

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

## Effetti di congestione per modelli di traffico su rete stradale: uno studio su Bologna

Relatore:  
Prof. Armando Bazzani

Presentata da:  
Francesco Salvi

Correlatore:  
Dott. Alessandro Fabbri

Anno Accademico 2020/2021



## Abstract

Nell'ultimo decennio, un notevole interesse nell'ambito della modellizzazione del traffico si è sviluppato attorno al concetto dei Diagrammi Fondamentali Macroscopici (MFD), resi popolari da un celebre esperimento condotto nel 2008 nella città giapponese di Yokohama. Tali diagrammi mettono in relazione le medie spaziali di flusso, densità e velocità su un intero network stradale e risultano sotto certe condizioni una proprietà intrinseca di quest'ultimo, indipendente dalla domanda di mobilità degli utenti, costituendo così potenzialmente un importante strumento nel controllo dinamico del traffico. Il presente lavoro si propone quindi di indagare l'esistenza di MFD in un network extraurbano attorno alla città di Bologna, composto sia da tratti di autostrada e tangenziale che da strade statali e provinciali. I diagrammi sono stati costruiti utilizzando una simulazione di traffico sulla regione Emilia-Romagna, basata su un input di dati di mobilità provenienti da utenti della rete TIM che consentono di ricavare su base oraria gli spostamenti aggregati dei veicoli. Se il carico è sufficientemente alto, si osserva negli MFD l'emergere di fenomeni di isteresi, a causa dei quali si trovano a parità di densità media valori differenti di flusso e velocità. Le cause dell'isteresi sono quindi analizzate nel dettaglio studiando gli effetti della congestione sulla variabilità spaziale della densità, che risulta essere un fattore chiave insieme all'eterogeneità della rete nella forma dei diagrammi.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Diagrammi Fondamentali Macroscopici</b>	<b>4</b>
1.1 Variabili macroscopiche . . . . .	4
1.2 Diagrammi Fondamentali . . . . .	5
1.3 Diagrammi Fondamentali Macroscopici . . . . .	8
1.4 Eterogeneità e isteresi . . . . .	11
<b>2 Modello e simulazioni</b>	<b>14</b>
2.1 Struttura del modello . . . . .	14
2.2 Cartografia . . . . .	14
2.3 Dati TIM e matrici OD . . . . .	16
2.4 Dinamica degli agenti . . . . .	16
2.5 Costruzione degli MFD . . . . .	19
<b>3 Risultati</b>	<b>21</b>
3.1 Carico standard . . . . .	21
3.2 Carico potenziato . . . . .	26
3.3 Isteresi . . . . .	29
3.4 Discussione . . . . .	33
<b>Bibliografia</b>	<b>35</b>

# Introduzione

Il problema della saturazione della circolazione e dell'insorgere nella dinamica del traffico di fenomeni ricorrenti di congestione è ad oggi uno degli ostacoli fondamentali nello sviluppo delle città, con importanti ricadute sociali, economiche e ambientali. Il congestionamento della rete stradale, infatti, causa perdite di tempo quotidiane, con ritardi negli spostamenti che generano stress e incertezza, e comporta inoltre l'aumento delle emissioni, dell'inquinamento atmosferico e acustico e un incremento nel numero di incidenti, nei tempi di risposta emergenziale e di spedizione dei beni, tutti fattori che determinano diffuse perdite economiche di varia natura e un complessivo peggioramento della qualità della vita [1, 2]. È stato stimato, ad esempio, che solo nel 2019 a Roma siano state perse mediamente da ogni individuo nel corso dell'anno un totale di 172 ore negli intasamenti durante le ore di punta, con addirittura un incremento medio di oltre 20 minuti per ogni mezz'ora di viaggio [3]. Dal punto di vista economico, invece, combinazioni degli effetti citati danno luogo negli Stati Uniti a una perdita stimata di quasi 90 miliardi di dollari all'anno [4, 5].

Per studiare questo ed altri problemi, a partire dal secolo scorso si è sviluppata una florida produzione nell'ambito della teoria dei flussi di traffico, con una spinta importante soprattutto dagli anni '50 e '60 a causa dello sviluppo tecnologico dei calcolatori, che hanno consentito di creare simulazioni sempre più sofisticate. Precursori in questo campo sono i lavori di Greenshields, che nel 1935 identifica una relazione fondamentale tra densità e velocità media in una strada, riassunta nei cosiddetti diagrammi fondamentali [6]. Sulla base di questi, poi, la modellizzazione del traffico si è sviluppata in diverse direzioni, tra cui si distinguono in generale due diverse categorie di approccio: microscopico e macroscopico [7, 8, 9].

Modelli microscopici sono adatti alla descrizione di fenomeni locali, limitati nel numero di veicoli coinvolti e nell'estensione spaziale, e studiano il comportamento dei singoli agenti in funzione delle loro immediate vicinanze. La maggior parte di questi sono modelli di tipo *car-following*, basati sull'assunzione che la dinamica di un singolo veicolo dipenda direttamente da posizione, velocità e accelerazione del veicolo che lo precede, tramite meccanismi di distanziamento e risposta agli stimoli. In questo filone hanno avuto un ruolo di primo piano i lavori di Pipes (1953, *safe-distance*) [10], Newell (1961, *optimal-velocity*) [11] e Chandler (1958, *stimulus-response*) [12]. In parallelo, sono stati

sviluppati modelli *lane-changing* per descrivere lo spostamento laterale dei veicoli e, più recentemente, partendo dagli studi di Cremer e Ludwig del 1986 [13], modelli ad automa cellulare (*cellular automata*), basati sulla discretizzazione spaziale in una griglia.

Dall'altra parte, i modelli macroscopici trattano fenomeni con dimensioni spaziotemporali estese e un elevato numero di veicoli coinvolti, adottando una descrizione aggregata al livello dell'intero network. Questo tipo di approccio si basa sullo studio di quantità globali medie quali la densità (#veicoli/km), il flusso (#veicoli/h) e la velocità (km/h), ignorando invece il comportamento microscopico dei singoli veicoli, e considera i flussi di traffico come flussi unidimensionali incompressibili nell'approssimazione continua. Sfruttando l'analogia con la fluidodinamica, Lighthill e Whitham nel 1955 [14] e Richards nel 1956 [15] hanno sviluppato il modello LWR, fondamento di numerosi studi e applicazioni successive, che esprime la conservazione del numero di veicoli tramite una semplice equazione differenziale alle derivate parziali, corrispondente alla canonica equazione di continuità per i fluidi. Insieme alla relazione fondamentale di Greenshields, tale equazione ammette come soluzioni, nelle transizioni tra stati di traffico, onde d'urto, motivo per cui nei sistemi reali la congestione si considera propagarsi come un'onda.

A metà strada tra queste due categorie si colloca poi una classe di modelli ibridi, talvolta descritti come mesoscopici, che adottano caratteristiche di entrambe le descrizioni. Tra questi il filone principale è dovuto ai lavori di Prigogine e Herman del 1971 [16], il cui modello si basa sulla teoria cinetica dei gas e tratta il moto dei veicoli come quello di un sistema termodinamico di particelle, in termini probabilistici.

In tempi più recenti, nell'ambito della modellizzazione macroscopica, si è sviluppato un notevole interesse attorno al concetto dei Diagrammi Fondamentali Macroscopici (MFD), portati in auge dai risultati sperimentali di Geroliminis e Daganzo del 2008 [17]. Partendo da dati sul campo provenienti dalla città giapponese di Yokohama, infatti, lo studio mostra come aggregando le misure di spira dei singoli rilevatori (*loop detectors*), i cui diagrammi fondamentali presentavano un'alta dispersione, è stato possibile ottenere dei diagrammi macroscopici ben definiti che mettevano in relazione densità, flusso e velocità mediate su tutto il network, con una bassa dispersione. Daganzo e Geroliminis [18, 19] postulano inoltre che una tale relazione macroscopica debba esistere sempre in regioni omogeneamente congestionate e che in esse gli MFD siano unicamente una proprietà del network, dipendenti dalla sua struttura ma invarianti rispetto alla domanda, costituendo così potenzialmente un importante strumento nel controllo dinamico del traffico.

Negli anni successivi, numerosi sforzi di ricerca sono poi stati impiegati per cercare di capire quali proprietà un network debba possedere per ammettere dei diagrammi ben definiti e per indagare l'impatto dell'eterogeneità e della struttura della rete sulla dispersione e sull'insorgenza negli MFD di fenomeni di isteresi, in particolar modo nei network autostradali.

Inserendosi nel solco di Geroliminis e Daganzo, il presente lavoro si propone quindi lo scopo di indagare l'esistenza di diagrammi fondamentali macroscopici in un net-

work eterogeneo di circa 1900 km<sup>2</sup> attorno a Bologna, che comprende tratti di autostrada e tangenziale ma anche strade statali e provinciali. Per tale studio si è usato un modello di simulazione del traffico basato su un input di dati di mobilità provenienti da traffico telefonico TIM nel mese di febbraio 2020, aggregati per costruire delle matrici Origine-Destinazione che descrivono gli spostamenti dei veicoli nella regione Emilia-Romagna.

Nel Capitolo 1 sono introdotti i concetti di base della modellizzazione macroscopica del traffico, per poi trattare il concetto dei diagrammi fondamentali macroscopici e fare una panoramica dei principali risultati conseguiti negli ultimi anni in quest'ambito. Successivamente, nel Capitolo 2 vengono descritti il funzionamento del modello di simulazione, la cartografia utilizzata e il dataset TIM, illustrando poi come sono stati costruiti gli MFD sulla rete scelta. Infine, il Capitolo 3 presenta i risultati ottenuti, in condizioni di carico normale o aumentato, analizzando quindi le cause dei fenomeni di isteresi che si osservano nei diagrammi e il loro legame con la variabilità spaziale della densità.

# Capitolo 1

## Diagrammi Fondamentali Macroscopici

### 1.1 Variabili macroscopiche

Dal punto di vista macroscopico, il traffico è descritto in maniera aggregata tramite tre variabili fondamentali: la densità  $\rho$  (veh/km), il flusso  $q$  (veh/h) e la velocità media  $v$  (km/h). A livello sperimentale, ipotizzando per semplicità di trattare un sistema unidimensionale, una qualsiasi misura di una o più di tali variabili avviene necessariamente su un determinato intervallo di misura  $S$ , che definisce un'area nel piano t-x (tempo-spazio). Gli intervalli di misura più comuni, rappresentati schematicamente in Fig. 1.1, corrispondono da un lato a misure istantanee su una porzione di strada con lunghezza  $\Delta X$ , realizzate ad esempio con fotografie aeree (aerofotogrammetria), e dall'altro a misure puntuali su un intervallo di tempo  $\Delta T$ , effettuate con sensori e spire [20, 21].

La densità lineare  $\rho$ , per una strada con una singola corsia, esprime il numero di veicoli per kilometro e si può pertanto ricavare da un intervallo di misura del primo tipo come il rapporto tra il numero di veicoli  $n$  misurati nell'intervallo e la sua estensione spaziale  $\Delta X$ , in un dato istante di tempo. Moltiplicando e dividendo per un infinitesimo temporale, è immediato riformulare tale espressione come il rapporto tra il tempo totale trascorso da tutti i veicoli nell'intervallo e la sua area nel piano t-x, relazione che generalizza la misura per un qualsiasi intervallo  $S$ .

$$\rho = \frac{n}{\Delta X} = \frac{n dt}{\Delta X dt} = \frac{\text{Tempo totale trascorso in S}}{\text{Area(S)}} \quad (1.1)$$

In modo analogo, il flusso  $q$  rappresenta il numero di veicoli che attraversano una superficie trasversale di strada per unità di tempo, e può quindi essere ottenuto per un intervallo del secondo tipo, in una data posizione spaziale, facendo il rapporto tra il numero di veicoli  $m$  che sono passati da tale posizione durante la misura e la durata  $\Delta T$

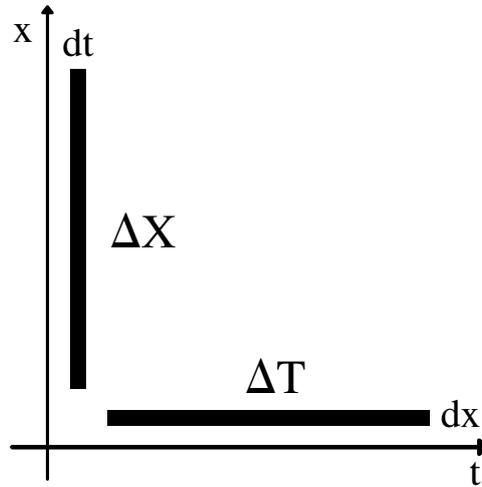


Figura 1.1: Rappresentazione nel piano t-x di intervalli di misura del primo e del secondo tipo, rispettivamente paralleli agli assi t e x.

di quest'ultima. Come prima, moltiplicando e dividendo per un infinitesimo spaziale, ci si riconduce al rapporto tra la distanza totale percorsa da tutti i veicoli nell'intervallo  $S$  e la sua area nel piano t-x, formula generale del flusso su un intervallo di misura arbitrario.

$$q = \frac{m}{\Delta T} = \frac{m dx}{\Delta T dx} = \frac{\text{Distanza totale percorsa in } S}{\text{Area}(S)} \quad (1.2)$$

La velocità media  $v$ , infine, è definita come il rapporto del flusso con la densità, espressione che se riarrangiata costituisce la cosiddetta relazione fondamentale della teoria del traffico:

$$q = \rho \cdot v \quad (1.3)$$

Inserendo la (1.1) e la (1.2) nella (1.3), si ricava immediatamente che per un generico intervallo di misura  $S$  la velocità media si ottiene dividendo la distanza totale percorsa e il tempo totale trascorso da tutti i veicoli in  $S$ .

$$v = \frac{\text{Distanza totale percorsa in } S}{\text{Tempo totale trascorso in } S} \quad (1.4)$$

## 1.2 Diagrammi Fondamentali

Le tre variabili macroscopiche introdotte nella Sezione 1.1 non sono tutte indipendenti tra loro, essendo legate dall'equazione (1.3) che riduce di uno i gradi di libertà del sistema. Si osserva però empiricamente che anche tra le rimanenti coppie di variabili, per qualsiasi scelta della variabile dipendente nella (1.3), si instaurano delle reciproche relazioni, che

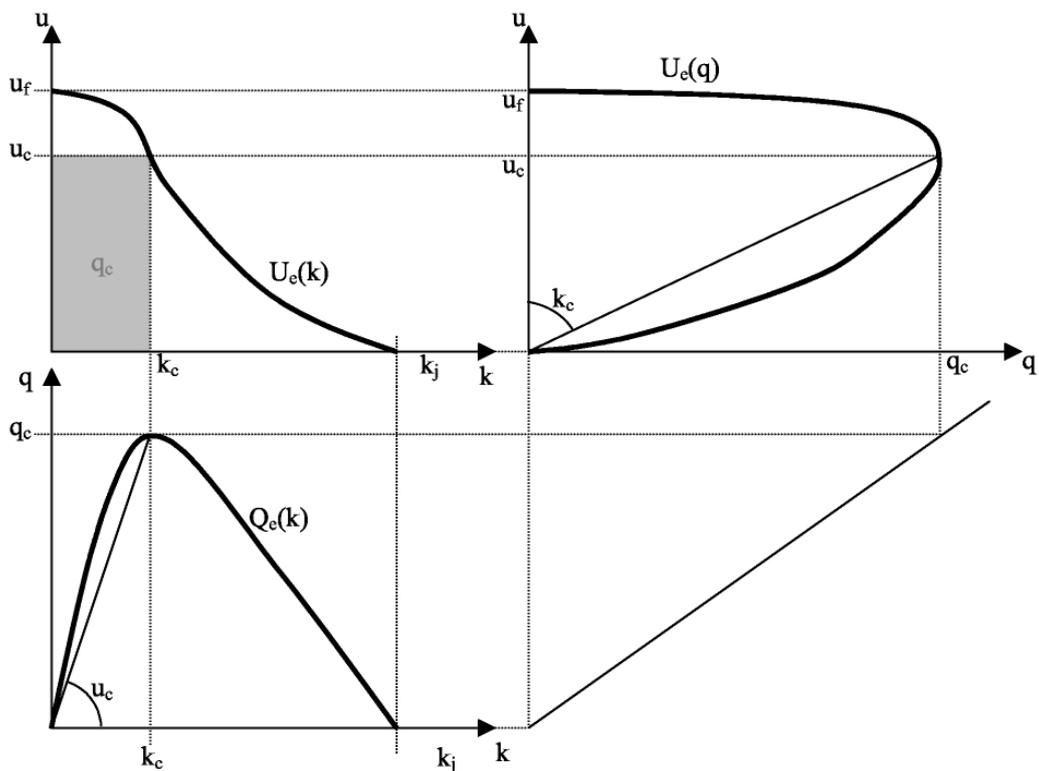


Figura 1.2: Diagrammi Fondamentali nel piano  $\rho$ - $v$ ,  $\rho$ - $q$  e  $q$ - $v$ , in una possibile forma funzionale teorizzata. Tratta da [21].

sotto determinate condizioni risultano univoche. Queste relazioni sono abitualmente rappresentate graficamente tramite i cosiddetti Diagrammi Fondamentali (FD), alla base di tutta la modellizzazione dei flussi di traffico, di cui è riportata in Fig. 1.2 una tipica forma funzionale teorica.

Tali diagrammi si riferiscono a una specifica strada in condizioni stazionarie, e nella loro versione più semplice rispondono all'elementare intuizione che la velocità su una strada diminuisce all'aumentare del numero di persone che vi circolano e quindi della densità. I FD permettono inoltre di identificare in generale due regimi di traffico:

- Traffico libero (*free flow*): per bassi valori di densità i veicoli scorrono liberamente senza ostacolarsi vicendevolmente e viaggiano a velocità prossime alla velocità massima o nominale  $v_{max}$  della strada. In questa regione il flusso aumenta all'aumentare della densità, mentre la velocità diminuisce lentamente. Nel limite di densità nulla, chiaramente, il flusso si annulla e la velocità è pari a  $v_{max}$ .
- Traffico congestionato (*congested*): per alti valori di densità, i veicoli sono fittamente impacchettati e, avendo poco spazio a disposizione, sono obbligati a procedere a basse

velocità. In questa regione, il flusso diminuisce all'aumentare della densità, fino ad arrivare a una densità limite  $\rho_j$  detta "di inceppamento" (*jam density*), per cui il traffico si arresta completamente e flusso e velocità si annullano.

Il passaggio tra questi due regimi avviene per una densità  $\rho_c$  detta densità critica, in corrispondenza della quale il flusso è massimo. Tale massimo identifica la condizione ottimale di operatività della strada, in cui essa riesce a servire il maggior numero possibile di utenti in assenza di congestione, e ne definisce la capacità. I valori di flusso e velocità corrispondenti alla densità critica  $\rho_c$  si dicono quindi *capacity flux*  $q_c$  e *capacity speed*  $v_c$ .

Il primo diagramma fondamentale è stato teorizzato da Greenshields nel 1935 [6] sulla base di una osservata dipendenza lineare tra velocità e densità [7, 20], espressa dalla relazione fondamentale:

$$v = v_{max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_j} \right) \quad (1.5)$$

Successivamente, sono state ipotizzate diverse altre forme di FD, una selezione delle quali è rappresentata in Fig. 1.3.

Dal punto di vista sperimentale, tuttavia, emergono nella costruzione dei diagrammi fondamentali una serie di criticità, dovute al fatto che in situazioni reali il traffico non è né omogeneo, a causa della presenza di veicoli di diverso tipo, né stazionario, poiché flusso, densità e velocità variano nel tempo e nello spazio, anche all'interno di una singola strada. Per questi motivi, come si vede in Fig. 1.4 i diagrammi risultano spesso affetti da una dispersione molto alta, in particolare nel regime congestionato e nelle transizioni

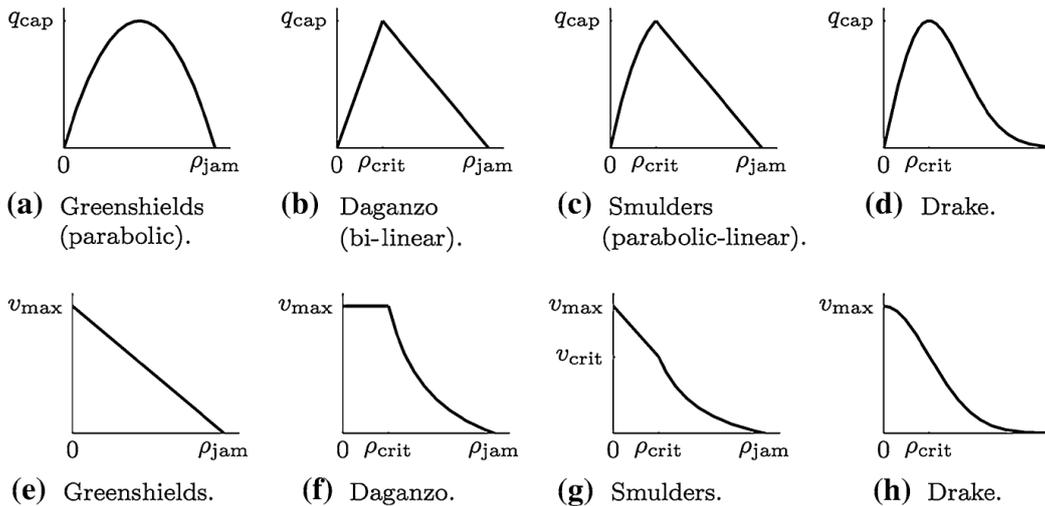


Figura 1.3: Esempi di forme funzionali dei diagrammi fondamentali, nei piani  $\rho$ - $v$  e  $\rho$ - $q$ . Tratta da [7].

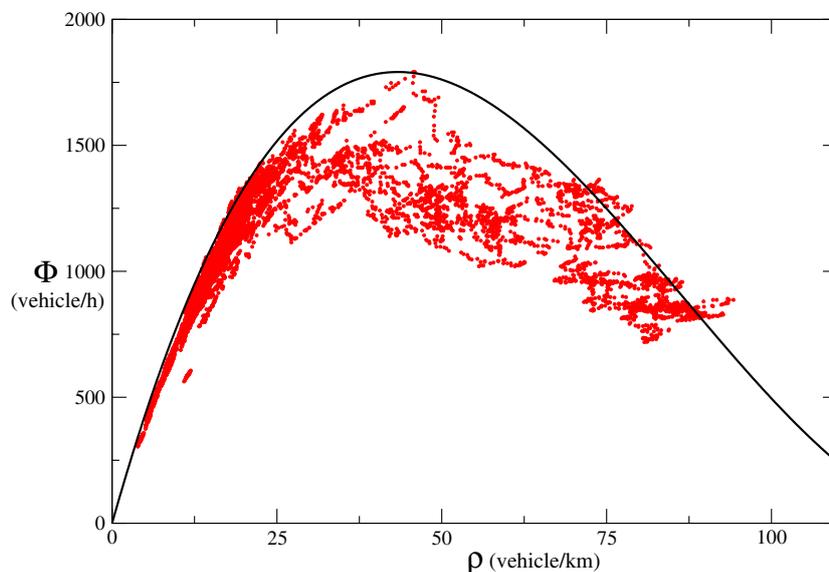


Figura 1.4: Diagramma fondamentale nel piano  $\rho$ - $q$  costruito tramite i dati raccolti da un rilevatore induttivo a spira magnetica del sistema MTS [22] in Emilia-Romagna. Tratta da [23].

di fase tra i diversi stati del traffico, corrispondenti a punti di non equilibrio, dove non si riesce a identificare una curva unidimensionale ben definita.

Per cercare di spiegare le osservazioni empiriche è stata ipotizzata ad esempio la presenza di cadute di capacità (*capacity drop*; Edie, 1961 [24]), dovute a una più lenta accelerazione dei veicoli a valle della congestione rispetto alla decelerazione che compiono quando vi sopraggiungono. Questa ipotesi porterebbe in effetti a dei FD in cui compare il fenomeno sperimentalmente osservato dell'isteresi, per cui lo stato del sistema dipenderebbe non solo dal valore assunto da una delle variabili macroscopiche in un dato istante ma anche dalla sua storia passata.

Secondo altri, tra cui in particolare Kerner [25], l'alta dispersione nei diagrammi fondamentali sarebbe invece sintomo della malfondatezza dell'ipotesi di esistenza di una relazione univoca, e la teoria del traffico che su di essi si fonda andrebbe opportunamente riformulata sulla base di tre stati di traffico invece che due (*three-phase theory*).

### 1.3 Diagrammi Fondamentali Macroscopici

L'idea dei Diagrammi Fondamentali Macroscopici (MFD) nasce dal tentativo di estendere il concetto dei diagrammi fondamentali, validi per una specifica strada o un tratto di essa, al livello di un intero network, ricavando delle relazioni globali tra le medie di flusso, densità e velocità aggregate per tutti i veicoli nell'area di studio.

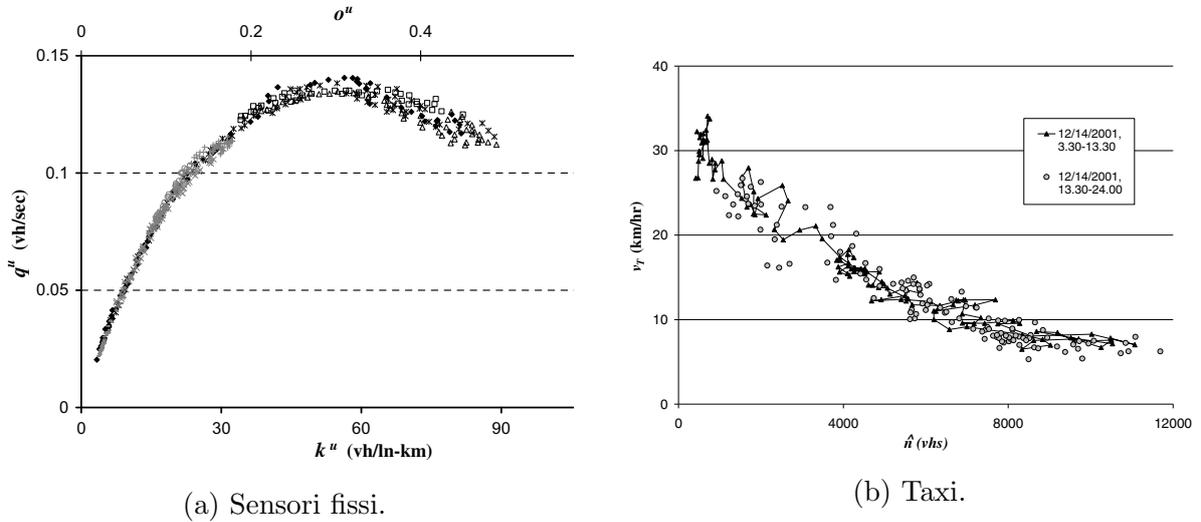


Figura 1.5: Diagrammi fondamentali macroscopici di Geroliminis e Daganzo a Yokohama, costruiti sulla base dei dati provenienti dai sensori fissi e dai taxi, rispettivamente nel piano densità-flusso e *accumulation-velocità* media. Tratta da: [17].

I primi passi in questa direzione furono mossi da Godfrey, che già nel 1969 [26] cercò di ricavare sulla base di misure condotte con fotografie aeree una relazione tra la velocità media nel centro di una città e il numero totale di veicoli che vi circolavano. Nei decenni successivi, furono condotti diversi altri tentativi di ricavare degli MFD in varie condizioni, sia attraverso simulazioni che con esperimenti sul campo, ma a causa della scarsità di dati misurati, prevalentemente relativi a condizioni di traffico libero, o della loro artificiosità, nessuno di questi studi è stato in grado di validare l'ipotesi dell'insorgenza dinamica di diagrammi macroscopici nel mondo reale [27, 28].

Un'importante svolta in questo ambito è stata data dai lavori di Geroliminis e Daganzo, che nel 2007 con delle micro-simulazioni nel *Financial District* di San Francisco [19] e soprattutto nel 2008 tramite un celebre esperimento nella città giapponese di Yokohama [17] hanno fornito delle prime robuste evidenze dell'esistenza di diagrammi fondamentali macroscopici in un contesto urbano. A Yokohama, infatti, i due hanno analizzato i dati di una regione di circa  $10 \text{ km}^2$  nella zona centrale della città, provenienti da un apparato di 500 sensori fissi posizionati in prossimità delle principali intersezioni stradali. Le misure di flusso e di densità, su intervalli di 5 minuti, sono quindi state mediate su tutti i rilevatori e studiate in forma aggregata. Mentre sui singoli sensori la relazione tra densità e flusso presentava un'alta dispersione, come tipico dei diagrammi fondamentali locali, si è trovato che nei dati aggregati la dispersione sostanzialmente scompariva, ed era possibile individuare una relazione macroscopica tra le variabili. Un'analisi analoga è poi stata ripetuta utilizzando i dati raccolti da una rete di 140 taxi dotati di GPS,

filtrandoli in modo tale da considerare solamente gli spostamenti con a bordo dei passeggeri, ritenuti rappresentativi della mobilità veicolare generale. Anche in questo caso, aggregando opportunamente i dati, si è potuta individuare una relazione macroscopica ben definita, in questo tra velocità media e numero di veicoli nel network. I diagrammi fondamentali macroscopici così ricavati sono mostrati in Fig. 1.5 ed esibiscono la forma tipica dei diagrammi fondamentali, con le caratteristiche descritte nella Sezione 1.2.

Le osservazioni condotte a Yokohama fanno in realtà seguito a un'ipotesi formulata da Daganzo già tra il 2005 e il 2007 [29, 18, 19], secondo cui un diagramma fondamentale macroscopico che colleghi il numero totale di veicoli o *accumulation*, prodotto della densità per la lunghezza del network, e la *production*, prodotto del flusso per la lunghezza del network, debba esistere sempre in regioni omogeneamente congestionate (*neighborhoods*), se la richiesta di mobilità degli utenti nella rete varia lentamente nel tempo. In queste condizioni, si dovrebbe inoltre avere una proporzionalità diretta tra la *production* e il tasso con cui gli utenti lasciano la rete (*trip completion rate*), anch'essa poi effettivamente verificata nello studio su Yokohama.

Successivamente, sono poi stati proposti diversi modelli teorici per derivare analiticamente gli MFD, ad opera ancora di Daganzo e Geroliminis nel 2008 [30], di Helbing nel 2009 [31] e di Laval e Castrillón nel 2015 [32], che hanno anche riformulato più rigorosamente le condizioni per l'esistenza di relazioni macroscopiche, includendo per esempio la proprietà di ridondanza della rete, in modo che i veicoli abbiano a disposizione diverse possibili scelte equivalentemente desiderabili di strade da percorrere per arrivare alla propria destinazione.

Tutti questi modelli, sulla base dei dati di Yokohama, postulano inoltre che nelle condizioni di validità degli MFD essi siano indipendenti dalla domanda di mobilità e vadano quindi considerati come una proprietà del network, dipendente unicamente dalla sua struttura e dalle sue caratteristiche. In tale modo, avendo a disposizione degli MFD invarianti rispetto alla domanda, lo stato di traffico della rete può essere determinato con precisione dalla misura di una sola variabile macroscopica su di essa, e si possono pertanto sviluppare sistemi intelligenti di gestione del traffico che si adattino alle condizioni del network in tempo reale.

Ad esempio, strategie di regolazione degli accessi (*perimeter control*) basate sugli MFD permetterebbero di mantenere il numero di utenti in una regione intorno al valore ottimale per cui essa raggiunge la sua massima capacità, al di sotto della soglia critica legata alla formazione di congestione. Altri sistemi di questo tipo includono meccanismi di assegnamento dinamico delle corsie, di temporizzazione dinamica dei semafori e dei segnali stradali e di variazione dei pedaggi (*pricing*), sempre con lo scopo di minimizzare la congestione e/o massimizzare il *trip completion rate* [27, 29, 8].

In aggiunta, l'analisi del traffico basata sugli MFD può fornire un valido strumento per orientare la pianificazione infrastrutturale in una regione, ad esempio nella scelta di investire nell'incremento della capacità delle strade piuttosto che nel potenziamento dei sistemi di trasporto pubblico.

## 1.4 Eterogeneità e isteresi

Nonostante i promettenti risultati di Yokohama, in numerosi altri esperimenti sul campo e analisi con dati reali la costruzione di diagrammi fondamentali macroscopici non ha avuto altrettanto successo, mostrando nelle relazioni tra le variabili un'elevata dispersione e l'insorgenza del fenomeno dell'isteresi, come accade su singola strada. In presenza di isteresi, i punti sui diagrammi non si dispongono su una curva ben definita ma bensì compiono dei cicli chiusi, e lo stato di traffico del network non è più univocamente identificabile tramite il valore assunto da una delle variabili macroscopiche, poiché dipende anche dalla storia passata del sistema.

Mentre, infatti, le condizioni in cui operavano Geroliminis e Daganzo a Yokohama [17] presentavano un alto grado di omogeneità, elemento per altro assunto come ipotesi della loro trattazione, in molte situazioni reali questo non avviene e si hanno condizioni eterogenee nella domanda, poiché alcune parti della rete attraggono o generano più spostamenti di altre, nell'infrastruttura stradale, con differenze nel tipo, nella lunghezza, nella velocità caratteristica e nel numero di corsie delle strade, e nei sistemi di controllo del traffico [33].

Buisson e Ladier nel 2009 [28] hanno indagato l'impatto dell'omogeneità sugli MFD nella città francese di Tolosa e hanno identificato tre principali fonti di eterogeneità, che differivano dalle assunzioni esplicite o implicite di Geroliminis e Daganzo: la posizione spaziale dei sensori di misura, collocati a distanza variabile dalle intersezioni stradali; la variabilità della domanda e la differenza tra i tipi di strada, in quanto la regione analizzata costituiva un network composto in maniera mista da una rete di strade urbane e da un anello autostradale. Anche considerando separatamente il network urbano e la tangenziale, inoltre, si sono riscontrate delle disomogeneità tra la zona centrale della città e le periferie residenziali. Isolando singolarmente tali fattori, si è osservato come ognuno di essi abbia un impatto importante sulla forma e sulla dispersione dei diagrammi macroscopici, o addirittura sulla loro possibile esistenza.

Successivamente, diversi studi hanno cercato di determinare quali proprietà un network dovesse possedere per ammettere l'esistenza di MFD ben definiti e invarianti rispetto alla domanda. Geroliminis e Sun nel 2010 [34] hanno congetturato per un network urbano che se la distribuzione spaziale della densità nelle strade è la stessa per due diversi intervalli di tempo con la stessa densità media sulla rete, allora tali due intervalli dovrebbero avere lo stesso valore medio di flusso. In altre parole, in queste condizioni, il flusso sarebbe determinato dai valori di densità e i corrispondenti punti nel diagramma  $\rho$ - $q$  si disporrebbero lungo una curva univoca. Con tale ipotesi si rilassa di fatto l'assunzione originaria sulla omogeneità dello stato di congestione su tutta la rete, sostituendola con una condizione sulla distribuzione spaziale della densità.

Nella stessa direzione va anche il lavoro di Mazloumian, Geroliminis e Helbing del 2010 [33], che identifica appunto la variabilità della densità di veicoli, espressa dalla sua deviazione standard sulle strade, come un parametro fondamentale per l'esistenza

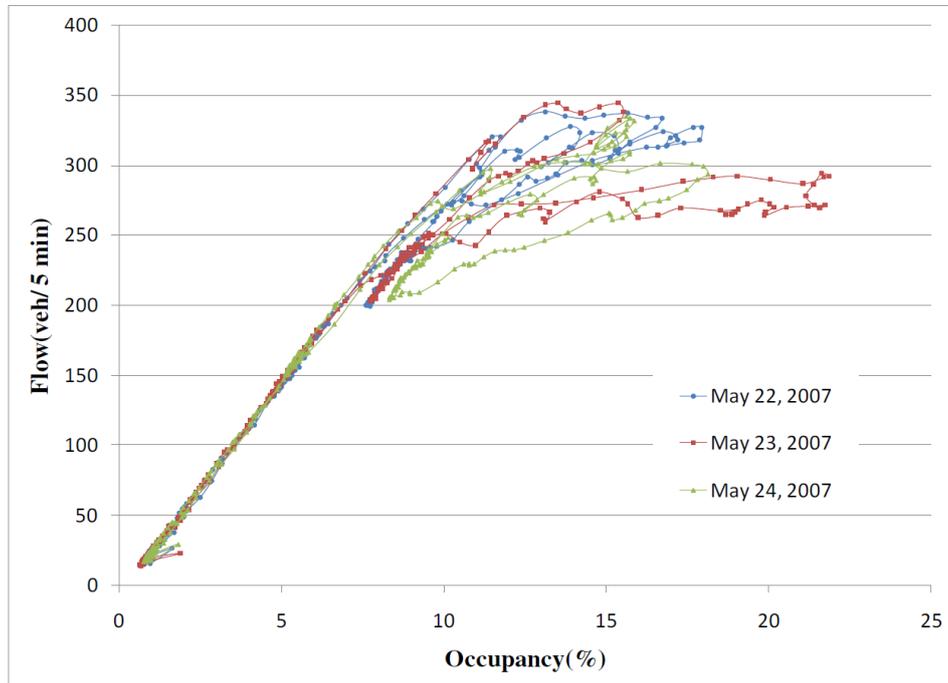


Figura 1.6: Diagramma fondamentale macroscopico di Geroliminis e Sun in Minnesota, nel piano occupazione-flusso. L'occupazione  $o$  è direttamente collegata alla densità media tramite  $o = k s$ , con  $s$  lunghezza media effettiva di un veicolo. Tratta da: [35].

di MFD e per spiegare le ampie differenze di flusso al pari della densità media e della domanda.

Anche in questo caso, le considerazioni fatte valgono prevalentemente per network urbani, mentre per una rete composta da strade ad alta percorrenza (autostrade, tangenziali, superstrade..), i cosiddetti *freeway networks*, la situazione è un po' più complicata. Network di questo tipo, infatti, presentano proprietà topologiche e modalità di controllo del traffico differenti e spesso non sono ridondanti, poiché le strade non presentano intersezioni e a meno dello spostamento di corsia non è dunque generalmente possibile cambiare percorso.

Sui *freeway networks* un importante studio, in proseguimento della precedente ricerca in ambito urbano, è stato svolto da Geroliminis e Sun nel 2011 [35], analizzando i dati di un sistema di spire (*loop detectors*) disposte lungo la rete autostradale dell'area metropolitana di Minneapolis-Saint Paul (le *Twin Cities*), nel Minnesota. I risultati di tale analisi, riportati in Fig. 1.6, mostrano lo svilupparsi in maniera consistente del fenomeno dell'isteresi, su tutte le giornate considerate. La principale causa del pattern isteretico, così come già messo in luce in precedenza, è attribuita alla diversa distribuzione spaziale della congestione a parità di densità media, dovuta a sua volta a una diversa distribuzione spaziale delle origini di mobilità degli utenti rispetto a quella delle destinazioni.

Calcolando, infatti, la varianza della densità sulle strade del network e graficandola rispetto alla densità media, appare evidente che anch'essa compie un ciclo di isteresi, in direzione opposta rispetto al ciclo compiuto dal flusso. Per valori maggiori della varianza il flusso risulta minore, e viceversa, il che viene associato al fatto che quando aumenta la variabilità la densità sulle singole strade si allontana mediamente di più dal proprio valor medio, vicino alla soglia critica che massimizza il flusso. Quest'ultimo, pertanto, diminuisce sui singoli rilevatori in entrambe le direzioni, dando quindi luogo nel complesso a un valore di flusso medio più basso. Infine, una seconda componente rilevante risulta essere dovuta alle transizioni di fase tra gli stati di traffico in prossimità dei rilevatori, che avvenendo in maniera sincronizzata estendono all'intero network l'instabilità e l'isteresi generata localmente dalle cadute di capacità (cfr. Sez. 1.2).

# Capitolo 2

## Modello e simulazioni

### 2.1 Struttura del modello

I dati utilizzati per la costruzione e l'analisi dei diagrammi fondamentali macroscopici sono stati generati da un modello di simulazione del traffico veicolare in Emilia-Romagna, che riproduce microscopicamente la dinamica dei singoli agenti sulle strade della regione nel corso di una giornata.

Tramite un set di dati spaziali aggregati provenienti da dispositivi TIM, opportunamente preprocessati, vengono costruite delle matrici origine-destinazione, che rappresentano la domanda di mobilità degli utenti nel tempo. Queste matrici sono poi prese in input dal programma di simulazione, scritto in C++, che le usa per generare dinamicamente veicoli nella rete, ognuno dei quali dotato di una determinata posizione di origine e una destinazione di arrivo. Ad ogni avanzamento temporale, corrispondente a un intervallo di 10 secondi, tutti i veicoli avanzano quindi spazialmente seguendo il percorso che gli è stato assegnato e con una velocità che dipende dalle caratteristiche e dallo stato di traffico della strada su cui si trovano.

Nelle sezioni successive sono descritti più nel dettaglio i singoli aspetti del modello e il modo in cui i dati prodotti da esso sono stati aggregati per costruire i diagrammi macroscopici.

### 2.2 Cartografia

La regione Emilia-Romagna mette a disposizione attraverso il proprio database topografico diversi layer cartografici, realizzati per esigenze di pianificazione e monitoraggio. Tra questi, per modellizzare l'infrastruttura stradale del territorio è stata scelta una cartografia detta "reticolo di sintesi", che comprende le strade principali della regione in termini di importanza e traffico, con percorsi costruiti appunto per sintesi semplificata di uno o più elementi stradali.



Figura 2.1: Mappa delle *poly* della cartografia di "reticolo di sintesi" dell'Emilia-Romagna.

In generale, un network stradale può essere rappresentato tramite un grafo, un oggetto matematico costituito da un insieme di vertici o nodi, che rappresentano gli incroci e le intersezioni stradali, collegati tra loro da un insieme di linee o spigoli (*link*), corrispondenti alle strade che connettono le intersezioni. Nel programma, quindi, l'informazione cartografica è memorizzata con tale struttura, in modo tale che ogni nodo sia geolocalizzato da una coppia di coordinate di longitudine e latitudine e identificato da un codice univoco, e ogni *poly* (*link*), poi in realtà scomposta più finemente in tratti più corti, connetta due nodi attraverso i loro identificativi.

A ciascuna *poly*, inoltre, è associata una velocità caratteristica  $v_{max}$ , che rappresenta la velocità massima efficace della strada in condizioni di traffico libero. Tale informazione è ricavata attraverso i dati a libero accesso di OpenStreetMap (OSM), che associa ad ogni *link* della propria cartografia un limite di velocità nominale, secondo il tipo di strada, o reale in specifici tratti. Le due cartografie, in generale molto diverse, vengono quindi fatte corrispondere con un algoritmo di matching e ad ogni *poly* è assegnato un valore di velocità mediato sui *link* di OSM ad essa associati.

Una mappa delle *poly* contenute nella cartografia è riportata in Fig. 2.1.

## 2.3 Dati TIM e matrici OD

Il dataset a disposizione comprende l'informazione aggregata sugli spostamenti della popolazione nella regione nei mesi di gennaio, febbraio e marzo 2020, ottenuta attraverso il traffico di dispositivi che utilizzano la rete cellulare della compagnia TIM. Questi includono dispositivi nativi TIM ma anche appartenenti a operatori virtuali sprovvisti di una rete propria o in roaming, con una penetrazione stimata di circa il 30%.

In generale, qualsiasi rete di telecomunicazioni radiomobile si struttura tassellando il territorio in unità spaziali dette celle, ognuna delle quali è servita da una apposita stazione radio base. Ciascun utente, ogni volta che effettua una richiesta, si "aggancia" al segnale di una cella, e i suoi spostamenti possono essere tracciati seguendo la localizzazione dell'area di copertura delle celle a cui si è agganciato. In questo modo, è possibile monitorare i flussi di persone registrando il numero di utenti che si sono spostati da una cella alle altre nel corso della giornata. L'informazione così ricavata è quindi fortemente aggregata in modo da poter essere usata per analisi statistiche conformemente alle norme europee in materia di privacy e protezione dei dati personali (GDPR), aggregando su tutti gli utenti della rete, temporalmente su intervalli di 1 ora e spazialmente sulle aree di censimento Istat, una tassellazione della superficie italiana basata sulla popolazione residente e realizzata a fini censuari.

I dati sugli spostamenti, ricevuti in questa forma da TIM, vengono successivamente riaggregati sui singoli comuni e incrociati per costruire le cosiddette matrici o tabelle Origine-Destinazione (OD), che descrivono appunto in maniera compatta la mobilità delle persone tra i comuni su base oraria. Tali matrici vengono poi mediate su un arco temporale di un mese, in maniera separata tra i giorni infrasettimanali (dal lunedì al venerdì) e il fine settimana (sabato e domenica), in modo da avere complessivamente due uniche tabelle OD medie per ogni mese di campionamento. La stessa procedura viene quindi ripetuta per costruire un secondo tipo di tabelle OD medie aggregando su base provinciale anziché comunale.

## 2.4 Dinamica degli agenti

Le matrici OD medie, costruite come spiegato nella precedente sezione, vengono impiegate nel programma di simulazione per generare veicoli sulla rete, che si muovano in modo tale da rispecchiare la domanda aggregata di mobilità degli utenti. Il processo di generazione avviene tramite "sorgenti" di 5 tipi diversi, corrispondenti ad altrettanti tipi di veicoli, di cui è tracciato in Fig. 2.2 un tipico grafico di evoluzione nel corso della giornata.

Gli spostamenti tra i primi 50 comuni della regione per attività, misurata per ogni comune come somma su tutta la giornata delle entrate delle tabelle OD che hanno come origine o destinazione tale comune, sono gestiti da sorgenti di tipo *src-dest*, che generano

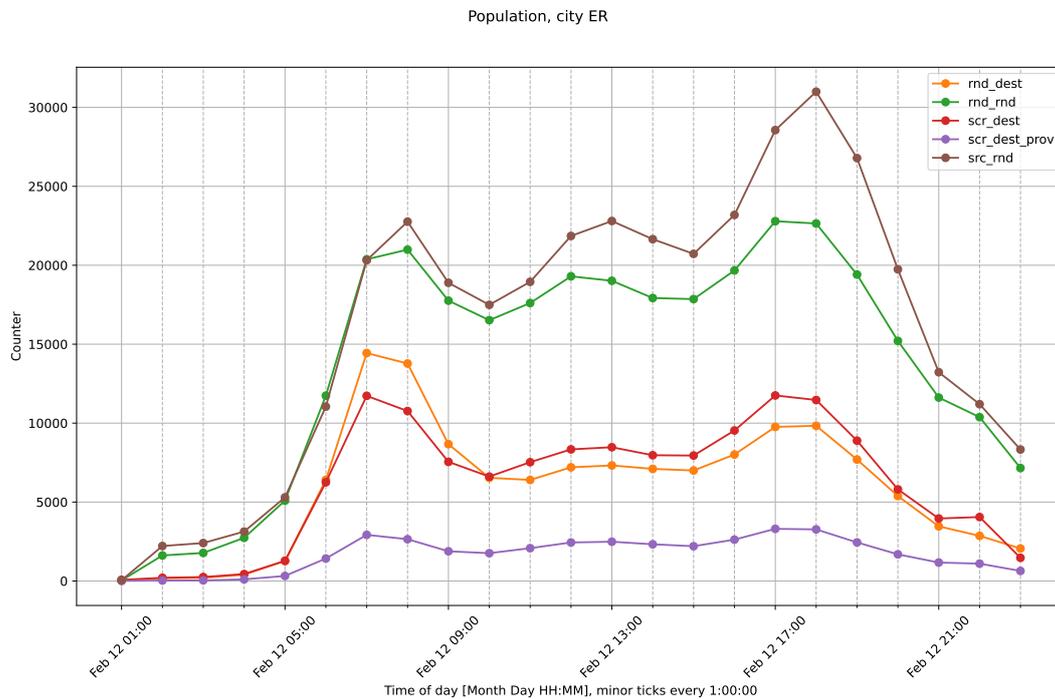


Figura 2.2: Evoluzione del numero di veicoli sulla rete per tipologia.

veicoli che possiedono nodi di origine e di arrivo univoci e determinati, corrispondenti appunto ai comuni oggetto del movimento.

Spostamenti che partono da un comune appartenente ai 50 più attivi ma diretti a uno che non ne fa parte, invece, sono regolati da sorgenti di tipo *src-rnd*, e i veicoli associati hanno un nodo prestabilito solo per l'origine, mentre quello di destinazione è estratto in maniera randomica tra tutti i nodi localizzati in una regione spaziale di raggio prestabilito attorno all'origine, pesati secondo la loro importanza. Analogamente, sorgenti *rnd-dest* gestiscono gli spostamenti da un comune poco attivo a uno tra i più attivi, con veicoli che estraggono casualmente il proprio nodo di origine.

Tutti gli incroci di comuni della regione non compresi nei precedenti casi, corrispondenti a coppie di località non tra le 50 più attive, vengono quindi sommati per formare un'unica sorgente *rnd-rnd*, i cui veicoli hanno nodi di origine e destinazione entrambi estratti randomicamente.

Infine, una quinta sorgente *src-dest-prov* è aggiunta per tenere conto del fatto che nel dataset originario sono inclusi anche spostamenti con origine o destinazione al di fuori dell'Emilia-Romagna. I veicoli associati ed essa si comportano in maniera analoga a quanto avviene per le sorgenti *src-dest*, con la differenza che in questo caso si usano i dati aggregati su base provinciale e non comunale, rimuovendo la mobilità interregionale già contata nelle altre sorgenti e usando quindi solo gli spostamenti che coinvolgono

almeno una provincia esterna alla regione.

Ad ogni sorgente è quindi assegnato per ogni ora della simulazione un tasso di creazione di veicoli ricavato tramite le matrici OD da una singola cella, per le sorgenti *src-dest* e *src-dest-prov*, o dalla somma degli elementi con uno o entrambi gli indici che variano sui comuni meno attivi, per le sorgenti *src-rnd*, *rnd-dest* e *rnd-rnd*. Con tali tassi di creazione la simulazione genera ogni 30 secondi nuovi utenti, che dal successivo avanzamento temporale si iniziano a muovere verso la destinazione prestabilita.

Il processo di instradamento (*routing*) dei veicoli, ovvero l'assegnazione della sequenza di *poly* da percorrere per raggiungere il nodo di destinazione, è fatto dopo aver esplorato staticamente prima dell'inizio della simulazione tutti i possibili percorsi.

Attraverso una variante dell'algoritmo di Dijkstra, un noto algoritmo di ricerca su grafi, è infatti possibile ricavare per ogni coppia di nodi il cammino minimo (*best path*) tra di essi, vale a dire quello che minimizza una funzione di costo che in questo caso corrisponde alla lunghezza delle strade. Partendo da un dato nodo iniziale si esplorano in primo luogo i collegamenti con gli immediati vicini, assegnando a questi una distanza pari al peso della *poly* che li congiunge con il nodo di partenza, secondo la funzione di costo scelta. Successivamente, ad ogni iterazione, si parte dal nodo non ancora processato con la distanza minore e si esplorano tutti i suoi *link* uscenti, variando eventualmente la distanza dei nodi corrispondenti se essa risulta maggiore del costo complessivo del cammino che si sta esplorando. Tale processo prosegue fino a che tutti i nodi non sono stati processati, cosicché al termine ognuno di essi abbia associato il valore di distanza minimo dal nodo iniziale. Ripetendo l'algoritmo al variare di quest'ultimo, è quindi possibile costruire una matrice di *best-path* che data una coppia di nodi, origine e destinazione, restituisca immediatamente l'identificativo del primo nodo sul cammino minimo.

Quando un veicolo raggiunge il nodo al termine della *poly* che stava percorrendo, questo viene dunque usato insieme al nodo finale di destinazione, assegnato durante la generazione in base al tipo di sorgente, per determinare il successivo nodo del percorso ottimale. Nella realtà, però, non tutti i veicoli seguono un percorso che corrisponde al cammino minimo, adottando bensì un comportamento variegato e condizionato da fattori esterni. Pertanto, nel programma è inserita una componente di incertezza in modo tale che ogni utente abbia una certa probabilità di proseguire verso il primo nodo sul percorso ottimale, mentre nei restanti casi scelga il successivo nodo in maniera casuale.

Una volta assegnata una *poly*, i veicoli si muovono con una velocità che dipende dalle caratteristiche della strada e dal suo stato istantaneo di traffico, secondo la relazione:

$$\begin{cases} v = \min \left[ v_j, v_{max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_j} \right) \right] & \rho \leq \rho_j \\ v = v_j & \rho > \rho_j \end{cases} \quad (2.1)$$

dove  $\rho$  è la densità di veicoli sulla strada,  $\rho_j$  la *jam density*,  $v_j$  la *jam speed* e  $v_{max}$  la velocità caratteristica della strada secondo la cartografia. Si vede subito che tale

relazione assomiglia molto alla (1.5), con l'unica differenza che in questo caso è introdotta una velocità minima al di sotto della quale non è possibile andare anche in presenza di congestione. Di fatto, si introducono quindi microscopicamente su ogni strada dei diagrammi fondamentali del tipo di Greenshields, che mettono in relazione densità e velocità.

Poiché nei dati cartografici manca l'informazione sul numero di corsie o sulla larghezza delle *poly*, la densità  $\rho$  sarà inevitabilmente calcolata considerando i veicoli su tutta la strada, senza tener conto della distinzione in corsie. La densità limite  $\rho_j$  dovrà quindi avere un valore che media il comportamento di tutte le *poly* della cartografia, dove sono presenti sia strade di campagna che autostrade, con un numero di corsie molto diverso.

I valori dei parametri  $\rho_j$  e  $v_j$  sono pertanto scelti su base efficace, in modo tale da massimizzare la bontà della simulazione nel confronto con i dati MTS, un sistema regionale di rilevazione dei flussi di traffico composto da 281 rilevatori induttivi a spira magnetica (*loop detectors* o semplicemente "spire") distribuiti sulle strade statali e provinciali principali [22]. Risultano da questo confronto  $\rho_j = 714$  veh/km e  $v_j = 10$  km/h.

## 2.5 Costruzione degli MFD

Per la costruzione e l'analisi dei diagrammi fondamentali macroscopici si è deciso di restringersi a una regione rettangolare attorno a Bologna con un'estensione di quasi 1900 km<sup>2</sup>, mostrata in Fig. 2.3 insieme alle velocità caratteristiche delle strade. Tale area contiene un totale di 322 *poly*, con una lunghezza complessiva di circa  $L = 840$  km, che come si vede dall'immagine comprendono sia tratti di autostrada che strade statali e provinciali con diverse velocità caratteristiche, risultando quindi fortemente eterogenee.

Durante la simulazione, ogni 60 secondi vengono stampate su un file le informazioni di ogni veicolo che si trova all'interno del rettangolo, ovverosia il suo identificativo, il suo tempo di vita (quanto tempo è passato da quando è stato generato), la distanza totale percorsa e la *poly* su cui si trova. Parallelamente, un secondo file viene riempito con le informazioni relative a ogni *poly* della regione scelta: il numero di veicoli che vi circolano, la densità  $\rho$  e la velocità  $v$  calcolata secondo la (2.1), sempre con un intervallo di *dump* di 60 secondi.

In seguito, dopo il termine della simulazione, i file così ottenuti vengono elaborati per costruire dei diagrammi macroscopici sulla rete. Un primo step di processamento ripartisce gli spostamenti degli utenti in "viaggi", dividendo quindi sequenze di entrate con lo stesso identificativo ma non contigue temporalmente, corrispondenti a movimenti di veicoli che sono entrati e usciti dal rettangolo di interesse più volte nel corso del tempo. Successivamente, su bin temporali di  $\Delta t = 30$  min, per ogni viaggio di ogni utente si calcolano il tempo trascorso e la distanza percorsa nell'intervallo all'interno della regione, facendo la differenza tra il massimo e il minimo sul viaggio di rispettivamente il tempo di vita e la distanza totale del veicolo. Questi valori, poi, vengono sommati su

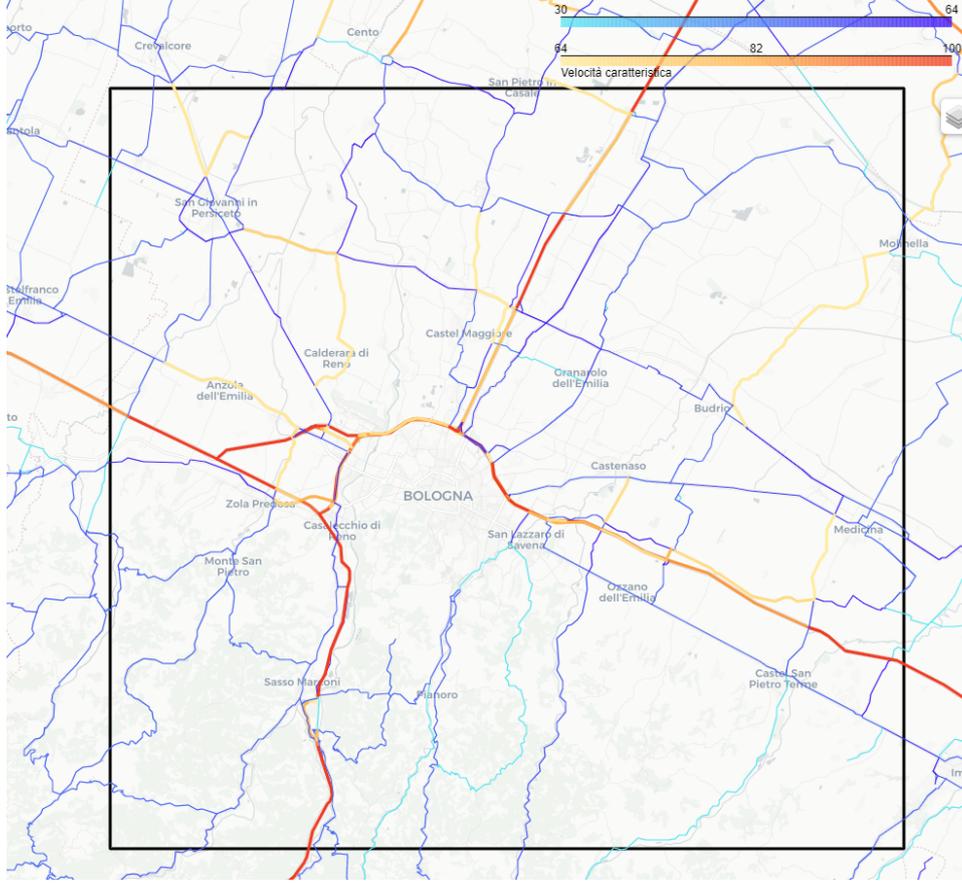


Figura 2.3: Mappa del network scelto per l'analisi dei diagrammi fondamentali macroscopici, con la velocità caratteristica di ogni *poly* secondo la cartografia.

tutti i viaggi di tutti gli utenti, in modo da ottenere per ogni bin un unico dato aggregato complessivo. In questo modo, è possibile stimare immediatamente la velocità media sul network attraverso la (1.4), facendo il rapporto tra la distanza totale percorsa  $\delta$  e il tempo totale trascorso  $\tau$ . Il numero di veicoli nella rete  $n$  (*accumulation*) nell'arco dei 30 minuti, invece, è stimato [17] come:

$$n = \frac{\tau}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Dividendo tale risultato per la lunghezza della rete  $L$  si ricava quindi la densità media  $\rho$ , che corrisponde all'espressione (1.1) considerando come intervallo di misura  $S$  un bin temporale nel rettangolo. Infine, il flusso medio sul network  $q$  è calcolato tramite la relazione fondamentale del traffico (1.3), come prodotto di densità e velocità medie. Gli MFD, dunque, si ottengono mettendo in relazione le tre variabili macroscopiche medie così estratte nel corso della giornata.

# Capitolo 3

## Risultati

### 3.1 Carico standard

Il procedimento descritto nella Sezione 2.5 consente di costruire dei diagrammi fondamentali macroscopici nella regione attorno a Bologna rappresentata in Fig. 2.3, calcolando su tutta la rete le variabili macroscopiche di densità media  $\rho$ , flusso medio  $q$  e velocità media  $v$ .

Scegliendo come input della simulazione un giorno infrasettimanale di febbraio 2020 in condizioni standard di mobilità, l'evoluzione delle tre variabili nel tempo è rappresentata in Fig. 3.1. In tale grafico e in tutti i successivi in cui è presente un asse temporale, ogni punto rappresenta il bin di ampiezza  $\Delta t = 30$  min che inizia nell'istante corrispondente all'ascissa del punto e termina mezz'ora dopo. La densità, inoltre, è stata rinormalizzata dividendo per 3 tutti i valori, in modo da ricondurla a una densità lineare efficace, nell'ipotesi che ogni *poly*, considerando entrambi i sensi di circolazione, possieda mediamente 3 corsie. Tale valore, poco sensato per un singolo tratto, risponde alla necessità di mediare su tutte le strade dell'Emilia-Romagna, con caratteristiche e larghezze molto diverse, ed è ottenuto dalla densità limite  $\rho_j$ , scelta dal confronto con i dati di spira (cfr. Sez. 2.4), moltiplicando per la lunghezza media efficace di un veicolo  $s = 4.2$  m.

Si vede dall'immagine che la densità e il flusso medio aumentano lentamente nelle prime ore della giornata fino a raggiungere un primo picco mattutino tra le 07:00 e le 08:00, a seguito del quale si portano nelle ore centrali in un quasi plateau. Successivamente, i loro valori tornano ad aumentare e si ha un secondo picco nel pomeriggio tra le 17:00 e le 18:00. La rete, quindi, si svuota gradualmente, con una piccola ripresa di attività intorno alle ore 22:00. I due picchi osservati corrispondono agli orari tipici di spostamento dei pendolari, che si muovono dalla propria residenza per recarsi sul luogo di lavoro o viceversa.

La velocità media, invece, si mantiene pressoché costante per tutta la simulazione, senza particolari variazioni.

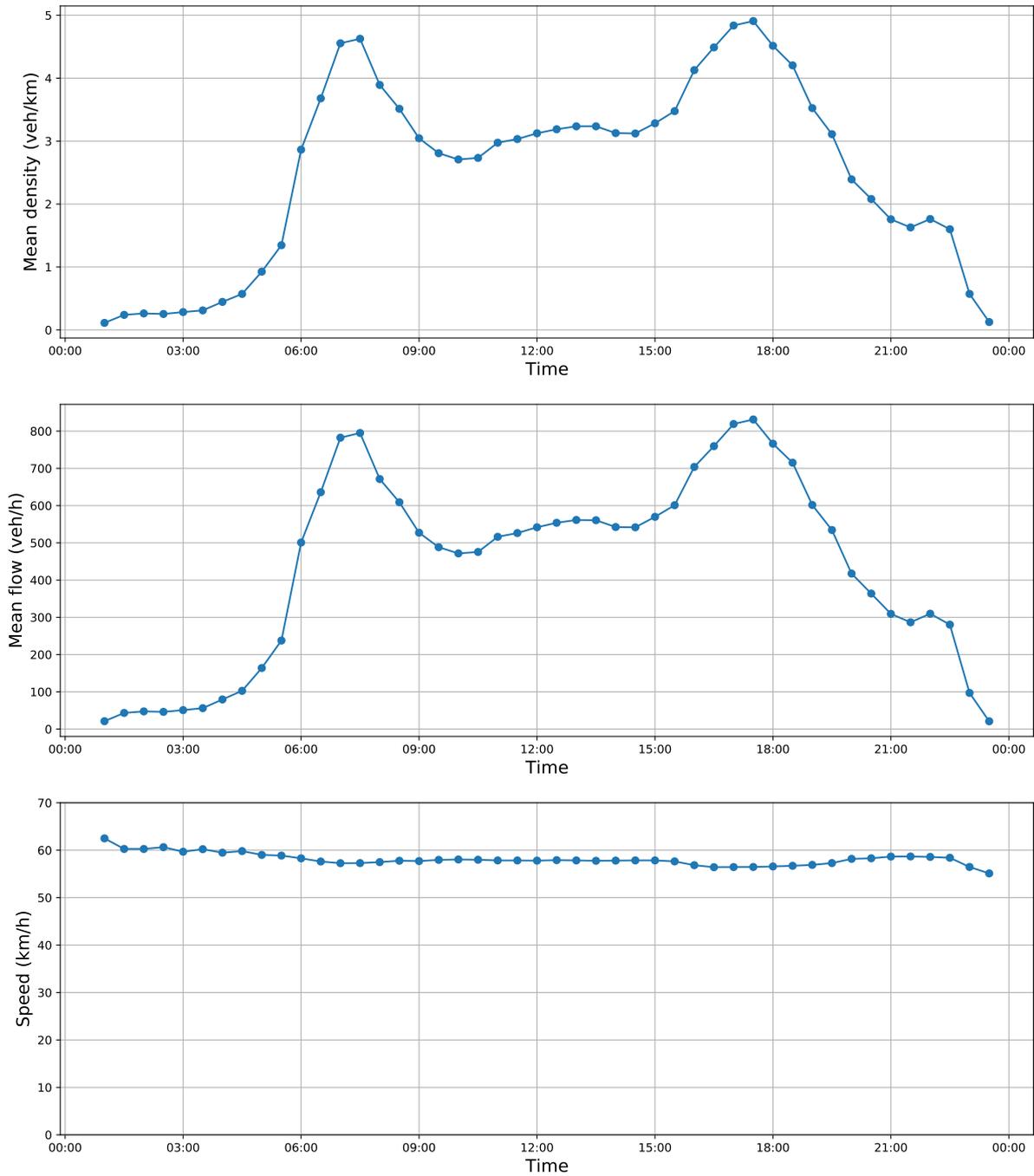


Figura 3.1: Evoluzione delle variabili macroscopiche mediate sul network durante un giorno infrasettimanale di febbraio 2020.

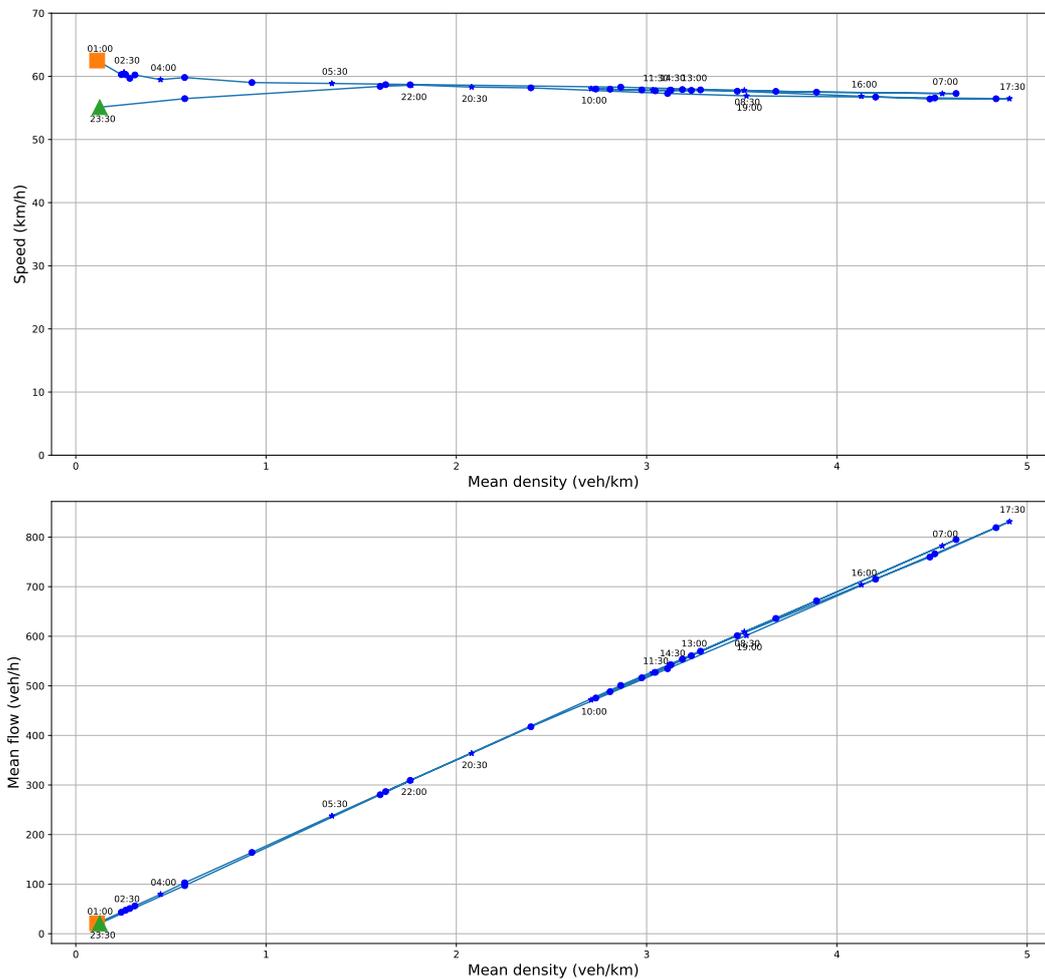


Figura 3.2: Diagrammi fondamentali macroscopici nei piani  $\rho-v$  e  $\rho-q$ , su un giorno infrasettimanale di febbraio 2020.

Mettendo ora in relazione velocità e flusso con la densità, si ottengono le rappresentazioni canoniche dei diagrammi fondamentali macroscopici nei piani  $\rho-v$  e  $\rho-q$ , mostrate in Fig. 3.2. In entrambi i grafici, i punti si dispongono in maniera regolare su una retta, che corrisponde a uno stato di traffico libero. Siccome, come già visto, la velocità rimane sostanzialmente costante, il flusso e la densità sono infatti linearmente proporzionali attraverso  $v$ , e il sistema non raggiunge mai la congestione.

L'unica anomalia in questo andamento si osserva nei punti all'inizio e alla fine della simulazione, dove si hanno a parità di densità valori differenti di velocità. Si tratta di punti molto poco popolati, in cui il basso numero di utenti nella rete non permette di stimare con accuratezza le variabili medie sul network, ma siccome questo elemento ricorre sistematicamente anche nei grafici successivi vale la pena indagarne brevemente le cause.

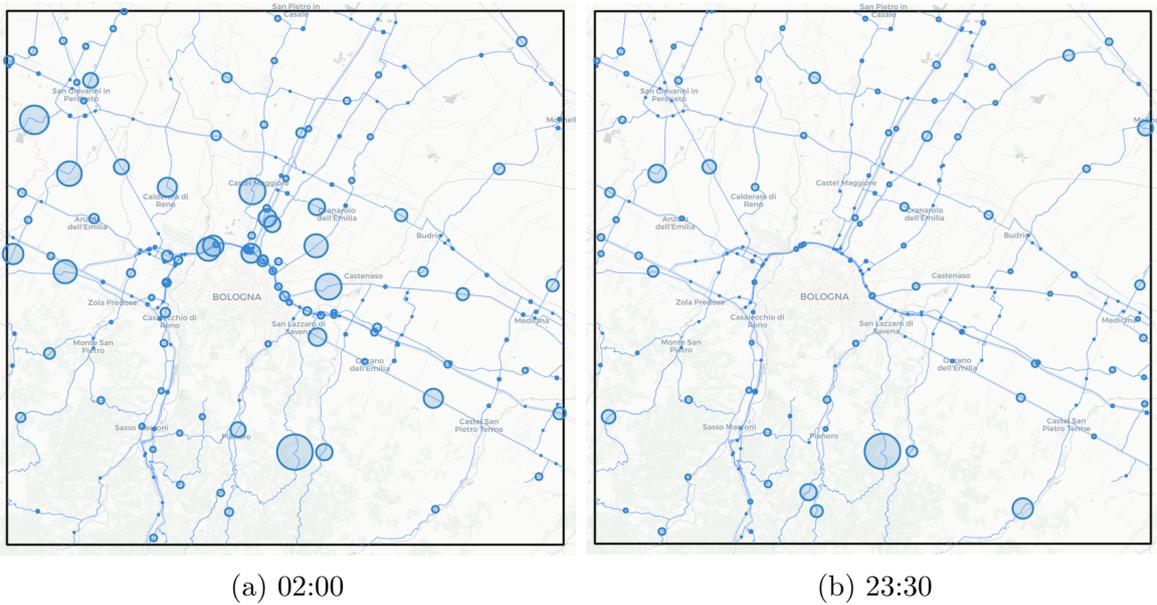


Figura 3.3: Mappa della distribuzione degli utenti nella rete in un giorno infrasettimanale, con ampiezze dei cerchi normalizzate sul massimo istantaneo.

In Fig. 3.3 è mostrata la distribuzione istantanea dei veicoli nella rete, alle ore 02:00 e 23:30. Ogni cerchio è centrato nel punto medio di una *poly* e ha un'ampiezza proporzionale al numero di veicoli che vi transitano nell'istante considerato, normalizzando i raggi sul valore massimo locale. Tali grafici non si prestano quindi a confronti nel tempo, ma possono essere utili per capire come si distribuiscono i veicoli nel network in un dato istante.

Pur essendo il numero totale di utenti circa uguale per le 02:00 e le 23:30, la distribuzione nella rete è molto diversa e spiega l'andamento osservato negli MFD. Alle 23:30, infatti, i veicoli percorrono prevalentemente strade provinciali e periferiche, con velocità caratteristiche tipicamente basse, mentre alle 02:00 si distribuiscono maggiormente sulla rete occupando anche tratti di autostrada, ad alta percorrenza. Quindi, nel secondo caso è logico aspettarsi una velocità media complessiva più elevata, a causa al fatto che i veicoli si trovano mediamente su strade con velocità caratteristiche maggiori.

Gli stessi ragionamenti possono poi essere fatti considerando un giorno del fine settimana, che differisce nella mobilità essendo le tabelle OD mediate separatamente (cfr. Sez. 2.3). La Fig. 3.4 mostra che in questo caso, in assenza di flussi di lavoratori, il primo picco di densità e flusso medi si sposta verso la tarda mattinata, tra le 11:00 e le 12:00, mentre il picco pomeridiano tende a distribuirsi tra le 16:30 e le 19:00. Si ha inoltre un terzo picco serale più pronunciato, sempre intorno alle 22:00. Anche in questo caso, tuttavia, la velocità resta essenzialmente costante e il sistema non raggiunge mai lo stato di congestione, con MFD del tutto analoghi a quelli di Fig.3.2.

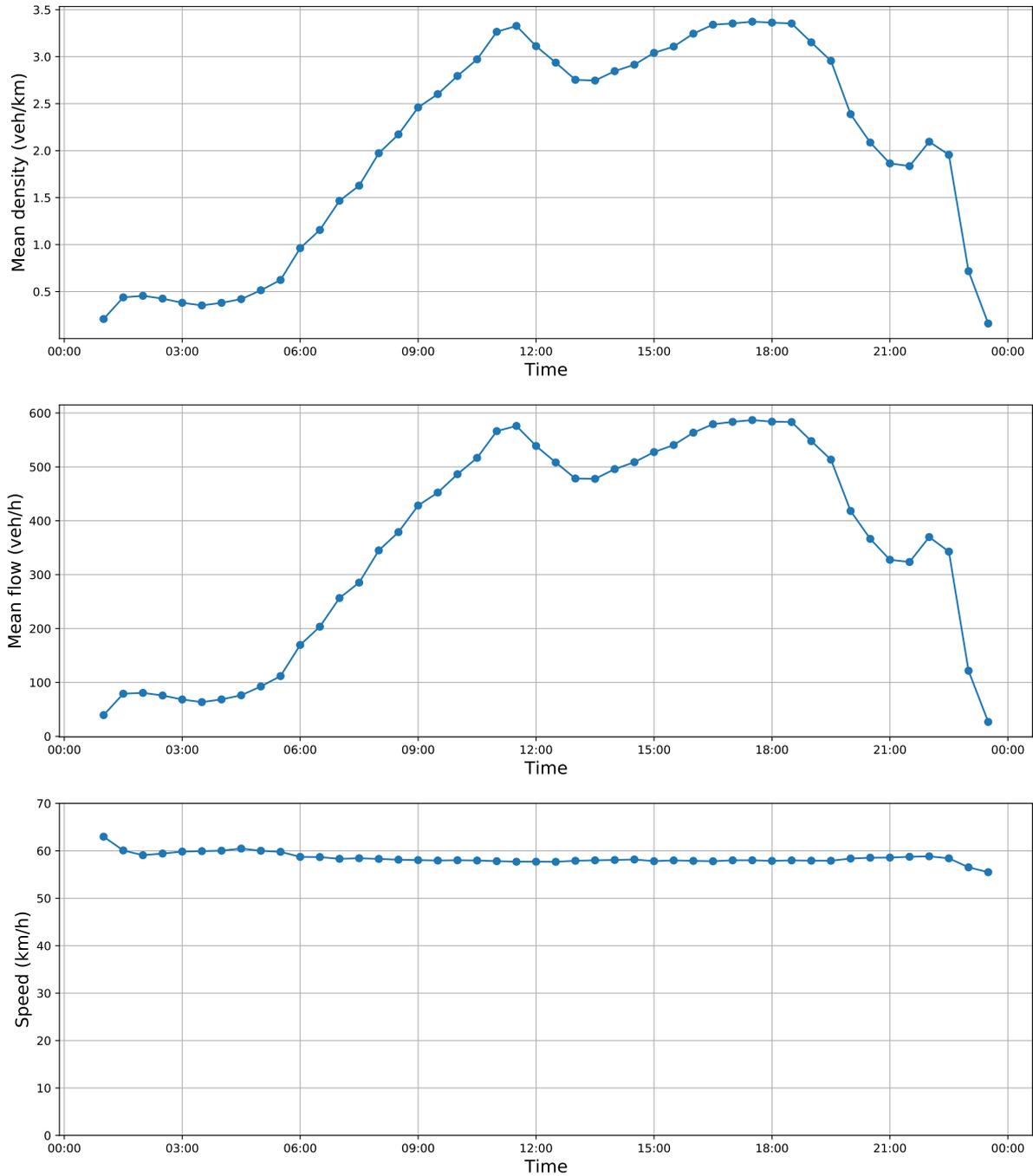


Figura 3.4: Evoluzione delle variabili macroscopiche mediate sul network durante un giorno del fine-settimana di febbraio 2020.

## 3.2 Carico potenziato

In condizioni di carico standard, come mostrato nella Sezione 3.1, il numero di utenti nella rete non è sufficiente per formare una congestione e il traffico rimane sempre nello stato libero. Per studiare anche lo stato congestionato, quindi, sono state effettuate delle simulazioni a carico potenziato, moltiplicando le matrici OD ricavate dai dati TIM per un dato fattore di amplificazione. Nel proseguo della presente sezione, si considererà un fattore moltiplicativo pari a 3 in un giorno infrasettimanale, per cui si osservano in effetti fenomeni di congestionamento.

Per quanto riguarda l'evoluzione delle variabili macroscopiche, rappresentata in Fig.3.5, flusso e densità hanno andamenti molto simili a quelli della Fig. 3.1, con valori però ovviamente maggiori, mentre è significativamente diversa l'evoluzione della velocità media. Si vede infatti che in questo caso la velocità non resta costante ma bensì diminuisce nel corso delle prime ore della mattina, per poi assestarsi attorno a un plateau stabile e infine risalire verso un valore di velocità libera al termine della giornata.

In Fig. 3.6 sono invece riportati i diagrammi fondamentali macroscopici, nelle rappresentazioni usuali. Emerge in questo caso un significativo pattern di isteresi, a causa del quale lo stato di traffico del sistema non può più essere determinato univocamente solo sulla base del valore assunto da una delle variabili macroscopiche in un dato istante, ma dipende anche dalla sua storia passata. In particolare, si osservano due cicli di isteresi, entrambi percorsi in senso orario. Il primo si sviluppa durante la mattina, compiendo nel piano flusso-densità un arco crescente tra le 06:00 e le 07:00-08:00, seguito da una discesa lungo una retta fino alle ore 10:00. Successivamente il flusso ricomincia ad aumentare, entrando nel secondo ciclo di isteresi, fino a che dopo il bin delle 17:30 non si riporta sulla retta di discesa precedente. I punti antecedenti alle 06:00 e posteriori alle 21:00, invece, si dispongono su un'unica retta stabile, che realizza uno stato di traffico libero analogo al caso di carico standard.

Il piano velocità-densità segue un comportamento analogo, in cui però alle rette di salita e di discesa del flusso corrispondono valori stazionari di velocità, ossia dei plateau.

La tesi che si vuole dimostrare è che l'isteresi sia una conseguenza dell'eterogeneità del sistema e che si possa spiegare analizzando la distribuzione spaziale della densità di veicoli sulle strade, in maniera molto simile a quanto descritto nella Sez. 1.4. Invece, il fatto che il flusso continui ad aumentare al crescere della densità, senza mai raggiungere la fase discendente dei diagrammi macroscopici, è spiegato dall'assenza nel modello di una capacità finita delle strade. I veicoli, infatti, continuano ad accumularsi sulle *poly* anche oltre la densità limite  $\rho_j$  e pertanto, una volta raggiunto un valore stabile di velocità, quando aumenta il numero di utenti anche il flusso necessariamente cresce.

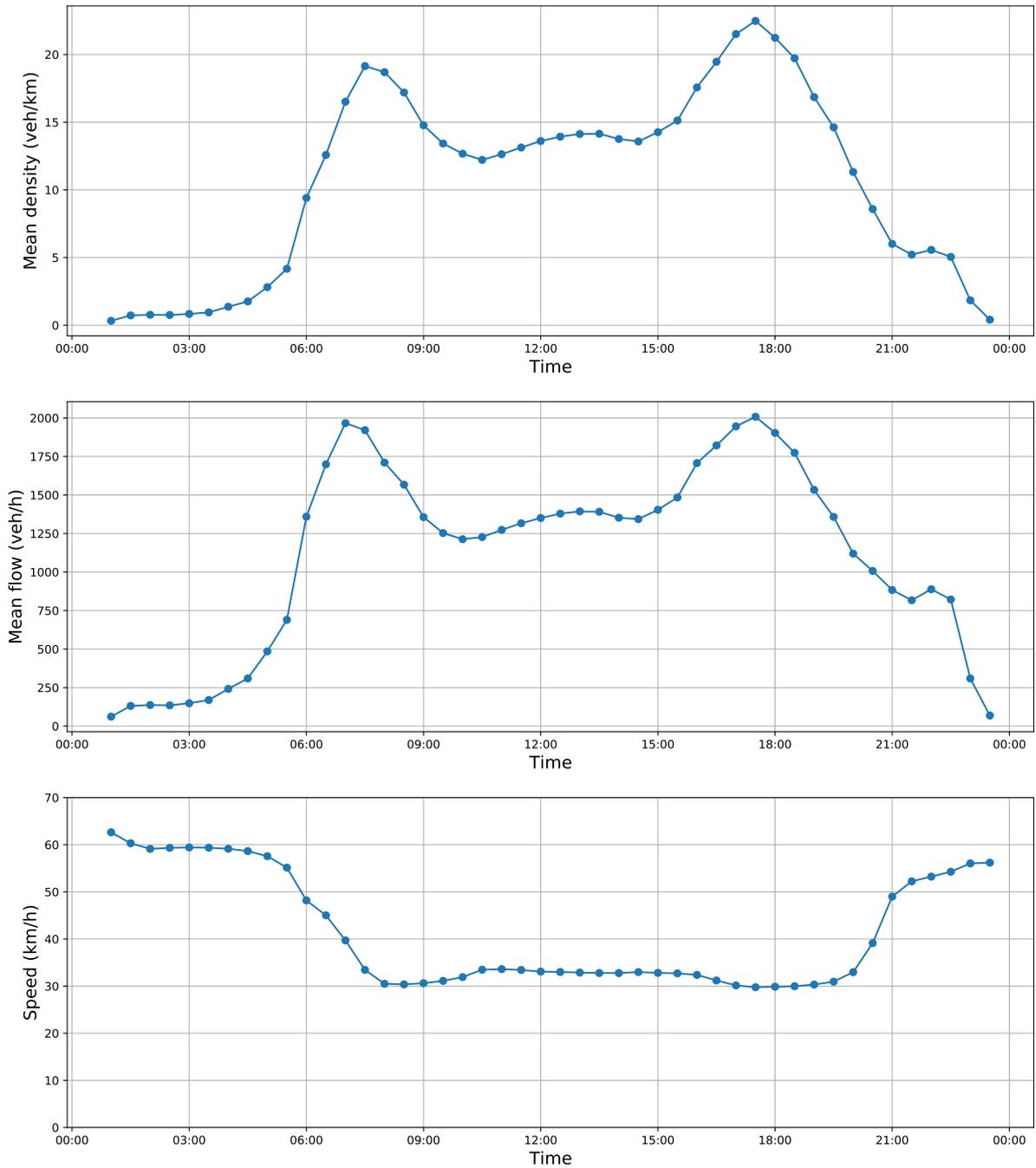


Figura 3.5: Evoluzione delle variabili macroscopiche medie sul network.

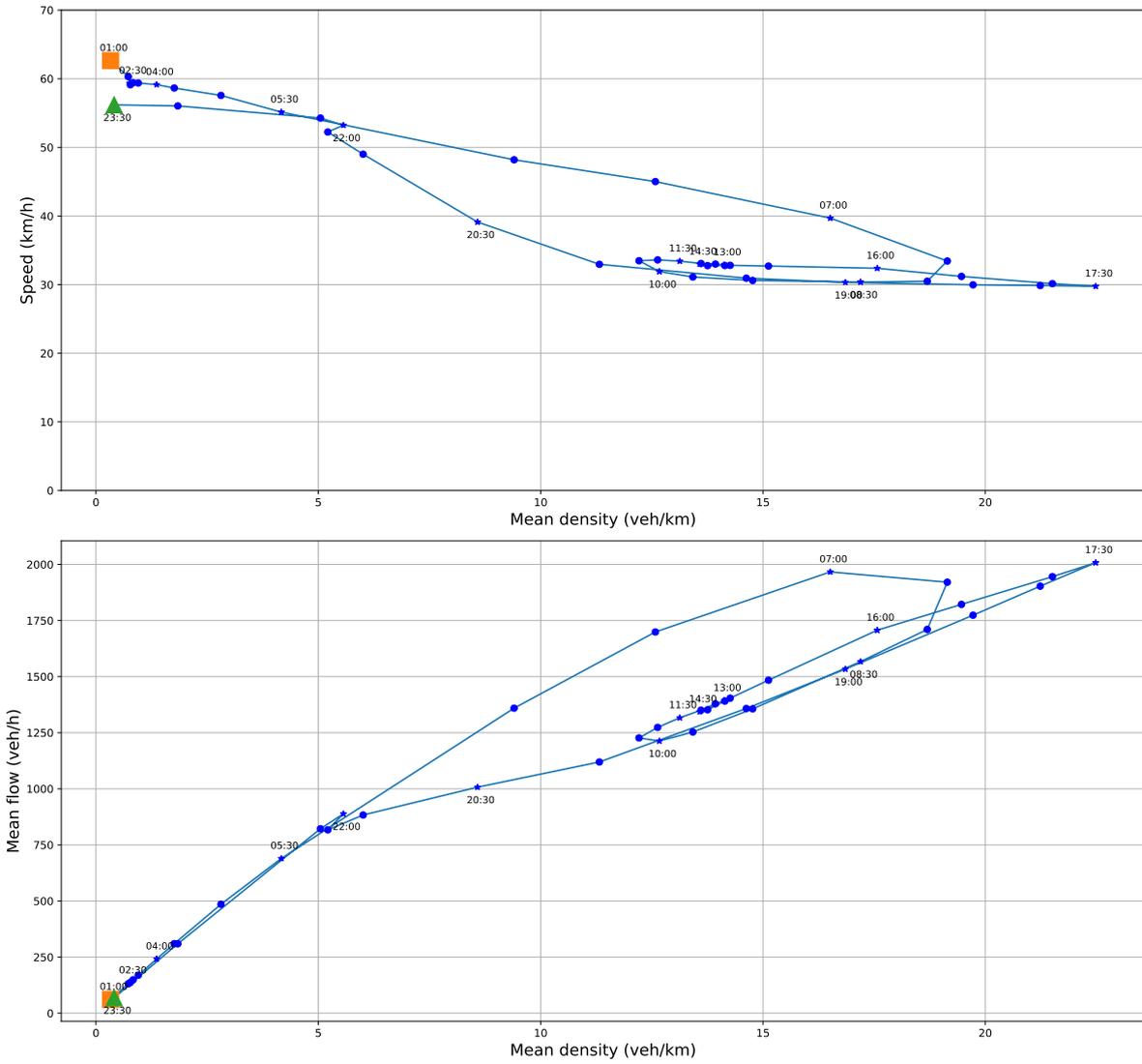


Figura 3.6: Diagrammi fondamentali macroscopici nei piani  $\rho$ - $v$  e  $\rho$ - $q$ .

### 3.3 Isteresi

La presente sezione si propone di indagare le cause dell'isteresi che si osserva nei diagrammi fondamentali macroscopici all'aumentare del carico, vale a dire il fatto che a parità di densità media sul network si trovano valori differenti di flusso e di velocità.

Per analizzare tale fenomeno consideriamo in primo luogo i due bin temporali delle 07:00 e delle 08:30, che appartengono al ciclo di isteresi mattutino e hanno densità media circa uguale, come si vede in Fig. 3.5 e in Fig. 3.6.

In Fig. 3.7 e in Fig. 3.8 sono mostrate rispettivamente la distribuzione dei veicoli sul network e la densità delle *poly* con  $\rho \geq 30$  veh/h nei due intervalli. Si nota che alle 07:00 gli utenti sono più distribuiti nella rete e ci sono più *poly* trafficate, quasi tutte però poco congestionate. Al contrario, alle 08:30 i veicoli si concentrano su poche *poly* che risultano molto congestionate, principalmente nell'anello di tangenziale e autostrada che circonda la città. La causa di tale diversità è dovuta alla congestione che alle 07:00 si sta creando attorno all'imbocco della tangenziale a nord, e che poi si espande sui tratti adiacenti rallentando i veicoli e tenendoli fermi in quella zona. Il flusso, quindi, risulta minore alle 08:30 poiché i veicoli mediamente si trovano su strade più congestionate e devono procedere più lentamente.

Tale comportamento si osserva anche nella Fig. 3.9, che descrive la distribuzione della densità sul network. L'istogramma divide in bin le densità comprese tra  $\rho = 30$  veh/km, per cui le strade iniziano ad essere trafficate, e  $\rho = 240$  veh/km, valore che corrisponde alla densità limite  $\rho_j$  scelta dal confronto con i dati di spira e rinormalizzata sul numero efficace di corsie dividendo per 3. Un ultimo bin è quindi aggiunto per includere tutte le densità maggiori di  $\rho_j$ , dato che in mancanza di una capacità finita, come già detto, i veicoli continuano ad accumularsi sulle strade anche oltre tale valore. Per ogni bin, vengono dunque messe a confronto nei due intervalli di tempo considerati le porzioni del network con densità media<sup>1</sup> compresa tra gli estremi del bin, calcolate come la somma della lunghezza di tutte le *poly* con densità siffatta fratto la lunghezza totale della rete, pari a circa 840 km. Si vede che nell'intervallo delle 07:00 la lunghezza totale del network trafficato è maggiore, ma con valori di densità bassi, mentre alle 08:30 la rete presenta alcuni tratti molto carichi di veicoli, che causano un abbassamento della velocità e del flusso totale medi.

Andamenti di questo tipo nelle distribuzioni spaziali si osservano anche per altre coppie di punti negli MFD con valori simili di densità media, come le 06:30 e le 10:00 o, in misura minore, le 16:30 e le 18:30, sul meno ampio ciclo di isteresi pomeridiano.

Tornando quindi a considerare tutta la giornata, in Fig. 3.10 è raffigurata l'evoluzione nel tempo della percentuale di network fortemente congestionata, con densità  $\rho \geq 150$  veh/km. Anche in questo caso, valutando gli intervalli come in precedenza,

---

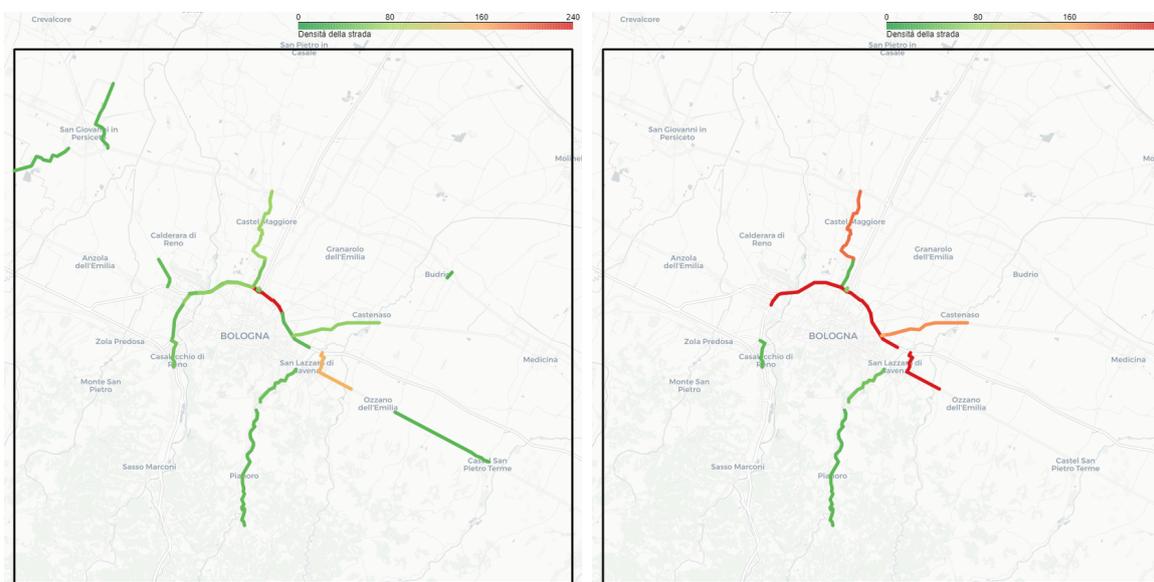
<sup>1</sup>Si intende in questo caso una media non spazio-temporale sulla rete, come nei diagrammi fondamentali macroscopici, ma solo temporale sugli intervalli con  $\Delta t = 30$  min, dal momento che si stanno considerando le singole *poly*.



(a) 07:00

(b) 08:30

Figura 3.7: Mappa della distribuzione degli utenti nella rete, con ampiezze dei cerchi normalizzate sul massimo istantaneo.



(a) 07:00

(b) 08:30

Figura 3.8: Mappa di densità delle *poly* con  $\rho \geq 30$  veh/h.

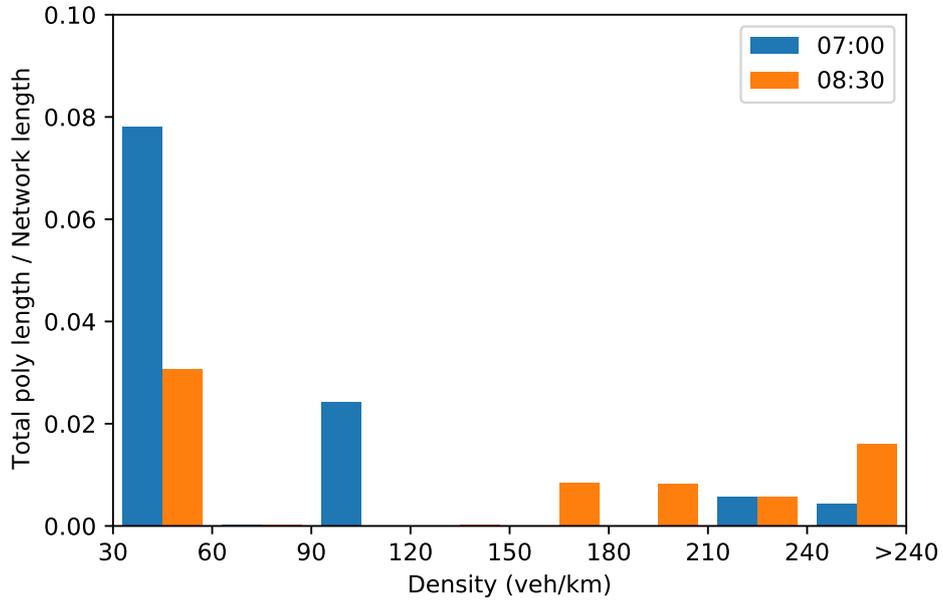


Figura 3.9: Istogramma di distribuzione della densità sulle *poly* del network.

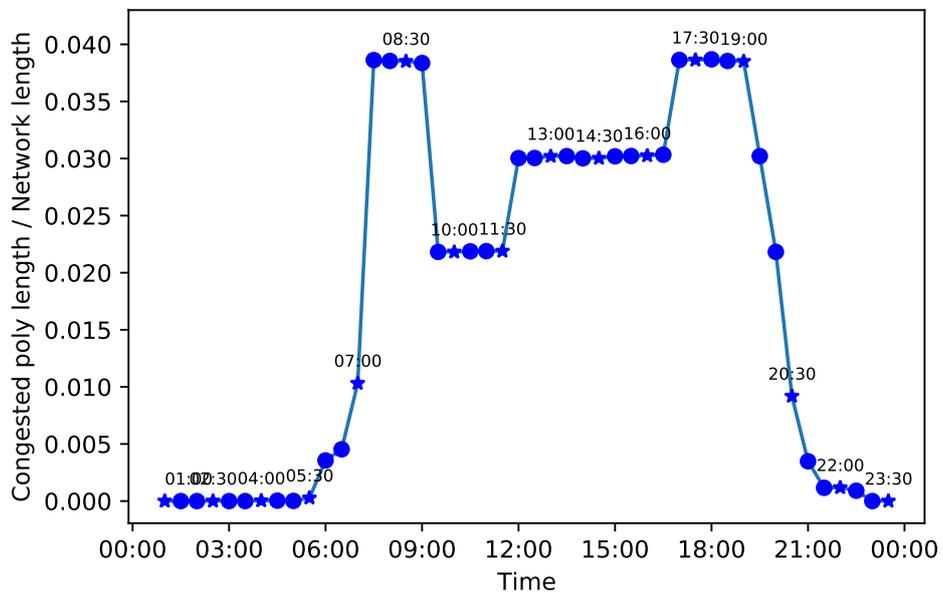


Figura 3.10: Evolutione della percentuale del network congestionata.

è evidente che punti con lo stesso valore medio di densità danno origine in realtà a stati di traffico molto diversi, in cui la rete è più o meno intasata. Si osserva che alcune parti del network, corrispondenti ai tratti centrali dell'anello autostradale che circonda Bologna, restano congestionate per tutta la giornata, e la rete torna a uno stato libero ovunque solo in tarda serata. Concordemente a quanto è noto in generale dalla teoria del traffico, la densità necessaria per smaltire tale congestione, intorno alle 20:30, risulta molto minore della densità per cui si è creata, alle 07:00, e in tali due intervalli anche la velocità media sul network assume lo stesso valore. Confrontando questo grafico con quello dei diagrammi fondamentali macroscopici di Fig. 3.6, si ritrovano essenzialmente gli stessi andamenti, in particolare nelle inversioni di pendenza del flusso.

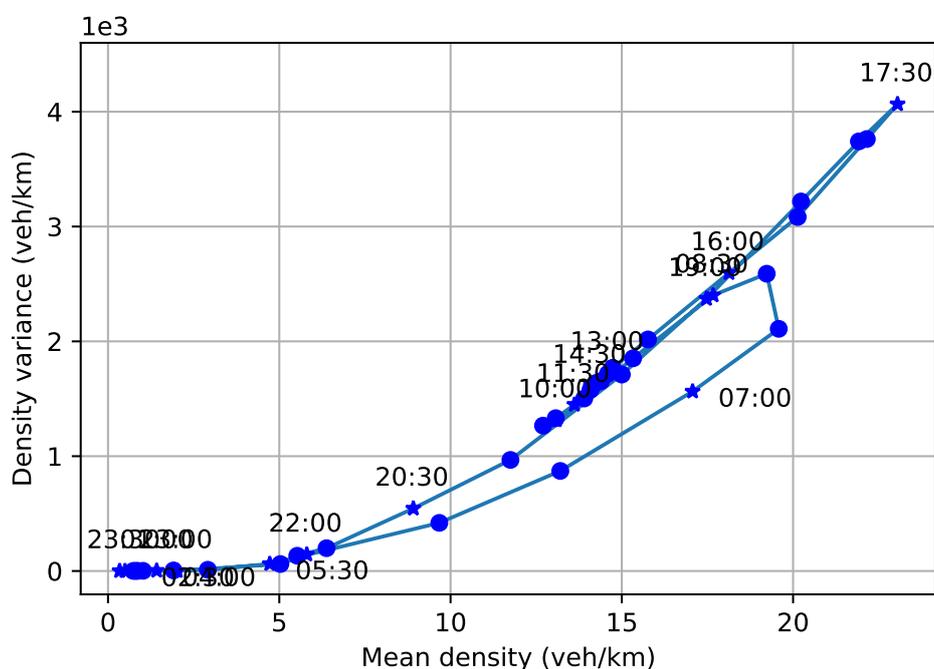


Figura 3.11: Varianza della densità sulle *poly*, pesate secondo la loro lunghezza, in funzione della densità media totale.

In Fig. 3.11, infine, è rappresentata la varianza della densità sulla rete in funzione della densità media, pesando ciascuna *poly* secondo la propria lunghezza. Il grafico mostra che anche per la varianza emerge chiaramente un ciclo di isteresi, che corrisponde precisamente al ciclo di isteresi mattutino dei diagrammi fondamentali macroscopici sui piani  $\rho-v$  e  $\rho-q$ , con la sola differenza che questo è percorso in senso antiorario anziché orario. Nella fase di creazione della congestione, quindi, la varianza è minore e le *poly* possiedono statisticamente un valore di densità più vicino alla media, per cui si ha sulle singole strade un diagramma fondamentale poco congestionato con un flusso più alto.

Nella fase discendente, invece, la varianza è maggiore e le *poly* si allontanano dal valore medio di densità, diventando rispetto ad esso più o meno congestionate, entrambi stati in cui il flusso risulta minore. Si osserva infine in misura molto ridotta un secondo ciclo di isteresi pomeridiano.

### 3.4 Discussione

L'analisi dei diagrammi fondamentali macroscopici condotta nelle precedenti sezioni ha dimostrato una forte dipendenza di flusso e velocità medi dalla variabilità spaziale della densità, indicatore di quanto la congestione è distribuita in modo eterogeneo nel network. Anche a parità di densità media, infatti, si riscontrano tra gli intervalli temporali forti differenze nella distribuzione di veicoli e di densità sulla rete e nel numero di *poly* congestionate, che spiegano la diversità osservata nei valori delle variabili macroscopiche medie.

I risultati ottenuti vanno nella stessa direzione degli studi discussi nella Sezione 1.4, volti appunto ad indagare le cause dell'isteresi e l'impatto dell'eterogeneità. In particolare, l'andamento della varianza riportato in Fig. 3.11, dove si osserva un ciclo di isteresi percorso in senso opposto rispetto a quello dei diagrammi fondamentali macroscopici, è molto simile a quello ricavato sperimentalmente da Geroliminis e Sun nel 2011 [35] analizzando i dati delle autostrade del Minnesota, con la stessa corrispondenza nei confronti dell'isteresi di flusso e densità. Il fatto che la variabilità spaziale sia un elemento determinante, che influisce sulla dispersione e sulla stessa esistenza dei diagrammi macroscopici, è constatato chiaramente anche nei lavori di Mazloumian, Geroliminis e Helbing del 2010 [33] e di Geroliminis e Sun del 2010 [34], confermando l'argomentazione portata avanti in Sezione 3.3.

Allo stesso tempo, emergono però una serie di criticità nel modello di simulazione descritto nel Capitolo 2, da cui vengono generati i dati usati per la costruzione degli MFD. In primo luogo, la già discussa mancanza di una capacità finita sulle strade impedisce ai diagrammi macroscopici di raggiungere la fase di flusso decrescente, poiché il numero di utenti sulle *poly* continua ad aumentare anche oltre la densità limite  $\rho_j$ . Questo pone anche un limite notevole alla diffusione nella rete della congestione, che agisce più come un rallentamento fisso nello spazio anziché come un'onda che si propaga all'indietro, come ci si attenderebbe dalla teoria del traffico.

In aggiunta, la scelta dei *best-path* tra le coppie di nodi della cartografia è fatta staticamente, senza tener conto di come varia il numero di persone che occupano le strade nel corso del tempo. Gli utenti, quindi, scelgono o estraggono il proprio percorso in maniera indipendente dallo stato di traffico, e ciò contraddice indirettamente l'ipotesi di ridondanza della rete assunta da Daganzo e Geroliminis [30] come condizione per l'esistenza degli MFD, già in realtà parzialmente compromessa nei network autostradali ed extraurbani come quello considerato.

Si ha poi un elemento problematico dovuto all'impossibilità, mancando tale informazione nella cartografia, di distinguere il numero di corsie per ogni *poly*, il che obbliga a considerare un unico valore di densità limite  $\rho_j$  mediato su tutta la regione in maniera efficace.

Infine, la scelta del network su cui operare per lo studio dei diagrammi macroscopici pone in condizioni di forte eterogeneità, poiché esso comprende sia tratti di autostrada e tangenziale che strade statali e provinciali secondarie, che come si vede in Fig. 2.3 hanno velocità caratteristiche molto diverse. L'effetto di questa dissonanza si può ad esempio notare nelle code degli MFD in condizioni di carico standard, dovute al disporsi dei veicoli su *poly* con velocità caratteristiche differenti (cfr. Fig. 3.2 e Fig. 3.3), e risponde alle osservazioni di Buisson e Ladier del 2009 [28].

Ulteriore lavoro sarebbe dunque necessario per migliorare il modello intervenendo sui singoli aspetti sottolineati e analizzando come ciascuna di tali correzioni possa impattare sugli MFD. L'influenza dell'eterogeneità potrebbe inoltre essere approfondita scomponendo la rete in più sotto-network contenenti strade dello stesso tipo, per isolare i fattori che condizionano la forma dei diagrammi.

# Bibliografia

- [1] John C. Falcocchio e Herbert S. Levinson. «The Costs and Other Consequences of Traffic Congestion». In: *Road Traffic Congestion: A Concise Guide*. Springer International Publishing, 2015, pp. 159–182. DOI: [10.1007/978-3-319-15165-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15165-6_13) (cit. a p. 1).
- [2] Minnesota Department of Transportation. «The Negative Effects of Traffic Congestion on The Twin Cities and The State of Minnesota». 2020. URL: <https://tinyurl.com/48dwttaj> (cit. a p. 1).
- [3] TomTom Traffic Index. Rome Traffic. 2019. URL: [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/rome-traffic/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/rome-traffic/) (cit. a p. 1).
- [4] Graham Cookson e Bob Pishue. *INRIX 2019 Global Traffic Scorecard*. INRIX Research, 2019 (cit. a p. 1).
- [5] Jinwon Kim. «Estimating the social cost of congestion using the bottleneck model». In: *Economics of Transportation* 19 (set. 2019), p. 100119. DOI: [10.1016/j.ecotra.2019.100119](https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2019.100119) (cit. a p. 1).
- [6] B. Greenshields et al. «A study of traffic capacity». In: *Highway Research Board Proceedings*. A cura di Highway Research Board. Vol. 14. 1935 (cit. alle pp. 1, 7).
- [7] Femke van Wageningen-Kessels et al. «Genealogy of traffic flow models». In: *EURO Journal on Transportation and Logistics* 4.4 (2014), pp. 445–473. DOI: [10.1007/s13676-014-0045-5](https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5) (cit. alle pp. 1, 7).
- [8] Ahmed Derbel e Younes Boujelbene. «A Systematic Literature Review of Studies on Road Congestion Modelling». In: *Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, 2020, pp. 23–36. DOI: [10.1007/978-3-030-40131-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40131-3_2) (cit. alle pp. 1, 10).
- [9] S P Hoogendoorn e P H L Bovy. «State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling». In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 215.4 (giu. 2001), pp. 283–303. DOI: [10.1177/095965180121500402](https://doi.org/10.1177/095965180121500402) (cit. a p. 1).

- [10] Louis A. Pipes. «An Operational Analysis of Traffic Dynamics». In: *Journal of Applied Physics* 24.3 (mar. 1953), pp. 274–281. DOI: [10.1063/1.1721265](https://doi.org/10.1063/1.1721265) (cit. a p. 1).
- [11] G. F. Newell. «Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following». In: *Operations Research* 9.2 (apr. 1961), pp. 209–229. DOI: [10.1287/opre.9.2.209](https://doi.org/10.1287/opre.9.2.209) (cit. a p. 1).
- [12] Robert E. Chandler, Robert Herman e Elliott W. Montroll. «Traffic Dynamics: Studies in Car Following». In: *Operations Research* 6.2 (apr. 1958), pp. 165–184. DOI: [10.1287/opre.6.2.165](https://doi.org/10.1287/opre.6.2.165) (cit. a p. 1).
- [13] M. Cremer e J. Ludwig. «A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations». In: *Mathematics and Computers in Simulation* 28.4 (ago. 1986), pp. 297–303. DOI: [10.1016/0378-4754\(86\)90051-0](https://doi.org/10.1016/0378-4754(86)90051-0) (cit. a p. 2).
- [14] M.J. Lighthill e G.B. Whitham. «On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads». In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 229.1178 (mag. 1955), pp. 317–345. DOI: [10.1098/rspa.1955.0089](https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089) (cit. a p. 2).
- [15] Paul I. Richards. «Shock Waves on the Highway». In: *Operations Research* 4.1 (feb. 1956), pp. 42–51. DOI: [10.1287/opre.4.1.42](https://doi.org/10.1287/opre.4.1.42) (cit. a p. 2).
- [16] I. Prigogine, R. Herman e Jan Chaiken. «Kinetic Theory of Vehicular Traffic». In: *Physics Today* 25.2 (feb. 1972), pp. 56–57. DOI: [10.1063/1.3070729](https://doi.org/10.1063/1.3070729) (cit. a p. 2).
- [17] Nikolas Geroliminis e Carlos F. Daganzo. «Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 42.9 (nov. 2008), pp. 759–770. DOI: [10.1016/j.trb.2008.02.002](https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002) (cit. alle pp. 2, 9, 11, 20).
- [18] Carlos F. Daganzo. «Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41.1 (gen. 2007), pp. 49–62. DOI: [10.1016/j.trb.2006.03.001](https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.03.001) (cit. alle pp. 2, 10).
- [19] N. Geroliminis e C. Daganzo. «Macroscopic modeling of traffic in cities». In: *TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers*. A cura di Transportation Research Board. 2007 (cit. alle pp. 2, 9, 10).
- [20] S. Maerivoet e B. Moor. «Traffic Flow Theory». In: *arXiv: Physics and Society* (2005) (cit. alle pp. 4, 7).
- [21] L.H. Immers e S. Logghe. *Traffic Flow Theory*. Course H 111. Department of Civil Engineering, Section Traffic e Infrastructure, 2002 (cit. alle pp. 4, 6).
- [22] Flussi MTS. Sistema regionale di rilevazione dei flussi di traffico della Regione Emilia-Romagna. URL: <https://servizissiiir.regione.emilia-romagna.it/FlussiMTS/> (cit. alle pp. 8, 19).

- [23] E. Andreotti et al. «Modeling Traffic Fluctuations and Congestion on a Road Network». In: *Advances in Complex Systems* 18.03n04 (mag. 2015). DOI: [10.1142/s0219525915500095](https://doi.org/10.1142/s0219525915500095) (cit. a p. 8).
- [24] Leslie C. Edie. «Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic». In: *Operations Research* 9.1 (feb. 1961), pp. 66–76. DOI: [10.1287/opre.9.1.66](https://doi.org/10.1287/opre.9.1.66) (cit. a p. 8).
- [25] Boris S. Kerner. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: [10.1007/978-3-642-02605-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02605-8) (cit. a p. 8).
- [26] JW Godfrey. «The mechanism of a road network». In: *Traffic Engineering & Control* 8.8 (1969) (cit. a p. 9).
- [27] Lele Zhang et al. «Recent developments in traffic flow modelling using macroscopic fundamental diagram». In: *Transport Reviews* 40.6 (mar. 2020), pp. 689–710. DOI: [10.1080/01441647.2020.1738588](https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1738588) (cit. alle pp. 9, 10).
- [28] Christine Buisson e Cyril Ladier. «Exploring the Impact of Homogeneity of Traffic Measurements on the Existence of Macroscopic Fundamental Diagrams». In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124.1 (gen. 2009), pp. 127–136. DOI: [10.3141/2124-12](https://doi.org/10.3141/2124-12) (cit. alle pp. 9, 11, 34).
- [29] Carlos F Daganzo. *Improving city mobility through gridlock control: an approach and some ideas*. U.C. Berkeley Center for Future Urban Transport. Working Paper UCB-ITS-VWP-2005-1. 2005 (cit. a p. 10).
- [30] Carlos F. Daganzo e Nikolas Geroliminis. «An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 42.9 (nov. 2008), pp. 771–781. DOI: [10.1016/j.trb.2008.06.008](https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.06.008) (cit. alle pp. 10, 33).
- [31] D. Helbing. «Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow». In: *The European Physical Journal B* 70.2 (mar. 2009), pp. 229–241. DOI: [10.1140/epjb/e2009-00093-7](https://doi.org/10.1140/epjb/e2009-00093-7) (cit. a p. 10).
- [32] Jorge A. Laval e Felipe Castrillón. «Stochastic approximations for the macroscopic fundamental diagram of urban networks». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 81 (nov. 2015), pp. 904–916. DOI: [10.1016/j.trb.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.09.002) (cit. a p. 10).
- [33] Amin Mazloumian, Nikolas Geroliminis e Dirk Helbing. «The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368.1928 (ott. 2010), pp. 4627–4647. DOI: [10.1098/rsta.2010.0099](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0099) (cit. alle pp. 11, 33).

- [34] Nikolas Geroliminis e Jie Sun. «Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 45.3 (mar. 2011), pp. 605–617. DOI: [10.1016/j.trb.2010.11.004](https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.11.004) (cit. alle pp. 11, 33).
- [35] Nikolas Geroliminis e Jie Sun. «Hysteresis Phenomena of a Macroscopic Fundamental Diagram in Freeway Networks». In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 17 (2011), pp. 213–228. DOI: [10.1016/j.sbspro.2011.04.515](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.515) (cit. alle pp. 12, 33).