. Tuttavia, questo aumento risulta più rilevante all'interno delle aree di influenza. Inoltre, nelle aree di influenza si è registrata una variazione di popolazione differente rispetto a quella registrata nel resto della città. Infatti, nel periodo di tempo considerato nella città di Napoli si è registrata una diminuzione della popolazione in favore dei Comuni limitrofi, ma nelle zone di influenza delle stazioni questo decremento di popolazione è stato meno rilevante.

Nel legame tra accessibilità e variazioni della popolazione non risulta chiaro, però, in che modo le singole modalità di trasporto influiscono sulla determinazione dell'accessibilità. Ad esempio, in alcuni casi, l'accessibilità della rete autostradale contribuisce all'aumento della popolazione, mentre l'accessibilità della rete ferroviaria influisce positivamente sull'aumento della popolazione urbana. Secondo alcuni autori (Kotavaara et al., 2011), ad oggi lo studio dell'accessibilità determinata considerando contemporaneamente più modalità di trasporto non è ampiamente trattato. Di conseguenza, questi autori hanno proposto un lavoro in cui è stata analizzata la relazione esistente tra la variazione della popolazione e l'accessibilità, calcolata considerando prima la sola rete stradale e nel secondo caso la rete stradale e quella ferroviaria. I dati utilizzati derivano da indagini svolte in Finlandia e comprendono il periodo di tempo che va dal 1970 al 2007. Lo studio è stato condotto considerando due diverse suddivisioni spaziali. Nel primo caso, l'area di studio è stata suddivisa in Comuni, nel secondo caso in quartieri. I dati sono stati analizzati utilizzando un GIS. La relazione tra variazione della popolazione e accessibilità è stata stimata applicando una particolare tecnica di regressione non parametrica: Generalized Additive Model (GAM). Dai risultati ottenuti è stato possibile fare osservazioni delle variazioni della popolazione indotte dall'accessibilità nel tempo. In particolare, nel periodo relativo agli anni '90, la popolazione era concentrata nelle zone in prossimità della rete stradale

caratterizzate da elevata accessibilità. Inoltre, l'accessibilità della rete ferroviaria ha influenzato la popolazione negli anni '70, quando il livello di traffico stradale era basso, e nel periodo 2000-2007 in seguito ad importanti investimenti effettuati nel settore ferroviario.

Un aspetto importante dell'influenza dei trasporti sul territorio è rappresentato dalla componente spaziale delle variabili coinvolte nel processo di interazione. Nel lavoro proposto da Noresah & Ruslan (2009) sono stati studiati i cambiamenti della struttura urbana che si sono verificati in alcune città della Malaysia negli ultimi vent'anni a causa di una rapida industrializzazione dell'intero Paese. Per comprendere le modalità secondo le quali questi cambiamenti si sono verificati, come approccio modellistico è stata applicata la regressione geograficamente pesata (GWR, Geographically Weighted Regression), una tecnica di regressione spaziale mediante la quale è possibile considerare la variazione spaziale delle variabili considerate. Nell'analisi sono state individuate venti variabili indipendenti, divise in quattro gruppi: variabili di accessibilità (come distanza dagli svincoli stradali, dall'aeroporto, dal porto, dalla stazione ferroviaria, dalle aree industriali, dal centro urbano); variabili relative al quartiere (estensione delle zone residenziali, commerciali e industriali); variabili di zonizzazione (relative alla destinazione d'uso dell'unità spaziale considerata); variabili fisiche (come pendenza media della zona, estensione del suolo disponibile per nuove costruzioni). Queste variabili sono state definite mediante l'utilizzo del GIS. La variabile dipendente è la variazione (nello specifico l'aumento) di superficie edificata nel 2002 rispetto al 1992. I risultati della regressione GWR sono stati confrontati con i risultati ottenuti applicando una regressione lineare ordinaria (non spaziale). Da questo confronto è emerso che utilizzando la regressione GWR è possibile tenere in considerazione la variazione spaziale delle variabili che non vengono considerate nella regressione ordinaria. Trascurare gli effetti spaziali può portare a risultati poco attinenti alla realtà del fenomeno.

Da questa rassegna di modelli emerge che gli effetti che un cambiamento operato nel sistema dei trasporti può indurre nel sistema territoriale possono essere molteplici.

La prima categoria di possibili effetti è relativa alla redistribuzione della popolazione, in particolare dei lavoratori, dovuta all'introduzione di nuovi servizi o alla costruzione di una nuova infrastruttura.

Il secondo gruppo di effetti riguarda la localizzazione delle industrie, che dipende dalle variazioni dei costi di trasporto dalla zona di produzione a quella di vendita. L'aumento di tali costi può indurre le aziende a localizzare la propria sede produttiva nelle zone vicine ai mercati finali. Se si verifica una riduzione dei costi di trasporto, diminuiscono anche i costi di produzione. Questo può comportare anche effetti indiretti sull'economia, quali l'aumento dei posti di lavoro nell'industria, della produttività e della domanda di lavoro.

In aggiunta, in seguito ad interventi nel sistema dei trasporti, si possono verificare anche effetti indiretti sul mercato immobiliare, come l'aumento dei prezzi degli immobili in aree in cui si verifica un aumento dell'accessibilità.

CAPITOLO 3

I MODELLI OPERATIVI INTEGRATI PER LA SIMULAZIONE DELLE INTERAZIONI TRASPORTI-TERRITORIO

3.1 Generalità

Nel corso degli anni, a partire dai diversi approcci teorici e metodologici sono stati elaborati diversi modelli per valutare le interazioni trasporti-territorio.

Si definiscono “integrati” i modelli che riproducono le relazioni reciproche tra il sistema dei trasporti e il sistema territoriale. In altri termini, i modelli integrati considerano l’influenza delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio, e l’influenza delle variabili dei trasporti sulle scelte di localizzazione delle residenze e delle attività economiche nel breve e nel lungo periodo.

I modelli di interazione trasporti-territorio si dicono “operativi” quando possono essere usati per applicazioni pratiche in diverse realtà urbane.

Infine, sono “globali” quei modelli che includono una serie completa di processi spaziali che riguardano i cambiamenti del territorio, le scelte di localizzazione fatte dalle famiglie e dalle aziende e la domanda di spostamento.

Alcuni modelli di interazione trasporti-territorio possono essere al tempo stesso integrati, operativi, e globali.

La maggior parte dei modelli operativi integrati permette di trattare un gran numero di variabili relative non solo al sistema territoriale e al sistema dei trasporti, ma anche al mercato immobiliare, come la disponibilità e il prezzo degli immobili, e al mercato del lavoro, come la richiesta o meno di determinate figure professionali. In particolare, alcuni modelli riproducono il processo di interazione tra domanda e offerta del mercato (sia esso relativo agli immobili, ai terreni, ai trasporti, alle merci o ai servizi) e determinano endogenamente le variazioni dei prezzi del mercato.

Attualmente esistono numerosi modelli che permettono di simulare le interazioni trasporti-territorio, caratterizzati da diversi livelli di completezza e di applicabilità. Alcuni autori hanno proposto diverse classificazioni dei modelli operativi, dalle quali è possibile individuare sei modelli operativi integrati che forniscono una buona rappresentazione dell'insieme di approcci usati attualmente nella pratica per la modellazione integrata di trasporti e territorio a scala urbana (Hunt et al., 2005).

I sei modelli selezionati sono i seguenti:

- ITLUP,
- MEPLAN,
- TRANUS,
- MUSSA,
- NYMTC-LUM,
- UrbanSim.

I sei modelli selezionati possono essere suddivisi in due grandi categorie. I primi tre sono modelli operativi, disponibili in commercio e utilizzati in molte applicazioni. Ad esempio, ITLUP è il sistema di modellazione urbana più utilizzato negli USA, mentre EMPAL e TRANUS sono molto utilizzati in Europa e Sud America. Questi modelli, definiti anche "pacchetti" per la loro natura modulare, costituiscono la pratica operativa corrente.

Gli altri tre modelli sono operativi, o quasi operativi, solo in una o più impostazioni pratiche. Ciascuno di essi, però, presenta un significativo ed interessante approccio alla rappresentazione del mercato fondiario e immobiliare, in quanto tratta esplicitamente la variazione dei prezzi.

In definitiva, i sei modelli presentati sono stati selezionati perchè forniscono una buona rappresentazione della serie di approcci usati nella

pratica per simulare l'evoluzione nel tempo del sistema territoriale e del sistema dei trasporti.

3.2 Descrizione dei modelli operativi integrati selezionati

3.2.1 Il modello ITLUP

Il modello ITLUP (Integrated Transportation and Land Use Package) è stato sviluppato e applicato in America circa trent'anni fa (Putman, 1983). Il modello è in realtà un sistema di sottomodelli, tra cui il sottomodello per la localizzazione delle residenze denominato DRAM (Disaggregated Residential Allocation Model), e il sottomodello per la localizzazione dei posti di lavoro EMPAL (Employment Allocation Model). ITLUP si basa essenzialmente sul modello di Lowry per localizzare le famiglie, i posti di lavoro e descrivere i comportamenti di viaggio. I dati in ingresso del modello sono relativi alla popolazione, allo stato occupazionale, al numero di spostamenti effettuati, alle caratteristiche delle famiglie e delle attività economiche.

ITLUP contiene un sottomodello Logit Multinomiale per effettuare la ripartizione modale e un sottomodello di assegnazione che supporta diversi algoritmi per assegnare i flussi alla rete. La generazione e la distribuzione degli spostamenti sono sviluppati contemporaneamente con la localizzazione delle famiglie mediante il sottomodello DRAM.

I sottomodelli DRAM e EMPAL sono spesso usati separatamente e al di fuori delle applicazioni di ITLUP. Inoltre, possono essere utilizzati anche in applicazioni effettuate con altri modelli commerciali di previsione della domanda di trasporto. In questo modo, è possibile ottenere ulteriori dettagli sulla domanda e i costi di trasporto mediante collegamenti esterni con questi ulteriori modelli.

Rispetto agli altri modelli integrati, ITLUP richiede relativamente pochi dati. In aggiunta, DRAM e EMPAL si basano su dati che sono quasi sempre disponibili, come dati relativi alla popolazione, alle famiglie e all'occupazione. Se da un lato questo rappresenta un vantaggio, dall'altro comporta uno svantaggio in quanto molto spesso in questi modelli vengono trascurati alcuni aspetti del mercato immobiliare.

Un recente sviluppo di questo modello è rappresentato da METROPILUS, sviluppato sulla base di ITLUP aggiungendo un database elaborato in GIS.

3.2.2 *Il modello MEPLAN*

Il modello MEPLAN fa parte di un software sviluppato da una società privata di consulenza inglese, il cui nome è Marcial Echenique and Partners Ltd (Echenique *et al.*, 1990).

MEPLAN è stato sviluppato per analizzare, prevedere e valutare gli effetti prodotti da interventi sul sistema territoriale e sul sistema dei trasporti. Il modello MEPLAN è composto da un primo modulo relativo alla struttura economica e all'analisi della domanda e dell'offerta di spazio (modulo territoriale) e da un secondo modulo dedicato all'analisi della domanda e dell'offerta di trasporto (modulo di trasporto). I due moduli dialogano tra loro tramite una apposita interfaccia. Un ulteriore altro modulo consente di mettere a confronto e valutare differenti politiche alternative.

Il modello rappresenta le interazioni spaziali tra le attività urbane utilizzando dei modelli di tipo Input-Output.

La domanda di trasporto è derivata dagli scambi economici tra le diverse attività. Gli spostamenti per motivi di lavoro sono determinati dalla domanda di lavoro espressa dalle attività economiche e dalle differenti localizzazioni delle residenze degli addetti e delle attività economiche. Analogamente la domanda per acquisti dipende dalla domanda di beni e servizi e dalle localizzazioni dei consumatori e delle attività commerciali.

La localizzazione delle attività e delle residenze è influenzata dall'accessibilità, a sua volta determinata dall'offerta di trasporto e dal grado di utilizzo delle reti (congestione). I costi associati allo spostamento di beni e persone (costi monetari, tempo, comfort, affidabilità) sono funzione dei sistemi di trasporto e del grado di concentrazione della domanda sugli stessi.

Trasporto e uso del suolo sono trattati come mercati nei quali l'equilibrio è dato dall'interazione fra offerta e domanda. Nel caso dei trasporti, domanda e offerta sono rappresentate, rispettivamente, dalle reti di trasporto e dai flussi di traffico, mentre nel secondo caso, dallo spazio edificato e dalla domanda di localizzazione di attività e famiglie. Il raggiungimento dello stato di equilibrio

all'interno del mercato del trasporto e di quello dell'uso del suolo definisce i costi generalizzati del trasporto e i prezzi delle aree.

Alla base del funzionamento del modello, vi è l'assunzione che le variazioni dell'offerta di trasporto influenzino le propensioni localizzative delle attività economiche e delle famiglie e che, a loro volta, le nuove localizzazioni delle attività economiche e delle famiglie (indotte dalle modifiche apportate alle configurazioni delle reti) modifichino nel tempo la struttura della domanda di trasporto. Il modello quindi non considera la domanda di trasporto come fissa, ma variabile nel tempo in funzione della configurazione dell'offerta.

Il modello distingue tra effetti di breve e di lungo periodo. Nel breve periodo variazioni dei costi generalizzati di trasporto hanno effetti prevalentemente sulla ripartizione modale, sulla scelta dei percorsi sulle reti e quindi sul costo di trasporto (modello *statico*).

L'accessibilità risultante dall'equilibrio raggiunto tra la domanda e l'offerta di trasporto costituisce a sua volta uno dei fattori che determinano indirettamente i prezzi delle aree, e quindi la localizzazione delle imprese e delle famiglie nel medio e lungo periodo nel modello *dinamico* di previsione.

3.2.3 *Il modello TRANUS*

Il modello TRANUS è stato sviluppato dalla società "Modelistica" con sede in Venezuela e commercializzato sotto forma di software (de la Barra, 1989). TRANUS è strutturato come un sistema di due sottomodelli e permette di simulare la localizzazione delle residenze e delle attività commerciali, l'assetto del territorio, il mercato immobiliare e il sistema dei trasporti.

Il primo sottomodello è un modello di urbanizzazione e simula la localizzazione delle attività sul territorio considerando l'offerta e la disponibilità di terreni e abitazioni in relazione all'accessibilità.

Il secondo sottomodello è un modello di trasporto e, a seconda delle localizzazioni, stima la matrice degli spostamenti emessi per diversi motivi, effettua l'assegnazione degli spostamenti alla rete di trasporto e calcola i costi ad essi associati. Anche se TRANUS è un modello integrato, il sottomodello relativo al sistema dei trasporti può essere usato singolarmente.

I dati di input del modello sono relativi al territorio, alla popolazione, alle attività economiche e al sistema dei trasporti. I risultati forniti dal modello riguardano l'organizzazione dello spazio urbano, in termini di localizzazione delle famiglie e delle attività economiche; i flussi di traffico, suddivisi per modo di trasporto; stime di carattere economico e finanziario, come l'andamento del mercato immobiliare; valutazioni relative alle condizioni ambientali, come il consumo di energia e le emissioni inquinanti.

Il sistema di modelli può essere applicato a qualsiasi scala di analisi, a partire da quartieri urbani fino ad interi paesi.

TRANUS è uno dei modelli operativi più utilizzati nelle applicazioni reali e presenta una struttura generale che può essere adattata a seconda dell'applicazione. Il modello rappresenta le interazioni spaziali tra le attività urbane utilizzando dei modelli di tipo Input-Output.

Una caratteristica fondamentale di TRANUS è l'uso di un set di forme funzionali e di opzioni di modellazione abbastanza ristretto, permettendo un approccio più diretto alla modellazione dei cambiamenti.

3.2.4 MUSSA

Il modello MUSSA (Modelo de Uso de Suelo de SANTIAGO) è stato sviluppato in Cile negli anni '90 (Martinez, 1996).

Questo modello è connesso ad un accurato modello a quattro stadi (denominato ESTRAUS). I due modelli combinati insieme sono indicati con il nome di 5-LUT e forniscono previsioni dell'assetto territoriale e della domanda di trasporto in condizioni di equilibrio.

Il modello è stato usato per esaminare diversi casi di interazioni fra trasporti e territorio, ma è particolarmente indicato nei casi in cui il trasporto pubblico rappresenta la componente centrale dell'analisi.

Il modello si basa sull'applicazione dei principi di microeconomia. Nel modello di equilibrio degli immobili, la domanda di immobili da parte di famiglie e aziende è basata sulla loro "disponibilità a pagare". I compratori cercano di massimizzare il loro risparmio mentre i venditori cercano di massimizzare il prezzo pagato. I prezzi degli immobili sono determinati internamente al modello mediante un processo di equilibrio.

L'analisi è svolta per una serie di anni successivi, per ciascuno dei quali il modello cerca di raggiungere la soluzione di equilibrio. La fase finale del modello, però, è indipendente dal processo iterativo seguito fino a quel momento e non richiede soluzioni per gli anni intermedi.

L'analisi è condotta ad un livello di disaggregazione soddisfacente in quanto il modello considera le zone di traffico. In ogni caso, però, l'analisi può essere condotta anche ad un livello di disaggregazione più alto.

Alcune estensioni del modello MUSSA sono state elaborate per includere nell'analisi anche la valutazione dell'impatto ambientale in termini di emissioni inquinanti dei veicoli.

3.2.5 NYMTC-LUM

Il modello NYMTC-LUM (Anas, 1998) è stato sviluppato dalla società New York Metropolitan Transit Commission (MTC).

Questo modello stima simultaneamente le interazioni tra la scelta della residenza, la disponibilità di immobili commerciali, gli spostamenti per motivi di lavoro e quelli effettuati per altri motivi. La stima viene effettuata con l'esplicita rappresentazione del processo di domanda e offerta che regola ciascun settore trattato.

I dati di input del modello riguardano la distribuzione della popolazione e la distribuzione delle attività economiche di base, come enti e amministrazioni pubbliche, la cui localizzazione non dipende da altri fattori. Inoltre, il modello necessita di una matrice in cui zona per zona è indicata l'impedenza relativa a ciascun modo di trasporto, che viene definita applicando un apposito modello di trasporto elaborato dalla società MTC. Come output il modello restituisce la localizzazione delle residenze e delle attività economiche non di base.

Il modello è incrementale ed è basato su principi della microeconomia. I prezzi delle abitazioni, la disponibilità di spazi commerciali e i salari dei lavoratori sono tutti determinati internamente al modello e sono applicati per mediare tra domanda e offerta.

Alla base dell'applicazione del modello vi è l'ipotesi del raggiungimento dell'equilibrio nell'anno per il quale viene fatta la previsione. L'equilibrio si raggiunge grazie al processo di bilanciamento tra domanda e offerta in relazione ai prezzi e ai salari. Lo stato finale del modello non dipende dal

processo iterativo seguito e non richiede soluzioni per gli anni intermedi tra quelli analizzati.

Per quanto riguarda il livello di aggregazione spaziale, il modello NYMTC-LUM può essere applicato suddividendo l'area di studio in sezioni di traffico. Non può essere applicato ad un livello di disaggregazione maggiore, come a livello delle singole famiglie o degli edifici.

La componente relativa alla modellazione del territorio non è integrata con un sottomodello di trasporto all'interno della struttura del modello, ma è connessa ad un modello di trasporto esterno.

Tra le caratteristiche del modello che facilitano la sua applicazione, si colloca l'utilizzo di piccole zone di traffico come unità spaziali di analisi, e la struttura del modello stesso basata sui principi di microeconomia, che permette di valutare una serie di misure economiche. Inoltre, utilizzando il modello di domanda di MTC è possibile ottenere una dettagliata rappresentazione della rete di trasporto e un efficiente modello di scelta modale.

3.2.6 *UrbanSim*

UrbanSim (Waddell, 2002) è un sistema di simulazione utilizzato per supportare la pianificazione e l'analisi degli interventi da attuare sul sistema urbano. Permette di considerare le interazioni tra il sistema territoriale, il sistema dei trasporti, l'economia e l'ambiente. Può essere utilizzato per valutare l'accessibilità, la disponibilità di abitazioni, le emissioni di gas nocivi e la protezione degli spazi aperti e degli habitat ecologicamente sensibili.

Il modello viene implementato nella prospettiva di un processo dinamico che si genera dalle interazioni fra numerosi decisori all'interno del mercato immobiliare, fondiario e dei trasporti. Il modello UrbanSim è molto disaggregato rispetto agli altri modelli.

UrbanSim è stato progettato per lavorare in collegamento con un tradizionale modello di trasporto a quattro stadi.

I dati di input del modello sono dati relativi alla popolazione e ai posti di lavoro, dati relativi all'andamento dell'economia della zona, piani che regolano il sistema dei trasporti e piani per il governo del territorio e

l'orientamento delle politiche di sviluppo della zona, come la presenza di vincoli ambientali.

Il modello restituisce previsioni sulla futura distribuzione della popolazione per l'anno di riferimento, sulla suddivisione delle famiglie in base a caratteristiche come reddito e numero di componenti, sul tipo di attività economiche, sulla variazione dei prezzi degli immobili, sulle trasformazioni del territorio. Non sono fornite previsioni sulle caratteristiche delle infrastrutture in quanto queste sono utilizzate come input del modello di trasporto.

UrbanSim si basa sul concetto della "disponibilità a pagare" da parte di famiglie e aziende per l'acquisto di un immobile. In questo modello, non vengono fatte ipotesi riguardanti il raggiungimento della condizione di equilibrio. Infatti, viene applicato un modello di disequilibrio per stimare la domanda e l'offerta di edifici che presenta degli incrementi annuali. La domanda di edifici da parte di famiglie o aziende è basata sulla loro disponibilità a pagare. I compratori tendono a massimizzare il loro risparmio, mentre i venditori cercano di massimizzare il prezzo da pagare. Gli edifici vengono offerti per massimizzare i profitti in funzione della domanda apparente. I prezzi degli immobili sono determinati all'interno del mercato immobiliare tenendo in considerazione la zona di traffico e le caratteristiche degli immobili.

All'interno della struttura dinamica del modello, la domanda è basata sull'offerta corrente e i prezzi relativi all'iterazione precedente. I prezzi sono in seguito modificati in base al bilanciamento fra domanda e offerta in ciascun mercato considerato.

3.3 Confronto tra i modelli operativi integrati selezionati

Dopo aver presentato le principali caratteristiche di ciascun modello, è interessante confrontare i modelli selezionati rispetto a diversi aspetti. Per prima cosa i modelli trattano in modo diverso le entità fisiche principali che caratterizzano le aree urbane: tempo, territorio e ambiente costruito.

Per quanto riguarda il tempo, ipotizzare che un'area urbana sia nella condizione di equilibrio è un'ipotesi forte ma risulta molto utile nel caso in

cui devono essere trattati dei casi complessi. Ad eccezione di UrbanSim, tutti i modelli considerati sono modelli statici di equilibrio, che raggiungono l'equilibrio finale in un solo step oppure tendono all'equilibrio in step successivi, svolgendo l'analisi ad intervalli di cinque anni. UrbanSim si applica operando in step successivi distanziati di un anno senza raggiungere la condizione di equilibrio.

In relazione al territorio, tutti i sei modelli si basano su una suddivisione dell'area di studio in zone di traffico più o meno ampie. ITLUP, MEPLAN e TRANUS si basano su una zonizzazione a maglie larghe, mentre MUSSA e NYMTC-LUM operano a livello delle zone di traffico. UrbanSim, invece, considera due livelli di dettaglio spaziale. Infatti, la domanda di trasporto viene calcolata a livello delle zone di traffico, mentre la domanda e l'offerta di immobili viene calcolata a livello delle singole particelle (come, ad esempio, le sezioni censuarie).

Cinque dei sei modelli rappresentano esplicitamente l'ambiente costruito, sottoforma di unità. In ITLUP, invece, si ipotizza che le famiglie utilizzano direttamente il terreno per cui il modello non riproduce le caratteristiche dell'ambiente costruito.

Un'altra caratteristica dei modelli operativi integrati è la capacità o meno di rappresentare il sistema dei trasporti. I sei modelli selezionati considerano differenti modelli in cui ci sono reti di trasporto multimodali. In particolare, MEPLAN e TRANUS contengono al loro interno il modello di trasporto, mentre MUSSA, NYMTC-LUM e UrbanSim sono connessi ad un modello di trasporto a quattro stadi. ITLUP può funzionare in entrambi i modi. Indipendentemente dal modello di trasporto, le informazioni passano al modello di simulazione del territorio nella forma di valori di utilità ottenuti mediante la teoria dell'utilità casuale.

I modelli di interazione trasporti-territorio considerano le decisioni prese da diverse categorie di decisori. È possibile distinguere fra quattro categorie principali: persone, famiglie, aziende private e amministrazioni pubbliche. Nessuno dei modelli operativi selezionati in questo lavoro simula esplicitamente il comportamento dei singoli individui, ma tutti considerano come unità elementare la famiglia. Le amministrazioni pubbliche sono considerate come decisori esterni al modello, a differenza delle imprese private da cui dipende la localizzazione delle attività economiche non di base.

All'interno dei modelli operativi, come visto nelle singole descrizioni del paragrafo precedente, sono considerati diversi settori, come quello dei trasporti, immobiliare, lavorativo. Questi settori sono identificati nella forma di "mercato" in quanto valutati nell'ipotesi di bilanciamento tra domanda e offerta.

Tutti i modelli, ad eccezione di ITLUP che simula solo la domanda, considerano il mercato immobiliare e il mercato di spazi commerciali come interazione tra domanda e offerta di immobili.

In relazione al mercato di merci e servizi, MEPLAN e TRANUS sono gli unici modelli che includono il processo di produzione e consumo delle merci e dei servizi. Gli altri modelli ricevono le informazioni relative a questo settore come dati di input.

Il mercato del lavoro è considerato esplicitamente in MEPLAN, TRANUS e NYMTC-LUM ed implicitamente in ITLUP. Gli altri modelli trattano il mercato del lavoro solo in riferimento alla domanda di spostamento relativa al motivo lavoro.

Per quanto riguarda il sistema dei trasporti, solo MEPLAN e TRANUS considerano esplicitamente la movimentazione delle merci, mentre gli altri si interessano solo dello spostamento di persone. Le infrastrutture e i servizi di trasporto sono dati di input in tutti i modelli.

Il mercato dell'automobile è trattato implicitamente come un fattore esterno in tutti i modelli, anche se il possesso dell'auto può essere trattato come un meccanismo indiretto in quanto va ad influenzare il modello di trasporto.

Dall'analisi delle caratteristiche dei sei modelli operativi integrati scelti, emerge che non è possibile individuare un modello ideale e completo. Infatti, ciascun modello si basa su ipotesi specifiche e permette di approfondire alcuni aspetti del fenomeno di interazione fra trasporti e territorio a discapito di altri. Di conseguenza, per ottenere risultati soddisfacenti è necessario applicare il modello che meglio si adatta al caso in esame.

In definitiva, numerosi sono i modelli operativi che sono stati implementati per la simulazione delle interazioni trasporti-territorio. Tali modelli consentono di considerare la complessità degli aspetti che entrano in gioco in queste interazioni, fra cui l'evoluzione del mercato immobiliare, delle

caratteristiche demografiche, degli assetti territoriali e del sistema dei trasporti.

Nonostante i modelli operativi attualmente utilizzati siano ampiamente applicati per studiare le interazioni trasporti-territorio, questo campo di ricerca è in continua evoluzione. Ad esempio, la maggior parte dei modelli attuali applicano il tradizionale modello a quattro stadi che risulta abbastanza limitato. Uno dei limiti è dato dal fatto che si considera una sola destinazione e un solo motivo dello spostamento per la generazione degli spostamenti (approccio trip-based). Questa assunzione risulta poco realistica e sarebbe pertanto opportuno considerare spostamenti basati su più destinazioni e più motivi (approccio tour-based). L'orientamento futuro nello studio delle interazioni trasporti-territorio è quello di considerare i modelli di tipo activity-based, cioè basati sulla sequenza delle attività, nella definizione del sottomodello del sistema dei trasporti.

Un'altra prospettiva futura è quella di collegare i sottomodelli ambientali ai modelli di interazione trasporti-territorio. Da un punto di vista tecnologico, le prospettive future in questo campo di ricerca sono eccellenti, grazie allo sviluppo di calcolatori sempre più efficienti che permettono di ridurre i tempi di applicazione e risoluzione dei modelli e grazie all'introduzione dei sistemi informativi geografici come strumento di organizzazione dei dati per i modelli urbani.

CAPITOLO 4

LE TECNICHE DI ANALISI SPAZIALE

4.1 Generalità

I processi che investono lo sviluppo delle aree urbane e del sistema dei trasporti sono intrinsecamente dipendenti dalle caratteristiche spaziali delle variabili che entrano in gioco. Infatti, una città è una struttura spaziale ottenuta come risultato delle interazioni nel tempo tra il sistema delle infrastrutture, il mercato immobiliare e fondiario, il sistema legislativo e contributivo e l'insieme delle politiche urbane. I processi di rilevante interesse nell'analisi delle aree urbane comprendono la realizzazione di nuove strutture (costruzioni residenziali o industriali, infrastrutture di trasporto), cambiamenti economici e demografici, mobilità (spostamenti di persone e merci, scelta della residenza) e processi riguardanti l'ambiente (consumo di energia, emissioni e rumore). Lo studio di questi processi, data la loro rilevante componente spaziale, richiede l'utilizzo di tecniche in cui sia considerata la distribuzione spaziale delle variabili che entrano in gioco.

Il concetto di analisi spaziale comprende ogni operazione eseguita sui dati geografici. Le tecniche di analisi spaziale permettono di studiare la forma dell'eventuale aggregazione spaziale delle variabili e l'entità delle relazioni spaziali che intercorrono tra di esse. Dallo studio delle variabili è possibile individuare diversi schemi di aggregazione spaziale e fare delle osservazioni

oggettive su di essi. Ad esempio, è possibile verificare se la distribuzione spaziale è casuale o segue uno schema definito, stabilire le possibili cause di una distribuzione spaziale, verificare se i valori osservati sono sufficienti per studiare il fenomeno spaziale, esplorare l'eterogeneità delle zone all'interno dell'area di studio.

Per descrivere e modellare i dati, l'analisi spaziale è affiancata alle tecniche di statistica spaziale. A differenza delle tradizionali statistiche non spaziali, le tecniche di statistica spaziale comprendono formulazioni e relazioni che si basano su reali misure spaziali di superficie, lunghezza, prossimità, orientamento. Nello studio delle dinamiche urbane è importante tenere in considerazione i cosiddetti "effetti spaziali", quali presenza di *cluster* (raggruppamenti nello spazio dei valori della variabile) o di dispersione, variabilità sistematica nello spazio, violazione delle ipotesi di indipendenza e omogeneità implicitamente assunte nelle analisi statistiche convenzionali. Infatti, nel caso in cui gli effetti spaziali che caratterizzano il fenomeno studiato sono trascurati, si può verificare la perdita di parte delle informazioni, la stima di parametri parziali e il raggiungimento di conclusioni poco esaustive. Lo studio degli effetti spaziali deve essere visto come un'opportunità per ottenere una conoscenza più approfondita del fenomeno studiato. In letteratura si trovano argomentazioni sia metodologiche sia concettuali che promuovono l'utilizzo delle tecniche di analisi spaziale per l'analisi dei processi che caratterizzano le aree urbane. Vi sono diverse tecniche di statistica spaziale che permettono di analizzare le numerose problematiche che compaiono nel trattare gli effetti spaziali dei dati. Tra queste, le tre maggiori tecniche analitiche di analisi spaziale trattate in questa sede sono: autocorrelazione spaziale (spatial autocorrelation), eterogeneità spaziale (spatial heterogeneity) e problema dell'unità areale modificabile (Modifiable Areal Unit Problem, MAUP).

4.2 Autocorrelazione spaziale

4.2.1 Definizione di autocorrelazione spaziale

L'autocorrelazione (o associazione) spaziale è la tendenza delle variabili di mostrare un certo grado di variazione sistematica nello spazio. In termini più

teorici, l'autocorrelazione spaziale è la correlazione tra i valori di una singola variabile che può essere attribuita alla disposizione più o meno aggregata dei valori nello spazio bidimensionale. L'autocorrelazione comporta che le ipotesi di osservazioni indipendenti assunte nelle statistiche tradizionali non spaziali non sono più valide. Esiste l'autocorrelazione spaziale perché i fenomeni che avvengono nel mondo reale sono caratterizzati dalla presenza di ordine, schemi e concentrazioni sistematiche piuttosto che da schemi casuali. La prima legge della filosofia di Tobler esprime questa situazione: "ogni cosa è collegata ad un'altra, ma le cose vicine sono più legate tra loro rispetto alle cose distanti". In altre parole, l'autocorrelazione spaziale rappresenta uno strumento per individuare la dipendenza esistente tra i valori di una variabile localizzati in punti vicini o per individuare schemi sistematici nei valori di una variabile attraverso la localizzazione di ciascuno di essi su una mappa in base a fattori comuni. Negli studi riguardanti le aree urbane questo fenomeno indica che i dati relativi a localizzazioni vicine tra di loro sono solitamente più simili rispetto ai dati localizzati più lontano (Griffith, 2009).

L'autocorrelazione spaziale può essere causata da molteplici processi spaziali, tra cui interazione, scambio e trasferimento, e diffusione e dispersione. Inoltre, il fenomeno di associazione spaziale può essere causato anche da variabili mancanti oppure da errori di misura che non possono essere osservati nelle analisi multivariate (Pàez & Scott, 2004).

I vantaggi che si possono ottenere dallo studio dell'autocorrelazione spaziale di una variabile sono molteplici (Getis, 2007). Infatti, l'autocorrelazione spaziale fornisce test per verificare se la specificazione del modello è corretta; permette di determinare l'entità degli effetti spaziali sulle variabili del modello; fornisce test per verificare il rispetto delle ipotesi di stazionarietà ed eterogeneità spaziale; permette di individuare l'eventuale relazione di dipendenza che una variabile può avere su un'altra. Inoltre, questo tipo di statistica permette di individuare l'influenza che una distanza limite fissata può avere sul modello di regressione spaziale; valutare se la geometria delle unità spaziali considerate può avere effetti sul comportamento della variabile; fornire test per verificare la presenza di relazioni spaziali nei dati; analizzare accuratamente ogni unità spaziale per comprendere se gli effetti spaziali possono influenzare altre unità spaziali limitrofe (autocorrelazione spaziale locale).

L'associazione spaziale può essere modellata mediante uno specifico tipo di modelli di regressione, noti con il nome di modelli di auto-regressione spaziale. Questi modelli sono stati sviluppati in geografia, un campo in cui spesso si ha a che fare con l'analisi di unità areali (come ad esempio le sezioni censuarie) o con dati riferiti ad una rete (nodi di una rete). Recentemente, questo tipo di analisi ha trovato una sostanziale applicazione nell'analisi delle aree urbane.

In questi modelli, la dipendenza spaziale è tenuta in considerazione aggiungendo al modello di regressione un nuovo termine che considera la relazione spaziale con la variabile dipendente. Formalmente il modello si esprime nel modo seguente (Anselin, 1988):

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (4.1)$$

in cui ε è il termine di errore:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad (4.2)$$

Gli elementi del modello sono: il vettore Y ($n \times 1$) delle osservazioni della variabile obiettivo; la matrice X ($n \times K$) delle osservazioni indipendenti comprese le costanti; il vettore β ($1 \times K$) dei parametri corrispondenti alle K variabili indipendenti. Gli scalari ρ e λ sono parametri di associazione spaziale corrispondenti rispettivamente alla variabile obiettivo e al termine di errore, mentre con μ sono indicati termini di errore indipendenti e possibilmente omogenei (Pàez & Scott, 2004). W rappresenta l'operatore spaziale ed è una matrice ($n \times n$) contenente i pesi w_{ij} che descrivono il grado di relazione spaziale (contiguità, prossimità e connettività) tra le unità di analisi i e j . Considerando la contiguità spaziale, nella matrice W un peso pari ad 1 è assegnato alle coppie di unità $i-j$ che condividono un bordo. Se ciò non è verificato, si assegna un peso pari a 0. La connettività può essere espressa in termini di spostamento tra coppie origine e destinazione. In alternativa, la prossimità può essere definita in termini di distanza o mediante una misura di accessibilità, come il tempo di viaggio o i costi generalizzati di trasporto.

Generalmente, il processo di modellazione del fenomeno è preceduto dall'analisi spaziale esplorativa dei dati, indicata comunemente con l'acronimo ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis). L'analisi ESDA è una fase associata alla presentazione visiva dei dati mediante grafici e mappe in modo tale da individuare eventuali schemi di aggregazione spaziale caratterizzanti il fenomeno oggetto di studio. ESDA è una raccolta di tecniche per visualizzare le distribuzioni spaziali, identificare localizzazioni atipiche, individuare schemi di associazione spaziale, aggregazioni (*clusters*) o punti caldi (*hot spot*), e proporre modelli spaziali o altre forme di eterogeneità spaziale. Le misure di autocorrelazione spaziale si dividono in misure globali, riferite al fenomeno nella sua interezza, e misure locali, che si focalizzano su ciascuna delle unità spaziali nelle quali è suddivisa l'area di studio.

4.2.2 Misure globali di autocorrelazione spaziale

L'approccio predominante per valutare il grado di associazione spaziale è basato sulle statistiche globali. Tra i più comuni test per valutare l'autocorrelazione spaziale globale si colloca il cosiddetto "Indice I di Moran". Questa statistica è essenzialmente una misura di correlazione tra prodotti che comprende la grandezza "spazio" per mezzo di una matrice W di misure spaziali pesate (Anselin et al., 2007). L'indice globale I di Moran può essere espresso nella forma seguente:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (4.3)$$

dove n è il numero di aree da considerare, x_i è il valore degli attributi considerati nell'area i , \bar{x} è il valore medio dell'attributo nell'area di studio e w_{ij} sono gli elementi di un operatore spaziale W . Generalmente, l'indice I di Moran viene utilizzato come test per verificare se l'ipotesi nulla di indipendenza spaziale è verificata. In caso positivo, il valore di I è uguale a 0 e ciò indica che non vi è dipendenza spaziale tra i valori della variabile. Nel caso in cui I assume valori positivi (compresi tra 0 e 1), questo significa che ci è una diretta correlazione tra i valori, se invece assume valori negativi

(compresi tra 0 e -1) questo indica che vi è correlazione inversa. Per stimare la significatività dell'indice I , è necessario associare ad esso una distribuzione statistica. Per questo scopo si considera la distribuzione normale.

4.2.3 Misure locali di autocorrelazione spaziale

Nello studio degli schemi di associazione spaziale locale, diverse statistiche spaziali permettono di individuare punti con insolite concentrazioni di alti o bassi valori (*hot* o *cold spots*) che devono essere analizzati. Negli ultimi anni, due tipologie di statistiche sono state utilizzate in molte applicazioni: $G_i(d)$ (Getis & Ord, 1993; Ord & Getis, 2001) e gli Indicatori Locali di Associazione Spaziale LISA (Local Indicators of Spatial Association) come l'indice *I di Moran Locale* (Anselin, 1995).

La statistica spaziale $G_i(d)$ definita da Getis e Ord è basata sulla distanza tra i punti in cui sono localizzati i valori della variabile da analizzare. $G_i(d)$ misura il rapporto tra il valore di una variabile trovata all'interno di un certo raggio da un punto e la somma totale della variabile nell'area di studio. La statistica $G_i(d)$ per un generico punto i e una distanza d fissata è definita nel modo seguente:

$$G_i(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (4.4)$$

dove x_j è il valore della variabile registrato nel punto j , $w_{ij}(d)$ è l'elemento ij della matrice binaria W ($w_{ij}=1$ se il punto rientra nella distanza d , $w_{ij}=0$ altrimenti) ed n è il numero di osservazioni. La media e la varianza di questa statistica possono essere ricavate da un processo di randomizzazione e usate per confrontare la statistica spaziale con una statistica standard. I dati presentano fenomeni di associazione spaziale positiva o negativa quando il valore della statistica standardizzata è più grande del valore limite ad un certo livello di significatività. I valori positivi indicano la presenza nei dati di un raggruppamento di valori relativamente alti, mentre i valori negativi indicano l'associazione di valori relativamente bassi (Pàez & Scott, 2004).

Gli indicatori LISA permettono la decomposizione degli indicatori globali, come l'indice I di Moran, nel contributo di ciascuna osservazione. Questo tipo di statistiche deve soddisfare due requisiti. Per prima cosa, l'indicatore LISA per ogni osservazione deve dare un'indicazione dell'estensione del raggruppamento di valori simili intorno ad un punto osservato; il secondo requisito prevede che la somma dell'indicatore LISA per tutte le osservazioni sia proporzionale all'indicatore globale di associazione spaziale (Anselin, 1995).

Un indicatore LISA per una variabile x_i osservata nel punto i può essere espressa come:

$$L_i = f(x_i, x_j) \quad (4.5)$$

dove f è una funzione e x_j sono i valori osservati nell'intorno J_i di i .

La versione locale dell'Indice I di Moran è data dalla seguente espressione:

$$I_i = x_i \sum_j w_{ij} x_j \quad (4.6)$$

dove i termini che compaiono sono analoghi a quello dell'indice globale. È possibile ricavare la media e la varianza di I_i mediante una procedura di randomizzazione, mentre l'inferenza può essere portata a termine ottenendo una statistica normalizzata.

L'interpretazione dei risultati ottenuti applicando l'indice di Moran locale è meno intuitiva rispetto a quella dei risultati della statistica $G_i(d)$. Per facilitare la lettura dei risultati è possibile individuare quattro schemi di associazione spaziale locale:

1. High-high association: il valore di x_i è al di sopra della media e i valori di x_j nelle zone limitrofe sono generalmente al di sopra della media, la statistica è positiva;
2. Low-low association: entrambi i valori sono al di sotto della media, la statistica è positiva;
3. High-low association: il valore in corrispondenza del punto i è al di sopra della media e i valori della variabile nelle zone circostanti sono al di sotto della media, la statistica è negativa;

4. Low-high association: il valore in corrispondenza del punto i è al di sotto della media e la media pesata è al di sopra della media, il valore di I_i è negativo.

Queste quattro condizioni possono essere rappresentate mediante un grafico a dispersione chiamato *Moran's Scatterplot*. La combinazione della statistica LISA e del diagramma a dispersione di Moran fornisce informazioni sui differenti tipi di associazione spaziale a livello locale.

4.3 Eterogeneità spaziale

4.3.1 Definizione di eterogeneità spaziale

L'eterogeneità spaziale si verifica quando la relazione che lega la variabile dipendente di interesse e le variabili indipendenti varia tra le unità spaziali in cui l'area di studio è stata suddivisa. In altri termini, non vi è una relazione univoca tra la variabile dipendente e quelle indipendenti che vale per l'intera area di studio (Bhat & Zhao, 2002). In termini statistici, l'eterogeneità spaziale può essere rappresentata come una variazione strutturale nella definizione della varianza o come una variazione sistematica nella media del processo (Páez & Scott, 2004).

L'eterogeneità spaziale si manifesta molto spesso nel caso in cui l'analisi è svolta considerando suddivisioni amministrative che delimitano il raggio di azione del processo oggetto di studio.

Trascurare l'eterogeneità spaziale comporta la non adeguatezza dei risultati statistici ottenuti. Per verificare la presenza o meno di eterogeneità spaziale, sono stati determinati degli indici e delle statistiche da applicare sui risultati ottenuti con tecniche non spaziali. La componente spaziale è trascurabile se i valori degli indici calcolati non sono compresi all'interno di un certo intervallo. In caso contrario, per ottenere risultati validi, la componente spaziale deve essere considerata, per cui è necessario trattare i dati applicando le tecniche di eterogeneità spaziale.

Tra i diversi modelli di eterogeneità spaziale è possibile distinguere tre modelli di rilevante importanza: modelli di regressione per classi di dati (*switching regressions*), modelli di regressione multilivello (*multilevel*

models) e modelli di regressione geograficamente pesata (Geographically Weighted Regression, GWR).

4.3.2 Modelli di regressione per classi di dati

La tecnica denominata *switching regression* è una semplice tecnica di modellazione che va a colmare il vuoto esistente tra le analisi a livello globale e quelle a livello locale. Questo metodo permette di classificare un *dataset* all'interno di regimi differenziati e di stimare specifici parametri per ogni regime. I parametri sono così eterogenei tra i regimi (eterogeneità tra le classi) ma sono omogenei all'interno di uno stesso regime (omogeneità all'interno della classe). Ipotizzando che un set di dati può essere suddiviso in due classi, i dati della regressione possono essere organizzati in modo tale da ottenere la seguente espressione in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

in cui Y_1 (di dimensioni $n_1 \times 1$) e Y_2 (di dimensioni $n_2 \times 1$) sono i vettori delle variabili dipendenti e contengono le osservazioni corrispondenti ai due diversi regimi; β_1 e β_2 sono i vettori dei parametri corrispondenti a ciascuno dei due regimi; μ_1 e μ_2 sono i termini di errore del modello.

La struttura della covarianza è definita nel modo seguente:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 I_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 I_2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

4.3.3 Modelli di regressione multilivello

L'applicazione delle analisi multilivello è particolarmente utile nel campo della geografia in cui la componente spaziale gioca un ruolo determinante. Inoltre, in questo campo l'analisi viene svolta raggruppando unità elementari,

quali singoli individui o famiglie, in aggregazioni ad un più alto livello, come quartieri o zone di traffico (Bhat & Zhao, 2002).

Il metodo è basato sul principio di espansione dei parametri del modello introducendo componenti casuali.

Nel caso di un modello a due livelli si ha la seguente formulazione:

$$y_{ij} = \alpha + x_{ij}\beta + \varepsilon_{ij} \quad (4.9)$$

dove il pedice i indica le osservazioni individuali al livello di base i ($=1, 2, \dots, n$), mentre j indica le osservazioni al livello più alto ($j=1, 2, \dots, q; q < n$).

I parametri dell'equazione possono essere ampliati come indicato di seguito:

$$\alpha_j = \alpha_o + \varepsilon_j^\alpha \quad (4.10)$$

dove α_j è riferito alla classe j del secondo livello ed è composto di due parti: un elemento globale α_o e un termine casuale riferito alla categoria j . La formulazione finale del metodo è:

$$y_{ij} = \alpha_o + x_{ij}\beta + (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_j^\alpha) \quad (4.11)$$

Tutte le variazioni non sistematiche del modello sono rappresentate dai due termini di errore presenti in parentesi. Come nel caso della *switching regression*, i parametri variano da una classe all'altra, ma sono globali o fissati all'interno di una data classe (Páez & Scott, 2004).

4.3.4 Modelli di regressione geograficamente pesata

La regressione geograficamente pesata (GWR) è una tecnica relativamente semplice sviluppata modificando una regressione lineare ordinaria in modo tale da tenere in considerazione le variazioni locali (Haung & Leung, 2002).

Il metodo dei minimi quadrati (OLS, Ordinary Least Squares) è la tecnica di regressione più conosciuta, e rappresenta il punto di partenza per effettuare

analisi di regressione spaziale. Può essere rappresentata con l'espressione seguente:

$$y = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k x_k + \varepsilon \quad (4.12)$$

dove y è la variabile dipendente; x_k sono le variabili esplicative; β_0 e β_k sono i coefficienti ed ε sono i residui.

Il metodo dei minimi quadrati fornisce un modello globale creando un'unica equazione che rappresenta il fenomeno per tutta l'area di studio. Per questo motivo possono insorgere diversi problemi legati all'eventuale presenza nei dati di eterogeneità spaziale. Infatti, questo tipo di regressione non spaziale trascura le variazioni che la relazione tra variabile dipendente e variabili indipendenti può subire da un'unità spaziale all'altra all'interno della stessa area di studio. Di conseguenza, la regressione OLS non è in grado di modellare le relazioni che variano nello spazio.

Per modellare l'eterogeneità spaziale, si utilizza la regressione GWR. Questo tipo di regressione spaziale è una forma di analisi locale ottenuta a partire da un modello di regressione modificato con l'introduzione di pesi basati sulla distanza da un punto focale fissato. I pesi sono assegnati alle osservazioni j in base alla distanza geografica da un punto i . Si tiene conto di ciò nei coefficienti che sono costituiti da un set di funzioni.

La tecnica di regressione GWR fornisce un'equazione di regressione locale per ogni unità spaziale in cui viene divisa l'area di studio che assume la forma seguente:

$$y_i = \beta_{0i} + \sum_{k=1}^K x_{ki} \beta_k(u_i, v_i) + \varepsilon \quad (4.13)$$

in cui y_i è la variabile dipendente; x_{ki} sono le variabili esplicative; β_{0i} e β_{ki} sono i coefficienti e ε_i sono i residui.

Il termine $\beta(u_i, v_i)$ rappresenta un set di funzioni delle coordinate geografiche (u_i, v_i) del punto i non specificate e non necessariamente lineari:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i | \gamma) = [X^T W(u_i, v_i | \gamma) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i | \gamma) y \quad (4.14)$$

dove $W(u_i, v_i | \gamma)$ è una matrice diagonale ($n \times n$) dei pesi geografici. Il generico elemento della matrice W può rappresentare l'inverso della distanza tra il punto i e l'osservazione j , oppure può essere uguale a 0 se la distanza tra i due punti è maggiore di un certo valore fissato, altrimenti può essere uguale a 1. Utilizzando una matrice ricavata secondo una di queste procedure, si possono, però, verificare problemi di discontinuità sull'area di studio. Di conseguenza è opportuno specificare ogni elemento di W come una funzione continua e decrescente della distanza tra i due punti.

La funzione utilizzata nella maggior parte delle applicazioni è la funzione Gaussiana:

$$w_{ij} = \exp(-\gamma d_{ij}^2) \quad (4.15)$$

dove d_{ij} che rappresenta la distanza tra la posizione del punto i e quella dell'osservazione j .

Il termine γ può essere definito utilizzando due diversi approcci. Il primo si basa su una procedura chiamata *cross-validation* (CV), un criterio che minimizza la somma totale del quadrato degli errori registrati tra i valori osservati e i valori stimati con il modello. Un secondo approccio prevede l'adozione di un valore arbitrario (Páez & Scott, 2004).

Dopo aver analizzato nel dettaglio la regressione GWR, si deduce che la differenza sostanziale con la regressione ordinaria OLS è rappresentata dai coefficienti β . Infatti, i coefficienti β_k sono costanti nel modello globale mentre sono funzioni non specificate delle coordinate geografiche del generico punto i nel modello locale. Se le funzioni $\beta(u_i, v_i)$ sono ricondotte ad una costante, il modello GWR diventa una regressione ordinaria.

In definitiva, la regressione geograficamente pesata può essere utilizzata per approssimare con un elevato livello di accuratezza la superficie della variabile osservata e trova applicazione in molti aspetti degli studi riguardanti le aree urbane.

4.4 Problema dell'unità areale modificabile

Il problema dell'unità areale modificabile è una potenziale fonte di errore nelle analisi spaziali che utilizzano fonti di dati aggregati. Le analisi spaziali territoriali sono spesso condotte utilizzando dati aggregati, cioè dati riferiti ad unità areali come sezioni censuarie o zone di traffico. I confini delle unità spaziali possono essere reali, come fiumi, infrastrutture, oppure arbitrari, come nel caso delle sezioni censuarie. Quando si tracciano confini arbitrari, la dimensione e la forma dell'area diventano elementi soggettivi e discutibili che hanno conseguenze sui risultati dell'analisi.

Uno dei problemi basilari ai quali si può andare incontro utilizzando dati aggregati riguarda l'unicità dei risultati dell'analisi. In altri termini, per la stessa popolazione oggetto di studio si possono ottenere diversi risultati a seconda della definizione spaziale dei confini di ciascuna unità territoriale. Questo fenomeno prende il nome di problema dell'unità areale modificabile (MAUP) ed è dovuto al fatto che possono essere definiti infiniti sistemi di zonizzazione per suddividere un'area urbana o una porzione di territorio in unità areali più piccole. Una conseguenza diretta è che i risultati di studi territoriali che utilizzano la stessa tecnica analitica possono variare usando differenti sistemi di zonizzazione (Páez & Scott, 2004).

Il problema dell'unità areale modificabile ha due effetti: l'effetto scala e l'effetto aggregazione. Il primo è un problema statistico dovuto all'aggregazione spaziale e al fatto che i risultati ottenuti variano al variare del numero di aree. Ad esempio, alcuni studi hanno evidenziato che all'aumentare della correlazione spaziale la risoluzione spaziale diventa grossolana (Openshaw & Taylor, 1979). L'effetto aggregazione, invece, è causato dalla possibilità di utilizzare numerosi schemi di zonizzazione a seconda del livello di dettaglio. A causa di questo effetto, si verifica la variazione dei risultati al variare della forma e della dimensione delle aree.

Il problema delle unità areali modificabili può interessare diversi tipi di analisi, come la regressione e la correlazione, e può riguardare in generale tutte le applicazioni. Solo nel caso in cui è possibile utilizzare dati a livello individuale, questo problema non insorge. Risulta, però, molto difficile avere dati a livello individuale per diversi motivi, tra cui la necessità di preservare la privacy dei singoli individui. Quando non si hanno a disposizione dati così

disaggregati, si applicano diversi metodi per ridurre gli effetti del MAUP. Uno di questi metodi consiste nel progettare una zonizzazione con unità areali di piccole dimensioni e nell'ipotizzare un ampio set di sistemi di zonizzazione. Se i risultati sono stabili anche variando il sistema di zonizzazione, questo significa che i dati sono indipendenti dalla zonizzazione. Lo scopo è comprendere i processi di base che vengono studiati in sistemi di zonizzazione.

CAPITOLO 5

I MODELLI AD EQUAZIONI STRUTTURALI

5.1 Generalità

I modelli ad equazioni strutturali sono modelli di regressione multivariati, chiamati anche modelli ad equazioni simultanee. Con la tecnica di modellazione SEM (Structural Equation Modelling) è possibile trattare un gran numero di variabili endogene (dipendenti) e variabili esogene (indipendenti) e, in aggiunta, variabili latenti (non osservate) specificate come combinazione lineare di variabili osservate.

A differenza dei tradizionali modelli lineari multivariati, la variabile dipendente in una delle equazioni che compongono il modello SEM può apparire come variabile indipendente in un'altra; inoltre, in un modello SEM le variabili possono influenzarsi reciprocamente l'una l'altra, sia direttamente sia attraverso altre variabili che fungono da intermediarie. Le equazioni strutturali sono volte a rappresentare le relazioni casuali tra le variabili del modello.

Il modello SEM è un metodo confermativo piuttosto che esplorativo, in quanto il modello viene costruito come un sistema di effetti unidirezionali di una variabile su un'altra.

Il SEM è un metodo relativamente nuovo, introdotto a partire dagli anni '70, che trova applicazione in molti campi, quali psicologia, sociologia,

biologia, scienze politiche e studi di mercato. Le prime applicazioni nello studio dei trasporti e dei comportamenti di viaggio risale al 1980. L'uso dei SEM è rapidamente aumentato negli ultimi anni grazie alla diffusione di software che permettono una facile applicazione del modello.

Molto spesso nel processo di costruzione del modello SEM ci si avvale dell'utilizzo di una particolare tecnica denominata "analisi fattoriale", con lo scopo di individuare le variabili latenti da considerare nel modello.

5.2 Caratteristiche dei modelli SEM

Il modello SEM è un tipo specifico di analisi di regressione che ha lo scopo di spiegare la relazione esistente tra le variabili indipendenti (esogene) e le variabili dipendenti (endogene). Il modello è composto di tre gruppi di equazioni simultanee, che vengono stimate contemporaneamente: un modello di misura per le variabili endogene, un modello di misura per le variabili esogene e un modello strutturale. Le variabili del modello possono essere osservate oppure latenti, cioè non osservate direttamente ma definite a partire dalle variabili osservate per mezzo del modello di misura. Il modello così definito prende il nome di "modello SEM a variabili latenti".

Il modello strutturale serve per rappresentare le relazioni tra le variabili esogene e quelle endogene. In generale, è usato per individuare l'influenza delle variabili esogene sulle variabili endogene e le influenze casuali reciproche tra le variabili esogene. Inoltre, il modello strutturale permette di specificare la covarianza dei termini di errore.

L'equazione base del modello strutturale è la seguente (Bollen, 1989):

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (5.1)$$

in cui η (eta) è il vettore delle variabili endogene latenti di dimensioni ($m \times 1$), ξ (xi) è il vettore delle variabili esogene latenti di dimensioni ($n \times 1$) e ζ (zeta) è il vettore delle variabili casuali di dimensioni ($m \times 1$). Gli elementi delle matrici B (beta) e Γ (gamma) sono i coefficienti strutturali del modello.

La matrice B di dimensioni $(m \times m)$ contiene i coefficienti delle variabili endogene latenti, mentre la matrice Γ di dimensioni $(m \times n)$ contiene i coefficienti delle variabili esogene latenti.

Il modello di misura si utilizza per specificare le variabili latenti (non osservate) come funzioni lineari di altre variabili nel sistema. Le altre variabili, se osservate, assumono il ruolo di “indicatori” delle variabili latenti. In questo modo, i modelli di misura sono simili all’analisi fattoriale, ma con una sostanziale differenza. Nell’analisi fattoriale esplorativa tutti gli elementi della matrice, che definiscono le variabili latenti (fattori) in termini di combinazioni lineari delle variabili osservate, assumono valori non nulli e le rotazioni sono sistematicamente eseguite per facilitare l’interpretazione dei fattori. Quando si progetta un modello SEM, invece, si decide anticipatamente quali parametri che definiscono i fattori devono essere pari a zero e quali devono essere stimati liberamente o vincolati ad essere uguali ad altri parametri non nulli. Inoltre, nei modelli SEM è possibile specificare varianze non nulle sia per le variabili osservate sia per quelle latenti. La specificazione di ciascun parametro permette di fare una serie di ipotesi che riguardano la struttura dei fattori. Poiché non vi può essere un gran numero di combinazioni possibili, l’analisi fattoriale esplorativa è a volte usata per guidare la costruzione del modello di misura del SEM.

Le equazioni di base del modello di misura per le variabili esogene e per le variabili endogene sono rispettivamente:

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \quad (5.2)$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad (5.3)$$

in cui x e δ (delta) nella (5.2) sono i vettori legati rispettivamente alle variabili esogene osservate e agli errori; Λ_x (lambda) è la matrice $(q \times n)$ dei coefficienti strutturali per gli effetti delle variabili esogene latenti sulle variabili osservate; y e ε (epsilon) nella (5.3) sono i vettori relativi rispettivamente alle variabili endogene osservate e agli errori; Λ_y ($p \times n$) è la matrice dei coefficienti strutturali per gli effetti delle variabili endogene latenti su quelle osservate.

La figura 5.1 mostra un esempio di modello SEM a variabili latenti in cui compaiono due variabili latenti esogene e una variabile latente endogena. Le variabili latenti sono determinate a partire da variabili osservate che sono chiamate indicatori. Ogni indicatore presenta un certo errore.

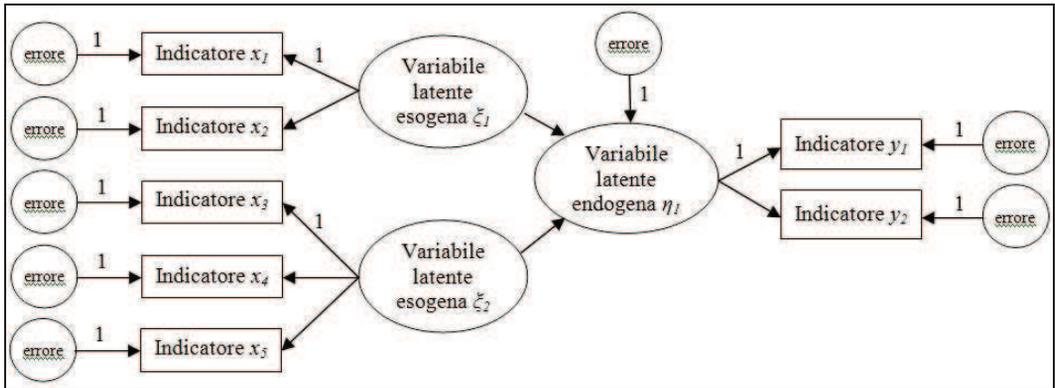


Fig. 5.1 - Esempio di modello SEM.

In questo caso il modello strutturale è costituito di una sola equazione, che assume la seguente forma indiciale:

$$\eta_1 = \beta_1 \eta_1 + \gamma_{11} \xi_1 + \gamma_{12} \xi_2 + \zeta_1 \quad (5.4)$$

Nella forma matriciale il modello strutturale si esplica nella seguente espressione:

$$[\eta_1] = [\beta_1][\eta_1] + [\gamma_{11} \quad \gamma_{12}] \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + [\zeta_1] \quad (5.5)$$

Il modello di misura, in riferimento all'esempio analizzato, permette di determinare le due variabili latenti esogene, utilizzando rispettivamente due e tre indicatori, e la variabile latente endogena a partire da due indicatori.

Le equazioni esplicitate del modello di misura per le variabili latenti esogene sono le seguenti:

$$x_1 = \lambda_1 \xi_1 + \delta_1 \quad (5.6)$$

$$x_2 = \lambda_2 \xi_1 + \delta_2 \quad (5.7)$$

$$x_3 = \lambda_3 \xi_2 + \delta_3 \quad (5.8)$$

$$x_4 = \lambda_4 \xi_2 + \delta_4 \quad (5.9)$$

$$x_5 = \lambda_5 \xi_2 + \delta_5 \quad (5.10)$$

In forma matriciale assumono la forma seguente:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ \lambda_2 & 0 \\ 0 & \lambda_3 \\ 0 & \lambda_4 \\ 0 & \lambda_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Le equazioni esplicitate del modello di misura per le variabili latenti endogene sono le seguenti:

$$y_1 = \lambda_6 \eta_1 + \varepsilon_1 \quad (5.12)$$

$$y_2 = \lambda_7 \eta_1 + \varepsilon_2 \quad (5.13)$$

In forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_6 \\ \lambda_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Nel modello SEM è possibile fare distinzione tra effetti “diretti”, “indiretti” e “totali”. Questo aspetto è molto utile per ottenere migliori intuizioni sulla complessa natura del fenomeno analizzato, come nel caso dell’analisi dei comportamenti di viaggio.

Gli effetti “diretti” sono gli effetti che una variabile produce su un’altra. Gli effetti “indiretti” sono quelli che si hanno tra due variabili per mezzo di una o più variabili che intervengono da intermediarie. Gli effetti “totali” non sono altro che la somma di effetti diretti e indiretti e rappresentano l’effetto complessivo di una variabile indipendente su una dipendente.

Il modello SEM nel suo complesso è stimato usando l’analisi della covarianza. Ciò significa che i parametri del modello sono determinati in modo tale che varianze e covarianze della variabile definita dal modello siano il più vicino possibile ai valori di varianze e covarianze del campione osservato.

L’equazione strutturale del modello viene generalmente stimata usando il Metodo della Massima Verosimiglianza (ML, Maximum Likelihood), che massimizza la probabilità che le covarianze osservate siano ottenute da una popolazione che ha varianze e covarianze generate dal modello, assumendo una distribuzione multivariata normale. La stima ML è abbastanza robusta nei confronti delle violazioni dell’ipotesi di normalità per campioni comunemente utilizzati negli studi riguardanti i trasporti (Golob, 2003).

5.3 Metodi di specificazione del modello

Un modello SEM è costruito a partire da effetti diretti ipotizzati tra le variabili e tra la covarianza dei termini di errore. Ogni effetto generalmente corrisponde a un parametro libero. Se il SEM non presenta modelli di misura, e di conseguenza in esso non compaiono variabili latenti, ci sono quattro tipi di parametri liberi potenziali: l’effetto della regressione di ciascuna variabile esogena su ogni variabile endogena, l’effetto di ogni variabile endogena su ciascuna delle altre variabili endogene, la varianza del termine di errore di ogni variabile endogena e la covarianza tra i termini di errore di ogni coppia di variabili endogene.

Se il modello SEM contiene variabili endogene latenti, la varianza e la covarianza dei termini di errore riguardano le variabili endogene latenti e la lista dei potenziali parametri liberi contiene anche l’effetto di una variabile latente sugli indicatori osservati, le varianze dei termini di errore di ciascuna variabile latente e, infine, le covarianze fra i termini di errore e ogni coppia di variabili latenti osservate.

Se il modello contiene variabili esogene latenti, si hanno varianze e covarianze dei termini di errore relativi alle variabili esogene.

Attualmente i modelli SEM possono essere applicati mediante l'utilizzo di software che permettono di specificare il modello usando la notazione matriciale, le equazioni simboliche e/o i diagrammi di flusso. In commercio vi sono numerosi programmi per definire i modelli SEM. Uno dei primi programmi utilizzati è LISREL (Jöreskog and Sörbom, 1993), mentre il più utilizzato è AMOS (Arbuckle, 1994, 1997), programma che permette di effettuare tutte le analisi relative ai modelli SEM e che è disponibile come un componente del software statistico SPSS.

Una grandezza che misura la dimensione del modello SEM è costituita dai gradi di libertà, che corrispondono alla differenza tra il numero di parametri liberi e quello delle quantità note. Il numero delle quantità note nell'analisi della covarianza è dato dal numero di elementi liberi nella matrice di varianza-covarianza delle variabili. L'abilità nella costruzione di un modello SEM consiste nella specificazione di un modello in cui alcuni dei parametri sono liberi e la maggior parte di essi tendono a zero. In questo modo il modello costituisce una possibile rappresentazione del fenomeno oggetto di studio.

Le conoscenze teoriche da un lato e il buon senso dall'altro devono essere la guida per la specificazione del modello.

Il modello "saturato" ha gradi di libertà pari a zero e riproduce perfettamente il fenomeno reale. Questo modello, però, è solo una base teorica per verificare i criteri di "goodness-of-fit" e serve per vedere quali parametri possono tendere a zero. Per ridurre la complessità del modello si possono eliminare gli effetti di regressione più deboli, ridurre il numero di indicatori per ogni variabile latente e minimizzare le covarianze deboli fra i termini di errore. Nel caso di un SEM con variabili latenti, i modelli di misura dovrebbero essere sviluppati per prima rispetto al modello strutturale.

La stima di un modello non è possibile se più di una combinazione di valori di un certo parametro vengono utilizzati per riprodurre gli stessi dati (covarianza). In questo caso il modello non è identificato. Nei modelli riguardanti i comportamenti di viaggio con una sola variabile endogena, l'identificazione di solito non crea problemi e comunque la flessibilità dei

SEM permette di specificare con facilità un modello che non sia non identificato.

Ci sono regole pratiche distinte per il modello di misura e per quello strutturale, ma l'intero sistema può essere identificato anche se ci sono problemi con uno dei sottomodelli, in quanto i limiti presenti in un sottomodello possono condurre all'identificazione dell'altro sottomodello.

Le regole pratiche per l'identificazione dei modelli di misura prescrivono che il numero di variabili osservate sia collegato a quello di ogni variabile latente e se i termini di errore delle variabili latenti sono specificati questi devono essere correlati.

Le regole pratiche per l'identificazione dei modelli strutturali prescrivono che tutti i modelli ricorsivi, in cui non c'è retroazione nelle catene di effetti diretti, possono essere identificati purché non ci siano correlazioni fra i termini di errore. I modelli non ricorsivi possono essere divisi in blocchi in cui tutte le retroazioni sono contenute in un blocco in modo tale che la relazione tra i blocchi è ricorsiva. Se ogni blocco soddisfa le condizioni di identificazione, l'intero modello risulta identificato.

Nella maggior parte dei casi quando ci sono valori anomali degli errori e della varianza dei coefficienti potrebbero verificarsi problemi di identificazione.

5.4 Metodi di calibrazione del modello

Il principio fondamentale dell'analisi della covarianza è che ogni modello statistico lineare comporta una matrice varianza-covarianza delle sue variabili. La forma funzionale di ogni elemento all'interno della matrice varianza-covarianza delle variabili endogene ed esogene può essere ottenuta a partire dalle equazioni del modello SEM utilizzando una matrice algebrica. L'analisi della covarianza permette di determinare i parametri del modello quando si verifica che varianza e covarianza stimate sono il più vicino possibile ai valori di varianza e covarianza osservati nel campione. Nelle regressioni multiple, questo procedimento porta a determinare le equazioni del metodo dei minimi quadrati. Nel caso del SEM con più variabili endogene, soprattutto se latenti, la stima è più difficile per cui sono stati sviluppati diversi metodi. La scelta del metodo di stima più appropriato dipende dalle ipotesi fatte sulla

distribuzione di probabilità, sulle proprietà delle variabili, sulla complessità del modello SEM e sulla dimensione del campione.

I metodi di stima più utilizzati nel processo di stima di un modello SEM sono il metodo della massima verosimiglianza (ML), il metodo dei minimi quadrati (GLS, Generalized Least Squares), il metodo dei minimi quadrati ponderati (WLS, Weighted Least Squares), il metodo dei minimi quadrati ponderati nella forma di distribuzioni asintotiche (ADF oppure ADF-WLS, Asymptotically Distribution Free Weighted Least Squares), e il metodo dei minimi quadrati ponderati ellittici (EGLS oppure ELS, Elliptical Reweighted Least Squares). Tutti questi metodi sviluppano una funzione scalare di adattamento che viene minimizzata usando metodi numerici. Gli errori standard e le correlazioni dei parametri sono calcolati a partire dalle matrici delle derivate di primo e secondo ordine della funzione di adattamento. Il prodotto della funzione di adattamento ottimizzata e della dimensione del campione segue la distribuzione chi-quadro con gradi di libertà pari alla differenza tra il numero di elementi liberi nelle varianze e covarianze osservate e il numero di parametri liberi nel modello.

Il metodo di massima verosimiglianza è quello più utilizzato. La soluzione del metodo ML massimizza la probabilità che le varianze osservate siano estratte dalla popolazione che ha varianza e covarianza generata dal processo implicito nel modello, assumendo una distribuzione normale multivariata. Gli stimatori ML sono esaminati accuratamente rispetto alla violazione dell'ipotesi di normalità, alla non convergenza e a soluzioni improprie. La linea di fondo è che gli stimatori del metodo ML sono abbastanza robusti rispetto a violazioni dell'ipotesi di normalità per campioni di dimensioni compatibili a quelle dei problemi che riguardano il campo dei trasporti. Gli studi di simulazione hanno mostrato che l'eccesso di curtosi (addensamento di una distribuzione intorno al suo valore modale) è il principale aspetto che influenza la stima dell'errore standard. Per tenere in considerazione il non rispetto dell'ipotesi di normalità, si possono applicare delle correzioni agli stimatori. Alcune correzioni possibili sono una robusta stima dell'errore standard (RML, Robust ML) e un test statistico scalato (SML, Scaled ML). In aggiunta, per tener conto di valori mancanti e dati che non rispettano l'ipotesi di normalità, si sta diffondendo l'applicazione di stimatori bayesiani basati sull'algoritmo EM.

Grazie alla robustezza del metodo di stima ML e ai fattori di correzione applicabili nel caso in cui l'ipotesi di normalità non sia rispettata, il modello SEM elaborato con la stima ML può essere usato anche quando si utilizzano dati relativi a sensazioni e percezioni dell'utente.

Al fine di minimizzare ulteriormente i condizionamenti, ADF-WLS e la relativa formulazione ellittica sono stati appositamente definiti per le variabili endogene. Queste stime si mostrano consistenti ed efficienti e presentano misure corrette asintoticamente per valutare l'adeguatezza del modello all'interno di un definito insieme di condizioni. Il principale svantaggio di questo metodo è la necessità di disporre di un campione di dati di dimensioni più grandi rispetto a quello richiesto con il metodo ML.

Anche i problemi di dimensione del campione hanno ricevuto una notevole attenzione. Come detto in precedenza, la stima ADF-WLS richiede un campione di grandi dimensioni (almeno un migliaio di osservazioni). La stima con il metodo della massima verosimiglianza ML richiede un campione sufficientemente grande soprattutto quando si utilizzano dati che non rispettano l'ipotesi di normalità.

5.5 Metodi di validazione del modello

Nel corso degli anni, sono stati sviluppati numerosi criteri per valutare l'adeguatezza di un SEM e per valutare il migliore tra più modelli. Questi criteri possono essere suddivisi in due grandi gruppi: criteri basati su indici assoluti e criteri basati su indici incrementali di adattamento.

Gli indici assoluti di adeguatezza sono misure che danno un'indicazione di come il modello proposto si adatti ai dati. Il calcolo di questi indici non si basa sul confronto con un modello di base. Fanno parte di questa categoria misure come il test χ^2 (chi-quadro), la radice quadrata dell'errore di approssimazione RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation), statistica GFI (Goodness-of-Fit), statistica AGFI (adjusted goodness-of-fit), radice quadrata dei residui RMR (Root Mean square Residual) e radice quadrata dei residui standardizzata SRMR (Standardized Root Mean square Residual).

Il test χ^2 è la tradizionale misura utilizzata per valutare la bontà del modello nel complesso e valuta l'entità della discrepanza tra la matrice di covarianza

del campione e quella stimata (Hu and Bentler, 1999). Un buon modello dovrebbe avere un valore di chi-quadro inferiore a 0,05. Nonostante questo test sia molto utilizzato, ci sono delle limitazioni. Per prima cosa, questo test ipotizza la condizione di normalità multivariata. Quando nel modello non è rispettata l'ipotesi di normalità, applicando questo test si potrebbe rigettare il modello anche se esso è propriamente specificato. In secondo luogo, il chi-quadro è un test di significatività statistica sensibile alle dimensioni del campione. In base al risultato del test, con un campione di grandi dimensioni il modello andrebbe rigettato quasi sempre, mentre per piccoli campioni il test perde di significatività.

La statistica RMSEA serve per valutare se il modello si adatta bene alla matrice di covarianza del campione (Byrne, 1998). Questo indice è molto sensibile al numero di parametri stimati nel modello. Generalmente, un valore compreso tra 0,05 e 0,10 rappresenta un buon risultato mentre valori superiori a 0,10 rappresentano una stima scadente (MacCallum et al., 1996). Successivamente, questo limite superiore è stato abbassato a 0,6 (Hu and Bentler, 1999).

La statistica GFI è stata introdotta come un test alternativo al chi-quadro e calcola la percentuale di varianza che si spiega con la covarianza della popolazione stimata. Osservando le varianze e le covarianze rappresentate dal modello, si vede come il modello da vicino riesce a replicare la matrice di covarianza osservata. Il valore di GFI è compreso tra 0 e 1. Quando si ha un gran numero di gradi di libertà rispetto alla dimensione del campione, la statistica tende ad un valore più basso. È stato sperimentato che il valore di GFI aumenta all'aumentare del numero di parametri e tende a valori più alti quando si hanno campioni grandi. Solitamente, per essere accettabile, GFI deve essere pari circa a 0,90 ma alcuni studi di simulazione hanno mostrato che quando le dimensioni del campione sono piccole è meglio avere un valore pari a 0,95. Questo indice è molto sensibile alle caratteristiche del campione per cui negli ultimi anni è sempre meno usato e al suo posto è stata introdotta la statistica AGFI basata sui gradi di libertà. In questo modo nel calcolo della statistica AGFI sono favoriti i modelli più semplici e penalizzati quelli più complessi, rispetto al calcolo di GFI. Anche i valori di AGFI sono compresi tra 0 e 1 e generalmente sono accettabili valori prossimi a 0,90. Dato l'effetto

delle dimensioni del campione, questi due indici di adattamento spesso sono associati ad altri indici per valutare l'adeguatezza del modello.

Le statistiche RMR e SRMR sono la radice quadrata della differenza tra i residui della matrice di covarianza del campione e la matrice di covarianza stimata con il modello. L'intervallo dell'indice RMR è calcolato in base alla scala di ciascun indicatore per cui se ci sono elementi con vari livelli, l'indice RMR diventa difficile da interpretare. La versione standardizzata SRMR di questo indice permette di risolvere questo problema e fornisce un'interpretazione più significativa. I valori di SRMR sono compresi tra 0 e 1. Un modello riproduce adeguatamente il campione se SRMR assume valori inferiori a 0,05 (Byrne, 1998; Diamantopoulos and Siguaw, 2000), anche se sono accettabili valori fino a 0,08 (Hu and Bentler, 1999). Generalmente, SRMR è più basso quando il numero di parametri stimati è elevato e la dimensione del campione è grande. Quando il valore di SRMR è pari a 0, il modello riproduce perfettamente la realtà.

Gli indici incrementali di adattamento, noti anche come indici di adattamento comparativi o relativi, sono un gruppo di indici che non usano il chi-quadro nella sua forma grezza ma comparano il valore di chi-quadro con un modello di base. Per questi modelli l'ipotesi nulla è che tutte le variabili non sono correlate (McDonald and Ho, 2002). Rientrano negli indici incrementali di adattamento le seguenti statistiche: indice normalizzato di adeguatezza NFI (Normed Fit Index) e indice comparativo di adeguatezza CFI (Comparative Fit Index).

La statistica NFI valuta il modello comparando il valore di χ^2 del modello e quello del modello nullo. Il modello nullo o indipendente rappresenta lo scenario peggiore in cui tutte le variabili non sono correlate. I valori di NFI vanno da 0 a 1, in particolare un buon modello è caratterizzato da valori prossimi a 0,90. Un inconveniente di questo indice è l'elevata sensibilità alla dimensione del campione per cui si possono avere valori sottostimati per campioni che contengono meno di 200 osservazioni. Di conseguenza, per valutare l'adeguatezza del modello non è consigliabile utilizzare solo questo indice. Questo problema è stato superato con l'introduzione dell'indice di adeguatezza non normato NNFI (Non-Normed Fit Index), noto anche con il nome di indice di Tucker-Lewis. Di contro, NNFI è piuttosto adatto per modelli semplici, inoltre nel caso di campioni piccoli si possono avere valori

che indicano l'inadeguatezza del modello anche se in realtà il modello è buono. Questo indice è di difficile interpretazione perchè i suoi valori possono essere anche superiori all'unità. In genere, affinché un modello sia accettabile, si devono avere valori pari a circa 0,80 ma sono stati proposti come accettabili anche valori superiori a 0,95 (Hu and Bentler, 1999).

L'indice CFI è una forma revisionata dell'indice NFI che tiene conto delle dimensioni del campione. Questo indice è stato introdotto da Bentler (1990). Questa statistica ipotizza che tutte le variabili non sono correlate (modello nullo o indipendente) e confronta la matrice di covarianza del campione con questo modello nullo. I valori di CFI oscillano tra 0 e 1 e affinché il modello sia accettabile si deve verificare che $CFI \geq 0,95$ (Hu and Bentler, 1999). Attualmente CFI è uno dei più importanti parametri calcolati dai programmi utilizzati per elaborare i modelli SEM in quanto è quello che risente meno della dimensione del campione.

Un'altra categoria di indicatori dell'adeguatezza del modello è quella in cui rientrano i cosiddetti "criteri di informazione". Il più conosciuto fra questi è l'indice AIC (Akaike Information Criterion), anche nella versione che tiene conto della dimensione del campione, che viene indicato con l'acronimo CAIC (Consistent Version of AIC). Queste statistiche sono usate quando si confrontano modelli non gerarchici elaborati con gli stessi dati. Esse indicano quale dei modelli è il più conveniente. Valori piccoli suggeriscono una buona corrispondenza del modello alla realtà. I valori di AIC e CAIC non sono normalizzati per cui non rientrano nell'intervallo 0-1.

5.6 Analisi fattoriale

Nella definizione di un modello SEM, si può applicare una particolare tecnica, l'analisi fattoriale, che permette di definire le variabili latenti da considerare nel sistema.

L'analisi fattoriale è una tecnica di analisi dei dati che permette di individuare uno o più fattori latenti che riassumono le similarità che accomunano una serie di variabili. In altri termini, è un metodo di analisi multivariata volto a spiegare le correlazioni fra un insieme di n variabili osservate attraverso un insieme di m variabili non osservate.

Oltre che nella definizione delle variabili di un modello SEM, l'analisi fattoriale può essere utilizzata anche come tecnica a se stante in diversi casi:

- per selezionare alcune variabili da un insieme più grande, considerando le variabili che hanno correlazione elevata con le componenti principali;
- per creare un gruppo di fattori che devono essere trattati come variabili non correlate come approccio per valutare la multicollinearità in procedure come la regressione multipla;
- per convalidare una scala o un indice.

Il punto di partenza dell'analisi fattoriale è rappresentato dalla matrice che contiene le correlazioni tra le variabili osservate, mentre il punto di arrivo è costituito da una matrice che contiene una misura della relazione tra le variabili osservate e i fattori latenti. In altri termini, l'analisi fattoriale sostituisce le variabili osservate con nuove variabili latenti, cioè che non vengono osservate direttamente ma ricavate dall'analisi. Queste variabili latenti, dette anche fattori latenti, non sono correlate tra loro e cercano di spiegare il massimo della covarianza e/o della varianza delle variabili osservate.

L'analisi fattoriale si articola in alcuni passi fondamentali:

- valutazione dell'adeguatezza delle variabili;
- valutazione della possibilità di ridurre in fattori la matrice di correlazione;
- scelta del metodo di estrazione dei fattori;
- scelta del numero di fattori;
- scelta del metodo di rotazione dei fattori;
- interpretazione della soluzione;
- validazione della soluzione.

Tra i metodi a variabili latenti, l'analisi fattoriale è quello più antico e usato. C'è uno stretto legame tra l'analisi fattoriale FA (Factor Analysis) e l'analisi delle componenti principali PCA (Principal Components Analysis). Infatti, spesso si vede la PCA come un metodo della FA (ad esempio, il software statistico SPSS tratta entrambi i metodi nella stessa procedura). In realtà, i due metodi sono profondamente diversi. La PCA è un metodo descrittivo che ha l'obiettivo di riassumere una matrice di dati in maniera tale da esprimere la sua struttura in un numero ridotto di dimensioni. La FA, invece, è una tecnica che, fatte alcune ipotesi sulle possibili relazioni tra le

variabili, individua i fattori latenti nei quali sono raggruppate le variabili coinvolte.

Entrambi i metodi sono ampiamente usati. La scelta del metodo si basa essenzialmente su due criteri: l'obiettivo dell'analisi fattoriale e la conoscenza o meno a priori della varianza delle variabili. La PCA si utilizza quando si vuole determinare il minimo numero di variabili per definire il problema. Al contrario, l'analisi fattoriale FA permette di determinare i fattori latenti a partire dalle variabili rilevate.

Una volta scelto il metodo, si può procedere con l'estrazione dei fattori non ruotati, che forniscono indicazioni sul numero di fattori. Ci sono diversi criteri per determinare il numero di fattori da estrarre e alcuni software provvedono in automatico ad effettuare la scelta del criterio più adatto.

Per ottenere dei risultati più significativi è opportuno effettuare l'analisi utilizzando anche un metodo di rotazione, che consiste nella rotazione degli assi (che rappresentano i fattori o componenti dell'analisi fattoriale). La rotazione dei fattori può essere ortogonale (si conserva l'angolo retto tra gli assi) oppure obliqua.

I metodi di rotazione ortogonale sono i seguenti:

- QUARTIMAX: questa tecnica punta alla rotazione dei fattori iniziali in modo tale che una variabile pesi di più su un solo fattore;
- VARIMAX: questo metodo massimizza la somma delle varianze dei pesi nella matrice dei fattori ruotati;
- EQUIMAX: questa tecnica rappresenta un compromesso tra i due metodi precedenti.

I metodi di rotazione obliqua permettono di avere fattori correlati piuttosto che indipendenti come avviene con la rotazione ortogonale.

La scelta del tipo di rotazione dipende dal problema oggetto di studio. Se l'obiettivo della ricerca è ridurre il numero di variabili o individuare fattori non correlati, è opportuno applicare una rotazione ortogonale. Se la ricerca richiede l'individuazione di fattori correlati, si deve applicare una rotazione obliqua.

Dall'applicazione dell'analisi fattoriale comune, qualunque sia il suo scopo e la tecnica di rotazione applicata, si ottiene una matrice che contiene i pesi di

ciascuna variabile sui fattori o componenti individuati. I fattori risultano definiti dalle variabili che hanno il carico maggiore.

Molti programmi statistici, tra cui SPSS, permettono di determinare agevolmente l'influenza delle variabili osservate sui fattori.

I modelli a variabili latenti sono strettamente collegati al modello di regressione, che esprime la relazione tra una variabile dipendente e una o più variabili indipendenti. Nell'analisi fattoriale, la relazione di regressione è tra una variabile manifesta e le variabili latenti. Il problema essenziale che deve risolvere l'analisi fattoriale è quello di ottenere informazioni sulle variabili latenti, note quelle manifeste.

Nella formulazione più immediata, si ipotizza che ciascuna variabile osservata X_i dipenda in parte da m "fattori comuni" a tutte le variabili, f_k (con $k = 1, \dots, m$), in parte da un "fattore specifico" u_i .

Ipotizzando una relazione lineare tra le variabili osservate e i fattori, si definisce un sistema di equazioni del tipo:

$$\begin{aligned} X_1 &= \mu_1 + \lambda_{11}f_1 + \dots + \lambda_{1k}f_k + \dots + \lambda_{1m}f_m + u_1 \\ &\dots \\ X_i &= \mu_i + \lambda_{i1}f_1 + \dots + \lambda_{ik}f_k + \dots + \lambda_{im}f_m + u_i \\ &\dots \\ X_n &= \mu_n + \lambda_{n1}f_1 + \dots + \lambda_{nk}f_k + \dots + \lambda_{nm}f_m + u_n \end{aligned} \quad (5.15)$$

dove μ_i è la media della variabile X_i .

Questo modello somiglia solo in apparenza a quello di regressione multipla, perché nel caso in esame le quantità incognite sono rappresentate da tutti gli elementi a destra dell'uguale, non direttamente misurabili o osservabili.

L'analisi fattoriale può essere impiegata sia in un momento esplorativo per identificare le variabili latenti sottostanti un gruppo di indicatori, sia in un approccio confermativo per verificare se un gruppo di indicatori, costruito per misurare particolari concetti, sia effettivamente in grado di spiegare tale struttura.

L'analisi fattoriale esplorativa ha lo scopo di scoprire la struttura implicita esistente in un set di variabili relativamente ampio. A priori si ipotizza che un

indicatore può essere associato con un fattore. Questa è la forma più comune di analisi fattoriale.

L'analisi fattoriale confermativa cerca di determinare se il numero di fattori e dei relativi indicatori è conforme a quanto ci si aspetta sulla base di teorie preesistenti.

In entrambi i casi, per poter applicare l'analisi fattoriale è necessario verificare che i dati siano sufficientemente correlati e che il fenomeno da analizzare sia concettualmente valido per essere studiato con questa tecnica. Infatti, l'analisi fattoriale non conduce a risultati significativi se i dati non presentano queste caratteristiche.

CAPITOLO 6

IL CASO DI STUDIO

6.1 Generalità

Il caso di studio analizzato corrisponde all'area urbana formata dalle città di Cosenza e Rende in Calabria.

Cosenza è il capoluogo dell'omonima provincia situata nella parte più settentrionale della Calabria. Collocata al centro di una corona di piccoli comuni, prevalentemente montani, Cosenza, insieme alla città di Rende, configura un sistema urbano attrattivo caratterizzato da un aggregato edilizio fisicamente continuo. La conurbazione Cosenza-Rende si sviluppa secondo un asse longitudinale che va dal Campus Universitario di Rende, situato a nord, al centro storico di Cosenza, a sud, e rappresenta la struttura portante di una più ampia area urbana che si sviluppa lungo la Valle del Crati e che comprende i comuni limitrofi, tra cui Montalto Uffugo a nord, Castrolibero a est e Zumpano a ovest.

Tra il 1951 e il 1981, la città di Cosenza registra una consistente fase di espansione, superando i 100.000 abitanti; ma nei successivi decenni, tra il 1981 e il 2001, il trend di crescita si blocca e la città perde popolazione. Nel 2001 a Cosenza risiedevano circa 73.000 abitanti. Alla contrazione demografica di Cosenza e alla sua crescita rallentata si accompagna un incremento di popolazione e un florido sviluppo edilizio nei comuni limitrofi,

come Rende e Castrolibero, che ha portato alla formazione di un'area urbana in cui vivono circa 120.000 abitanti. L'area urbana cosentina si è sviluppata in modo imponente nell'arco dell'ultimo cinquantennio, rispondendo ad una serie di dinamiche che ne hanno fatto centro nevralgico e sede di importanti attività economiche e di funzioni amministrative. Da sede politico-amministrativa a città dei servizi, a città universitaria e della cultura, l'area urbana ha visto progressivamente venire meno ogni sorta di discontinuità nel tessuto urbano. Quest'area risulta fortemente attrattiva per i comuni dell'hinterland, e all'interno di essa si verificano continui spostamenti dovuti agli scambi tra i due poli urbani. Inoltre, l'area urbana cosentina si colloca in posizione baricentrica all'interno della provincia stessa, ricoprendo il ruolo di polo attrattore sia per i centri collocati sulle coste tirrenica e ionica sia per i centri fuori provincia.

6.2 *L'area urbana Cosenza – Rende*

All'interno dell'area urbana cosentina, particolare interesse suscita la conurbazione Cosenza-Rende. Entrambi i comuni presentano l'antico centro urbano in collina e l'insediamento moderno nella valle del Crati, tra il sistema montuoso della Catena Costiera a ovest e i rilievi della Sila a est (figura 6.1).

Per comprendere appieno la conformazione della conurbazione è necessario ripercorrere le tappe fondamentali della crescita urbana delle due città.

Il centro storico di Cosenza si distingue in due nuclei localizzati nella parte collinare della zona sud dell'aggregato urbano. Il nucleo più antico e consistente è strutturato lungo le pendici del colle Pancrazio, a ridosso dei fiumi Crati, Busento e della loro confluenza; l'altro, di dimensioni più ridotte, si estende sul colle Triglio sulla riva destra del Crati.

Negli anni '50 la città è interessata da un processo di espansione che tende a spostare verso nord il centro cittadino. Infatti, lo sviluppo interessa la pianura del Crati e l'abitato storico viene ad assumere una posizione marginale ed indebolita rispetto all'insieme urbano. L'intero centro storico viene investito da un progressivo processo di spopolamento e di abbandono sociale ed economico, in quanto la parte nuova della città si allontana dal centro storico e diventa sempre più precaria e difficile la loro integrazione.

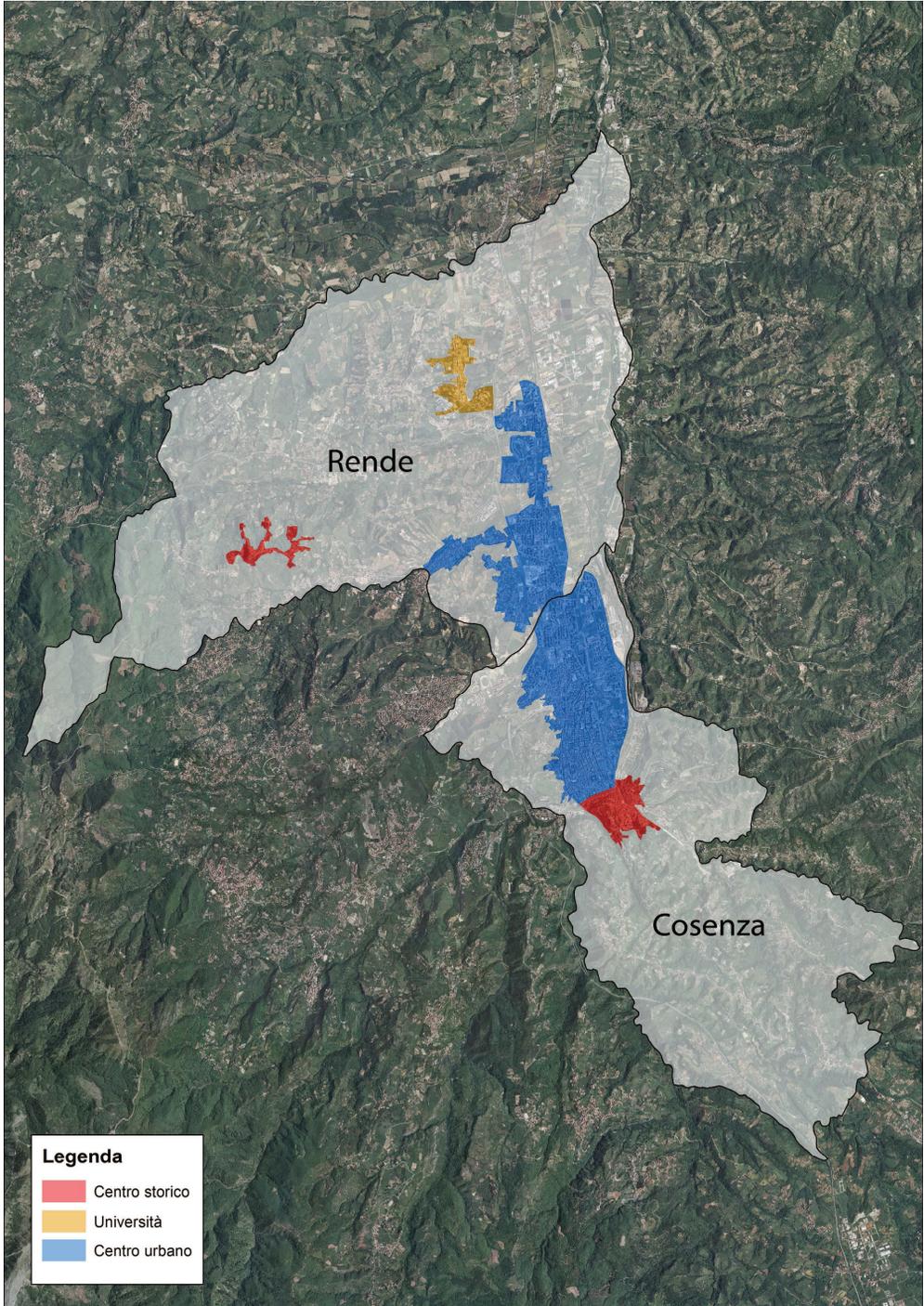


Fig. 6.1 – Area urbana Cosenza-Rende.

Negli anni '60 si conferma e si accentua la tendenza della città ad espandersi in direzione nord e la popolazione raggiunge quasi la soglia dei 100.000 abitanti. L'attività edilizia interessa anche la zona ovest sulla collina di S. Vito e lungo la provinciale che collega la città con Castrolibero.

Negli anni '70 viene introdotto il nuovo PRG (Piano Regolatore Generale) Vittorini con l'obiettivo di riqualificare la struttura urbana, migliorare la struttura viaria e ridurre la densità abitativa. Lo strumento urbanistico individua, inoltre, la direttrice d'espansione tra la SS19 ed il Crati come asse urbano per i futuri sviluppi intercomunali tra Cosenza e Rende. Negli anni successivi, l'espansione di Cosenza subisce un brusco rallentamento. La città perde popolazione che viene attratta dai vicini comuni di Rende e Castrolibero che risultano attrattivi per la realizzazione di nuovi quartieri residenziali.

Lo sviluppo urbanistico di Cosenza ha avuto un impulso considerevole soprattutto da metà degli anni '90 con l'entrata in vigore della Variante Generale al PRG. Negli anni successivi sono stati realizzati nuovi quartieri sia a uso residenziale sia a uso dirigenziale e commerciale.

Analogamente al caso della città di Cosenza, il centro storico di Rende è collocato in collina, in particolare sul colle Vaglio, e presenta un ricco patrimonio storico, artistico e culturale connesso ai valori naturali del territorio circostante. La struttura architettonica ed il tessuto urbano sono rimasti quasi intatti e la città moderna si è sviluppata verso valle. Inizialmente la città era divisa in quartieri isolati però caratterizzati da una continua espansione, che ha portato alla situazione attuale in cui è difficile identificare una zona dall'altra. Nella zona più a sud, la città di Rende si fonde con Cosenza.

Nella zona più settentrionale del territorio di Rende sorge l'Università della Calabria (Unical), che ha iniziato la sua attività nell'anno accademico 1972-73, e che ricopre un ruolo fondamentale all'interno dell'area urbana Cosenza-Rende. La sua istituzione ha avviato un forte processo di espansione edilizia nel comune di Rende ma ha anche indotto una forte spinta alla crescita dell'intera conurbazione. L'università è un Campus di stile anglo-sassone, per cui a carattere residenziale, ed è caratterizzata dalla presenza dell'Asse Ponte, un viadotto centrale a due livelli con orientamento nord-sud. Ai lati del Ponte sorgono una serie di edifici denominati "cubi" per la loro forma e disposti in genere su due moduli per ciascun lato. I cubi sono gli edifici che ospitano le

strutture dipartimentali e didattiche. Ai bordi del Ponte sono collocati anche l'edificio del Rettorato e dell'Amministrazione e la Biblioteca di Ateneo. Nell'area universitaria sono inoltre dislocati gli edifici che ospitano le residenze universitarie e i servizi. Nel corso degli anni il Campus universitario non è riuscito a fornire al suo interno, come previsto dalla legge istitutiva, alloggi per tutti gli studenti non residenti nei comuni contermini e per il personale docente e non docente. La richiesta di alloggi da parte della popolazione universitaria ha prodotto un consistente sviluppo edilizio nelle aree circostanti ed in generale nella conurbazione. Attualmente il Campus è frequentato quotidianamente da oltre 30.000 studenti e circa 3.000 unità fra personale docente e non docente.

6.3 Analisi ed elaborazione dei dati relativi all'area di studio

6.3.1 Costruzione del GIS

L'analisi e l'elaborazione dei dati sono state condotte utilizzando dati provenienti da diverse fonti, quali dati provenienti dal Censimento, dati cartografici georeferenziati, dati provenienti da indagini effettuate sulla popolazione, dati geografici estratti da aerofotogrammetrie della zona oggetto di studio.

Per riuscire a trattare dati con caratteristiche molto diverse tra loro, l'analisi è stata supportata da un GIS appositamente implementato tramite il software "ArcGIS 9 - ArcMap Versione 9.3" commercializzato dall'azienda ESRI. Il GIS è uno strumento geospaziale molto utile perchè permette di organizzare dati provenienti da diverse fonti secondo architetture, chiamate livelli o *layers*, che possono essere sovrapposte in modo da ottenere nuove informazioni.

Nella costruzione del GIS relativo all'area urbana, la base del database è rappresentata dai dati del "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" condotto dall'Istituto Italiano di Statistica (ISTAT) nel 2001 (ISTAT, 2001a). L'ISTAT, oltre ai dati numerici, fornisce la cartografia con i riferimenti geografici a cui questi dati devono essere riferiti. Oltre ai dati sulla popolazione e sulle abitazioni, nel database del GIS sono stati caricati anche i dati relativi alle attività economiche rilevate tramite l' "8° Censimento

generale dell'industria e dei servizi", effettuato dall'ISTAT nel 2001 (ISTAT, 2001b).

La scala spaziale di riferimento dei dati ISTAT è la sezione censuaria, unità spaziale che è stata utilizzata nel corso dell'intera analisi. A tal proposito, l'ISTAT ha suddiviso la città di Cosenza in 678 sezioni censuarie mentre la città di Rende in 158, per un totale di 836 sezioni censuarie per l'intera area urbana.

La cartografia ISTAT fornisce la delimitazione delle sezioni censuarie e i dati ad esse associati, ma non dà informazioni sulla presenza di elementi puntuali. Per localizzare sul territorio gli elementi dell'ambiente urbano, quali edifici residenziali, edifici industriali, centri commerciali, infrastrutture di trasporto, sono state inserite nel GIS anche le cartografie relative all'area urbana. Le cartografie utilizzate fanno parte della Carta Tecnica Regionale (CTR) della Regione Calabria e sono relative agli anni 1998 e 2008.

Particolare interesse è stato volto alla distribuzione degli edifici, che sono stati divisi per tipologia e per sezione censuaria, in modo tale da rapportare le caratteristiche degli edifici ai dati censuari.

A partire dalla cartografia tecnica, utilizzando gli strumenti offerti dal GIS, è stata costruita la rete stradale dell'intera area urbana. La rete stradale è stata schematizzata mediante un insieme di archi. Ciascun arco della rete è stato indicato, oltre che con un codice identificativo univoco, con il toponimo della strada che rappresenta. Inoltre, ad ogni arco sono state attribuite alcune caratteristiche qualitative, come il limite massimo di velocità, fissato in funzione della tipologia di strada, e il verso di percorrenza dei tronchi stradali, indispensabili per poter svolgere sulla rete analisi spaziali come la ricerca del minimo percorso tra un'origine e una destinazione.

In funzione delle caratteristiche degli archi sono stati individuati tre livelli funzionali della rete, che è stata suddivisa in rete principale, secondaria e locale (figura 6.2).

La rete principale comprende la rete di comunicazione sovracomunale alla quale si può accedere mediante svincoli dedicati.

La rete secondaria comprende le strade di collegamento tra Cosenza e Rende di rilevante importanza e di ampia sezione trasversale e costituisce la rete a maglie larghe che permette di coprire tutta l'area.

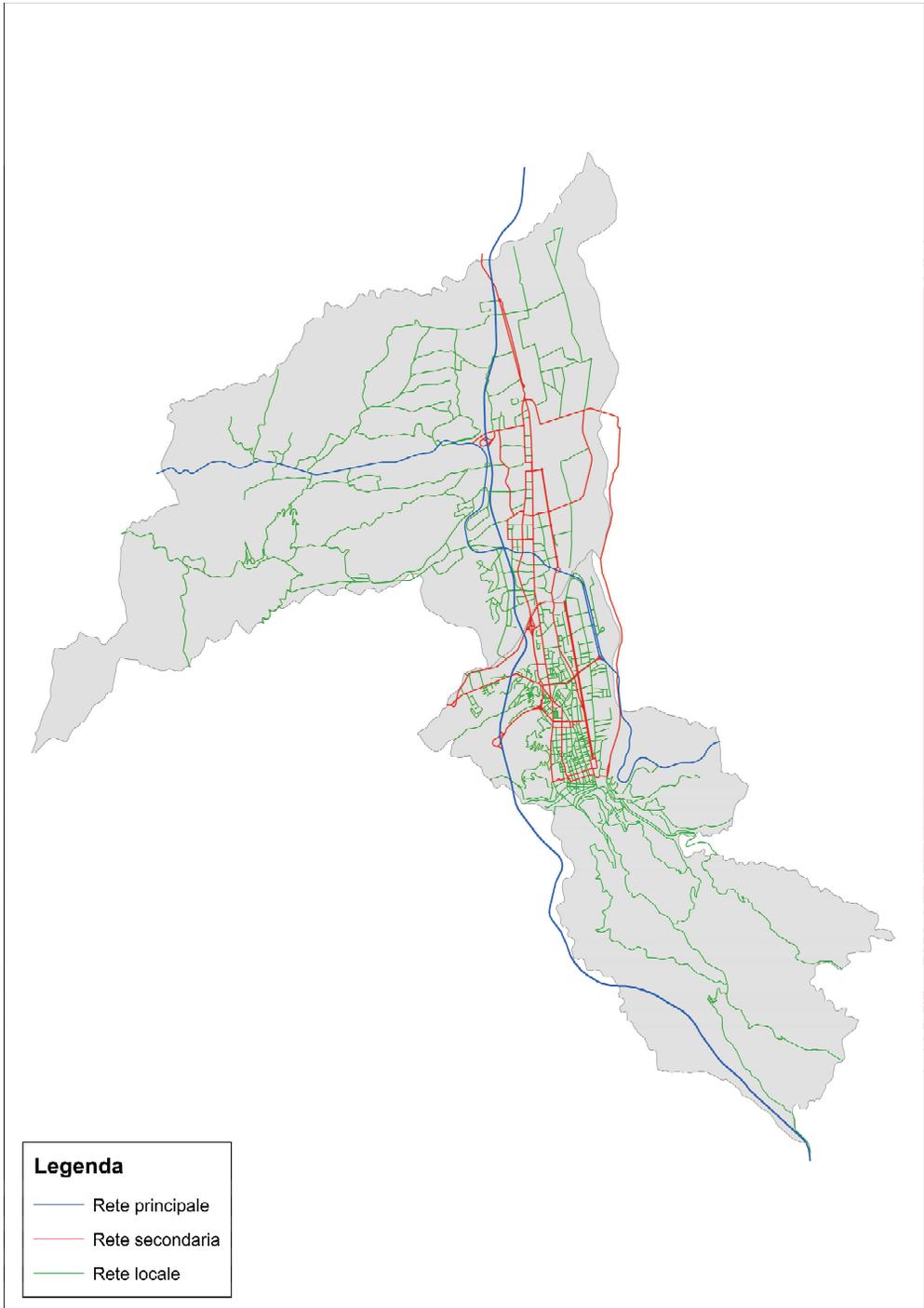


Fig. 6.2 – Classificazione della rete stradale.

La rete locale comprende tutte le strade di quartiere di dimensioni ridotte che costituiscono la maglia più fitta di strade che si connette direttamente alla rete secondaria.

Sfruttando le potenzialità del GIS, la rete stradale è stata sovrapposta alla suddivisione in sezioni censuarie dell'area di studio in modo tale da ottenere l'ammontare della lunghezza delle strade a livello delle sezioni censuarie.

Infine, nel database sono stati inseriti i dati e la cartografia definiti dal progetto "Corine Land Cover" elaborato nell'anno 2006, che fornisce indicazioni riguardo all'uso e alla copertura del suolo. In base a queste informazioni, il territorio può essere classificato in diversi modi a seconda che sia agricolo, boschivo, urbanizzato più o meno densamente o sia destinato ad insediamenti industriali.

6.3.2 Analisi delle caratteristiche demografiche

Le informazioni statistiche sono un importante strumento per comprendere e quantificare i processi dinamici che interessano la popolazione di una determinata area. L'analisi delle caratteristiche demografiche svolta è basata sui dati provenienti dal "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" condotto nel 2001 dall'Istituto Italiano di Statistica (ISTAT, 2001a).

La popolazione totale raggiunge quasi quota 110.000 abitanti, come riportato nella tabella 6.1. Di questi, circa 73.000 risiedono a Cosenza, mentre i restanti 35.000 circa costituiscono la popolazione di Rende. In realtà, la popolazione complessiva dell'area urbana è maggiore a causa della presenza dell'Università della Calabria. Infatti, anche se non sono residenti, molti studenti fuori sede e persone impiegate presso l'Università vivono sia a Rende che a Cosenza.

La popolazione dell'area urbana si ripartisce quasi equamente tra maschi (48%) e femmine (52%). Circa il 68% della popolazione ha età compresa tra 15 e 65 anni, per cui appartiene alla categoria della popolazione in età lavorativa. Il 18% circa della popolazione ha più di 65 anni mentre il restante 14% ha meno di 15 anni. La città di Rende possiede una popolazione in media più giovane di quella di Cosenza. Infatti, solo il 12% della popolazione residente di Rende fa parte della categoria di persone con più di 65 anni a fronte del 20% della città di Cosenza. Inoltre, il 15% della popolazione di

Rende ha meno di 15 anni, mentre a Cosenza i residenti più piccoli di 15 anni costituiscono il 13% della popolazione. Questi risultati possono essere confermati dal calcolo dell'indice di vecchiaia, che è il rapporto tra il numero delle persone che hanno età superiore a quella lavorativa (solitamente, si considerano le persone con età superiore a 65 anni) e il numero di persone in età lavorativa (in genere di età compresa tra 15 e 65 anni). Nello specifico, l'indice di vecchiaia calcolato in riferimento all'area urbana è pari a 0,26. Nel caso della città di Cosenza l'indice di vecchiaia è più alto (0,31); Rende, invece, presenta un valore più basso (0,13) che conferma quanto emerso in precedenza dall'analisi dei dati censuari.

Tab. 6.1 - Dati riguardanti la popolazione.

	Cosenza	Rende	Area urbana
Popolazione totale (ab.)	72.998	34.421	107.419
Popolazione maschile (ab.)	34.689	16.948	51.637
Popolazione femminile (ab.)	38.309	17.473	55.782
Popolazione di età inferiore a 15 anni (ab.)	9.432	5.351	14.783
Popolazione di età compresa tra 15 e 65 anni (ab.)	48.387	24.989	73.376
Popolazione di età superiore a 65 anni (ab.)	15.179	4.081	19.260
Numero di famiglie	27.476	12.090	39.566
Numero di famiglie con un componente	7.561	2.636	10.197
Numero di famiglie con 2 componenti	6.635	2.560	9.195
Numero di famiglie con 3 componenti	5.186	2.502	7.688
Numero di famiglie con 4 componenti	5.516	3.185	8.701
Numero di famiglie con 5 componenti	1.984	971	2.955
Numero di famiglie con 6 o più componenti	594	236	830
Superficie (kmq)	36,82	44,72	81,54
Densità di popolazione (abitanti/kmq)	1982,58	769,68	1317,36

fonte: "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT,2001a)

Nell'area urbana vi sono circa 40.000 famiglie, la maggior parte (70%) risiede a Cosenza. Le famiglie formate da un unico componente corrispondono al 26%; circa il 23% del numero complessivo di famiglie ha due componenti; le famiglie con tre o quattro componenti costituiscono il 40% del totale e, infine, le famiglie con cinque o più componenti raggiungono il 10%. La città di Rende è caratterizzata dalla presenza di più famiglie con tre o quattro componenti (47%) rispetto a Cosenza (39%). Inoltre, Rende presenta un numero minore di famiglie composte di uno o due individui (43%) rispetto a Cosenza, in cui le famiglie appartenenti a questa categoria raggiungono il 52%.

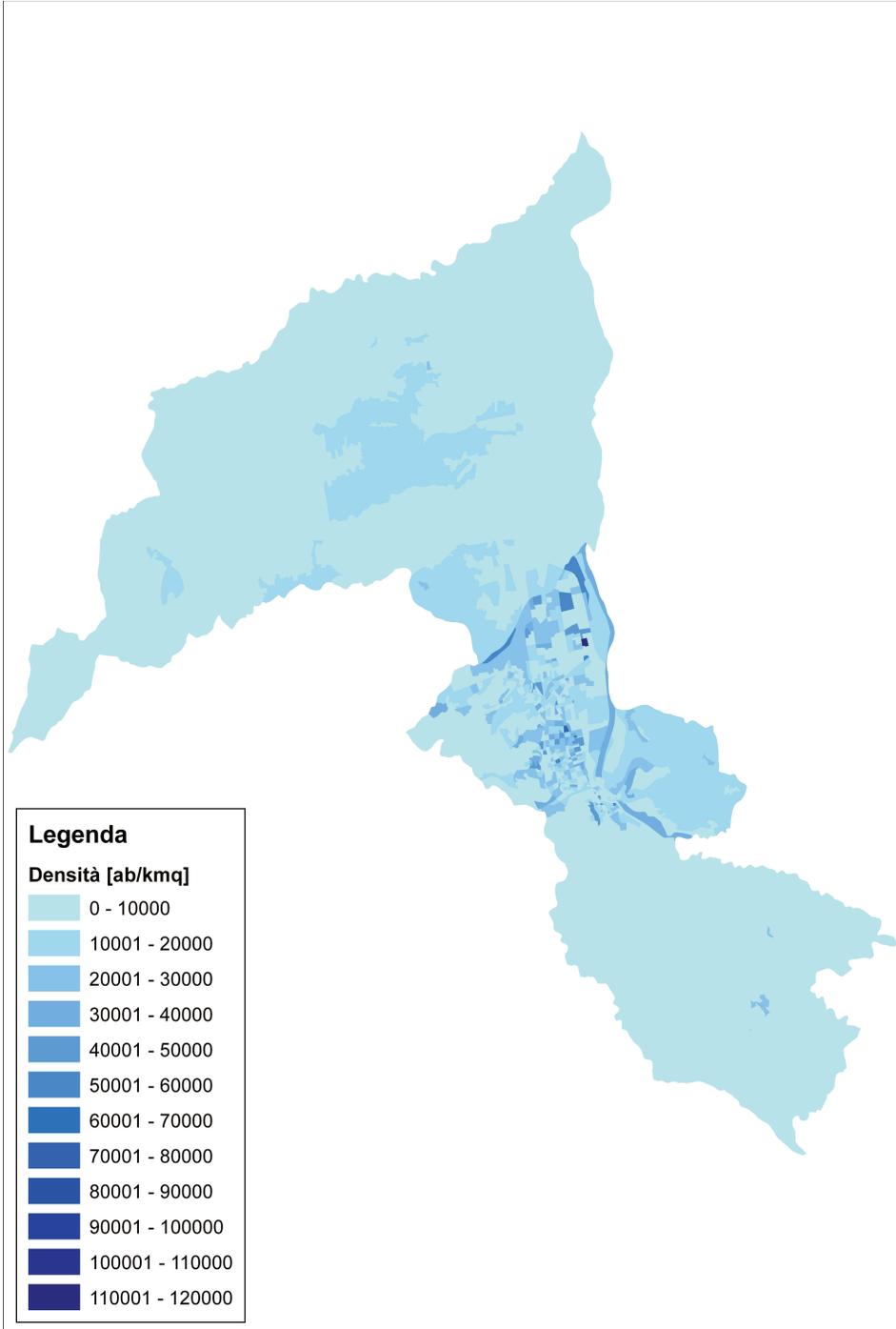


Fig. 6.3 – Densità di popolazione.

Come riportato nella tabella 6.1, la superficie complessiva dell'area urbana è pari a circa 82 chilometri quadrati. La città di Rende copre un'area di 45 km² ed è più estesa di Cosenza, che ha una superficie meno estesa pari a 37 km². Confrontando i valori della popolazione e delle superfici delle due città, è possibile osservare che Rende è più estesa di Cosenza ma meno popolata. Questo aspetto è anche confermato dai valori della densità di popolazione calcolati per le due città, come il rapporto tra la popolazione e l'area di un territorio (figura 6.3). La densità di popolazione di Cosenza è pari a circa 2.000 abitanti per chilometro quadrato, mentre lo stesso indice calcolato per Rende è pari a 800 abitanti per chilometro quadrato.

6.3.3 *Analisi delle caratteristiche socio-economiche*

Per analizzare le caratteristiche socio-economiche dell'area di studio, sono stati utilizzati sia i dati riguardanti la popolazione in termini di occupazione, sia i dati riguardanti le attività economiche e, di conseguenza, i posti di lavoro nei diversi settori economici.

La tabella 6.2 contiene di dati relativi al numero di residenti occupati suddivisi in settori economici, ottenuti dall'elaborazione dei dati forniti dal "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT, 2001a).

Tab.6.2 – *Dati riguardanti lo stato di occupazione della popolazione residente.*

	Cosenza	Rende	Area urbana
Popolazione attiva	27.831	14.477	42.308
Occupati	21.529	11.844	33.373
Occupati nell'agricoltura	419	224	643
Occupati nell'industria	2.898	1.660	4.558
Occupati nei servizi	18.212	12.110	28.172
Impiegati	16.577	8.905	25.482

fonte: "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT,2001a)

La popolazione economicamente attiva (o forza lavoro) comprende sia gli occupati sia i disoccupati. Più di 42.000 persone compongono la popolazione attiva dell'area urbana. Di queste, il 66% risiede a Cosenza e il restante 34% a Rende. Nell'area urbana i residenti occupati ammontano a circa 33.000 persone e la maggior parte di essi risiede a Cosenza (65%). Queste percentuali non sono misure assolute ma sono correlate con la popolazione.

Sono stati calcolati alcuni indici per confrontare i dati riguardanti l'occupazione nelle due città e per dare informazioni più specifiche sul livello occupazionale. Il tasso di occupazione regionale indica il livello di occupazione considerando le persone occupate come una percentuale della popolazione (figura 6.4). In questo caso, il tasso di occupazione riferito all'area urbana è pari al 31%, mentre quello della città di Cosenza è 29% e quello di Rende è 34%. Di conseguenza, a parità di popolazione, Rende ha un numero di occupati maggiore rispetto a Cosenza. Analogamente, il tasso di disoccupazione regionale può essere calcolato come il rapporto tra le persone non occupate e il totale della popolazione attiva (forza lavoro). L'area urbana presenta tasso di disoccupazione pari al 21%, Cosenza pari a circa il 23%, mentre Rende presenta il valore più basso pari al 18%.

La specializzazione di un'area rispetto ad un tipo di attività dipende da molti fattori, quali le risorse naturali presenti, la disponibilità di personale qualificato, gli aspetti culturali e le tradizioni, i livelli di costo, le infrastrutture, gli aspetti normativi, le condizioni climatiche e topografiche e la vicinanza ai mercati.

Dall'analisi dei dati riguardanti l'occupazione nei diversi settori dell'area di studio, si osserva che il settore dei servizi pubblici e privati è il settore economico in cui sono occupati la maggior parte degli abitanti dell'area urbana e la stessa tendenza si ha per Rende e Cosenza. Infatti, le persone occupate in questo settore corrispondono all'84% del totale dei residenti occupati, circa il 14% dei residenti lavorano nel settore industriale e solo il 2% sono impiegati nell'agricoltura. Infine, il 76% delle persone occupate lavora nella posizione di impiegato.

Dopo aver fatto l'analisi del livello di occupazione della popolazione, sono stati analizzati i dati riguardanti il lavoro. L'ISTAT fornisce i dati riguardanti le attività economiche, divise per settori, mediante il censimento delle attività industriali e dei servizi effettuato ogni dieci anni.

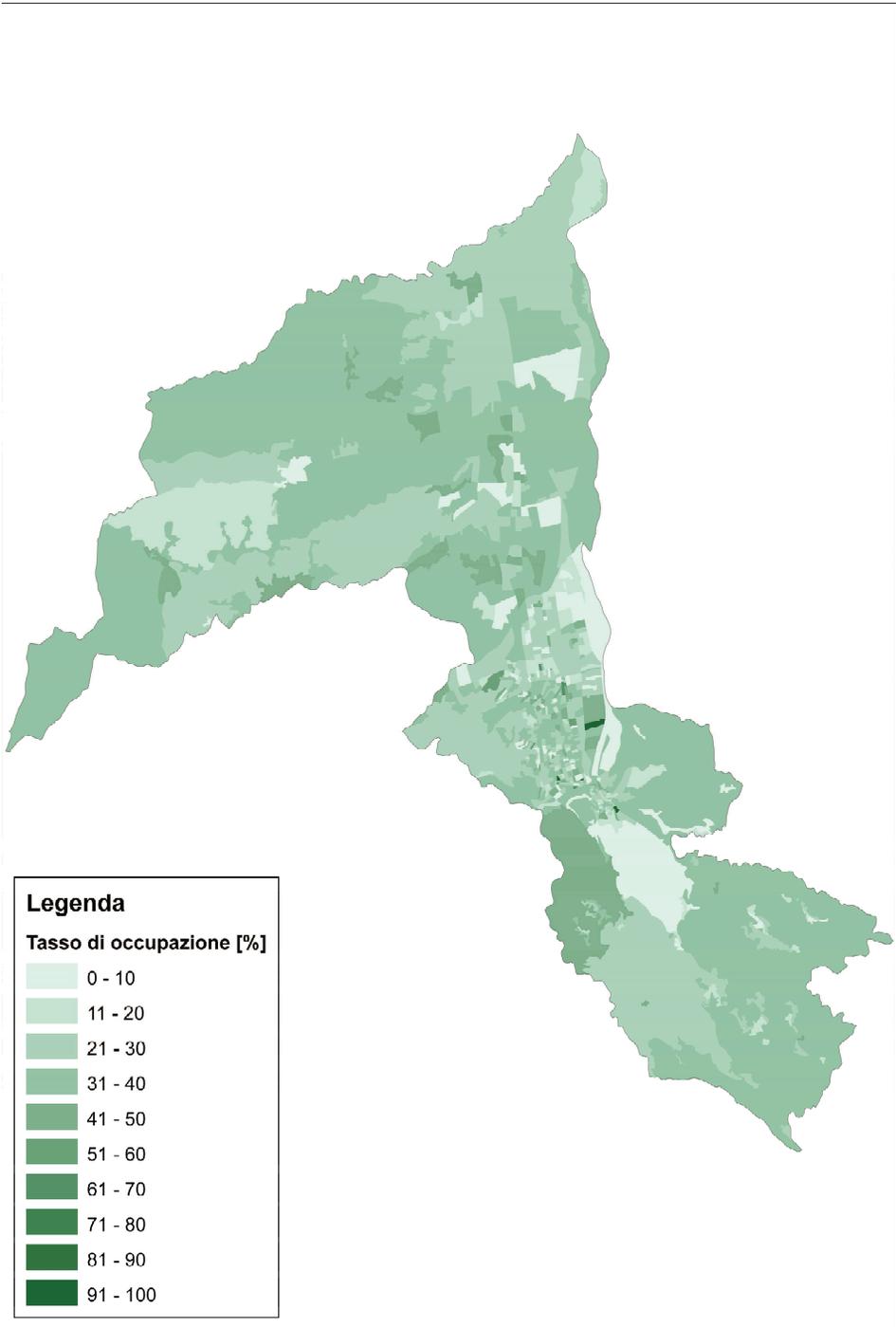


Fig. 6.4 – Tasso di occupazione.

In questo caso sono stati utilizzati i dati forniti dall' "8° Censimento generale dell'industria e dei servizi", effettuato nel 2001 (ISTAT, 2001b).

Osservando i dati contenuti nella tabella 6.3, si legge che nell'area urbana sono presenti circa 9.000 imprese pubbliche e private, per un totale di oltre 45.000 posti di lavoro, localizzati soprattutto nel territorio cosentino (72% del totale). Generalmente, le imprese suddette sono di piccole dimensioni e presentano in media 4,4 impiegati.

Si osserva, inoltre, che la maggior parte delle imprese presenti nell'area urbana operano nel settore dei servizi. La maggior parte dei posti di lavoro offerti a Cosenza rientra nel settore dei servizi pubblici, mentre le imprese ubicate a Rende forniscono prevalentemente servizi privati. Inoltre, i posti di lavoro nel settore agricolo corrispondono solo al 6% del totale e altrettanto pochi sono i posti di lavoro nel settore industriale (13%). Le percentuali riferite all'area urbana sono abbastanza simili a quelle riferite alla città di Cosenza, mentre per Rende si ha una suddivisione abbastanza differente. Infatti, i posti di lavoro in agricoltura sono pari allo 0,2%, quelli nell'industria al 21,3% e quelli nei servizi al 78,5%.

Tab. 6.3 – Numero dei posti di lavoro.

	Cosenza	Rende	Area urbana
Posti di lavoro	32.751	12.664	45.415
Posti di lavoro in agricoltura	2.852	25	2.877
Posti di lavoro nelle industrie	3.261	2.701	5.962
Posti di lavoro nei servizi	26.638	9.938	36.576
Posti di lavoro nel settore bancario e assicurativo	7.262	3.794	11.056
Posti di lavoro in altri servizi privati	6.074	2.844	8.918
Posti di lavoro nei servizi pubblici	13.302	3.300	16.602

fonte: "8° Censimento generale dell'industria e dei servizi" (ISTAT, 2001b)

Un'ulteriore classificazione si può fare suddividendo il settore servizi in servizi pubblici e servizi privati, a loro volta divisi tra servizi bancari e assicurativi e altri servizi privati. Secondo questa suddivisione, i posti di lavoro nel settore dei servizi bancari e assicurativi corrispondono al 24%, i posti di lavoro negli altri servizi privati al 20%, e i posti di lavoro nel settore dei servizi privati al 37%.

6.3.4 Analisi del patrimonio edilizio

L'analisi del patrimonio edilizio è stata condotta analizzando i dati del "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT, 2001a) e svolgendo un'analisi spaziale utilizzando il GIS.

Dall'analisi dei dati forniti dal Censimento, risulta che l'area urbana offre circa 47.000 abitazioni. Circa il 66% di queste sono collocate nel comune di Cosenza e la restante parte in quello di Rende. Confrontando il numero di abitazioni e l'estensione della superficie delle due città, risulta che Rende è più estesa rispetto a Cosenza ma offre meno abitazioni. Questo aspetto è confermato anche dai valori della densità delle abitazioni, che è definita come il rapporto tra le abitazioni presenti sul territorio e la superficie totale. In particolare, Cosenza presenta più di 800 abitazioni per chilometro quadrato di superficie mentre Rende circa 350 (tabella 6.4). La figura 6.5 mostra i valori di superficie delle abitazioni totali per ciascuna sezione censuaria appartenente all'area di studio.

Tab. 6.4 - Dati riguardanti le abitazioni.

	Cosenza	Rende	Area urbana
Abitazioni totali	31.129	15.727	46.856
Abitazioni occupate da persone residenti	27.092	12.004	39.096
Abitazioni occupate solo da persone non residenti	813	2.017	2.830
Abitazioni vuote	3.224	1.706	4.930
Altri tipi di alloggio	12	4	16
Superficie delle abitazioni totali [kmq]	3.006.365	1.716.509	4.722.874
Superficie delle abitazioni occupate da persone residenti [kmq]	2.679.097	1.393.236	4.072.333
Densità di abitazioni (n. di abitazioni/kmq)	845,44	351,67	574,63

fonte: "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT,2001a)

La maggior parte delle abitazioni è occupata da persone residenti, come testimoniato anche dagli elevati valori della superficie delle abitazioni occupate da persone residenti rispetto ai valori della superficie delle abitazioni totali. Nel caso di Rende il numero di abitazioni occupate solo da persone non residenti è pari a circa il 13% del totale delle abitazioni mentre per Cosenza tale percentuale raggiunge solo il 3%. Questo significa che a Rende vivono anche persone che non sono residenti ma solo domiciliate, come ad esempio gli studenti universitari.

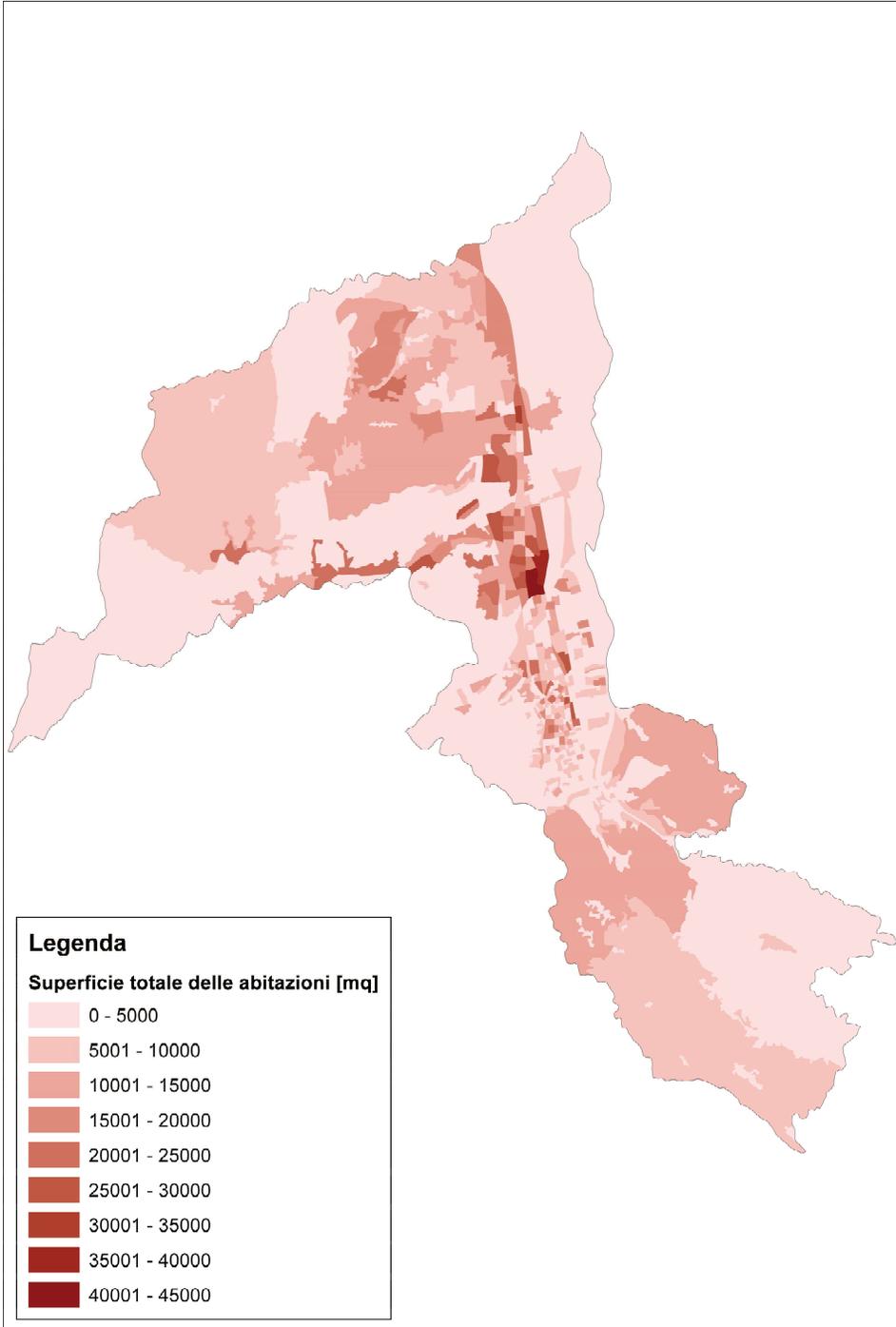


Fig. 6.5 – Superficie totale delle abitazioni.

Dai dati del censimento del 2001 (tabella 6.5), risulta che la maggior parte degli edifici presenti sul territorio dell'area urbana sono utilizzati quasi esclusivamente ad uso abitativo. Solo una minima parte sono destinati ad alberghi, uffici, attività commerciali, attività industriali, comunicazioni e trasporti.

Tab. 6.5 - Dati riguardanti gli edifici.

	Cosenza	Rende	Area urbana
Edifici e complessi di edifici	6.432	5.303	11.735
Edifici e complessi di edifici utilizzati	6.039	4.844	10.883
Edifici ad uso abitativo	5.509	4.417	9.926
Edifici utilizzati per uso non abitativo	264	163	427

fonte: "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT, 2001a)

Molto significativi sono i risultati ottenuti dall'analisi spaziale condotta considerando l'effettiva posizione e la superficie degli edifici distribuiti spazialmente nell'area urbana. L'analisi è stata svolta considerando la variazione di superficie edificata tra il 1998 e il 2008. Utilizzando il GIS, sono state sovrapposte le cartografie relative ai due anni considerati ed è stata calcolata la variazione di superficie edificata (tabella 6.6).

Tab. 6.6 - Dati riguardanti la variazione di superficie edificata [km²].

	Anno 1998	Anno 2008	Δ
Cosenza	1,90	2,19	+ 0,29
Rende	1,64	2,00	+ 0,36
Area urbana	3,54	4,17	+ 0,63

Nel complesso si è registrato un incremento di superficie edificata nell'area urbana pari in media a 0,63 km². Andando ad analizzare nello specifico le variazioni nelle due città considerate, risulta che l'incremento maggiore di superficie edificata si è registrata nel territorio di Rende. Questo fenomeno è stato indotto soprattutto dalla presenza dell'Università della Calabria. Infatti, con l'aumentare del numero di iscritti, è aumentata anche la richiesta di alloggi che ha causato una forte e rapida urbanizzazione delle aree più prossime al Campus universitario.

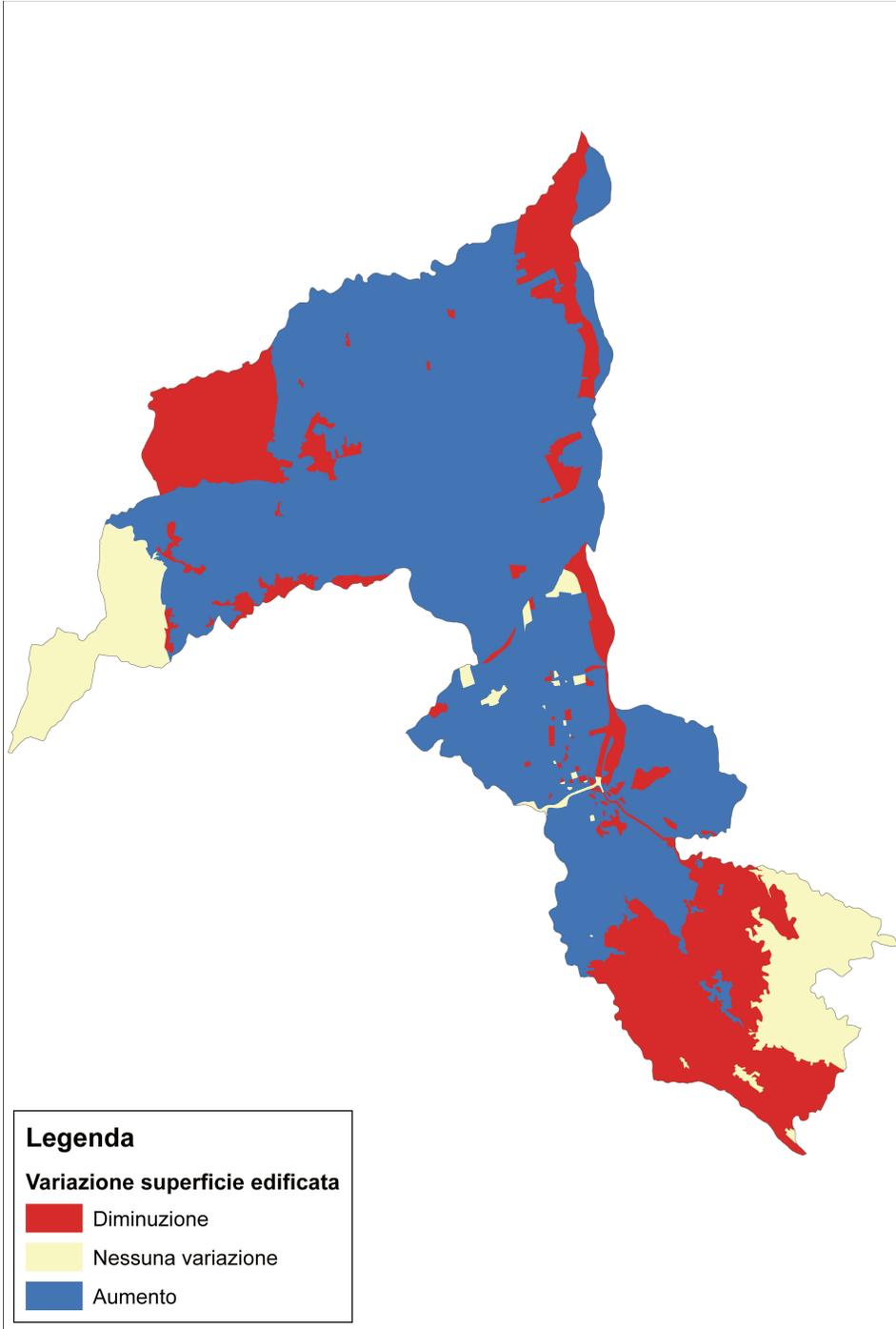


Fig. 6.6 – *Variatione della superficie edificata nel periodo 1998-2008.*

La figura 6.6 illustra le variazioni di superficie edificata classificando le sezioni censuarie in tre gruppi, a seconda che si sia registrato un incremento o un decremento di superficie edificata o nessuna variazione.

Gli edifici sono stati suddivisi in tre grandi classi: edifici residenziali, edifici industriali ed altri edifici. La variazione di superficie edificata ad uso residenziale segue l'andamento complessivo ottenuto precedentemente, mentre la superficie di edifici industriali e di altri edifici non ha registrato importanti variazioni rimanendo pressoché costante nell'arco di tempo considerato.

6.3.5 Analisi delle infrastrutture di trasporto

L'area urbana Cosenza-Rende rappresenta uno dei punti cruciali del sistema stradale e ferroviario della Calabria (figura 6.7).

Il territorio della conurbazione è servito dall'autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria e dalla strada statale SS19 delle Calabrie in direzione nord-sud. La SS19 termina a Catanzaro e corre parallela all'autostrada. Gran parte dell'infrastruttura è stata declassata da strada statale a strada regionale e quindi a provinciale. In direzione est-ovest i collegamenti sono assicurati dalla SS 107 Silana Crotonese che collega il Tirreno cosentino allo Ionio crotonese, attraversando i monti della Sila.

L'autostrada A3 presenta uno svincolo a servizio del territorio rendese e uno a servizio della città capoluogo. I due svincoli servono indirettamente anche la zona della Sila. Lo svincolo A3 di Montalto, più a nord, consente l'accesso diretto all'area industriale che si sviluppa lungo il corso del Crati, senza l'attraversamento di centri abitati. Lo svincolo di Rende-Cosenza Nord si innesta mediante una rotatoria sul tratto di viabilità che collega la SS107 con la SS19. Lo svincolo è anche utilizzato per raggiungere la vicina Università della Calabria. Lo svincolo di Cosenza Sud immette direttamente nel centro urbano di Cosenza.

La SS19 delle Calabrie costituisce un asse portante del sistema di insediamento vallivo e collega Cosenza e Rende attraverso i quartieri di Roges, Commenda e Quattromiglia. Tali infrastrutture sono caratterizzate da ampi rettilinei, ad un unico senso di marcia con collegamenti trasversali e nodi semaforizzati.

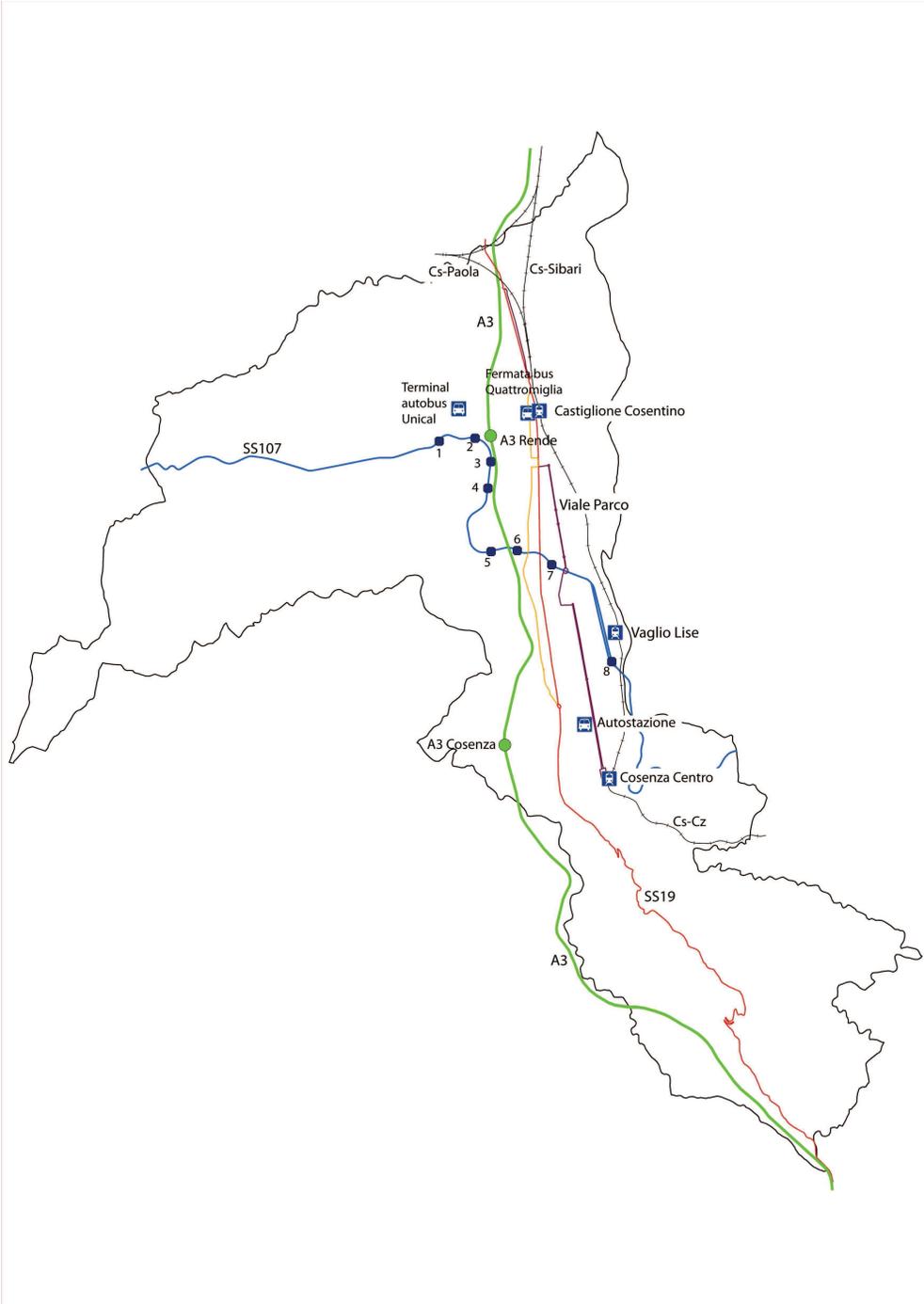


Fig. 6.7 – Infrastrutture stradali e ferroviarie.

La SS107 collega la dorsale ionica e quella tirrenica, passando in viadotto dal confine tra Cosenza e Rende ed attraversando trasversalmente tutto l'insediamento vallivo. Si connette alla viabilità urbana attraverso una serie di svincoli dislocati in tutta l'area urbana che attraversa.

Le linee ferroviarie della Calabria che interessano il territorio cosentino appartengono alle Rete Ferroviaria Italiana (RFI), facente parte del gruppo Ferrovie dello Stato (FS), e alle Ferrovie della Calabria. Le stazioni ferroviarie presenti nella conurbazione sono "Cosenza Vaglio Lise" (FS) e "Cosenza Centro" (Ferrovie della Calabria), entrambe nel territorio cosentino, e "Castiglione Cosentino" (FS) nel territorio di Rende.

Le linee RFI che si attestano alla stazione ferroviaria di Vaglio Lise sono la direttrice Cosenza-Sibari e la linea Paola-Cosenza, entrambe linee a binario singolo elettrificate fino alla stazione di Castiglione Cosentino e a doppio binario elettrificato da Castiglione Cosentino a Cosenza.

Dal terminale di Vaglio Lise si diramano due linee delle Ferrovie della Calabria entrambe a scartamento ridotto: la linea Cosenza-S. Giovanni in Fiore e la linea Cosenza-Catanzaro.

Un ruolo particolare svolge il Viale Parco, infrastruttura di recente costruzione e di influenza sovracomunale. Tale opera, che nel comune di Cosenza assume la denominazione di Viale Giacomo Mancini, è particolarmente significativa, in quanto prevista dal nuovo PRG di Cosenza sulla sede del dismesso rilevato ferroviario, con la funzione di unire il centro urbano con i quartieri di periferia. L'opera non è limitata ai confini di Cosenza ma continua anche nel comune di Rende, con la denominazione di Viale Francesco e Carolina Principe. Il ruolo fondamentale di questa infrastruttura è collegare tutta l'area urbana fino all'Università della Calabria.

Il principale collegamento dell'Università con l'area urbana è costituito dalla statale SS107, che connette le strutture universitarie anche con lo svincolo autostradale di Rende-Cosenza Nord. Al Campus è possibile accedere anche mediante alcune strade provinciali e comunali che presentano, però, sezioni trasversali piuttosto ridotte e riescono a smaltire solo una percentuale del traffico di autovetture. La viabilità interna è costituita da un asse principale, posto parallelamente all'Asse Ponte sul lato est, e dalla viabilità secondaria che distribuisce il traffico tra i vari insediamenti.

6.3.6 *Analisi della mobilità sistematica*

I dati del censimento della popolazione (ISTAT, 2001a) forniscono anche dati riguardanti gli spostamenti giornalieri effettuati dai residenti per recarsi dalla propria abitazione ai luoghi di studio o lavoro (spostamenti sistematici).

La figura 6.8 mostra la distribuzione degli spostamenti sistematici totali emessi dalle sezioni censuarie dell'area urbana. Questi spostamenti sono stati divisi in due gruppi: spostamenti interni, cioè con destinazione all'interno della città di residenza, e spostamenti esterni, cioè con destinazione al di fuori della città di residenza.

È necessario puntualizzare, però, che la maggior parte degli spostamenti esterni originatisi a Cosenza hanno come destinazione la città di Rende. Allo stesso modo, buona parte degli spostamenti esterni con origine in Rende hanno come destinazione Cosenza. Di conseguenza, questi spostamenti devono essere considerati come spostamenti interni all'area urbana.

Per quantificare gli spostamenti da Cosenza a Rende, sono state considerate alcune informazioni ottenute da un'indagine sulla mobilità effettuata in occasione della stesura del Piano Urbano di Traffico (PUT) della città di Cosenza (Festa, 2002). L'indagine è stata svolta nel mese di maggio del 2000 ed è stata rivolta a 649 famiglie (circa 2.000 persone) su un totale di 28.499 famiglie residenti nella città di Cosenza (ISTAT, 1991).

I dati raccolti hanno mostrato che ogni giorno gli intervistati effettuano complessivamente 32.852 spostamenti (per tutti i motivi) che hanno destinazione in zone esterne a Cosenza. Una rilevante parte di questi spostamenti, circa il 54,6%, ha come destinazione la città di Rende. Questa percentuale può essere usata per stimare il numero di spostamenti sistematici (casa-lavoro o casa-scuola) che hanno come origine Cosenza e destinazione l'area urbana.

Analogamente, per quantificare gli spostamenti interni all'area urbana da Rende a Cosenza, è stata considerata un'indagine svolta in occasione del Piano Urbano del Traffico della città di Rende (Festa & Stellato, 1997). L'indagine ha mostrato che dalle persone intervistate residenti a Rende sono stati effettuati 7.293 spostamenti giornalieri per tutti i motivi destinati a zone esterne dai confini comunali. Anche in questo caso, la maggior parte degli spostamenti che hanno origine in Rende (72,3%) sono diretti a Cosenza.

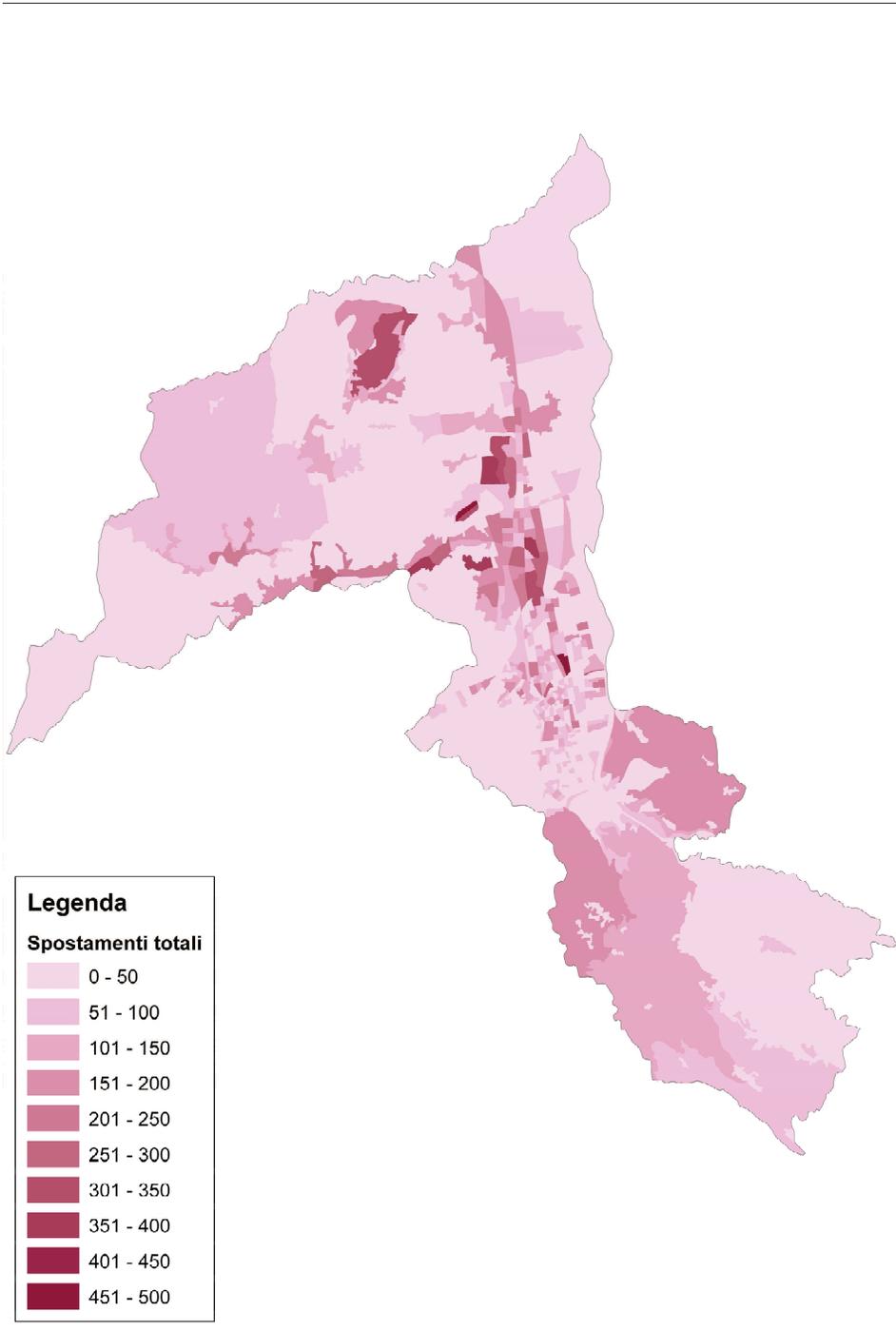


Fig.6.8 – Spostamenti emessi totali.

Questa percentuale può essere usata per stimare il numero di spostamenti sistematici con origine in Rende e destinazione nell'area urbana.

Sulla base dei dati censuari e applicando le percentuali provenienti dalle indagini suddette, sono stati calcolati gli spostamenti interni all'area urbana. Dalla tabella 6.7 si può osservare che gli spostamenti interni all'area urbana costituiscono l'aliquota rilevante di spostamenti sia per Rende sia per Cosenza e costituiscono circa il 90% degli spostamenti totali.

Tab. 6.7 - *Spostamenti giornalieri per motivi di studio e lavoro.*

	Spostamenti interni	Spostamenti con destinazione Cosenza	Spostamenti con destinazione Rende	Spostamenti esterni	Spostamenti totali
Cosenza	22.157	-	4.138	3.441	29.736
Rende	11.462	4.535	-	1.738	17.735
Totale	33.619	4.535	4.138	5.179	47.471

Gli spostamenti analizzati finora sono solo quelli effettuati per motivi di studio o lavoro. In realtà, come mostrato anche da studi sperimentali, gli spostamenti sistematici sono relativamente pochi rispetto agli spostamenti giornalieri effettuati per altri motivi. Ad esempio, i risultati dell'indagine svolta in occasione del PUT di Cosenza mostrano che di circa 5.000 spostamenti effettuati dai residenti intervistati, il 38% sono spostamenti per motivi di studio o lavoro, mentre il 62% sono spostamenti realizzati per altri motivi. Di conseguenza, si può ipotizzare che gli spostamenti totali (47.471) registrati dal censimento rappresentano solo il 38% degli spostamenti effettuati in un giorno dai residenti dell'area urbana. Tenendo conto dell'altro 62% di spostamenti effettuati per altri motivi, gli spostamenti totali effettuati per tutti i motivi con origine la residenza e destinazione interna all'area urbana ammonterebbero a 124.924. Questo valore potrebbe essere ulteriormente aumentato considerando anche gli spostamenti che hanno come origine luoghi diversi dalla residenza.

6.3.7 Analisi dell'accessibilità

L'accessibilità può essere definita come la facilità con cui le attività ubicate in un determinato posto possono essere raggiunte usando uno o più modi di trasporto (Liu & Zhu, 2004).

Per analizzare l'accessibilità dell'area urbana Cosenza-Rende è stato utilizzato il GIS, mediante il quale i dati sono stati elaborati sfruttando le relazioni spaziali esistenti tra di essi. In particolare, l'accessibilità è stata valutata separatamente sia in riferimento ai nodi di trasporto, sia in relazione ai servizi offerti da ciascuna sezione censuaria.

L'accessibilità ai nodi di trasporto è stata studiata svolgendo un'analisi spaziale basata sul tempo di viaggio in auto impiegato per raggiungere, a partire dalla zona di residenza, i terminal dei trasporti collettivi (come le autostazioni e le stazioni ferroviarie) e gli svincoli stradali e autostradali. Il tempo di viaggio in auto è stato calcolato utilizzando gli strumenti forniti dal GIS per l'analisi della rete stradale e considerando le velocità medie di percorrenza su ciascun arco della rete. Nello specifico, agli archi relativi ai tronchi autostradali appartenenti alla rete principale è stata assegnata una velocità pari a 110km/h mentre a quelli relativi alla strada statale SS107 è stata assegnata una velocità di 70 km/h. Agli archi che rappresentano i tronchi stradali appartenenti alla rete secondaria è stata assegnata la velocità media di 50 km/h. Infine, agli archi che costituiscono la rete locale è stata assegnata una velocità di percorrenza pari a 30 km/h.

I valori del tempo di viaggio calcolati utilizzando queste velocità possono essere considerati come misure di accessibilità di ciascuna sezione censuaria ai terminal dei trasporti collettivi e agli svincoli stradali.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi dei tempi di viaggio necessari per raggiungere i terminal dei trasporti collettivi, sono stati definiti i bacini di utenza, in termini di popolazione residente servita, delle fermate degli autobus e delle stazioni ferroviarie presenti nell'area urbana.

Nell'area urbana sono presenti tre importanti terminal raggiunti dalle linee di autobus che collegano l'area urbana con il resto della provincia e, in alcuni casi, con località fuori provincia e fuori regione. Il terminal più importante è l'autostazione di Cosenza, collocata nel centro cittadino e frequentata ogni giorno da migliaia di viaggiatori. Un altro punto nevralgico del trasporto

pubblico è rappresentato dalla fermata degli autobus localizzata a Quattromiglia di Rende in corrispondenza di una piazzola nei dintorni della stazione ferroviaria. Pur non essendo un vero e proprio terminal ma piuttosto una semplice fermata, qui giungono numerosi autobus provenienti dai paesi che si trovano a nord dell'area urbana mediante lo svincolo autostradale di Rende. Il terzo terminal considerato è localizzato all'interno del Campus universitario e, di conseguenza, è frequentato soprattutto dagli studenti che qui trovano gli autobus per rientrare a casa.

I risultati ottenuti da questa analisi (tabella 6.8) mostrano che circa il 76% della popolazione residente nell'area urbana riesce a raggiungere il più vicino terminal autobus impiegando un tempo di viaggio in auto fino a 5 minuti. Il terminal più attrattivo per la popolazione, in quanto raggiungibile in meno tempo dalla maggior parte delle sezioni censuarie dell'area urbana, è l'autostazione di Cosenza. Infatti, grazie alla sua posizione, essa è facilmente raggiungibile dai residenti di Cosenza e dai residenti dalla zona più a sud di Rende.

Tab. 6.8 – *Bacino di utenza delle fermate degli autobus.*

Tempo di viaggio in auto	Terminal Bus UniCal	Fermata Bus Quattromiglia	Autostazione di Cosenza	Popolazione totale servita	%
0-5	3.439	15.059	63.110	81.608	76,0
5-10	4.252	5.239	9.104	18.595	17,3
10-15	1.327	1.145	946	3.418	3,2
15-20	183	0	3.299	3.482	3,2
20-25	0	0	316	316	0,3
Totale	9.201	21.443	76.775	107.419	100,0

Per quanto riguarda il trasporto su ferro, tre sono le stazioni ferroviarie presenti nell'area urbana. Nel territorio del comune di Rende, in particolare nel quartiere Quattromiglia, si colloca la stazione di “Castiglione Cosentino”, che, quindi, si trova nella zona nord dell'area urbana. Nel territorio di Cosenza ricadono la stazione “Cosenza Centro”, collocata in prossimità del centro storico nella zona sud dell'area urbana, e la stazione “Vaglio Lise” collocata in posizione baricentrica rispetto alle altre due.

La tabella 6.9 mostra che circa l'81% della popolazione ha la possibilità di raggiungere in auto la stazione più vicina in meno di 5 minuti. Inoltre, per la

maggior parte della popolazione la stazione più accessibile è “Vaglio Lise”. Questa analisi, essendo basata esclusivamente sul tempo necessario a raggiungere la stazione più vicina, non tiene conto dei servizi erogati. Nella realtà, infatti, la stazione ferroviaria maggiormente frequentata è “Castiglione Cosentino”.

Tab. 6.9 – *Bacino di utenza delle stazioni ferroviarie.*

Tempo di viaggio in auto	Castiglione Cosentino	Vaglio Lise	Cosenza Centro	Popolazione totale servita	%
0-5	15.140	36.587	34.973	86.700	80,7
5-10	4.263	4.882	1.498	10.643	9,9
10-15	3.995	1.771	2.495	8.261	7,7
15-20	230	0	1.585	1.815	1,7
Totale	23.628	43.240	40.551	107.419	100,0

Le figure 6.9 e 6.10 rappresentano l’accessibilità rispettivamente delle fermate degli autobus e delle stazioni ferroviarie.

Un’analisi simile è stata condotta considerando gli svincoli dell’autostrada A3 e quelli della strada statale SS107 che ricadono nel territorio dell’area urbana. Nella tabella 6.10 sono riportati i risultati ottenuti nella determinazione dei bacini di utenza degli svincoli autostradali di “Rende-Cosenza Nord” e “Cosenza”. Questi risultati mostrano che circa il 77% della popolazione riesce a raggiungere lo svincolo autostradale in meno di 5 minuti utilizzando l’auto, e lo svincolo più facilmente raggiungibile è quello di Cosenza.

Tab. 6.10 – *Bacino di utenza degli svincoli autostradali.*

Tempo di viaggio in auto	Rende - Cosenza Nord	Cosenza	Popolazione totale servita	%
0-5	17.081	6.828	82.909	77,2
5-10	9.796	7.218	17.014	15,8
10-15	2.358	4.324	6.682	6,2
15-20	184	630	814	0,8
Totale	29.419	78.000	107.419	100,0

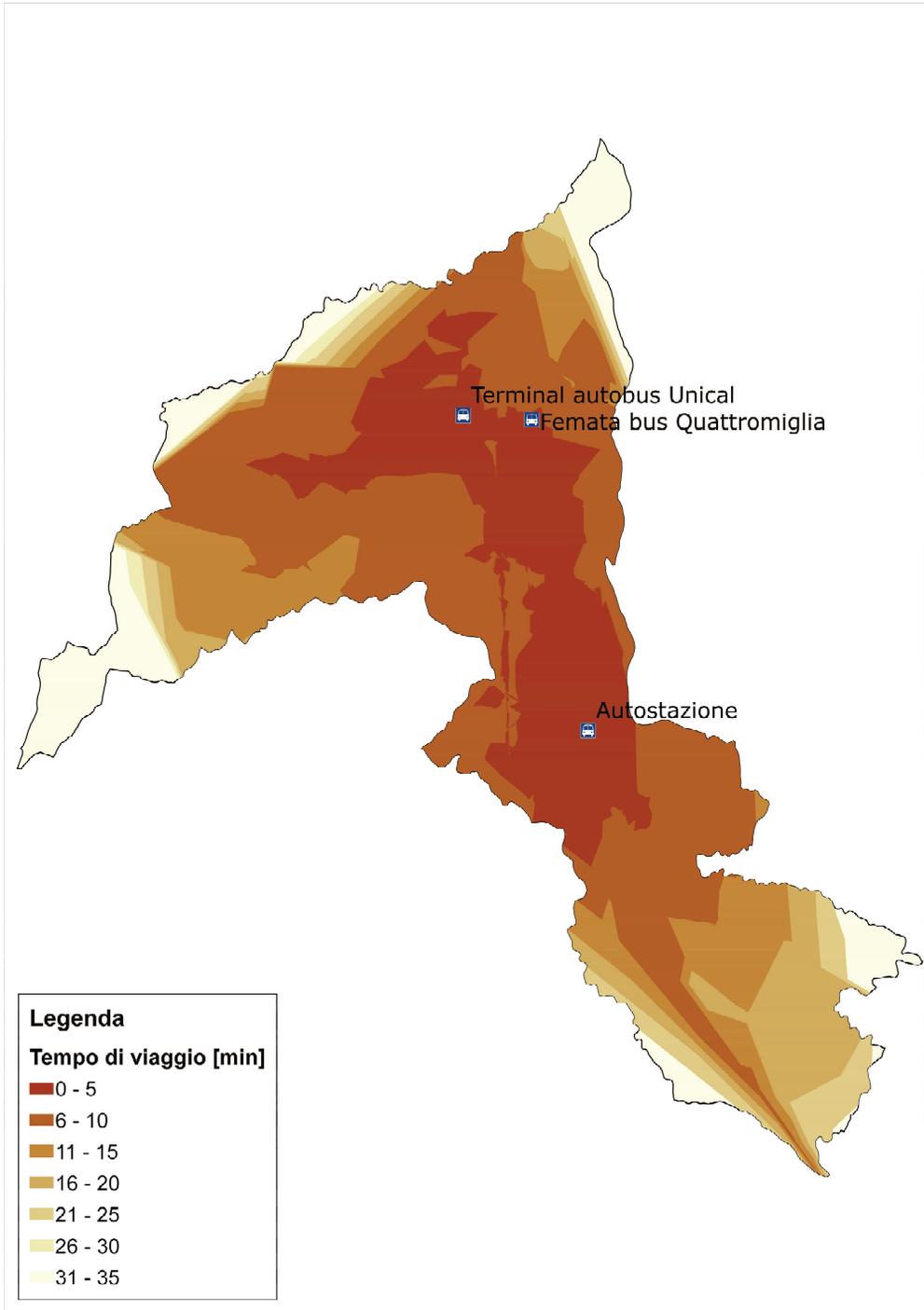


Fig. 6.9 – Accessibilità delle fermate degli autobus.

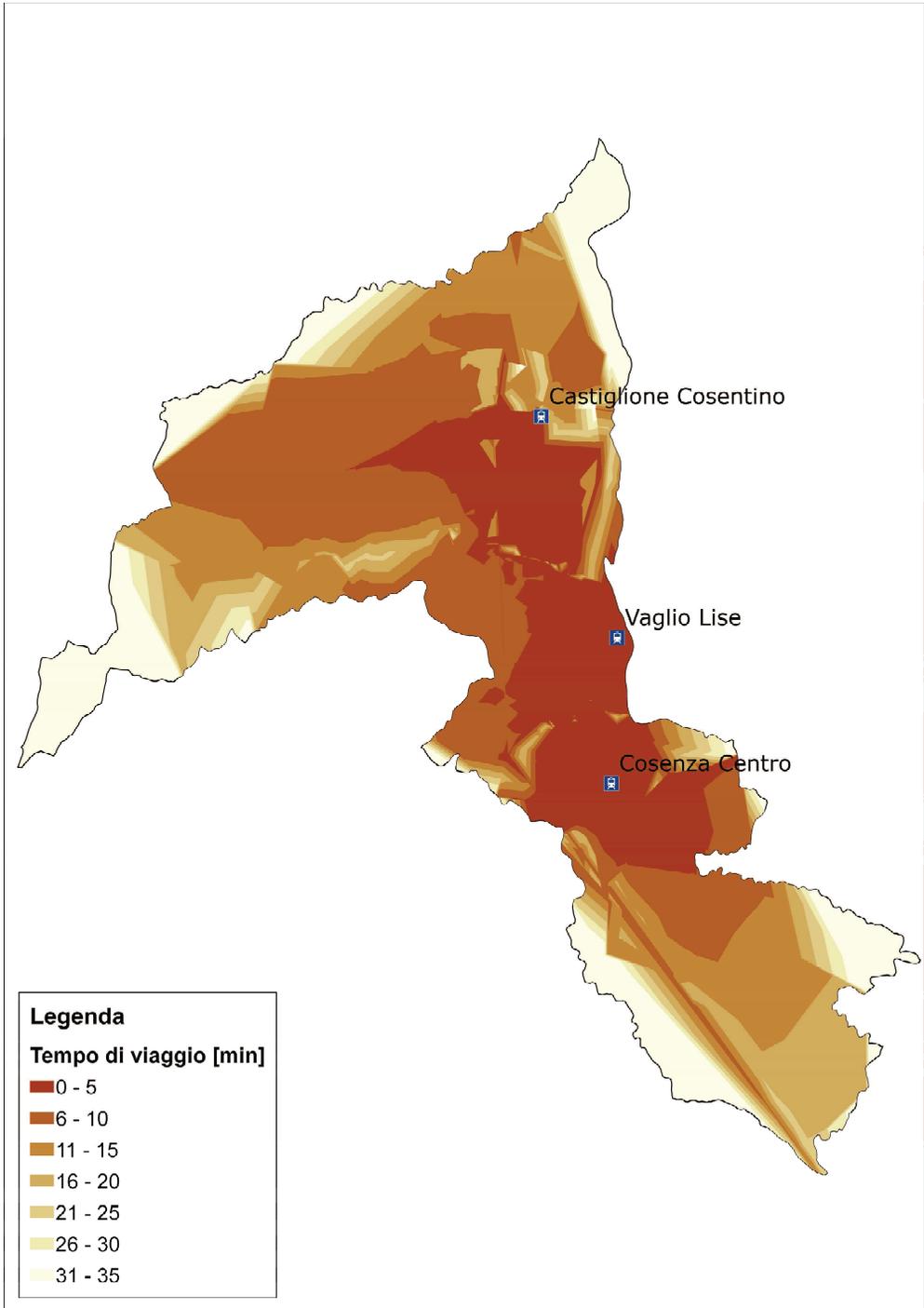


Fig. 6.10 – Accessibilità delle stazioni ferroviarie.

Gli svincoli della SS107 che rientrano nell'area urbana Cosenza-Rende sono otto. Per facilità di trattazione sono stati indicati con un numero piuttosto che con la loro denominazione originale, che deriva dal quartiere in cui si collocano (tabella 6.11). I risultati dell'analisi mostrano che più dell'80% della popolazione accede allo svincolo stradale più vicino percorrendo un tempo in auto inferiore a 5 minuti. Lo svincolo più facilmente raggiungibile è indicato con il numero 8 ed è localizzato nel territorio di Cosenza.

Tab. 6.11 – *Bacino di utenza degli svincoli della SS107.*

Tempo di viaggio in auto	1	2	3	4	5	6	7	8	Popolazione totale servita	%
0-5	2.987	1.360	77	7.243	2.586	8.314	7.813	56.801	87.181	81,2
5-10	4.982	0	0	206	989	473	0	7.417	14.067	13,1
10-15	462	0	0	0	391	317	0	1.197	2.367	2,2
15-20	0	0	0	0	0	0	0	3.009	3.009	2,8
20-25	0	0	0	0	0	0	0	795	795	0,7
Totale	8.431	1.360	77	7.449	3.966	9.104	7.813	69.219	107.419	100,0

L'analisi dei bacini di utenza degli svincoli autostradali e stradali indica che gli svincoli più utilizzati dai residenti dell'area urbana sono quelli localizzati nel territorio di Cosenza.

Le figure 6.11 e 6.12 rappresentano l'accessibilità rispettivamente degli svincoli dell'autostrada A3 e degli svincoli della strada statale SS107.

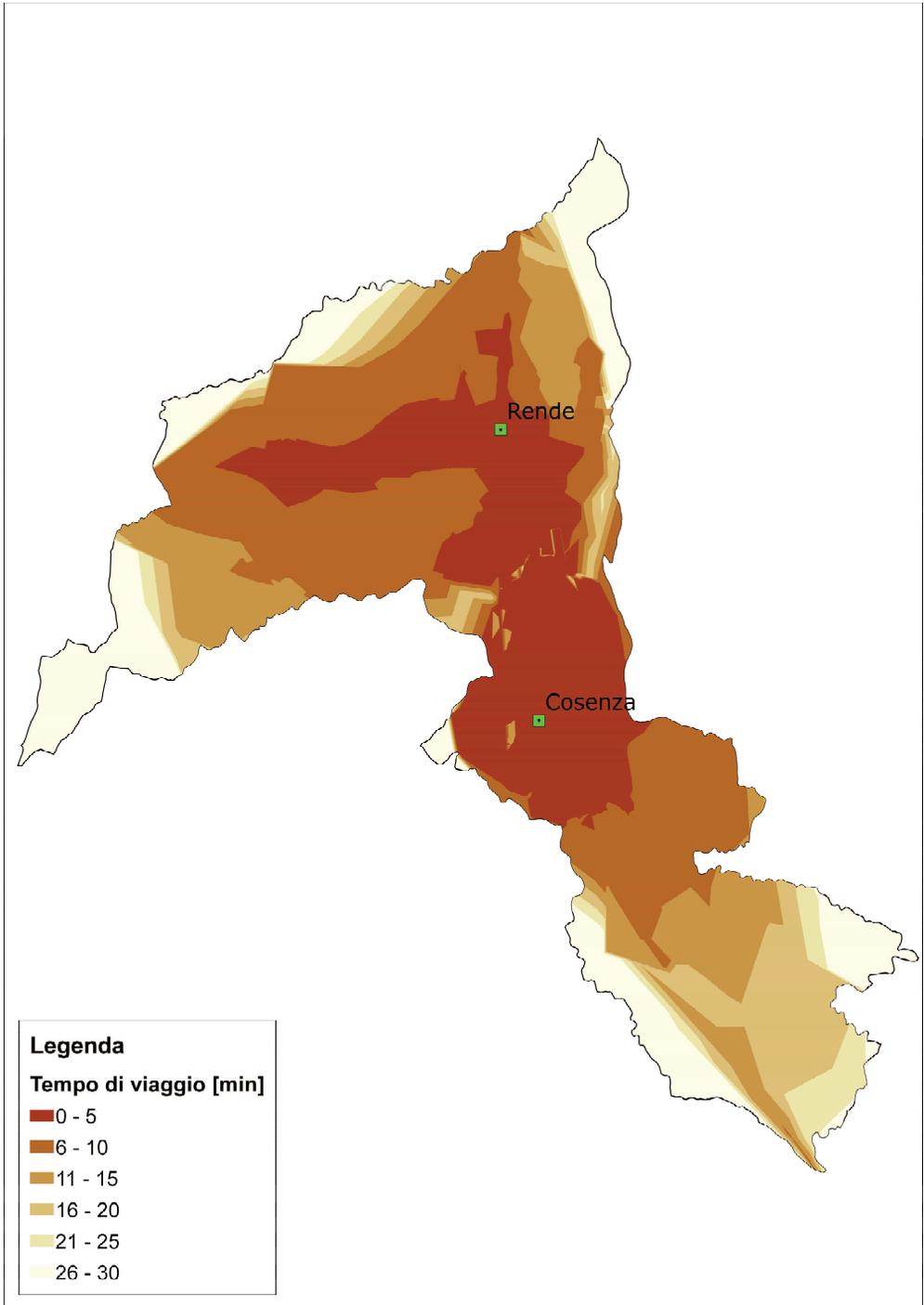


Fig. 6.11 – Accessibilità degli svincoli autostradali.

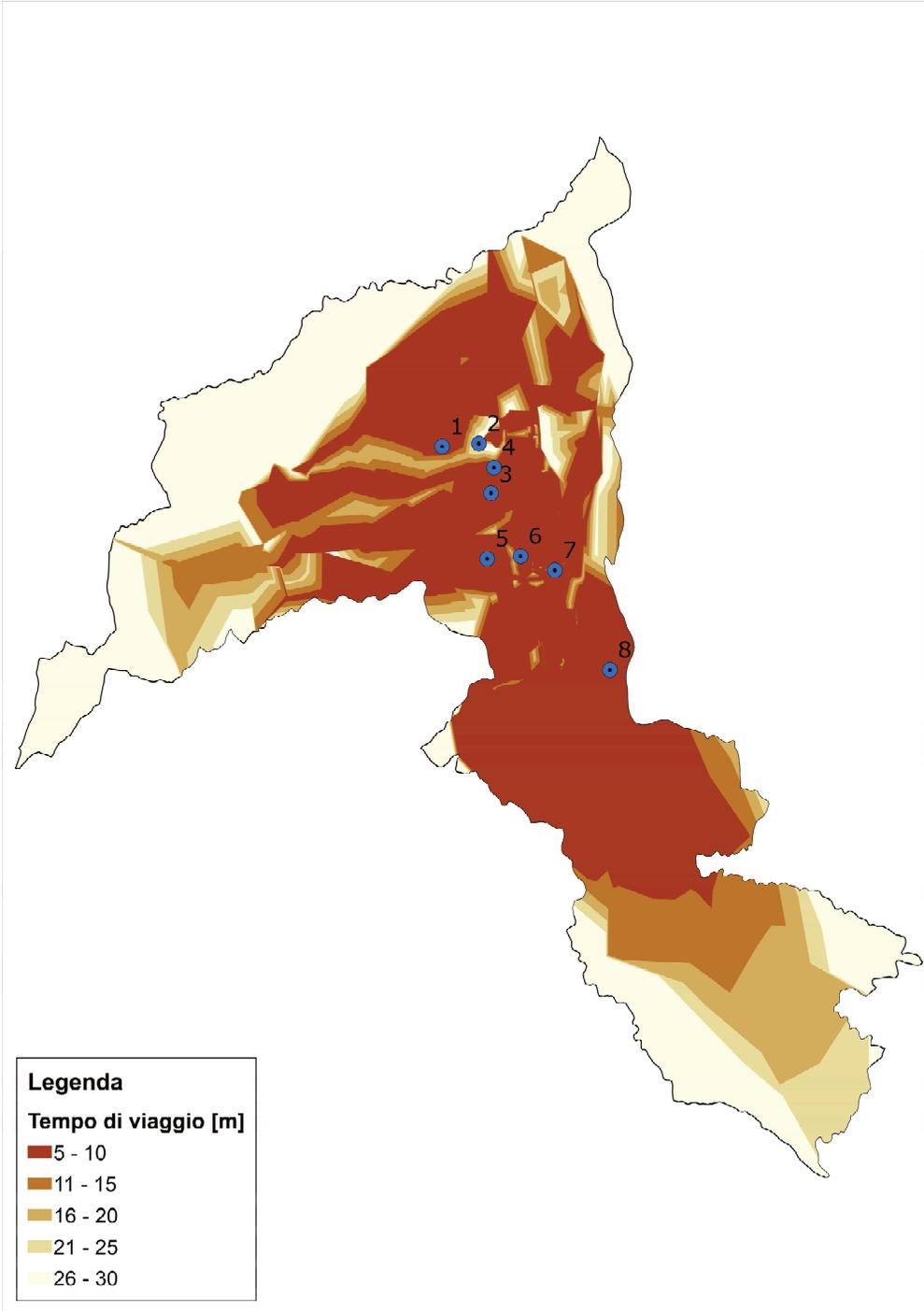


Fig. 6.12 – Accessibilità degli svincoli stradali.

L'accessibilità ai servizi si riferisce all'accessibilità di ogni sezione censuaria verso luoghi di lavoro, uffici pubblici, negozi e aziende distribuiti nell'area urbana. Tra le differenti misure di accessibilità, già descritte nel capitolo 1, per stimare l'accessibilità ai servizi è stata elaborata una misura di accessibilità di tipo gravitazionale.

L'espressione elaborata e usata per determinare l'accessibilità ai servizi è la (6.1) che permette di determinare l'accessibilità A_i della sezione censuaria i ai servizi distribuiti spazialmente nell'area urbana:

$$A_i = \sum_j^N \frac{P_j}{d_{ij}} \quad (6.1)$$

dove P_j è il numero di posti di lavoro in tutti i settori economici presenti nella sezione censuaria j (considerati come fattore attrattivo della zona come destinazione), d_{ij} è la distanza tra l'origine o e la destinazione j dello spostamento, che in questo caso corrisponde al tempo di viaggio in auto necessario per spostarsi da i a j ottenuto a partire dalla rete stradale elaborata con il GIS. In base a questa formulazione gravitazionale, l'accessibilità è direttamente proporzionale al numero di posti di lavoro della zona di destinazione dello spostamento e inversamente proporzionale alla distanza da superare per raggiungere la destinazione.

La figura 6.13 rappresenta l'accessibilità ai servizi calcolata con la relazione (6.1) per ciascuna sezione censuaria. Le zone che presentano maggiore accessibilità sono concentrate sul confine tra le due città e nell'area valliva di Cosenza. Infatti, essendo collocate in una zona ricca di infrastrutture stradali e in posizione baricentrica rispetto al resto dell'area urbana, da queste sezioni è possibile raggiungere facilmente tutte le possibili destinazioni. Le sezioni censuarie che presentano un livello molto basso di accessibilità sono collocate nella zona settentrionale del territorio di Rende. Oltre ad essere in posizione periferica rispetto al centro urbano, queste sezioni sono scarsamente popolate.

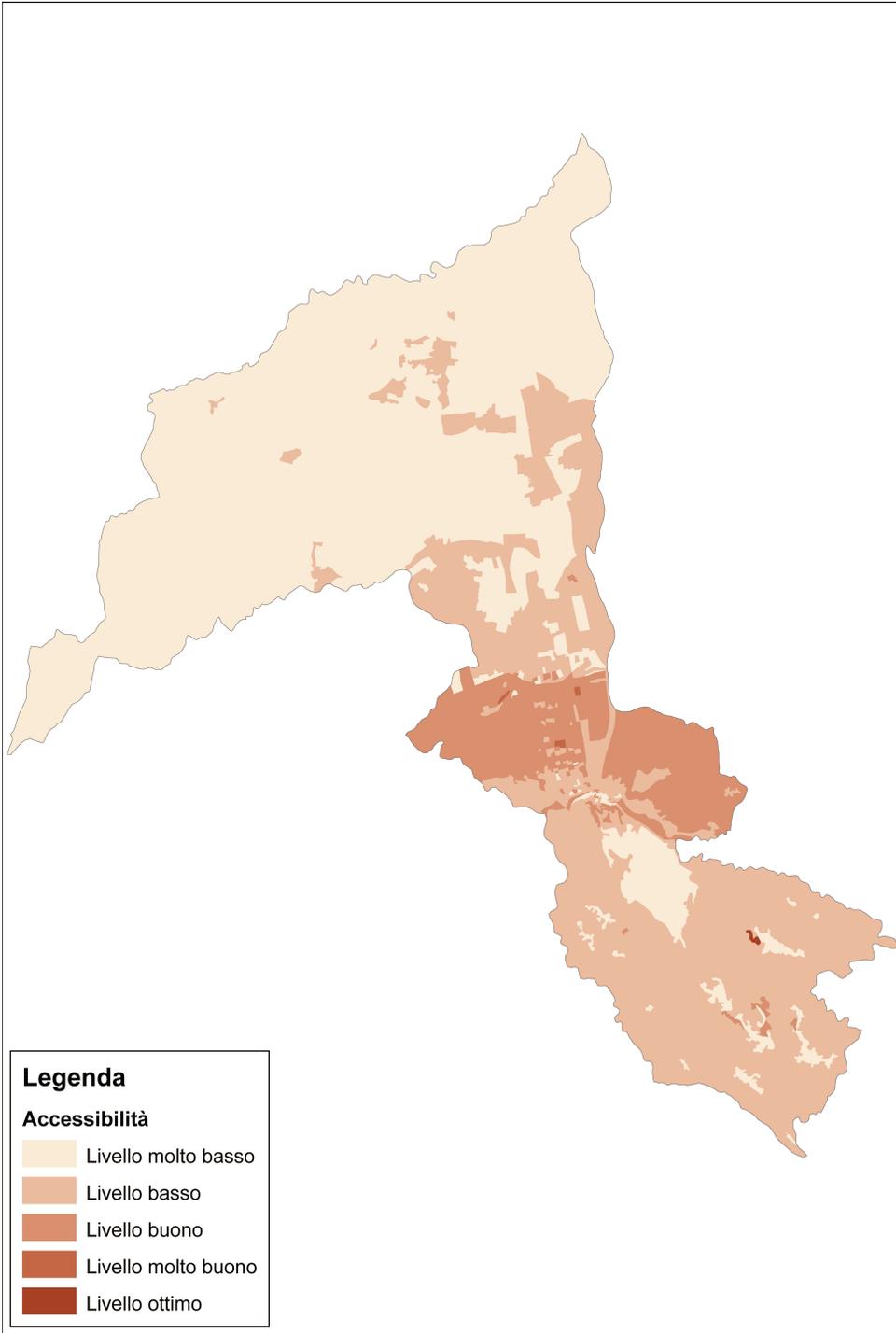


Fig. 6.13 - Accessibilità ai servizi.

CAPITOLO 7

VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DEL SISTEMA TERRITORIALE SUL SISTEMA DEI TRASPORTI

7.1 Generalità

Per valutare l'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti possono essere seguiti diversi approcci metodologici. Alla base si colloca, in ogni caso, un'approfondita analisi delle variabili che entrano in gioco nelle relazioni tra i due sistemi.

Un aspetto importante è rappresentato dalla componente spaziale del fenomeno. Infatti, recenti studi hanno dimostrato che considerando la componente spaziale delle variabili si ottengono risultati molto diversi da quelli ottenuti trascurando le caratteristiche spaziali. La rete stradale e ferroviaria, gli edifici civili e industriali e altre costruzioni presenti sul territorio sono stati realizzati in risposta ai bisogni della popolazione, che ha necessità di spostarsi per prendere parte alle attività. La domanda di trasporto, poiché influenzata dalla localizzazione sul territorio delle abitazioni e delle attività economiche, dipende fortemente dalla loro distribuzione spaziale.

In questo lavoro, verrà effettuata l'analisi spaziale degli spostamenti sia interni e sia esterni applicando le tecniche di associazione (o autocorrelazione) spaziale, al fine di individuare l'eventuale presenza di *cluster* o aggregazioni di valori simili di ciascuna variabile. Le misure globali

e locali di autocorrelazione spaziale saranno applicate e implementate utilizzando il GIS. Infatti, il software ArcGIS (ESRI) contiene degli strumenti dedicati che permettono di valutare ampiamente gli schemi spaziali della distribuzione dei dati trattati. Le tecniche di associazione spaziale sono considerate un approccio efficace per analizzare la complessità dei dati in modo da determinare se esistono tra di essi delle relazioni spaziali.

Studi empirici indicano che le interazioni trasporti-territorio possono variare notevolmente nello spazio geografico e trascurare l'entità di queste variazioni può condurre ad una cattiva interpretazione del fenomeno studiato. Di conseguenza, per analizzare l'influenza delle variabili territoriali sulla domanda di trasporto si possono utilizzare le tecniche di eterogeneità spaziale, prima fra tutte la regressione GWR, che permette di modellare le relazioni tra le variabili tenendo in considerazione le variazioni spaziali.

Un'altra metodologia che sarà utilizzata per valutare l'influenza del sistema territoriale sulla domanda di spostamento è rappresentata dalla tecnica di modellazione SEM. L'aspetto più interessante dei modelli ad equazioni strutturali è la possibilità di spiegare una variabile latente (non osservata) come il risultato delle relazioni tra un certo numero di variabili osservate direttamente, chiamate indicatori. Nel caso dello studio delle interazioni trasporti-territorio, tra le variabili osservate è possibile considerare anche variabili che presentano caratteristiche prettamente spaziali, come quelle che si riferiscono alla conformazione del territorio e alla struttura urbana. I risultati del SEM valutano quantitativamente l'entità delle relazioni esistenti tra le variabili latenti indipendenti (esogene) e quella dipendente (endogena) e allo stesso tempo individuano gli indicatori che hanno il maggior peso sulle variabili esogene e, di conseguenza, su quella endogena.

7.2 Applicazione delle tecniche di associazione spaziale

7.2.1 Statistiche globali di associazione spaziale

Lo scopo dell'applicazione delle statistiche globali di associazione spaziale è comprendere la distribuzione spaziale degli spostamenti emessi dalle sezioni censuarie dell'area urbana considerando separatamente gli spostamenti "interni", cioè con destinazione interna all'area urbana, e quelli "esterni", cioè

con destinazione all'esterno dell'area urbana. Gli strumenti presenti nel software ArcGIS che permettono di calcolare le statistiche globali di autocorrelazione spaziale sono denominati *High/low Clustering* (Aggregazione di alti o bassi valori) e *Spatial Autocorrelation* (Autocorrelazione spaziale).

Usando *High/Low Clustering* è possibile misurare il grado di aggregazione di valori elevati o di valori bassi della variabile. In altri termini, questo strumento permette di individuare l'eventuale presenza di aggregazioni di valori simili. Le misure fornite per valutare la presenza o meno di *clusters* sono la statistica denominata "General G" di Getis e Ord e il valore ad essa associato di *Z*, che corrisponde al valore della statistica di riferimento in base alla quale si valuta se rigettare o meno l'ipotesi nulla "non c'è aggregazione spaziale". In altri termini, *Z* è una misura di significatività statistica. Quando il valore assoluto di *Z* è abbastanza grande, l'ipotesi nulla può essere rigettata. Nel caso di valori di *Z* positivi e molto alti si registra la presenza di aggregazioni di valori alti della variabile, mentre nel caso di valori di *Z* negativi si ha l'aggregazione di valori bassi simili. Quando *Z* assume un valore vicino a 0, la variabile analizzata non presenta aggregazioni di valori simili nell'area di studio.

La statistica "General G" è stata applicata prima agli spostamenti interni ottenendo i risultati riportati nella tabella 7.1. Si osserva che il valore di *Z* è negativo e abbastanza lontano da 0 in valore assoluto per cui l'ipotesi nulla può essere rigettata.

Tab. 7.1 – Risultati *High/low clustering* (spostamenti giornalieri interni).

General G	
Valore osservato General G	0,000348
Valore atteso General G	0,000449
Varianza	0,000000
Z Score	-3,584739
p-value	0,000337

L'output grafico restituito da ArcGIS mostra che vi è una probabilità molto più bassa dell'1% che l'aggregazione di valori bassi sia il risultato di una scelta casuale (figura 7.1).

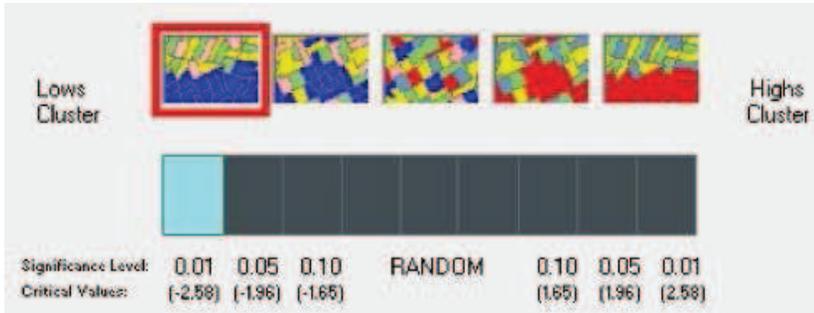


Fig. 7.1 - High/Low Clustering Output (spostamenti giornalieri interni).

I risultati dell'applicazione della statistica "General G" alla distribuzione degli spostamenti esterni (tabella 7.2) mostra che il valore di Z non è significativo perciò l'ipotesi nulla non può essere rigettata. In base a questo risultato, la distribuzione degli spostamenti esterni non presenta *clusters* dovuti alla presenza di aggregazione spaziale dei valori della variabile.

Tab. 7.2 – Risultati High/low clustering (spostamenti giornalieri esterni).

General G	
Valore osservato General G	0,000413
Valore atteso General G	0,000449
Varianza	0,000000
Z Score	-1,180129
p-value	0,237949

Come mostrato nella figura 7.2, anche se vi è la presenza di alcuni *clusters*, la distribuzione dei valori della variabile potrebbe essere dovuta ad una disposizione casuale e non a relazioni spaziali.

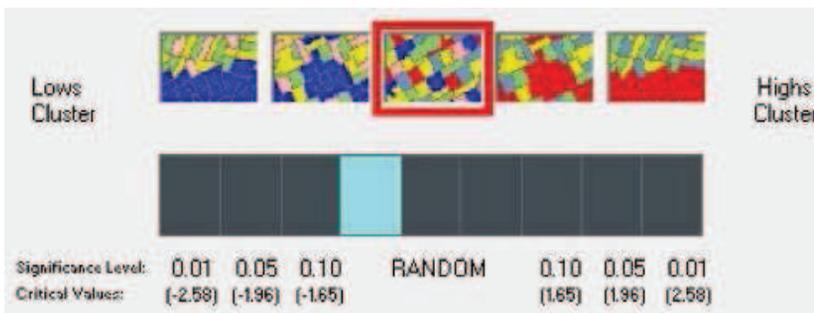


Fig. 7.2 - High/Low Clustering Output (spostamenti giornalieri esterni).

Il secondo strumento di ArcGIS utilizzato, *Spatial Autocorrelation*, misura l'indice globale "I di Moran" che valuta se i valori della variabile analizzata sono aggregati, dispersi o disposti casualmente. Un valore di I molto vicino a +1,0 indica la presenza di cluster mentre un valore vicino a -1,0 indica dispersione dei valori della variabile. Anche nel caso dell'indice globale "I di Moran", si utilizza il valore di Z associato per rigettare o meno l'ipotesi nulla "non c'è aggregazione spaziale". Per definire se il valore di Z è statisticamente significativo, si confronta questo valore con un intervallo di valori per un particolare livello di significatività. Quando il valore di p-value è basso e il valore assoluto di Z è alto abbastanza da non rientrare nell'intervallo di confidenza fissato, l'ipotesi nulla può essere rigettata.

Dall'analisi della distribuzione spaziale degli spostamenti interni, risulta che il valore di Z è alto e l'ipotesi nulla può essere rigettata (tabella 7.3).

Tab. 7.3 – Risultati *Spatial Autocorrelation* (spostamenti giornalieri interni).

Indice globale I di Moran	
Indice I di Moran	0.153467
Indice I di Moran atteso	-0.001198
Varianza	0.000021
Z Score	33.541291
p-value	0.000000

Come rappresentato nella figura 7.3, i dati sono aggregati e la probabilità che lo schema aggregato dei valori della variabile sia il risultato di una scelta casuale è molto più bassa dell'1%.

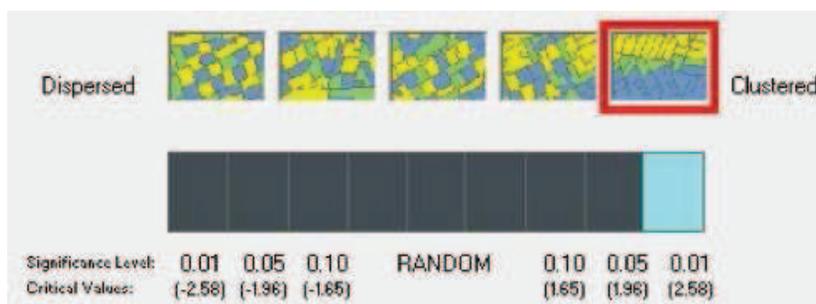


Fig. 7.3 – Output *Spatial Autocorrelation* (spostamenti giornalieri interni).

L'applicazione dello strumento *Spatial Autocorrelation* alla distribuzione degli spostamenti esterni mostra risultati simili a quelli ottenuti per gli spostamenti interni, come riportato nella tabella 7.4.

Tab. 7.4 – Risultati *Spatial Autocorrelation* (spostamenti giornalieri esterni).

Indice globale I di Moran	
Indice I di Moran	0.163209
Indice I di Moran atteso	-0.001198
Varianza	0.000021
Z Score	35.724162
p-value	0.000000

La probabilità che lo schema aggregato dei valori della variabile sia il risultato di una scelta casuale è molto meno dell'1% per cui l'ipotesi nulla può essere rigettata (figura 7.4).

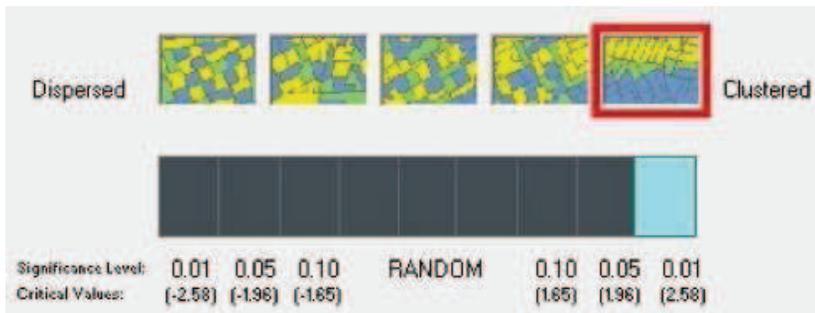


Fig. 7.4 – Output *Spatial Autocorrelation* (spostamenti giornalieri esterni).

L'applicazione delle statistiche "General G" e "Indice globale I di Moran" restituisce risultati simili nel caso dell'analisi degli spostamenti interni mentre dà risultati contrastanti considerando gli spostamenti esterni. Infatti, nel caso degli spostamenti interni la prima statistica stabilisce che la distribuzione dei valori degli spostamenti presenta aggregazioni di valori bassi, risultato confermato dalla seconda statistica in base alla quale i dati sono aggregati. Invece, nel caso degli spostamenti esterni la statistica "General G" prescrive che la distribuzione dei dati è casuale mentre l'indice globale "I di Moran" stabilisce che i dati seguono una distribuzione aggregata. Una possibile spiegazione di questo fenomeno è la differenza tra le due variabili. Infatti, come risulta dall'analisi della mobilità sistematica, gli spostamenti con

destinazione esterna all'area urbana costituiscono solo una minima aliquota degli spostamenti totali emessi da ciascuna sezione censuaria. Quasi tutti gli spostamenti emessi hanno destinazione all'interno dell'area urbana stessa.

7.2.2 *Statistiche locali di associazione spaziale*

Le misure globali di associazione spaziale si riferiscono all'intera area di studio e non danno indicazioni riguardanti la localizzazione dei *clusters*. Per rilevare la posizione delle aggregazioni di valori simili in una distribuzione di dati geografici si utilizzano le statistiche locali di associazione spaziale. Gli strumenti presenti in ArcGIS e usati per applicare le statistiche locali sono denominati *Hot Spot Analysis* (Analisi dei punti critici) e *Cluster and Outlier Analysis* (Analisi dei cluster e dei valori anomali).

Hot Spot Analysis fornisce la statistica G_i^* di Getis e Ord per verificare la presenza o meno di punti critici. Il risultato della funzione G_i è un valore della statistica di riferimento Z , utilizzato per valutare la significatività statistica. Un elevato valore di Z per una sezione censuaria indica che la sezione considerata e quelle vicine hanno alti valori della variabile considerata. Allo stesso modo, un valore basso di Z indica che la sezione censuaria a cui si riferisce e quelle limitrofe presentano bassi valori della variabile analizzata. Un valore di Z prossimo a 0 indica che non ci sono apparenti concentrazioni di valori simili.

Come nel caso delle statistiche globali, le tecniche locali di associazione spaziale sono state applicate sia agli spostamenti interni sia a quelli esterni. I risultati possono essere rappresentati graficamente in termini di Z . A seconda del valore di Z , le sezioni censuarie sono state divise in "hot spot", cioè aggregazioni di sezioni che presentano alti valori della variabile spostamenti, e in "cold spot", cioè gruppi di sezioni che presentano un basso numero di spostamenti interni giornalieri. Nello specifico, gli "hot spot" sono rappresentati nei toni del rosso, mentre i "cold spot" nei toni del blu. I risultati ottenuti applicando la statistica G_i^* agli spostamenti interni e agli spostamenti esterni sono rappresentati rispettivamente nelle figure 7.5 e 7.6.

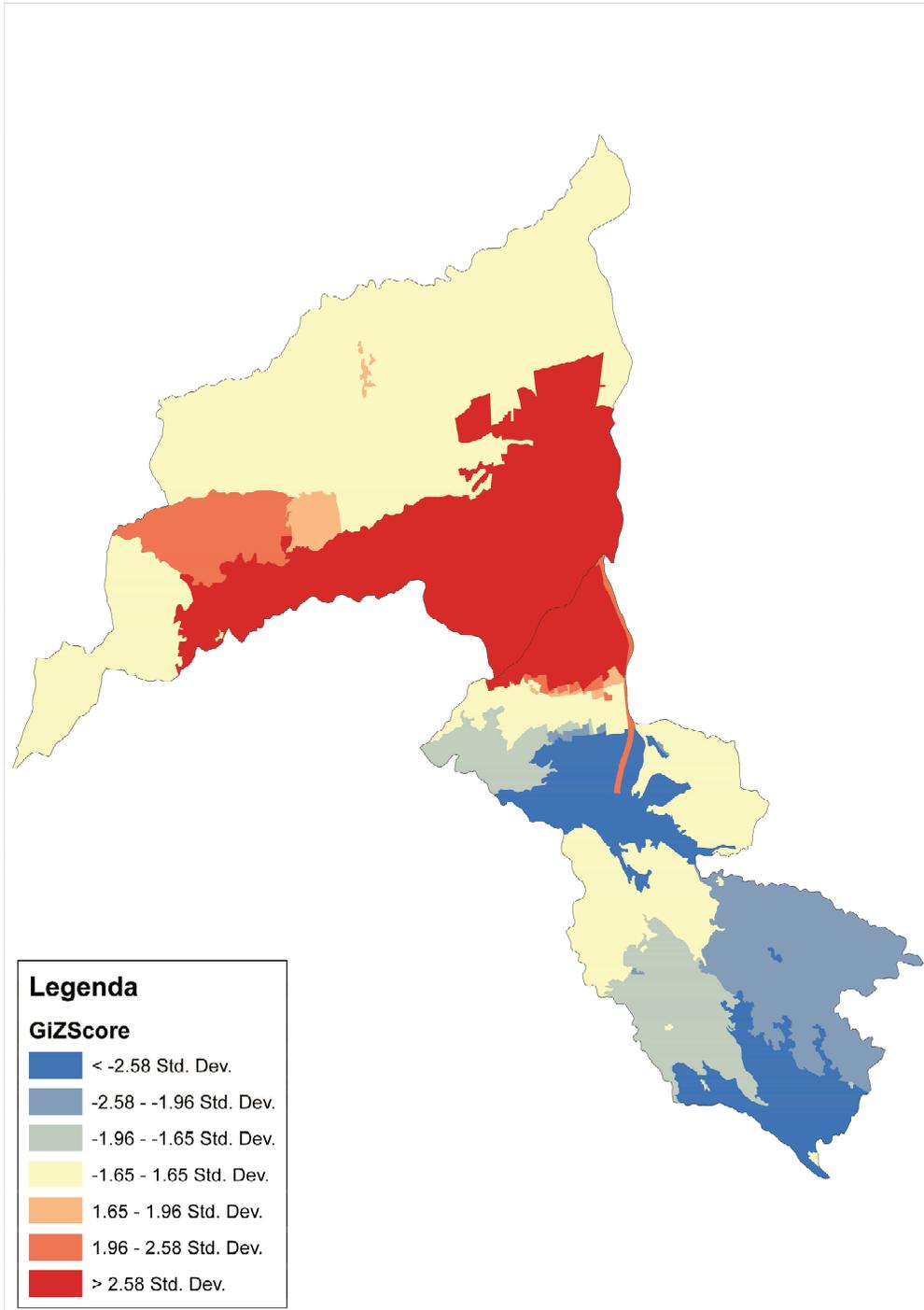


Fig. 7.5 - Statistica G_i^* applicata agli spostamenti giornalieri interni.

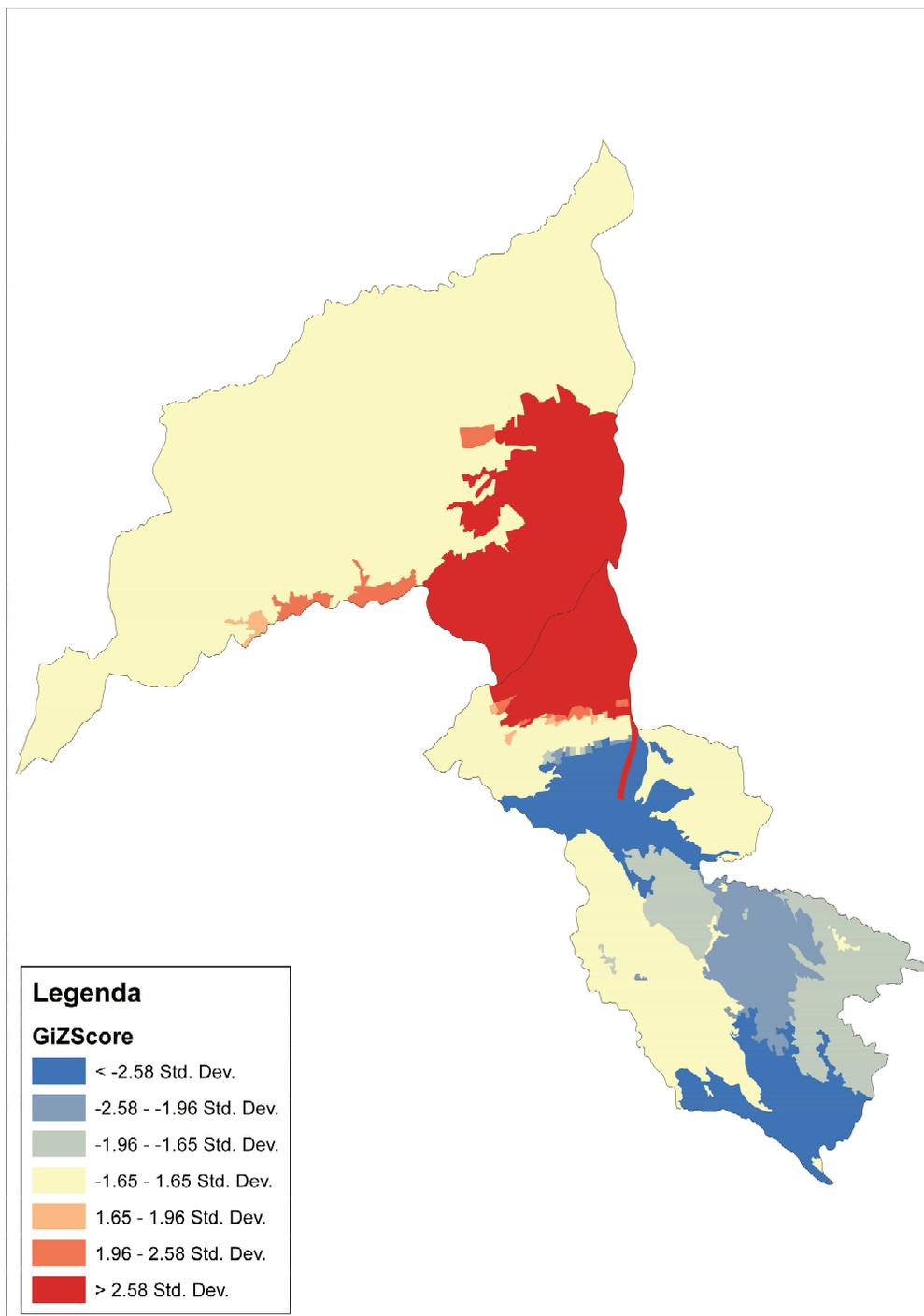


Fig. 7.6 - Statistica G_i^* applicata agli spostamenti giornalieri esterni.

Osservando le figure, si deduce che le due variabili presentano aggregazioni di valori alti e aggregazioni di valori bassi localizzate più o meno nelle stesse zone. In entrambi i casi, le aree con alti valori di spostamenti sono localizzate in prossimità del confine tra Cosenza e Rende. Data la conformazione urbana delle due città, lungo il confine non si registra discontinuità e l'analisi spaziale degli spostamenti emessi mette in evidenza proprio questo aspetto. Le sezioni con bassi valori di spostamenti sono, invece, localizzate in corrispondenza del centro storico di Cosenza e di aree scarsamente popolate.

L'indice "I di Moran locale" definito da Anselin può essere calcolato utilizzando *Cluster and Outlier Analysis*. Questo strumento di analisi identifica i raggruppamenti di punti con valori simili e i raggruppamenti di punti con valori molto diversi tra di loro. Quando il valore di I è positivo, la sezione considerata è circondata da sezioni che hanno valori simili. Un valore negativo indica che la sezione considerata è circondata da sezioni che presentano valori diversi della variabile. Per ogni osservazione, è possibile calcolare anche il valore di Z. Un gruppo di sezioni vicine con valori elevati di Z indicano un raggruppamento di valori simili che possono essere alti o bassi. Un valore negativo di Z indica che la sezione è circondata da sezioni con valori diversi.

L'indice I di Moran locale può essere rappresentato anche attraverso la definizione di quattro schemi di associazione spaziale:

- High-High (HH): un valore elevato è circondato da altri valori elevati;
- Low-Low (LL): un valore basso è circondato da altri valori bassi;
- High-Low (HL): un valore elevato è circondato da valori bassi;
- Low-High (LH): un valore basso è circondato da valori elevati.

Questo tipo di rappresentazione è molto utile perchè permette di avere un'immediata individuazione delle zone in cui si hanno aggregazioni di valori.

Applicando *Cluster and Outlier Analysis* alle variabili spostamenti interni e spostamenti esterni, sono stati ottenuti gli schemi di aggregazione riportati rispettivamente nelle figure 7.7 e 7.8.

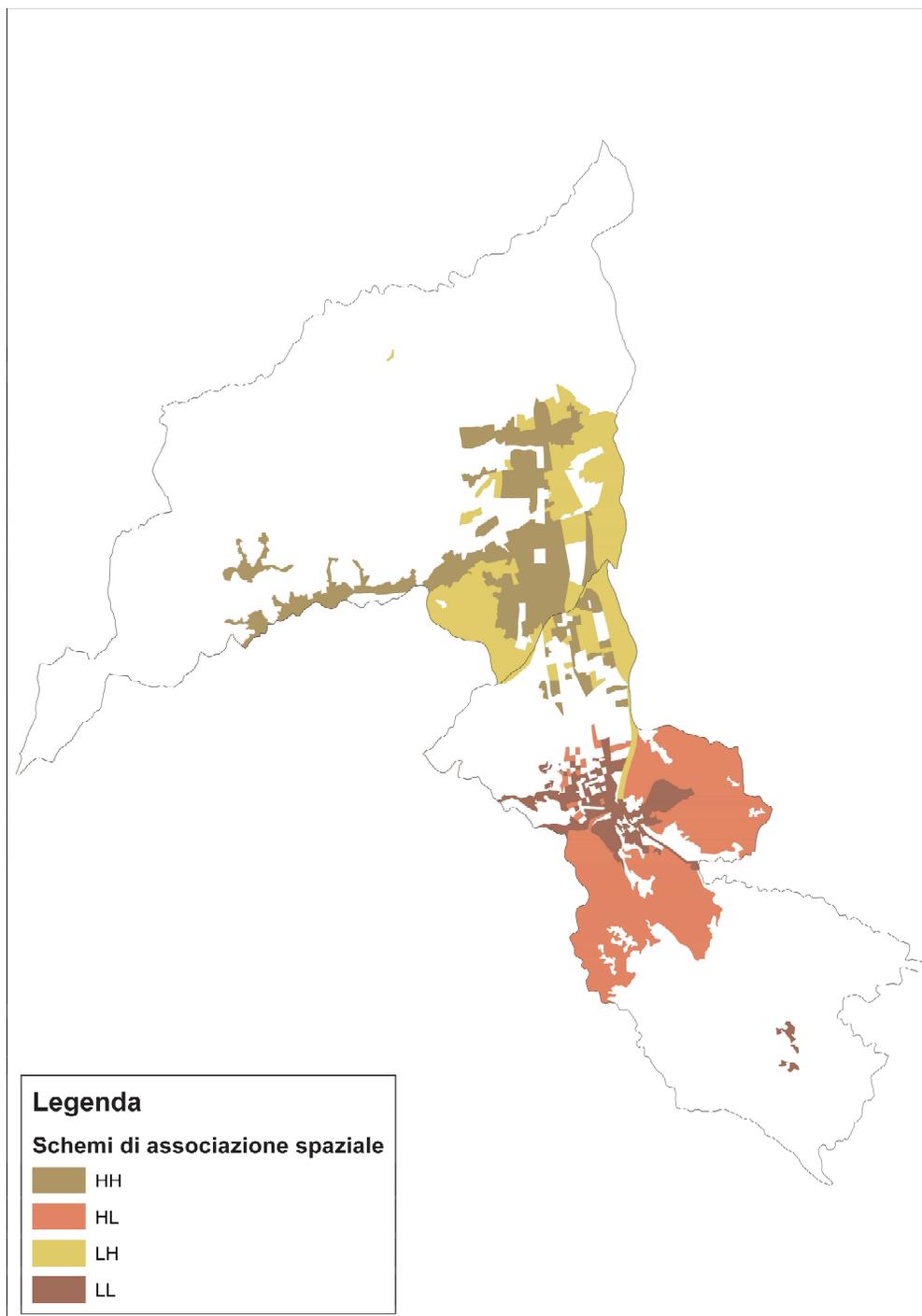


Fig. 7.7 - Schemi di associazione spaziale locale degli spostamenti giornalieri interni.

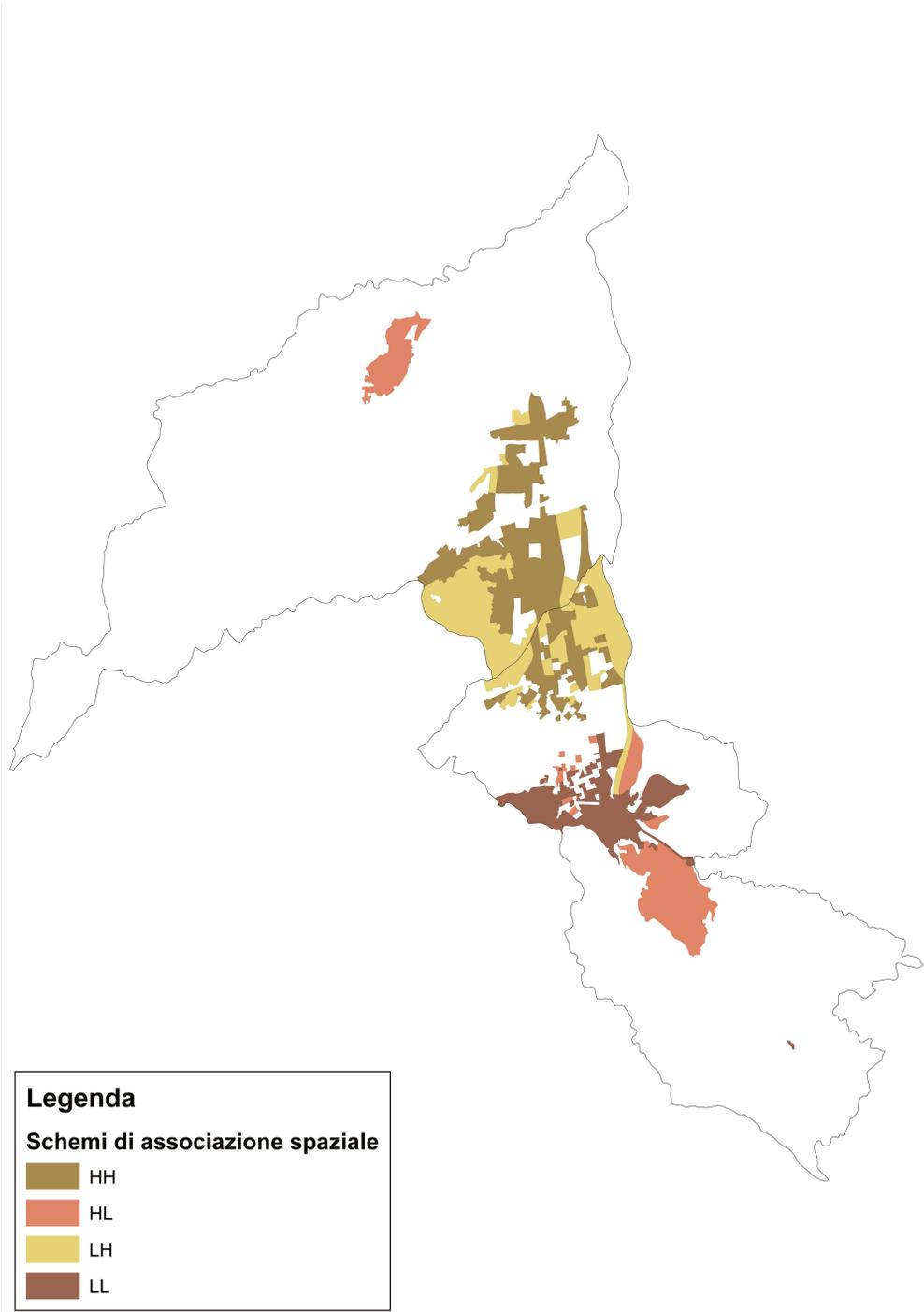


Fig. 7.8 - Schemi di associazione spaziale locale degli spostamenti giornalieri esterni.

Anche in questa analisi è forte l'influenza dell'ordine di grandezza delle due variabili. Anche se le figure presentano schemi simili di associazione spaziale, la figura relativa all'analisi spaziale locale degli spostamenti interni, a differenza di quella relativa agli spostamenti esterni, mostra zone di associazione spaziale della stessa tipologia più ampie.

Confrontando i risultati ottenuti dalle due analisi di associazione spaziale locale, *Hot Spot Analysis* e *Cluster and Outlier Analysis*, emergono numerose similarità. Per prima cosa, entrambe le statistiche individuano le stesse zone in cui si registra la localizzazione di aggregazioni spaziali dei valori della variabile.

L'applicazione delle statistiche di associazione spaziale ai dati relativi agli spostamenti sistematici introduce nuovi aspetti nello studio della domanda di spostamento. Infatti, permette di individuare eventuali dipendenze spaziali dei valori della variabile sottoposta ad analisi, come avvenuto nel caso in esame. Di conseguenza, una volta individuata l'influenza della componente spaziale, questa deve essere tenuta in conto nei modelli di stima della domanda di spostamento per meglio riprodurre la realtà del fenomeno studiato.

7.3 Applicazione delle tecniche di eterogeneità spaziale

7.3.1 Studio e definizione del modello di regressione GWR

Nell'analisi dell'influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti, gli spostamenti sistematici giornalieri possono essere espressi mediante un modello di regressione come funzione di alcune variabili, quali variabili socio-economiche, variabili relative alle caratteristiche delle infrastrutture di trasporto o variabili relative all'assetto territoriale.

Quando si studiano fenomeni in cui entrano in gioco variabili spaziali, queste non assumono valori costanti per l'intera area di studio, ma presentano valori diversi a seconda del punto in cui vengono rilevate, cioè variano nello spazio. Di conseguenza, l'analisi non può essere condotta utilizzando modelli di regressione ordinari, come il modello di regressione dei minimi quadrati, perchè questi modelli possono portare a risultati incompleti o errati e, quindi, ad una cattiva interpretazione del fenomeno. Infatti, i modelli di regressione ordinari, come la regressione OLS, trascurano la variazione delle variabili

nello spazio per cui forniscono un'unica funzione che vale per l'intera area di studio. Per ovviare a questo inconveniente, l'analisi degli spostamenti sistematici emessi dalle sezioni censuarie che compongono l'area di studio è stata condotta applicando sia la regressione OLS sia la regressione geograficamente pesata GWR. Entrambi i modelli sono stati calibrati utilizzando le stesse variabili esplicative. L'applicazione di entrambi i metodi è necessaria perchè l'inadeguatezza della tecnica di regressione OLS è il requisito fondamentale per l'applicazione della regressione GWR. Infatti, un approccio molto diffuso è individuare il miglior modello OLS e dopo applicare la regressione GWR per valutare quale sia il modello che meglio si adatta ai dati.

Il modello di regressione ha lo scopo di determinare il numero di spostamenti effettuati dalla popolazione residente per motivi di studio e lavoro. Le variabili esplicative sono state scelte in base allo studio delle caratteristiche demografiche, delle caratteristiche socio-economiche, del patrimonio edilizio, delle infrastrutture di trasporto e dell'accessibilità. Sono state individuate cinque variabili esplicative: la superficie delle abitazioni, il numero di persone residenti occupate, il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo, il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale, l'accessibilità ai servizi.

Il modello di regressione GWR definito ha la seguente espressione:

$$S_i = \beta_{0i} + \beta_{SA}(u_i, v_i)SA_i + \beta_{RO}(u_i, v_i)RO_i + \beta_{TC}(u_i, v_i)TC_i + \beta_{ST}(u_i, v_i)ST_i + \beta_{AC}(u_i, v_i)AC_i \quad (7.1)$$

dove:

- S_i è il numero di spostamenti giornalieri totali effettuati dalle persone residenti nella sezione censuaria i per motivi di studio e lavoro;
- β_{0i} è l'intercetta del modello per la sezione censuaria i ;
- SA_i è la superficie delle abitazioni della sezione censuaria i espressa in metri quadrati;
- RO_i è il numero di persone occupate residenti nella sezione censuaria i ;

- TC_i è il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo misurato in minuti sulla rete stradale reale a partire dalla sezione censuaria i ;
- ST_i è il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale misurato in minuti sulla rete stradale reale a partire dalla sezione censuaria i ;
- AC_i è l'accessibilità ai servizi della sezione censuaria i in funzione del numero di posti di lavoro presenti nelle altre sezioni censuarie e la distanza da percorrere per raggiungerli;
- $\beta_{SA}, \beta_{RO}, \beta_{TC}, \beta_{ST}$ e β_{AC} sono i coefficienti del modello GWR per la sezione censuaria i .

7.3.2 Calibrazione del modello GWR e analisi dei risultati

Il modello di regressione GWR è stato applicato ai dati riferiti alle sezioni censuarie in cui l'area urbana è stata suddivisa. I risultati ottenuti nel complesso appaiono soddisfacenti. In primo luogo, il modello di regressione locale si adatta convenientemente ai dati in quanto la maggior parte dei valori degli errori standardizzati sono compresi tra -1,5 e +1,5 e non vi è collinearità locale. Gli altri risultati sono riportati nella tabella 7.5. Oltre alle misure proprie del modello GWR, è importante verificare i valori di R^2 , che misura l'adeguatezza del modello, e di R^2 modificato, che misura l'adeguatezza del modello tenendo conto della dimensione del campione. In questo caso, entrambi i valori sono prossimi all'unità per cui il modello si adatta in modo più che adeguato ai dati.

Tab. 7.5 – Risultati GWR

GWR	
Ampiezza	2804,6582
Quadrato degli errori	173139,6584
Numero effettivo	33,8102
Sigma	14,6913
AIC	6885,8019
R^2	0,9570
R^2 modificato	0,9553

Un importante contributo alla comprensione del modello è costituito dalla rappresentazione grafica dei coefficienti di ciascuna variabile sotto forma di superfici raster. Questo tipo di rappresentazione mette in evidenza le variazioni nello spazio dei coefficienti delle variabili esplicative del modello.

Il coefficiente della variabile *SA* relativa alla superficie delle abitazioni (figura 7.9) presenta segno positivo nella maggior parte delle sezioni censuarie di Cosenza, e segno negativo nelle sezioni localizzate nella parte settentrionale di Rende. Dall'analisi emerge che la variabile *SA* non è significativa nella determinazione degli spostamenti emessi per le sezioni censuarie dell'area urbana in cui presenta segno negativo. Questa informazione non può essere ricavata quando si utilizza una tecnica di regressione globale.

Un comportamento diverso ha la variabile *RO* che si riferisce al numero di persone residenti occupate (figura 7.10). Il coefficiente di *RO* ha segno positivo in tutte le sezioni dell'area urbana e ciò significa che il numero totale di spostamenti emessi aumenta all'aumentare del numero di persone residenti occupate. Osservando la superficie raster dei coefficienti di questa variabile emerge che *RO* ha un peso maggiore nelle sezioni censuarie del comune di Rende.

Il coefficiente della variabile *TC*, tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo a partire dalla sezione censuaria considerata, ha quasi sempre segno positivo (figura 7.11). Questo significa che all'aumentare del tempo di viaggio aumentano gli spostamenti. Una possibile spiegazione di questo risultato, apparentemente contraddittorio, potrebbe essere che i residenti delle zone che presentano scarsa accessibilità verso i terminal del trasporto collettivo preferiscono spostarsi utilizzando un mezzo di trasporto privato, come l'automobile. Di conseguenza, scegliendo l'automobile, la popolazione effettua un maggior numero di spostamenti a partire dalla propria residenza.

La variabile *ST*, tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale, presenta variazioni spaziali marcate (figura 7.12). Infatti, il coefficiente di *ST* assume segno negativo nel territorio di Cosenza e nella zona centrale dell'area urbana, e segno positivo nelle zone più settentrionali di Rende. Questa variabile ha rilevanza nelle sezioni più vicine

agli svincoli stradali e autostradali mentre perde di significatività man mano che ci si allontana dalle principali infrastrutture stradali.

Infine, il coefficiente della variabile *AC* ha sempre segno positivo (figura 7.13) per cui il numero di spostamenti totali aumenta all'aumentare dell'accessibilità ai servizi. Il peso della variabile è più grande nelle sezioni censuarie localizzate nella zona più a nord dell'area urbana.

Osservando le superfici raster dei coefficienti delle variabili è possibile comprendere come l'influenza delle variabili sulla domanda di spostamento cambia da una sezione censuaria all'altra. Infatti, alcune variabili sono significative in una sezione censuaria ma non in altre.

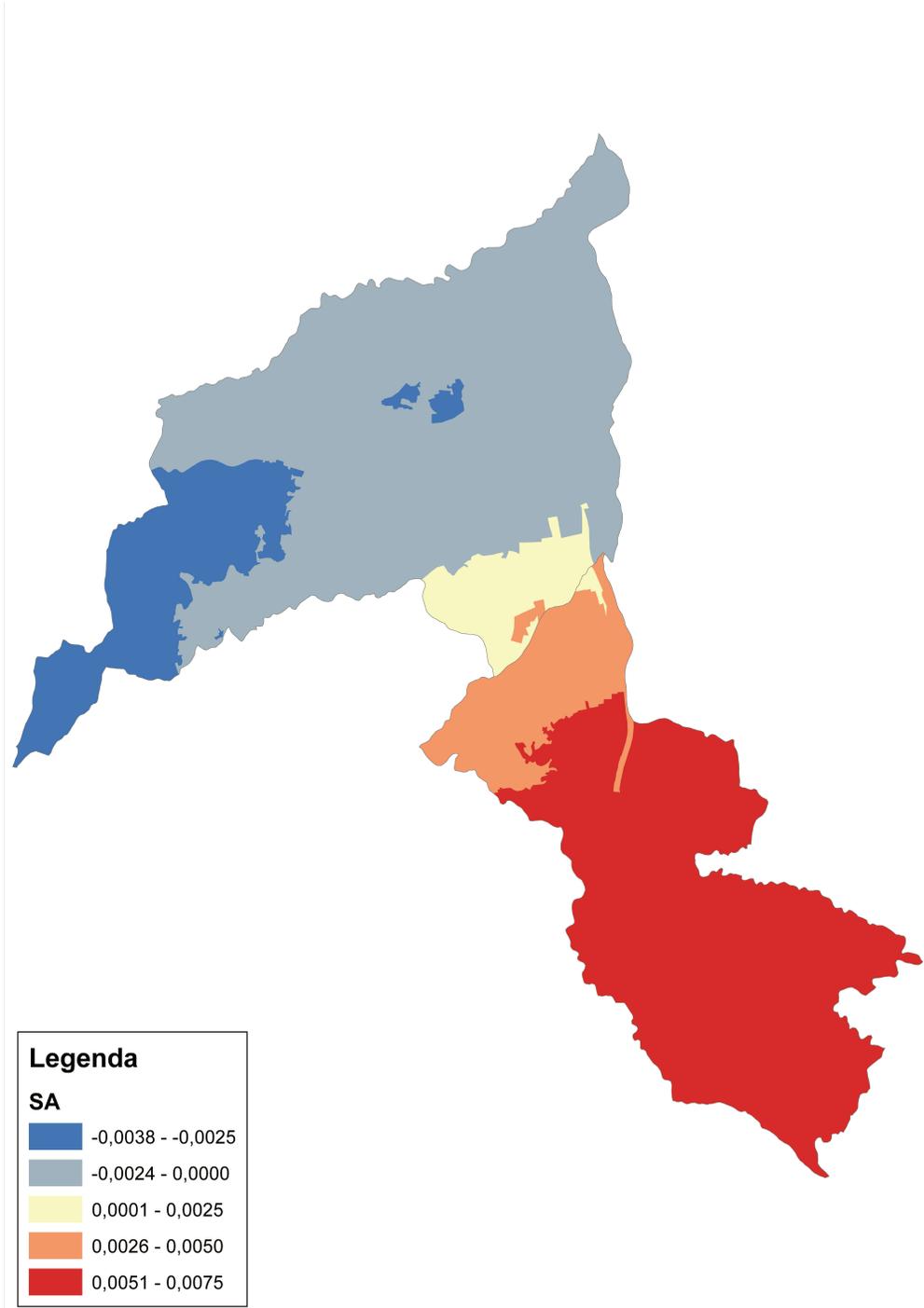


Fig. 7.9 – Superficie raster dei coefficienti della variabile SA.

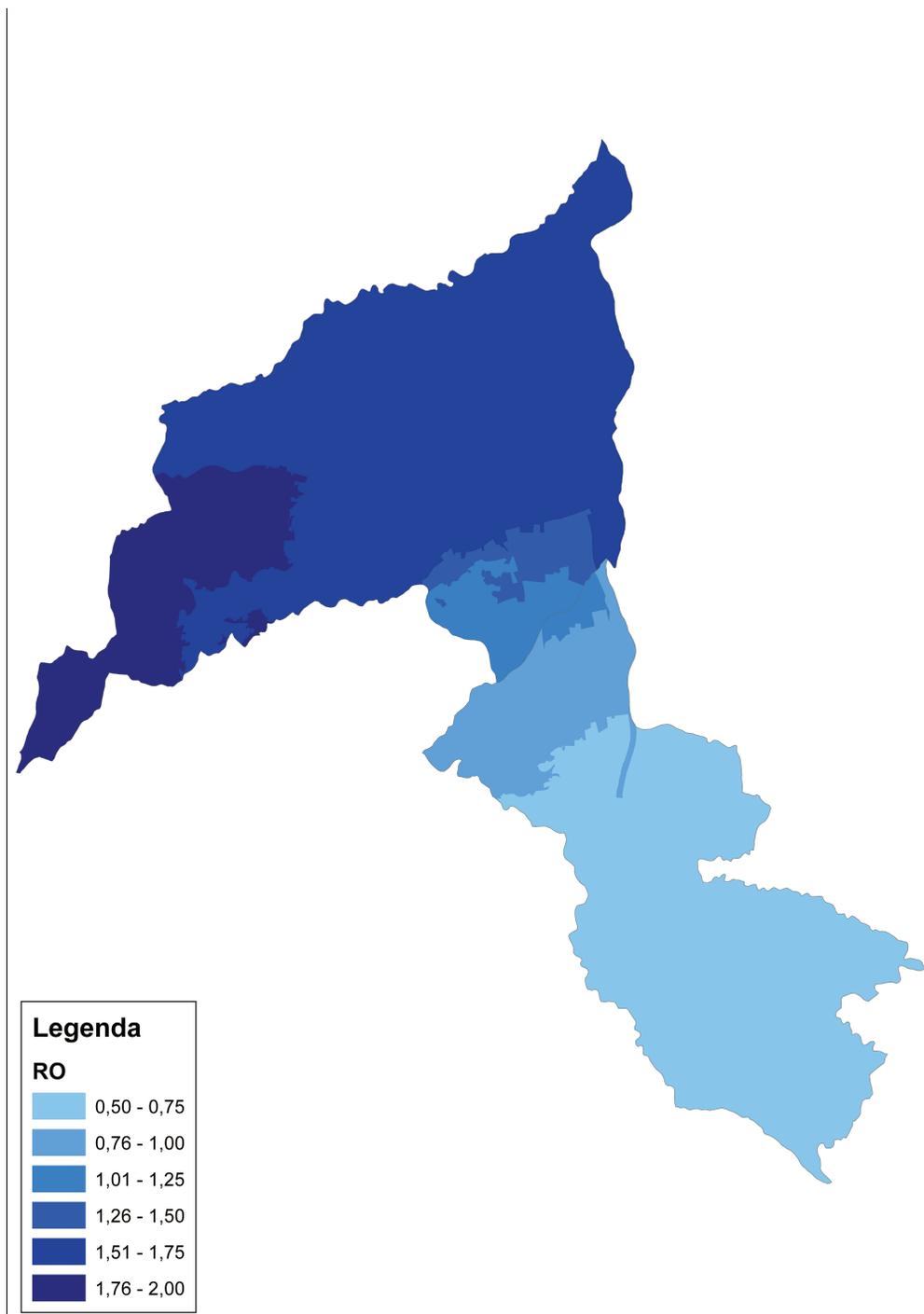


Fig. 7.10 – Superficie raster dei coefficienti della variabile RO.

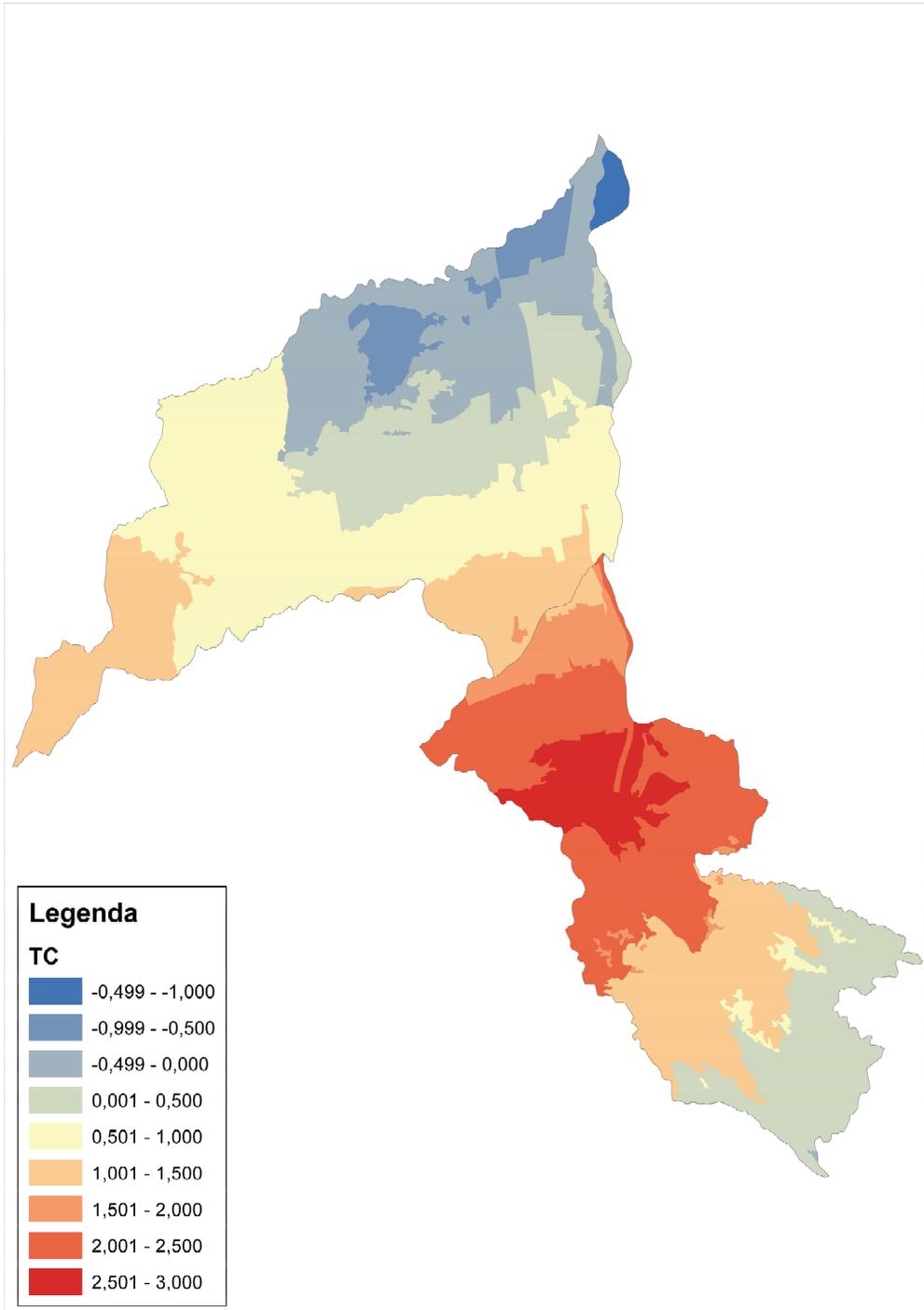


Fig. 7.11 – Superficie raster dei coefficienti della variabile TC.

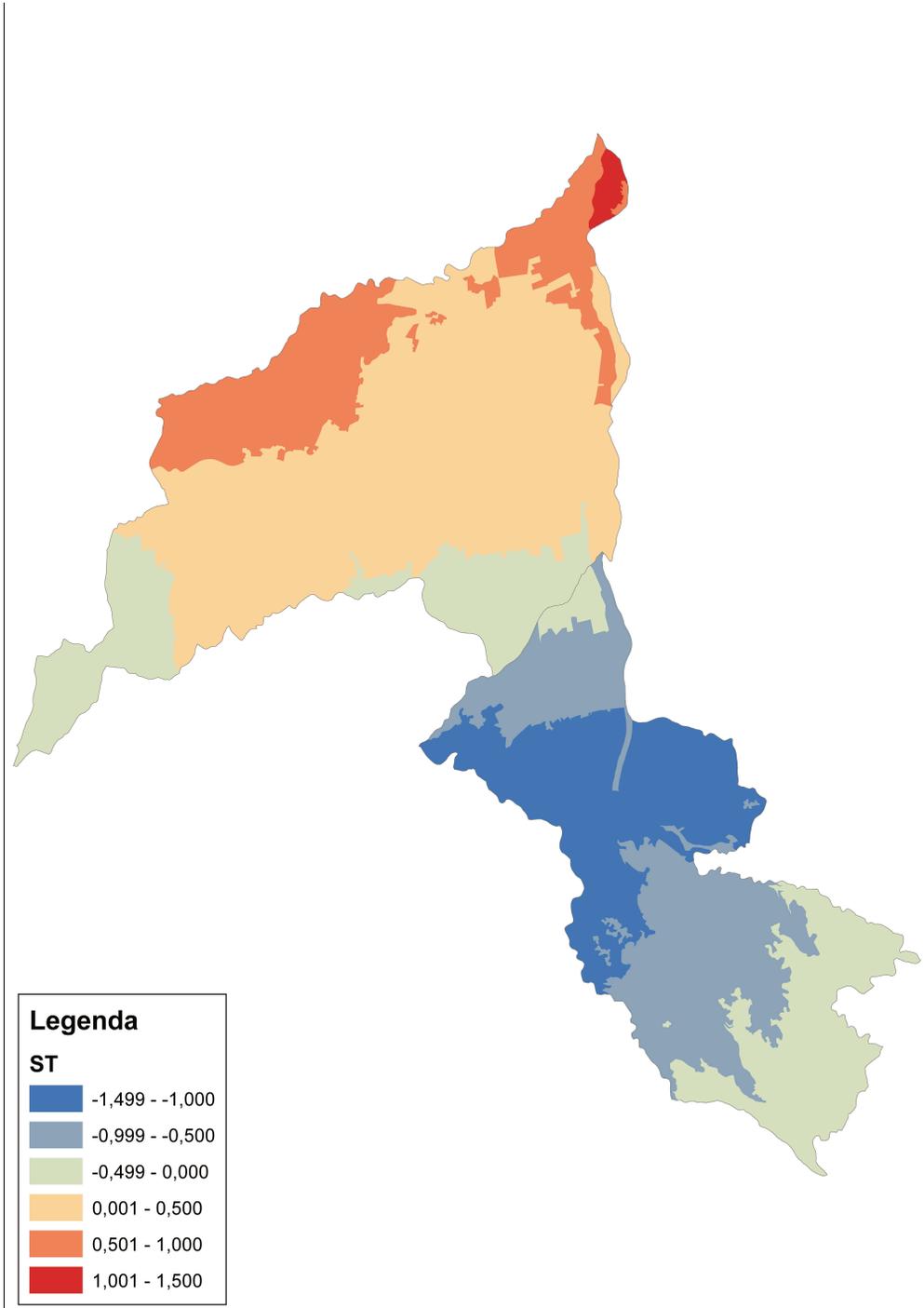


Fig. 7.12 – Superficie raster dei coefficienti della variabile ST.

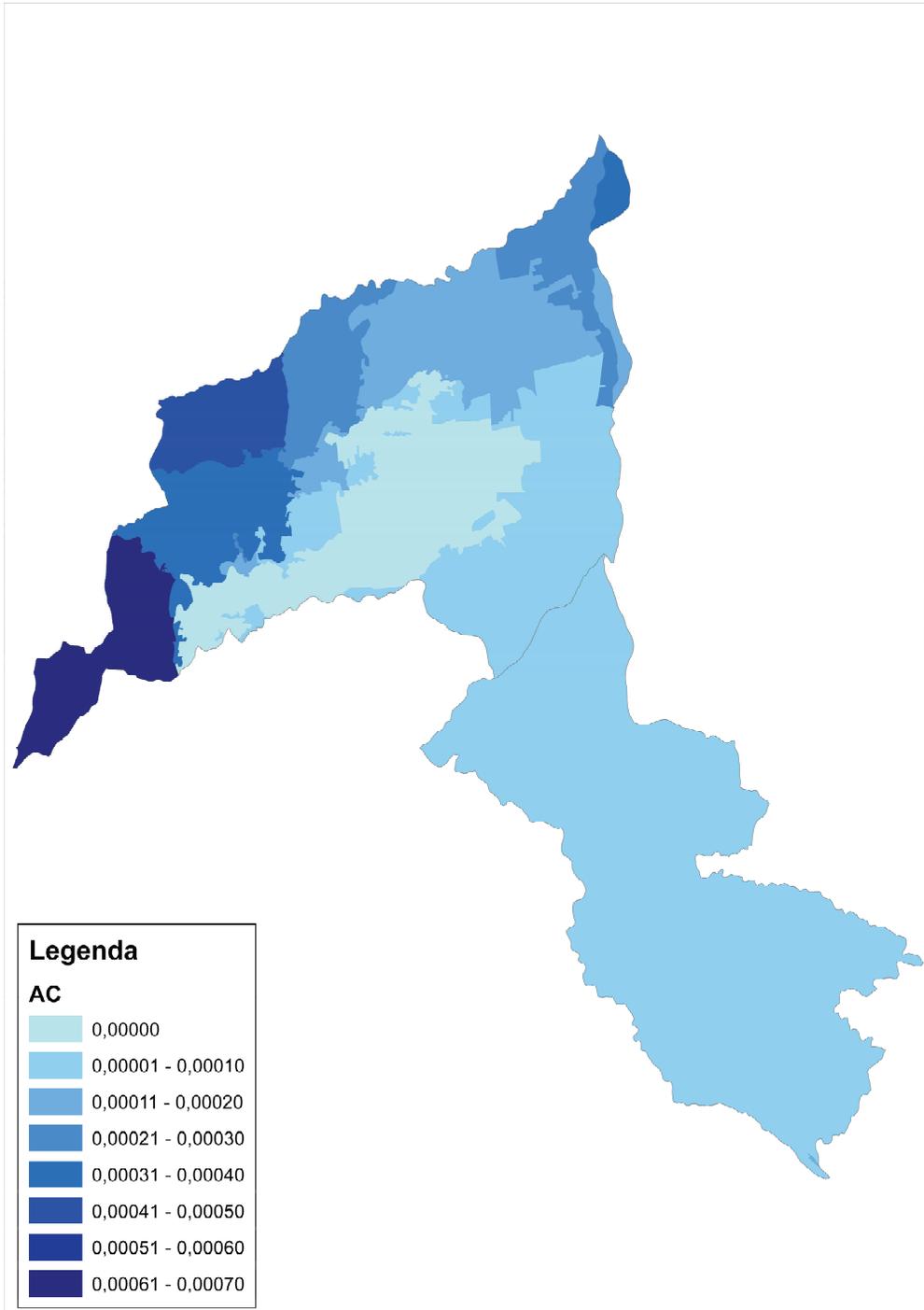


Fig. 7.13 – Superficie raster dei coefficienti della variabile AC.

7.3.3 Confronto tra il modello di regressione globale OLS e il modello di regressione locale GWR

Prima di definire e applicare il modello GWR, è stato applicato il modello di regressione globale OLS, utilizzando le stesse variabili esplicative. Il modello OLS permette di determinare gli spostamenti giornalieri effettuati dai residenti dell'area urbana per motivi di studio o lavoro e assume la seguente espressione:

$$S = \beta_0 + \beta_{SA}SA + \beta_{RO}RO + \beta_{TC}TC + \beta_{ST}ST + \beta_{AC}AC \quad (7.2)$$

dove:

- S è il numero di spostamenti giornalieri totali effettuati dalle persone residenti nell'area urbana per motivi di studio e lavoro;
- β_0 è l'intercetta;
- SA è la superficie delle abitazioni espressa in metri quadrati;
- RO è il numero di persone occupate residenti nell'area urbana;
- TC è il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo misurato in minuti sulla rete stradale reale a partire dalla sezione censuaria di residenza;
- ST è il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale misurato in minuti sulla rete stradale reale a partire dalla sezione censuaria di residenza;
- AC è l'accessibilità ai servizi della sezione censuaria di residenza in funzione del numero di posti di lavoro presenti nelle altre sezioni censuarie e la distanza da percorrere per raggiungerle;
- β_{SA} , β_{RO} , β_{TC} , β_{ST} e β_{AC} sono i coefficienti del modello.

Nella tabella 7.6 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del modello. I valori dei coefficienti rispecchiano il peso e il tipo di relazione che la variabile esplicativa ha con la variabile dipendente. I coefficienti delle variabili SA e RO hanno segno positivo. Questo significa che quando la superficie delle abitazioni o il numero di residenti occupati aumenta, il numero di spostamenti giornalieri effettuati aumenta. Il coefficiente della variabile ST ha segno negativo per cui il numero di spostamenti aumenta

quando diminuisce il tempo di viaggio per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale. Comportamento diverso presenta la variabile *TC*. Infatti, il coefficiente di questa variabile ha segno positivo per cui all'aumentare del tempo di viaggio necessario per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo aumenta anche il numero di spostamenti giornalieri effettuati. Una possibile interpretazione di questo risultato è che le persone che vivono in zone con scarsa accessibilità verso i terminal di trasporto collettivo preferiscono utilizzare la propria automobile, compiendo così un gran numero di spostamenti aventi come origine la residenza.

Tab. 7.6 - Risultati OLS

<i>Variabile</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>StdError</i>	<i>t-Statistic</i>	<i>Probabilità</i>	<i>VIF</i>
Intercetta	-5,640458	1,2167	-4,6355	0,000006 *	-
SA	0,004065	0,0003	12,9086	0,000000 *	8,663677
RO	0,950918	0,0352	26,9193	0,000000 *	8,690841
TC	1,583017	0,2682	5,9004	0,000000 *	2,202543
ST	-0,598974	0,1925	-3,1103	0,001945 *	2,328944
AC	0,000005	0,5451	0,5857	0,585780	1,004251

*Statistically significant at the 0,05 level.

Per valutare la significatività delle variabili esplicative del modello si utilizzano diversi test come *t-Statistic* e *VIF* (Variance Inflation Factor o Fattore di Inflazione della Varianza).

Il test *t-Statistic* è usato per valutare se ciascuna variabile esplicativa è statisticamente significativa. L'ipotesi nulla da rigettare è che il coefficiente è pari a zero per cui non è significativo all'interno del modello. Quando la probabilità è molto bassa, la possibilità che il coefficiente sia nullo è molto bassa. Nel caso in esame, mediante la statistica *t-Statistic*, si può affermare che, ad eccezione dell'accessibilità ai servizi *AC*, tutte le altre variabili considerate sono significative in quanto hanno probabilità di non essere significative inferiore al 5%.

Il fattore di inflazione della varianza *VIF* è un indicatore di multicollinearità e misura la ridondanza tra le variabili esplicative. Una regola generale è eliminare dal modello di regressione le variabili esplicative che presentano un valore di *VIF* superiore a 7,5. Solitamente, le variabili per cui si registrano valori di *VIF* superiori alla soglia sono variabili che si riferiscono allo stesso aspetto "quantitativo", come ad esempio la popolazione e gli

occupati. Nel caso in esame, tra le variabili esplicative, ve ne sono due, la superficie delle abitazione *SA* e il numero di residenti occupati *RO*, che presentano *VIF* più alto di 7,5 per cui una delle due variabili andrebbe eliminata dal modello.

Il modello di regressione OLS presenta in generale risultati non soddisfacenti. Inoltre, confrontato con il modello GWR presenta valori di R^2 ed R^2 modificato più bassi, quindi un minor livello di adattabilità ai dati (tabella 7.7).

Tab. 7.7 - Valutazione complessiva del modello OLS

OLS			
Number of observation	836		
Number of variables	6		
AIC	7075,1668		
Multiple R-Squared	0,9431		
Adjusted R-Squared	0,9427		
Koenker (BP) Statistic	430,2590	Prob ($>\chi^2$), (5) degrees of freedom:	0,00000*

Per valutare l'adeguatezza del modello di regressione globale OLS ai dati, è stata utilizzata la statistica *Koenker BP* (Koenker's studentized Bruesch-Pagan statistic). Questa statistica valuta la stazionarietà, cioè determina se le variabili esplicative del modello hanno una relazione consistente con la variabile dipendente. L'ipotesi nulla da rigettare è che il modello è stazionario, cioè le variabili non presentano variazioni spaziali. Per un livello di significatività del 95%, un valore di probabilità minore di 0,05 indica eteroschedasticità statisticamente significativa o non stazionarietà. I modelli di regressione che presentano non stazionarietà significativa non danno buoni risultati, per cui i dati possono essere utilizzati per sviluppare un modello di regressione GWR. Nel caso in esame, il risultato della statistica *Koenker BP* è statisticamente significativo per cui l'ipotesi di modello stazionario può essere rigettata. Le variabili presentano variazioni spaziali per cui devono essere utilizzate all'interno di un modello di regressione locale GWR.

In base a questa analisi, il modello OLS non è adatto per studiare e modellare il fenomeno oggetto di studio per cui si è scelto di applicare il modello GWR illustrato nei sottoparagrafi precedenti.

Un altro criterio utilizzato per determinare il modello migliore tra OLS e GWR è il "Test di Verifica delle Informazioni di Akaike", indicato più

comunemente con l'acronimo AIC (Akaike Information Criterion), che permette di individuare tra diversi modelli quale sia il migliore. In base a questo criterio, il modello che presenta il più basso valore di AIC è il modello si adatta meglio ai dati osservati. Confrontando il valore di AIC del modello GWR (pari a 6885,8019) e quello del modello OLS (pari a 7075,1668) si può affermare che il modello di regressione locale è più adatto per stimare il numero di spostamenti giornalieri sistematici in funzione delle variabili esplicative scelte.

7.4 Applicazione della tecnica di modellazione SEM

7.4.1 Studio e definizione del modello

Il modello SEM proposto è stato elaborato sulla base dei dati riferiti alle sezioni censuarie in cui è stata suddivisa l'area urbana. Il modello presenta cinque variabili latenti, di cui quattro esogene e una endogena, spiegate complessivamente da 19 indicatori (figura 7.14).

La variabile latente endogena, denominata "Comportamento di viaggio", si riferisce al comportamento di viaggio della popolazione residente nell'area urbana in relazione agli spostamenti sistematici. Questa variabile è definita mediante il modello di misura per la variabile endogena dal contributo di due indicatori, gli spostamenti sistematici giornalieri interni e gli spostamenti sistematici giornalieri esterni.

Le variabili latenti esogene sono: "Caratteristiche socio-demografiche", "Caratteristiche economiche", "Land Use" e "Accessibilità". Ciascuna variabile è definita mediante il modello di misura per le variabili esogene.

La variabile riferita alle caratteristiche socio-demografiche è il risultato del contributo di sei variabili osservate direttamente, quali la densità (misurata in abitanti per ettometro quadrato), il numero medio di componenti per famiglia, la popolazione attiva, il sesso, lo stato civile e il livello di istruzione.

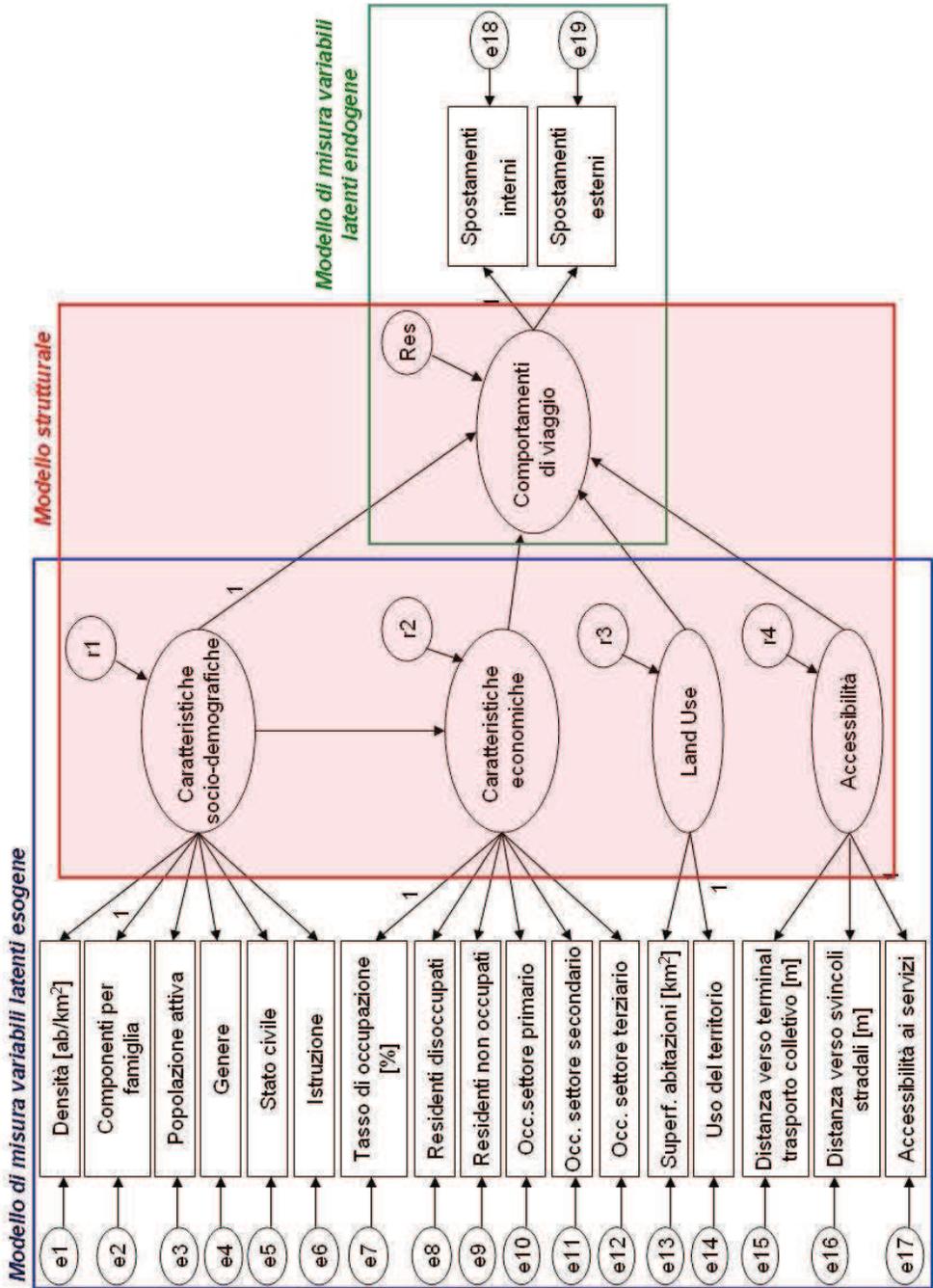


Fig. 7.14 – Struttura del modello SEM proposto.

La variabile “Caratteristiche economiche” è stimata in funzione di variabili riguardanti gli aspetti economici dell’area urbana, quali il tasso di occupazione, il numero di persone residenti disoccupate, il numero di persone residenti che non lavorano (come pensionati, casalinghe, ecc.), gli occupati nel settore primario (agricoltura), gli occupati nel settore secondario (industria) e gli occupati nel settore terziario (servizi).

La variabile “Land Use” si riferisce agli aspetti relativi all’uso del territorio, per cui è rappresentata da due indicatori, la superficie delle abitazioni (misurata in chilometri quadrati) e l’uso del territorio urbano, suddiviso in zone rurali, zone industriali e zone urbanizzate.

Infine, la variabile “Accessibilità” è definita dalla distanza in metri da percorrere per raggiungere il terminal di trasporto collettivo più vicino, dalla distanza in metri da percorrere per raggiungere lo svincolo stradale o autostradale più vicino e dall’accessibilità ai servizi, variabile direttamente proporzionale ai posti di lavoro di ciascuna sezione censuaria e inversamente proporzionale alla distanza da percorrere per raggiungerla.

Le prime due variabili latenti esogene sono state ricavate a partire dai dati del Censimento della popolazione del 2001, mentre le altre sono state definite a partire da variabili prettamente spaziali elaborate e quantificate utilizzando il GIS.

In base al modello strutturale, la variabile latente endogena è determinata in funzione delle quattro variabili latenti esogene. Inoltre, tra le variabili latenti esogene, la variabile “Caratteristiche socio-demografiche” influenza la variabile “Caratteristiche socio-economiche”.

7.4.2 Calibrazione del modello e analisi dei risultati

Il modello è stato calibrato utilizzando il software AMOS 4.0 della SmallWaters Corporation (Arbuckle & Wothke, 1995). Per stimare il modello, è stato assegnato un peso pari a 1 ad uno degli indicatori relativi a ciascuna variabile latente.

I risultati ottenuti dall’applicazione del modello SEM proposto sono stati sintetizzati nella tabella 7.8. Nelle prime due colonne sono riportate le variabili del modello indicando la relazione che intercorre tra di esse. La terza colonna mostra i coefficienti del modello (indicati con l’abbreviazione

“Coeff.”); la quarta colonna contiene i valori dell'errore standard (S.E.) e la quinta colonna il livello di probabilità (P) che il coefficiente stimato sia significativamente diverso da zero. Infine, nell'ultima colonna sono riportati i valori dei coefficienti standardizzati, indicati con “Coeff. St.”.

Tab. 7.8 - Risultati del modello SEM (modello strutturale).

		Coeff.	S.E.	P	Coeff. St.
<i>Variabile latente endogena</i>		<i>Variabile latente esogena</i>			
Comportamento di viaggio (η_1)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	1,000	-	-	0,019
Comportamento di viaggio (η_1)	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	14,641	1,799	0,000	0,964
Comportamento di viaggio (η_1)	← Land use (ξ_3)	142,359	31,559	0,000	0,231
Comportamento di viaggio (η_1)	← Accessibilità (ξ_4)	-0,001	0,000	0,007	-0,025
<i>Variabile latente esogena</i>		<i>Variabile latente esogena</i>			
Caratteristiche economiche (ξ_2)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	0,969	0,257	0,000	0,274
<i>Variabile osservata esogena</i>		<i>Variabile latente esogena</i>			
Densità [ab/hmq] (x_1)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	9,192	4,314	0,033	0,072
Componenti per famiglia (x_2)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	1,000	-	-	1,125
Popolazione attiva (x_3)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	0,008	0,004	0,060*	0,062
Genere (x_4)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	0,087	0,022	0,000	0,195
Stato civile (x_5)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	-0,099	0,025	0,000	-0,199
Istruzione (x_6)	← Caratt. socio-demografiche (ξ_1)	-0,133	0,031	0,000	-0,263
Tasso di occupazione [%] (x_7)	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	1,000	-	-	0,274
Persone residenti disoccupate (x_8)	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	1,608	0,204	0,000	0,747
Persone residenti non occupate (x_9)	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	13,698	1,691	0,000	0,930
Occupati nel settore primario (x_{10})	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	0,194	0,027	0,000	0,500
Occupati nel settore secondario (x_{11})	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	1,679	0,209	0,000	0,864
Occupati nel settore terziario (x_{12})	← Caratteristiche economiche (ξ_2)	11,326	1,396	0,000	0,946
Superficie abitazioni [km ²] (x_{13})	← Land use (ξ_3)	0,056	0,014	0,000	0,780
Uso del territorio (x_{14})	← Land use (ξ_3)	1,000	-	-	0,201
Distanza verso il terminal di trasporto collettivo più vicino [m] (x_{15})	← Accessibilità (ξ_4)	-1,729	0,780	0,027	-1,241
Distanza verso lo svincolo stradale più vicino [m] (x_{16})	← Accessibilità (ξ_4)	-1,134	0,360	0,002	-0,744
Accessibilità ai servizi (x_{17})	← Accessibilità (ξ_4)	1,000	-	-	0,077
<i>Variabile osservata endogena</i>		<i>Variabile latente endogena</i>			
Spostamenti interni (y_1)	← Comportamento di viaggio (η_1)	1,000	-	-	0,994
Spostamenti esterni (y_2)	← Comportamento di viaggio (η_1)	0,126	0,002	0,000	0,921

*non statisticamente significativo al 5%

Dall'analisi dei risultati si osserva che ciascun coefficiente presenta segno corretto e un valore statisticamente differente da zero ad un buon livello di significatività. Solo un parametro (la variabile osservata "Popolazione attiva") presenta un coefficiente meno significativo rispetto agli altri (livello di significatività del 6,0%).

Il valore minimo della funzione di discrepanza ottenuto è pari a 4678, un valore statisticamente significativo in base al test chi-quadro. Questo test statistico valuta l'adeguatezza globale del modello ma è fortemente sensibile alle dimensioni del campione e alla condizione di non-normalità nella distribuzione delle variabili di input. Di conseguenza, per valutare l'adeguatezza del modello ai dati si fa riferimento anche ad altri test statistici di significatività. Ad esempio, sono stati determinati l'indice GFI (Goodness-of-fit Index) pari a 0,647, l'indice AGFI (Adjusted Goodness-of-fit Index) pari a 0,547 e l'indice CFI (Comparative Fit Index) pari a 0,667. I risultati di questi test appaiono abbastanza soddisfacenti. Altri testi di riferimento utilizzati sono RMSA (Root Mean Square Error of Approximation) e RMSA calcolato al limite superiore e inferiore dell'intervallo di confidenza. I valori ottenuti per questi indici sono bassi e possono ritenersi soddisfacenti. In particolare, RMSA ha assunto il valore 0,191, RMSA al limite superiore è pari a 0,196 e al limite inferiore vale 0,187.

In base ai risultati ottenuti, è possibile individuare l'indicatore che ha maggiore impatto sulla variabile latente a cui si riferisce. Nel caso della variabile "Caratteristiche socio-demografiche", l'indicatore "Componenti per famiglia" ha un peso standardizzato pari a 1,125 maggiore rispetto ai coefficienti mostrati dalle altre variabili osservate. Allo stesso modo, "Occupati nel settore terziario" è la variabile osservata che ha il maggiore impatto (0,946) sulla seconda variabile latente esogena, "Caratteristiche economiche", anche se il peso dell'indicatore "Persone residenti non occupate" è comunque rilevante. La variabile "Land Use" è nettamente influenzata dall'indicatore "Superficie delle abitazioni", che ha coefficiente standardizzato pari a 0,780. Infine, "Distanza al più vicino terminal di trasporto collettivo" ha la maggiore influenza (-1,241) sulla quarta variabile latente esogena "Accessibilità". Il segno negativo di questo indicatore indica che la variabile "Accessibilità" diminuisce quando aumenta la distanza da

percorrere per raggiungere il più vicino terminal autobus o la più vicina stazione ferroviaria.

La variabile latente endogena è spiegata in modo rilevante dall'indicatore "Spostamenti interni" (0,994), anche se il peso di "Spostamenti esterni" è considerevole.

Allo stesso modo è possibile individuare la variabile latente esogena che ha il maggiore impatto sulla variabile latente endogena. In questo caso, tra le variabili esogene, "Caratteristiche economiche" è quella che ha il peso maggiore (0,964) sulla variabile endogena. Anche "Land Use" ha una forte influenza sulla variabile relativa ai comportamenti di viaggio dei residenti, mentre è poco rilevante l'impatto della variabile "Caratteristiche socio-demografiche". Il caso della variabile "Accessibilità" è differente perché questa variabile ha segno negativo per cui ha anche effetto negativo sulla variabile latente endogena.

Un aspetto importante dell'analisi effettuata mediante le tecniche di modellazione SEM è l'individuazione degli eventuali effetti indiretti dovuti alle relazioni esistenti tra le variabili latenti esogene. Infatti, considerando gli effetti indiretti è possibile ottenere risultati diversi rispetto a quelli ottenuti a partire dall'analisi dei soli effetti diretti. Nel caso in esame, sono presenti effetti indiretti dovuti alla relazione esistente tra le variabili latenti "Caratteristiche socio-demografiche" e "Caratteristiche economiche". Infatti, la variabile relativa ai dati socio-demografici influenza la variabile "Caratteristiche economiche" e, tramite questa, presenta effetti indiretti sulla variabile endogena "Comportamenti di viaggio" (tabella 7.9).

Tab. 7.9 - Effetti totali delle variabili esogene sulla variabile "Comportamento di viaggio".

	Effetti diretti	Effetti indiretti	Effetti totali
Caratteristiche socio-demografiche	0.019	0.264	0.283
Caratteristiche economiche	0.964	-	0.964
Land use	0.231	-	0.231
Accessibilità	-0.025	-	-0.025

Calcolando gli effetti totali come somma degli effetti diretti e di quelli indiretti, si possono fare osservazioni differenti da quelle effettuate precedentemente in seguito all'analisi degli effetti diretti ottenuti dal modello. Infatti, osservando i risultati riportati nella tabella 7.9, si deduce che in termini

di effetti totali il peso della variabile “Caratteristiche socio-demografiche” risulta maggiore, anche se la variabile “Caratteristiche economiche” resta quella che ha il maggiore impatto sulla variabile latente endogena.

In questi casi, l’analisi degli effetti totali tra le variabili latenti porta a risultati più conformi alle caratteristiche del fenomeno analizzato.

CAPITOLO 8

VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DEL SISTEMA DEI TRASPORTI SUL SISTEMA TERRITORIALE

8.1 Generalità

Dall'analisi della letteratura riguardante le interazioni trasporti-territorio è emerso che i cambiamenti che avvengono nel sistema dei trasporti, come la costruzione di una nuova infrastruttura, l'ammodernamento di un'infrastruttura esistente o semplicemente la riorganizzazione della circolazione veicolare, possono influenzare e cambiare in maniera più o meno rilevante l'assetto del sistema territoriale.

Lo studio dell'influenza del sistema dei trasporti sul sistema territoriale risulta molto più complesso rispetto allo studio dell'influenza nel verso opposto. Infatti, i cambiamenti del territorio nella sua complessità non dipendono solo da modifiche avvenute nell'assetto del sistema dei trasporti ma anche da fattori come l'andamento dell'economia, del mercato immobiliare e fondiario, i cambiamenti dello stile di vita della popolazione. Questi sono tutti aspetti difficili da isolare e quantificare. Inoltre, il sistema territoriale modifica il suo assetto molto lentamente per cui risulta difficile elaborare un modello che permetta di ipotizzare scenari di previsione così a lungo termine.

L'analisi dell'impatto delle variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale sarà condotta considerando un caso pratico, cioè valutando gli effetti che si sono avuti sul territorio in seguito alla realizzazione di una nuova infrastruttura viaria all'interno dell'area urbana Cosenza-Rende.

L'approccio seguito non sarà di tipo modellistico ma quantitativo. Infatti, si procederà in primo luogo alla delimitazione dell'area di influenza della nuova infrastruttura e, successivamente, saranno rilevate le variazioni delle variabili territoriali registrate in questa area nell'arco di tempo intercorso tra l'anno in cui è iniziata la costruzione della strada e l'anno in cui la strada è stata ultimata. In particolare, saranno studiati gli effetti provocati dalla nuova infrastruttura sul territorio urbano, approfondendo gli aspetti che riguardano la localizzazione delle residenze e delle attività produttive.

8.2 Delimitazione dell'area di influenza

L'infrastruttura di recente costruzione di cui si vogliono determinare gli effetti sul territorio è comunemente indicata con il nome di "Viale Parco".

La realizzazione di questa opera, prevista dalla Variante al PRG di Cosenza, è iniziata alla fine degli anni '90. Nel progetto iniziale, alla nuova infrastruttura era assegnata la funzione strategica di elemento di congiunzione tra i quartieri dirigenziali del centro cittadino e quelli di edilizia popolare situati in periferia. L'infrastruttura si sviluppa sul tracciato dell'ex rilevato ferroviario per una lunghezza di circa 3,2 km, collegando la zona della stazione "Cosenza Centro" con la zona residenziale posta in prossimità del confine con Rende. Successivamente, per rafforzare i legami tra Cosenza e Rende nella formazione di un'unica area urbana, è stata prevista e realizzata un'infrastruttura di simili caratteristiche anche nel territorio di Rende. L'obiettivo ultimo dell'intero intervento è realizzare un'unica infrastruttura che colleghi il centro di Cosenza con il Campus universitario attraversando l'intera area urbana di Cosenza e Rende.

Attualmente, l'infrastruttura si presenta in tre tronchi separati. Il primo è localizzato nel territorio di Cosenza e prende il nome di "Viale Giacomo Mancini", mentre gli altri due ricadono nel territorio di Rende. Il primo di questi è denominato "Viale Francesco e Carolina Principe" e collega la zona al confine con Cosenza al quartiere Quattromiglia, mentre l'altro tronco è

posto nella zona più a nord del comune e si estende dal quartiere Quattromiglia fino al confine con Montalto Uffugo.

Ai fini dell'analisi, saranno considerati i tre tronchi di "Viale Parco" collegati tra loro mediante la viabilità ordinaria esistente in modo tale da costituire un'unica infrastruttura (figura 8.1).

Per determinare gli effetti che la nuova infrastruttura dopo la sua ultimazione ha indotto sul sistema territoriale, è stata definita un'area di influenza, cioè un'area in cui si ipotizza che possano manifestarsi i cambiamenti indotti dal diverso assetto del sistema dei trasporti.

L'area di influenza è stata identificata utilizzando il GIS relativo all'area urbana e sfruttando la suddivisione in sezioni censuarie operata dall'ISTAT nel "14° Censimento della popolazione e delle abitazioni" (ISTAT, 2001a). Si è ipotizzato che gli effetti della presenza dell'infrastruttura si possano avvertire nel sistema territoriale in un raggio di 500 m. Di conseguenza, mediante il GIS sono state tracciate delle circonferenze di raggio di 500 m in ciascun punto dell'asse stradale. Le sezioni censuarie investite da queste circonferenze costituiscono l'area di influenza.

In totale, l'area di influenza delimitata copre circa 26 km² di superficie ed è costituita di 446 sezioni censuarie. La maggior parte delle sezioni censuarie (353) appartiene al comune di Cosenza, ma l'area di influenza appartenente al comune di Rende (20,3 km²) è più estesa rispetto a quella del comune di Cosenza (5,9 km²). Ciò si spiega considerando che le sezioni censuarie in cui è diviso il territorio di Cosenza sono molto piccole a differenza di quelle del territorio di Rende che coprono vaste superfici.

L'area di Cosenza attraversata dall'infrastruttura era già in parte urbanizzata prima della realizzazione dell'opera. Diverso è il caso di Rende, dove l'infrastruttura è stata realizzata in un'area di espansione urbana ma che presentava ancora caratteristiche rurali.

A partire dall'apertura dei primi lotti di "Viale Parco" nel 1998, tutta l'area ha iniziato a manifestare cambiamenti sempre più marcati nel corso di dieci anni. I cambiamenti, ampiamente visibili sul territorio, riguardano soprattutto la destinazione d'uso delle zone, la superficie occupata da edifici e la popolazione residente. Utilizzando il GIS è possibile ricostruire la variazione della popolazione e della superficie occupata da costruzioni sia nell'area di intervento sia nell'area urbana.

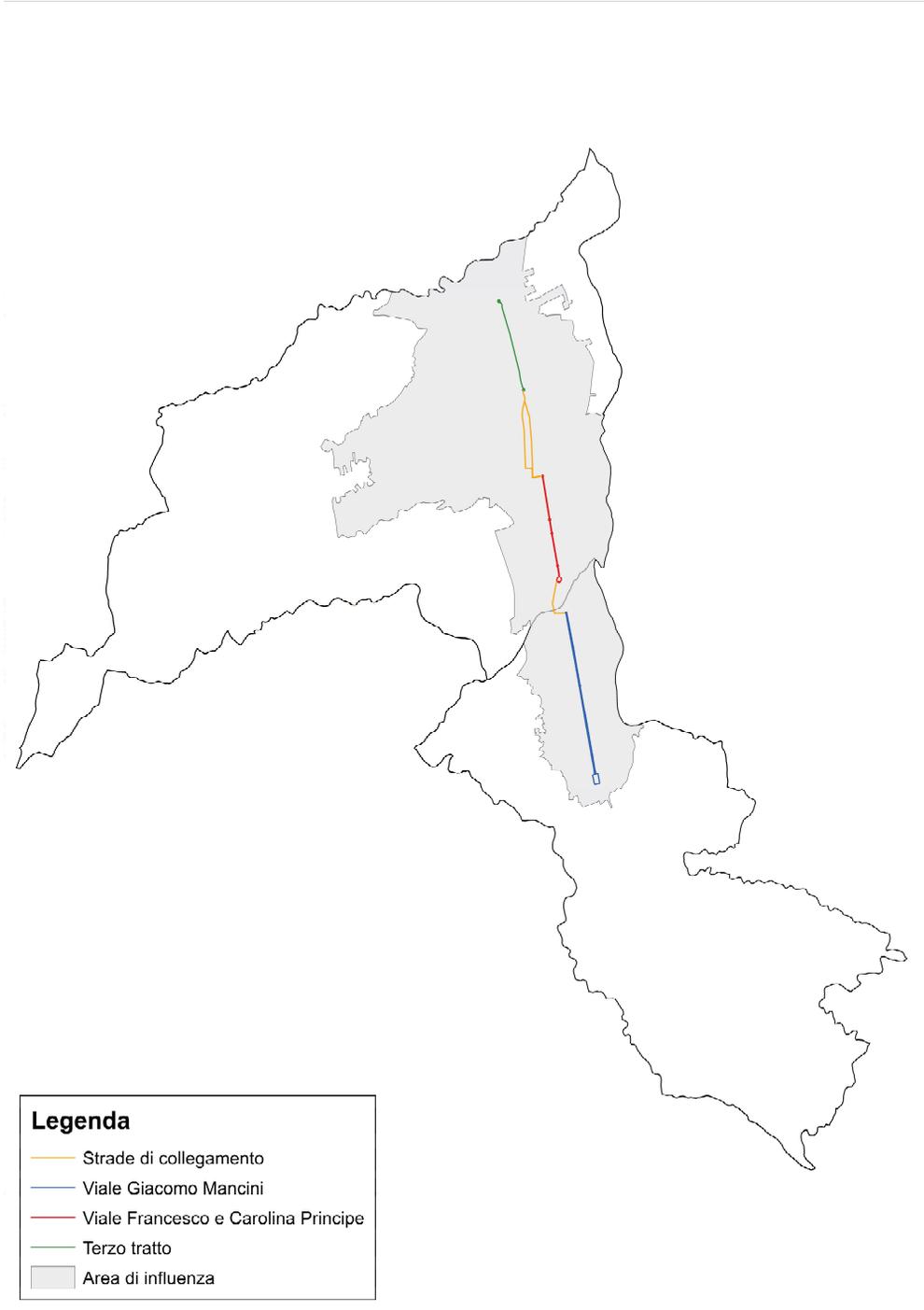


Fig. 8.1 – Area di influenza della nuova infrastruttura.

8.3 Analisi dei cambiamenti avvenuti nel sistema territoriale

8.3.1 Variazione della superficie edificata

L'analisi della variazione dell'estensione della superficie edificata è stata condotta confrontando l'ammontare di superficie edificata prima e dopo la realizzazione dell'infrastruttura. Utilizzando il GIS, sono stati elaborati i dati presenti nelle cartografie dell'area urbana relative all'anno 1998 (prima della realizzazione dell'opera) e all'anno 2008 (dopo il completamento e l'apertura al traffico di buona parte del Viale).

Per comodità di trattazione, le tipologie di edifici presenti nella cartografia tecnica sono state semplificate in tre gruppi: edifici residenziali, edifici industriali e altri edifici (questa categoria comprende edifici non destinati ad uso residenziale, quali ruderi, baracche e tettoie). Intersecando la cartografia con il layer relativo all'area urbana suddivisa in sezioni censuarie, è stato determinato il valore di superficie edificata secondo ciascuna tipologia per sezione censuaria. Noti i valori della superficie coperta dagli edifici per sezione censuaria nei due anni di riferimento, sono state determinate le variazioni registrate nell'arco dei dieci anni di riferimento sia nell'area di influenza dell'infrastruttura sia nell'intera area urbana Cosenza-Rende.

I risultati ottenuti dall'analisi della superficie occupata dalla tipologia edifici residenziali (tabella 8.1) mostrano che nell'area di influenza si è registrato un incremento di superficie edificata ad uso residenziale pari al 43% del valore iniziale. L'incremento maggiore si è avuto nell'area di influenza appartenente al comune di Rende (53%), mentre l'aumento di superficie nell'area di influenza di Cosenza raggiunge il 35%.

Tab. 8.1 – *Analisi della superficie occupata da edifici residenziali.*

	Superficie occupata da edifici residenziali anno 1998 [m ²]	Superficie occupata da edifici residenziali anno 2008 [m ²]	Δ superficie occupata da edifici residenziali [m ²]
Area di influenza	1.406.655	2.013.242	606.586
Area di influenza Cosenza	786.479	1.061.903	275.424
Area di influenza Rende	620.176	951.338	331.162
Area urbana	2.668.176	3.427.223	759.047
Cosenza	1.524.433	1.836.561	312.128
Rende	1.143.742	1.590.662	446.920

Confrontando le figure 8.2 e 8.3 relative all'area di influenza, si possono individuare le zone in cui l'aumento di superficie occupata dagli edifici residenziali è stato più rilevante. Nella zona posta più a sud i valori restano pressoché costanti. L'aumento della superficie destinata ad uso residenziale è concentrato soprattutto nella zona di Rende.

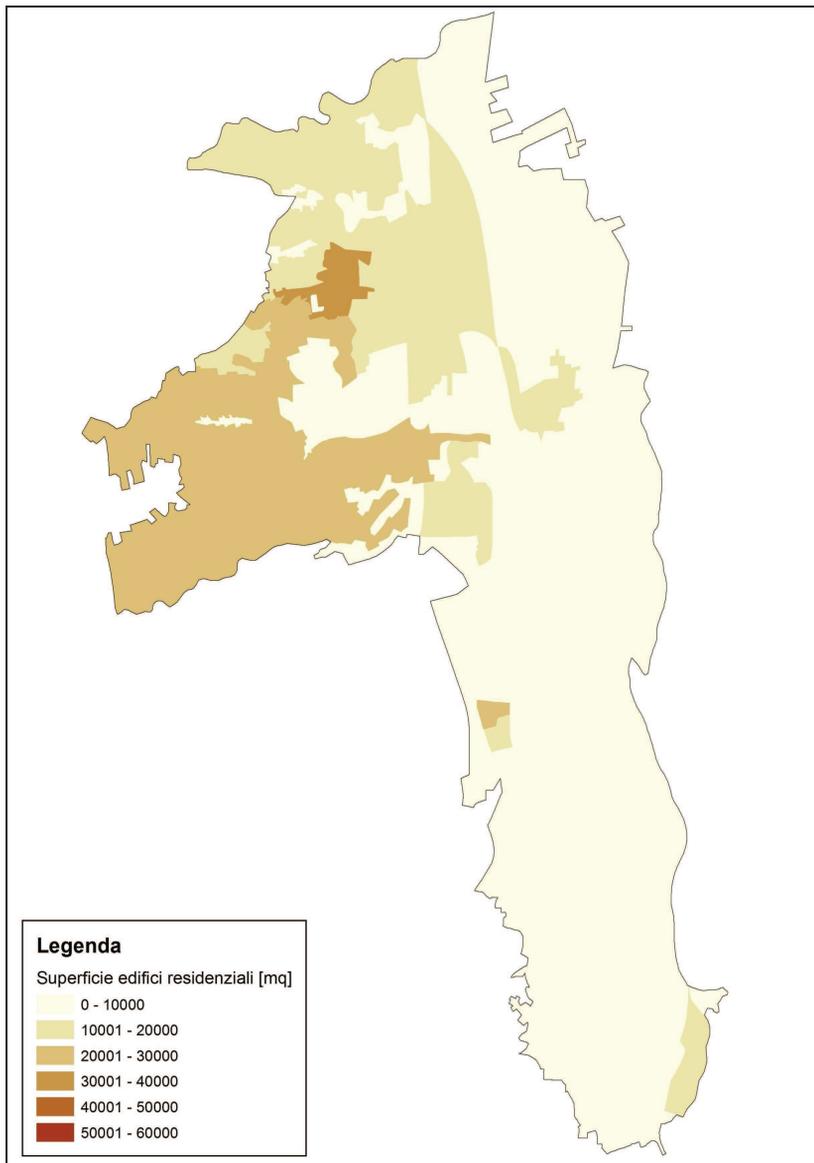


Fig. 8.2 – Superficie occupata dagli edifici residenziali nel 1998.

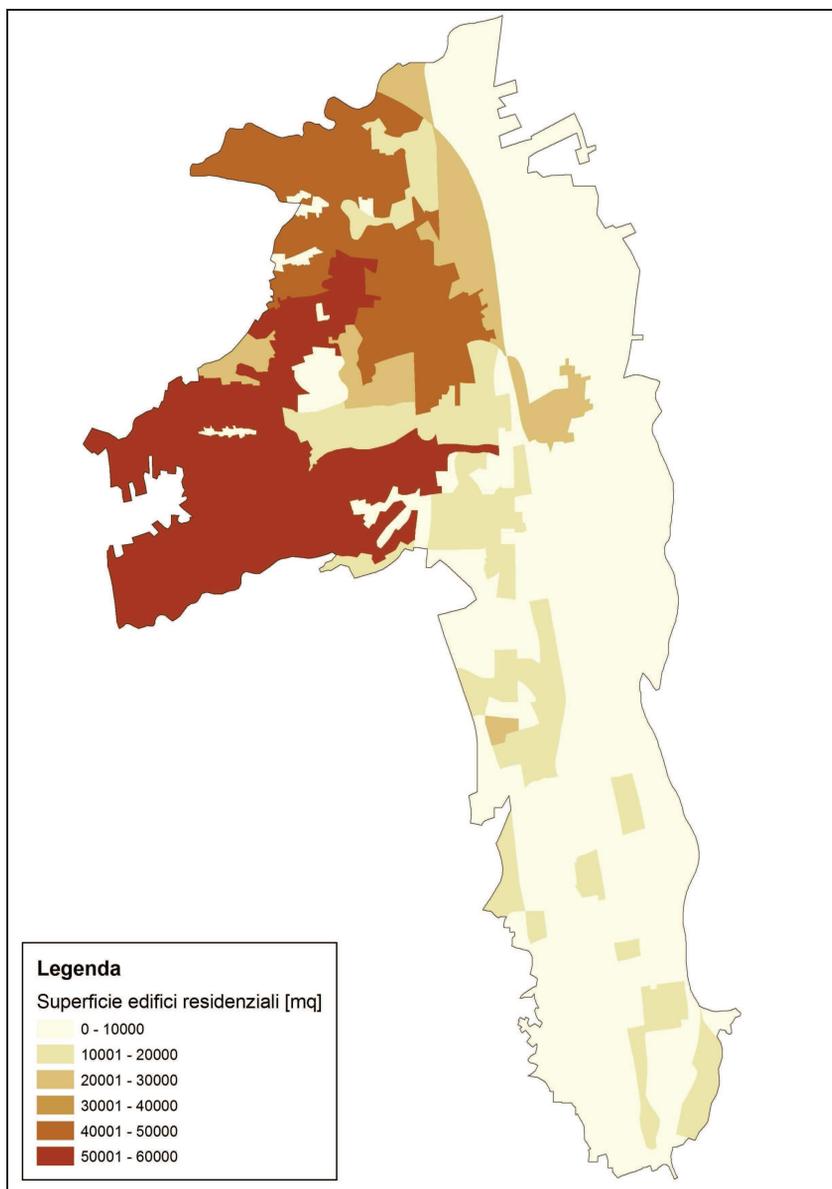


Fig. 8.3 – Superficie occupata dagli edifici residenziali nel 2008.

L'incremento di superficie edificata a uso residenziale registrato nell'intera area urbana è pari al 28%. Anche a questo livello, l'aumento maggiore si è avuto nel territorio di Rende pari al 39% a fronte di un aumento pari al 20% di Cosenza.

Questi dati mostrano un comportamento diverso tra l'area di influenza e l'area urbana. L'area di influenza mostra, infatti, un notevole aumento della superficie occupata dagli edifici residenziali. Una possibile spiegazione di questo fenomeno è da ricercarsi nell'impatto esercitato dalla nuova infrastruttura sul territorio. Infatti, la costruzione della strada ha comportato modifiche dell'accessibilità della zona che è diventata più attrattiva per la localizzazione delle residenze.

Risultati molto differenti sono stati ottenuti dall'analisi delle variazioni subite dalla superficie occupata dagli edifici industriali (tabella 8.2). Per questa tipologia si registra una riduzione della superficie occupata sia a livello dell'area di influenza sia a livello dell'area urbana. La diminuzione di area destinata ad edifici industriali è più evidente nell'area urbana (-11%) e meno forte nell'area di influenza (-3%).

Tab. 8.2 – *Analisi della superficie occupata da edifici industriali.*

	Superficie occupata da edifici industriali anno 1998 [m ²]	Superficie occupata da edifici industriali anno 2008 [m ²]	Δ superficie occupata da edifici industriali [m ²]
Area di influenza	400.189	386.116	-14.073
Area di influenza Cosenza	141.450	125.618	-15.832
Area di influenza Rende	296.889	260.498	1.759
Area urbana	558.668	494.085	-63.956
Cosenza	221.759	197.902	-23.857
Rende	336.909	296.810	-40.099

Le figure 8.4 e 8.5 mostrano che la diminuzione di superficie occupata da edifici industriali è localizzata soprattutto nelle immediate vicinanze dell'infrastruttura. Questo è dovuto al cambiamento di destinazione d'uso della zona. Inizialmente, l'area era attraversata dalla linea ferroviaria e risultava attrattiva per la localizzazione di impianti e capannoni industriali. Dopo che il tracciato ferroviario è stato dismesso e la nuova strada è stata costruita, la zona è diventata attrattiva per la localizzazione delle abitazioni. Di conseguenza, gli edifici industriali sono stati dislocati nelle aree appositamente predisposte a questo uso dagli strumenti urbanistici vigenti. Nella figura 8.5 si nota un modesto aumento della superficie degli edifici industriali nella zona posta a nord ovest dell'area di influenza. Questa zona, infatti, corrisponde alla zona industriale di contrada Cutura di Rende. La zona

posta a nord-est che presenta i valori più alti di superficie occupata da edifici industriali sia nel 1998 sia nel 2008, corrisponde alla zona industriale di contrada Lecco di Rende.

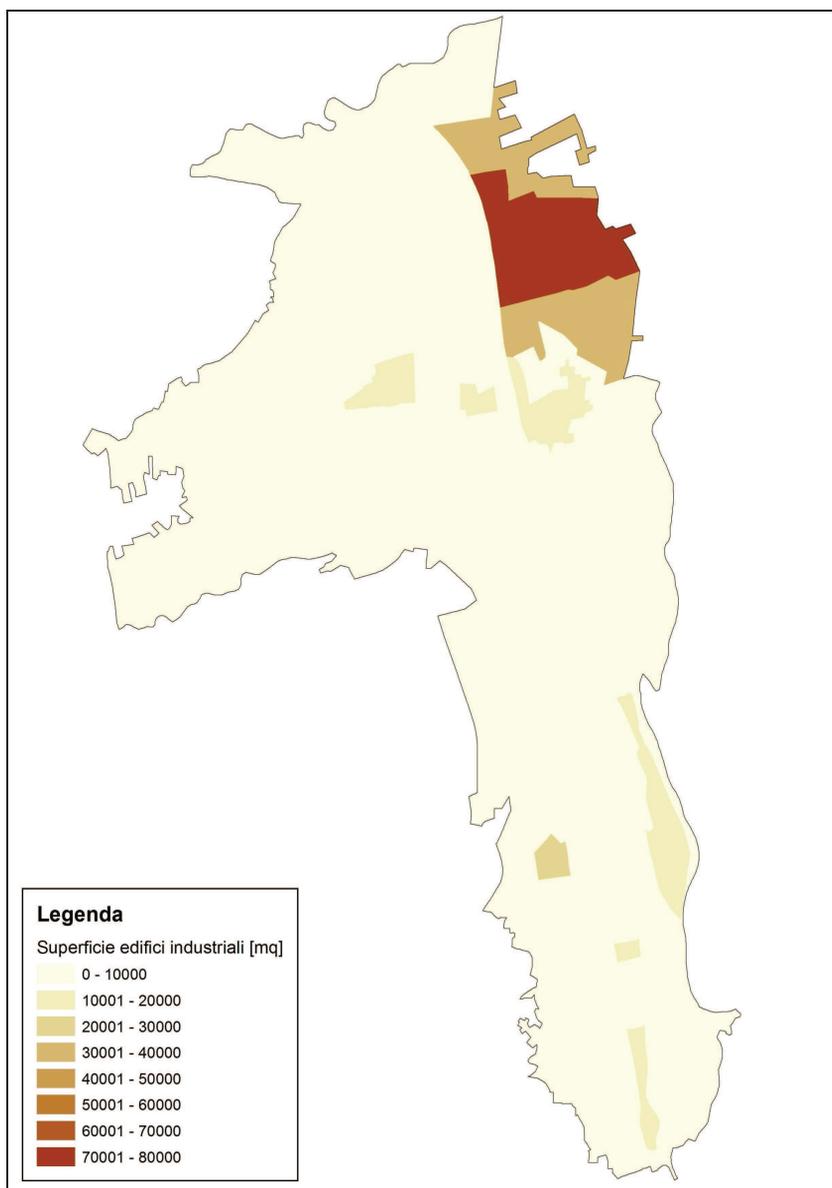


Fig. 8.4 – Superficie occupata dagli edifici industriali nel 1998.

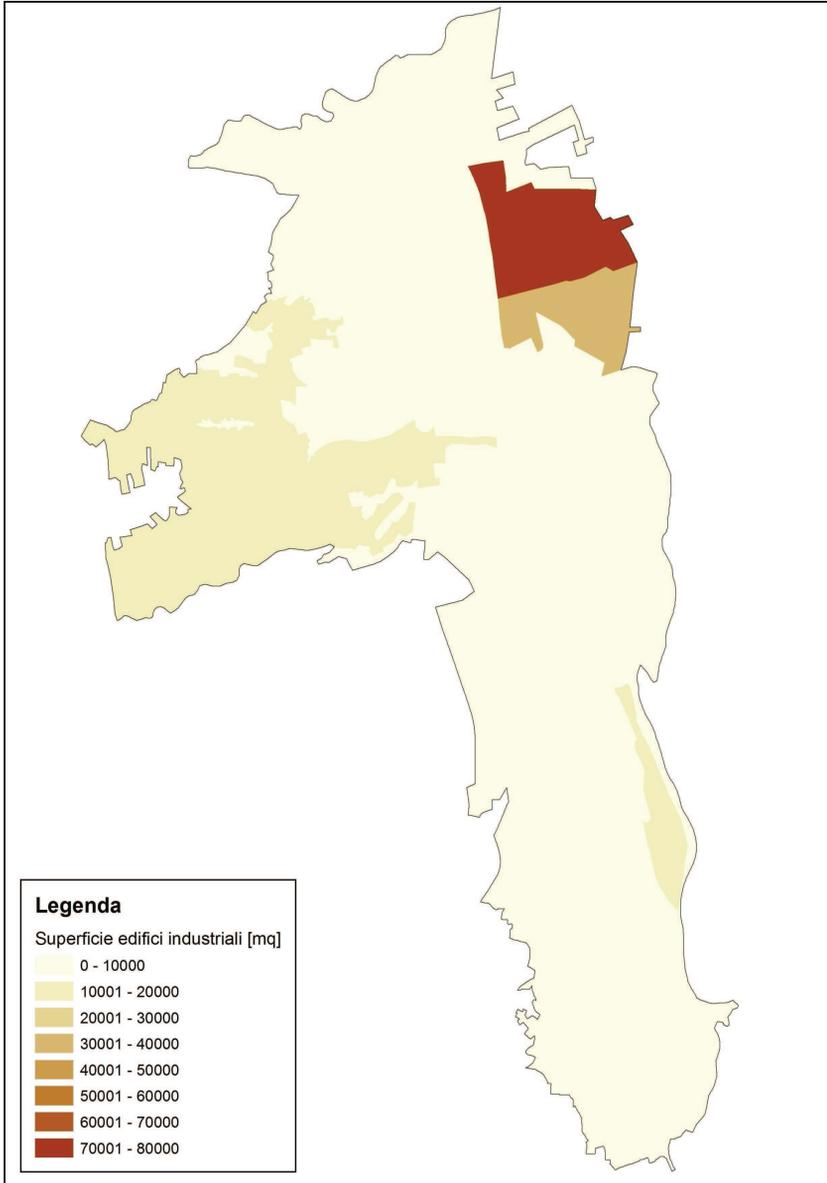


Fig. 8.5 – Superficie occupata dagli edifici industriali nel 2008.

Una categoria particolare di edifici è quella denominata “altri edifici” che contiene diverse tipologie di costruzioni, come baracche, ruderi, depositi di campagna, non adatte ad uso residenziale o commerciale e industriale. Osservando i risultati ottenuti (tabella 8.3), si vede che in tutta l’area urbana si è verificata la diminuzione della superficie occupata da questi edifici. Nel

dettaglio, la percentuale di decremento è maggiore per l'area di influenza (-8%) rispetto a quella registrata nell'area urbana (-7%). In particolare, la variazione più importante si ha nell'area di influenza di Rende, dove la diminuzione raggiunge il 10%.

Tab. 8.3 – *Analisi della superficie occupata da altri edifici.*

	Superficie occupata da altri edifici anno 1998 [m ²]	Superficie occupata da altri edifici anno 2008 [m ²]	Δ superficie occupata da altri edifici [m ²]
Area di influenza	160.586	146.909	-13.676
Area di influenza Cosenza	63.445	59.650	-3.795
Area di influenza Rende	97.141	87.260	-9.881
Area urbana	318.110	294.085	-24.025
Cosenza	160.091	134.002	-26.089
Rende	158.018	115.082	-42.9936

Le figure 8.6 e 8.7 confermano la diminuzione di superficie occupata da altri edifici nell'area di influenza. Questa diminuzione è localizzata soprattutto in corrispondenza del tracciato stradale. Infatti, per far posto all'infrastruttura, sono state demolite le costruzioni ormai in rovina appartenenti al passato rurale del territorio e le costruzioni, come capannoni e depositi, che facevano parte del complesso costituente l'infrastruttura ferroviaria dismessa.

Dopo aver analizzato separatamente le tre tipologie di edifici definite, è stata valutata la variazione di superficie occupata dagli edifici totali (tabella 8.4). Anche questi risultati confermano l'aumento di superficie edificata tra i due anni di osservazione.

Tab. 8.4 – *Analisi superficie occupata da edifici.*

	Superficie occupata da edifici anno 1998 [m ²]	Superficie occupata da edifici anno 2008 [m ²]	Δ superficie occupata da edifici [m ²]
Area di influenza	1.967.430	2.546.267	578.837
Area di influenza Cosenza	991.374	1.247.171	255.797
Area di influenza Rende	976.056	1.299.096	323.040
Area urbana	3.544.953	4.171.019	626.066
Cosenza	1.906.284	2.194.554	288.270
Rende	1.638.669	2.002.554	363.885

In particolare, si è registrato un aumento del 29% della superficie coperta nell'area di influenza, più concentrato nel comune di Rende (33%).

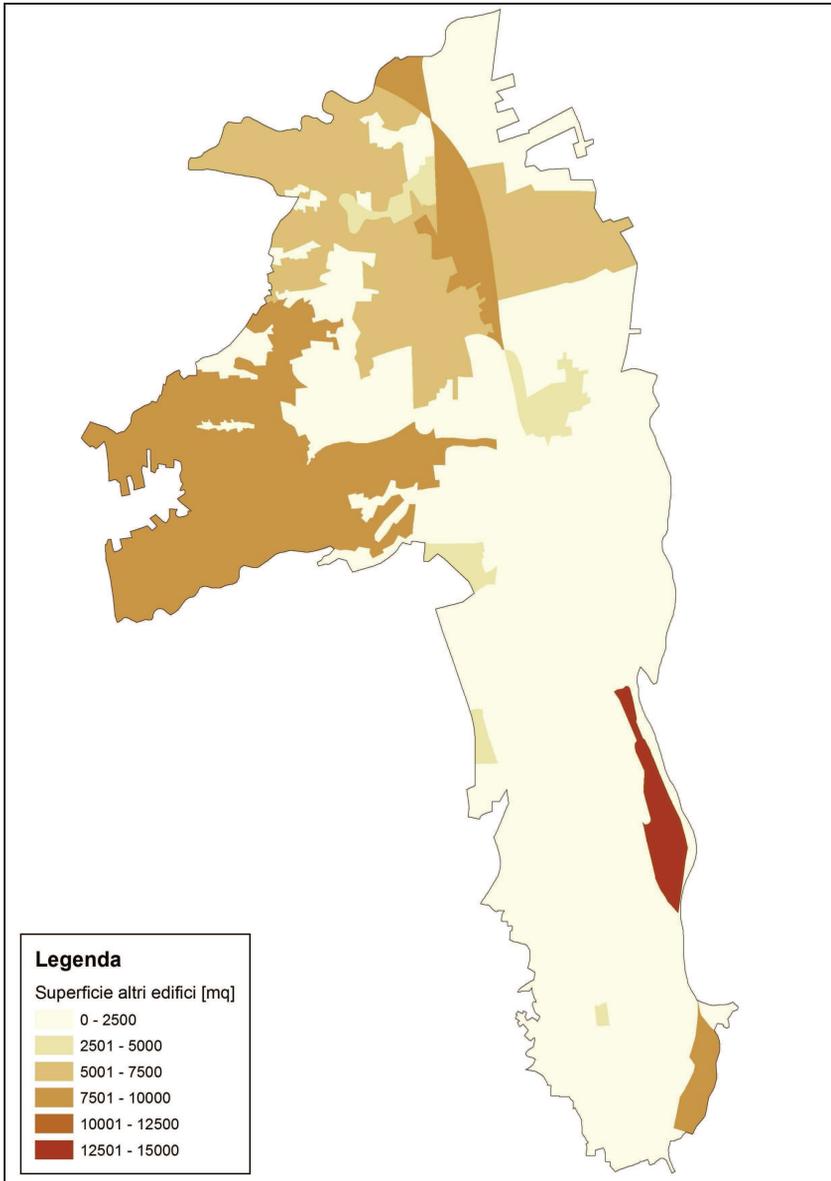


Fig. 8.6 – Superficie occupata da altri edifici nel 1998.

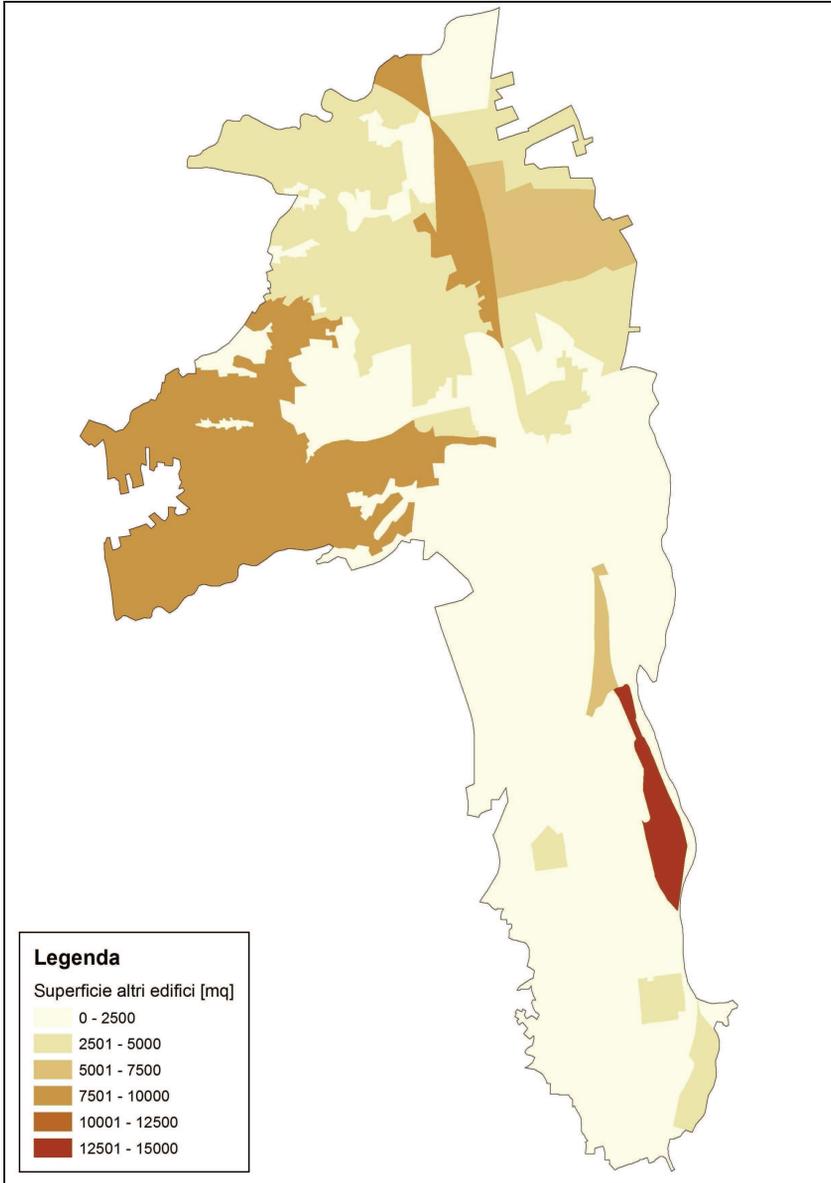


Fig. 8.7 – Superficie occupata da altri edifici nel 2008.

A livello dell'area urbana, la variazione di superficie occupata raggiunge il 12% ed è maggiore nel territorio di Rende (16%) rispetto a Cosenza (8%). La figura 8.8 rappresenta visivamente i dati analizzati confermando l'aumento di superficie occupata da edifici che si è verificato nell'area di influenza.

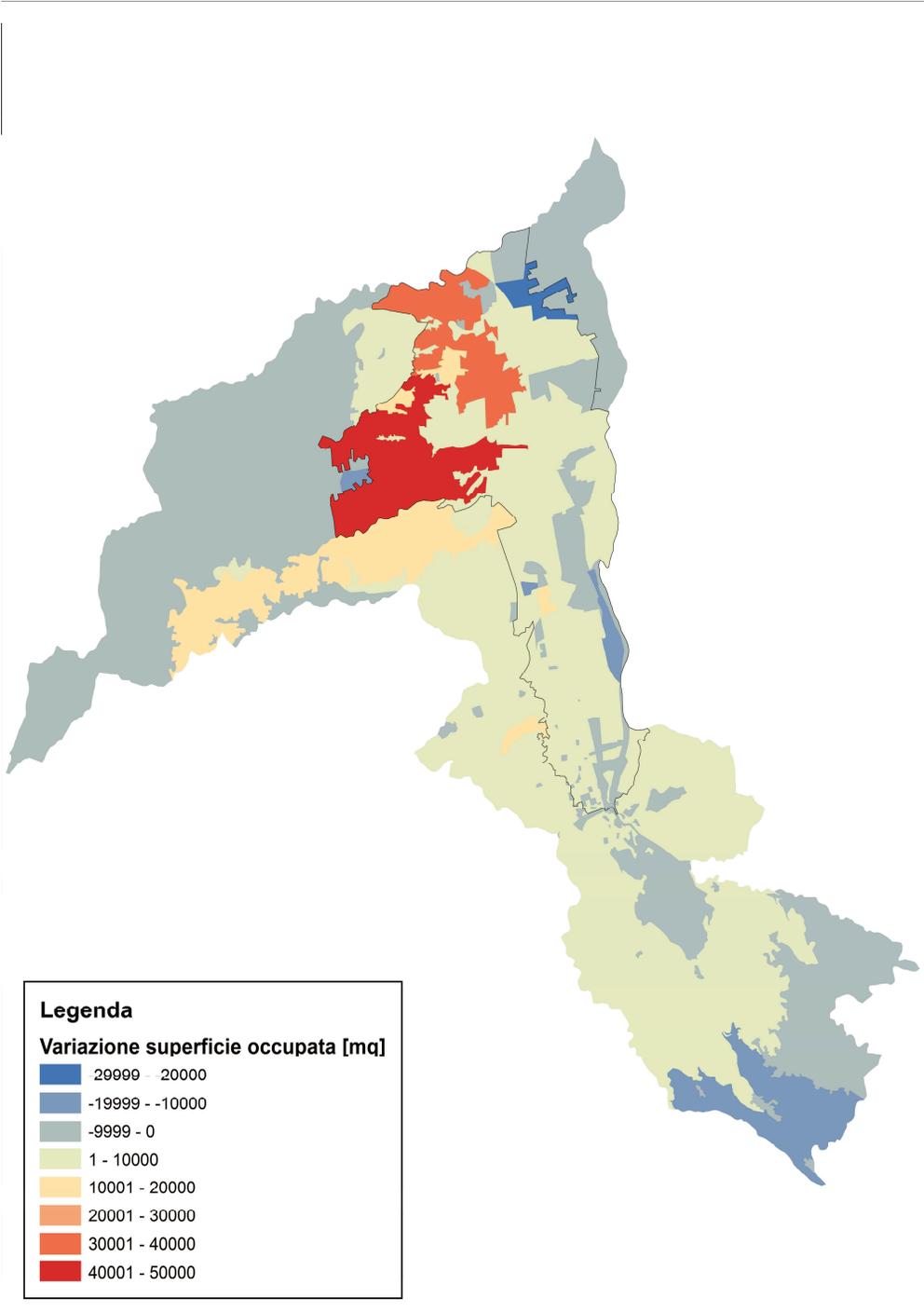


Fig. 8.8 – *Variatione della superficie occupata da edifici tra il 1998 e il 2008.*

In definitiva, i dati mostrano che, in seguito alla costruzione della nuova infrastruttura, all'interno dell'area di influenza, si è registrato un forte aumento della superficie occupata da edifici residenziali e una diminuzione di quella occupata da edifici industriali e da altri edifici. Infatti, la costruzione dell'infrastruttura ha comportato una variazione dell'accessibilità dell'area di influenza divenuta più attrattiva per le residenze. Di conseguenza, nella zona si sono registrati cambiamenti della destinazione d'uso, indirizzati anche dalle politiche locali, che hanno comportato la diminuzione di edifici non destinati ad uso abitativo.

8.3.2 Stima della variazione della popolazione

Nota la variazione della superficie occupata da edifici, è possibile elaborare una stima della variazione di abitanti tra il 1998 e il 2008. L'analisi è stata condotta per sezione censuaria, elaborando i dati della superficie occupata dagli edifici. La tipologia di edifici considerata è quella degli edifici residenziali, in quanto l'obiettivo è fornire una stima della popolazione residente.

Per determinare la popolazione per sezione censuaria prevista nel 2008 è stato ipotizzato che la densità di popolazione per metro quadrato di superficie edificata sia costante nel tempo intercorso tra i due anni considerati. In altri termini, si ipotizza che la densità di popolazione per sezione censuaria sia invariata tra il 1998 e il 2008 supponendo, di conseguenza, che le tipologie edilizie realizzate nel corso degli anni siano sempre uguali, come, ad esempio, edifici con lo stesso numero di piani, e che il numero medio di persone per abitazione sia rimasto costante. Queste ipotesi, seppur forti, sono accettabili in quanto non si sono registrati importanti cambiamenti economici tra i due anni di riferimento e lo stile di vita degli abitanti dell'area urbana è rimasto sostanzialmente immutato.

In un primo momento sono stati calcolati i valori della densità di popolazione riferiti all'anno 1998, dividendo il numero di abitanti per la superficie occupata dagli edifici residenziali. Successivamente, i valori della densità di popolazione riferiti all'anno 1998 sono stati moltiplicati per i corrispondenti valori della superficie occupata da edifici residenziali riferiti

all'anno 2008 ottenendo la stima della popolazione residente al 2008 per sezione censuaria.

L'analisi condotta si basa esclusivamente sui dati relativi alla superficie occupata da edifici residenziali per cui non tiene in considerazione tutti gli aspetti legati al mercato immobiliare che rendono una zona più o meno attrattiva come zona in cui localizzare la residenza.

I risultati, riportati nella tabella 8.5, mostrano che l'aumento della popolazione stimata nell'area di influenza è maggiore rispetto a quello previsto nel resto dell'area urbana. Nello specifico, la variazione stimata della popolazione è pari al 35% nell'area di influenza, maggiore nel territorio di Rende (41%) piuttosto che in quello di Cosenza (33%).

Tab. 8.5 – *Stima della variazione della popolazione.*

	Popolazione residente anno 1998	Popolazione residente anno 2008	Δ popolazione residente [ab]	Δ popolazione residente [%]
Area di influenza	68.810	93.020	24.210	+35
Area di influenza Cosenza	47.553	63.123	15.570	+33
Area di influenza Rende	21.257	29.897	8.640	+41
Area urbana	107.419	137.268	34.164	+32
Cosenza	72.998	89.324	16.491	+22
Rende	34.421	47.944	13.357	+38

Nell'area urbana, l'aumento della popolazione è in media più basso in quanto nelle zone più periferiche si è registrata una diminuzione della superficie occupata da edifici residenziali e, di conseguenza, è stata stimata una riduzione della popolazione.

Come mostra la figura 8.9 relativa all'area di influenza, la popolazione stimata per l'anno 2008 aumenta soprattutto nelle sezioni censuarie poste a ovest. Nella zona orientale, sono stati ottenuti valori più bassi. Questo fenomeno può essere spiegato dalle particolari caratteristiche geomorfologiche della zona. Infatti, sul confine est dell'area urbana si colloca il bacino del fiume Crati, area non adatta alla realizzazione di edifici residenziali.

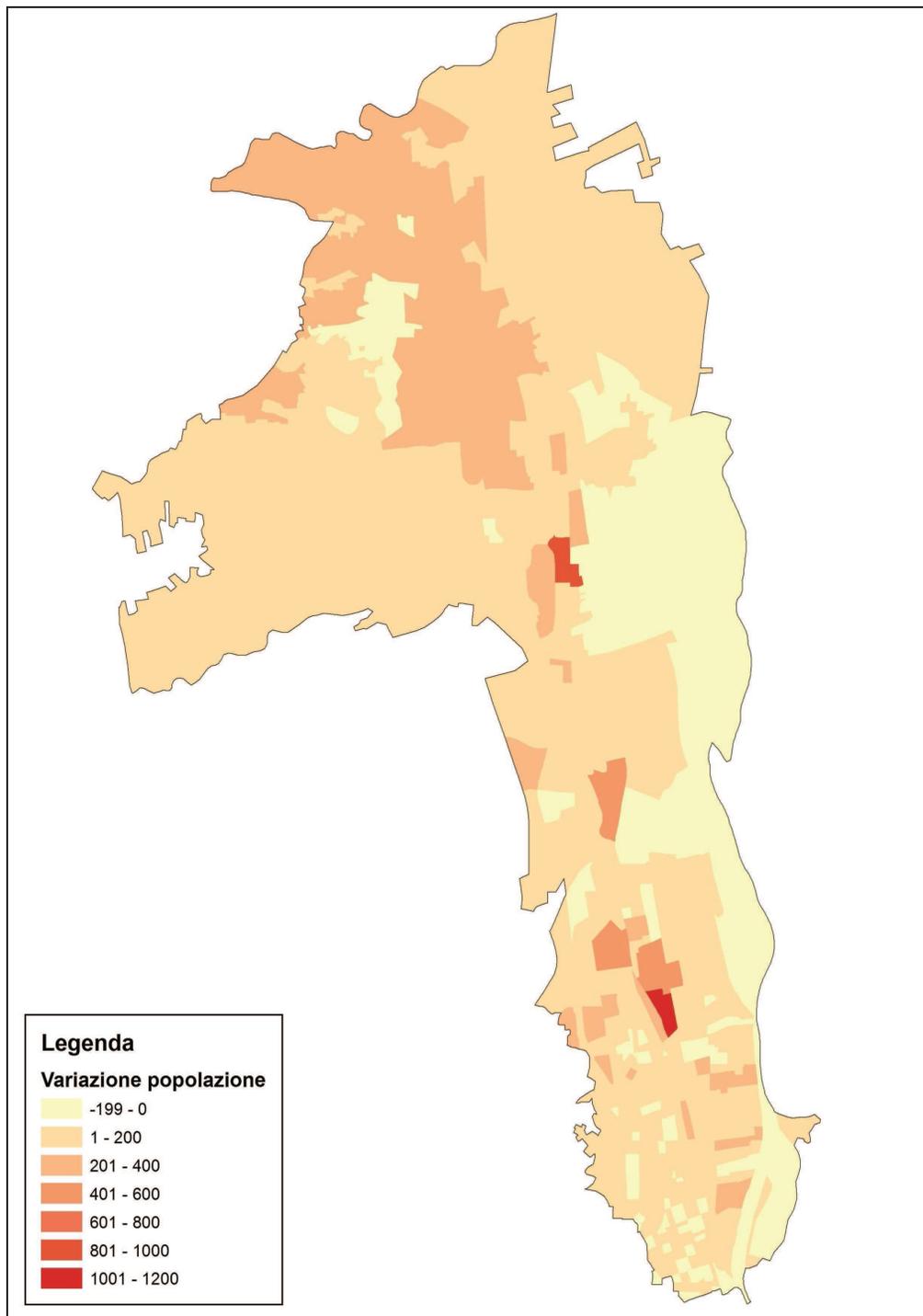


Fig. 8.9 – Stima della variazione della popolazione residente tra il 1998 e il 2008.

La stessa tendenza è stata confermata dalla variazione della densità di popolazione, calcolata rapportando la popolazione residente, riferita a ciascuna sezione censuaria, all'area misurata in chilometri quadrati (tabella 8.6).

Tab. 8.6 – *Stima della variazione della densità di popolazione.*

	Densità di popolazione anno 1998 [ab/km ²]	Densità di popolazione anno 2008 [ab/km ²]	Δ densità di popolazione [ab/km ²]	Δ densità di popolazione [%]
Area di influenza	2.625	3.549	924	35
Area di influenza Cosenza	8.046	10.680	2.634	33
Area di influenza Rende	1.047	1.473	426	41
Area urbana	1.162	1.485	323	28
Cosenza	1.946	2.381	435	22
Rende	627	873	246	38

Nell'area di influenza è stato stimato un aumento della densità pari a 924 ab/km² pari al 35%, mentre nell'area urbana l'aumento previsto è pari a 323 ab/km² corrispondente ad una crescita del 28% rispetto al valore iniziale.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi del sistema integrato costituito da trasporti e territorio permette di ottenere interessanti risultati riguardanti le dinamiche che interessano l'assetto dei due sistemi, e può risultare utile per indirizzare e controllare i loro processi di trasformazione nel tempo.

Diverse sono le tecniche che possono essere applicate per valutare l'impatto prodotto da variazioni del sistema territoriale sul sistema dei trasporti, e l'influenza di variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale.

Per studiare l'influenza delle variabili territoriali sui comportamenti di viaggio, sono usate soprattutto tecniche descrittive. La maggior parte dei lavori esistenti in letteratura presentano modelli di regressione calibrati a partire da dati sulla popolazione, sulle attività economiche e sull'assetto del territorio. L'obiettivo principale di questi modelli è stimare in che misura le variabili territoriali, socio-economiche e demografiche possono incidere sui comportamenti di viaggio, in particolare sulla scelta modale, sul numero di spostamenti effettuati e sulla lunghezza degli spostamenti.

L'applicazione di questa tipologia di modelli permette di ottenere importanti informazioni sul legame trasporti-territorio e di effettuare stime e previsioni su come agendo su una variabile indipendente si possa intervenire sui comportamenti di viaggio. A titolo di esempio, confrontando i risultati ottenuti per diversi casi di studio relativi a città di grandi dimensioni, è emerso che la densità abitativa è una variabile che ha influenza significativa

sulla scelta modale. Si è osservato che, aumentando la densità, aumenta il numero di spostamenti effettuati utilizzando i mezzi di trasporto collettivo o a piedi. Le politiche urbane, volte a ridurre il numero di spostamenti motorizzati, possono trovare nei risultati di questi studi ottimi suggerimenti per attuare interventi efficaci.

Un'altra tecnica che permette di avere risultati significativi nello studio dell'influenza del sistema territoriale sui trasporti è la tecnica di modellazione ad equazioni strutturali SEM.

Il punto di forza di questa tecnica è la possibilità di definire variabili latenti (non osservate) a partire da variabili osservate direttamente. In altri termini, si ha una regressione a due livelli. Al primo, le variabili osservate relative a diversi aspetti del fenomeno vanno ad identificare un certo numero di variabili latenti. Al secondo livello, si applica la regressione tra le variabili latenti indipendenti e quella dipendente. Mediante l'applicazione del modello SEM, è possibile individuare l'influenza delle variabili latenti dipendenti su quella dipendente e determinare quella che ha il peso maggiore. Allo stesso modo, è possibile individuare la variabile osservata che influenza maggiormente ciascuna variabile latente e determinare, tramite questa, il peso che la variabile osservata ha sulla variabile latente dipendente.

I risultati degli studi presenti in letteratura in cui è stata effettuata l'applicazione della tecnica di modellazione SEM dimostrano che con questa tecnica è possibile eseguire un'analisi a più ampio raggio, utilizzando nella modellazione del fenomeno un numero maggiore di variabili rispetto a quelle considerate in un modello di regressione. Aspetto confermato anche dall'applicazione del modello SEM al caso sperimentale oggetto di studio in questo lavoro. Nel modello SEM proposto sono state definite cinque variabili latenti, di cui quattro esogene ("Caratteristiche socio-demografiche", "Caratteristiche economiche", "Land Use" e "Accessibilità") e una endogena ("Comportamento di viaggio"), spiegate complessivamente da 19 variabili osservate direttamente. Complessivamente, i risultati ottenuti sono statisticamente significativi. A partire dai valori dei coefficienti ottenuti è stato individuato l'indicatore che ha maggiore influenza su ciascuna variabile endogena e la variabile latente esogena che ha il maggiore impatto sulla variabile latente endogena. In questo caso, tra le variabili esogene, "Caratteristiche economiche" influenza maggiormente la variabile endogena.

Per una maggiore completezza di analisi sono stati considerati anche gli effetti totali, ottenuti come somma degli effetti diretti e di quelli indiretti. In questo caso è stato visto che il peso della variabile “Caratteristiche socio-demografiche” è aumentato, anche se la variabile “Caratteristiche economiche” ha continuato ad avere il maggiore impatto sulla variabile latente endogena. Consultando i risultati del modello SEM è stato possibile individuare in che misura le variabili del sistema territoriale influenzano i comportamenti di viaggio degli utenti e, in particolare, la scelta di effettuare o meno lo spostamento.

Negli ultimi anni, nello studio delle interazioni trasporti–territorio sono state introdotte le tecniche di statistica spaziale. Queste tecniche tengono in considerazione la componente spaziale delle variabili che entrano in gioco nell’influenza del sistema territoriale sul sistema dei trasporti e viceversa.

Molto utilizzate sono le tecniche di associazione spaziale che vanno ad indagare sulla presenza di schemi spaziali nella distribuzione dei valori di una variabile. Negli studi delle interazioni trasporti–territorio, l’applicazione delle tecniche globali di associazione spaziale è molto utile per individuare la presenza di eventuali *cluster* o aggregazioni di valori simili che non possono essere state provocate dalla distribuzione *random* dei valori della variabile. Uno dei più importanti indicatori appartenenti a questa categoria è l’indice “I di Moran” che è possibile determinare anche mediante l’applicazione di software di statistica spaziale. Tramite l’applicazione delle statistiche locali di associazione spaziale, come “ G_i^* ” e indice “I di Moran locale”, è possibile individuare la posizione in cui i *cluster* sono localizzati.

Le tecniche globali di autocorrelazione spaziale sono state applicate al caso di studio considerato in questo lavoro. I risultati ottenuti hanno confermato che i valori della variabile relativa al numero degli spostamenti emessi si distribuiscono creando aggregazioni di valori simili.

Applicando al caso di studio le tecniche locali di autocorrelazione spaziale, le aggregazioni di valori simili sono state localizzate sul territorio dell’area urbana. I risultati mostrano che il numero di spostamenti assume valori simili elevati in corrispondenza delle zone con alta densità abitativa e in cui sono concentrati attività commerciali e servizi. In aggiunta, l’aggregazione di valori bassi degli spostamenti è localizzata in corrispondenza di zone periferiche e scarsamente popolate.

Dai risultati ottenuti è possibile valutare in che modo la componente spaziale influenza il processo di interazione trasporti–territorio e analizzare le cause che possono aver comportato la presenza di associazione spaziale della distribuzione della variabile.

Per modellare la relazione tra le variabili territoriali e quelle dei trasporti, non di rado viene applicata la tecnica di regressione geograficamente pesata (GWR). Questa tecnica di regressione spaziale locale permette di considerare nell'analisi la variazione di ciascuna variabile tra una zona e l'altra. La regressione GWR viene utilizzata sia per stimare l'influenza delle variabili territoriali sul sistema dei trasporti sia per stimare l'influenza delle variabili dei trasporti sull'assetto territoriale, in quanto fornisce indicazioni relative al peso delle variabili indipendenti su quella dipendente, zona per zona. Risulta così possibile individuare come varia il peso di ciascuna variabile da una zona all'altra e verificare se ci sono zone in cui una variabile non è significativa.

Applicazioni della GWR sono state fatte per valutare la variazione della superficie edificata in un certo intervallo di tempo in funzione di diverse variabili, tra cui la variazione della dotazione infrastrutturale; ma anche per stimare il numero di spostamenti effettuati in funzione di variabili demografiche, socio–economiche e territoriali. In entrambi i casi, il modello ha portato a risultati soddisfacenti e ha permesso di individuare aspetti che erano stati trascurati nelle analisi non spaziali.

In particolare, in questo lavoro la tecnica di regressione GWR è stata applicata per stimare il numero di spostamenti totali giornalieri effettuati per motivi di studio e lavoro in funzione di cinque variabili esplicative: la superficie delle abitazioni, il numero di persone residenti occupate, il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino terminal di trasporto collettivo, il tempo di viaggio in auto per raggiungere il più vicino svincolo stradale o autostradale, l'accessibilità ai servizi. L'applicazione del modello GWR ha mostrato che utilizzando le tecniche di statistica spaziale è possibile tenere in considerazione anche le relazioni spaziali tra le variabili, giungendo a risultati completamente diversi da quelli che è possibile ottenere applicando tecniche non spaziali. Per dimostrare questo aspetto, i risultati ottenuti dal modello GWR sono stati confrontati con quelli ottenuti calibrando un modello di regressione non spaziale a partire dalle stesse variabili. Come atteso, i risultati

della regressione non spaziale mostrano l'inadeguatezza del modello a riprodurre i dati e la necessità di utilizzare tecniche di regressione spaziale.

Una tipologia di modelli utilizzata in molti studi riguardanti la stima dell'impatto dovuta a variazioni del sistema dei trasporti sul sistema territoriale è rappresentata dai modelli comportamentali, in particolare dai modelli di utilità casuale.

Generalmente in questi modelli viene stimata la localizzazione delle residenze e delle attività economiche in funzione dell'attrattività della zona, dell'accessibilità ai servizi ed al posto di lavoro, e della configurazione del sistema dell'offerta di trasporto. Grazie a questi modelli è possibile stimare l'impatto che un intervento nel sistema dei trasporti, come la realizzazione di una nuova infrastruttura, ha sull'assetto del territorio in termini di una diversa localizzazione delle residenze e delle attività commerciali.

I cambiamenti dell'assetto del territorio provocati da variazioni del sistema dei trasporti non sono immediati ma si registrano nel lungo periodo. Per individuare le variazioni avvenute è possibile svolgere analisi quantitative, andando ad individuare in che misura si è manifestata l'influenza della variazione del sistema dei trasporti sul territorio. L'impatto dell'opera sul territorio circostante si verifica se si registrano sostanziali variazioni del sistema territoriale, come ad esempio variazioni della superficie edificata nettamente diverse da quelle registrate in altre zone non influenzate dall'infrastruttura. Inoltre, andando ad approfondire l'analisi considerando le diverse destinazioni d'uso degli edifici, è possibile valutare in che modo la variazione di accessibilità dovuta alla realizzazione dell'infrastrutture incide sulle scelte localizzative di famiglie e imprenditori.

Nel presente lavoro è stata svolta un'analisi quantitativa per determinare gli effetti che la realizzazione di una nuova infrastruttura ha indotto sul sistema territoriale. Definita l'area di influenza, è stato studiato l'assetto territoriale prima della realizzazione dell'infrastruttura e dopo la sua ultimazione, coprendo un arco temporale di dieci anni e individuando sostanziali differenze tra i due scenari. La costruzione dell'infrastruttura ha comportato un cambiamento dell'accessibilità dell'area in cui ricade, facendo variare anche la sua attrattività in relazione alla localizzazione delle residenze e delle attività economiche. In particolare, se da un lato è stato rilevato l'aumento della superficie degli edifici residenziali, dall'altro è stata registrata

la diminuzione della superficie occupata da edifici destinati ad altri usi. Ciò dimostra che la nuova infrastruttura ha comportato anche variazioni della destinazione d'uso in buona parte dell'area di influenza.

In definitiva, la valutazione delle interazioni trasporti–territorio comprende diversi aspetti, per cui non è possibile individuare una metodologia di analisi che fornisca risultati soddisfacenti per ogni caso di studio. Nella scelta dell'approccio da seguire ha un ruolo determinante l'obiettivo che si intende raggiungere svolgendo l'analisi, in quanto le metodologie sono diverse a seconda che si voglia studiare l'impatto del territorio sui trasporti o viceversa.

In ogni caso, la ricerca in questo campo è volta a definire nuove tecniche che permettano di riprodurre in modo sempre più preciso il processo di interazione trasporti–territorio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Abreu e Silva, J., Golob, T.F. & Goulias K.G. (2006). The effects of land use characteristics on residence and employment location and travel behavior of urban adult workers. Proceedings of the 85th Annual Transportation Research Board Meeting, January, 2006, Washington D.C.

Alonso, W. (1964). Location and Land Use. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Anas, A. (1994). METROSIM: A Unified Economic Model of Transportation and Land-Use. New York, NY: Alex Anas & Associates.

Anas, A. (1998). NYMTC Transportation Models and Data Initiative, The NYMTC Land Use Model. Williamsville, NY: Alex Anas & Associates.

Anderstig, C. & Mattsson, L.G. (1991). An integrated model of residential and employment location in a metropolitan region. Papers in Regional Science, 70(2), 167–184.

Anselin, L. (1988). Spatial econometrics: methods and models. Kluwer, Dordrecht.

Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association-LISA. Research paper 9331, Regional Research Institute West Virginia University Morgantown.

Anselin, L., Sridharan, S. & Gholston, S. (2007). Using exploratory spatial data analysis to leverage social indicators databases: the discovery of interesting patterns. Social Indicators Research, 82:287–309.

Apel, D. (1992). Verkehrskonzepte in europäischen Städten. Erfahrungen mit Strategien zur Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik.

Arbuckle, J.L. (1994). AMOS: analysis of movement structures. Psychometrika, 59, 135-137.

Arbuckle, J.L. (1997). AMOS Users' Guide, Version 3.6. Smallwaters Corp., Chicago.

Bagley, M.N. & Mokhtarian, P. (2002). The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach. *The Annals of Regional Science*, 36, 279-297.

Banister, D. (1992). Energy use, transport and settlement patterns. In: Breheny, M.J. (ed.): *Sustainable Development and Urban Form. European Research in Regional Science 2*. London: Pion, 160-181.

Ben-Akiva, M. & Lerman, S.R. (1979). Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility. In: Hensher, D.A., Sopher, P.R. (Eds.), *Behavioural Travel Modelling*. Croom Helm, Andover, Hants, 654-679.

Ben-Akiva, M. & Lerman, S.R. (1985). *Discrete choice Analysis*. MIT Press, Cambridge, MA.

Bentler, P.M. (1990). Comparative Fit Indexes in Structural Models. *Psychological Bulletin*, 107 (2), 238-46.

Bhat, C. & Zhao, H.M. (2002). The spatial analysis of activity stop generation. *Transportation Research Part B*, 36: 557-575.

Bollen, K.A. (1989). *Structural Equations with Latent Variables*. New York: Wiley.

Boyce, D. (1986). Integration of supply and demand models in transportation and location: problem formulation and research questions. *Environment and Planning*, 18A, 485-489.

Burns, L.D. (1979). *Transportation, Temporal and Spatial Components of Accessibility*. Lexington Books, Lexington/Toronto.

Byrne, B.M. (1998). *Structural Equation Modeling with LISREL, PRELIS and SIMPLIS: Basic Concepts, Applications and Programming*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

Cao, X.J., Mokhtarian, P.L. & Handy, S.L. (2009). The relationship between the built environment and nonwork travel: A case study of Northern California. *Transportation Research Part A*, 43, 548-559.

Cascetta E., Biggiero L., & Pagliara F. (2002b). Modelli di utilità aleatoria per lo studio dell'interazione trasporti/territorio nella localizzazione delle attività. In:

- Cantarella G.E. & Russo F. (eds.) *Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti*. Seminario 2000. Milano: FrancoAngeli. 327-342.
- Cascetta, E. (1998). *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*. UTET, Torino.
- Cascetta, E., Coppola, P. & Papola, A. (2002a). *Infrastrutture, servizi di trasporto e sviluppo sostenibile*. Atti della XXIII Conferenza Italiana di Scienze Regionali (AISRe).
- Cervero, R. (1996). *Mixed land-uses and commuting: Evidence from the American Housing Survey*. *Transportation Research A: Policy and Practise* 30, 5: 361-377.
- Crane, R. (2000). *The Influence of Urban Form on Travel: An Interpretative Review*. *Journal of Planning Literature*, 15:1, 3-23.
- Dalvi, M.Q. & Martin, K.M. (1976). *The measurement of accessibility: some preliminary results*. *Transportation*, 5, 17-42.
- De la Barra T. (1989). *Integrated Land Use and Transport Modelling*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Diamantopoulos, A. & Sigauw, J.A. (2000). *Introducing LISREL*. London: Sage Publications.
- Dong, X., Ben-Akiva, M., Bowman, J. & Walker, J. (2006). *Moving From Trip-Based to Activity-Based Measure of Accessibility*. *Transportation Research A*, 2: 163-180.
- Echenique M.H., Flowerdew A.D., Hunt J.D., Mayo T.R., Skidmore I.J. & Simmonds D.C. (1990). *The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund*. *Transportation Reviews*, 10, 309-322.
- Echenique, M.H. (1985). *The use of integrated land use transportation planning models: the cases of Sao Paulo, Brazil and Bilbao, Spain*. In: Florian, M. (ed.), *The Practice of Transportation Planning*. The Hague: Elsevier.
- Ewing, R. (1995). *Beyond density, mode choice, and single-purpose trips*. *Transportation Quarterly*, 49, 4: 15-24.

Festa, D.C. & Stellato, F. (1997). Redazione del Piano Urbano del Traffico e del Piano della Viabilità della città di Rende (CS).

Festa, D.C. (2002). Studio per la redazione del Piano Generale del Traffico Urbano del Comune di Cosenza. Dipartimento di Pianificazione Territoriale, Università della Calabria, Rende.

Friedman, B., Gordon, S.P. & Peers J.B. (1994). The effect of neo-traditional neighbourhood design on travel characteristics. *Transportation Research Record* 1400, 63-70.

Getis, A. & Ord, J.K. (1993). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 25:276–276

Getis, A. (2007). Reflections on spatial autocorrelation. *Regional Science and Urban Economics*, 37, 491–496.

Geurs, K.T. & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12, 127-140.

Golob, T.F. (2003). Structural equation modeling for travel behavior research. *Transportation Research Part B*, 37, 1-25.

Griffith, D.A. (2009). Modeling spatial autocorrelation in spatial interaction data: empirical evidence from 2002 Germany journey-to-work flows. *Journal of Geographical System*, 11, 117–140.

Hair, J.F., Tatham, R.L. & Anderson, R. (1998). *Multivariate Data Analysis*. Prentice-Hall.

Handy, S. (1995). Understanding the link between urban form and travel behavior. Paper presented at the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Handy, S.L. & Niemeier, D.A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A*, 29, 1175-1194.

Hansen, W.G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of American Institute of Planners* 25 (1), 73–76.

- Harris, B. (1962). Linear programming and the protection of land uses. Urban Transportation Planning Abstracts, Paper No.20.
- Herbert, J. & Stevens, B. (1960). A model for the distribution of residential activity in urban areas. *Journal of Regional Science*, 2, 21-36.
- Hillman, M. & Whalley, A. (1983). *Energy and Personal Travel: Obstacles to Conservation*. London: Policy Studies Institute.
- Holtzclaw, J. (1994). Using residential patterns and transit to decrease auto dependence and costs. Unpublished report, Natural Resources Defense Council.
- Holz-Rau, C. & Kutter, E. (1995). Verkehrsvermeidung. Siedungsstrukturelle und organisatorische Konzepte. Materialien zur Raumentwicklung Heft 73. Bonn: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung.
- Holz-Rau, C. (1997). Siedlungsstruktur und Verkehr. Materialien zur Raumentwicklung Heft 84. Bonn: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung.
- Hooper, D., Coughlan, J. & Mullen, M. (2008). Structural Equation Modelling: Guidelines for Determining Model Fit. *Electronic Journal of Business Research Methods*, 6(1), 53-60.
- Hu, L.T. & Bentler, P.M. (1999). Cutoff Criteria for Fit Indexes in Covariance Structure Analysis: Conventional Criteria Versus New Alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6 (1), 1-55.
- Huang, Y. & Leung, Y. (2002). Analysis regional industrialization in Jiangsu province using geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, 4, 233-249.
- Hunt J.D., Kriger D.S. & Miller E.J. (2005). Current Operational Urban Land-use-Transport Modelling Frameworks: A Review. *Transport Reviews*, 25(3), 329-376.
- Iacono, M., Levinson, D. & El-Geneidy A. (2008). Models of Transportation and Land Use Change: A Guide to the Territory. *Journal of Planning Literature*, 22(4), 323-340.

Istituto Nazionale di Statistica (1991). 13° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, Roma.

Istituto Nazionale di Statistica (2001a). 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni. Roma.

Istituto Nazionale di Statistica (2001b). 8° Censimento generale dell'industria e dei servizi. Roma.

Jöreskog, K.G. & Sörbom, D. (1993). LISREL 8 User's Reference Guide; PRELIS 2 Reference Guide. Scientific Software International, Chicago.

Kagermeier, A. (1997). Siedlungsstruktur und Verkehrsmobilität. Eine empirische Untersuchung am Beispiel von Südbayern. Dortmund: Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur.

Kim, J.H., Pagliara, F. & Preston, J. (2005). The Intention to Move and Residential Location Choice Behaviour. *Urban Studies*, 42(9), 1621-1636.

Kim, T.J. (1989). *Integrated Urban Systems Modeling: Theory and Applications*. Dordrecht: Kluwer.

Kitamura, R., Mokhtarian, P. & Laidet, L. (1997). A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area. *Transportation* 24, 125-158.

Kotavaara, O., Antikainen, H. & Rusanen, J. (2011). Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970-2007. *Journal of Transport Geography*, 19, 926-935.

Kreibich, V. (1978). The successful transportation system and the regional planning problem: an evaluation of the Munich rapid transit system in the context of urban and regional planning. *Transportation*, 7: 137-145.

Lowry, I. (1964). *A Model of Metropolis*. Santa Monica, CA: Rand Corporation.

MacCallum, R.C., Browne, M.W. & Sugawara, H.,M. (1996). Power Analysis and Determination of Sample Size for Covariance Structure Modeling. *Psychological Methods*, 1 (2), 130-49.

- Mackett, R. (1990). The systematic application of the LILT model to Dortmund, Leeds and Tokyo. *Transport Reviews*, 10, 323-338.
- Mackett, R.L. (1983). The Leeds Integrated Land Use Transport (LILT) Model. Report SR 805 (Crowthorne: UK Transport and Road Research Laboratory).
- Martínez F.J. (1996). MUSSA: A Land Use Model for Santiago City. *Transportation Research Record 1552: Transportation Planning and Land Use at State, Regional and Local Levels*, 126-134.
- Martínez, F.J. (1995). Access: the transport-land use economic link. *Transportation Research part B*, 29 (6), 457-470.
- Martínez, F.J., Araya, C. (2000). A note on trip benefits in spatial interaction models. *Journal of Regional Science*, 40 (4), 789-796.
- McDonald, R.P. & Ho, M.-H.R. (2002). Principles and Practice in Reporting Statistical Equation Analyses. *Psychological Methods*, 7 (1), 64-82.
- Miller, E.J. & Ibrahim, A. (1998). Urban form and vehicular travel: some empirical findings. Paper presented at the 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Miller, E.J., Kriger, D.S., Hunt, J.D. & Badoe, D.A. (1998). Integrated Urban Models for Simulation of Transit and Land-Use Policies. Final Report, TCRP Project H-12. Toronto: Joint Program of Transportation, University of Toronto.
- Miller, H.J. (1999). Potential contributions of spatial analysis to geographic information systems for transportation (GIS-T). *Geographical Analysis* (30th anniversary issue).
- Newman, P.W.G, & Kenworthy, J.R. (1989). *Cities and automobile dependence: an international sourcebook*. Brookfield, VT: Gower.
- Noresah, M.S. & Ruslan, R. (2009). Modelling urban spatial structure using Geographically Weighted Regression. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13-17 July 2009.

Nuzzolo, A. & Coppola, P. (2006). Accessibilità extraurbana e localizzazione delle attività socio-economiche. Atti della XXVII Conferenza Italiana di Scienze Regionali (AISRe).

Okunuki K. (2001). Urban analysis with GIS. *GeoJournal* 52, 181-188.

Openshaw, S. & Taylor, P.J. (1979). A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. In Wrigley, N. (ed), *Statistical Applications in the Spatial Sciences*, 127-144. Pion, London.

Ord, J.K. & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27:286–306.

Ord, J.K. & Getis, A. (2001). Testing for local spatial autocorrelation in the presence of global autocorrelation. *Journal of Regional Science*, 41(3):411–432.

Pàez, A. & Scott, D.M. (2004). Spatial statistic for urban analysis: A review of techniques with examples. *Geo Journal* 61, 53-67.

Pagliara, F. & Papa, E. (2011). Urban rail systems investments: an analysis of the impacts on property values and residents' location. *Journal of Transport Geography* 19, 200–211.

Peng, H. & Lu, H. (2007). Study on the Impacts of Urban Density on the Travel Demand Using GIS Spatial Analysis. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 7 (4), 90-95.

Pharoah, T. & Apel, D. (1995). *Transport Concepts in European Cities*. Aldershot: Ashgate.

Putman S. (1983). *Integrated Urban Models*. London: Pion.

Shaw, S.-L. & Xin, X. (2003). Integrated land use and transportation interaction: a temporal GIS exploratory data analysis approach. *Journal of Transport Geography*, 11, 103-115.

Simma, A. & Axhausen, K.W. (2003). Interactions between travel behaviour, accessibility and personal characteristics: The case of the Upper Austria Region, *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 3(2), 179-197.

Simmonds, D. (1999). The design of the DELTA land use modelling package. Submitted for publication Environment and Planning B.

Simmonds, D. (2000). The objectives and design of a new land-use modelling package: DELTA. Rapporto della David Simmonds Consultancy.

Spence, N. & Frost, M. (1995). Work travel responses to changing workplaces and changing residences. In: Brotchie, J., Batty, M. Blakely, E., Hall, P. & Newton, P. (eds.): Cities in Competition. Productive and Sustainable Cities for the 21st Century. Melbourne: Longman, 359-381.

Still, B.G., May, A.D. & Bristow, A.L. (1999). The assessment of transport impacts on land use: practical uses in strategic planning. Transport Policy, 6, 83-98.

Van Acker, V., Witlox, F. & Van Wee, B. (2007). The Effects of the Land Use System on Travel Behavior: A Structural Equation Modeling Approach. Transportation Planning and Technology, 30(4), 331-353.

Von Thunen, J.H. (1826). Der Isolierte Staat in Beziehung auf landwirtschaft und Nationalökonomie, Amburgo. Traduzione in inglese di: Wartenberg, C.M. (1966) in Hall, p. (ed.) Von Thunen's Isolated State. Oxford: Pergamon Press.

Waddel P. (2002). UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning. Journal of the American Planning Association, 68(3), 297-314.

Wegener M. & Fürst, F. (1999). Land-Use Transport Interaction: State of the Art. Deliverable 2a of the project TRANSLAND (Integration of Transport and Land Use Planning) of the 4th RTD Framework Programme of the European Commission.

Wegener, M. (1982). A multilevel economic-demographic model for the Dortmund region. Sistemi Urbani 3, 371-401.

Wegener, M. (1998). The IRPUD Model: Overview. <http://irpud.raumplanung.unidortmund.de/irpud/pro/mod/mod.htm>.

Wheaton, W.C. (1974). Linear programming and locational equilibrium: The Herbert-Stevens model revisited. Journal of Urban Economics, 1(3), 278-287.

Wilson, A.G. (1970). Entropy in Urban and Regional Modelling. PION, London.

Wilson, A.G. (1971). A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning*, 3 (1), 1-32.

Wingo, L. (1961). *Transportation and Urban Land*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press.

Yoon, S.Y., Golob, T.F. & Goulias, K.G. (2009). A California Statewide Explanatory Analysis Correlating Land Use Density, Infrastructure Supply and Travel Behavior. Paper accepted for presentation at the 2009 TRB 88th Annual Meeting and Inclusion in the TRB Preprint CD ROM.