

LO STUDIO DELLE INTERAZIONI TRASPORTI-TERRITORIO NEL CASO DELLA RETE METROPOLITANA DELLA CITTÀ DI MADRID

Laura EBOLI¹, Carmen FORCINITI², Gabriella MAZZULLA³

SOMMARIO

Le politiche attuate nel campo della pianificazione dei trasporti attualmente sono orientate a spostare quanto più possibile la domanda di spostamento dal mezzo di trasporto privato ai sistemi di trasporto collettivo. Di conseguenza, la pianificazione territoriale deve essere opportunamente integrata alla pianificazione dei trasporti, in quanto alcune tipologie di interventi da attuare sul sistema territoriale possono orientare la scelta del modo di trasporto verso i sistemi di trasporto collettivo. A questo proposito, il presente lavoro di ricerca mira ad individuare e studiare i fattori che influiscono sulla scelta degli utenti di spostarsi utilizzando i trasporti collettivi.

Il caso di studio preso in considerazione è la città di Madrid (Spagna), la cui rete metropolitana ha subito recentemente importanti ampliamenti con l'inserimento di nuove linee, nuove stazioni e nuove tratte. In seguito a questi interventi sono state registrate variazioni nella localizzazione della popolazione e delle attività economiche.

Dallo studio è emerso che i fattori che caratterizzano il fenomeno possono essere suddivisi in quattro gruppi, quali variabili socio-economiche della popolazione, variabili del sistema territoriale, variabili di accessibilità e variabili del sistema dei trasporti.

I risultati hanno mostrato importanti indicazioni riguardo ai fattori che possono avere maggiore influenza sulla generazione degli spostamenti effettuati utilizzando la rete metropolitana.

¹ Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ponte Pietro Bucci 46B, 87036, Rende (CS), e-mail: laura.eboli @unical.it.

² Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ponte Pietro Bucci 46B, 87036, Rende (CS), e-mail: carmen.forciniti @unical.it (corresponding author).

³ Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ponte Pietro Bucci 46B, 87036, Rende (CS), e-mail: gabriella.mazzulla @unical.it.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, i comportamenti di viaggio degli utenti del sistema dei trasporti sono diventati molto più complessi, passando da spostamenti effettuati essenzialmente per un unico motivo a spostamenti effettuati con lo scopo di svolgere diverse attività. Queste nuove caratteristiche della domanda di trasporto hanno favorito l'aumento dell'utilizzo dei mezzi di trasporto individuali, come l'autovettura, contribuendo notevolmente da un lato ad acutizzare il problema dell'inquinamento dell'aria e del consumo delle risorse non rinnovabili, e dall'altro all'insorgere di problemi sociali come la congestione del traffico e l'abbassamento della qualità della vita.

Dal punto di vista dell'individuo, l'autovettura privata resta la modalità di trasporto più attrattiva perché, comparata con le altre alternative di trasporto, risulta generalmente percepita come la più confortevole, flessibile e veloce per adattarsi ai bisogni connessi con lo stile di vita contemporaneo (Redman *et al.*, 2013). Inoltre, le caratteristiche della conformazione urbana, come la dispersione urbana e la realizzazione di aree con bassa densità residenziale, hanno anche contribuito ad aumentare l'attrattività dell'autovettura come mezzo di trasporto più conveniente sotto tutti i punti di vista (Kennedy *et al.*, 2005; Luk, 2003).

Per contrastare questo fenomeno, le politiche attuate nel campo della pianificazione dei trasporti attualmente sono orientate a spostare quanto più possibile la domanda di spostamento dal mezzo di trasporto privato ai sistemi di trasporto collettivo. Per favorire il raggiungimento di questo obiettivo, la pianificazione territoriale deve essere opportunamente integrata alla pianificazione dei trasporti, in quanto, come mostrato in molti studi presenti nella letteratura del settore, alcune tipologie di interventi da attuare sul sistema territoriale possono orientare la scelta del modo di trasporto verso i sistemi di trasporto collettivo. In altre parole, ci sono alcune tipologie di quartieri che incoraggiano l'uso dei trasporti collettivi. In particolare, gli interventi prevedono la realizzazione di quartieri con struttura compatta in modo tale da permettere spostamenti a piedi o con i sistemi di trasporto collettivo invece di spostamenti effettuati con l'autovettura privata. La realizzazione di interventi volti a trasformare la conformazione delle aree urbane verso una struttura adatta a spostamenti non motorizzati o mediante sistemi di trasporto collettivo hanno mostrato effetti positivi in alcune città. Infatti, gli individui residenti in insediamenti urbani in cui sono presenti diversi usi del territorio possono effettuare la maggior parte degli spostamenti utilizzando il trasporto pubblico, a piedi o in bicicletta. In questo modo diminuisce notevolmente il numero di auto in circolazione e, conseguentemente, diminuisce la congestione stradale e migliorano le condizioni di vivibilità della città.

La riduzione dell'uso dell'auto privata potrebbe risolvere numerosi problemi, come il traffico automobilistico, l'inquinamento acustico e dell'aria e il consumo di energia. Per perseguire questo obiettivo, i servizi di trasporto collettivo devono essere offerti al maggior numero di utenti possibile. Il primo punto di contatto tra passeggeri e servizi offerti è la fermata. Di conseguenza, la disponibilità e la facilità di accesso alla fermata costituiscono un importante fattore che influenza l'uso dei mezzi di trasporto collettivo.

A questo proposito, il presente lavoro di ricerca mira ad individuare e studiare i fattori che influiscono sulla scelta degli utenti di spostarsi utilizzando i trasporti collettivi. In particolare, l'obiettivo consiste nella definizione dei fattori legati alle caratteristiche socio-economiche della popolazione, al land use, all'accessibilità e al sistema dei trasporti, che determinano il numero di spostamenti giornalieri effettuati utilizzando la metropolitana.

Il caso di studio preso in considerazione è la città di Madrid, la cui rete metropolitana ha subito recentemente importanti ampliamenti con l'inserimento di nuove linee, nuove stazioni e nuove tratte. In seguito a questi interventi sono state registrate variazioni nella localizzazione della popolazione e delle attività economiche. Inoltre, la rete metropolitana di Madrid vanta un numero di utenti molto elevato per cui si presenta come un ottimo caso di studio per l'analisi dei fattori che influenzano la scelta di utilizzare un sistema di trasporto collettivo.

Nel paragrafo successivo è proposta una breve rassegna di studi riguardanti le interazioni trasporti-territorio. Il paragrafo 3 descrive il caso di studio considerato mentre il paragrafo 4 riguarda l'analisi delle

variabili che intervengono nel processo di interazione trasporti-territorio. Infine, sono presentati i risultati più significativi della ricerca e alcune considerazioni finali sul lavoro svolto.

2. Analisi delle interazioni tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti

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 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 interazioni tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti costituiscono un processo dinamico che induce cambiamenti sia spaziali sia temporali nei due sistemi coinvolti. I cambiamenti che avvengono nel sistema territoriale possono modificare la domanda di trasporto e indurre cambiamenti nel sistema dei trasporti affinché l'offerta possa soddisfare la domanda di trasporto. Allo stesso tempo, le modifiche alla configurazione del sistema dei trasporti producono nuovi livelli di accessibilità che comportano cambiamenti nel sistema territoriale, in quanto la popolazione e le attività economiche tendono a localizzarsi in zone caratterizzate da buoni livelli di accessibilità.

La relazione tra il sistema territoriale e il sistema dei trasporti in un'area urbana può essere descritta utilizzando variabili spaziali relative alle caratteristiche geografiche della zona, alla localizzazione delle attività economiche e delle residenze, alle caratteristiche demografiche e socio-economiche della popolazione, al sistema dei trasporti, e alle caratteristiche della domanda di mobilità.

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.

La maggior parte di essi mira ad indagare sulla relazione fra il volume di spostamenti effettuati in ambito 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 per cui il ritorno alla città compatta dovrebbe comportare la diminuzione del numero e della lunghezza degli spostamenti. 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 non sempre viene confermata da altri studi. 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.

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 all'inizio del XX secolo, si è registrata una percentuale maggiore di spostamenti effettuati 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).

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.

Un'altra relazione di difficile interpretazione è quella tra la dimensione della città e i comportamenti di viaggio. 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.

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, quali variazioni dell'andamento demografico, condizioni economiche, cambiamenti dello stile di vita, sviluppo tecnologico, per cui risulta difficile isolare il contributo delle variabili del sistema dei trasporti.

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.

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. Al contrario, 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 presenta 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.

3. Il caso di studio: la rete della metropolitana della città di Madrid

La popolazione registrata nella città di Madrid nell'anno 2014 ammonta a 3.166.130 abitanti. Dall'analisi della distribuzione spaziale della popolazione, è risultato che le zone maggiormente popolate corrispondono a quelle localizzate nelle aree più centrali della città. Nel corso degli anni la popolazione residente nel

territorio di Madrid ha subito notevoli variazioni e questo fenomeno è stato oggetto di molti studi. In particolare, fra il 2000 al 2010, la popolazione residente nelle zone centrali della città di Madrid ha subito un aumento annuale pari allo 0,9%, mentre nelle zone più periferiche è stato registrato un aumento maggiore. A partire dal 2010, però, la popolazione ha iniziato a diminuire ma contemporaneamente si è iniziato a registrare un aumento dei residenti nelle cittadine limitrofe. In altri termini, da qualche anno la popolazione preferisce localizzare la propria residenza in una delle cittadine dell'area metropolitana di Madrid piuttosto che nella città vera e propria. Questo fenomeno potrebbe essere causato da diversi fattori, primo fra tutti la disponibilità nelle città limitrofe di aree edificabili a prezzi più bassi. Inoltre, questo aspetto combinato con la recente espansione subita della rete della metropolitana costituisce una motivazione più che valida per scegliere di localizzare la residenza al di fuori della capitale. Infatti, è possibile acquistare un'abitazione ad un prezzo minore rispetto a quelli praticati nel centro di Madrid e, grazie alla rete dei trasporti collettivi, spostarsi in breve tempo in tutta l'area metropolitana.

La metropolitana di Madrid fu inaugurata nel 1919. La prima linea in esercizio misurava 3,48 km di lunghezza e presentava 8 stazioni. Fin dall'entrata in servizio della prima linea, la metropolitana è stata oggetto costantemente di ampliamenti e miglioramenti. Gli ampliamenti più recenti sono stati effettuati fra il 1995 e il 1999, realizzando 56 km di nuove linee e 38 nuove stazioni, e fra il 2003 e il 2007, che rappresenta l'espansione più imponente con 59 km di nuove linee di metropolitana, 28 km di linee di metropolitana leggera e 81 nuove stazioni. In seguito a quest'ultimo ampliamento, la rete metropolitana di Madrid è diventata un sistema interurbano di trasporto che raggiunge anche alcune città dell'area metropolitana di Madrid. In totale, la rete metropolitana al 2010 misura 293 km (Tabella 1).

Tabella 1 – Sintesi degli ampliamenti subiti della rete metropolitana di Madrid

Anno	Lunghezza (km)	Stazioni	Domanda (milioni di passeggeri)
1995	121	164	397
2006	227	237	657
2008	284	294	685
2009	284	294	649
2010	293	300	627

Il sistema di metropolitana è connesso con il sistema di metropolitana leggera, in esercizio dal 2007, e con il sistema di ferrovie regionali, che servono le medio-lunghe distanze e mettono in collegamento la Capitale con le città circostanti.

La metropolitana di Madrid (figura 1) è la seconda per lunghezza in Europa, preceduta solo da quella di Londra, e l'ottava metropolitana più lunga nel mondo, benché Madrid sia approssimativamente la quindicesima area metropolitana nel mondo per numero di abitanti.

Successivamente all'espansione della rete, è stato registrato anche l'aumento del numero di spostamenti effettuati utilizzando la metropolitana. Tra il 1995 e il 2010 si è registrato un aumento della domanda pari al 58%. Senza dubbio, l'espansione della metropolitana e l'aumento della domanda di spostamento registrati nel corso degli anni mostrano il potenziale impatto che l'espansione della rete metropolitana ha avuto sui cambiamenti avvenuti nel sistema territoriale e nella distribuzione della popolazione nell'area metropolitana.

Questo lavoro è basato sui dati dell'indagine EDM (Indagine a domicilio sulla mobilità) condotta nel 2004 dalla società che gestisce i trasporti collettivi nell'area metropolitana di Madrid. L'indagine si riferisce agli spostamenti effettuati un giorno feriale medio nel periodo ottobre-novembre 2004 ed è stata condotta intervistando la popolazione di età superiore a 4 anni e residente nell'area metropolitana di Madrid. Il numero totale di spostamenti registrato è risultato pari a 14.511.397. Questi spostamenti comprendono sia spostamenti effettuati per motivo di studio o lavoro (che costituiscono la mobilità sistematica) sia spostamenti effettuati per altri motivi (mobilità non sistematica). Circa il 60% degli spostamenti sono stati effettuati per il motivo lavoro e sono stati registrati in media 2,60 spostamenti per abitante. Se confrontato

con i risultati ottenuti dalla precedente indagine sulla mobilità svolta nel 1996, il numero medio di spostamenti per abitante ha subito un aumento del 20,3%.

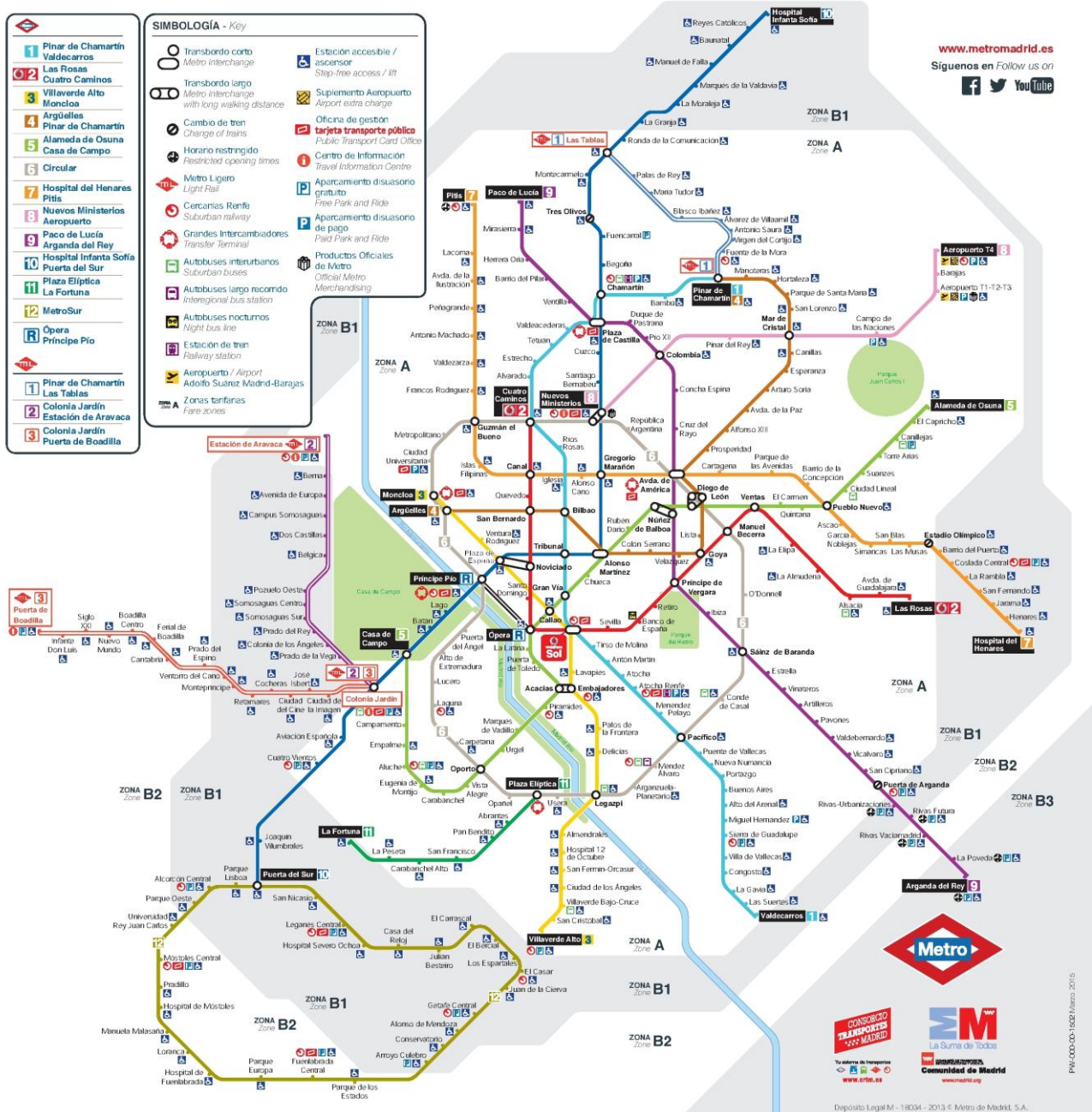


Figura 1 - Piano della Metropolitana di Madrid (2015)

Fonte: Consorcio Regional de Transportes de Madrid

In relazione alla scelta modale, il 54,7 % degli spostamenti registrati sono stati effettuati utilizzando i trasporti collettivi, e il 45,3% utilizzando il veicolo privato. Dall'analisi dei dati è emerso che il sistema di trasporto collettivo più utilizzato corrisponde alla metropolitana, scelta dal 37,3% degli utenti. Si è registrato un aumento di circa il 10 % rispetto allo stesso parametro rilevato nell'indagine sulla mobilità del 1996. Questo aumento di spostamenti in metropolitana è imputabile all'espansione subita dalla rete nel corso degli anni.

La maggior parte degli spostamenti hanno come origine le zone centrali della città, anche se i risultati dell'indagine hanno mostrato un aumento del numero di spostamenti generati a partire dalle zone periferiche rispetto ai risultati ottenuti con l'indagine condotta nel 1996.

Nel dettaglio, la maggior parte degli spostamenti effettuati utilizzando i sistemi di trasporto collettivo si origina dalle zone centrali, ma, in generale, in tutta l'area urbana si è registrata la diminuzione degli spostamenti effettuati utilizzando il veicolo privato.

4. Analisi e definizione delle variabili che influenzano la generazione degli spostamenti

4.1 Spostamenti giornalieri effettuati utilizzando la metropolitana

Le variabili che intervengono nel processo di generazione degli spostamenti effettuati dalla popolazione residente sono molteplici. In primo luogo, la domanda di mobilità dipende dalle caratteristiche dell'offerta di trasporto e dalle caratteristiche degli utenti. In aggiunta, come già detto in precedenza, il sistema dei trasporti e il sistema territoriale si influenzano reciprocamente per cui la scelta di effettuare o meno uno spostamento e le caratteristiche dello spostamento, quali modo di trasporto e percorso utilizzato, dipendono anche dalle variabili relative al sistema territoriale e all'uso del suolo. Di conseguenza, è necessario studiare le variabili e individuare quelle più significative ai fini della generazione degli spostamenti.

Dall'analisi della letteratura riguardante lo studio delle interazioni trasporti-territorio e del caso di studio, le variabili studiate possono essere suddivise in variabili relative alle caratteristiche socio-economiche della popolazione, all'uso del suolo, all'accessibilità, e all'offerta di trasporto. Tutte le variabili sono state definite per quartieri (*barrios*) in base alla zonizzazione ufficiale del territorio della città.

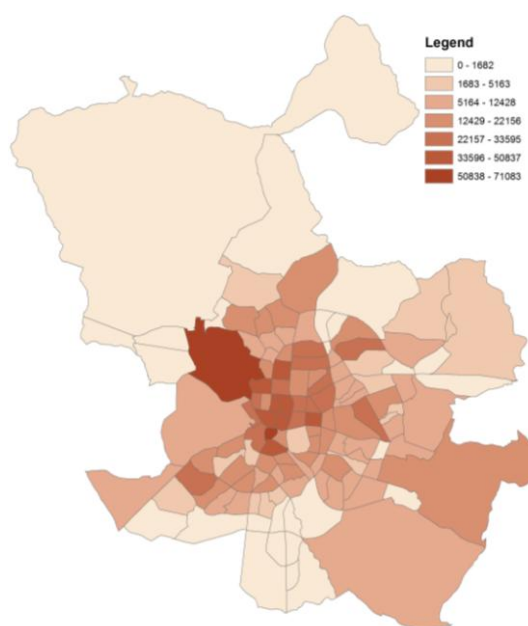


Figura 2 - Spostamenti giornalieri effettuati in metropolitana

In particolare, l'obiettivo è studiare le variabili che intervengono nel processo di generazione degli spostamenti effettuati utilizzando la metropolitana. Come si osserva dalla figura 2, la maggior parte degli spostamenti sono concentrati nelle zone centrali della città, che risultano essere anche quelle meglio servite dal sistema metropolitano. Una quota notevole di spostamenti è localizzata anche nelle zone sud-orientali della città. Infatti, in queste zone, come ampiamente documentato dagli studi del settore presenti in letteratura (Calvo *et al.*, 2013), negli ultimi anni si è registrato un progressivo aumento della popolazione in risposta alla realizzazione di nuove tratte e nuove stazioni della rete metropolitana. Diversa è la situazione che si registra nelle zone settentrionali della città. Infatti, il numero di spostamenti giornalieri emessi è basso in quanto la maggior parte dell'estensione di queste zone è area parco. Queste zone risultano, quindi, scarsamente popolate e la struttura urbana presenta caratteristiche diverse rispetto al resto della città.

4.2 Variabili socio-economiche

Le variabili socio-economiche della popolazione analizzate nel presente studio sono la popolazione totale, la popolazione maschile, la popolazione femminile, l'età media della popolazione, il titolo di studio, la situazione lavorativa, il settore di occupazione, la popolazione attiva, il numero medio di componenti del nucleo familiare, il numero di famiglie, il numero medio di auto possedute per nucleo familiare.

La popolazione totale rappresenta il potenziale bacino di utenza del servizio di metropolitana, per cui l'analisi della distribuzione della popolazione sul territorio e delle sue caratteristiche costituisce un'attività essenziale per poter comprendere la generazione degli spostamenti.

Come mostrato dalle figure seguenti (figura 3), il numero totale di residenti per zona dipende dall'estensione della singola zona, per cui le zone più ampie presentano un maggior numero di abitanti rispetto alle zone meno estese. La popolazione si divide più o meno a metà tra maschi e femmine, anche se la popolazione di sesso femminile è prevalente in quasi tutte le zone in cui è stata suddivisa l'area di studio. La distribuzione spaziale della popolazione maschile e quella della popolazione femminile seguono entrambe la distribuzione della popolazione totale. Generalmente si analizza separatamente la popolazione maschile da quella femminile perché potrebbero verificarsi differenze nei comportamenti di viaggio.

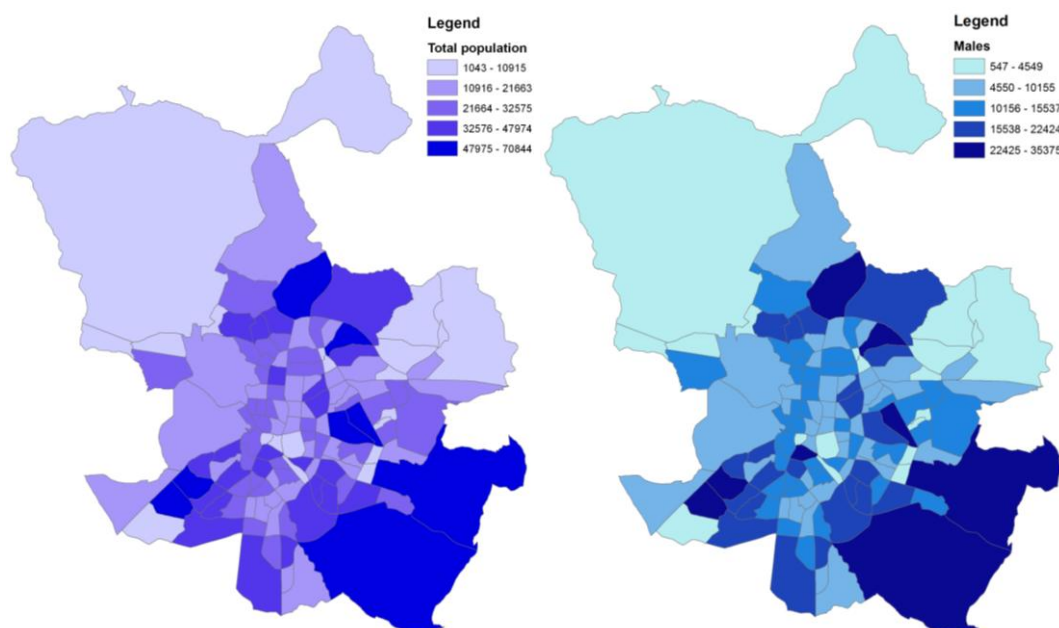


Figura 3 - Popolazione totale (a), popolazione maschile (b)

L'età della popolazione è un altro fattore che può influire sul numero di spostamenti effettuati utilizzando la metropolitana. Infatti, a parità di altre condizioni, si può verificare che una persona adulta effettua un certo numero di spostamenti al giorno e sceglie di spostarsi utilizzando una determinata modalità di trasporto, mentre un giovane preferisce spostarsi utilizzando un'altra modalità di trasporto ed effettuare più spostamenti giornalieri. L'età media della popolazione residente per zona varia da 32,5 a 48,5 anni. Osservando la rappresentazione grafica della distribuzione della popolazione secondo l'età media (figura 4a), la popolazione in media più giovane è localizzata nelle zone più esterne della fascia orientale della città, mentre la popolazione con età media più alta si trova nelle zone centrali e settentrionali.

Il grado di istruzione della popolazione è stato studiato riconducendo a tre livelli i diversi titoli di studio. Risulta che nella maggior parte delle zone la popolazione possiede prevalentemente un titolo di studio di livello basso. Le zone in cui la maggior parte della popolazione possiede un titolo di studio alto sono localizzate nella fascia centro-settentrionale della città.

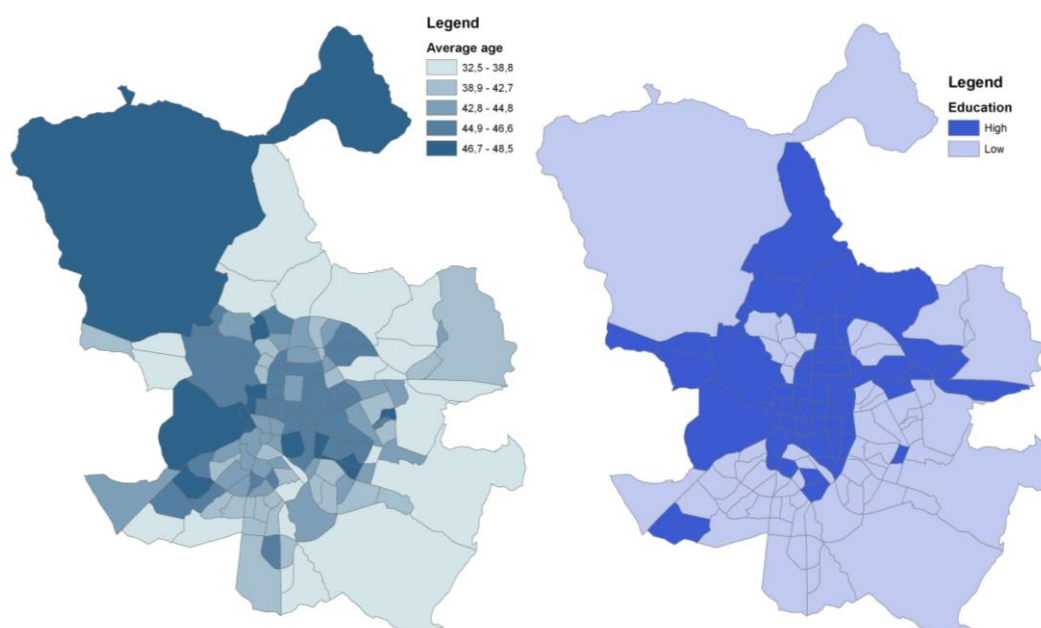


Figura 4 - Età media della popolazione (a), livello di istruzione (b).

La distribuzione sul territorio di occupati, disoccupati, inoccupati e studenti segue la distribuzione della popolazione totale, mentre dalla percentuale di ciascuna categoria è possibile individuare per ciascuna zona la categoria prevalente (figura 5). In generale, la percentuale di occupati è nettamente superiore alle percentuali registrati per le altre categorie. Inoltre, si osserva che le percentuali più alte di occupati si registrano nelle zone suburbane della città, in cui risiede la popolazione avente età media più bassa.

Dai dati relativi al settore di occupazione risulta che la maggior parte della popolazione attiva lavora nel settore terziario (figura 6). Come mostrato in figura, le percentuali degli occupati nel settore terziario sono molto più alte rispetto alle percentuali degli occupati nel settore primario e secondario. Questo fenomeno può essere spiegato prendendo in considerazione il fatto che le attività appartenenti al settore primario e secondario sono localizzate nei centri abitati limitrofi che appartengono all'area metropolitana di Madrid.

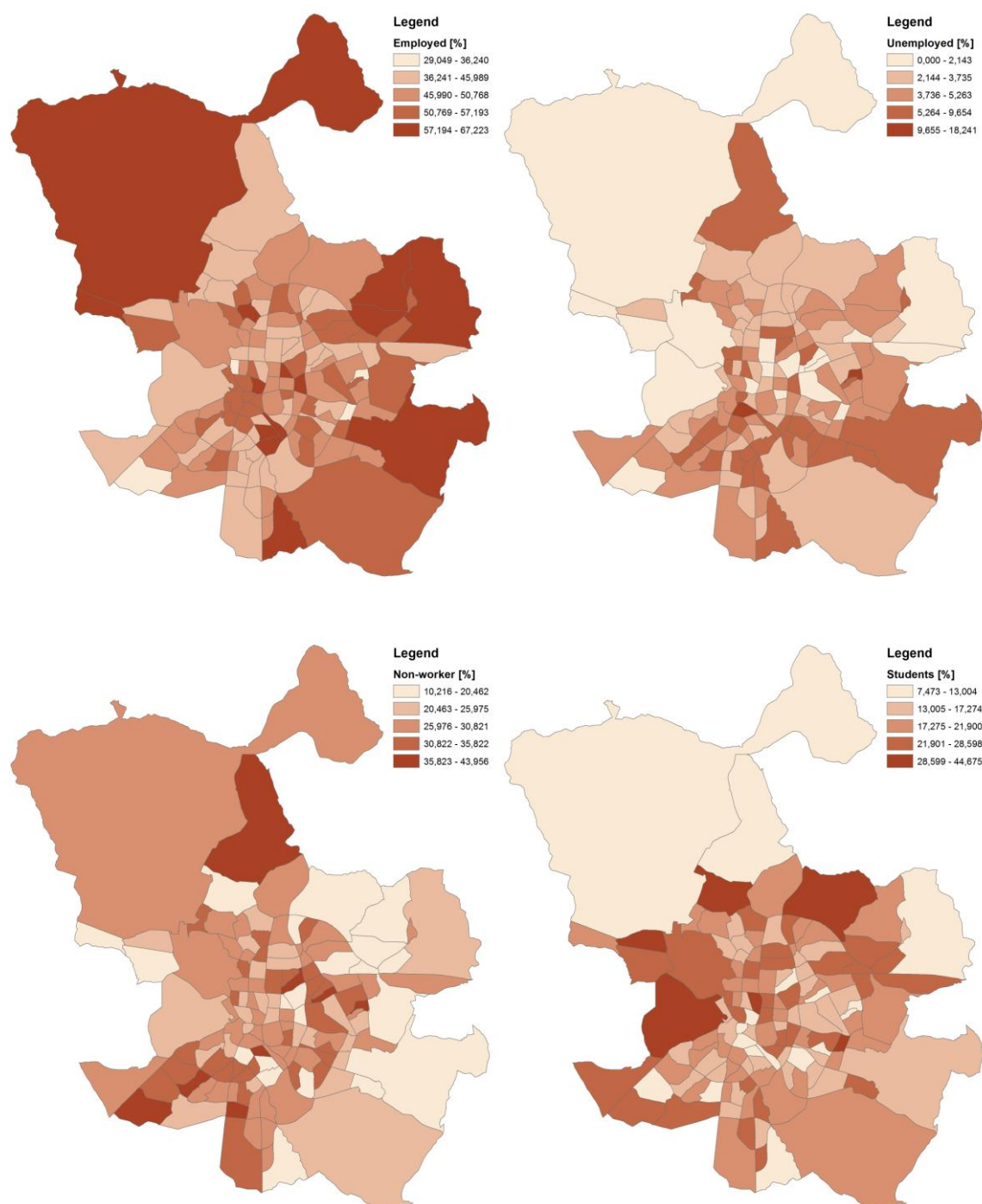


Figura 5 - Percentuale occupati (a), disoccupati (b), inattivi (c), studenti (d)

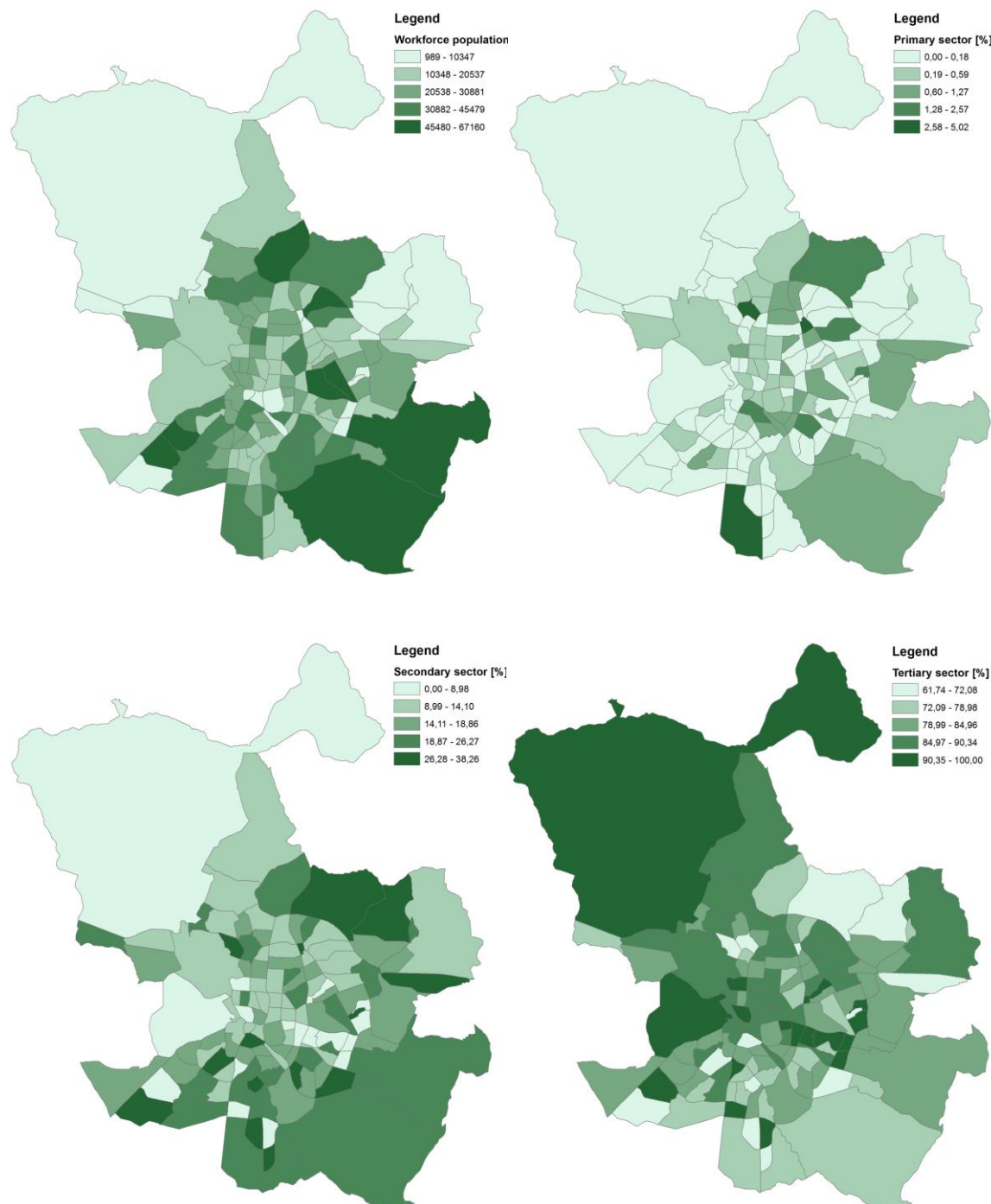


Figura 6 - Popolazione attiva (a), occupati settore primario (b), secondario (c), terziario (d)

Un'altra unità di misura che può essere utilizzata per quantificare il numero di potenziali utenti di un sistema di trasporto è rappresentata dal nucleo familiare. Infatti, il numero di spostamenti effettuati dai singoli individui può essere relazionato al numero di spostamenti effettuati dai membri del nucleo familiare a cui lo stesso individuo appartiene.

Il numero di famiglie per zone varia da 143 a 26.716 e la distribuzione nell'area di studio segue la distribuzione della popolazione totale. Il numero medio di componenti per famiglia varia da 2,11 a 4,54 e le famiglie più numerose sono localizzate nelle zone non appartenenti al centro della città (figura 7).

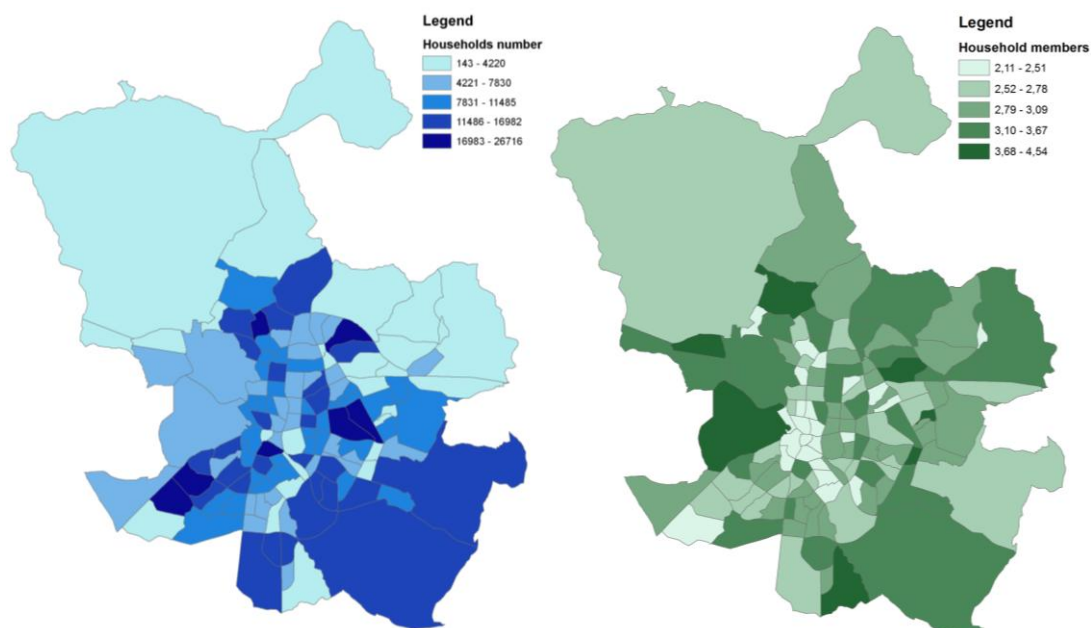


Figura 7 - Numero di famiglie (a), numero di medio componenti per famiglia (b)

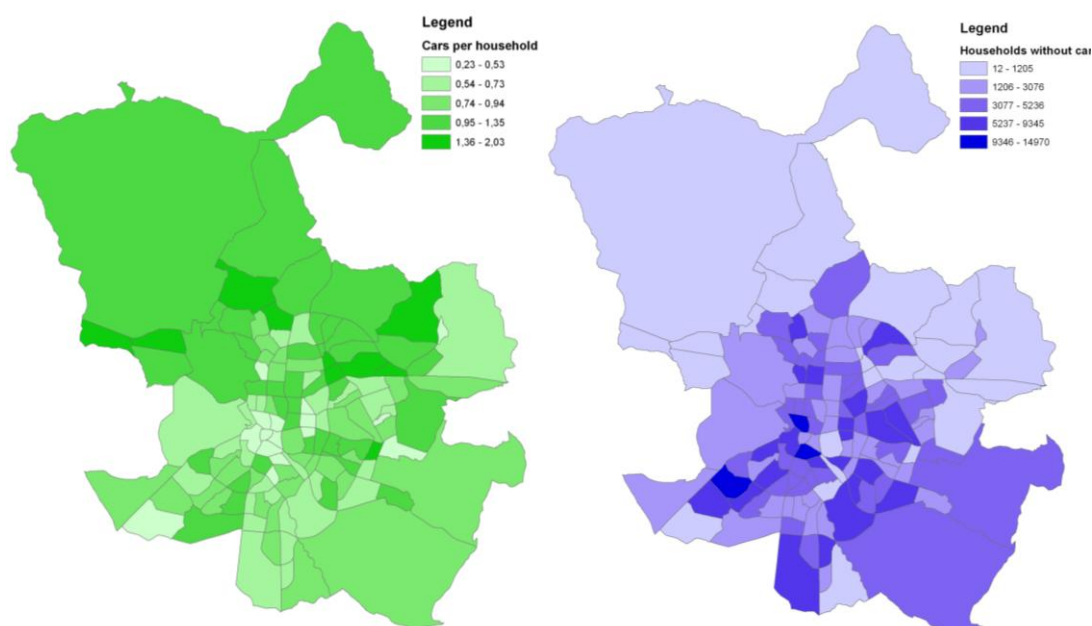


Figura 8 - Numero medio di auto per famiglia (a), numero di famiglie senza auto (b)

Un fattore che presenta una forte influenza sul numero di spostamenti effettuati utilizzando la metropolitana è il numero di automobili per famiglia. Infatti, a seconda della disponibilità dell'autovettura privata all'interno del nucleo familiare, il singolo individuo sceglie se effettuare o meno lo spostamento e se utilizzare un sistema di trasporto collettivo.

Il numero medio di auto per famiglia varia da 0,23 a 2,03 mentre il numero di famiglie che non dispone di un'automobile varia da 12 a 14.970. Le zone in cui si registra il maggior numero di famiglie che non possiede un'autovettura privata sono localizzate nelle zone centrali della città (figura 8). Questo risultato è coerente con i dati relativi al numero di spostamenti in metropolitana, in quanto si evidenzia che i componenti delle famiglie che non dispongono di un'autovettura privata effettuano spostamenti utilizzando la metropolitana.

4.3 Variabili di land use

Per quantificare le caratteristiche del land use, sono state elaborate diverse variabili a partire dalla classificazione del territorio proposta dal Comune di Madrid. Utilizzando la carta degli usi del suolo, sono stati determinati quattro classi di uso del suolo: area occupata da edifici residenziali, area occupata da edifici destinati ad attività economiche e produttive, area relativa spazi urbani di aggregazione e infrastrutture e area occupata da riserve naturali e parchi. Per ciascuna zona di riferimento è stata determinata l'estensione di ogni classe di uso del suolo e, di conseguenza, la percentuale relativa a ciascuna tipologia rispetto al totale dell'estensione superficiale. Altre variabili di land use sono quelle che riguardano la densità di popolazione, che può essere determinata in termini di abitanti totali, oppure per categorie, quali occupati e studenti. Inoltre, è stata determinata la densità di posti di lavoro, che rappresenta un indicatore delle attività economiche presenti sul territorio. È stato determinato anche un indice che fornisce informazioni sul mix tra residenti, occupati e studenti, e un indice che fornisce informazioni sul mix di diversi land use.

Rappresentando su mappa i dati relativi alla caratterizzazione prevalente di ciascuna zona, emerge, come riportato nella mappa sintetica relativa al land use (figura 9), che le zone in cui la superficie è coperta prevalentemente da edifici residenziali (RES) sono localizzate nella parte centrale della città e hanno un'estensione complessiva minore rispetto a quella delle zone in cui la maggior parte della superficie è occupata da spazi di aggregazione e infrastrutture urbane (DOT). Le zone costituite prevalentemente da aree naturali (RUR) sono soltanto due e sono localizzate nella parte nord della città, in corrispondenza di una vasta Riserva Naturale. Solo una zona risulta avere come destinazione d'uso prevalente quella relativa agli edifici realizzati per svolgere attività economiche e produttive (SERV). La maggior parte delle zone ha prevalenza di superficie occupata da dotazione infrastrutturale e spazi urbani.

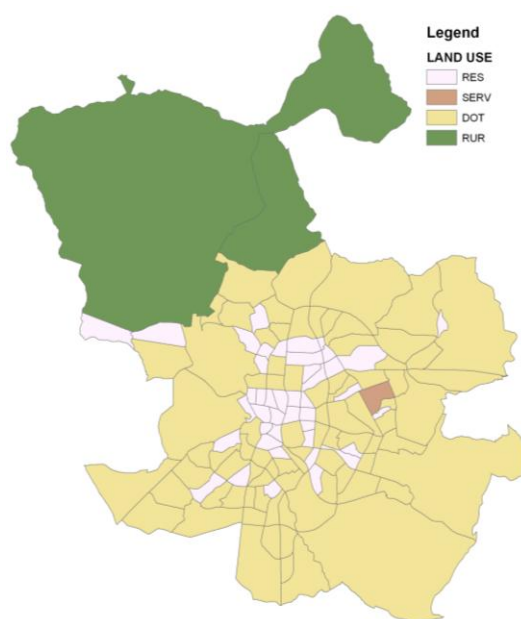


Figura 9 - Land use prevalente per zona

La densità della popolazione nell'area di studio varia da 0 a 600 abitanti per ettaro. Dall'analisi dei valori della densità della popolazione, risulta che le zone centrali hanno una densità di popolazione maggiore rispetto alle zone più esterne. Anche la densità dei posti di lavoro presenta una distribuzione di valori più alti in corrispondenza delle zone centrali e di valori più bassi nelle zone periferiche. I valori della densità dei posti di lavoro varia da 0 a 608 posti di lavoro per ettaro (figura 10). Le zone centrali della città sono quelle maggiormente consolidate, per cui risultano densamente abitate e presentano un gran numero di attività economiche e di servizi.

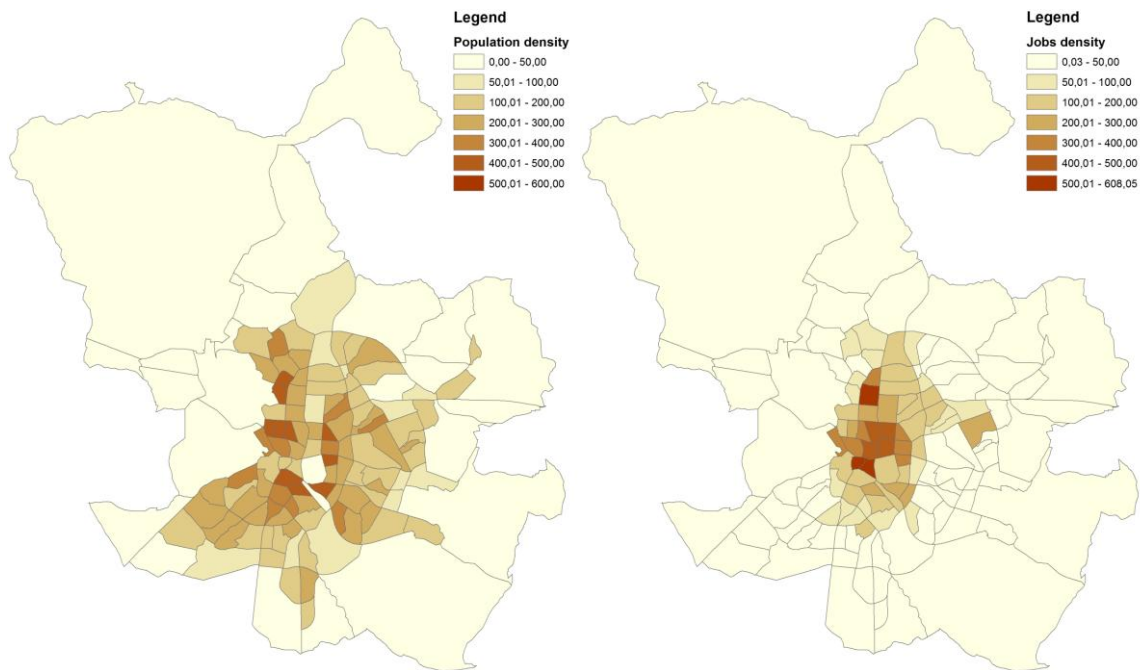


Figura 10 - Densità della popolazione (a) e densità dei posti di lavoro (b)

A partire dai dati iniziali è stato ricavato un indice che rappresenta il mix tra residenti, posti di lavoro e studenti, calcolato come il rapporto tra la somma di lavoratori e studenti e il numero di residenti totali (Abreu e Silva, 2014). Questo indice varia da 0 a 100 assumendo valori prossimi a 0 quando il numero di lavoratori e studenti è molto più basso del numero di residenti totali, e valori prossimi a 100 quando la quasi totalità dei residenti è costituita da lavoratori e studenti. Il valore medio assunto da questo indice nell'area di studio è pari a 64 (figura 11a).

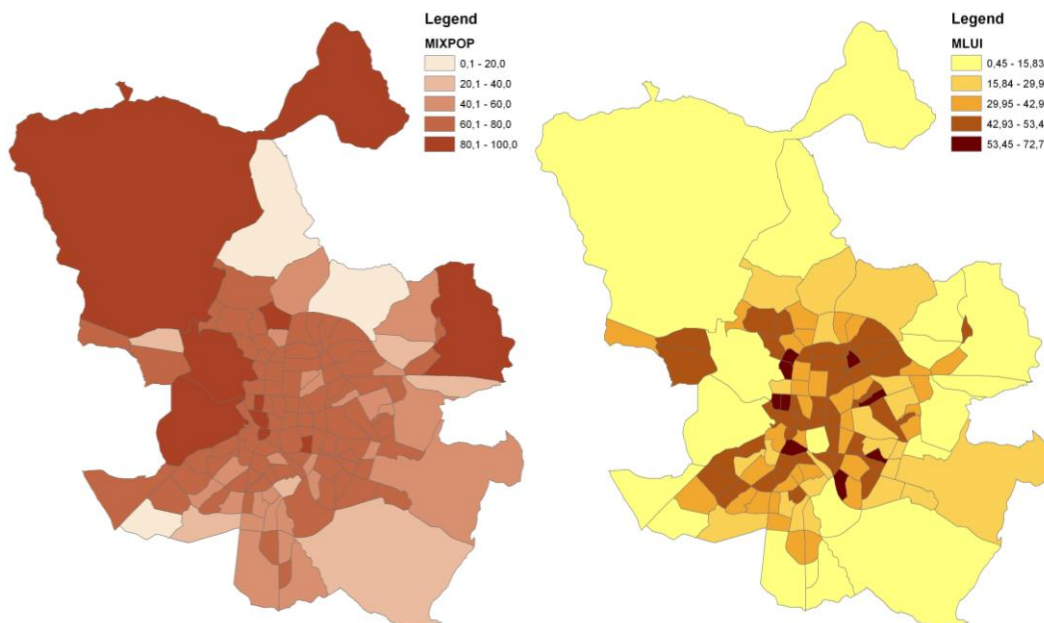


Figura 11 - Indice MIXPOP (a) e indice MLUI (b)

Il secondo indice considera il mix di land use che si realizza all'interno della zona considerata, cioè in che misura coesistono nella stessa zona i diversi usi del suolo. L'indice MLUI (Mixed Land Use Index) è stato calcolato per ciascuna zona come rapporto tra l'estensione della superficie residenziale e l'estensione della

superficie totale (van den Hoek, 2008). Il valore ottimale assunto da MLUI è pari a 50 e corrisponde al caso di una zona caratterizzata da una struttura urbana che favorisce gli spostamenti a piedi. Infatti, al valore di MLUI pari a 50 corrisponde un mix di superficie residenziale e di superficie non residenziale pari a 50/50. Al contrario, una zona che possiede MLUI pari a 100 è costituita solo da superficie residenziale, mentre una zona con MLUI pari a 0 non presenta superficie residenziale (Inbakaran & Howes, 2011). Come si evince dalla rappresentazione grafica di questo indice, le zone periferiche dell'area di studio assumono valori bassi mentre solo per alcune zone poste nella parte centrale della città si hanno valori di MLUI compresi tra 42 a 53 e, quindi, rappresentativi di un buon mix di usi del suolo tra residenziale e non residenziale (figura 11b).

4.4 Variabili di accessibilità

L'accessibilità è stata considerata definendo due diverse variabili, quali l'accessibilità attiva della zona e la percentuale di popolazione di ciascuna zona che risiede a meno di 600 metri dalla stazione della metropolitana più vicina.

L'accessibilità attiva della zona, indicata con AA_o , è stata misurata sulla rete della metropolitana e definita mediante un modello di tipo gravitazionale:

$$AA_o = \sum_{d=1}^n \frac{Add_d}{D_{od}} \quad [1]$$

in cui Add_d è il numero di posti di lavoro della zona d come destinazione e D_{od} è la distanza che è necessario percorrere per spostarsi dalla zona o alla zona d . Questa distanza può essere misurata sulla rete stradale oppure sulla rete della metropolitana. Quando l'obiettivo dell'analisi è lo studio degli spostamenti effettuati utilizzando la metropolitana, è più opportuno determinare una misura di accessibilità legata al sistema della metropolitana. Di conseguenza, nel caso in esame, D_{od} corrisponde alla distanza misurata sulla rete della metropolitana e calcolata usando una riproduzione della rete effettuata utilizzando il software ArcGIS.

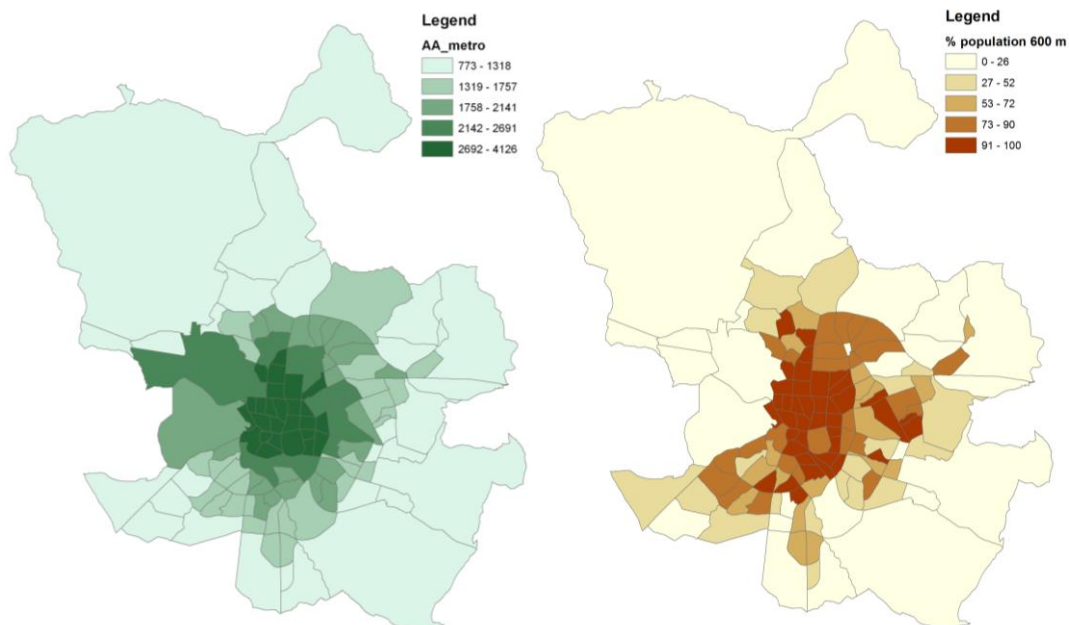


Figura 12 - Accessibilità AA (a) e percentuale popolazione residente a meno di 600 metri dalla stazione della metropolitana (b)

Dalla mappatura dei valori dell'accessibilità attiva, si vede che le zone centrali della città hanno accessibilità maggiore e man mano che ci si allontana dal centro l'accessibilità diminuisce gradualmente

(figura 12a). Questo risultato è facilmente interpretabile, in quanto le zone centrali sono quelle meglio servite dal sistema della metropolitana, che presenta più linee e più stazioni rispetto alle zone periferiche.

La percentuale di popolazione di ciascuna zona che risiede a meno di 600 metri dalla stazione della metropolitana più vicina è stata ricavata intersecando l'area di influenza di ciascuna stazione della metropolitana con la ripartizione in zone della città. Le aree di influenza sono state determinate come aree poligonali considerando una distanza massima tra la zona di residenza e la stazione della metropolitana pari a 600 metri (Calvo et al., 2013). La distanza è stata misurata sulla rete pedonale, per cui i percorsi pedonali utilizzati per ricavare l'area di influenza corrispondono ai percorsi reali che il pedone può fare per arrivare alla stazione della metropolitana. L'elaborazione è stata svolta utilizzando ArcGIS, determinando i percorsi pedonali diretti a ciascuna stazione della metropolitana di lunghezza non superiore a 600 metri. Collegando i percorsi determinati per ciascuna fermata, è stata determinata un'area poligonale che costituisce l'area di influenza. I valori di questa variabile sono più alti per le zone centrali della città, per cui queste zone presentano una migliore accessibilità al sistema della metropolitana (figura 12b).

4.5 Variabili del sistema dei trasporti

Le variabili individuate per la caratterizzazione del sistema dei trasporti riguardano la rete della metropolitana e le linee di autobus urbane.

La variabile Metro è data dal rapporto tra il numero di stazioni della metropolitana, che è possibile raggiungere percorrendo una distanza pedonale inferiore a 600 metri a partire dalla zona di residenza, e la distanza media per raggiungere una stazione della metropolitana. Entrambe queste grandezze sono state determinate utilizzando ArcGIS. Questa variabile assume valori più alti in corrispondenza delle zone che presentano un maggior numero di stazioni della metropolitana raggiungibili a piedi in meno di 600 metri. In queste zone, la disponibilità del sistema di metropolitana è maggiore rispetto alle altre zone (figura 13).

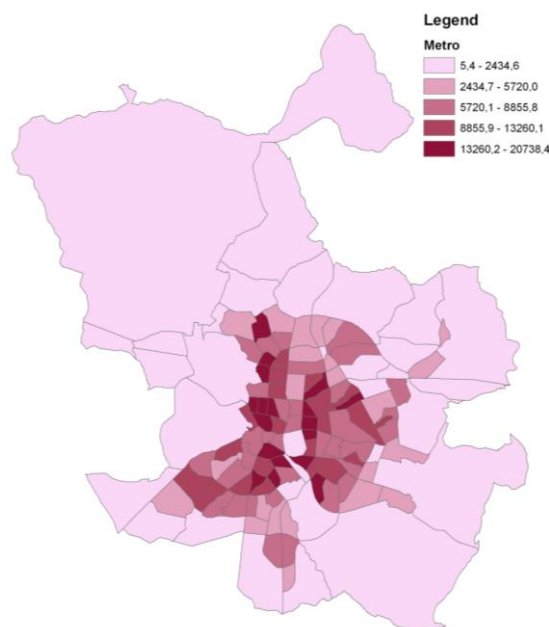


Figura 13 - Variabile Metro

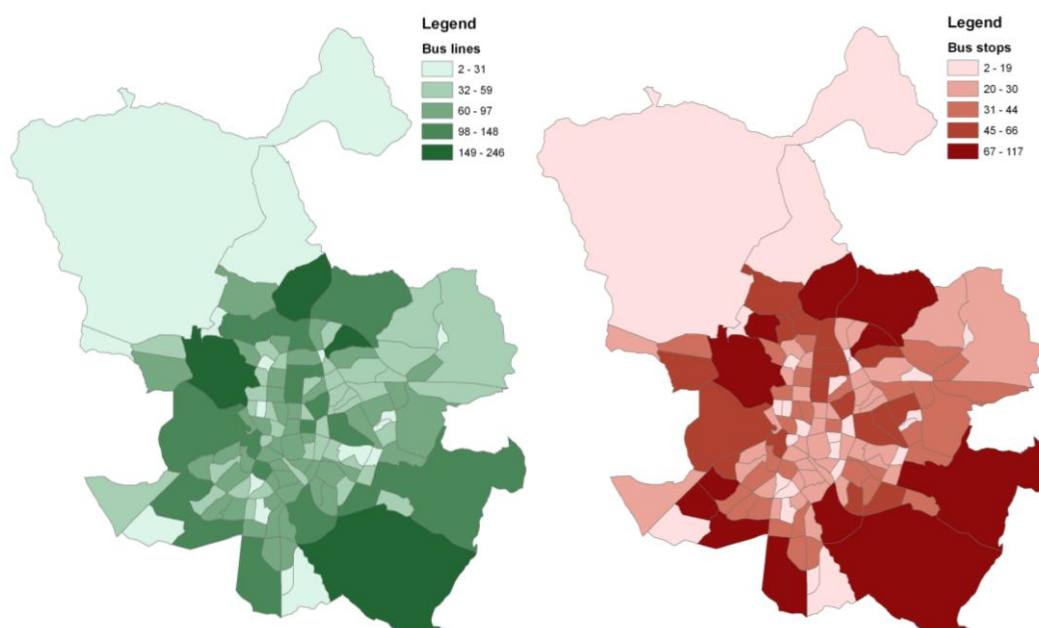


Figura 14 - Numero di linee di autobus (a), numero di fermate di autobus (b) per zona

Le variabili che si riferiscono alla rete delle linee urbane di autobus sono il numero di fermate per zona e il numero di linee per zona (figura 14). Queste variabili sono state inserite nell'analisi del sistema dei trasporti per tener in considerazione l'attitudine della popolazione residente della città di Madrid ad utilizzare i sistemi di trasporto collettivi.

5. Risultati

A partire dall'analisi svolta precedentemente, sono state individuate alcune variabili che potrebbero essere utilizzate come possibili variabili esplicative all'interno di un modello che stima il numero di spostamenti giornalieri effettuati in metropolitana.

Per prima cosa, è stata svolta un'analisi di correlazione bivariata considerando tutte le variabili definite, a fine di individuare multicollinearità fra le variabili. Infatti, per come sono state definite, soprattutto all'interno di uno stesso gruppo, alcune variabili potrebbero risultare collineari tra di loro. Per ridurre al minimo questo problema, le variabili che dall'analisi di correlazione bivariata risultano avere alta correlazione devono essere escluse dall'analisi. In base ai risultati ottenuti, per ciascuno dei quattro gruppi di variabili sono state selezionate quelle che non presentano rilevanti problemi di collinearità, come riportato nella tabella 2. I valori di correlazione più elevati sono stati osservati fra le variabili relative all'indice MLUI e alla percentuale di popolazione residente a meno di 600 metri dalla stazione della metropolitana più vicina (0,691), e tra le variabili relative all'accessibilità calcolata considerando la rete della metropolitana e alla percentuale di popolazione residente a meno di 600 metri dalla stazione della metropolitana più vicina (0,657). In ogni caso, anche i valori più alti di correlazione registrati si trovano al di sotto della soglia limite di 0,7 (Clark & Hosking, 1986).

Le variabili selezionate potrebbero, quindi, essere identificate come potenziali variabili indipendenti all'interno di un modello di regressione per la stima del numero di spostamenti giornalieri emessi nella città di Madrid.

Tabella 2 – Analisi di correlazione bivariata

	Popolazione maschile	Età media	Componenti per famiglia	Auto per famiglia	Area per dotazioni infrastrutturali	Percentuale area attività economiche	Mix popolazione	Indice mix land use	AA	Posti di lavoro	Percentuale residenti in 600 m dalla metro	Numero linee di autobus
Popolazione maschile	1											
Età media	0,040	1										
	0,656											
Componenti per famiglia	-0,060	-0,293**	1									
	0,503	0,001										
Auto per famiglia	-0,095	-0,234**	0,474**	1								
	0,288	0,008	0,000									
Area per dotazioni infrastrutturali	0,222*	-0,362**	0,200*	0,028	1							
	0,012	0,000	0,023	0,752								
Percentuale area attività economiche	-0,029	-0,034	-0,139	0,005	-0,095	1						
	0,744	0,705	0,118	0,952	0,285							
Mix popolazione	-0,044	0,683**	-0,058	-0,012	-0,217*	-0,050	1					
	0,624	0,000	0,514	0,896	0,014	0,577						
Indice mix land use	0,114	0,441**	-0,284**	-0,076	-0,560**	0,041	0,331**	1				
	0,200	0,000	0,001	0,392	0,000	0,642	0,000					
AA_metro	-0,140	0,459**	-0,349**	-0,278**	-0,374**	0,205*	0,424**	0,526**	1			
	0,116	0,000	0,000	0,001	0,000	0,020	0,000	0,000				
Posti di lavoro	0,052	0,069	-0,110	-0,095	0,172	0,534**	0,101	-0,022	0,424**	1		
	0,561	0,437	0,218	0,288	0,052	0,000	0,256	0,808	0,000			
Percentuale residenti in 600 m dalla metro	-0,049	0,604**	-0,332**	-0,291**	-0,558**	0,098	0,394**	0,691**	0,657**	0,221*	1	
	0,593	0,000	0,000	0,001	0,000	0,286	0,000	0,000	0,000	0,015		
Numero linee di autobus	0,610**	0,037	0,058	,017	0,308**	0,117	0,019	-0,139	0,000	0,417**	-0,083	1
	0,000	0,680	0,512	0,851	0,000	0,189	0,835	0,117	0,996	0,000	0,366	

** La correlazione è significativa al livello 0,01

* La correlazione è significativa al livello 0,05

6. Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati individuati e studiati i fattori che influiscono sulla scelta degli utenti di spostarsi utilizzando i trasporti collettivi. In particolare, sono stati definiti i fattori legati alle caratteristiche socio-economiche della popolazione, al land use, all'accessibilità e al sistema dei trasporti, che determinano il numero di spostamenti giornalieri effettuati utilizzando la metropolitana.

Come caso di studio è stata presa in considerazione la città di Madrid, la cui rete metropolitana ha subito recentemente importanti ampliamenti con l'inserimento di nuove linee, nuove stazioni e nuove tratte. Negli anni successivi alla realizzazione di questi interventi sono state registrate rilevanti variazioni nella localizzazione della popolazione e delle attività economiche, oltre che nei comportamenti di viaggio. Infatti, è stato registrato anche un notevole aumento della domanda di passeggeri del sistema di metropolitana della città. A partire dall'analisi della letteratura del settore, sono state individuate quattro categorie di variabili legate alle caratteristiche socio-economiche della popolazione, dell'uso del suolo, dell'accessibilità e del sistema dei trasporti. Le variabili appartenenti ai diversi gruppi sono state studiate realizzando la mappatura dei valori utilizzando ArcGIS. Utilizzando queste rappresentazioni grafiche e in base alle caratteristiche della città presa in esame, per ciascuna variabile è stata elaborata una approfondita analisi nell'ottica del potenziale impatto che questa potrebbe avere sulla generazione degli spostamenti giornalieri effettuati utilizzando la metropolitana. Infine, le variabili definite sono state analizzate realizzando un'analisi di correlazione

bivariata con l'obiettivo di mettere in evidenza le variabili che presentano problemi di collinearità. In tal modo, si è giunti alla definizione di un gruppo di variabili che potrebbero essere identificate come potenziali variabili indipendenti all'interno di un modello di regressione per la stima del numero di spostamenti giornalieri emessi nella città di Madrid ed effettuati utilizzando la metropolitana.

7. Riconoscimenti

Il presente articolo è cofinanziato con il sostegno della Commissione Europea, Fondo Sociale Europeo e della Regione Calabria. Gli autori sono i soli responsabili di questo articolo e la Commissione Europea e la Regione Calabria declinano ogni responsabilità sull'uso che potrà essere fatto delle informazioni in essa contenute.

8. Bibliografia

- Apel D. (1992), Verkehrskonzepte in europäischen Städten. Erfahrungen mit Strategien zur Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl. Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik.
- 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.
- Calvo F.J., de Oña J., Arán F. (2013), Impact of the Madrid subway on population settlement and land use, *Land Use Policy*, 31, 627-639.
- Clark W.A., Hosking P.L. (1986) *Statistical methods for geographers*, New York: Wiley.
- de Abreu e Silva J. (2014), Spatial self-selection in land-use-travel behavior interactions: Accounting simultaneously for attitudes and socioeconomic characteristics, *The Journal of Transport and Land Use*, 7, 2: 63-84.
- 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.
- Handy S. (1995), Understanding the link between urban form and travel behavior. Paper presented at the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board, held in Washington, D.C., USA.
- Hansen W.G. (1959), How accessibility shapes land use. *Journal of American Institute of Planners*, 25, 1: 73-76.
- Holz-Rau C., Kutter E. (1995), Verkehrsvermeidung. Siedungsstrukturelle und organisatorische Konzepte. Materialien zur Raumentwicklung Heft 73. Bonn: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung.
- Inbakaran C., Howes K. (2011), Mixed land use index and public transport catchments, *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings*.
- Kennedy C., Miller E., Shalaby A., Maclean H., Coleman J. (2005), The four pillars of sustainable urban transportation, *Transport Reviews*, 25, 4: 393-414.
- Luk J. (2003), Reducing car travel in Australian cities: review report, *Journal of Urban Planning and Development*, 129, 2: 84-96.
- Pharoah T., Apel D. (1995) *Transport Concepts in European Cities*. Aldershot: Ashgate.
- Redman L., Friman M., Gärling T., Hartig T. (2013), Quality attributes of public transport that attract car users: A research review, *Transport Policy*, 25, 119-127.
- Van den Hoek, Joost, (2008), The MXI (Mixed-use index). Paper presented at the 44th ISOCARP Congress, held in Dalian, China.

ABSTRACT

Current orientations of transportation planning aim at shifting transportation demand from private vehicles towards transit systems. In order to reach this objective, transportation planning must be conveniently integrated with territorial planning, because some interventions made on territorial system could address the modal split towards transit systems.

The aim of this research is to investigate on the factors impacting daily trips made by Metro system in the city of Madrid (Spain), chosen as case study. Recently, the metro system in Madrid was considerably expanded. As a result, relevant variations were recorded in the spatial distribution of residences and economic activities. Therefore, the case study provides the perfect context for assessing the relationships among variables affecting trips generation.

In order to individuate the main factors that impact on daily trips generation, a great amount of variables were analysed. This analysis led to the identification of four main groups of variables related to socio-economic characteristics of population, land use, accessibility, and transportation system. The results show important indications about the factors which could affect daily trips generation made by metro system.