



Università degli Studi di Genova  
Scuola Politecnica

Tesi per il conseguimento del titolo di  
Dottore di Ricerca  
in Ingegneria delle macchine e dei sistemi per l'energia,  
l'ambiente e i trasporti

Progetto di reti di trasporto orientato al  
miglioramento della qualità urbana:  
un'applicazione delle potenzialità dei veicoli  
autonomi

Candidato: Agnese Torre

Tutor: Prof. Nicola Sacco

*Maggio 2019*



## Sommario

Negli ultimi anni è cresciuto considerevolmente l'interesse per la mobilità urbana, non solo per l'aumento delle esternalità negative generate dai trasporti, ma soprattutto perché le recenti innovazioni tecnologiche stanno offrendo soluzioni particolarmente efficaci proprio nei contesti urbani. Queste nuove tecnologie vanno ad integrarsi con il concetto di sostenibilità, il quale è molto discusso e affrontato da diversi settori, in particolare da quello dei trasporti e della pianificazione territoriale. Tra le diverse definizioni di "trasporto sostenibile" che si possono trovare in letteratura, il Consiglio Europeo ha fornito un prezioso chiarimento, affermando che "un sistema di trasporto sostenibile è accessibile, sicuro, e rispettoso dell'ambiente". Nel 2015, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha adottato una serie di 17 obiettivi di sviluppo sostenibile. Sustainable Development Goals (SDG) 11 è dedicato alle città e afferma che bisogna renderle inclusive, sicure, resilienti e sostenibili. Il documento "New Urban Agenda", approvato a Quito nell'ottobre 2016 durante "UN Conference on Housing and Sustainable Urban Development (Habitat III)", si concentra anche sul trasporto sostenibile e sullo sviluppo urbano sostenibile. Portando l'attenzione alle aree urbane, il problema della congestione stradale combinato con la necessità di ridurre le emissioni inquinanti, le problematiche legate alla sicurezza stradale dei veicoli ma anche legata alla "soft mobility" (cioè la mobilità di pedoni e ciclisti) ha portato il mondo della ricerca allo studio e allo sviluppo di soluzioni che forniscano valide alternative al trasporto privato. Il continuo crescere del numero di veicoli privati e di conseguenza l'aumento dei flussi stradali, ha reso sempre più necessario lo sviluppo di sistemi di sicurezza sia per il singolo utente che per la sicurezza stradale. Per ridurre l'impatto ambientale, economico e sociale del trasporto stradale sarebbe corretto che una parte della domanda di mobilità fosse soddisfatta da altri sistemi di trasporto maggiormente sostenibili. Per far fronte a queste problematiche combinate, l'ingegneria dei trasporti ha iniziato a sviluppare nuovi sistemi di trasporto come i veicoli autonomi (AVs). Questi nuovi mezzi di trasporto equipaggiati di telecamere, sensori, radar e lidar, potranno muoversi autonomamente nel traffico cittadino e autostradale. Nello specifico, l'introduzione di mezzi a guida autonoma potrebbe cambiare radicalmente lo scenario consentendo, da una parte, un miglioramento e una diffusione più capillare del servizio pubblico, e dall'altra, l'implementazione di politiche di controllo e moderazione dell'uso dei veicoli individuali su aree estese del territorio più densamente urbanizzato (e congestionato), senza il rischio di ridurre l'accessibilità e creare esclusione sociale. Sfruttando le caratteristiche dei veicoli autonomi, l'interconnessione fra di loro (V2V) e con l'infrastruttura (V2X) in tempo reale sarà possibile migliorare l'ambiente di guida, la sicurezza stradale e le caratteristiche del flusso veicolare in particolar modo sarà possibile gestire le condizioni di traffico congestionato andando così ad aumentare la sostenibilità del trasporto stradale e nel caso di traffico cittadino di migliorare i livelli di inquinamento delle aree urbane. Inoltre con l'introduzione dei veicoli autonomi è stato valutato che sarà possibile andare a controllare e gestire al meglio l'utilizzo del territorio urbano, quindi si avranno anche degli interessanti impatti sulle aree urbane.

L'obiettivo principale del seguente elaborato è quello di presentare un nuovo approccio analitico e risolutivo per valutare, attraverso un sistema di modelli di interazione trasporti-territorio, gli impatti sulla domanda di mobilità e sull'uso del suolo; precisamente l'impatto dei veicoli autonomi sull'infrastruttura e sulla pianificazione territoriale al fine di migliorare la qualità urbana, tramite un'opportuna modellazione e analisi.

La prima parte dell'elaborato ha lo scopo di valutare lo stato dell'arte attuale circa le tematiche principali ovvero la sostenibilità nell'ambito dei trasporti e nell'ambito urbano, e i veicoli autonomi. Nella seconda parte verranno affrontati gli obiettivi principali, il primo è l'analisi e la valutazione di un modello di assegnazione multiclasse, considerando quindi due classi di veicoli e una condizione di traffico veicolare misto composto da veicoli autonomi e tradizionali. Grazie ai modelli di assegnazione è possibile simulare l'interazione fra il modello di offerta e di domanda di trasporto, e riprodurre gli effetti della congestione stradale sui flussi veicolari. In questo modo sarà possibile valutare come cambieranno le dinamiche del traffico veicolare con l'introduzione dei veicoli a guida autonoma. Successivamente verrà affrontato il secondo obiettivo della tesi, cioè la valutazione dell'impatto del traffico misto sulla rete stradale. Quindi è stato definito un problema di network design capace di valutare gli impatti del flusso veicolare misto sull'infrastruttura esistente in particolare andando a valutare l'eventuale possibilità di chiudere degli archi stradali alla mobilità mantenendo intatte le caratteristiche e le prestazioni della rete di trasporto. I seguenti problemi possono essere considerati quando si vogliono prendere delle decisioni strategiche, tattiche o operative in merito alla pianificazione territoriale e urbanistica. Entrambi i modelli sono stati validati attraverso l'applicazione a un caso reale, e successivamente i modelli sono stati utilizzati per valutare un intervento urbanistico per la città di Genova. Infine per rendere operativa la sostenibilità urbana ed integrarla nelle politiche territoriali sono stati definiti tre indicatori per permettere la valutazione del livello di sostenibilità della città di Genova. In particolare sono stati valutati i possibili incrementi delle aree urbane verdi da dedicare alla collettività.

Sono diversi i punti legati al tema della salute nel contesto urbano e altrettante le azioni da eseguire per mettere in pratica il concetto di sostenibilità; dal miglioramento della qualità dell'aria all'utilizzo di energie rinnovabili, passando dal paesaggio e finendo alla morfologia stessa degli spazi urbani. Il seguente elaborato si è soffermato sull'ultimo concetto di quelli elencati precedentemente quello legato agli spazi urbani, senza discostarsi dall'impatto del traffico veicolare grossa fonte di inquinamento delle aree cittadine. Grazie all'analisi e agli studi proposti nel seguente documento è stato possibile valutare che attraverso l'utilizzo di mezzi di trasporto più sostenibili, sarà possibile ridurre lo spazio dedicato alla circolazione dei veicoli e di conseguenza potrà cambiare l'assetto urbanistico delle città riacquistando spazi da dedicare ai cittadini sotto forma di aree verdi o per la collettività. Questo approccio presentato può essere utile alle amministrazioni pubbliche per iniziare a inquadrare i futuri trend trasportistici e urbanistici al fine di migliorare la vivibilità nelle città del domani.

## Indice

Capitolo 1 Sostenibilità.....	9
1.1.1 Le tappe fondamentali a livello internazionale: da Stoccolma a Johannesburg .....	10
1.1.2 Misure di attuazione .....	13
1.2 Urbanizzazione .....	15
1.2.1 Cos'è l'urbanizzazione? .....	15
1.2.2 Urban Sprawl .....	16
1.2.3 Consumo del suolo .....	16
1.2.4 Pareri dell'Unione Europea .....	18
1.2.5 Trend urbanistici.....	19
1.3 Città, territorio e trasporti.....	21
1.3.1 Programmi di regolazione, trasformazione urbana e di sviluppo sostenibile dei trasporti 21	
1.3.2 Analisi urbanistica del territorio.....	23
1.3.3 Città contemporanee e Smart Cities .....	28
1.3.4 Pianificazione intelligente sostenibile .....	31
1.3.4.1 Sostenibilità dei trasporti: avoid, shift and improve .....	32
1.3.4.2 Soft Mobility .....	33
1.4 Spazi urbani e land use.....	34
Capitolo 2 Veicoli Autonomi.....	38
2.1 Stato dell'arte .....	38
2.1.2 Accettazione e risposta umana .....	40
2.1.3 Comunicazione tra veicolo ed infrastruttura (V2I) e tra veicolo e veicolo (V2V).....	41
2.2 Analisi scenari futuri.....	43
2.2.1 Medio breve termine (2020-2030).....	43
2.2.2 Medio lungo termine (2030-2050).....	44
Capitolo 3 Modello di costo di arco e l'assegnazione multiclasse .....	46
3.1 Struttura della rete: Grafo.....	47
3.2 Modelli per il deflusso veicolare .....	51
3.2.2 Relazione velocità flusso per flusso veicolare misto .....	52
3.2.3 Funzione flusso-tempo di viaggio.....	56
3.3 Assegnazione Multiclasse.....	59
3.3.1 Modello per Assegnazione Multiclasse: ipotesi e notazioni .....	60
3.3.2 Esistenza e unicità del punto di equilibrio.....	63
3.4 Applicazione Modello.....	64
Capitolo 4 Network Design.....	67

4.1 Network Design: storia e stato dell'arte .....	67
4.2 Network Design Semplificato: verifica di fattibilità.....	70
4.2.1 Network Design Semplificato: verifica di fattibilità.....	71
4.2.1.1 Esempio .....	76
4.2.2 Network Design Completo .....	78
Capitolo 5 Caso di Studio: Genova Centro .....	81
5.2 Risultati.....	88
5.2.1 Assegnazione all'equilibrio multiclasse .....	88
5.2.2 Network Design .....	89
5.2.3 Analisi urbanistica della soluzione.....	90
5.3 Effetti del design ottimo sugli indicatori ambientali urbanistici .....	95
5.3.1 Individuazione delle caratteristiche urbanistiche e possibili sviluppi futuri .....	96
5.3.2 Definizione dei parametri necessari alla valutazione ambientale urbanistica.....	97
5.3.3. Definizione e analisi degli indici di sostenibilità per i centri urbani .....	97
5.3.4 Risultati del reporting ambientale e urbanistico.....	99
Capitolo 6 Conclusioni.....	101
Bibliografia.....	103
Sitografia .....	107

## Indice figure

Figura 1: Componenti fondamentali della sostenibilità .....	9
Figura 2: Schematizzazione del modello di sviluppo urbano di Burgess.....	26
Figura 3: Schematizzazione del modello di sviluppo urbano di Hoyt.....	26
Figura 4: Schematizzazione del modello di sviluppo di Harris & Ullmann. ....	27
Figura 5: Modello Smart Cities [E. S. Cities, «www.smart-cities-eu,»].....	30
Figura 6: Schema illustrativo Land Use.....	36
Figura 7: SAE Level identificativi dei sistemi AVs. ....	40
Figura 8: Esempio di grafo e matrice di incidenza (Cascetta). ....	48
Figura 9: Funzione velocità (km/ora) - flusso (veicoli/ora). ....	55
Figura 10: Funzione flusso-tempo BPR .....	56
Figura 11: Funzione flusso (veicoli/ora) - tempo di viaggio (ore).....	58
Figura 12: Schema riassuntivo dei modelli di assegnazione. ....	59
Figura 13: Schematizzazione del modello studiato per l'assegnazione multiclasse. ....	62
Figura 14: Grafo e individuazione dell'area di studio.....	64
Figura 15: Costo totale calcolato al variare del parametro $\alpha$ . ....	65
Figura 16: Andamento della percentuale di veicoli autonomi calcolato per ogni arco stradale. .....	66
Figura 17: Screenshot del file .dat di CPLEX riguardante una parte della matrice delle lunghezze degli archi. ....	76
Figura 18: Risultati dell'applicazione del modello di network design al caso di studio. ....	77
Figura 19: Individuazione dell'area del caso di studio nel territorio genovese.....	81
Figura 20: Rappresentazione con mappa Google Maps dell'area di studio.....	82
Figura 21: Grafo del caso di studio: Genova Centro.....	83
Figura 22: Grafo del caso di studio suddiviso in zone. ....	86
Figura 23: Zone di traffico di Genova .....	87
Figura 24: Grafico del costo totale all'equilibrio al variare di $\alpha$ . ....	88
Figura 25: Risultati del problema di network design completo applicato alla rete del centro di Genova. ....	90
Figura 26: Ulteriori risultati del problema di network design completo applicato alla rete del centro di Genova .....	93
Figura 27: Schematizzazione del reporting ambientale e urbanistico. ....	95

## Indice Tabelle

Tabella 1: Parametri utilizzati nella relazione flusso velocità. ....	54
Tabella 3: Matrice OD dell'ora di punta mattutina. ....	65
Tabella 4: Tabella delle variabili utilizzate nel modello di network design semplificato. ....	72
Tabella 5: Valori del vincolo (8) del modello di network design semplificato. ....	73
Tabella 6: Tabella delle variabili utilizzate nel modello di network design completo.....	79
Tabella 7: Dimensioni delle aree pedonali genovesi. ....	83
Tabella 8: Matrice origine-destinazione ( <i>MOD</i> ) dell' ora di punta mattutina. ....	87
Tabella 9: Valutazione indici di sostenibilità. ....	99
Tabella 10: Ulteriore valutazione indici di sostenibilità. ....	100



# Capitolo 1 Sostenibilità

Negli ultimi anni le realtà territoriali si stanno modificando sempre più vertiginosamente: fenomeni del tutto nuovi e inaspettati, come i processi di globalizzazione, entrano prepotentemente non solo nelle economie nazionali ma anche nella vita dei singoli, e i rischi ambientali tendono a mettere in crisi la qualità della vita e la salute degli abitanti della Terra. Tutto ciò appare più evidente nelle aree urbane, che accolgono ormai buona parte della popolazione mondiale, proprio perché le città da un lato risultano particolarmente coinvolte da questi fenomeni e dalle problematiche che essi stessi comportano, dall'altro sembrano possedere elementi, quali cultura e tecnologia, necessari alla loro soluzione.

La definizione oggi ampiamente condivisa di sviluppo sostenibile è quella contenuta nel rapporto Brundtland, elaborato nel 1987 dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo e che prende il nome dall'allora premier norvegese Gro Harlem Brundtland, che presiedeva tale commissione: "Lo sviluppo sostenibile, lungi dall'essere una definitiva condizione di armonia, è piuttosto processo di cambiamento tale per cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e i cambiamenti istituzionali siano resi coerenti con i bisogni futuri oltre che con gli attuali".

La sostenibilità ruota attorno a tre componenti fondamentali:

- **Sostenibilità economica:** intesa come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione.
- **Sostenibilità sociale:** intesa come capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione, democrazia, partecipazione, giustizia.) equamente distribuite per classi e genere.
- **Sostenibilità ambientale:** intesa come capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali.

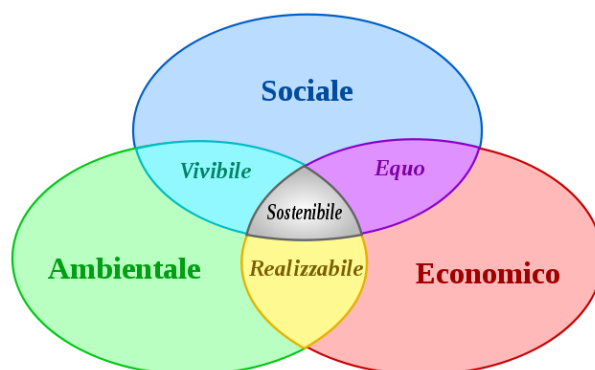


Figura 1: Componenti fondamentali della sostenibilità.

L'area risultante dall'intersezione delle tre componenti (vedi Figura 1), coincide idealmente con lo sviluppo sostenibile. Le intersezioni intermedie tra le componenti, dove vengono indicate le parole Vivibile, Equo, Realizzabile, si possono leggere come delle indicazioni di tipo operativo o di verifica.

### 1.1.1 Le tappe fondamentali a livello internazionale: da Stoccolma a Johannesburg

Nel seguente capitolo si introduce una panoramica generale sulle tappe fondamentali a livello internazionale riguardanti le misure e le restrizioni da mettere in atto circa la sostenibilità ambientale. È importante conoscere quali sono le conferenze o gli appuntamenti che hanno dato origine alle strategie mondiali riguardanti la sostenibilità.

1972, Conferenza di Stoccolma sull'Ambiente Umano

L'inizio del percorso culturale e politico relativo allo sviluppo sostenibile, si può far coincidere con la Conferenza ONU sull'Ambiente Umano tenutasi a Stoccolma nel 1972: si afferma l'opportunità di intraprendere azioni tenendo conto non soltanto degli obiettivi di pace e di sviluppo socio-economico del mondo, per i quali «la protezione e il miglioramento dell'ambiente è una questione di capitale importanza», ma anche avendo come «obiettivo imperativo» dell'umanità «difendere e migliorare l'ambiente per le generazioni presenti e future».

1980, Strategia Mondiale per la Conservazione

Nel 1980 IUCN – International Union for Conservation of Nature elabora il documento Strategia Mondiale per la Conservazione nel quale si delineano i seguenti obiettivi:

- mantenimento dei processi ecologici essenziali;
- salvaguardia e conservazione della diversità genetica nel mondo animale e vegetale;
- utilizzo sostenibile degli ecosistemi.

1987, Rapporto Brundtland

Nel 1983 viene istituita dall'ONU la "Commissione Mondiale su Sviluppo e Ambiente", presieduta dall'allora premier norvegese Gro Harlem Brundtland, che elaborò il rapporto Brundtland, a cui dobbiamo l'attuale condivisa definizione di sviluppo sostenibile.

1992, Summit della Terra

Nel 1992 a Rio de Janeiro si tiene la Conferenza ONU su Ambiente e Sviluppo, nella quale vengono confermati i contenuti della Dichiarazione della Conferenza ONU di Stoccolma del 1972 «...cercando di considerarla come base per un ulteriore ampliamento». Si pone l'accento su temi quali:

- il diritto allo sviluppo per un equo soddisfacimento dei bisogni sia delle generazioni presenti sia di quelle future;
- la tutela ambientale non separata ma parte integrante del processo di sviluppo;

- la partecipazione dei cittadini, a vari livelli, per affrontare i problemi ambientali. Quindi la possibilità di accedere alle informazioni riguardanti l'ambiente, che gli Stati dovranno rendere disponibili, e di partecipare ai processi decisionali;
- il principio del "chi inquina paga" per scoraggiare gli sprechi, stimolare la ricerca e l'innovazione tecnologica al fine di attuare processi produttivi che minimizzino l'uso di materie prime.

Dalla Conferenza di Rio de Janeiro scaturiscono due iniziative di rilievo:

- Programma d'azione Agenda 21;
- Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici.

1993, Piano Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile

Nel 1993 viene messo a punto, dal Ministero dell'Ambiente italiano, il Piano Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile per l'attuazione dell'Agenda 21, approvato dal CIPE il 28 dicembre, «...per realizzare uno sviluppo compatibile con la salvaguardia dell'ambiente».

1994, 1° Conferenza Europea sulle Città Sostenibili

Nel 1994 ad Aalborg si tiene la "1° Conferenza Europea sulle Città Sostenibili", dove viene approvata dai partecipanti la Carta di Aalborg, Carta delle città europee per uno sviluppo durevole e sostenibile: un impegno delle «...città e regioni europee ad attuare l'Agenda 21 a livello locale e ad elaborare piani d'azione a lungo termine per uno sviluppo durevole e sostenibile, nonché ad avviare la campagna per uno sviluppo durevole e sostenibile delle città europee».

1996, 2° Conferenza Europea sulle Città Sostenibili

Nel 1996 a Lisbona si tiene la "2° Conferenza Europea sulle Città Sostenibili", dove viene approvato dai partecipanti il Piano d'azione di Lisbona: dalla Carta all'azione: una valutazione dei progressi fatti dalla 1° Conferenza di Aalborg e la discussione sull'avvio e l'impegno nel processo di attivazione di una «Local Agenda 21 e sull'attuazione del locale piano di sostenibilità».

2000, 3° Conferenza Europea sulle Città Sostenibili

Nel 2000 ad Hannover si tiene la "3ª Conferenza Europea sulle Città Sostenibili" dove viene elaborato l'Appello di Hannover delle autorità locali alle soglie del XXI secolo: un «...bilancio sui risultati conseguiti nel fare diventare le nostre città e comuni sostenibili, nonché per concordare una linea d'azione comune alle soglie del XXI secolo» e, quindi, un impegno per il proseguimento nell'azione di Agenda 21 Locale.

Unione Europea 2001, VI Piano d'Azione Ambientale 2002/2010

L'Unione europea (UE) definisce le priorità e gli obiettivi della politica ambientale europea fino al 2010 e oltre, e descrive in modo particolareggiato i provvedimenti da adottare per contribuire alla realizzazione della strategia in materia di sviluppo sostenibile da essa elaborata. I principali temi sono:

- Natura e biodiversità

- Ambiente e salute
- Uso sostenibile delle risorse naturali e gestione dei rifiuti.

#### 2002, Vertice Mondiale sullo Sviluppo Sostenibile

Nel 2002 a Johannesburg si tiene il "Vertice Mondiale sullo Sviluppo Sostenibile" in cui le novità sono sostanzialmente le seguenti:

- la crescita economica non è la base dello sviluppo;
- è opportuno distinguere tra crescita e sviluppo;
- nella piramide dei valori, il pilastro sociale è al vertice dei pilastri economico e ambientale; comunque nessuno dei pilastri potrà essere considerato a sé stante;
- è prioritario lo sviluppo rispetto alla crescita economica;
- è necessario valutare i costi sociali e ambientali delle politiche.

#### 2004, Aalborg +10 e gli Aalborg Commitments

Nel giugno 2004 ad Aalborg ha luogo la Quarta Conferenza Europea delle città sostenibili (detta "Aalborg + 10"); in essa 110 comuni, appartenenti a 46 paesi diversi, confermano una visione comune per un futuro urbano sostenibile. La Conferenza è stata l'occasione per effettuare una riflessione su dieci anni (Aalborg 1994) d'impegno per la realizzazione di azioni locali per la sostenibilità, necessaria per fissare nuovi traguardi e assumere impegni più definiti. In particolare è stata individuata la necessità di fissare target qualitativi e quantitativi per l'implementazione dei principi di sostenibilità. La visione si concretizza nei cosiddetti Commitments Aalborg +10, una serie d'impegni condivisi finalizzati a tradurre la visione comune in azioni concrete a livello locale. I Commitments sono uno strumento flessibile e adattabile alle singole situazioni locali. I governi locali che vi aderiscono avviano un percorso di individuazione degli obiettivi, che coinvolge gli stakeholders locali e che si integra con l'Agenda 21 Locale o con altri piani d'azione sulla sostenibilità.

Con la sottoscrizione degli Aalborg, gli enti si impegnano a:

- produrre un'analisi integrata sulla base degli Aalborg Commitments, entro 12 mesi dalla sottoscrizione, che definisca i target per ogni punto del documento su progetti e iniziative in corso;
- istituire un processo locale condiviso per l'individuazione degli obiettivi che aggrega l'Agenda 21 Locale e altri piani;
- stabilire specifici obiettivi locali entro 24 mesi dalla data della firma, fissando scadenze temporali per verificare i progressi compiuti rispetto agli impegni presi;
- effettuare una verifica periodica dei nostri risultati relativamente agli Aalborg Commitments e renderla disponibile ai cittadini;
- diffondere regolarmente informazioni sugli obiettivi e i relativi progressi.

## 1.1.2 Misure di attuazione

Come nel capitolo precedente, anche nel seguente si vogliono introdurre le misure di attuazione riguardanti la sostenibilità.

### Il protocollo di Kyōto

L'11 dicembre 1997 viene sottoscritto il Protocollo di Kyōto, strumento attuativo della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, a sua volta sottoscritta a New York il 9 maggio 1992 e scaturita nello stesso anno a Rio de Janeiro. Entrato in vigore il 16 febbraio 2005, impegna 169 nazioni del mondo a ridurre, per il periodo 2008-2012, il totale delle emissioni di gas serra almeno del 5% rispetto ai livelli del 1990 (preso come anno di riferimento), al fine di rimediare ai cambiamenti climatici in atto. Grandi assenti gli Stati Uniti, primi produttori di gas a effetto serra nel mondo, che non lo hanno ratificato. Per raggiungere gli obiettivi prefissati, le azioni devono essere finalizzate in particolare a:

- sostituire le fonti energetiche non rinnovabili con fonti energetiche rinnovabili;
- ridurre l'uso di combustibili fossili;
- aumentare l'efficienza energetica;
- ridurre i consumi energetici;
- ridurre la deforestazione.

### ISO 26000: Responsabilità sociale e sviluppo sostenibile

A novembre 2010 si è pubblicata la norma ISO 26000 Guida sulla responsabilità sociale che intende fornire una guida mirata a responsabilizzare tutti i tipi di organizzazioni sull'impatto delle loro attività sulla società e sull'ambiente, affinché tali attività siano condotte in una modalità che, in accordo con le leggi applicabili, sia basata su un comportamento etico e sia consistente con gli interessi della società e di uno sviluppo sostenibile.

### ISO 9004: Qualità verso la sostenibilità

L'evoluzione dei modelli organizzativi stanno recependo con forte attenzione il tema dello sviluppo sostenibile. La nuova revisione della norma ISO 9004, da decenni di riferimento internazionale per i Sistemi di gestione per la qualità in ambito aziendale e non, da Linea guida per il miglioramento delle prestazioni (nella revisione 2000) sarà intitolata *Managing for sustainability* (nella revisione prevista per gennaio 2009) proprio con l'intenzione di fornire alle organizzazioni una linea guida per conseguire un successo sostenibile. Nella stessa norma vien proposta la definizione di "sostenibile" come «capacità di un'organizzazione o di un'attività di mantenere e sviluppare le proprie prestazioni nel lungo periodo» attraverso un bilanciamento degli interessi economico-finanziari con quelli ambientali.

### Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia

Il 18 giugno 2010 è stata pubblicata sulla gazzetta ufficiale dell'Unione Europea la nuova direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia. Nell'articolo 1 si legge: «la presente direttiva promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione, tenendo conto delle

condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi». La direttiva, in vigore dal 9 luglio 2010, costituisce un notevole passo avanti nel raggiungimento dello sviluppo sostenibile; stabilendo, fra le altre cose, che dal 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano "edifici a energia quasi zero"; in particolare, quelli di proprietà di enti pubblici dovranno rispettare gli stessi criteri a partire dal 31/12/2018. Per "edificio a energia quasi zero" s'intende: "un edificio ad altissima prestazione energetica"; il cui "fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze".

## 1.2 Urbanizzazione

Promuovere le pratiche di sostenibilità anche, e soprattutto, all'interno delle grandi aree urbanizzate: è questa la nuova sfida per il prossimo futuro secondo il report "Building sustainability in an urbanizing world", pubblicato dalla Banca Mondiale nel luglio del 2013. Le zone urbane sono importanti punti di accesso ai servizi di base e al benessere sociale ed economico per oltre la metà della popolazione mondiale e contribuiscono significativamente alle problematiche del climate change, del sovrasfruttamento delle risorse e della perdita di biodiversità, risentendone esse stesse per prime.

### 1.2.1 Cos'è l'urbanizzazione?

L'urbanizzazione viene in genere definita principalmente in relazione a due categorie interpretative: da un lato quella demografica, legata a fenomeni quali l'aumento della popolazione nell'aree definite urbane e la proportion urban, dall'altro quella territoriale, basata su indicatori quali il consumo di suolo, la diffusione e la concentrazione. Spesso l'urbanizzazione è stata associata al processo di trasformazione del territorio da rurale a urbano, allo sviluppo dei centri abitati e alla concentrazione della popolazione nelle aree urbane. Il tasso di urbanizzazione infatti si può misurare calcolando il rapporto tra popolazione urbana e popolazione rurale, anche se va distinto dalla crescita urbana (urban growth), che invece si riferisce solo alla crescita demografica della popolazione che risiede in aree urbane, e non all'espansione fisica. Il grande interesse nei confronti dell'urbanizzazione e, più in generale, dell'urbanità, è dovuto alle dimensioni del fenomeno su scala globale, dato che il 50 per cento della popolazione vive nelle città e il trend è in costante crescita. Si prevede infatti che da adesso al 2030 ci saranno più di 41 mega-city (città con più di 10 milioni di abitanti) e che il 64 per cento della popolazione mondiale vivrà in aree urbane nel 2050. Praticamente si assisterà a un totale ribaltamento delle proporzioni rispetto al 1950, quando la popolazione urbana costituiva un terzo di quella globale. Gli effetti dell'urbanizzazione sono spesso ambivalenti e contraddittori; la crescita urbana spesso porta con sé effetti negativi quali congestione del traffico, sovrappollamento, disoccupazione, inquinamento ambientale, corruzione, carenza di infrastrutture, debolezza delle istituzioni e, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Generalmente gli studi pongono l'attenzione non solo sui trend, le caratteristiche, i pattern, le forze motrici e gli effetti dell'urbanizzazione, ma anche sulle sfide che essa pone al governo del territorio, che riguardano sia la sua amministrazione che la qualità complessiva della vita urbana.

## 1.2.2 Urban Sprawl

Il fenomeno dell'urban sprawl, definito come l'espansione urbana disordinata e incontrollata verso le zone periferiche unita al calo della densità abitativa (Brueckner 2001), è uno dei più evidenti cambiamenti nell'uso del suolo che interessa un numero crescente di città nel mondo (Arribas-Bel et al. 2011). L'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) ha descritto lo sprawl come un modello fisico di espansione a bassa densità delle grandi aree urbane a scapito delle aree agricole e da un uso misto del territorio e delle periferie (European Environmental Agency 2006). Il rischio che esso comporta è l'innalzamento delle spese pubbliche per la fornitura di servizi e un maggior utilizzo di mezzi privati; viene pertanto considerato "insostenibile" (Gibelli e Salzano 2006). Generalmente con l'espressione "sprawl urbano" si intende definire l'estensione di una città e dei suoi sobborghi sulle aree rurali che si trovano ai confini dell'area urbana. Il risultato di questo processo è la dispersione urbana o lo sparpagliamento di caseggiati, strade, centri commerciali. Nonostante i dati disponibili non siano omogenei, si stima che le aree artificiali (che comprendono quelle residenziali e di servizio) coprano solo il 4,3 per cento della superficie europea e il 7 per cento di quella italiana (Istat 2016), benché la loro dispersione comporti che almeno un quarto del territorio sia direttamente coinvolto da un uso "urbano" (EEA, Corine Land Cover, in Ispra 2015). In Europa le aree urbane si espandono ad una velocità superiore alla crescita della popolazione: negli ultimi venti anni si è assistito ad una espansione fisica, intesa come incremento delle aree edificate, del 20 per cento a fronte di una crescita di popolazione di solo il 6 per cento (Di Iacovo, Rovai, Meini, in Perrone e Zetti 2010). In realtà ciò che si sta verificando è uno spostamento di una parte della popolazione urbana nei comuni minori, dove i costi per l'abitazione sono ridotti, oppure nella campagna, che diventa sempre più urbanizzata, influenzando quindi sull'espansione delle fasce periurbane. Gli attuali studi sulle città europee sono ormai concordi nel considerare finito il periodo dell'espansione urbana, sostenendo la necessità di un nuovo approccio orientato alla densificazione (o ri-densificazione) e al recupero di aree urbane non utilizzate o male utilizzate, senza prevedere ulteriore consumo di suolo. Consumo di suolo e urban sprawl sono dunque fenomeni strettamente correlati e sono sempre più spesso considerati il risultato di una pianificazione territoriale poco efficiente. Il concetto di densità è stato introdotto per misurare i fenomeni demografici e insediativi che hanno condotto alla formazione e al consolidamento della città industriale in Europa e costituisce un parametro per osservare e pianificare lo sviluppo urbano.

## 1.2.3 Consumo del suolo

Un'alterata percezione sociale dell'essenzialità del suolo per l'equilibrio ambientale, rinforzata dal suo essere una risorsa naturale riconosciuta come privatizzata e privatizzabile, ne determina frequentemente il suo uso o abuso, nell'incertezza della sua fragilità, della sua sostanziale non rinnovabilità e degli impatti derivanti dalla perdita delle sue funzioni. Le scorrette pratiche agricole, la diffusione insediativa, delle attività economiche e delle infrastrutture possono originare gravi processi degradativi che limitano o inibiscono totalmente la funzionalità del suolo e che spesso diventano evidenti solo quando sono irreversibili, o in uno stato talmente avanzato da renderne estremamente oneroso ed economicamente poco vantaggioso il ripristino. Tra i numerosi fattori



che determinano forme di copertura del suolo in ambito urbano (infrastrutture, complessi commerciali, etc.) l'edificato residenziale è l'elemento che più di altri viene associato all'insediamento antropico. Al fine di valutare l'evoluzione dell'occupazione dello spazio ad opera degli edifici, una delle fonti primarie è quella dei dati censiti. In questa prospettiva, sono due gli elementi che risultano decisivi per valutare l'impatto del consumo di territorio: da una parte la consistenza numerica e dall'altra quella relativa alle dimensioni (volume e superficie) degli edifici. Combinando opportunamente le informazioni censuarie relative agli edifici (interni per piano di ciascun edificio) e alle abitazioni (superficie media delle abitazioni) è possibile stimare la proiezione del fabbricato sul terreno, la superficie coperta, utilizzandola quale ulteriore indicatore del consumo di suolo. In Italia la dimensione, in termini di occupazione al suolo, dell'edificato ha registrato un andamento sempre crescente nel corso degli anni, passando da una superficie media di 98,7 m<sup>2</sup> degli edifici più vecchi ai 136,3 m<sup>2</sup> di quelli costruiti nell'ultimo decennio intercensuario. I valori differiscono anche in funzione del grado di urbanizzazione e della localizzazione geografica, con gli edifici dei centri delle principali realtà urbane mediamente più grandi di quelli ricadenti nei comuni di corona, a loro volta mediamente più grandi degli edifici delle città medie e degli altri sistemi locali. Nel corso del tempo si è andata complessivamente affermando un'edilizia residenziale più "aggressiva" e meno attenta al rispetto della risorsa 'suolo', in linea con le altre dinamiche dei consumi che hanno caratterizzato lo sviluppo economico del secondo dopoguerra nel nostro Paese. È stato valutato come le risorse ambientali non sono tutelate: il suolo, risorsa finita, è consumato con ritmi eccessivi (80 – 100 ha/giorno) senza nessuna forma di compensazione, mentre la diffusione insediativa impedisce i processi naturali di rigenerazione ecologica di acqua e aria; si determina così una condizione di non sostenibilità. Tutto questo porta, in particolare ai margini delle aree urbane esistenti e in corrispondenza di aree a bassa densità, a generare pressioni elevate sulle aree agricole, naturali e semi naturali, che attraverso una modifica dell'uso del suolo, incrementano le superfici con copertura artificiale e le aree impermeabilizzate. Uno stato del suolo, quindi, che può essere valutato in termini di percentuale di superficie impermeabilizzata o artificializzata. In queste aree, gli impatti sono significativi e portano alla riduzione o alla perdita delle funzioni del suolo, alla minore disponibilità di aree per la nostra e per le future generazioni, a impatti negativi sui servizi ecosistemici e sulla biodiversità, alla frammentazione del paesaggio, al possibile peggioramento della qualità della vita nelle città. In particolare, l'incremento della copertura artificiale a scapito di superficie agricola, naturale o seminaturale, causa una profonda alterazione biofisica del suolo, che nella gran parte dei casi risulta irreversibile. Questo rende critica la condizione di disponibilità di questa risorsa naturale che è, inoltre, sostanzialmente non rinnovabile, a causa dei tempi estremamente lunghi di formazione e di ripristino del suolo. Un altro aspetto da considerare è che il deterioramento del suolo ha ripercussioni dirette sulla qualità delle acque e dell'aria, sui cambiamenti climatici, sulla sicurezza dei prodotti destinati all'alimentazione umana e animale e impatta direttamente sulla salute dei cittadini. Possibili risposte riguardano la limitazione o l'azzeramento del consumo e dell'impermeabilizzazione del suolo, il mantenimento di alcune funzioni del suolo anche in caso di nuove costruzioni, oppure l'implementazione di misure di deimpermeabilizzazione e di rinaturalizzazione di aree artificiali. L'ultima opzione è raramente applicata e comporta costi elevati, oltre a garantire difficilmente, comunque, il completo ripristino delle condizioni di naturalità originali (Pileri, 2007; Paolanti, 2010). Occorrerebbe, quindi, orientare lo sviluppo urbano verso il riutilizzo di aree già costruite, compresi i siti industriali dismessi, privilegiando, al contempo, tecniche costruttive che consumano meno suolo o che ne possano

salvaguardare alcune funzioni (in particolare la permeabilità). Raccogliendo le indicazioni contenute nel rapporto finale di Rio+20, il tema del monitoraggio del territorio è presente anche nell'Agenda Globale per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite e nei relativi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals - SDGs), da raggiungere entro il 2030, che dovranno essere integrati nei programmi nazionali a breve e medio termine, così da evitare la coesistenza di agende differenti e incoerenti (UN, 2015). Tra i target individuati, di particolare interesse per il territorio e per il suolo, i governi dovranno:

- migliorare, entro il 2030, la sostenibilità dell'attuale modello di sviluppo urbano e degli strumenti di pianificazione;
- assicurare, entro il 2030, l'accesso universale a spazi verdi e spazi pubblici sicuri, inclusivi e accessibili;
- raggiungere, entro il 2030, un land degradation neutral world, quale elemento essenziale per mantenere le funzioni e i servizi ecosistemici in un dato intervallo di tempo.

Con la sottoscrizione dell'Agenda, tutti i paesi compresa l'Italia hanno accettato di partecipare ad un processo di monitoraggio di questi obiettivi gestito dalla Commissione Statistica delle Nazioni Unite, attraverso un sistema di indicatori, tra cui alcuni specifici sul consumo di suolo, sull'uso del suolo e sulle aree artificiali. Tra gli indicatori relativi a tali obiettivi sono di interesse specifico:

- densità di verde urbano rispetto alla superficie comunale;
- la percentuale delle aree urbane costruite accessibile al pubblico;
- la percentuale del territorio soggetto a fenomeni di degrado.

## 1.2.4 Pareri dell'Unione Europea

Da diversi anni, l'Unione Europea ha posto l'attenzione sui fenomeni di diffusione delle aree urbane, urban sprawl, come testimoniano i due rapporti elaborati dal Joint Research Centre e dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) nel 2002 e nel 2006. In particolare, i due rapporti evidenziano lo scollamento tra crescita della popolazione e crescita dell'urbanizzazione. Nel 2002 la Commissione Europea ha prodotto un primo documento, la Comunicazione COM (2002) 179 dal titolo "Verso una strategia tematica per la protezione del suolo" e nel settembre 2006 ha proposto una nuova Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, che avrebbe dovuto definire il quadro complessivo per la protezione del suolo e adottare la Strategia tematica per la protezione e l'uso sostenibile del suolo. Tale strategia ha posto l'accento sulla prevenzione da un ulteriore degrado del suolo e sul mantenimento delle sue funzioni, sottolineando la necessità di attuare buone pratiche per ridurre gli effetti negativi del consumo di suolo e, in particolare, della sua forma più evidente e irreversibile: l'impermeabilizzazione. Tale attenzione è approdata, con la Tabella di marcia per un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse del 2011, alla definizione dell'obiettivo dell'arresto del consumo del suolo entro l'anno 2050. Obiettivo rafforzato in seguito con l'approvazione del Settimo Programma di Azione Ambientale, denominato "Vivere bene entro i limiti del nostro pianeta", che ha riproposto l'obiettivo precedente, richiedendo inoltre che, entro il 2020, le politiche dell'Unione tenessero conto dei loro impatti diretti e indiretti sull'uso del territorio. Peraltro, la Commissione aveva già ritenuto utile indicare le priorità di azione e le linee guida da seguire per raggiungere l'obiettivo dell'occupazione netta di terreno pari a zero entro il

2050 e ha pubblicato nel 2012 le linee guida per limitare, mitigare e compensare l'impermeabilizzazione del suolo. L'approccio proposto è quello di mettere in campo politiche e azioni finalizzate, nell'ordine, a limitare, mitigare e compensare l'impermeabilizzazione del suolo, da definire dettagliatamente negli Stati membri e da attuare a livello nazionale, regionale e locale. In altri termini, gli Stati membri dovranno, prioritariamente, assicurare la limitazione dell'impermeabilizzazione attraverso la riduzione del tasso di conversione e di trasformazione del territorio agricolo e naturale e il riuso delle aree già urbanizzate, con la definizione di target realistici al consumo di suolo a livello nazionale e regionale e di linee di azione come la concentrazione del nuovo sviluppo urbano nelle aree già insediate. Solo quando la perdita di suolo è inevitabile, potranno essere previste misure di mitigazione, volte al mantenimento delle principali funzioni del suolo e alla riduzione degli effetti negativi sull'ambiente del soil sealing. Infine, tutti gli interventi inevitabili di nuova impermeabilizzazione del suolo dovranno essere compensati, ad esempio, con una riqualificazione di terreni già impermeabilizzati oppure, come ultima possibilità, sotto forma di corrispettivi economici, purché vincolati per l'utilizzo in azioni di protezione del suolo. Sebbene nel maggio 2014 la Commissione abbia ritirato la proposta della Direttiva Quadro sul suolo del 2006, che avrebbe trasformato la Strategia tematica per la protezione del suolo in norme vincolanti per gli Stati Membri, la stessa Commissione ha poi dichiarato di voler mantenere il proprio impegno sulla questione, valutando le diverse opzioni possibili e, intanto, delegando al Settimo Programma di Azione Ambientale le sfide da affrontare per il perseguimento degli obiettivi sulla protezione del suolo. Ogni anno in Europa è stimato che un'area pari a circa 1.000 km<sup>2</sup>, più o meno equivalente alla superficie di una città come Berlino, viene definitivamente persa in seguito alla costruzione di nuove infrastrutture e reti viarie (Commissione Europea, 2011). Sebbene il suolo e il territorio siano riconosciuti come risorse vitali, nelle ultime decadi il tasso di suolo perso in Europa è cresciuto più del doppio rispetto all'incremento della popolazione (EEA, 2016). Tra il 2000 e il 2006 la perdita media nell'UE è cresciuta del 3%, con picchi del 14% in Irlanda e Cipro e del 15% in Spagna.

### 1.2.5 Trend urbanistici

Uno degli aspetti più interessanti su cui stanno riflettendo architetti, pianificatori e progettisti di tutto il mondo è sicuramente la messa in discussione di un modus operandi che ha imperversato negli ultimi decenni. L'architettura, a partire dalla metà degli anni '70, come ha più volte accusato l'architetto danese Jan Gehl, si è gradualmente abbandonata a una forma di grandeur. Si è iniziato a parlare di archi-star e i professionisti hanno incominciato a vedere il proprio lavoro come un'arte, puntando su estrosità, magnificenza e spettacolarità. Dimenticando, nella maggior parte dei casi, il vero ruolo dell'architettura, che dovrebbe essere sempre al servizio di chi la usa: gli edifici dovrebbero essere costruiti pensando ai futuri occupanti e le città pensate in base alle esigenze degli abitanti. Ecco che, tra i trend urbanistici moderni sembra delinearsi proprio questa volontà di recuperare questo obiettivo, riscoprendo un rapporto privilegiato con le persone, mettendole al centro di qualsiasi progetto. Questo scopo può essere raggiunto in vari modi, ma generalmente si traduce nella creazione di spazi verdi, percorsi pedonali e ciclabili, offerta di servizi e di complessi residenziali di elevata qualità. Dal momento in cui trascorriamo più del 90% del nostro tempo in ambienti chiusi, sta assumendo sempre più importanza la valutazione della salubrità degli ambienti interni. E' decisamente questo un altro dei trend urbanistici che sarà al centro del dibattito nei prossimi anni. Finora l'importanza della qualità dell'aria interna (Indoor Air Quality, IAQ) e della qualità globale dell'ambiente interno (Indoor Environmental Quality, IEQ) non è stata considerata

come avrebbe dovuto. Se finora, nell'immaginario comune, parlare di verde in città significava riferirsi ai grandi parchi urbani, adesso esistono mille modi, sempre più creativi e impensati, di inserire la vegetazione nell'ambiente urbano. Nei nuovi trend urbanistici c'è sicuramente la volontà di investire in tanti interventi che prevedono l'inserimento della vegetazione ovunque sia possibile: negli angoli inutilizzati delle città, sui tetti degli edifici e sulle infrastrutture, trasformandole in infrastrutture verdi. Questo trend sta prendendo sempre più piede, grazie a pianificatori lungimiranti e anche all'iniziativa privata, con movimenti particolarmente interessanti, che sfruttano progetti di pocket parks per rigenerare gli ambienti urbani. Ne sono un esempio i progetti californiani Paley Park e Park (in) Day, che hanno previsto la conversione di vecchi parcheggi in spazi pubblici temporanei e ricchi di verde, piccole oasi dove riposarsi e staccare la spina dalla frenesia urbana. Stesso principio applicato dal programma newyorkese Street Seats, che prevede la realizzazione di aree di sosta con sedie e tavolini circondati dalla vegetazione. Infine, non si possono non citare due dei trend urbanistici più importanti che caratterizzeranno sicuramente la pianificazione urbanistica e la progettazione edilizia del futuro. Da un lato c'è la necessità di sviluppare strategie a livello urbanistico in un'ottica di resilienza, mettendo a punto una serie di misure volte a proteggere le città dagli effetti dei cambiamenti climatici. Dall'altro lato si continuerà sempre più a investire in costruzioni che rispettino elevati standard energetici e ambientali, come sta già avvenendo da qualche anno a questa parte.

## 1.3 Città, territorio e trasporti

### 1.3.1 Programmi di regolazione, trasformazione urbana e di sviluppo sostenibile dei trasporti

La sostenibilità è diventata un argomento chiave per la pianificazione territoriale e quindi per i trasporti. Come lo sviluppo sostenibile, il concetto di trasporto sostenibile è ampiamente definito. L'espressione mobilità sostenibile indica le modalità di spostamento (e in generale un sistema di mobilità urbana) in grado di diminuire gli impatti ambientali sociali ed economici generati dai veicoli privati e cioè:

- l'inquinamento atmosferico e le emissioni di gas serra;
- l'inquinamento acustico;
- la congestione stradale;
- l'incidentalità;
- il degrado delle aree urbane (causato dallo spazio occupato dagli autoveicoli a scapito dei pedoni);
- il consumo di territorio (causato dalla realizzazione delle strade e infrastrutture).

Analizzando gli aspetti connessi alla mobilità non è possibile prescindere dalla conoscenza dei relativi aspetti normativi, sia in ragione dell'importanza che ormai essi hanno assunto, sia per il ruolo centrale che, nella gestione della mobilità, rivestono enti ed associazioni pubbliche.

Un importante contributo, che la Commissione europea ha fornito per l'elaborazione della strategia sull'ambiente urbano, è costituito dalla comunicazione n. 60 del 2004: "Comunicazione della Commissione al Consiglio, al Parlamento europeo, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni Verso una strategia tematica sull'ambiente urbano". Questa comunicazione ha presentato il quadro di riferimento per l'elaborazione delle linee d'azione, che sono state formalizzate l'11 gennaio 2006 con una nuova comunicazione dal titolo Strategia tematica sull'ambiente urbano (Comunicazione 718/2005). Il documento Verso una strategia tematica sull'ambiente urbano contiene ciò che è emerso dalla consultazione delle città e delle altre parti interessate, nonché i risultati degli studi dei gruppi di lavoro e del gruppo di esperti dell'Unione europea sull'ambiente urbano. La strategia viene articolata secondo quattro temi prioritari:

- edilizia sostenibile;
- gestione urbana sostenibile;
- progettazione urbana sostenibile;
- trasporto urbano sostenibile.

Nel Libro bianco (2011), l'Europa ha stabilito la necessità di:

1. Ridurre le emissioni mondiali di gas serra, con l'obiettivo di limitare i cambiamenti climatici globali al di sotto dei 2 ° C. Nel complesso, l'UE deve ridurre le emissioni

dell'80-95% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2050 e entro il 2030 del 20% rispetto a quelle del 2008.

2. Dimezzare l'uso di auto "convenzionalmente rifornite" entro il 2030; eliminarle entro il 2050; raggiungere entro il 2030 la logistica di città senza CO<sub>2</sub> nei principali centri urbani.
3. Le nuove tecnologie per i veicoli e la gestione del traffico saranno fondamentali per ridurre le emissioni dei trasporti nell'UE come nel resto del mondo.

A settembre 2015, l'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha adottato una serie di 17 obiettivi (SDG, Sustainable Development Goals) di sviluppo sostenibile. L'SDG 11 è dedicato alle città: "rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili". La nuova Agenda Urbana, approvata a Quito nell'ottobre 2016 in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite (Habitat III), è incentrata anche sullo sviluppo urbano sostenibile. La sezione 50 si concentra sulle interazioni e connettività urbano-rurali rafforzando il trasporto sostenibile e la mobilità, sulle reti e infrastrutture tecnologiche e di comunicazione, sostenute da strumenti di pianificazione basati su un approccio urbano e territoriale integrato per massimizzare il potenziale di questi settori per una maggiore produttività, sociale, coesione economica e territoriale, nonché sicurezza e sostenibilità ambientale.

Le strategie europee sulla mobilità urbana indicano il Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) come strumento essenziale per stimolare e governare il cambiamento necessario. L'utilizzo del PUMS è considerato un fattore competitivo nell'accesso ai finanziamenti europei, che rappresentano la principale risorsa oggi a disposizione per gli Enti Locali. Attraverso l'attivazione di questi piani è possibile affrontare le nuove sfide poste dai trasporti, e le criticità che interessano le aree urbane in un'ottica maggiormente integrata e sostenibile, caratteristiche che fanno prevedere una permanenza stabile e duratura dei PUMS sull'agenda politica della Commissione Europea e degli stati membri. Tramite questa nuova fase di pianificazione si vuole porre al centro dell'attenzione le persone e i cittadini, infatti uno degli argomenti chiave è l'accessibilità e la qualità della vita. Inoltre si pone l'attenzione su: lo sviluppo di varie modalità di trasporto, incoraggiando l'utilizzo di quelle più sostenibili; il contribuire a migliorare l'attrattività del territorio e la qualità dell'ambiente urbano. Un altro tassello importante a livello europeo per lo sviluppo sostenibile delle città è il Piano della Logistica Urbana Sostenibile (SULP Sustainable Urban Logistics Plan). È uno strumento di supporto politico rivolto alle città di piccole e medie dimensioni europee per la modellazione e la valutazione della logistica urbana. La metodologia SULP è correlata a un piano di mobilità urbana sostenibile. I suoi elementi principali comprendono un approccio partecipativo e il coinvolgimento a livello politico. Adotta un approccio dal basso verso l'alto, partendo dalle esigenze degli utenti, dalle esigenze degli operatori e dagli obiettivi delle città.

## 1.3.2 Analisi urbanistica del territorio

Lo studio della mobilità in ambito urbano non può prescindere da una attenta analisi del territorio di riferimento. È importante, in particolare, analizzare i processi di crescita ed urbanizzazione delle aree urbane, definendo possibili modelli di sviluppo del tessuto urbano. È palese, infatti, come la distribuzione spaziale di residenze, attività, industrie, attività economiche del settore terziario, ecc., produca la necessità e la richiesta di spostamenti, sia di persone, che di merci (C.Buchanan,1963).

Il tema della mobilità interessa tre fattori: gli spostamenti, le infrastrutture di trasporto e le attività che le persone svolgono e che sono l'origine degli spostamenti; ciascuno di questi tre elementi può essere causa o effetto degli altri due. Gli spostamenti possono essere origine della decisione di realizzare nuove infrastrutture, o viceversa, si può pensare di realizzare nuove infrastrutture allo scopo di incrementare gli spostamenti. Nuove infrastrutture di trasporto possono indurre la localizzazione di nuove attività o viceversa, la localizzazione di nuove attività può indurre interventi sulla rete infrastrutturale.

Diversi usi del suolo determinano altrettanti diversi e variabili flussi di traffico, aprendo la strada agli studi che mettono in relazione i differenti assetti del trasporto e delle forme di accessibilità ai luoghi della città. È uno spostamento di enfasi fondamentale: dagli effetti alle cause, dagli studi sul traffico agli studi sul land use, vale a dire dagli effetti alle origini dei fenomeni di mobilità, dal modo di essere dei flussi alle cause che li determinano (Rapporto "Mitchell e Rapkin",1954).

La capacità di un'infrastruttura e la sua portata possono influenzare la disponibilità di uno spostamento, in quanto possono modificare la velocità consentita o il livello di comfort (livello di servizio). L'accessibilità di un'attività può influenzare il comportamento di una persona, portandola a preferire quell'attività rispetto ad altre alternative meno accessibili, o addirittura a inserire quell'attività nella propria agenda in virtù della sua accessibilità. L'accessibilità di una attività non può essere valutata in termini assoluti, ma relativamente ad una determinata persona e in relazione alle altre attività che questa deve svolgere. È opportuno distinguere tra accessibilità attiva e passiva. L'accessibilità attiva fa riferimento alla facilità di accesso da parte delle persone alle attività localizzate sul territorio, mentre l'accessibilità passiva fa riferimento alla facilità di accesso di singole attività da parte di persone localizzate in punti diversi del territorio. L'accessibilità attiva è riferita, quindi, alla facilità di accesso da un determinato luogo, mentre l'accessibilità passiva fa riferimento alla facilità di accesso a un determinato luogo (Dijst, 2002).

Cecchini, nel 2012, propone la seguente definizione di città, area urbana e area metropolitana:

- **Città** è una porzione di territorio ad alta densità insediativa, caratterizzata da una edificazione intensa e compatta, senza effettive soluzioni di continuità, di norma estese, nel corso del primo «ciclo» della urbanizzazione industriale, attorno ad un centro storico preesistente. In termini economico-funzionali essa è soprattutto il luogo nodale delle reti di relazioni ove si concentrano gli scambi e si polarizzano i flussi di persone, di beni e di messaggi: è quindi il luogo ove si costituiscono le maggiori convenienze per la localizzazione delle attività, ad alto valore aggiunto, connesse a funzioni direzionali, di gestione e di rappresentanza che di quegli scambi e di quei flussi più largamente beneficiano.

- **L'area urbana** è di norma costituita da un territorio più ampio, la cui densità insediativa permane piuttosto elevata, ma che può presentare soluzioni di continuità della edificazione, e al cui interno sono localizzate, in modo commisto, o comunque a breve distanza reciproca, residenze, attività industriali, manifatturiere in particolare, commerciali e di servizio in un sistema fortemente integrato di produzione, di distribuzione e di consumo. L'«area urbana» rappresenta, dunque, l'estensione produttiva e residenziale della «città» nei territori a essa limitrofi. Le città intorno alle quali si è andata formando un'area urbana, essenzialmente nel corso del secondo «ciclo» di urbanizzazione, sono usualmente indicate come «città centrali».
- Con il termine **area metropolitana**, si intende un sistema economico, funzionale più che una unità insediativa demografico-edilizia; esso può includere anche diverse «città» ed «aree urbane». Ciò che importa nella individuazione di un'area metropolitana, le cui dimensioni sia territoriali che demografiche e funzionali sono comunque molto più ampie di quelle dell'«area urbana», non è la continuità della edificazione, la quale può risultare interrotta da territori anche ampi, a destinazione agricola o liberi, quanto la presenza di rapporti funzionali, di interrelazioni e di scambi fra le diverse attività e funzioni insediate nel suo ambito. I confini fisici di un'area metropolitana appaiono dunque più sfumati di quelli della «città» e anche dell'«area urbana»; cionondimeno essi sono approssimativamente definibili attraverso opportuni indicatori.

Le città e le metropoli sono sottoposte, nel tempo, a continue variazioni, sia da un punto di vista morfologico-strutturale, sia socio-economico. Tuttavia, è possibile sintetizzare lo sviluppo di una città in tre fasi storiche tra loro consecutive, a partire da metà '800:

1. formazione della città industriale (da metà '800 a fine '800);
2. formazione delle aree urbane e metropolitane (da inizio '900 a metà '900);
3. la città diffusa, riuso e riqualificazione (da metà '900 ad oggi).

Per rappresentare le città in maniera semplificata, e per schematizzarne le principali correlazioni tra gli infiniti elementi che le compongono, spesso vengono impiegati i cosiddetti “modelli urbani” o “modelli di sviluppo urbano”. Si tratta di strumenti empirici di ausilio per la comprensione di meccanismi di crescita urbana, e dei relativi processi di sviluppo. Tali modelli sono stati testati su alcune città pilota che rappresentano i casi studio. Tuttavia, come vedremo, le città sono molto differenti tra loro, soprattutto in relazione all'area geografica mondiale di appartenenza, alle condizioni morfologiche, e alla loro evoluzione storica, a partire dalla ragione per cui esse sono sorte.

E.W. Burgess (1925) fu il primo, e partì dall'idea che una città si espande dall'interno verso l'esterno, tendenzialmente in modo uniforme in tutte le direzioni. Burgess ipotizzò che lo sfruttamento del territorio, e la distribuzione dei gruppi di popolazione nelle città, non avvenga in modo uniforme. Per questo motivo in ogni zona della città dominano determinate utilizzazioni territoriali, oppure gruppi di popolazione. Secondo Burgess, lo sviluppo più rapido lo vive la “city”, detta anche C.B.D. (Central Business District), grazie alle sue attività economiche e terziarie. Secondo questo modello, rappresentato in Figura 1, una grande città può essere suddivisa in sei zone concentriche così distinte:



- Zona I - Central Business District, (o Downtown). Prevalenza di attività terziarie e direzionali. È l'area che attrae e produce il maggior traffico in quanto sede delle più numerose attività e uffici. Genera spostamenti soprattutto del tipo casa-lavoro essendo il cuore pulsante della città, ed essendo contraddistinta da elevata accessibilità.
- Zona II - Inner city (o factory zone). Prevalenza di attività industriali. Si tratta di un'area immediatamente adiacente al C.B.D., con molte attività, e dove si trovano la maggior parte dei terminali di trasporto, ovvero siti portuali e stazioni ferroviarie. È caratterizzata da una accessibilità medio-alta, e contiene, inoltre, il segmento più povero delle residenze della popolazione urbana.
- Zona III - Inner suburbs (o zona di transizione). Prevalenza di attività industriali e abitanti a basso reddito che non possono permettersi di sostenere i costi di trasporto. Zona residenziale caratterizzata dalle residenze della classe operaia. Questa zona ha il vantaggio di essere situata in prossimità delle principali zone di occupazione (I e II); genera pertanto brevi percorsi a basso costo.
- Zona IV - Outer suburbs (o working class zone). Prevalenza di zone residenziali dominate da abitanti a medio reddito (working class). Zona quasi esclusivamente residenziale.
- Zona V - Residential zone. Prevalenza di zone residenziali di elevata qualità insediativa, abitanti a medio-alto reddito dotati di mezzi di trasporto privato. Area principalmente con classe residente di alto livello, con costi di trasporto molto elevati. Prima della diffusione di massa dell'automobile la maggior parte di questi insediamenti erano situati vicino alle stazioni ferroviarie.
- Zona VI - Commuter zone. Prevalenza di zone residenziali di pregio. Si tratta della zona suburbana con abitanti ad alto reddito che possono sostenere gli elevati costi di trasporto.

Sebbene il modello di Burgess risulti valido, ha attirato numerose critiche, di cui se ne riportano alcune:

1. il modello è troppo semplice e limitato ad applicazioni storiche e culturali fino al 1950;
2. il modello è stato sviluppato quando le città americane erano in crescita in termini demografici, e quando il trasporto motorizzato era ancora poco diffuso. L'espansione ha così coinvolto principalmente fenomeni di riconversione di aree limitrofe al centro. Questo concetto non può essere applicato in un contesto contemporaneo (dalla seconda metà del 20° Secolo), in quanto le autostrade hanno consentito uno sviluppo urbano anche lontano dal centro stesso;
3. il modello è stato sviluppato per le città americane e ha limitato l'applicabilità altrove, in particolare in Europa, dove il modello a cerchi concentrici non risulta compatibile con gli sviluppi urbani post-industriali.

Tuttavia, il modello Burgess rimane ancor oggi un valido strumento per definire lo sviluppo concentrico urbano.

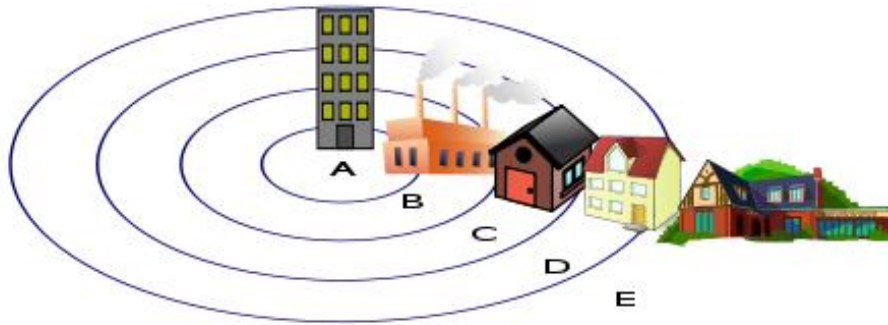


Figura 2: Schematizzazione del modello di sviluppo urbano di Burgess.

Hoyt (1939) partì invece dall'idea che lo sviluppo delle città porta alla costituzione di quartieri omogenei. Hoyt ha proposto un modello secondo cui la città tende a strutturarsi sempre in senso radiale, ma in settori circolari a forma di cono. Egli osserva, infatti, che in realtà i singoli settori o tipologie residenziali non si sviluppano su cerchi, come se la distanza da un unico centro rappresentasse il solo fattore di organizzazione spaziale, ma si concentrano in aree specifiche a seguito della attrattività e repulsione fra settori e attività diverse. Un esempio evidente è dato dalla disposizione delle zone industriali e di quelle residenziali dei lavoratori, che si trovano lungo importanti vie di traffico. Si denota, quindi, l'importanza delle grandi vie di comunicazione. I ceti benestanti evitano per lo più queste zone, e si insediano generalmente nelle aree intermedie, con una preferenza per la periferia.

Secondo questo modello, mostrato in Figura 3, la città è suddivisa in cinque tipologie di zone, le quali si caratterizzano in base alle grandi vie di comunicazione (principalmente stradali, ma non solo):

- Zona 1: Central Business District;
- Zona 2: Attività produttive;
- Zona 3: Area residenziale per classe operaia;
- Zona 4: Area residenziale per classe media;
- Zona 5: Area residenziale per abitanti ad alto reddito.

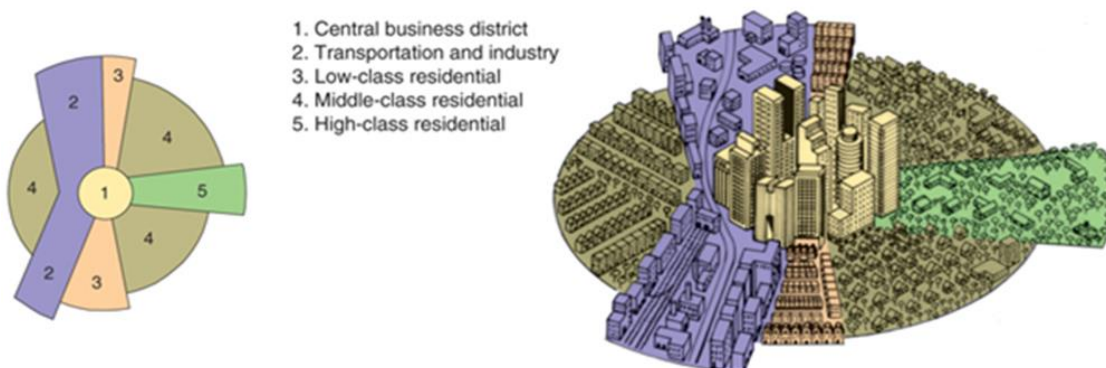


Figura 3: Schematizzazione del modello di sviluppo urbano di Hoyt.

Harris & Ullmann (1945), per il loro modello polinucleare rappresentato in Figura 4, partirono dal presupposto che alcune specifiche funzioni o attività che in una città si svolgono all'interno dello stesso spazio si respingono, altre invece si attraggono. Secondo Harris & Ullmann, esistono nuclei specifici (Centro Città, Shopping-Center, parco cittadino, quartiere industriale, ecc.) in cui si concentrano queste funzioni e attività. Le zone utilizzate a scopi industriali si trovano spesso vicino alle zone residenziali per i lavoratori. Le zone residenziali del ceto medio-superiore sono, per contro, lontane dalle industrie. Il modello di Harris & Ullmann si caratterizza in nove differenti zone, alcune connesse al sistema delle attività, altre al sistema residenziale, ed introduce un importante zona: il sobborgo, che si suddivide in due componenti differenti, residenziale, e industriale.

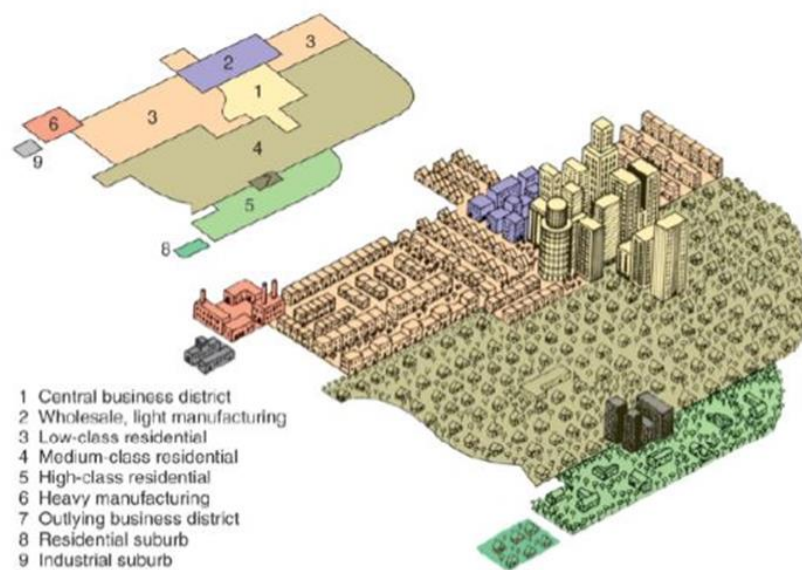


Figura 4: Schematizzazione del modello di sviluppo di Harris & Ullmann.

### 1.3.3 Città contemporanee e Smart Cities

Le teorie connesse alla nascita, alla crescita, e allo sviluppo delle aree urbane sono utili per rappresentare l'evolversi delle città, e la loro conoscenza può rivelarsi un fattore vincente per tecnici e urbanisti, o, più in generale, per le amministrazioni e per i decisori. Le città nascono e muoiono, diminuiscono di dimensione e crescono, in particolare negli ultimi decenni. Ma come sono le città contemporanee? E come saranno le città del futuro?

In questo paragrafo ci si sofferma su questi aspetti, concentrando l'attenzione principalmente sulle città europee e sulle linee guida definite per le città del futuro, tra cui giocano un ruolo di primaria importanza i vari progetti che vanno sotto la dicitura "Smart City". Un'approfondita analisi sulle peculiarità delle città europee è stata sviluppata da Vicari, il quale ha individuato le caratteristiche tipiche di queste metropoli. Vicari afferma, anzitutto, che la città europea ha una distinta dimensione morfologica: essa si caratterizza per la sua forma compatta e densamente costruita attorno ad un'area centrale (Centro Storico) ove si concentrano gli edifici pubblici, le Chiese, i monumenti, le aree per il commercio e gli scambi. A partire da questo centro, la città si sviluppa lungo le linee radiali, articolandosi in strade e piazze. Fino all'inizio del XX secolo le città europee sono rimaste addensate attorno al loro centro e organizzate su uno spazio relativamente limitato. Questa matrice comune ha creato poi, in tempi più recenti, forme diverse che si articolano nel tempo secondo le scelte delle tecnologie di trasporto pubblico e privato, ma anche in ragione dell'azione dell'autorità statale che, in ogni Paese, lascia sulla forma urbana una sua impronta nazionale, visibile nello stile degli edifici pubblici, nell'impostazione della pianificazione urbanistica e nelle politiche della casa. Nonostante tale diversificazione, per la grande maggioranza degli agglomerati urbani europei, la strutturazione delle città in riferimento al suo centro storico rimane un elemento comune e di forte significato. Il secondo tratto caratteristico della città europea è la sua longevità. In grandissima maggioranza le città europee hanno origini molto antiche. Il 30% degli insediamenti europei è di origine romana, una quota altrettanto importante ha origine nella crisi alto-medioevale della città e nella dispersione sul territorio di monasteri e castelli attorno ai quali sorgono nuovi centri urbani. Il terzo elemento che caratterizza, secondo Vicari, la città europea è quello di far parte di un sistema urbano molto denso. L'Europa è, infatti, da tempo un continente di città: se disponiamo sulla mappa europea un punto per ogni agglomerato con più di 10.000 abitanti, questa risulta fittamente coperta di punti. Il quarto elemento che caratterizza il sistema urbano europeo è la forte incidenza delle città di piccola e media dimensione. Esse sono molto numerose, ma la grande maggioranza della popolazione urbana europea vive in città medio-grandi (da 1 a 2 milioni di abitanti). Le città, dunque, sono contraddistinte da intrinseche differenze che le rendono uniche e solo in parte assimilabili ad altre realtà urbane. Ciononostante, un elemento comune a molte è contraddistinto dal progressivo declino della dimensione pubblica del governo, con contestuale noncuranza delle politiche di riequilibrio territoriale, fondate principalmente sullo sviluppo del sistema della mobilità e del trasporto collettivo. Uno dei prevedibili e deplorabili effetti di questo declino è stata l'esplosione della dispersione insediativa, residenziale e produttiva. Dalla metà degli anni novanta, anche per rispondere alla crisi di efficacia del governo pubblico delle trasformazioni urbane, attraverso una nuova generazione di leggi regionali si è faticosamente fatto strada un nuovo modello di piano urbanistico locale. Il nuovo modello di piano pone come centrale

il tema dell'integrazione fra urbanistica ed ecologia. In questo contesto, esistono diverse soluzioni per incrementare la qualità della vita in ambito urbano, e per garantire al cittadino uno sviluppo sostenibile. Tali soluzioni sono di varia natura: infrastrutturale, gestionale, tecnica, ecc. In linea generale, però, le principali soluzioni sono connesse agli strumenti di governance urbano; volgendo uno sguardo al futuro, le città devono adottare un modello globale di sviluppo urbano sostenibile mediante il quale (E.C., 2011):

- affrontare le sfide con un approccio integrato e globale;
- combinare approcci basati sul territorio e sulle persone;
- affiancare alle strutture formali di governance, altre strutture più flessibili ed informali che rispecchino il livello al quale le varie sfide da affrontare si presentano.
- sviluppare sistemi di governance capaci di creare visioni condivise e conciliare obiettivi contrastanti fra loro e modelli di sviluppo divergenti;
- collaborare al fine di garantire uno sviluppo territoriale coerente e un uso efficiente delle risorse.

I sistemi di governance devono quindi essere adeguati all'evolversi della situazione e tener conto delle diverse scale territoriali (ad es. sovraurbana e infraurbana) e temporali. Risulta, inoltre, necessario un coordinamento orizzontale e verticale: le città devono collaborare con gli altri livelli amministrativi e rafforzare la cooperazione e i legami con le altre città, al fine di condividere gli investimenti e i servizi richiesti su una più ampia scala territoriale.

Da questi presupposti nasce il concetto di "Smart Cities", che negli ultimi anni sta catalizzando l'attenzione di municipalità, Stati e, soprattutto, della Commissione Europea. Le molte definizioni di smart cities sottintendono un insieme coordinato di interventi che mirano a rendere le città più sostenibili. Anzitutto da un punto di vista energetico-ambientale, attraverso scelte e tecnologie che permettano di risparmiare energia, e di utilizzare energie rinnovabili sia nel comparto residenziale, sia nelle strade; da un punto di vista funzionale, assicurando qualità dei servizi urbani nel rispondere alle richieste degli utenti e nello sviluppare capacità di adattamento. Ma la sostenibilità è intesa anche nella qualità stessa della vita, a partire dallo sviluppo della partecipazione sociale, elemento fondante del "senso di comunità" ("smart communities") e nell'indotto produttivo collegato ai nuovi servizi. Infine la sostenibilità è intesa anche nel senso di capacità della città di pianificare una crescita coordinata, preservare un corretto rapporto con il verde, reagire in modo coordinato e flessibile alle emergenze ambientali, come a quelle dovute ad attività umane, e garantire la sicurezza sotto tutti i punti di vista. Per realizzare questo "collante" tra tante tematiche si fa ampio utilizzo di tecnologie ICT (informazione e telecomunicazione) e soprattutto di "intelligenza" e di capacità di progettazione sistemica, da cui l'aggettivo "smart". Nella Figura 5 è rappresentato un modello di smart cities.

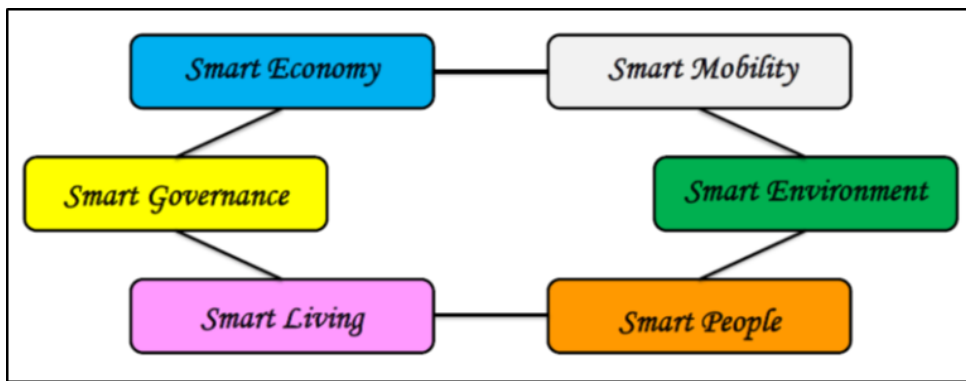


Figura 5: Modello Smart Cities [E. S. Cities, «www.smart-cities-eu,»].

Riconducendo il concetto di “Smart City” a quello di “Città Intelligente”, si può dire che per rendere “intelligente” un territorio è importante sottolineare come l’applicazione al suo interno di adeguate tecnologie dell’informazione e della comunicazione permettano di ottenere il massimo dell’efficienza: maggiore competitività con minore consumo di risorse. Si possono distinguere almeno quattro modi di applicare l’intelligenza ai territori:

1. progettare i territori in modo intelligente;
2. ottenere informazioni intelligenti dai territori;
3. progettare applicazioni intelligenti a servizio dei territori;
4. utilizzare in modo intelligente i territori.

Progettare i territori in modo intelligente significa utilizzare un’adeguata pianificazione urbanistica che riesca a creare sinergie tra le diverse strategie territoriali: la distribuzione funzionale delle attività, la valorizzazione dell’identità dei luoghi, la conservazione del patrimonio ambientale e paesaggistico, la crescita sostenibile dell’economia, la dotazione infrastrutturale e di servizi, il contenimento dell’uso del suolo, etc. Un territorio intelligente è in grado di fornire, attraverso le reti digitali, flussi di informazioni che possono essere elaborate ed utilizzate per individuare interventi operativi anche immediati. Sistemi di sensori possono, ad esempio, monitorare sia fenomeni naturali come i livelli dei bacini ma anche la situazione del centro urbano ovvero rilevare le condizioni di traffico o la disponibilità di parcheggio. Progettare applicazioni intelligenti a servizio di cittadini e imprese è un valore aggiunto oramai irrinunciabile per la competitività dei territori. Molti servizi on-line possono essere assunti da indicatori per determinare il livello di attrattività di un territorio. Un utilizzo intelligente del territorio è legato anche ad un uso sostenibile delle sue risorse. La difesa dell’identità dei luoghi, soprattutto delle aree marginali, la salvaguardia dei patrimoni ambientali e paesaggistici a rischio, passano attraverso la dotazione di adeguate reti di telecomunicazione che consentano a questi territori di potersi connettere ai network globali. La città intelligente è un insieme di strategie di pianificazione urbanistica tese all’ottimizzazione e all’innovazione dei servizi pubblici così da mettere in relazione le infrastrutture con i cittadini grazie all’impiego diffuso delle nuove tecnologie della comunicazione, della mobilità, dell’ambiente e dell’efficienza energetica, al fine di migliorare la qualità della vita e soddisfare le esigenze di cittadini, imprese e istituzioni. Le città intelligenti possono essere identificate (e classificate) secondo sei assi o dimensioni principali:

- economia intelligente;
- mobilità intelligente;
- ambiente intelligente;
- persone intelligenti;
- vita intelligente;
- governance intelligente.

### 1.3.4 Pianificazione intelligente sostenibile

Lo scopo principale della pianificazione urbana è regolarizzare l'utilizzo del territorio ed organizzare lo sviluppo delle attività umane svolte su di esso. Proprio per questo è una disciplina che coinvolge gli aspetti geologici, architettonici, ingegneristici e produttivi di un'area. Lo scopo di una buona pianificazione territoriale è organizzare una corretta interazione tra le attività umane e il territorio su cui esse sono svolte, in modo da dare vita ad uno sviluppo territoriale sicuro ed uno sviluppo produttivo economicamente sostenibile. I principi che ispirano le moderne teorie della pianificazione devono seguire linee progettuali coerenti con i principi di sviluppo sostenibile e di tutela dell'ambiente, sia nel tentativo di porre un freno all'antropizzazione, la cui espansione frenetica è capace di trasformare in modo irreversibile i sistemi naturali, sia nel tentativo di migliorare la qualità di vita delle generazioni presenti e future. L'informazione, il dialogo, la valutazione e la decisione costituiscono i fondamenti della pianificazione territoriale. L'analisi di tali forme di conoscenza e l'utilizzo delle migliori tecnologie informatiche, la cui tecnica permette di agevolare l'elaborazione dell'informazione e di ottimizzare i metodi di valutazione e i criteri di scelta, consentiranno di conseguire le migliori soluzioni tecniche e progettuali al fine di raggiungere gli obiettivi desiderati.

Dal punto di vista dell'urbanistica e del progetto urbano, la pianificazione intelligente può essere interpretata come un insieme di strategie di pianificazione urbanistica tese all'ottimizzazione e all'innovazione dei servizi pubblici così da mettere in relazione le infrastrutture materiali delle città «con il capitale umano, intellettuale e sociale di chi le abita» grazie all'impiego diffuso delle nuove tecnologie della comunicazione, della mobilità, dell'ambiente e dell'efficienza energetica, al fine di migliorare la qualità dei servizi e dello spazio pubblico, meglio interpretando le esigenze di cittadini, imprese, istituzioni. L'integrazione delle tecnologie web, wiki e georeferenziate (tipo Google Earth) con applicazioni GIS, ad esempio, migliorano l'interazione tra cittadini, responsabili politici e competenze tecnico-scientifiche in gioco nei processi di pianificazione urbana. Anche dati multi-utilities condivise possono incoraggiare partnership pubblico-privato e interventi di trasformazione urbana unicamente privati o in project financing (Carta, 2014). La disponibilità di informazioni e di banche dati in tempo reale migliora il livello di "fiducia" nelle istituzioni e nei processi di governance, sia da parte dei cittadini, sia da parte degli investitori e del così detto terzo settore. Il concetto di smart city legato alla pianificazione urbana è strettamente connesso ai principi di sostenibilità e di competitività urbana, sia per quanto riguarda l'utilizzo di nuove tecnologie ICT, sia per la qualità del capitale sociale del quale la città può disporre. La mobilità rappresenta in Italia un campo di sperimentazione avanzato per rendere smart la sua progettazione e la sua gestione nel



tempo e nello spazio. Diverse città sono ad oggi impegnate nel trasformare la mobilità urbana in una smart mobility: spostamenti agevolati, buona disponibilità di trasporto pubblico innovativo e sostenibile con mezzi a basso impatto ecologico, regolamentazione dell'accesso ai centri storici a favore di una maggiore vivibilità, adozione di soluzioni avanzate di mobility management e di infomobilità per gestire gli spostamenti quotidiani dei cittadini e gli scambi con le aree limitrofe, ecc. La mobilità intelligente è, in sostanza, una delle dimensioni chiave in cui il paradigma smart city si articola, e quella in cui le città italiane stanno trovando la loro trasformazione più interessante, sia attraverso grandi investimenti strutturali, sia mediante iniziative low cost che fanno leva sull'innovazione sociale e sulla sensibilizzazione dei cittadini.

Il documento della Commissione Europea dal titolo ““Cities of tomorrow. Challenges, visions, ways forward” sostiene che le città saranno la chiave dello sviluppo sostenibile in Europa. Gli obiettivi principali per uno sviluppo a ridotto impatto ambientale saranno: costruzione di aree verdi, rigenerazione urbana e ambientale, pianificazione urbana compatta, accessibilità a tutte le zone della città, trasporti sostenibili e interconnessi, sviluppo di zone pedonali e ciclabili per favorire lo sviluppo di mobilità non motorizzata, sistemi di trasporto integrati su tutto il territorio urbano. Per raggiungere i seguenti obiettivi saranno necessarie nuove linee guida per la pianificazione urbana e territoriale. In particolare per sostenere il settore dei trasporti, serviranno misure accurate per l'installazione e il funzionamento della tecnologia necessaria all'interconnessione fra i sistemi.

Maria-Lluïsa Marsal-Llacuna e Maria-Beatriz López-Ibáñez sostengono che le metodologie di pianificazione urbana hanno la necessità di essere rivedute urgentemente viste le modifiche e le nuove tendenze in materia. Inoltre affermano che sarebbe opportuno dare un ruolo centrale ai cittadini in modo che possano contribuire in modo più significativo alla rigenerazione urbana, attraverso sondaggi e raccolta dati si potrebbe capire come i cittadini vorrebbero sfruttare l'uso del suolo e rispondere meglio alle loro esigenze.

#### 1.3.4.1 Sostenibilità dei trasporti: avoid, shift and improve

Nel documento “A New Paradigm for Urban Mobility” sono stati proposti tre approcci principali per mitigare i problemi di mobilità urbana: influenzare la domanda per ridurre le esigenze di viaggio (avoid), promuovere opzioni di trasporto più sostenibili (shift) e implementare una tecnologia migliore e riorganizzare l'offerta (improve). Da un punto di vista tecnologico (improve), gli sforzi negli ultimi decenni si sono concentrati sullo sviluppo di energie più pulite e su motori più efficienti. Dal punto di vista della prevenzione, sono state fatte e implementate politiche mirate per il sistema offerta, non solo promuovendo le attività tecnologiche, ma anche fornendo un'infrastruttura più efficiente e una corretta distribuzione dell'uso del suolo. Questo nuovo paradigma di sviluppo urbano mira a promuovere l'accessibilità a una più ampia varietà di attività, incoraggiando la camminata e l'uso di opzioni di trasporto più sostenibili anziché l'uso di auto singole. Spostare la domanda verso opzioni di trasporto più sostenibili ha dimostrato di essere promettente, forse anche più di altri approcci. Recentemente, è emersa la promozione e l'integrazione delle opzioni di trasporto condiviso, all'interno di un cosiddetto paradigma dell'economia condivisa. Questo nuovo paradigma della mobilità potrebbe rappresentare un'opzione interessante per gestire meglio il trasporto nelle città.



### 1.3.4.2 Soft Mobility

Con il termine “soft mobility” si indica tutte le forme di trasporto non motorizzate, quelle che usano solo “energia umana” (Human Powered Mobility). Questo nuovo sistema di mobilità a “zero impatto” ambientale, fornisce idee di come sostituire l’uso del veicolo infatti viene anche definita come “slow traffic mobility”. Questo concetto rientra nell’ottica di mobilità sostenibile mirata ad aumentare la vivibilità urbana, mantenendo il diritto individuale di muoversi. In effetti, la mobilità dolce potrebbe migliorare l’ambiente urbano in particolare riferendosi a:

- livelli di inquinamento acustico e atmosferico;
- traffico stradale;
- sicurezza stradale.

In generale, soft mobility e la sua promozione nelle politiche urbane è strettamente collegata al problema delle emissioni generate dal traffico veicolare. Tale promozione si basa anche sulla convinzione che l’aumento di soft mobility ridurrebbe il traffico automobilistico privato, in particolare per quanto riguarda viaggi brevi. Nonostante questa crescente attenzione, non è stata ancora definita e progettata un’infrastruttura dedicata e mirata alla mobilità leggera.

## 1.4 Spazi urbani e land use

Land Use è il termine generico usato per indicare un ramo della pianificazione urbana che comprende diverse discipline le quali hanno come obiettivo quello di ordinare e regolare l'uso del suolo in modo efficiente e corretto. Le amministrazioni usano il termine land-use per gestire lo sviluppo del territorio in grado di pianificare le esigenze della comunità, salvaguardando le risorse naturali e ponendo attenzione agli usi futuri. "American Planning Association" afferma che con il termine land-use si vuole indicare una pianificazione territoriale mirata a favorire il benessere dei cittadini attraverso la realizzazione di ambienti salutarì ed efficienti.

Il "Land-Use" ha due diverse accezioni (Rodrigue, 2013): la natura dell'uso del suolo, che riguarda le attività che si sviluppano sul territorio, e il livello di accumulo spaziale che indica la loro intensità e concentrazione. È importante fare dunque una distinzione fra:

- Uso formale del suolo: esso comprende gli attributi qualitativi dello spazio, come forma, modello e aspetto. Molti indicatori sono stati proposti in letteratura (Tsai, 2005), che includono la densità, la capacità o il numero di poli (definito da una notevole concentrazione di sedi) che indica se il territorio è monocentrico o policentrico;
- Uso funzionale del suolo: esso riguarda la natura economica delle attività (come la produzione, il consumo, la residenza e i trasporti) e la natura delle persone (il reddito, la dimensione della famiglia, età media, occupazione, etc.).

La Direttiva 2007/2/CE definisce land-use come una classificazione del territorio in base alla dimensione funzionale o alle destinazioni socioeconomiche presenti e programmate per il futuro (ad esempio ad uso residenziale, industriale, commerciale, agricolo, silvicolo, ricreativo). Altro concetto fondamentale strettamente collegato all'uso del suolo ma distinto è la copertura del suolo. Per copertura del suolo si intende, infatti, la copertura biofisica della superficie terrestre. Il fattore land-use è sempre rientrato nelle problematiche inerenti la città e i suoi spazi, basti pensare a come la conformazione territoriale influisca sullo sviluppo delle attività, delle residenze e le infrastrutture in una determinata zona del centro urbano o meno. Appare dunque intuitiva la relazione tra usi del suolo e sistema dei trasporti, anzi, affermarne l'esistenza può sembrare una considerazione superflua. L'ambiente territoriale, attraverso la sua forma fisica e la sua organizzazione funzionale, rappresenta la causa del nascere della mobilità, mentre i trasporti sono lo strumento che consente a tali relazioni di concretizzarsi. Lo spostamento in sé, pertanto, non costituisce, generalmente, l'obiettivo dell'individuo ma solo una fase intermedia necessaria per il raggiungimento dei luoghi dove realizzare quelle attività dalle quali l'individuo riceve un certo livello di soddisfazione personale. La mobilità urbana rappresenta una delle componenti fondamentali del vivere delle persone e delle loro relazioni sociali, della produzione di merci e della loro distribuzione, del funzionamento delle città e del loro sviluppo. Di conseguenza la mobilità rappresenta anche una componente fondamentale di come il territorio urbano viene utilizzato e modificato. L'analisi delle iterazioni e delle reciproche relazioni tra territorio e trasporti rappresenta, dunque, una disciplina alquanto complessa.

Il processo di crescita demografica ed economica del territorio può così dare luogo alla formazione di vere e proprie aree metropolitane, le quali si formano quando l'agglomerato urbano si sviluppa

oltre i suoi confini tradizionali, per integrarsi con lo spazio circostante, stabilendo con esso nuove relazioni economiche e sociali. Un'area con queste caratteristiche raggiunge, solitamente, un elevato potenziale demografico, necessario a generare la domanda per la produzione dei servizi più centralizzati, e un'elevata densità industriale e terziaria.

Lo sviluppo metropolitano delle città può essere determinato da due aspetti, l'evoluzione demografica, e la successione, all'interno delle stesse, delle fasi del ciclo metropolitano, le quali sono: urbanizzazione, suburbanizzazione, deurbanizzazione, riurbanizzazione.

Le iterazioni tra territorio e trasporti possono essere analizzate su diversa scala, considerando differenti aree di interesse, ma risultano decisamente più complicate se analizzate in ambito urbano, dove le relazioni tra attività e spostamenti sono fortemente condizionate da componenti di tipo sociale, economico, finanziario, occupazionale, ecc., oltre che, ovviamente, da fattori di tipo tecnico. Concentrando l'attenzione sul contesto urbano, poiché reputato più significativo, si sottolinea come la localizzazione di residenze, attività, servizi, e aree commerciali influenzi pesantemente le dinamiche dei trasporti, siano essi di natura individuale, che collettiva, sia passeggeri che merci, obbligando le istituzioni a una attenta pianificazione della mobilità, e a un costante aggiornamento della stessa (Riganti, 2008).

Le prime ipotesi relativamente alla determinazione delle interazioni trasporti-territorio, sono di tipo tecnico. Diversi autori hanno contribuito all'evoluzione di questa tematica (Mumford, 1961; Törnqvist 1968; Brunet, 1989; Castells, 1989; Gillespie, 1991), implementando teorie basate sulle funzionalità urbane, sui rapporti tra lo spazio occupato dalle attività e lo spazio occupato dalle infrastrutture di trasporto, su fattori logistici, e così via. I primi sforzi per studiare in modo sistematico le interrelazioni tra trasporti e struttura spaziale risalgono agli anni '50, negli Stati Uniti d'America. Dapprima Carroll (1955) sviluppò una analisi per migliorare il sistema dei trasporti, e le sue interazioni con gli usi del suolo, nell'area metropolitana Camden-Philadelphia-Trenton: tale studio prende il nome di "Penn-Jersey Study". Hansen (1959) dimostrò, usando come caso studio la città di Washington D.C., che luoghi con una buona accessibilità hanno una maggiore probabilità di crescere e svilupparsi. Hansen propose un modello basato sul presupposto che l'accessibilità ai posti di lavoro rappresenta il fattore più determinante dei trasferimenti della popolazione residente. Si tratta di un modello gravitazionale ad un solo vincolo, dato dalla accessibilità dei posti di lavoro dalle varie aree. Le due teorie riportate sono tra le prime in questo settore; successivamente se ne svilupparono rapidamente molte altre, inizialmente in terra americana, successivamente in Europa. In generale, uno dei concetti predominanti è quello di "land-use transport feedback cycle", che si è rapidamente diffuso tra i pianificatori. L'insieme di definizioni-relazioni contenute in questo termine, che di fatto sintetizza tutte le interazioni tra land-use e sistema dei trasporti, può essere brevemente riassunto come segue:

- La diffusione dei diversi usi del territorio (residenziale, industriale e commerciale) nelle aree urbane determina la localizzazione delle attività quali lavoro, scuola, ecc.;
- La distribuzione delle attività nello spazio richiede delle interazioni spaziali, o spostamenti, nel sistema dei trasporti con cui superare le distanze tra le diverse attività;
- La distribuzione e le caratteristiche delle infrastrutture e dei servizi che costituiscono il sistema dei trasporti crea l'opportunità di interazioni spaziali e può essere misurato come accessibilità;

- La distribuzione dell'accessibilità nello spazio determina, in parte, le decisioni di localizzazione e, di conseguenza, cambiamenti del sistema uso-del territorio.

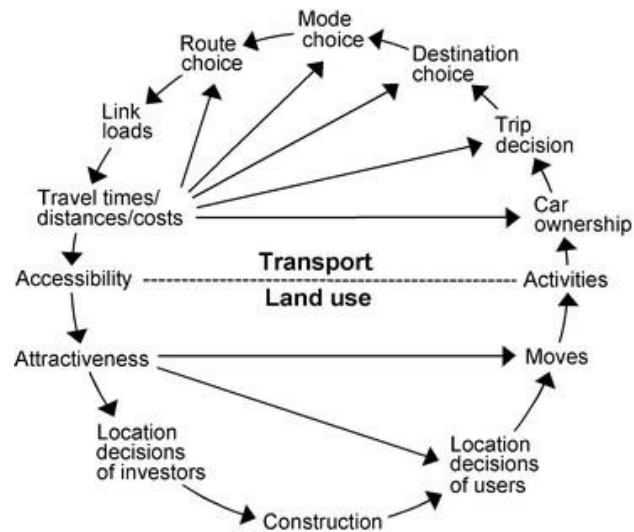


Figura 6: Schema illustrativo Land Use.

Dal "land-use transport feedback cycle" derivano molteplici teorie sullo sviluppo tecnico delle interazioni territorio-trasporti, in particolare se si considera l'ambito urbano. Le teorie basate su questo paradigma si sono sviluppate principalmente da alcune semplici osservazioni relative alla mobilità urbana, come la distanza media percorsa, e il tempo di viaggio, deducendo le origini e destinazioni di viaggio che meglio riproducono le distribuzioni di frequenza osservate. Nella definizione e quantificazione delle interazioni tra trasporti e territorio un ruolo molto importante lo riveste il "Model of Metropolis" (Lowry, 1964). Il modello di Lowry è considerato il primo modello integrato per l'analisi delle interazioni trasporti/land-use (Rodrigue et al. 2006). Esso permette di simulare l'uso del suolo urbano in un dato istante, si tratta quindi di un modello statico. La sua prima applicazione è relativa all'area di Pittsburgh. Lowry suddivise la città in diverse aree (secondo criteri di omogeneità economica, demografica, e geografica), e suppose che in ognuna di esse fossero insediate attività di base. La popolazione è localizzata in funzione di questa occupazione iniziale, e la presenza di questa popolazione stimola poi lo svilupparsi di attività di servizio, le quali richiedono nuovi lavoratori, con conseguenti effetti sull'allocazione residenziale. L'aumento di popolazione induce un'ulteriore richiesta di servizi, anche se con un incremento inferiore alla precedente richiesta, e così via. In questa teoria si suppone che le attività di base siano allo stesso tempo indipendenti economicamente dal resto del sistema urbano, e indipendenti anche nella localizzazione. La soluzione al sistema di equazioni è trovata in modo iterativo, tenendo conto di un vincolo spaziale che è dato dalla quantità di spazio disponibile in ciascuna zona per attività e residenze. Il modello di Lowry nasce dalla necessità di rappresentare e studiare sistemi urbani complessi. Tale modello di simulazione urbana si prefigge, partendo da informazioni limitate, la stima dei seguenti valori: dimensione della popolazione urbana totale e sua localizzazione nelle varie zone; dimensione dell'occupazione di servizio alla popolazione e sua localizzazione nelle stesse zone; domanda di trasporto complessiva e relativi flussi generati. La possibilità di collegare tali informazioni ad altri modelli di distribuzione e di assegnazione alla rete dei trasporti, e la disponibilità di indicatori con cui analizzare in modo compiuto le simulazioni eseguite, consentono di utilizzare il modello di Lowry come strumento di ausilio a processi di programmazione e

pianificazione dei trasporti e dello sviluppo urbano. Il modello di Lowry ha generato un numero crescente di approcci complessi, come ad esempio i lavori di Goldner (1971), Putman (1983), Mackett (1983), Webster et al. (1988). Altri studi hanno invece implementato approcci basati solo in parte sul modello di Lowry, come quello di Boyce et al. (1981), i quali hanno sviluppato modelli di equilibrio combinati di localizzazione residenziale, scelta della modalità di trasporto, e scelta del percorso. Il modello proposto da Lowry è stato, da molti punti di vista, il precursore di diversi filoni di ricerca finalizzati allo studio delle interazioni trasporti/territorio, e alla definizione di metodologie con cui affrontare i relativi problemi, soprattutto grazie alla sua versatilità e alla sua capacità di integrare molteplici funzioni. L'approccio di Lowry ha nel fatto di essere un modello di tipo statico la sua principale lacuna. Per ovviare a ciò, successive linee di ricerca sono sorte da un interesse per gli approcci di tipo dinamico. Il primo modello dinamico urbano è attribuito a J.W. Forrester (Forrester, 1969). Quello di Forrester è stato il tentativo più noto di applicazione delle tecniche dei modelli dinamici al contesto urbano. Le tecniche modellistiche di Forrester sono atte a studiare processi dal lento andamento (decadenza del comparto industriale, e relativi effetti sul tasso di occupazione, recupero urbano, ecc.), e, benché il modello sia ancor oggi ritenuto molto completo, tiene poco in considerazione la struttura spaziale del territorio. Inoltre un altro aspetto non considerato sono i limiti non superabili dalle dimensioni di una città in termini di superfici abitate, popolazione, ecc. L'ultimo approccio analizzato è quello di Brotchie (1984), il quale propone di rappresentare graficamente i possibili legami tra interazioni spaziali e struttura spaziale. La struttura spaziale è rappresentata sull'asse orizzontale come dispersione spaziale (per esempio, la distanza media di viaggio di lavoro dal centro della regione); l'interazione spaziale è rappresentata sull'asse verticale. Ogni città dovrebbe collocarsi tra i tre punti ipotetici nel diagramma. Il punto A rappresenta una situazione in cui tutti i posti di lavoro sono collocati presso il centro urbano, cioè la dispersione del rapporto di lavoro è pari a zero. Il punto B e il punto C rappresentano invece le regioni in cui tutti i lavori sono ugualmente "dispersi". Il punto C rappresenta una situazione in cui tutti i lavoratori si recano a piedi al lavoro. L'insieme delle esperienze descritte, che rappresenta solo una ridotta parte della letteratura presente su tali tematiche, è utile per comprendere quanti e quali siano gli elementi che giocano un ruolo di prioritaria importanza nella analisi e determinazione delle interazioni tra trasporti e territorio, e per sottolineare come la mobilità dipenda da una molteplicità di decisioni e di fattori, non sempre individuabili e quantificabili.

# Capitolo 2 Veicoli Autonomi

## 2.1 Stato dell'arte

La mobilità è una componente importante per tutte le attività umane, garantendo l'accesso dei cittadini all'esercizio dei loro diritti sociali e alla capacità di partecipare ad attività produttive. In un ambiente urbano, con densità di popolazione e livelli di attività economica elevati, la mobilità favorisce lo sviluppo economico e contribuisce all'equità sociale. Il continuo crescere del numero di veicoli privati e di conseguenza l'aumento dei flussi stradali, ha reso sempre più necessario lo sviluppo di sistemi di sicurezza sia per il singolo utente che per la sicurezza stradale. Gli incidenti stradali hanno forti ripercussioni sul costo di trasporto (totale, sociale e di gestione). Inoltre il traffico automobilistico all'interno delle aree urbane ha come forti conseguenze l'aumento dei tempi di attesa e di spostamento, l'incremento dell'inquinamento ambientale; andando a incidere negativamente sulla condizione di vita delle persone nei centri urbani. Ad oggi l'ingegneria dei trasporti, per far fronte ai problemi sopra elencati, ritiene che sia necessario l'utilizzo di sistemi legati allo "sviluppo sostenibile" in modo da ridurre i rischi ambientali e sociali legati al traffico cittadino. Gli attuali sistemi di trasporto, poiché generano congestione stradale, inquinamento ambientale e riduzione della sicurezza, non possono essere definiti sostenibili. Per ridurre l'impatto ambientale, economico e sociale del trasporto stradale sarebbe corretto che una parte della domanda fosse soddisfatta da altri sistemi di trasporto maggiormente sostenibili. Con ITS (Intelligent Transport o Transportation Systems) o "sistemi di trasporto intelligenti" (STI), s'intendono quei sistemi nei quali si integrano conoscenze nel campo delle telecomunicazioni, elettronica, informatica - in breve, la "telematica" - con l'ingegneria dei trasporti, per la pianificazione, progettazione, esercizio, manutenzione e gestione dei sistemi di trasporto. Questa integrazione è finalizzata al miglioramento della sicurezza della guida e all'incolumità delle persone, alla sicurezza e protezione dei veicoli e delle merci, alla qualità, nonché all'efficienza dei sistemi di trasporto per i passeggeri e le merci, ottimizzando l'uso delle risorse naturali e rispettando l'ambiente.

I veicoli automatizzati o autonomi rientrano nella categoria degli ITS. Gli Intelligent Vehicles possono essere classificati in base al ruolo del sistema automatico nella guida del veicolo:

- **Informazione al conducente:** il sistema assiste il conducente nelle operazioni di guida, tramite informazioni riguardanti le scelte di viaggio o le manovre da effettuare, o allarmi riguardanti pericoli, come ad esempio una collisione imminente (Collision Avoidance System);
- **Azioni automatiche di correzione:** il sistema corregge le manovre del conducente, per garantire e mantenere la stabilità e la controllabilità del veicolo (ad esempio ABS ed ESC);
- **Guida parzialmente automatica:** il sistema si sostituisce al conducente in alcune operazioni di guida, ad esempio mantenendo il distanziamento dal veicolo precedente (Adaptive Cruise Control), oppure interviene autonomamente in caso di emergenza, ad esempio azionando i freni in condizioni d'impatto imminente (Collision Avoidance System);

- Guida integralmente automatica del veicolo: il sistema effettua autonomamente la guida del veicolo, sostituendo il guidatore in tutte le attività di guida.

La grossa e sostanziale differenza fra i veicoli di nuova generazione e quelli a guida manuale è la possibilità di utilizzare la tecnologia di automazione al fine di: comunicare con gli altri veicoli e ottimizzare la capacità dell'infrastruttura, comunicare con l'infrastruttura ed essere a conoscenza della sua situazione di essa in modo da non aumentare la congestione di alcuni tratti stradali o di evitare zone con pericoli o sbarramenti, poter svolgere altre attività durante la guida, avere un sistema di ausilio durante la marcia per aumentare la sicurezza stradale. Limitare la congestione stradale, quindi diminuire le fermate agli incroci o nelle code ma anche le alte variazioni di velocità, è possibile diminuire le emissioni inquinanti nei centri urbani. Secondo la valutazione SWOT, strumento di pianificazione strategica usato per valutare i punti di forza (Strengths), debolezza (Weaknesses), le opportunità (Opportunities) e le minacce (Threats) di un progetto, le emissioni possono essere ridotte dal 20% fino al 40%. Inoltre le auto di nuova generazione forniscono la possibilità di ridurre le misure strutturali di sicurezza a bordo del veicolo (come la zona di protezione dallo schiacciamento) con conseguente riduzione del peso del mezzo e consumi minori. La stima evidenzia una possibile riduzione del consumo del 5%-25%. Una classificazione circa l'automazione dei veicoli è quella SAE, descritta nel SAE J3016 Information Report "Taxonomy and Definitions for Terms related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving System", definisce i vari livelli di automazione. Questa descrizione è quella utilizzata nell'ambito della ricerca scientifica. I livelli sono:

- Livello 0: il sistema non ha funzioni di guida automatizzata ma può essere equipaggiato con sistemi di allarme necessari a informare l'autista in caso di pericolo, in modo tale che l'utente possa rispondere velocemente ed efficientemente al pericolo. Questo tipo di automazione può migliorare la sicurezza del veicolo, andando a vigilare la situazione intorno al sistema tramite sensori e rilevando minacce.
- Livello 1: il sistema di assistenza alla guida può fornire un controllo automatico della velocità o la guida automatica del veicolo mentre il conducente continua a svolgere la funzione di controllo del veicolo. Mezzi dotati di questo sistema di automazione sono già in vendita e rappresentano una piccola frazione del numero di veicoli venduti.
- Livello 2: il sistema di parziale automazione è stato recentemente introdotto sui veicoli di alta gamma. Sia il livello 1 che il livello 2 sono mirati a garantire confort e convenienza di guida, ma necessitano che l'autista faccia un controllo continuo della guida e che sia idoneo a prendere il controllo del mezzo immediatamente in caso di pericolo.
- Livello 3: il sistema è dotato di un'automazione condizionale, che fornirà livelli più alti di confort e convenienza all'autista permettendogli di togliere l'attenzione dalla guida temporaneamente; ma il conducente deve poter riprendere il controllo del veicolo in pochi secondi quando il sistema ha raggiunto il limite delle sue capacità.
- Livello 4: il sistema è dotato di un'alta automazione. Questo livello può sostituire completamente l'autista e non richiede l'intervento in caso di emergenza.
- Livello 5: il sistema è dotato di completa automazione, la quale permette al veicolo di guidare da solo ovunque e in qualsiasi condizione in cui un normale utente sarebbe in grado di guidare.

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
<b>Human driver monitors the driving environment</b>						
<b>0</b>	<b>No Automation</b>	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
<b>1</b>	<b>Driver Assistance</b>	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>2</b>	<b>Partial Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	<b>System</b>	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>Automated driving system ("system") monitors the driving environment</b>						
<b>3</b>	<b>Conditional Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	<b>System</b>	Human driver	Some driving modes
<b>4</b>	<b>High Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	<b>System</b>	Some driving modes
<b>5</b>	<b>Full Automation</b>	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	<b>All driving modes</b>

Copyright © 2014 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed provided SAE International and J3016 are acknowledged as the source and must be reproduced AS-IS.

Figura 7: SAE Level identificativi dei sistemi AVs.

## 2.1.2 Accettazione e risposta umana

L'esperienza di guida in termini di livelli di comfort, sicurezza, efficienza e divertimento, può essere continuamente migliorata attraverso l'incorporazione di tecnologie sofisticate nel design del veicolo. Queste includono tecnologie che consentono al guidatore di non avere il completo controllo di guida. Il comportamento umano è una delle tematiche calde legate all'introduzione dei veicoli automatizzati. In prima battuta, quello che interessa è capire come l'uomo percepisca l'automazione e quali siano i termini e le condizioni di accettabilità. Pertanto, il fattore umano, legato all'interesse verso i veicoli automatizzati, all'accettabilità a priori, alla capacità di adattabilità a questi nuovi sistemi, è di particolare rilevanza. Infatti il passaggio da sistema di supporto al conducente a sistema completamente automatico condiziona il ruolo del guidatore stesso. Il ruolo dell'uomo, infatti, come spiegato in letteratura, a seconda del livello di automazione, cambia da diretto protagonista a supervisore del sistema automatizzato. L'atto di guida viene rappresentato come un continuo spostamento tra guida manuale e automatica, sottolineando la collaborazione e la necessità di suddivisione dei ruoli tra guidatore e sistema automatico. Quest'ultimo, infatti, deve essere uno strumento di supporto al guidatore e non un elemento sostitutivo. all'aumentare del livello di automazione, può cambiare l'interazione e il ruolo del guidatore, è presentato un caso di studio di rilevamento di pedoni. Il sistema di rilevamento pedonale PEDESTRIAN AEB è stato identificato dal EURO NCAP (European New Car Assessment Programme) come sistema di sicurezza che potrebbe essere diffuso dal 2016. Questo sistema di rilevamento è basato sull'utilizzo di radar e videocamera per monitorare e rilevare oggetti che potrebbero intersecare il percorso del veicolo e di conseguenza avvertire il



conducente della possibile imminente collisione con l'oggetto rilevato. L'attenzione umana è dunque un aspetto di rilevante importanza soprattutto nella fase di transizione nella riassunzione del controllo del veicolo in scenari particolari di emergenza. La letteratura sul fattore umano e l'automazione dei veicoli, ossia sull'interazione dei piloti con l'ACC, sostiene che un aumento dell'automazione comporta un peggioramento della consapevolezza del conducente con conseguenti performance peggiori in caso di fallimento del sistema.

### 2.1.3 Comunicazione tra veicolo ed infrastruttura (V2I) e tra veicolo e veicolo (V2V)

Il grande vantaggio reso possibile grazie all'interazione tra lo sviluppo tecnologico e l'automazione è la possibilità di interconnessione tra i veicoli tramite comunicazioni V2V (vehicle to vehicle) e V2I (vehicle to infrastructure), tramite sensori e connessioni wireless. Le connessioni V2V forniscono informazioni tramite sensori radar sul movimento degli altri veicoli e sulle decisioni degli utenti, mentre le comunicazioni V2I permettono lo scambio di informazione istantanea tra veicolo e infrastruttura. È proprio la connessione tra i veicoli e il contemporaneo legame diretto con l'infrastruttura che permette di ovviare i limiti fisici dei sensori e permettere un miglioramento della viabilità e della sicurezza. La decisione presa dal conducente rappresenta la situazione standard dei veicoli manuali senza capacità di comunicazione. In questo caso, la decisione del guidatore è basata esclusivamente sulla propria capacità di percezione delle condizioni del traffico circostante e del comportamento dei veicoli limitrofi. Il guidatore modifica la velocità di avanzamento in base alla visuale che possiede dell'ambiente circostante. L'aggiunta di comunicazioni tra veicoli e con l'infrastruttura permette di migliorare la percezione del guidatore e di conseguenza l'efficienza, l'affidabilità e la sicurezza. Proprio per caratterizzare questo miglioramento è necessario distinguere due tipi di comunicazione, i quali possono essere incorporati all'interno del sistema di guida automatica a supporto dell'uomo:

- V2V (vehicle to vehicle);
- V2I (vehicle to infrastructure).

Le comunicazioni V2V forniscono informazioni circa il movimento e le decisioni dell'utente alla guida (accelerazione, velocità, posizione), mentre le comunicazioni V2I forniscono i dettagli circa le condizioni stradali, il meteo e informazioni che possono influire sulle scelte del conducente, in base alle informazioni ricevute. La definizione di veicolo automatizzato include cinque diversi livelli. Il primo livello riguarda i veicoli convenzionali, in cui il guidatore è l'unico responsabile nel prendere le decisioni. Al secondo livello ci sono veicoli caratterizzati da almeno una funzione di controllo automatizzata. Il terzo livello riguarda veicoli con almeno due funzioni di controllo del veicolo automatizzate che agiscono contemporaneamente a supporto dell'utente. Al livello successivo, il quarto, il veicolo controlla alcune fasi critiche di sicurezza, con limiti circa determinate condizioni di meteo, manto stradale ecc. Il guidatore può riassumere in qualunque momento il controllo del veicolo con un tempo sufficiente per la transizione. In generale, l'automazione dovrebbe comportare un alleggerimento del lavoro dell'autista, ma in alcuni casi e situazioni critiche può aumentare lo stress e il carico mentale del guidatore e dei passeggeri. L'ultimo livello di

automazione si riferisce alla guida completamente automatica, in cui è il veicolo a controllare tutti i processi decisionali. Le prime versioni di veicoli automatizzati, erano caratterizzate dal prevedere a bordo sistemi di sensori per raccogliere le informazioni circostanti, con limiti legati alla fisicità e alla precisione nel funzionamento dei sensori stessi. La connessione tra veicoli e con l'infrastruttura, permette di superare i limiti dei sensori e contemporaneamente permette un'esperienza di guida più sicura, affidabile ed efficiente. Grazie allo scambio di informazioni, si ha la possibilità di essere continuamente aggiornati in tempo reale su ogni tipo di variazione riguardante l'ambiente circostante, sia quello a diretto contatto che quello più distante. L'interazione tra veicoli automatici e infrastrutture è una questione di rilievo da prendere in considerazione. I sistemi di automazione per il trasporto su strada sono stati proposti per l'uso in diversi ambienti operativi, con grandi differenze di complessità, ad esempio le strade con accesso limitato sono molto più semplici rispetto alle strade urbane. Questo ha una forte influenza sulle sfide tecnologiche progettuali a cui il sistema deve ovviare e rappresenta quindi un fattore determinante sul tempo necessario per l'introduzione del sistema stesso nel mercato. Infatti, la complessità dell'ambiente operativo determina la necessità di un maggior livello di supporto esterno, (cioè comunicazione di dati V2I), per garantire sicurezza nelle operazioni di scambio. Pertanto, se l'ambiente diventa più complesso, cresce la necessità di comunicare dati supplementari ai veicoli, sui pericoli che non sono all'interno del loro immediato raggio di azione o che possono essere difficili da percepire. Pertanto, l'automazione può essere disponibile solo quando l'infrastruttura lo consente e il sistema tecnologico deve essere anche in grado di rilevare quando lo stato della strada è adeguato per la guida automatica. L'infrastruttura è chiamata a fornire un supporto alla guida automatizzata e a comunicare informazioni ai sistemi di bordo dei veicoli, come i dati aggiornati sul traffico, i sensori e altri elementi infrastrutturali. Ciò richiede un significativo passo in avanti nell'applicazione di alta tecnologia alle infrastrutture. Al giorno d'oggi esistono veicoli tecnologicamente avanzati che tuttavia si devono interfacciare con infrastrutture arretrate. Quindi, il divario tecnologico tra i veicoli e l'infrastruttura deve essere riempito per rendere possibile ed efficiente l'automazione stradale. È prevedibile che nella fase di transizione l'automazione sia realizzabile solo su strade pre-approvate e pre-progettate, con dati sufficienti per il sostegno di queste comunicazioni. Le altre reti stradali saranno gradualmente aggiornate (sia con gli elementi fisici che digitali) per raggiungere un più alto livello di automazione. Pertanto, il sistema di automazione deve essere in grado di rilevare quale livello di automazione è più adatto a seconda della situazione stradale e conseguentemente adattarsi. Per questo motivo, l'utente può probabilmente sperimentare diversi livelli di automazione durante un singolo viaggio. L'interazione tra veicoli automatici e altri componenti del flusso sono un altro aspetto importante. Da questo punto di vista, l'ambiente su strada urbana è il più impegnativo per la guida automatizzata, considerando la necessità di condividere informazioni con tutti gli altri utenti della strada, i quali possono apparire con un preavviso molto breve e in più da qualsiasi direzione. Inoltre, la volontà di progredire ad una completa automazione porta, sostanzialmente, alla necessità di più elevati requisiti di prestazione e sicurezza. Per questo motivo, è prevedibile che i veicoli automatici saranno probabilmente utilizzabili, in un primo momento, solo in determinate condizioni di traffico (ad esempio per operazioni durante ingorghi a bassa velocità o per operazioni ad alta velocità nel traffico leggero) o nelle corsie limitate ai veicoli dotati di capacità di comunicazione V2V per il sistema di automazione.

## 2.2 Analisi scenari futuri

Di seguito si riporta una descrizione degli scenari futuri valutati e studiati dalla Commissione Europea per quanto riguarda lo sviluppo e l'inclusione dei veicoli autonomi (AV) all'interno del traffico veicolare ma non solo. Il documento di riferimento ritenuto importante è "From Connected Vehicles to a Connected, Coordinated and Automated Road Transport (C2ART) System" scritto da Directorate C Energy, Transport and Climate, Sustainable Transport Unit Joint Research Centre sede italiana Ispra. Verrà trattato il tema anche dell'accettazione dei nuovi sistemi di trasporto da parte degli utenti, e come cambieranno gli aspetti legati alla mobilità quotidiana. Sono stati considerati due scenari temporali, uno più recente quello di medio breve termine e uno più distante quello lungo medio termine. L'atto di guida viene rappresentato come un continuo spostamento tra guida manuale e automatica, sottolineando la collaborazione e la necessità di suddivisione dei ruoli tra guidatore e sistema automatico. Quest'ultimo, infatti, deve essere uno strumento di supporto al guidatore e non un elemento sostitutivo.

### 2.2.1 Medio breve termine (2020-2030)

È stato valutato che nell'immediato futuro (2020-2030) ci sarà un periodo di transizione in cui il flusso veicolare sarà misto, caratterizzato da una parte di veicoli a guida manuale e una parte a guida autonoma. Complessivamente si può affermare che ci saranno decenni durante i quali i veicoli convenzionali e gli AV dovranno interagire ma questo periodo temporale non è definibile; di conseguenza capiterà che alcune persone guideranno solo veicoli convenzionali. Per studiare questo periodo di transizione di traffico veicolare misto, è importante fare attenzione all'interazione fra le due tipologie di veicoli. Ad esempio le reazioni inaspettate tipiche del comportamento umano non potranno essere valutate dalla tecnologia degli AV, di conseguenza il veicolo di nuova generazione non sarà pronto a gestire un evento simile. Gli AV saranno utilizzati anche al fine di combattere gli incidenti in cui gli errori umani sono la causa principale ma è chiaro che non possono compensare gli arresti causati da azioni inappropriate degli altri utenti, dei veicoli mal funzionanti o da azioni ambientali e strutturali dell'infrastruttura. Il comportamento conservativo degli AV potrebbe peggiorare alcune situazioni in quanto tenderà a dimostrarsi più prudentemente rispetto ai veicoli a guida manuale per la sicurezza e per motivi di responsabilità. Questa circostanza potrà indurre i veicoli manuali ad adottare comportamenti rischiosi come il sorpasso in situazioni pericolose o saltare in un plotone di AV, quindi introducendo nuovi rischi. Ovviamente la quantità di veicoli autonomi andrà ad aumentare negli anni futuri arrivando ad una condizione di soli veicoli autonomi in circolazione, ma prima ci sarà la fase di transizione e sarà molto importante valutarla e studiarla. Uno dei motivi del lento successo dei veicoli autonomi è l'elevato costo delle tecnologie di cui sono dotati gli AV, ovviamente si arriverà a una condizione di mercato in cui questi prodotti saranno più accessibili e di conseguenza il loro costo diminuirà. Un altro motivo è legato agli aspetti legali, ancora oggi non si sono sciolti i dubbi circa la responsabilità in caso di incidente o mal funzionamento del veicolo; ma non solo un altro aspetto importante è collegato alla patente di guida. Sicuramente le pratiche e le conoscenze per ottenere la patente dovranno cambiare e modificarsi in funzione delle nuove caratteristiche del veicolo e delle sue

funzionalità autonome. I futuri utenti dovranno essere formati e informati su tutti i nuovi aspetti tecnologici di cui saranno dotati i veicoli, in modo da poter interagire nel migliore dei modi. Altro aspetto che giocherà un ruolo chiave sarà l'accettazione del AV da parte degli utenti, è stato studiato e valutato che i veicoli di nuova generazione avranno una guida diversa da quella umana e di conseguenza gli utenti potrebbero avvertire una sensazione di disagio e non accettare il veicolo di nuova generazione. Quindi i veicoli autonomi e connessi porteranno nuove sfide per i governatori, sarà fondamentale rivedere e rielaborare il codice della strada, il concetto di responsabilità, di sicurezza stradale; e non sarà da sottovalutare l'ampio accesso ai dati e di conseguenza garantire la protezione dei dati personali degli utenti ed evitare cyberattac. Il lavoro in questi settori è in corso sia in Europa che in tutto il mondo (Commissione europea, Stati membri dell'UE, UNECE, NHTSA) e sebbene non esistano ostacoli legali importanti per i sistemi devono essere fatti passi significativi per le successive generazioni di AV dotati di livelli più alti di automazione.

### 2.2.2 Medio lungo termine (2030-2050)

Considerando un periodo di tempo medio-lungo termine, l'uso privato dei veicoli AV potrebbe aumentare se però di conseguenza i prezzi diventeranno più accessibili a una parte più ampia della popolazione, gli utenti si fideranno e l'accettazione porterà all'aumento di AV. Sicuramente sarà importante e necessario che verranno fornite da parte degli organismi di regolamentazione la giusta serie di misure regolamenti e codici stradali. Oltre agli AV privati, l'uso di soluzioni di trasporto pubblico automatizzato e condiviso saranno fra le opzioni di viaggio per gli utenti e questo porterebbe all'aumento della proporzione di sistemi a guida automatizzata sulle strade. Esiste molta incertezza per quanto riguarda la stima della percentuale di penetrazione dei veicoli autonomi per i prossimi decenni, il documento "Look Ma, No Hands!" (W.H. Willigen, 2014) sostiene che nel 2040 circoleranno un 70% di AV nel traffico urbano e non. Ma purtroppo è un dato non certo e non valutabile al momento. La domanda di viaggio dovrebbe aumentare come conseguenza dell'introduzione degli AV i quali renderanno i viaggi su strada più economici, più confortevoli, più efficiente e accessibile a nuovi gruppi di utenti. Quindi di conseguenza aumenterà la domanda di viaggio per gli utenti delle fasce fragili (come giovani, anziani, disabili, persone con condizioni mediche limitanti, persone senza patente di guida). È stato studiato che il futuro a lungo termine sarà caratterizzato da mezzi di trasporto autonomi e condivisi, la condivisione dell'AV tra le famiglie potrebbe indurre un aumento del numero di viaggi per veicolo fino al 75%, anche se il concetto di proprietà del veicolo potrebbe essere ridotto fino al 43%. Altri studi hanno stimato un aumento totale dei viaggi per veicolo tra il 30% e il 90% con flotte miste di veicoli condivisi, AV e auto private tradizionali, potenzialmente questo potrà anche portare ad aumento del numero di veicoli. Gli studi sulle preferenze dell'utente hanno rivelato alcuni risultati, ad esempio, relativi ai viaggi a lunga distanza. Potrebbero essere percorsi e svolti con AV, soprattutto data la loro maggiore sensibilità a costi e tempi di viaggio rispetto ai viaggi giornalieri. Inoltre, a livello di spostamenti locali di breve distanza precisamente per tratte svolte in modalità multimodale in cui la modalità principale di viaggio sarà il treno, è stata valutata che la possibilità di percorrere l'ultimo miglio con veicoli AV invece che l'utilizzo di altre modalità come autobus, tram, metro o bicicletta. Però è stato

anche valutato che gli AV avranno a lungo termine il potenziale per aumentare la capacità stradale, potrebbe risultare un aumento della congestione stradale, e quindi delle emissioni inquinanti. Sicuramente lo scenario futuro sarà da studiare e definire nel migliore dei modi per garantire la sostenibilità ambientale e la vivibilità delle aree urbane. Alcuni autori sostengono che i benefici legati alla sicurezza, con l'utilizzo di veicoli dotati di elevati livelli di automazione, esisteranno ma non saranno così ampi come è stato detto negli ultimi anni; gli stessi sostengono che la riduzione del numero di incidenti stradali sia stata sovrastimata.

Il futuro della mobilità e dei trasporti sarà radicalmente diverso dalla situazione attuale, a seguito dei drastici cambiamenti che ci si aspettano e che si stanno iniziando a verificare nell'imminente. Scenari evolutivi e rivoluzionari diventeranno reali, con diversi impatti socio-economici. Anticipando queste potenziali situazioni e l'obiettivo è e sarà analizzare la fattibilità delle possibili soluzioni, attraverso la consultazione e alla collaborazione degli stakeholder. Le ricerche e i recenti studi sostengono che alti livelli di automazione possono indurre un aumento della domanda di viaggio e della capacità stradale, ma la velocità di questi rispettivi aumenti possono congestionare le reti. I veicoli autonomi e connessi potrebbero contribuire a mitigare queste conseguenze e consentire una mobilità sicura a basse emissioni. Il traffico misto in queste circostanze potrebbe creare notevoli cambiamenti e sfide per il mondo dei trasporti, e non da meno saranno le conseguenze sull'ambiente, la mobilità e l'economia. Il ruolo che le autorità pubbliche avranno in tali scenari futuri rimane cruciale e fondamentale per coordinare i cambiamenti e l'impatto dei nuovi sistemi sul territorio urbano, sfruttando i benefici a favore degli utenti e dei cittadini.

# Capitolo 3 Modello di costo di arco e l'assegnazione multiclasse

Diversi usi del suolo determinano altrettanti diversi e variabili flussi di traffico, aprendo la strada agli studi che mettono in relazione i differenti assetti del trasporto e delle forme dei luoghi della città. Dopo aver analizzato i nuovi trend di pianificazione urbanistica e dopo aver valutato i nuovi sistemi di trasporto come i veicoli autonomi, si è deciso che l'obiettivo principale di questo capitolo è quello di determinare un modello che caratterizzi il deflusso veicolare misto (veicoli autonomi e a guida manuale) e valutare gli impatti sull'infrastruttura esistente. Verranno descritti i modelli necessari allo studio della marcia dei veicoli e verrà individuato quello che rappresenta al meglio il caso di deflusso misto. L'analisi partirà da aspetti più generali come la struttura della rete e i modelli di deflusso considerando un traffico veicolare manuale, arrivando nel caso specifico di un modello di assegnazione multiclasse andando a considerare la presenza di veicoli autonomi.

Il trasporto veicolare di persone e merci è di vitale importanza nella società moderna. In aree densamente popolate, la capacità della rete stradale è spesso spinta al limite, e i frequenti ingorghi, congestioni e rallentamenti possono arrecare disagio all'utenza, aumentare il rischio di incidenti, nonché provocando un danno economico significativo. Una possibile soluzione al problema è l'intensificazione delle arterie stradali, ovvero l'introduzione di nuove tratte, o l'aggiunta di nuove corsie alle tratte già esistenti. Di solito, però, la costruzione di nuove strade è difficilmente possibile e socialmente insostenibile, in quanto tale intervento non solo provocherebbe un forte impatto ambientale, ma risulterebbe altamente oneroso. Inoltre, se si considera che le congestioni si presentano solitamente in una determinata fascia oraria, la rush-hour (ora di punta), e non lungo l'intero arco giornaliero, la costruzione di nuove arterie si rivelerebbe per lo più inutile. Pertanto è stata proposta una soluzione alternativa, che mira ad un uso intelligente della risorsa "infrastruttura di trasporto". Questa seconda soluzione si pone l'obiettivo di sfruttare al massimo le potenzialità della rete esistente, dotandola di sistemi di raccolta di informazioni e di monitoraggio del traffico. Il controllo del deflusso veicolare, prendendo in considerazione la variabilità delle condizioni e delle caratteristiche di esso, fa parte dell'ampio tema della gestione e monitoraggio del traffico. Risulta molto importante studiare tutti i fattori da cui dipende il traffico veicolare, e determinare i principali obiettivi per una corretta gestione del deflusso. Un esempio di obiettivi possono essere: l'accessibilità delle persone e delle merci al territorio, migliorare le condizioni di traffico in particolar modo nei nodi urbani, garantire e massimizzare la sicurezza stradale e infine migliorare le condizioni ambientali riducendo l'inquinamento. Per studiare il deflusso veicolare è bene analizzare la marcia del veicolo; nel caso di veicolo stradale è definita come "a vista" invece la marcia dei veicoli di tipo ferroviario è definita "strumentale". Infatti i treni, le metropolitane, e altri sistemi di trasporto di massa in sede propria possiedono una strumentazione a bordo e a terra. Tale tecnologia rende possibile una marcia guidata tramite segnali visti o ricevuti dal guidatore. Grazie a questi segnali esso è in grado di regolare la guida del veicolo. Nella marcia dei veicoli su strada ordinaria, invece, il driver deve regolarsi di volta in volta in relazione altri utenti intorno a lui. Quindi il guidatore su strada dovrà adattare a vista la marcia per prendere decisioni circa le manovre di avviamento,

accelerazione e decelerazione, rallentamento, arresti, sterzata; necessarie alla sicurezza ed alla regolarità di marcia del proprio mezzo. Tutti i veicoli che compongono il flusso veicolare possono essere visti come un insieme di entità con le loro singole caratteristiche, modi di agire, di pensare; quindi un insieme di elementi diversi gli uni dagli altri. All'interno del volume di traffico stradale, la marcia dei singoli veicoli dipende dalla condizione generale del volume di traffico, quindi dei singoli comportamenti di ogni veicolo nei confronti degli altri veicoli. In tal modo si possono definire due condizioni di marcia a seconda dell'entità degli effetti delle mutue azioni fra veicoli sui singoli veicoli: marcia libera e marcia condizionata. Tecnicamente si avrebbe marcia libera quando un veicolo è libero di compiere tutte le manovre, affinché sia soddisfatta questa condizione bisogna che il veicolo sia completamente solo. In pratica si considera la condizione di marcia libera quando un veicolo riesce a mantenere la propria velocità desiderata senza che venga intralciato da altri utenti. L'altra condizione di marcia si realizza quando veicoli con velocità desiderate diverse si intralciano reciprocamente limitando la velocità degli altri veicoli. Convenzionalmente si intende marcia libera quella in cui sono possibili dei sorpassi, marcia condizionata quella in cui non lo sono. La marcia condizionata è caratterizzata dal fatto che per una qualsiasi causa di disturbo può interrompersi, realizzando così quella condizione critica chiamata congestione ( $q = 0; v = 0; k > 0$ ).

La determinazione delle condizioni di marcia, necessarie per lo studio della capacità di una strada, si basa su due elementi: conoscenza pratica del deflusso ottenibile attraverso l'esperienza, e rappresentazione teorica del deflusso mediante modelli. Per quanto riguarda l'aspetto teorico del deflusso, la conoscenza dei modelli teorici risulta molto utile per comprendere i fenomeni che stanno alla base del deflusso, in modo da affrontare con un minimo di conoscenza i problemi legati alla capacità delle strade ed a quelli connessi con l'assegnazione.

### 3.1 Struttura della rete: Grafo

È importante definire cosa sono i grafi stradali ancora prima di parlare dei modelli di deflusso veicolare. Per rappresentare in modo semplice ed immediato il sistema di offerta di trasporto lo strumento più idoneo è sicuramente il grafo. In generale si definisce rete un grafo ai cui archi è associata una caratteristica quantitativa. I grafi a loro volta, sono definiti come una coppia ordinata di insiemi:  $N$ , insieme di elementi detti nodi, ed  $L$ , insieme di coppie di nodi appartenenti ad  $N$ , detti archi o rami. Simbolicamente un grafo  $G$  può essere indicato come  $G = (N, L)$ . I grafi utilizzati per le reti di trasporto sono in generale orientati; ovvero gli archi hanno un verso e le coppie di nodi che li definiscono sono coppie ordinate. Un arco che collega la coppia di nodi  $(i, j)$  può essere indicato con un unico indice che ne rappresenta la posizione nella lista di tutti gli archi del grafo oppure con la coppia di indici  $(i, j)$  relativi al nodo iniziale e al nodo finale dell'arco stesso. In una rete di trasporto e per il modello di offerta ad essa associato, oltre agli archi che rappresentano, come si vedrà in seguito, fasi dello spostamento, si possono definire delle particolari sequenze di archi, detti percorsi che rappresentano degli spostamenti dalla origine alla destinazione. Ad archi e percorsi possono poi associarsi due tipi di variabili: costi e flussi. Le variabili di arco e di percorso sono collegate fra loro in funzione della topologia della rete alla quale sono relative. Detti  $i$  e  $j$  due nodi del grafo, questo si dirà orientato se la coppia ordinata  $(i, j)$  è diversa dalla coppia  $(j, i)$ , si dirà non orientato nel caso contrario. Ad esempio il grafo stradale è solitamente un grafo orientato in



quanto i diversi rami stradali hanno un loro verso di percorrenza, e quindi non tutte le coppie  $(i, j)$ , per ogni  $i$  e  $j$ , possono essere utilizzate per rappresentare il collegamento tra i nodi. In un grafo orientato il primo nodo della coppia  $(i, j)$  si dice nodo iniziale e il secondo nodo finale. Un grafo inoltre si dice connesso se da ogni nodo è possibile raggiungere tramite un percorso ogni altro nodo del grafo. Infine, un grafo si dice pesato se ad ogni arco resta associata una funzione matematica che individua una quantità connessa all'arco. Ciascun arco del grafo utilizzato per rappresentare un sistema di trasporto corrisponde ad una fase dello spostamento, cioè la percorrenza di un elemento fisico (ad esempio un tronco stradale) e/o una attività connessa allo spostamento (ad esempio l'attesa di un treno ad una stazione); in entrambi i casi l'attraversamento dell'arco è caratterizzato da un tempo di trasferimento e/o da altri oneri sopportati dall'utente. Di solito nei grafi che rappresentano sistemi di trasporto si considerano esclusivamente percorsi che collegano fra loro nodi rappresentativi delle zone di traffico o nodi centroidi introdotti; tali percorsi rappresentano quindi una sequenza completa di fasi che consente di raggiungere una certa destinazione partendo da una certa origine. Per quanto detto ogni percorso è univocamente associato ad una e una sola coppia O-D mentre la stessa coppia O-D può essere collegata da più percorsi. La relazione esistente fra archi e percorsi in un grafo può essere rappresentata con la matrice di incidenza archi-percorsi,  $A$ . La matrice  $A$  ha tante righe quanti sono gli archi,  $n_L$ , e tante colonne quanti sono i percorsi  $n_p$ ; il generico elemento che la compone,  $a_{lk}$ , vale uno se l'arco  $l$  appartiene al percorso  $k$ ,  $l \in k$ , vale zero altrimenti,  $l \notin k$ .

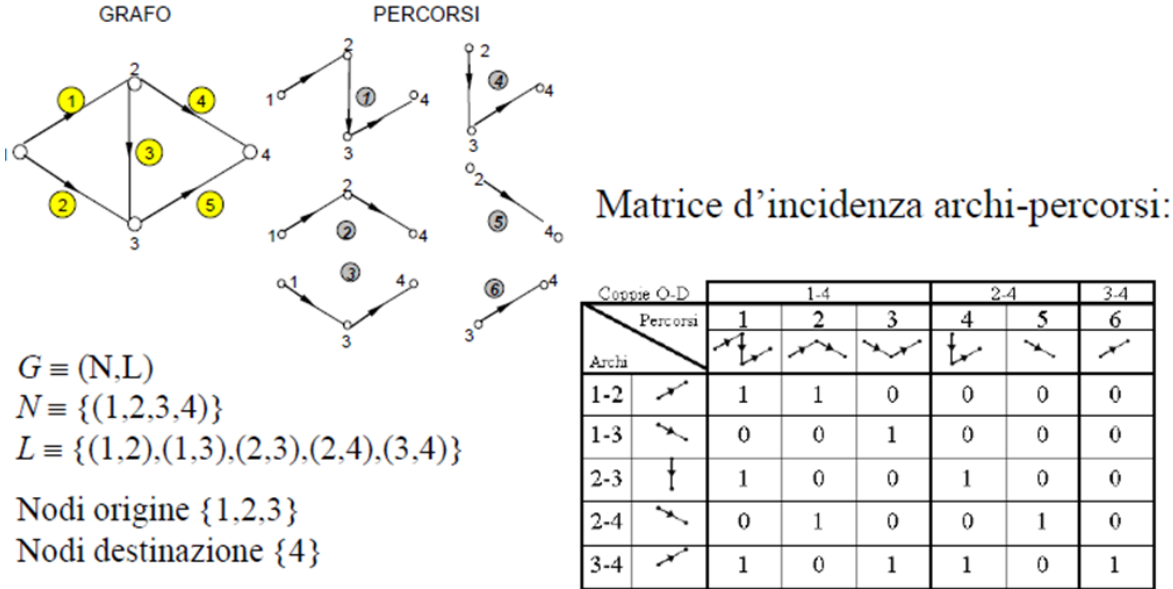


Figura 8: Esempio di grafo e matrice di incidenza (Cascetta).

La costruzione di un grafo rappresentativo dei collegamenti offerti da un sistema di trasporto richiede la definizione degli elementi che lo costituiscono (nodi ed archi) in funzione delle caratteristiche del sistema fisico che si intende rappresentare, successivamente si dovranno individuare gli elementi che si ritengono significativi ai fini dell'analisi del sistema reale e per i quali si vogliono conoscere flussi e prestazioni. In ogni caso nodi e archi saranno relativi all'insieme delle infrastrutture e/o ai servizi di trasporto che sono stati individuati come rilevanti. Si tratta in



definitiva di rappresentare con un grafo i collegamenti fra le zone di traffico, o meglio fra i centroidi che le rappresentano, consentiti dalla rete di base. In questa fase ci si limita ad indicare dei criteri su come possono essere selezionate le infrastrutture ed i servizi rilevanti per lo studio della mobilità, che saranno poi rappresentate con il modello di offerta. Gli elementi (infrastrutture e servizi) da selezionare dipendono dagli scopi dello studio. Nel grafo rappresentativo di una rete di trasporto stradale i nodi rappresentano punti fisici del territorio e precisamente sono situati in corrispondenza di intersezioni tra diverse strade o in corrispondenza di strozzature su una stessa strada; gli archi orientati rappresentano i collegamenti tra questi diversi punti, cioè tratti di strada con caratteristiche geometriche, funzionali e prestazionali omogenee. I nodi rappresentativi di intersezioni sono detti nodi reali, per distinguerli dai nodi centroidi; gli archi rappresentativi di tratti di strada sono detti archi reali. I centroidi corrispondono all'inizio e/o al termine di uno spostamento, e sono rappresentati da nodi centroidi. I nodi reali sono numerati progressivamente a partire da numeri successivi a quelli utilizzati per i centroidi. I nodi centroidi sono collegati alla rete di trasporto tramite archi fittizi detti archi connettori, rappresentativi degli spostamenti che avvengono per raggiungere la rete di base, a partire dal luogo reale di origine dello spostamento.

Un grafo ai cui archi siano state associate delle caratteristiche quantitative si definisce rete, ed in particolare nel caso del sistema di trasporto ad ogni arco è intuitivamente associato il costo, nella sua accezione più generale, legato al trasferimento lungo l'arco stesso. Si definisce costo di trasporto di un arco la grandezza scalare che sintetizza le varie voci di costo prese in considerazione dall'utente per effettuare il trasferimento. In altri termini, il costo di trasporto sull'arco è una combinazione di grandezze non necessariamente tra loro omogenee quali il tempo, il costo monetario, lo stress, etc. Se si vuole ridurre il costo ad una grandezza scalare o si considera una sola delle sue componenti ritenuta rilevante, ad esempio il tempo di trasferimento, oppure, se si vogliono considerare tutte, occorre omogeneizzarle attraverso l'introduzione di coefficienti di reciproca sostituzione, che tengano cioè conto di quanto vale (o pesa) un'unità della grandezza  $a$  rispetto ad un'unità della grandezza  $b$ . Ad esempio, considerando una forma lineare si può scrivere:

$$c_i = \sum_{i=1}^n b_i x_i$$

in cui  $c_i$  è il costo generalizzato di trasporto per l'arco  $i$  considerato,  $x_i$  sono le varie componenti (quali il tempo, costo monetario, etc.) e gli  $b_i$  i coefficienti di reciproca sostituzione. Un flusso d'arco non è altro che la somma dei flussi sui percorsi che utilizzano quel ramo; sfruttando ancora la matrice di incidenza archi-percorsi, e detto  $F$  il vettore dei flussi di percorso il cui generico elemento  $f_k$  è il flusso sul percorso  $k$  che collega una coppia di nodi, si può scrivere che:

$$f_i = \sum_k a_{ik} f_k$$

Uno studio sulla mobilità che interessa un sistema di trasporto (esistente o da progettare) avviene secondo le seguenti fasi:

- 1) individuazione dell'area di studio;
- 2) suddivisione in zone dell'area di studio (zonizzazione);

- 3) definizione del modello di offerta del sistema di trasporto;
- 4) stima (tramite indagini o modelli) della domanda di trasporto che interessa l'area di studio (matrici OD);
- 5) simulazione dell'interazione domanda/offerta (calcolo dei flussi di traffico sulle diverse componenti del sistema).

I risultati ottenuti dalla fase 5 (flussi sulle componenti del sistema di trasporto) possono essere utilizzati per effettuare valutazioni sul funzionamento di un sistema esistente o per progettare un nuovo sistema di trasporto. In seguito saranno descritte sinteticamente le singole fasi del processo di analisi della domanda di mobilità.

## 3.2 Modelli per il deflusso veicolare

Il controllo del deflusso veicolare, prendendo in considerazione la variabilità delle condizioni e delle caratteristiche di esso, fa parte dell'ampio tema della "gestione e monitoraggio del traffico". Risulta molto importante studiare tutti i fattori da cui dipende il traffico veicolare, e determinare i principali obiettivi per una corretta gestione del deflusso. Un esempio di obiettivi possono essere: l'accessibilità delle persone e delle merci al territorio, migliorare le condizioni di traffico in particolar modo nei nodi urbani, garantire e massimizzare la sicurezza stradale e infine migliorare le condizioni ambientali riducendo l'inquinamento. Tutti i veicoli che compongono il flusso veicolare possono essere visti come un insieme di entità con le loro singole caratteristiche, modi di agire, di pensare; quindi un insieme di elementi diversi gli uni dagli altri. All'interno del volume di traffico stradale, la marcia dei singoli veicoli dipende dalla condizione generale del volume di traffico, quindi dei singoli comportamenti di ogni veicolo nei confronti degli altri veicoli. La determinazione delle condizioni di marcia, necessarie per lo studio della capacità di una strada, si basa su due elementi:

1. conoscenza pratica del deflusso ottenibile attraverso l'esperienza;
2. rappresentazione teorica del deflusso mediante modelli.

Per quanto riguarda l'aspetto teorico del deflusso, la conoscenza dei modelli teorici risulta molto utile per comprendere i fenomeni che stanno alla base del deflusso, in modo da affrontare con un minimo di conoscenza i problemi legati alla capacità delle strade ed a quelli connessi con l'assegnazione. I modelli matematici permettono di rappresentare l'andamento di una rete di trasporto tenendo conto di tutte le variazioni economiche, sociali e ambientali; questo aspetto con un semplice modello fisico non è fattibile. Grazie ai modelli si è in grado di facilitare la rappresentazione quantitativa della distribuzione spaziale e temporale dei flussi di traffico e di conseguenza agevolare lo studio degli effetti di nuovi interventi infrastrutturali e gestionali su reti più o meno complesse.

Da quando è nato un interesse da parte degli studiosi verso il settore della logistica e dei trasporti sono stati concepiti due tipi di modelli matematici per la gestione e il controllo del traffico. Tali modelli di traffico possono essere suddivisi in due categorie: il modello microscopico e il modello macroscopico, a seconda del livello di dettaglio adottato. Negli ultimi anni, inoltre, si sta affermando una terza famiglia di modelli, detti mesoscopici, i quali si pongono come una via di mezzo tra i due sopra citati.

**Modelli microscopici.** Il modello microscopico pone l'attenzione sul comportamento dell'individuo, cioè del singolo veicolo. Il guidatore aggiorna la propria velocità e la propria accelerazione istante per istante basandosi sulle condizioni di traffico nel suo intorno, ossia dei veicoli con i quali esso condivide il tratto stradale, in particolare in base alla velocità e all'accelerazione del veicolo che lo precede. I modelli di simulazione microscopica sono quindi capaci di rappresentare in maniera precisa e specifica il traffico e la sua evoluzione istantanea, considerando gli aspetti geometrici dell'infrastruttura in relazione al comportamento reale del conducente. Essi sono in grado di analizzare ed elaborare istante per istante il movimento di ogni singola unità presente sulla rete. Scopo della microsimulazione è la modellazione dei movimenti di ciascun veicolo sulla base di

aggiornamenti temporali di un secondo, o di una sua frazione, al fine di valutare le prestazioni di una rete stradale in relazione alle diverse componenti di traffico.

**Modelli macroscopici.** Osservando una grande arteria stradale da un aereo si può vedere il traffico come una corrente o un fluido continuo. È quindi abbastanza naturale associare il traffico al flusso di un fluido, e trattarlo di conseguenza. L'approccio macroscopico prevede quindi l'uso di modelli continui: dal momento che il traffico coinvolge grandezze quali flusso  $f$ , velocità media  $v$  e densità  $d$ , c'è una naturale tendenza ad assimilarne il comportamento a quello di un fluido incomprimibile, per il quale sussista una legge di corrispondenza diretta tra velocità e densità e tra flusso e densità. I modelli macroscopici usano variabili aggregate, cioè variabili che contengono un'informazione mediata di una grandezza, relativamente a un gruppo di veicoli, per descrivere una situazione di traffico. I modelli macroscopici di traffico presentano un livello di dettaglio minore rispetto ai modelli di tipo microscopico. Mentre questi ultimi studiano la dinamica del singolo veicolo, l'obiettivo dei modelli macroscopici è lo studio del traffico nella sua totalità, cercando previsioni su velocità media di scorrimento, sul flusso o sulla densità veicolare, e quindi su grandezze continue e mediate. I tre parametri di flusso, velocità e densità sono legati tra loro dalla seguente relazione:

$$f = v k$$

Per la costruire i diagrammi che legano le tre grandezze a due a due, si pongono le seguenti ipotesi:

- per densità uguale a zero (nessun veicolo lungo l'arco) il flusso è nullo ( $k = 0$  implica  $f = 0$ );
- un incremento della densità  $d$  implica un incremento del flusso  $f$ ;
- per valori di densità massimi, il flusso deve essere nullo.

### 3.2.2 Relazione velocità flusso per flusso veicolare misto

Dopo aver descritto come vengono trattati i problemi dell'ingegneria dei trasporti riguardanti il deflusso veicolare di tipo manuale, in questa sezione verrà descritta la relazione velocità flusso per il caso di flusso veicolare misto quindi composto da veicoli autonomi e manuali. Questa condizione di deflusso sarà caratteristica dell'immediato futuro, nel quale sarà importante studiare il periodo di transizione dell'introduzione dei veicoli autonomi nel traffico classico fino ad oggi conosciuto. Volendo porre attenzione ai macromodelli per l'analisi del flusso veicolare misto, è bene analizzare il lavoro svolto da Ionnaou (2003). Nel suo studio si possono notare le relazioni flusso - densità per reti tradizionali con veicoli con guida semi-autonoma. I veicoli con guida semi-automatica sono dotati di strumentazione (ICC) Intelligent Cruise Control che consente di seguire un altro veicolo precedente nella stessa corsia. Questo sistema è dotato di sensori di misura longitudinali che permettono di determinare la velocità e distanza relativa fra il veicolo e quello successivo per poi produrre controlli di regolazione per le fasi di accelerazione e frenatura. L'autore ha posto l'attenzione alla creazione di un modello per valutare il deflusso di traffico misto, con veicoli manuali e semi-autonomi supponendo che la marcia dei veicoli avvenga in condizioni stazionarie quindi con tipologie di guida uguali utilizzando intervalli di tempo e spaziali uguali.

Basandosi su questo studio è stato valutato un procedimento per calcolare la relazione velocità flusso, le principali ipotesi del modello utilizzato sono le seguenti:

- le caratteristiche dei veicoli autonomi, ovvero quelli che adottano livelli di automazione pari ai livelli 3-4-5 dei livelli SAE, sono indicati con il pedice  $a$  oppure “Highly – Fully Autonomous (HFA) vehicles”; invece le caratteristiche dei veicoli a guida manuale, ovvero quelli che adottano i livelli di automazione pari ai livelli 0-1-2 dei livelli SAE, sono indicati con il pedice  $m$  oppure “No – Partially Autonomous vehicles (NPA)”;
- le matrici O/D per entrambe le classi di veicoli sono note e fissate;
- la rete verrà rappresentata con un grafo  $G = \{N, L\}$ , dove  $N$  saranno i nodi della rete e  $L$  gli archi della rete;
- sono noti per tutti i possibili valori della percentuale di veicolo autonomo  $p(j)$ , per ogni coppia O/D solo i primi  $K > 2$  percorsi più brevi sono considerati. Pertanto è possibile scrivere la matrice di incidenza  $\Delta$ , il cui elemento generico  $\delta_{o,d}(j, k)$  è uguale a 1 se l’arco  $j$  appartiene al percorso  $k$  per la coppia origine/destinazione  $o, d$ .

Poiché si presume che la rete di traffico sia generalmente congestionata, il tempo di percorrenza su ciascun link  $(h, l)$  dipende dal flusso di traffico totale  $f_{h,l} = f_{h,l}^{HFA} + f_{h,l}^{NPA}$ , essendo  $f_{h,l}^{HFA}$  il flusso di traffico HFA  $f_{h,l}^{NPA}$  il flusso di traffico NPA, e sulla percentuale di veicoli HFA rispetto a  $f_{h,l}$  di seguito indicato come  $p_{h,l} = f_{h,l}^{HFA} / f_{h,l}$ . Quindi, il modello analitico del tempo di viaggio può essere determinato considerando la distanza tra i veicoli detto *spacing* il quale avrà una parte in funzione dei veicoli autonomi e una parte in funzione dei veicoli a guida manuale:

$$s_{mix} = ps_a + (1 - p)s_m \quad (1)$$

Con  $s_{mix}$  lo spacing di traffico veicolare misto,  $s_{mix}$  lo spacing relativo ai soli veicoli manuali, invece  $s_a$  quello caratteristico dei veicoli autonomi infine  $p$  rappresenta il coefficiente di penetrazione dei veicoli autonomi all’interno del traffico misto.

Sapendo che la densità del traffico può essere espressa in generale come inverso dello spacing, cioè  $k = 1 / s$ , è possibile scrivere la densità media del traffico veicolare misto come:

$$\frac{1}{k_{mix}} = ps_a + (1 - p)s_m \quad (2)$$

Poiché la velocità media del flusso di traffico è vincolata alla velocità dei veicoli più lenti, quindi  $v_{mix} = v_a = v_m$ , si divide l’equazione (2) per  $v_{mix}$  ottenendo:

$$\frac{1}{f_{mix}} = \frac{1}{v_{mix}k_{mix}} = \frac{ps_a + (1 - p)s_m}{v_{mix}} \quad (3)$$

Inoltre, nei link congestionati in cui i veicoli interagiscono tra loro, lo spacing tra i veicoli è funzione dello spazio di arresto e può essere scritto nel seguente modo:

$$s_m = \frac{v_{mix}^2}{2a_m} + t_r v_{mix} + \lambda \quad (4)$$

per veicoli NPA o manuali, e

$$s_a = \frac{v_{mix}^2}{2a_a} + \lambda \quad (5)$$

per veicoli HFA o autonomi.

Con  $\lambda$  si indica la lunghezza media del veicolo,  $a_m$  e  $a_a$  le decelerazioni delle due classi di veicoli. Nell'equazione (5) si ipotizza che il tempo di reazione dei veicoli autonomi sia trascurabile rispetto a quello di quelli manuali. È possibile riscrivere l'equazione (3) nel seguente modo:

$$\frac{1}{f(v_{mix}, p)} = p \left( \frac{v_{mix}}{2a} + \frac{\lambda}{v_{mix}} \right) + (1 - p) \left( \frac{v_{mix}}{2a} + \frac{\lambda}{v_{mix}} + t_r \right) \quad (6)$$

Di conseguenza è possibile determinare il flusso di traffico misto in funzione della velocità del traffico  $f_{mix}(v_{mix}, p)$  come:

$$f_{i,j}(v_{i,j}, p_{i,j}) = \frac{1}{p_{i,j} \left( \frac{v_{i,j}}{2a_a} + \frac{\lambda}{v_{i,j}} \right) + (1 - p_{i,j}) \left( \frac{v_{i,j}}{2a_m} + \frac{\lambda}{v_{i,j}} + t_r \right)} \quad (7)$$

Assumendo, i parametri del modello riportati in Tabella 1, le forme delle funzioni di flusso-velocità per un generico arco di 1 km sono riportate in Figura 9, dove le funzioni sono rappresentate al variare della percentuale  $p$  corrispondente al numero di veicoli autonomi all'interno del traffico veicolare. Si noti che assumendo i parametri in Tabella 1, le classi di veicoli NPA e HFA si differenziano solo per il tempo di reazione senza perdita di validità dell'approccio generale considerato.

Tabella 1: Parametri utilizzati nella relazione flusso velocità.

$\lambda$	8m
$t_r$	1.5 s
$a_m$	4 ms <sup>-2</sup>
$a_a$	4 ms <sup>-2</sup>

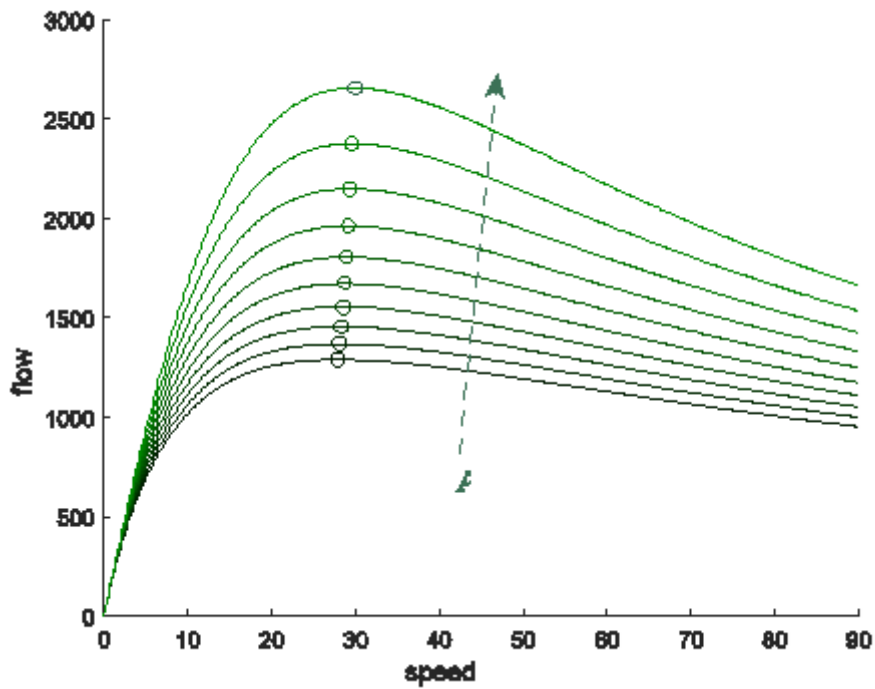


Figura 9: Funzione velocità (km/ora) - flusso (veicoli/ora).

I grafici della funzione variano colore partendo da un verde scuro ( $p = 0\%$ ) a un verde chiaro che rappresenta la condizione massima ovvero di traffico veicolare totalmente automatico ( $p = 100\%$ ). Fissato un valore della velocità, dalla Figura 9 si può determinare che all'aumentare di  $p$  aumentano i valori di flusso veicolare. Di conseguenza la percentuale di veicoli autonomi all'interno del flusso veicolare giocherà un ruolo fondamentale per l'aumento dei flussi veicolari grazie al ridotto distanziamento tra i veicoli.

In Figura 9 sono evidenziati i valori di flusso massimo al variare di  $p$  che saranno utilizzati nel prossimo paragrafo per determinare i tempi di viaggio.

### 3.2.3 Funzione flusso-tempo di viaggio

Si prevede che con l'introduzione dei veicoli autonomi all'interno del traffico veicolare vi saranno delle conseguenze come l'aumento della velocità di viaggio e il miglioramento della capacità stradale, questa analisi è stata ampiamente studiata nel capitolo precedente. Invece nel seguente paragrafo invece si valuterà la funzione flusso-tempo di viaggio, partendo da quella proposta da Bureau of Public Roads (BPR) fino ad arrivare a valutarla in condizioni di traffico misto. Analizzando il lavoro svolto dal Marron Institute of Urban Management (2014) i veicoli autonomi porteranno dei miglioramenti quindi è importante valutare le migliorie che si ripercuoteranno sulla funzione flusso-tempo. La funzione BPR ha la seguente espressione:

$$t = t_o \left[ 1 + \alpha \left( \frac{f}{Q} \right)^\beta \right] \quad (8)$$

dove  $t_o$  è il tempo di viaggio a flusso libero,  $f$  è il flusso di traffico,  $Q$  la capacità stradale,  $\alpha$  e  $\beta$  due parametri caratteristici dell'arco stradale sottointendono un insieme di fattori funzionali del tratto stradale come condizioni d'uso, caratteristiche geometriche o presenza di sosta. Il parametro  $\alpha$  deve essere positivo e corrisponde all'incremento di tempo di percorrenza che si ha in condizioni di flusso pari alla capacità rispetto al valore corrispondente ad una condizione di flusso nullo. Il parametro  $\beta$ , invece, deve risultare maggiore di uno, determinando così notevoli incrementi del tempo di percorrenza per flussi superiori alla capacità. Nella calibrazione originaria del HCM erano stati attribuiti i valori  $\alpha = 0,15$  e  $\beta = 4$ . Le condizioni stradali future in seguito all'introduzione di veicoli autonomi possono essere specificate in termini di aumento della capacità e della velocità di flusso libero. Di conseguenza i tempi di percorrenza e il volume di traffico miglioreranno, il che produce un effetto equivalente all'abbassare il tempo di flusso libero (freccia tratteggiata blu in Figura 10) ed estendere la porzione piatta della funzione BPR (aumento di capacità) ulteriormente a destra lungo l'ascissa (freccia tratteggiata rossa in Figura 10).

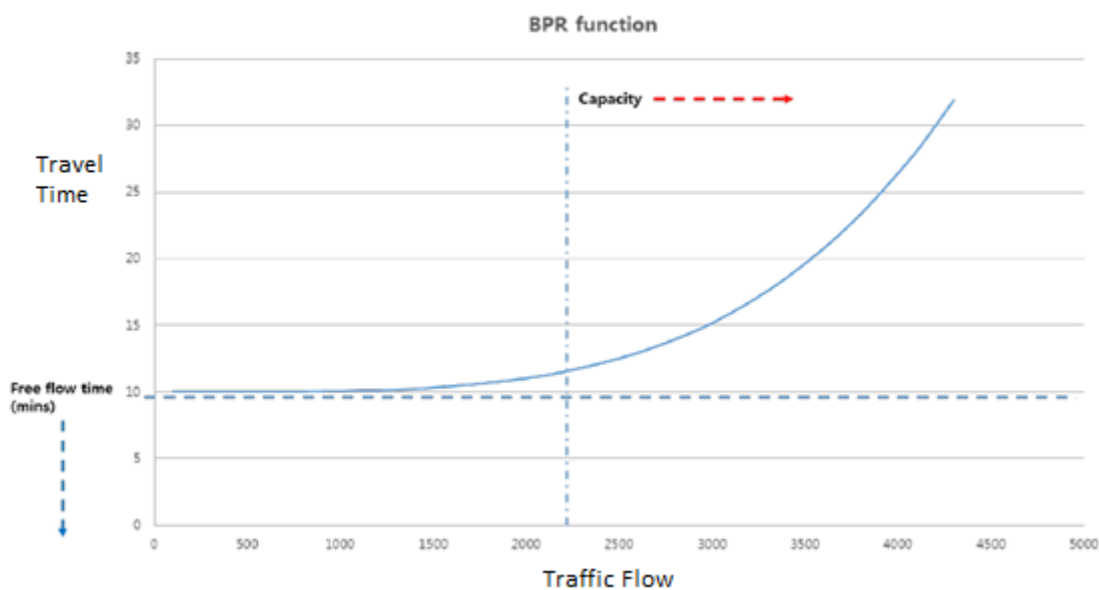


Figura 10: Funzione flusso-tempo BPR.



Nel rapporto viene proposta una ripartizione della capacità stradale in funzione dell'introduzione dei veicoli autonomi all'interno del traffico veicolare rifacendosi a quanto riportato nel lavoro di Murata (1998). Le caratteristiche dei veicoli autonomi, ovvero quelli che adottano livelli di automazione pari ai livelli 3-4-5 dei livelli SAE, sono indicati con il pedice *a* oppure "Highly – Fully Autonomous (HFA) vehicles"; invece le caratteristiche dei veicoli a guida manuale, ovvero quelli che adottano i livelli di automazione pari ai livelli 0-1-2 dei livelli SAE, sono indicati con il pedice *m* oppure "No – Partially Autonomous vehicles (NPA)". L'espressione della capacità è la seguente:

$$Q = \frac{3600}{(h_a p + h_m (1 - p))} \quad (9)$$

dove  $Q$  è la capacità veicolare di traffico misto (autonomo e manuale),  $p$  la percentuale di veicoli autonomi,  $h_a$  headway dei veicoli autonomi e  $h_m$  headway dei veicoli manuali. Quindi in presenza di veicoli autonomi è bene considerare la capacità stradale sia in funzione delle caratteristiche della strada ma anche della presenza di veicoli autonomi. L'headway per i veicoli manuali dipende dalle caratteristiche del tratto stradale, per esempio considerando un arco stradale con un'unica direzione progettato con una capacità di 1800 *veic/h* l'headway risulterà 2 s ( $3600/1800 = 2$  s). Invece l'headway per i veicoli autonomi è stato valutato pari a 0,5 s.

Con un procedimento analogo a quello del rapporto precedentemente descritto, sono state calcolate le funzioni flusso-tempo per ogni valore di  $p$ . La differenza principale è consistita nel calcolo della capacità, che nel presente lavoro è stato effettuato tramite il modello riportato nel paragrafo 3.2.2.

Per giungere a questo obiettivo, è stato considerato un tratto stradale rettilineo urbano dotato di una corsia di lunghezza pari a 1 km. Precisamente sono stati calcolati i valori di  $Q$  associati a ogni valore di  $p$  considerando l'equazione 9, come valori dell'headway sono stati presi quelli citati nel lavoro svolto dal Marron Institute of Urban Management. Successivamente facendo variare il flusso  $f$  per ogni percentuale di veicoli autonomi sono state determinate le funzioni flusso-tempo considerando l'equazione 8. I parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , relativi alla funzione flusso tempo di viaggio, considerati sono rispettivamente 0,15 e 4. Si è scelto di non modificare i valori dei due parametri di calibrazione perché si ipotizza che le strade non verranno modificate significativamente e le caratteristiche tecniche rimarranno le stesse nel momento in cui verranno introdotti i veicoli autonomi nel flusso veicolare. Sicuramente con lo sviluppo delle intelligent roads i parametri andranno rivalutati e ricalibrati in relazione alle future caratteristiche delle strade.

In Figura 11 sono riportati i risultati e le funzioni calcolate con il procedimento spiegato precedentemente. Le funzioni hanno un andamento monotono crescente, caratteristico della funzione flusso-tempo. Al variare della percentuale di veicoli autonomi all'interno del flusso stradale, i tempi di viaggio diminuiscono. Questo comportamento è caratteristico dei veicoli di

nuova generazione i quali potranno viaggiare a velocità maggiori grazie ai sistemi di comunicazione V2V e V2X.

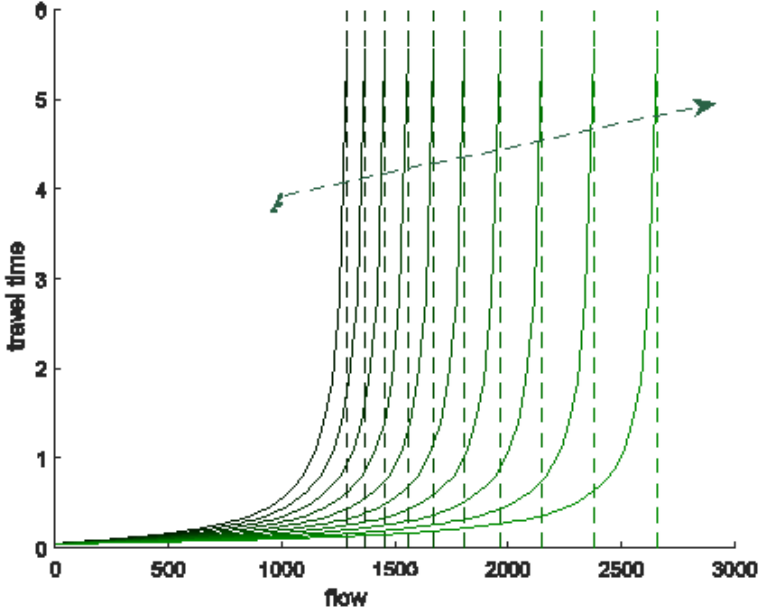


Figura 11: Funzione flusso (veicoli/ora) - tempo di viaggio (ore).

### 3.3 Assegnazione Multiclasse

I modelli di assegnazione per una rete di trasporto simulano l'interazione domanda-offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti e le prestazioni per ciascun elemento del sistema di offerta. Questi modelli sono spesso denominati "modelli di interazione domanda-offerta". La domanda di trasporto è influenzata dai costi di percorso, ottenuti come somma dei costi dei singoli archi che compongono l'intero percorso. Inoltre i costi degli archi sono funzione delle condizioni di traffico che si generano sui singoli archi. Esiste quindi una dipendenza mutua fra domanda, flussi e costi. I modelli di assegnazione svolgono un ruolo centrale nella costruzione di un modello complessivo per la simulazione di un sistema di trasporto, in quanto si pongono l'obiettivo di simulare lo stato del sistema. I risultati della simulazione a loro volta costituiscono gli elementi di ingresso per la progettazione e/o la verifica del sistema di trasporto. I modelli di assegnazione possono essere classificati in relazione alle ipotesi sulle funzioni costo-flusso degli archi che esprimono la dipendenza delle prestazioni del sistema di trasporto dal flusso di utenti. In particolare, se si assume che i costi non dipendano dai flussi, si ottengono i modelli di assegnazione a reti non congestionate, o con costi costanti. Se invece i costi dipendono dai flussi sugli archi si hanno modelli di assegnazione a reti congestionate. Il modello di scelta del percorso può essere deterministico o stocastico. Nel primo caso solo il percorso di costo minimo è scelto e gli altri rimangono scarichi; mentre nel secondo caso ogni percorso viene scelto con probabilità diversa in funzione dell'utilità associata a ciascun percorso. La condizione di equilibrio (User Equilibrium) viene raggiunta quando per ogni coppia OD i costi su tutti i percorsi alternativi sono uguali. Il costo ottenuto è minore o uguale al costo che un singolo utente sperimenterebbe utilizzando un altro percorso. Il sistema evolve fino al raggiungimento della condizione di equilibrio. Pertanto tale condizione genera la particolare configurazione di flussi cui corrispondono dei costi di arco che generano dei costi percepiti di percorso che l'utente riscontra effettivamente sulla rete. In Figura 12 è rappresentato uno schema riassuntivo di tutti i modelli di assegnazione al variare della situazione della rete (congestionata e no) e del modello di scelta del percorso (deterministico o stocastico).

MODELLI DI ASSEGNAZIONE		Modelli di scelta del percorso	
		Deterministico	Stocastico
Rete Non Congestionata		DNL	SNL
Rete Congestionata	Equilibrio	DUE	SUE
	Processo Dinamico	DDP	SDP

Figura 12: Schema riassuntivo dei modelli di assegnazione.

### 3.3.1 Modello per Assegnazione Multiclasse: ipotesi e notazioni

In questa sezione verrà determinato un modello di assegnazione per una condizione di traffico veicolare misto. Per il caso di studio è stato scelto un Modello di Assegnazione SUE (Stochastic User Equilibrium) Multiclasse, precisamente due classi di veicoli una per i veicoli manuali (NPA) e una per i veicoli automatici (HFA). Questa classificazione dei veicoli è la stessa trattata nel capitolo 3.2.3. Il modello ha lo scopo di valutare come le prestazioni della rete cambiano con l'introduzione dei veicoli autonomi all'interno del flusso veicolare manuale.

L'assegnazione di equilibrio stocastico si ottiene applicando l'approccio di equilibrio a reti congestionate nell'ipotesi di comportamento di scelta del percorso probabilistico. L'assegnazione di equilibrio è in generale espressa da modelli di punto fisso, ossia da sistemi di equazioni non lineari, ovvero da modelli di disequazioni variazionali. Pertanto non sono disponibili algoritmi a convergenza finita. Nel caso di reti congestionate, oltre alla dipendenza dei flussi di arco dai costi di arco, dovuta al comportamento di scelta del percorso, si verifica anche la dipendenza dei costi di arco dai flussi di arco. L'approccio di equilibrio allo studio delle interazioni domanda-offerta assume che una configurazione dei flussi di percorso mutuamente consistente con i corrispondenti costi di percorso sia rappresentativa dello stato assunto dal sistema. I flussi e i costi di percorso di equilibrio sono definiti dal sistema di equazioni ottenuto combinando il modello di offerta con il modello di domanda, come analizzato precedentemente nel paragrafo 3.2. Si assume inoltre che i flussi di domanda delle differenti coppie  $OD$  siano espressi in unità comuni; in particolare, per i modi individuali, ad esempio l'auto, sono espressi in veicoli o guidatori per unità di tempo, mentre nel caso dei modi piedi o trasporto collettivo in utenti per unità di tempo. Idealmente l'algoritmo di assegnazione stocastica si potrebbe distinguere per veicoli autonomi e veicoli manuali, agendo sulla diversificazione del parametro che rappresenta la varianza. Si considera, infatti, la varianza del sistema caratterizzato dai veicoli autonomi pressoché nulla, in quanto si ipotizza che i veicoli autonomi scelgano, ogni qualvolta sia necessario scegliere un percorso, quello minimo attraverso l'utilizzo delle tecnologie a bordo del veicolo stesso.

L'algoritmo di assegnazione SUE considerato utilizza un modello C-Logit per la scelta del percorso dei veicoli autonomi, invece un modello Multinomiale Logit per modellare il processo decisionale dei veicoli manuali. I comportamenti di scelta del percorso, e i modelli che li rappresentano, dipendono dalle diverse caratteristiche del servizio offerto dal modo di trasporto in esame. Il modello C-Logit risolve problemi derivanti dalla proprietà di indipendenza delle alternative irrilevanti del modello Logit, permette di ridurre la probabilità di scegliere percorsi con forti sovrapposizioni e fa aumentare quella di scegliere percorsi poco sovrapposti (Cascetta, 2006). Il modello C-Logit ha un'interpretazione comportamentale come modello simultaneo di percezione delle alternative e di scelta fra le alternative percepite. In tal modo, si presume che i veicoli autonomi non siano influenzati dalla percezione della sovrapposizione dei percorsi, conoscendone esattamente i costi. Si è scelto di utilizzare questa tipologia di Logit perché permette di mettere in evidenza la differente percezione dei percorsi tra ogni coppia  $OD$  dell'uomo rispetto a quella dei veicoli autonomi. Infatti, l'utente umano percepisce come simili percorsi diversi che sono caratterizzati da archi in comune.

Riguardo al modello, per ogni iterazioni  $i$ -esima, data la colonna della matrice di incidenza  $\Delta_{k,od}$  del  $k^{th}$  percorso da  $o$  a  $d$ , il vettore dei costi per arco è  $c(f^{(i)})$  ed è in funzione dal flusso di arco  $f^{(i-1)}$  calcolato all'iterazione  $(i-1)^{th}$ . Considerato il fattore di sovrapposizione  $CF_{k,od}$  per i veicoli manuali, il quale "riduce" l'utilità sistematica di un percorso in funzione del suo grado di sovrapposizione con altri percorsi alternativi (Cascetta, 2006), pari a:

$$CF_{k,od} = \ln(1 + \sum_{h \neq k} \frac{z_{hk}}{(z_h z_k)^{1/2}}) \quad (10)$$

considerando i residui aleatori  $z_h$  e  $z_k$  per ciascun percorso  $k$ , per recarsi da  $o$  a  $d$  nell'intervallo temporale  $h$ .

L'utilità sistematica è la seguente:

$$V_{k,od}^a(f^{(i-1)}) = -\Delta_{k,od}^T c(f^{(i-1)}) \quad (11)$$

per i veicoli autonomi HPA,

$$V_{k,od}^m(f^{(i-1)}) = -\Delta_{k,od}^T c(f^{(i-1)}) - CF_{k,od}, \quad \forall k, o, d \quad (12)$$

per i veicoli tradizionali NPA.

I costi di viaggio assunti includono solo i tempi di viaggio  $t_i$ . Successivamente è possibile determinare le due matrici di probabilità, veicoli manuali e automatici, per ogni origine destinazione e per ogni percorso. Inoltre è possibile determinare la probabilità di scelta per le due categorie di veicoli. Gli elementi di queste matrici sono determinate con la solita formulazione dei modelli basati su C-Logit e mediante le utilità sistematiche calcolate mediante Equazione 11 ed Equazione 12. Per ogni iterazione dell'algorithmo di assegnazione SUE, il modello calcola i flussi di percorso per le due categorie di veicoli,  $h_i^m$  e  $h_i^a$ , e successivamente ne calcola il totale  $h_i = h_i^m + h_i^a$ . Di conseguenza calcolerà anche i flussi sugli archi:  $f_m^i = \Delta h_m^i$  per i veicoli manuali,  $f_a^i = \Delta h_a^i$  per i veicoli automatici, il flusso totale sugli archi  $f_i = f_i^m + f_i^a$ , e la percentuale  $p^{(i)}$ . L'algorithmo di assegnazione SUE si ferma quando è stato raggiunto l'equilibrio, di conseguenza garantirà come output i flussi sugli archi e sui percorsi di equilibrio  $f_{eq}$  e  $h_{eq}$ , e i costi all'equilibrio  $g_{eq}$ .

Le ipotesi riguardanti la domanda di mobilità prese in considerazione sono le seguenti:

$$\begin{cases} M_a = \alpha M_{tot} \\ M_m = (1 - \alpha) M_{tot} \end{cases} \quad (12)$$

Il parametro  $\alpha$  considerato è il coefficiente di penetrazione del mercato dei veicoli automatici. Per quanto riguarda i risultati numerici, il costo totale all'equilibrio  $CT_{eq} = c_{eq}^T f_{eq} = t_{eq}^T f_{eq}$  e le percentuali di partizione  $p$  sono determinati per diversi valori del parametro  $\alpha$ .

Come si può vedere in Figura 13 gli input esterni sono rappresentati con rettangoli verdi, mentre gli output sono rappresentati con rettangoli rossi e infine le variabili interne del problema sono rappresentate in blu. Gli output consistono nel percorso di equilibrio e i flussi sugli archi,  $h$  e  $f$ , inoltre la percentuale di veicoli autonomi presenti  $p_{eq}$ .

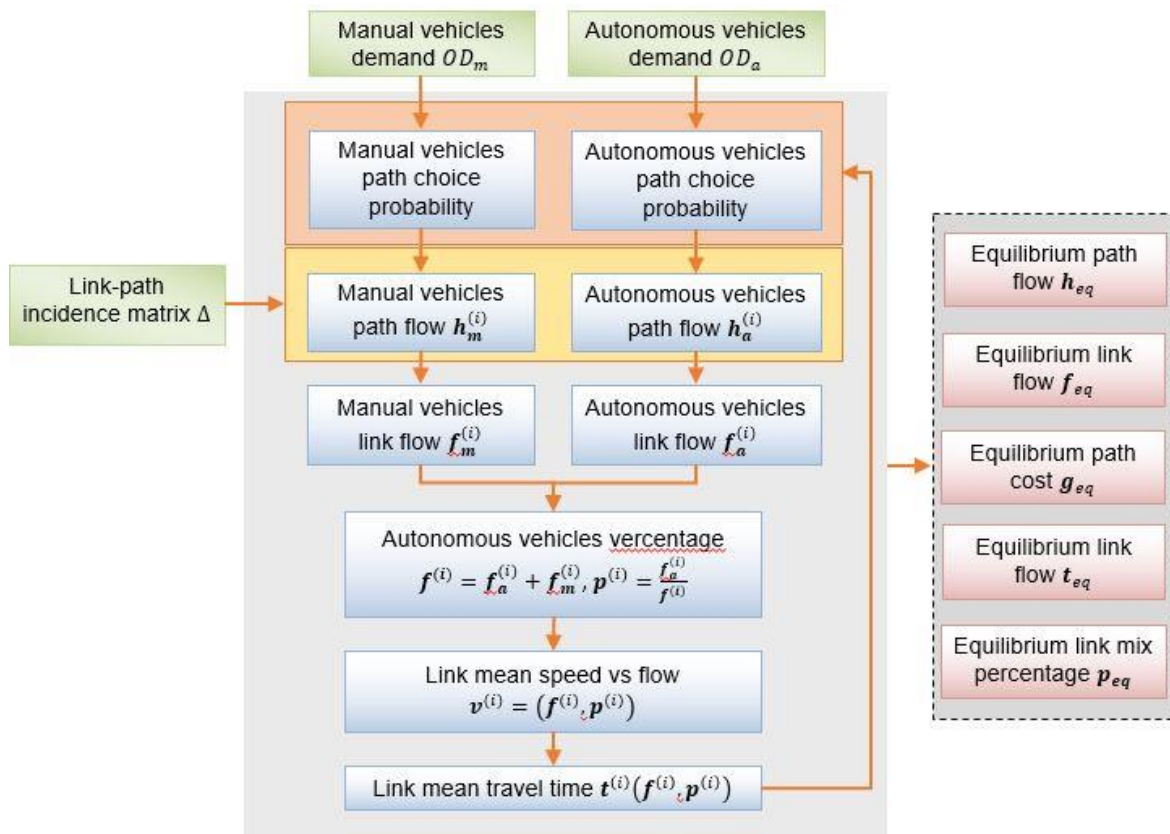


Figura 13: Schematizzazione del modello studiato per l'assegnazione multiclasse.

### 3.3.2 Esistenza e unicità del punto di equilibrio

Un problema di assegnazione multiclasse, in generale, si presenta quando è necessario stimare i flussi (di utenti e/o veicolari) congiuntamente su differenti sistemi di trasporto e quando sussistono le seguenti ipotesi: la scelta modale, oltre che quella del percorso, è influenzata dai costi della rete ed almeno due sistemi di trasporto sono congestionati (cioè le loro prestazioni dipendono dai flussi). Alcuni autori, tra cui Cascetta (2001) e Cantarella (1997), hanno dimostrato che con opportune ipotesi sulle funzioni di costo, su quelle di domanda e sui modelli di scelta del percorso, è possibile dimostrare l'esistenza e l'unicità della soluzione del problema di assegnazione.

Le ipotesi sono le seguenti:

- Esistenza:
  - le funzioni di probabilità di scelta del percorso sono continue;
  - le funzioni di costo sono continue;
  - ciascuna coppia  $OD$  è connessa;
  - i flussi di domanda sono limitati.
- Unicità nel caso di congestione indifferenziata (Cascetta, 2006):
  - Monotonia della cosiddetta "funzione di costo di riferimento" di arco;
  - Monotonia della funzione di probabilità di scelta.

Nel caso in esame, il costo generalizzato coincide con il solo tempo di viaggio che, essendo il flusso misto, di veicoli autonomi e tradizionali, è lo stesso per entrambe le classi. Poiché come visto esso dipende dal flusso totale, si ha  $c_{i,j}(f_a, f_m) = c_{i,j}(f_a + f_m)$  in cui  $c_{i,j}(\cdot)$  è la funzione BRP in (8), monotona crescente. In altre parole, poiché si considera solo il tempo di viaggio, entrambe le classi hanno la stessa funzione costo, che equivale ad assumere entrambi i pesi  $\gamma_a$  e  $\gamma_m$ , che definiscono i costi per ogni classe rispetto al costo di riferimento, pari a 1.

Inoltre le funzioni di probabilità considerate per le classi sono continue e monotone. Ne consegue che è possibile sostenere l'esistenza e l'unicità della soluzione del modello proposto nel capitolo 3.3.1.

Si noti che la condizione che la rete stradale ottimizzata per la validità dei modelli risulti connessa, dovrà essere garantita nel problema di network design descritto nel prossimo capitolo.

## 3.4 Applicazione Modello

Il modello descritto nel cap. 3.3.1 è stato applicato a un caso reale per validare e verificare le formule ponderate. Come soggetto dell'analisi è stata scelta una parte della città di Genova precisamente una porzione di circa 50 km<sup>2</sup> posta nella parte levante del capoluogo. La rete di trasporto è stata ricostruita tramite un grafo stradale, precisamente composto da 75 nodi 16 centroidi 231 archi stradali. Tale rete, relativamente piccola, è stata scelta unicamente per validare e implementare il modello e verificarne i risultati. I centroidi sono riferiti alle 16 zone in cui è stata suddivisa l'area di studio. Di seguito si riportano le immagini rappresentative dell'area di studio (Figura 14).

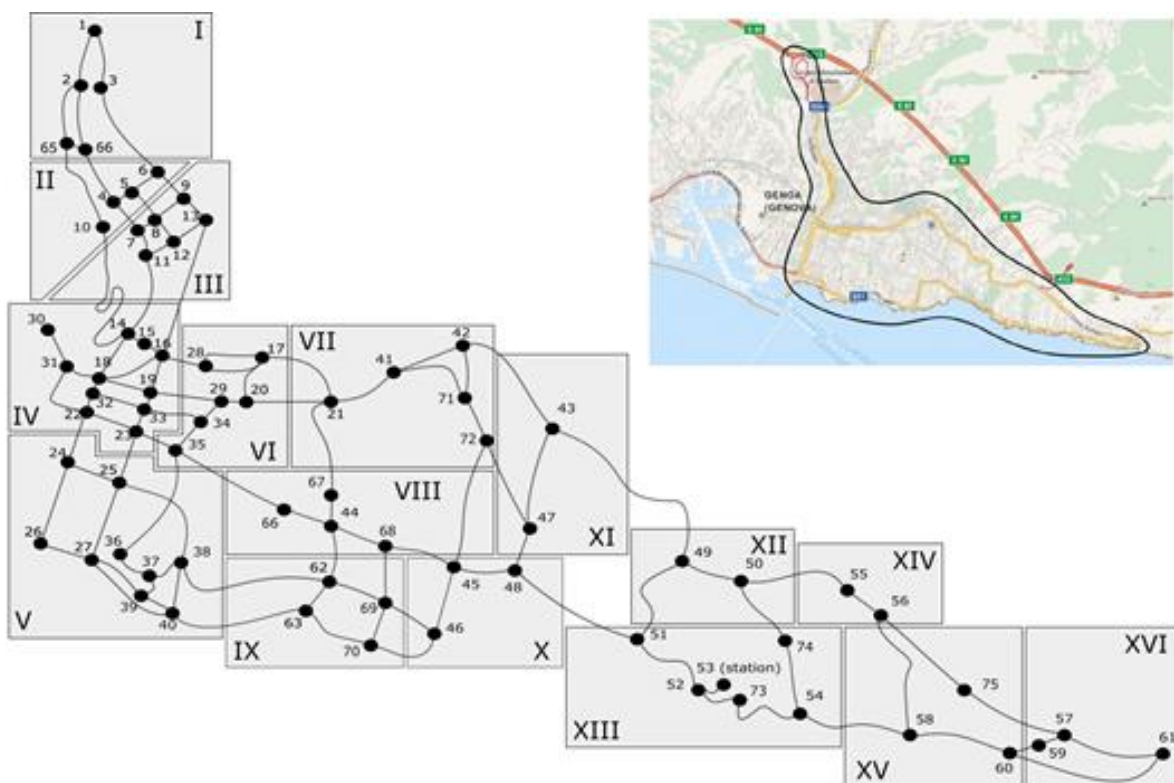


Figura 14: Grafo e individuazione dell'area di studio.

Come intervallo di tempo per la simulazione è stata considerata l'ora di punta mattutina e di seguito viene riportata la matrice origine destinazione relativa al caso di studio, come riportato in Tabella 3. La matrice permette di individuare i dati della domanda di mobilità. La domanda di trasporto viene suddivisa in due parti, quella automatica e quella manuale, come riportato nell'Equazione 12. Si può notare che  $M = \sum_o \sum_d OD^a(o, d) + OD^m(o, d) \approx 10000 \text{ veic/h}$ .

Tramite il software Matlab è stato possibile implementare il modello di assegnazione; sono state fatte 45 simulazioni facendo variare il parametro  $\alpha$ , il fattore che indica la penetrazione dei veicoli autonomi all'interno del traffico veicolare. Si può affermare che il modello ha una buona affidabilità



e si è arrivati a una soluzione accettabile, in quanto i risultati ottenuti attraverso le simulazioni hanno riscontrato sempre i soliti andamenti e valori.

Tabella 2: Matrice OD dell'ora di punta mattutina.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
I	-	210	70	35	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0
II	210	-	140	70	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	210
III	70	140	-	210	35	140	14	14	14	14	7	7	7	7	7	7	70
IV	35	140	280	-	280	280	70	70	70	14	14	7	7	7	7	7	35
V	14	70	210	420	-	280	70	70	140	70	14	14	7	7	7	7	14
VI	14	14	35	280	420	-	210	70	70	0	7	7	7	7	7	7	14
VII	14	14	140	280	280	350	-	70	35	14	7	7	7	7	7	7	14
VIII	14	7	14	70	70	210	210	-	70	35	35	7	7	7	7	7	14
IX	7	7	14	70	70	70	70	140	-	70	0	7	7	7	7	7	7
X	7	7	14	70	140	70	35	70	140	-	14	14	14	7	7	7	7
XI	7	7	7	14	70	7	14	35	70	70	-	14	7	7	7	7	7
XII	7	7	7	14	7	7	7	35	7	14	35	-	35	14	7	7	7
XIII	7	7	7	7	7	7	7	7	7	14	14	35	-	35	35	35	7
XIV	7	7	7	7	7	7	7	7	7	14	7	35	140	-	14	14	7
XV	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	14	35	35	-	35	7
XVI	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	35	14	70	-	7

Per valutare le prestazioni del sistema è stato considerato il Costo Totale ( $TC$ ):

$$TC(\mathbf{f}_{eq}(\alpha), \mathbf{p}_{eq}(\alpha), \alpha) = \sum_{(i,l) \in L} t_{i,j} \left( f_{i,j,eq}(\alpha), p_{i,j,eq}(\alpha) \right), f_{i,j,eq}(\alpha) \quad (13)$$

dove  $\alpha$  è il coefficient di penetrazione,  $f_{i,j,eq}(\alpha)$  è flusso totale sull'arco  $(i, l)$  e  $p_{i,j,eq}(\alpha)$  la percentuale di veicoli autonomi sull'arco generico  $(i, j)$ .

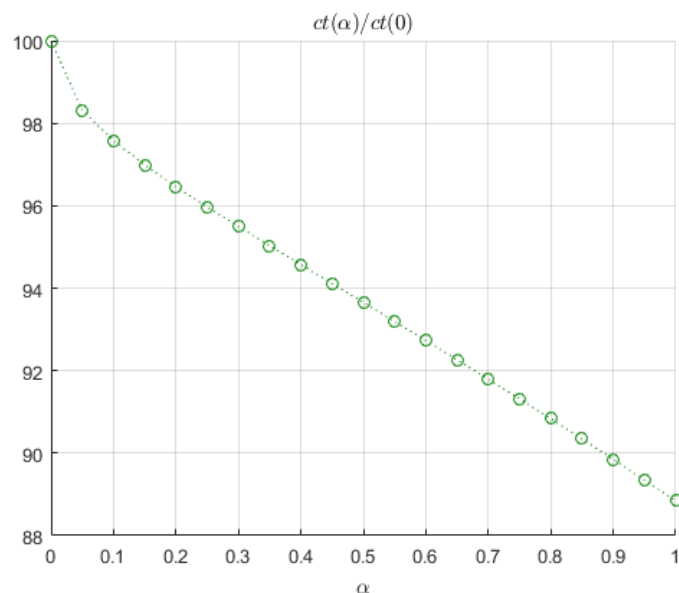


Figura 15: Costo totale calcolato al variare del parametro  $\alpha$ .

In Figura 15 è riportato uno dei risultati ottenuti dalle simulazioni cioè l'andamento del costo totale al variare del parametro  $\alpha$  ovvero il coefficiente di penetrazione dei veicoli autonomi nel flusso veicolare. È possibile notare che all'aumentare del numero di veicoli autonomi il costo totale

diminuisce. Questo è un classico comportamento dei nuovi sistemi di trasporto come i AVs. In Figura 16 è riportato un ulteriore risultato, è stato analizzato l'andamento della percentuale di veicoli autonomi per ogni link in funzione del parametro  $\alpha$ . Ogni grafico colorato in grigio rappresenta la percentuale  $p_{i,j}(\alpha)$  per ogni generico link  $(i,j) \in L$ . È possibile vedere che la distribuzione dei veicoli autonomi non è uniforme su tutti gli archi della rete. Il punto  $(\alpha, p_{i,j}(\alpha)) = (0,0)$  rappresenta la condizione di solo traffico manuale, invece il punto  $(\alpha, p_{i,j}(\alpha)) = (1,1)$  rappresenta la condizione di solo traffico di veicoli autonomi,  $\forall (i,j) \in L$ . Invece i grafici colorati in nero rappresentano la percentuale sui link per un dato valore di  $\alpha$ , precisamente le linee tratteggiate indicano i link con valori di  $p(\alpha)$  più elevati mentre quelli con linea continua rappresentano gli archi con valori di percentuale  $p(\alpha)$  inferiori. È interessante notare che al variare del coefficiente di penetrazione  $\alpha$  cambiano gli archi con percentuale  $p(\alpha)$  massima e minima.

Infine, è possibile notare che alcuni archi sono scelti da veicoli autonomi solo quando  $\alpha < \bar{\alpha}$ , come l'arco (44,66) che non viene scelto quando  $\alpha \geq 95\%$ . Infine, ci sono alcuni collegamenti mai scelti da veicoli autonomi.

Questo comportamento suggerisce la possibilità di "rimuovere" questi collegamenti dalla rete e valutare le prestazioni per testare cosa accadrebbe se alcuni spazi urbani venissero "liberati" dal traffico e "restituiti" alla città.

È interessante valutare il comportamento della rete stradale con la chiusura di determinati archi stradali, quelli non scelti dai veicoli autonomi e quelli al di sotto di una determinata soglia pari a una percentuale  $\gamma$  del flusso all'equilibrio nella condizione di soli veicoli manuali ( $f_{eq}^\alpha \leq \gamma f_{eq}^0$  con  $0 \leq \gamma \leq 1$ ).

Per effettuare la scelta urbanistica ottimale degli archi che potrebbero essere chiusi al traffico veicolare sarà necessario andare a definire un opportuno modello di network design in cui venga espressamente considerato l'equilibrio della rete determinato tramite il modello definito in questo capitolo.

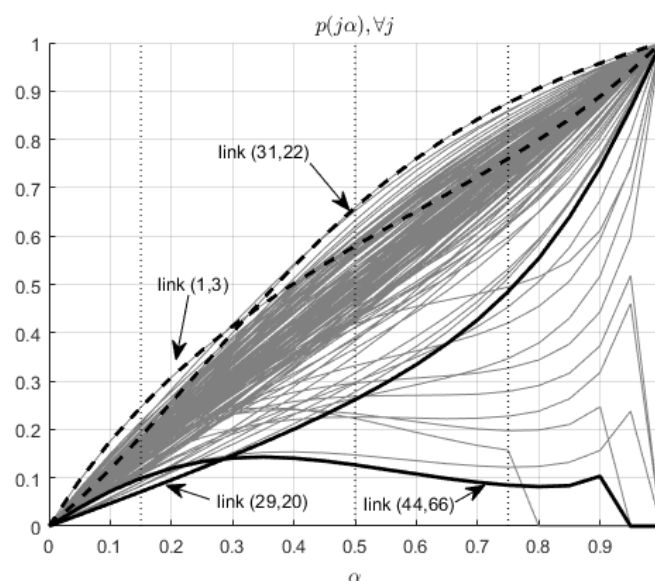


Figura 16: Andamento della percentuale di veicoli autonomi calcolato per ogni arco stradale.

# Capitolo 4 Network Design

Gli scenari descritti nel capitolo 3 hanno evidenziato l'impatto dei veicoli autonomi sull'infrastruttura esistente. È stato ampiamente sostenuto che il futuro dei trasporti sta andando nella direzione dell'automazione e di conseguenza dei veicoli autonomi, perciò si è ritenuto importante studiare e definire un modello di deflusso veicolare misto e un modello di assegnazione specifico per il caso di traffico veicolare sia manuale che autonomo. Nel capitolo precedente è stato valutato che alcuni archi della rete stradale non verranno scelti dai AV di conseguenza saranno possibili eventuali interventi urbanistici al fine di migliorare la vivibilità delle aree urbane e di migliorare i livelli di sostenibilità ambientale cittadina, andando a riutilizzare questi archi stradali. In questo capitolo verranno trattati i modelli di network design, quei modelli matematici di supporto alle decisioni di pianificazione territoriale. Oltre allo sviluppo continuo della tecnologia, incentrato sulle funzionalità dei futuri veicoli autonomi, è interessante ed essenziale indagare e valutare le relative opportunità che porteranno. In particolare in questo elaborato si è deciso di porre attenzione agli aspetti e alle opportunità urbanistiche, andando a calcolare quanti archi stradali potranno essere chiusi e quindi essere riutilizzati per costruire aree urbane per la collettività. Le aree urbane, in cui vive circa l'80% della popolazione italiana e dove si produce oltre l'85% del PIL, sono il punto da cui partire per contrastare i punti di debolezza, di innovazione produttiva e sociale che caratterizzano il Paese. In esse si concentrano, infatti, i maggiori problemi legati alla gestione delle risorse naturali (es.: consumo del suolo) ed energetiche, nonché quelli relativi alla mobilità (es.: città disegnata per il trasporto privato) e all'inquinamento. Fra i vari obiettivi comunitari al fine di rendere più sostenibili le città, c'è quello di andare ad aumentare la quantità di metri quadrati di verde urbano. Quindi si ritiene molto importante vedere se attraverso l'utilizzo dei futuri sistemi di trasporto sarà possibile riacquistare dello spazio cittadino da dedicare al verde urbano per rendere migliori e più sostenibili le città.

## 4.1 Network Design: storia e stato dell'arte

Oggi, il settore del trasporto stradale si trova ad affrontare numerose sfide. La principale è quella legata alla riduzione del traffico stradale, con il verificarsi del fenomeno "urban sprawl" le città hanno assunto dimensioni maggiori da quelle solite e di conseguenza la popolazione urbana ha raggiunto livelli elevati. Con l'aumento dei valori legati alla popolazione, la domanda di trasporto e i flussi di veicoli hanno subito un incremento notevole. È noto che con l'aumentare dei valori dei flussi veicolari in ambito urbano, aumentano le emissioni inquinanti e diminuisce la sicurezza stradale. Di conseguenza le infrastrutture necessitano di una pianificazione e progettazione più efficiente. Le seguenti tematiche vengono affrontate, studiate e valutate attraverso i problemi-modelli di Network Design. I seguenti modelli possono essere considerati quando si vogliono prendere delle decisioni strategiche, tattiche o operative. Con decisioni strategiche si intendono ad esempio decisioni riguardo la costruzione di nuove strade o nuove corsie dedicate a diverse modalità di trasporto oppure semplicemente per ampliare archi stradali già esistenti. Con decisioni

tattiche si intendono quelle riguardanti l'allocazione di linee dedicate o di corsie. Infine con decisioni operative si intendono, ad esempio, quelle riguardanti la programmazione della manutenzione o delle fasi semaforiche.

Sono state pubblicate diverse review ad esempio da Boyce (1988), Magnanti and Wong (1984), Friesz (1985), Migdalas (1995), Yang and Bell (1998), Desaulniers and Hickman (2007), Guihaire and Hao (2008), e più recentemente da Kepaptsoglou and Karlaftis (2009). Alcune di esse trattano il problema generale dei problemi di network design, ma alcune sono specifiche sulle applicazioni alle aree urbane (urban network design) o sulle reti di trasporto urbane. Con Road Network Design Problem (RNDP) si intendono quei modelli che permettono di determinare la configurazione ottima degli elementi della rete stradale rispettando vincoli e criteri scelti utilizzati per la pianificazione e la gestione delle reti di trasporto; data una rete esistente il modello permette di determinare la struttura ottima dei link – direzione degli archi – capacità stradale – spazio per parcheggi – fasi semaforiche. Possono essere suddivisi in due sotto categorie: NDP-Network Design Problem e TSS-Traffic Signal Setting. I modelli NDP si possono suddividere in due categorie: una categoria di algoritmi discreti (Billheimer and Gray, 1973) che permettono di valutare l'aggiunta o la modifica di archi stradali di una rete stradale in termini di layout; una categoria di algoritmi continui (Boyce et al., 1988) che si occupano della definizione ottima della capacità degli archi stradali esistenti. In generale, i modelli NDP garantiscono soluzioni solo per reti non congestionate, lavorano con matrici  $OD$  dell'ora di punta, considerano la domanda rigida per la scelta modale, la progettazione per reti private e pubbliche viene separata, eseguono un'ottimizzazione mono criterio, e garantiscono soluzioni con algoritmi esatti solo per piccoli sistemi di trasporto. Invece i modelli TSS sono utilizzati per gestire ed ordinare le interazioni fra i diversi archi dell'infrastruttura stradale attraverso l'ottimizzazione delle fasi semaforiche. Anche questi algoritmi si possono suddividere in due categorie: quelli usati per studiare le intersezioni singole (Webster 1958; Gazis 1964; Gazis and Potts 1965, Allsop 1971; Allsop 1972), e quelli utilizzati per studiare le intersezioni interagenti. In generale i problemi NDP e TSS vanno studiati separatamente, per risolvere NDP si utilizzeranno algoritmi genetici (Goldberg 1989) invece per risolvere problemi di tipo TSS si utilizzeranno procedure LOSS (Local Optimisation of Signal Settings).

La maggior parte dei modelli di design possono essere formulati come problemi di ottimizzazione vincolata in cui, a seconda della formulazione, alcuni obiettivi di base possono essere introdotti come vincoli (con un limite superiore o inferiore); d'altra parte, i vincoli possono essere introdotti nell'obiettivo funzione attraverso moltiplicatori Lagrangiani. La formulazione può essere la seguente:

$$\min w(f, x)$$

*s. t.*

$$k(x) \leq K$$

$$h(x) = H$$

$$f = e(f, x)$$

$$x \in X$$

$$f \in S_f$$

Dove:

- $x$  sono le variabili di progetto appartenenti all'insieme  $X$ ;
- $f$  il vettore dei flussi di arco, appartenente all'insieme di flussi ammissibili  $S_f$
- $w(f, x)$  è la funzione obiettivo da ottimizzare;
- $k(x)$  e  $h(x)$  sono i vincoli, in generale non lineari, di disuguaglianza e di uguaglianza;
- $f = e(f, x)$  è un vincolo specifico del sistema di trasporto quale, ad esempio il vincolo che determina i flussi all'equilibrio.

La funzione obiettivo per ottimizzare tiene conto dei vincoli progettuali, ad esempio può essere rappresentata dalla minimizzazione del tempo di viaggio totale  $TT(f, x)$  tenendo conto dei di ridurre i problemi, oppure se si vuole tenere conto dell'inquinamento ambientale in relazione con il costo di viaggio  $w(f, x)$  può essere il costo totale da minimizzare all'equilibrio; tutto sempre in relazione al confort di viaggio e al design della rete stradale che si vuole mantenere o ottenere. Le variabili di design possono essere di diverse tipologie: variabili topologiche che esprimono l'esistenza di un link per una determinata modalità, oppure che esprimono la direzione di un link per una determinata modalità allora verranno usate variabili discrete, variabili di performance che esprimono caratteristiche di un arco come la capacità o la velocità massima. La risoluzione dei problemi di Network Design viene eseguita solitamente con i metodi di ricerca operativa, come problemi di programmazione lineare intera e Branch& Bound. La Programmazione Lineare Intera (PLI) tratta il problema della minimizzazione (massimizzazione) di una funzione lineare di più variabili, soggetta a vincoli di uguaglianza e disuguaglianza lineari ed alla restrizione che una o più variabili possano assumere soltanto valori interi. In generale, i modelli di Programmazione Lineare Intera sono adatti alle applicazioni caratterizzate dall'indivisibilità delle risorse e dalla necessità di scegliere tra un numero finito di alternative. Queste applicazioni includono problemi operativi quali la distribuzione di beni ed il sequenziamento delle attività produttive; problemi di pianificazione quali la gestione ottima del portafoglio titoli e la localizzazione degli impianti ed infine problemi di progettazione. Altri esempi di utilizzazione dei PLI sono modelli di allocazione ottima di risorse, modelli di miscelazione, modelli di trasporto. Il metodo del Branch&Bound viene applicato per la soluzione di problemi di ottimizzazione combinatoria e si tratta di un metodo computazionalmente oneroso. Inoltre è stato studiato un ulteriore metodo per risolverli: l'uso di Algoritmi Genetici, come detto da Goldberg (1989). Gli AG sono tecniche euristiche di calcolo general purpose, ispirate dalla meccanica della selezione naturale. Proposti originariamente da John Holland nel 1975, ripresi con successo da Dave Goldberg nel 1989; gli AG vengono applicati in un ampio spettro di problematiche: da problemi di natura prettamente controllistica per gasdotti, altiforni e la guida di missili terra-aria, a problemi di natura ottimizzatoria come quello del commesso viaggiatore e quelli ben più vasti di scheduling, dai problemi di ingegnerizzazione come la progettazione di turbine e parti aerodinamiche di velivoli, alla modellazione di mercati finanziari telematici. L'idea di base dell'algoritmo è quella di codificare la soluzione con una sequenza di simboli considerata come dei cromosomi. La qualità di ogni soluzione è misurata con la fitness (equivalente alla funzione obiettivo o alla funzione costo nei tradizionali metodi di ottimizzazione) che è la decodifica della stringa genetica. In tal senso la stringa viene chiamata genotipo, mentre la soluzione decodificata prende

il nome di fenotipo. La ricerca procede con una serie di generazioni in cui ogni individuo contribuisce alla successiva generazione in proporzione alla sua fitness. Ciò viene realizzato selezionando gli individui in modo casuale. A tal fine viene utilizzata una funzione di probabilità pesata tramite i valori della fitness, o i valori del fenotipo scalati o, ancora, un semplice rango. Gli AG quindi risolvono un determinato problema ricorrendo a una popolazione di soluzioni che, inizialmente casuali e quindi con fitness bassa, vengono poi fatte evolvere per un certo numero di generazioni successive, sino all'apparizione di almeno una soluzione con fitness elevata. Per poter applicare l'algoritmo genetico, occorre anzitutto codificare numericamente le soluzioni e individuare una opportuna funzione di fitness. Ogni individuo della popolazione è codificato da un cromosoma, una stringa di lunghezza costante formata da geni. La funzione di fitness è la misura numerica della "bontà" di una soluzione, e fortemente dipendente dal problema che occorre risolvere. Dopo ogni iterazione dell'algoritmo, la soluzione peggiore viene eliminata e vengono generate nuove soluzioni migliori. Le operazioni genetiche più importanti sono il cross-over, la mutazione e l'inversione. L'operazione di cross-over coinvolge 2 stringhe "genitrici" e, dopo la scelta casuale di una posizione o punto di cross-over, effettua lo scambio di geni che produce le stringhe "figlie". La mutazione riguarda un singolo bit di una stringa che viene cambiato nel valore opposto, con una probabilità prefissata. L'inversione, invece, riguarda una sola stringa; scegliendo a caso un punto  $k$  di inversione, si cambia l'ordine di geni.

## 4.2 Network Design Semplificato: verifica di fattibilità

Grazie l'applicazione del modello di assegnazione mista alla rete, come mostrato nel capitolo 3.4, è stato valutato che attraverso l'introduzione di veicoli autonomi nel traffico veicolare determinati archi stradali non verranno scelti dagli utenti. Quindi si vuole porre l'attenzione alla possibilità di rimuovere alcuni archi dalla rete stradale, però di conseguenza è importante valutare le prestazioni dell'infrastruttura contemporaneamente a un intervento di pianificazione territoriale.

Successivamente verranno affrontati due problemi di network design. Nel paragrafo 4.2.1 verrà elaborato un modello di ND Semplificato, utilizzato unicamente per testare in un ambiente lineare i vincoli che descrivono la rimozione degli archi stradali. Invece nel paragrafo 4.2.2 verrà elaborato un modello di ND Completo, il quale prenderà in considerazione l'assegnazione multiclasse effettuata nel capitolo 3 e andando così a tenere in considerazione gli effetti reali del traffico urbano; in questo modo si effettuerà un'applicazione reale del modello.

#### 4.2.1 Network Design Semplificato: verifica di fattibilità

Come primo approccio è stato implementato un modello di network design precisamente di PLI che massimizzi il numero di archi da eliminare garantendo però un percorso per ogni origine-destinazione. Questo modello è del tipo Road Network Design Problem (RNDP) ovvero quei modelli che permettono di determinare la configurazione ottima degli elementi della rete stradale rispettando vincoli e criteri scelti utilizzati per la pianificazione. Questo primo step è stato indentificato al solo fine di valutare e validare i vincoli del problema e per verificare che, effettivamente, la formulazione proposta funzioni e dia in output risultati consistenti.

Tuttavia, l'introduzione in funzione obiettivo del temine che pesa i percorsi minimi tra ogni coppia origine destinazione, permette di dare un'interpretazione approssimata della soluzione del punto di vista trasportistico. Infatti, essendo la matrice  $C$  dei pesi del grafo costante (e contenente solo la lunghezza degli archi), il problema considera il caso di rete non congestionata, cioè con costi di arco costanti, in cui si determina il miglior compromesso tra la chiusura degli archi e la minimizzazione dei percorsi.

Va comunque ricordato che il problema descritto in questo paragrafo è solo preliminare al problema oggetto della tesi perché, oltre a trascurare la congestione, e quindi l'equilibrio, non prende in considerazione la presenza dei veicoli autonomi.

Il problema di ottimizzazione ha la struttura del seguente modello di programmazione

$$\max \mu O + \sum_{\substack{\forall o,d \in N, \\ o \neq d}} SP(o, d) \quad (1)$$

s. t.

$$O = \sum_{\forall (i,j) \in L} w_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in BS(i)} w_{ji} \leq |BS(i)| - 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j \in FS(i)} w_{ij} \leq |FS(i)| - 1 \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{j \in FS(i)} w_{ij} \leq \sum_{j \in BS(i)} w_{ji} \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{h \in FS(i)} z_{ih,o,d} - \sum_{h \in BS(i)} z_{hi,o,d} = \begin{cases} -1 & \text{se } i \equiv o \\ 1 & \text{se } i \equiv d \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\forall o, d \in N, o \neq d$$

$$SP(o, d) = \sum_{\forall (i,j) \in L} W_{ij} z_{ij,o,d} \quad \forall o, d \in N \quad (7)$$

$$\begin{cases} z_{ij,o,d} \geq x_{ij} + w_{ij} - 1 \\ z_{ij,o,d} \leq 0.5(x_{ij} + w_{ij}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall (i,j) \in L \\ \forall o,d \in N, o \neq d \end{array} \quad (8)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i,j) \text{ è rimosso} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall (i,h) \in L \quad (9)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i,j) \in L \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in L \quad (10)$$

$$z_{ij,o,d} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i,j) \in SP(o,d) \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall (i,j) \in L \\ \forall o,d \in N, o \neq d \end{array} \quad (11)$$

dove si è scelto di massimizzare il numero di archi eliminati (equazione (1)) garantendo il mantenimento del percorso minimo  $SP(o,d)$  esistente nella rete originale,  $\forall o,d \in N, o \neq d$ . La variabile  $O$  rappresenta il numero di archi eliminati, perché è uguale alla sommatoria delle variabili binarie  $w_{ij}$ , le quali valgono 1 se viene chiuso l'arco  $(i,j)$  e zero altrimenti. Il vincolo (2) rappresenta il legame fra  $O$  e  $w_{ij}$ . Il vincolo (3) rappresenta la condizione nella quale posso chiudere al massimo il numero meno uno di archi entranti in un generico  $i$ .

Tabella 3: Tabella delle variabili utilizzate nel modello di network design semplificato.

Simbolo	Significato
$i, j, h$	Generici Nodi
$L$	Insieme archi
$N$	Insieme nodi
$BS(i)$	Archi entranti nel nodo $i$ -esimo
$FS(i)$	Archi uscenti nel nodo $i$ -esimo
$ \cdot $	Cardinalità di un insieme
$SP(o,d)$	Percorso minimo $\forall o,d \in N, o \neq d$
$w_{ij}$	Variabile binaria che indica se l'arco $(i,j)$ è soppresso
$x_{ij}$	Variabile binaria che rappresenta l'esistenza dell'arco $(i,j)$ nel grafo
$z_{ij,o,d}$	Variabile binaria ausiliaria che indica l'arco $(i,j)$ appartiene al percorso minimo tra $o$ e $d$
$\mu$	Peso che definisce l'importanza di $w$ nel funzionale complessivo
$o, d$	Origini e destinazioni
$C_{ij}$	Matrice dei pesi degli archi $\forall (i,j) \in L$

Il vincolo (4) rappresenta la condizione nella quale posso chiudere al massimo il numero meno uno di archi uscenti in un generico  $i$ . Il vincolo (6) garantisce l'esistenza del percorso minimo: infatti, per ogni generico nodo  $i$  se esso coincide con l'origine vi potrà essere solo un nodo uscente; se esso



coincide con la destinazione vi potrà essere solo un nodo entrante; infine, in tutti gli altri casi il numero di archi entrati sarà uguale al numero di archi uscenti. Il vincolo (7) determina il costo del percorso minimo tra  $(o, d)$ . La coppia di vincoli nell'equazione (8) determina se l'arco  $(i, j)$  può essere usato nel percorso minimo. Infatti, osservando le possibili combinazioni di valori delle variabili  $w_{ij}$ ,  $x_{ij,o,d}$ , e  $z_{ij,o,d}$  si osserva che essi rappresentano l'equazione  $z_{ij,o,d} = x_{ij,o,d} \cdot w_{ij}$ , che pone a zero la variabile  $z_{ij,o,d}$  (che quindi non può appartenere al percorso minimo) se l'arco  $(i, j)$  è chiuso ( $w_{ij} = 0$ ) o se l'arco  $(i, j)$  non esiste nella rete ( $x_{ij,o,d} = 0$ ).

Tabella 4: Valori del vincolo (8) del modello di network design semplificato.

$z_{ij,o,d}$	$x_{ij}$	$w_{ij}$
0	0	0
0	1	0
0	0	1
1	1	1

Infatti, poiché che  $z_{ij,o,d}$  è una variabile binaria e può assumere solo i valori zero o uno quando  $x_{ij}$  e  $w_{ij}$  valgono 0 l'espressione  $z_{ij,o,d} \geq x_{ij,o,d} + w_{ij} - 1$  si riduce a  $z_{ij,o,d} \geq -1$  visto che  $z_{ij,o,d}$  può assumere valori 0 o 1 la disequazione è verificata. Se invece si prende in considerazione la disequazione  $z_{ij,o,d} \leq 0.5(x_{ij,o,d} + w_{ij})$  quando  $x_{ij}$  e  $w_{ij}$  valgono 0 l'espressione si può riscrivere come  $z_{ij,o,d} \leq 0$  ed è verificata. Ne consegue che l'unico valore ammissibile per  $z_{ij,o,d}$  è zero.

Nel caso in cui una tra  $x_{ij,o,d}$  o  $w_{ij}$  assuma il valore di 1 l'espressione diventa  $z_{ij,o,d} \geq 0$  ed è sempre verificata mentre la seconda equazione diventa  $z_{ij,o,d} \leq 0.5$ . Ne consegue che l'unico valore ammissibile per  $z_{ij,o,d}$  è zero.

Infine nel caso in cui entrambe  $x_{ij,o,d}$  e  $w_{ij}$  assumano il valore di 1 la prima equazione diventa  $z_{ij,o,d} \leq 1$  mentre la seconda equazione diventa  $z_{ij,o,d} \geq 1$ . Ne consegue che l'unico valore ammissibile per  $z_{ij,o,d}$  è uno.

I vincoli (9), (10), e (11) indicano i valori ammissibili dalle variabili binarie  $w_{ij}$ ,  $x_{ij,o,d}$ , e dalla variabile binaria ausiliaria  $z_{ij,o,d}$ .

Il modello è stato implementato nel solver CPLEX attraverso il seguente codice:

```
int n = ...; // numero nodi della rete
int nz = ...; // numero di origini/destinazioni (centroidi)
range Zones = 1..nz; // numero zone associate ad ogni origine/destinazione
range Nodes = 1..n; // numero nodi

float C[Nodes][Nodes] = ...; // matrice dei pesi (lunghezze archi stradali)
int A[Nodes][Nodes] = ...; // matrice di adiacenza

int Z[Zones] = ...; // zone associate ad ogni origine/destinazione
```

```

// matching variables

tuple Edge //archi (h,l)
{
    int link_orig;
    int link_dest;
};

setof(Edge) Edges = {<h,l> | h,l in Nodes: W[h][l] != 0.00}; // esistenza
dell'arco (h,l) quando il peso associato è diverso da zero

tuple Pair // percorsi
{
    int orig;
    int dest;
};

setof(Pair) Pairs = {<o,d> | o,d in Zones: o != d}; // insieme delle coppie
o/d di tutta la rete con o diverso da d

dvar boolean x[Edges][Pairs]; // variabile binaria x di arco per ciascuna
coppia (o,d)
dvar boolean omega[Edges]; // variabili di riduzione: una sola per
tutte le coppie
dvar boolean zeta[Edges][Pairs]; // variabile z aux per ciascuna coppia
dvar float P[Pairs]; // percorsi minimi per ogni coppia
dvar int+ 0;

// objective

maximize

100000*0 - sum (p in Pairs) P[p];

//Constraints

subject to {

forall(p in Pairs, h in Nodes)
{
    if(Z[p.orig] == h)
        sum (<h,l> in Edges) zeta[<h,l>][p] - sum (<l,h> in Edges)
zeta[<l,h>][p] == 1; // vedi vincolo (6)

    else
        if(Z[p.dest] == h)
            sum (<h,l> in Edges) zeta[<h,l>][p] - sum (<l,h> in Edges)
zeta[<l,h>][p] == -1; // vedi vincolo (6)

        else

```

```

                sum (<h,l> in Edges) zeta[<h,l>][p] - sum (<l,h> in Edges)
zeta[<l,h>][p] == 0;
    }      // vedi vincolo (6)

forall(p in Pairs)
    P[p] == sum (h,l in Nodes, p in Pairs: <h,l> in Edges )
C[h][l]*x[<h,l>][p]; // vincolo (7)

forall(i in Nodes)//: i != j)
    sum(e in Edges: e.link_dest == i) omega[e] <= sum(j in Nodes) A[j][i]-1;
// salvaguardia

forall(i in Nodes)//: i != j)
    sum(e in Edges: e.link_orig == i) omega[e] <= sum(j in Nodes) A[i][j]-1;
// salvaguardia in uscita

forall(i in Nodes)//: i != j)
    sum(e in Edges: e.link_orig == i) omega[e] <= 1; // non più di un arco
chiuso in uscita ad ogni vedi vincolo (3) e (4)

forall(p in Pairs, e in Edges)
    {
        zeta[e][p] >= x[e][p] + (1-omega[e]) - 1;
        zeta[e][p] <= 0.5*(x[e][p] + (1-omega[e])); //vincolo di
linearizzazione (9)
    }

0 == sum (e in Edges) omega[e]; // 0 è la sommatoria di tutti gli w vedi
vincolo (2)

}

```

### 4.2.1.1 Esempio

In questo capitolo verrà applicato il modello di network design semplificato studiato precedentemente (capitolo 4.2.1), precisamente come caso di studio si è preso in esempio quello utilizzato nel capitolo 3.2.2. Quindi come soggetto dell'analisi è stata scelta una parte della città di Genova precisamente una porzione di circa 50 km<sup>2</sup> posta nella parte levante del capoluogo. La rete di trasporto è stata ricostruita tramite un grafo strale, precisamente composto da 75 nodi 16 centroidi 231 archi stradali. L'applicazione a una rete reale consente l'efficienza e convergenza degli algoritmi di soluzione proposti da testare e confrontare.

```

6
7 n = 91;
8 nz = 16 ;
9
10 Z = [76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91];
11
12 W =[[
13 [ 0 0.4 0.4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
14 [ 0.4 0 0 0 0 0.6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
15 [ 0 0 0 0.4 0 0.26 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
16 [ 0 0 0 0.4 0 0.25 0 0.27 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
17 [ 0 0 0.6 0 0.25 0 0 0 0.35 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
18 [ 0 0 0 0.26 0 0 0 0.12 0 0 0.18 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
19 [ 0 0 0 0 0.27 0 0.12 0 0.3 0 0 0.16 0 0 0 0 0 0 0 0 0
20 [ 0 0 0 0 0 0.35 0 0.3 0 0 0 0 0.2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
21 [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.6 0 0 0 0 0 0 0 0
22 [ 0 0 0 0 0 0 0.18 0 0 0 0 0.11 0 0.6 0 0 0 0 0 0 0 0
23 [ 0 0 0 0 0 0 0 0.16 0 0 0.11 0 0.27 0 0 0 0 0 0 0 0 0
24 [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0.2 0 0 0.27 0 0 0 0.9 0 0 0 0 0 0
25 [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.6 0.6 0 0 0 0.16 0 0 0.4 0 0 0
26 [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.16 0 0.12 0 0 0 0 0 0

```

Figura 17: Screenshot del file .dat di CPLEX riguardante una parte della matrice delle lunghezze degli archi..

Come si può vedere nella funzione obiettivo, (1), alla variabile  $w_{hi}$  è associato un peso  $\mu$ . Nelle diverse applicazioni del modello di ottimizzazione del problema considerato è risultato che all'aumentare di  $\mu$ , aumenta il numero di archi possibili da chiudere rispettando sempre la condizione di garantire un percorso minimo per ogni coppia origine destinazione. In Figura 18 è riportata la soluzione della simulazione. Con le frecce verdi sono indicati gli archi e le direzioni chiuse e con le frecce nere gli archi e le direzioni che rimangono a disposizione del deflusso veicolare. In particolare gli archi stradali, quelli rappresentati da un solo tratto nero, sono archi stradali a doppio senso. Al variare del peso  $\mu$ , precisamente si è passati da 44 archi da chiudere arrivando a un massimo di 77 archi. Considerando il caso di studio caratterizzato da 75 archi a doppio senso quindi 150 archi stradali, il simulatore ha indentificato con 77 archi il numero massimo di link da chiudere.

Quindi è verificato che chiudendo degli archi stradali le prestazioni della rete di trasporto non cambiano; di conseguenza riusciamo a garantire il deflusso dei veicoli all'interno del centro urbano, gestione della congestione, percorso per ogni coppia origine destinazione. Il risultato è consistente, quindi è ragionevole considerare il problema completo in cui ci sia l'equilibrio della rete e si tenga in considerazione il comportamento dei veicoli autonomi. Questo primo modello di ND serviva solo a verificare, in un problema di PLI facile, che i vincoli fossero verificati e consistenti.

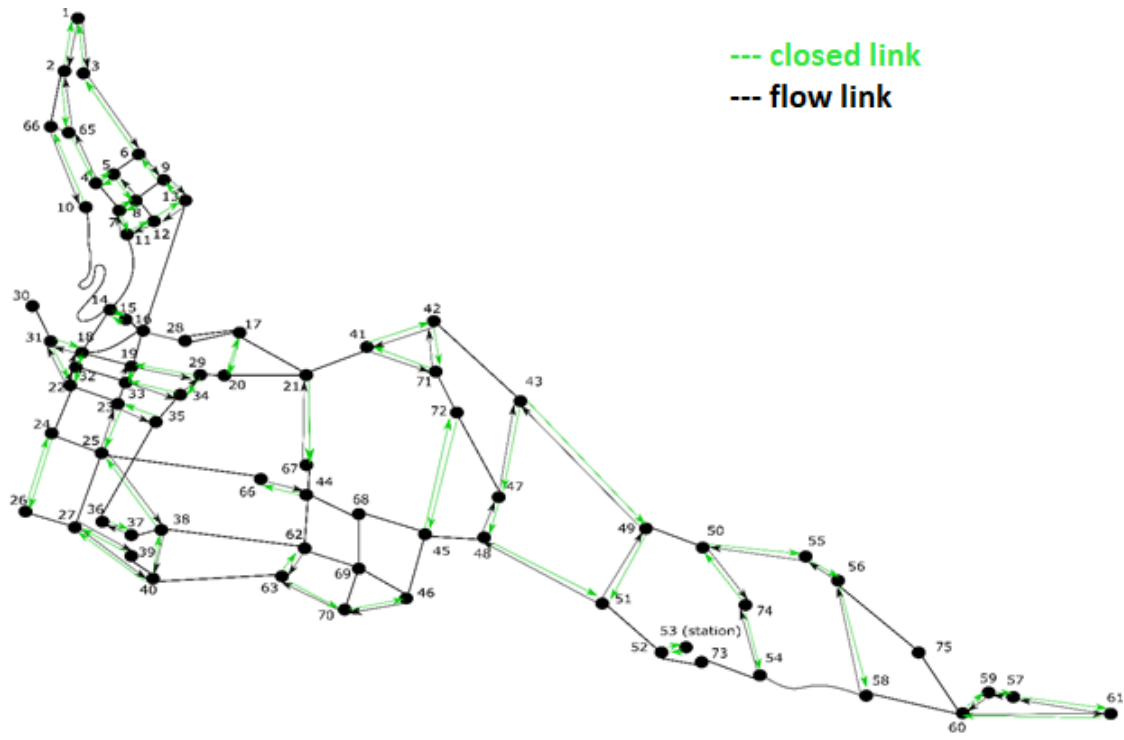


Figura 18: Risultati dell'applicazione del modello di network design al caso di studio.

## 4.2.2 Network Design Completo

Dopo aver verificato la validità dei vincoli attraverso il problema di ND Semplificato studiato nel capitolo 4.2.1, in questo paragrafo verrà valutato e formulato il modello di ND Completo andando quindi a considerare gli effetti del deflusso veicolare misto sulla rete. È fondamentale per garantire una completezza dell'analisi territoriale prendere in considerazione gli effetti e i risultati dell'applicazione del modello di assegnazione.

Considerando il problema di network design semplificato studiato precedentemente, tenendo in considerazione anche degli effetti della congestione stradale e la penetrazione dei veicoli autonomi all'interno delle reti stradali quindi considerando i risultati del modello di assegnazione multiclasse, il problema subirà delle modifiche. Inoltre si è introdotta, tramite le variabili  $y$ , anche la possibilità di riservare delle corsie stradali al TPL, permettendo di considerare casi reali più complessi. Quindi analizzando questo modello di network design più complesso si prendono in considerazione ulteriori aspetti importanti per la valutazione di uno scenario futuro caratterizzato da un flusso veicolare misto. Il modello ha la seguente scrittura:

$$\min \beta_1 TT_{tot} - \beta_2 O \quad (13)$$

s. t.

$$O = \sum_{\forall(i,j) \in L} w_{ij} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in BS(i)} w_{ji} \leq |BS(i)| - 1 \quad \forall i \in N \quad (15)$$

$$\sum_{j \in FS(i)} w_{ij} \leq |FS(i)| - 1 \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$\sum_{j \in FS(i)} w_{ij} \leq \sum_{j \in BS(i)} w_{ji} \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1 \quad \forall (i,j) \in L \quad (18)$$

$$x_{ij} + y_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in L \quad (19)$$

$$z_{ij} = w_{ij} x_{ij} \quad \forall (i,j) \in L \quad (20)$$

$$f_{SUE} = SUE(G, M_{OD}) \quad \forall (i,h) \in L \quad (21)$$

$$TT_{tot} = t(G, f) \quad (22)$$

$$G(i,j) = C(i,j) \cdot (1 - w_{ij}) \cdot (1 - y_{ij}) \cdot x_{ij} \quad \forall i,j \in N \quad (23)$$

$$f_{eq}^p \leq \gamma f_{eq}^0 \quad \forall (i,h) \in L \quad (24)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i,j) \text{ è rimosso} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall (i,h) \in L \quad (25)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i, j) \in L \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in L \quad (26)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se l'arco } (i, j) \text{ è dedicato al TPL} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in L \quad (27)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in L \quad (28)$$

$$\forall o, d \in N, o \neq d$$

Nella Tabella sono riportate tutte le annotazioni utili alla definizione del modello citato sopra:

Tabella 5: Tabella delle variabili utilizzate nel modello di network design completo.

Simbolo	Significato
$M_{OD}$	Matrice Origine destinazione
$L$	Insieme archi
$N$	Insieme nodi
$w_{ij}$	Variabile binaria che indica se l'arco $(i, j)$ è soppresso
$x_{ij}$	Variabile binaria che rappresenta l'esistenza dell'arco $(i, j)$ nel grafo
$y_{ij}$	Variabile binaria che rappresenta se l'arco $(i, j)$ nel grafo è dedicato al TPL
$z_{ij}$	Variabile binaria ausiliaria che indica se un arco esiste ed è utilizzato
$\beta_1, \beta_2$	Pesi che definiscono l'importanza di $TT_{tot}$ e $O$ nel funzionale complessivo
$o, d$	Origini e destinazioni
$BS(i)$	Archi entranti nel nodo $i$ -esimo
$FS(i)$	Archi uscenti nel nodo $i$ -esimo
$C$	Matrice completa della lunghezza degli archi $\forall (i, h) \in L$
$G$	Matrice dei pesi degli archi non chiusi
$t(G, f_{SUE})$	Funzione che fornisce il tempo totale di viaggio
$SUE(G, M_{OD})$	Funzione che definisce i flussi di arco all'equilibrio data la domanda e la topologia della rete
$f_{SUE}$	Vettore dei flussi all'equilibrio

Come obiettivo (equazione (13)) si è scelto di minimizzare il tempo di viaggio totale e massimizzare gli archi stradali eliminati. La variabile  $O$  rappresenta il modo di valutare la chiusura degli archi, perché è uguale alla sommatoria delle variabili  $w_{ij}$  le quali valgono 1 se viene chiuso l'arco  $(i, j)$  e

zero altrimenti. Il vincolo (14) rappresenta il legame fra  $O$  e le variabili  $w_{ij}$ . Questa scelta deriva dalla considerazione che, considerando gli attori principali i gestori del sistema di trasporto, vi sono diversi obiettivi contrastanti:

- a) minimizzazione del tempo totale di viaggio all'equilibrio;
- b) massimizzare le aree urbane utilizzabili (o qualsiasi altro indicatore sociale);
- c) minimizzazione il rumore e dell'inquinamento atmosferico.

Questi obiettivi sono differenti tra di loro: infatti, in prima approssimazione l'obiettivo (a) richiede di lasciare tutti gli archi della rete; l'obiettivo (b) si ottiene massimizzando il numero di archi "liberati" dal traffico; l'obiettivo (c) è ottenibile, sempre in prima approssimazione, ottimizzando l'obiettivo (a). È possibile utilizzare altre funzioni di costo purché siano esprimibili in funzione delle variabili di controllo del problema, la cui scelta non è oggetto di questo lavoro.

I vincoli di tipo tecnico (dal vincolo (15) al (20)) definiscono gli aspetti infrastrutturali e di struttura del grafo stradale (esistenza ed uso degli archi), mentre i vincoli di tipo comportamentale (vincolo (21) -(22) -(23)) definiscono l'interazione domanda-offerta e quindi l'assegnazione sulla rete e il costo totale.

Precisamente, in analogia al problema precedente, il vincolo (15) rappresenta la condizione nella quale posso chiudere al massimo il numero meno uno di archi entranti in un generico  $i$ . Il vincolo (16) invece rappresenta la condizione nella quale posso chiudere al massimo il numero meno uno di archi uscenti in un generico  $i$ .

I vincoli (17) e (18) sono vincoli di struttura: il (17) indica che il tratto di strada tra i nodi  $i$  e  $j$  è usato o da  $i$  verso  $j$  oppure da  $j$  verso  $i$ ; il (18) se l'arco  $(i, j)$  è riservato al TPL non possono passarci le auto e viceversa.

Il vincolo (21) è il vincolo di assegnazione, vengono calcolati i flussi associati ad ogni arco  $(i, j)$  non eliminato dalla rete. L'assegnazione è di tipo Stochastic User Equilibrium (SUE) definita nel capitolo 3.3.

Il vincolo (22) definisce il tempo totale di viaggio  $TT_{tot}$  attraverso la funzione  $t$ .

Il vincolo (23) definisce la topologia della rete: infatti  $G$  è la matrice dei pesi associati ad ogni arco  $(j, i)$  il cui generico elemento  $G(i, j)$  ha valore zero se l'arco  $(i, j)$  è stata chiuso altrimenti ha valore pari al tempo di tale arco. Si noti che in questa definizione gli archi non esistenti (nella rete originale o chiusi) hanno costo pari a 0, fornendo quindi una definizione della matrice dei pesi diversa da quella canonica che vorrebbe un costo infinito per tali archi.

Il vincolo (24) indica che si tengano in considerazioni i flussi inferiori alla condizione peggiore ovvero quella di solo traffico veicolare misto.

I vincoli (25), (26), (27),(28)) indicano i valori ammissibili dalle variabili binarie  $w_{ij}$ ,  $x_{ij,o,d}$ ,  $y_{ij}$  e dalla variabile ausiliaria  $z_{ij,o,d}$ .

Per determinare la soluzione del modello di network design è stato utilizzato il software Matlab, tramite il quale si è utilizzato l'algoritmo genetico per la ricerca della soluzione visto che il problema di ND Completo non è lineare.



# Capitolo 5 Caso di Studio: Genova

## Centro

In questo capitolo, verrà analizzato il caso di studio relativo al centro città di Genova. Genova è un comune italiano di 578924 abitanti, capoluogo dell'omonima città metropolitana e della regione Liguria, sesto comune italiano e terzo del Nord Italia per popolazione, quinto per movimento economico, vertice del triangolo industriale Milano-Torino-Genova. Il Nodo di Genova è il sistema stradale di scorrimento veloce che svolge funzione di tangenziale esterna e interna alla città. Esso è costituito dall'interscambio delle autostrade A7 Milano-Genova, A10 Genova-Ventimiglia, A12 Genova-Rosignano marittima e Autostrada A26 Genova-Gravellona Toce, che percorrono l'interno e cingono a monte i quartieri costieri della città. La città è servita da due importanti stazioni nazionali, quella di Genova Piazza Principe e quella di Genova Brignole. La società cui è affidata la gestione dei servizi pubblici della città è l'Azienda Mobilità e Trasporti (AMT), la quale garantisce un servizio multimodale in città: 138 linee bus, 3.362 fermate, 186 caplinea, 1 linea di metropolitana.

Precisamente come caso studio si è scelto il centro città, come rappresentato in Figura 19 e 20. L'area delimitata dalla linea nera continua rappresenta la sotto area comunale per la quale verrà eseguita l'analisi e verranno determinati i risultati. L'area rappresenta il centro città di Genova, precisamente l'area intorno a Via XX Settembre delimitata a sud da Via Brigade Partigiane e nord dalla zona di Piazza De Ferrari-Via XII Ottobre.



Figura 19: Individuazione dell'area del caso di studio nel territorio genovese.

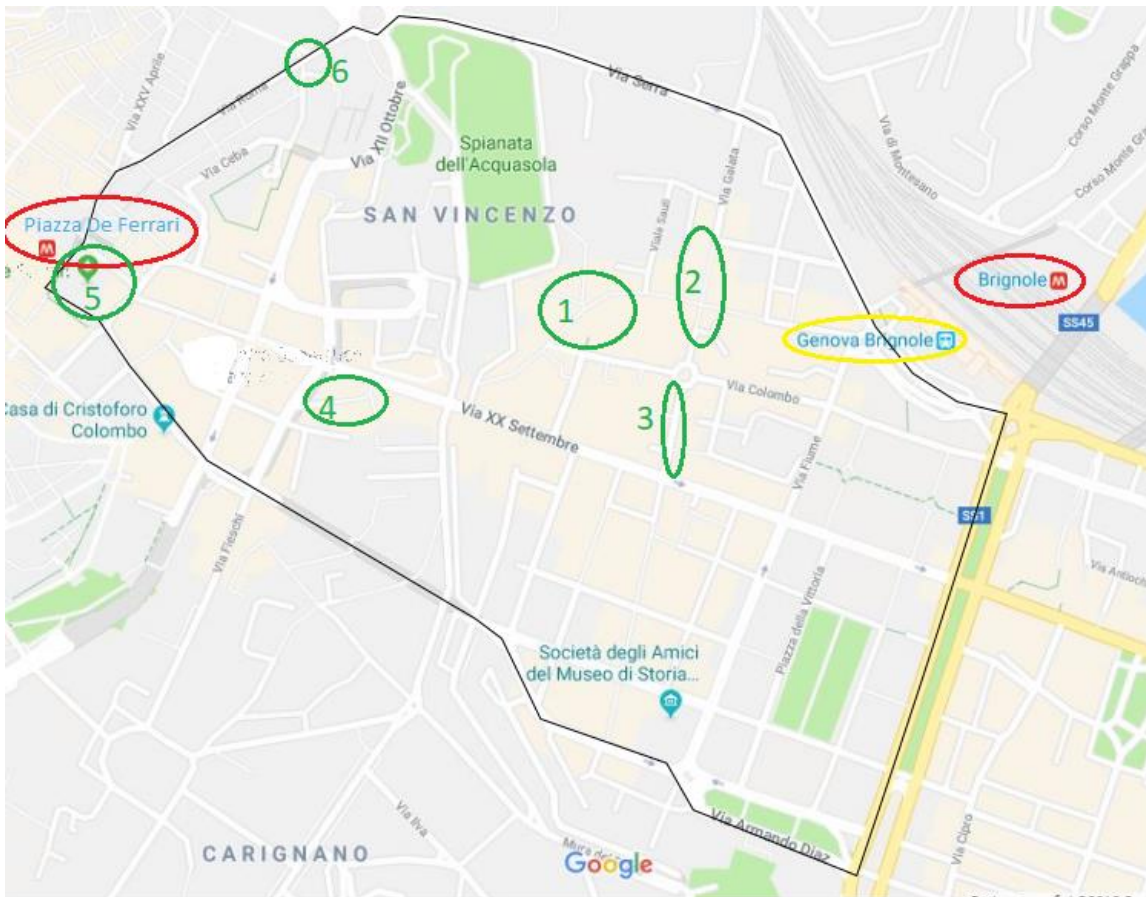


Figura 20: Rappresentazione con mappa Google Maps dell'area di studio.

All'interno dell'area in esame non sono presenti stazioni ferroviarie o della metropolitana, ma sono nelle vicinanze esterne quindi è bene prenderle in considerazione. La stazione ferroviaria di Genova Brignole è evidenziata nella figura con il colore giallo. Genova Brignole è la seconda stazione ferroviaria del capoluogo ligure. Il volume e la tipologia di traffico, in media 60 mila transiti giornalieri e 22 milioni di utenti l'anno, ne fanno una tipica stazione "di transito". Invece le due stazioni metropolitane di Genova Brignole e Piazza De Ferrari sono indicate con il colore rosso. La stazione di Brignole ha 9 ascensori e 6 scale mobili che permettono alle persone di spostarsi agevolmente all'interno dei 2.000 metri quadrati aperti al pubblico. Quella di De Ferrari è sotterranea a circa meno 20 metri rispetto a Piazza De Ferrari, questa stazione è la più importante dell'intero percorso, da qui transitano i maggiori flussi di utenza. La stazione è stata inaugurata nel 2005, diventando il capolinea centrale del percorso. La tratta di metropolitana che è all'interno della zona di interesse è pari a 1,5 km. Inoltre il numero di passeggeri annui movimentati dal sistema sono 11 milioni. È bene prendere in considerazione queste stazioni perché hanno un grosso impatto sui flussi pedonali e stradali della zona.

L'area è caratterizzata da tre aree verdi: Giardini Acquasola, Area verde Armando Diaz e Piazza della Vittoria. Le aree verdi si estendono per circa 43440 m<sup>2</sup>. Inoltre sono presenti delle Zone Pedonali evidenziate con il colore verde: 1 Via San Vincenzo, 2 Via Galata, 3 Via Colombo, 4 Via Porta degli Archi, 5 Piazza De Ferrari e 6 Largo Eros Lanfranco. In Tabella 7 sono state inserite le misure delle superfici delle aree pedonali individuate.

Tabella 6: Dimensioni delle aree pedonali genovesi.

NOME_AREA	SUP_M <sup>2</sup>
Via San Vincenzo	2929
Via Galata	1165
Via Colombo	321
Via Porta degli Archi	654
Piazza De Ferrari	6372
Largo Eros Lanfranco	1390

Il problema della congestione urbana unito alla necessità di ridurre le emissioni in atmosfera e di aumentare la sicurezza stradale a supporto degli “utenti deboli” (come pedoni, ciclisti e conducenti di ciclomotori) ha indotto le amministrazioni nazionali ed europee a sviluppare soluzioni che forniscano una valida alternativa al trasporto privato. Tra queste, la realizzazione di percorsi ed aree dedicate ai pedoni può rappresentare una soluzione da adottare per disincentivare il trasporto motorizzato. Per tale ragione occorre sviluppare soluzioni che possano consentire un’ottimizzazione della gestione ed organizzazione delle reti pedonali. Migliorare la pedonalità urbana, oltre a generare un effetto diretto e positivo sull’organizzazione dei trasporti, si configura anche come un’opportunità di riqualificazione della città e di incremento dei flussi turistici.

Per la zona considerata è stato realizzato un grafo che schematizza il reticolo stradale preso in esame, quindi sono stati scelti degli incroci strategici come nodi e di conseguenza sono stati definiti gli archi necessari al collegamento tra loro. Il grafo è schematizzato nella Figura 21. I grafi costituiscono un potente strumento di rappresentazione “topologica”, che consentono di sapere se fra due elementi del sistema esiste una relazione che definisce gli archi. Inoltre ci permettono di rappresentare il modello di offerta e valutarne le prestazioni.

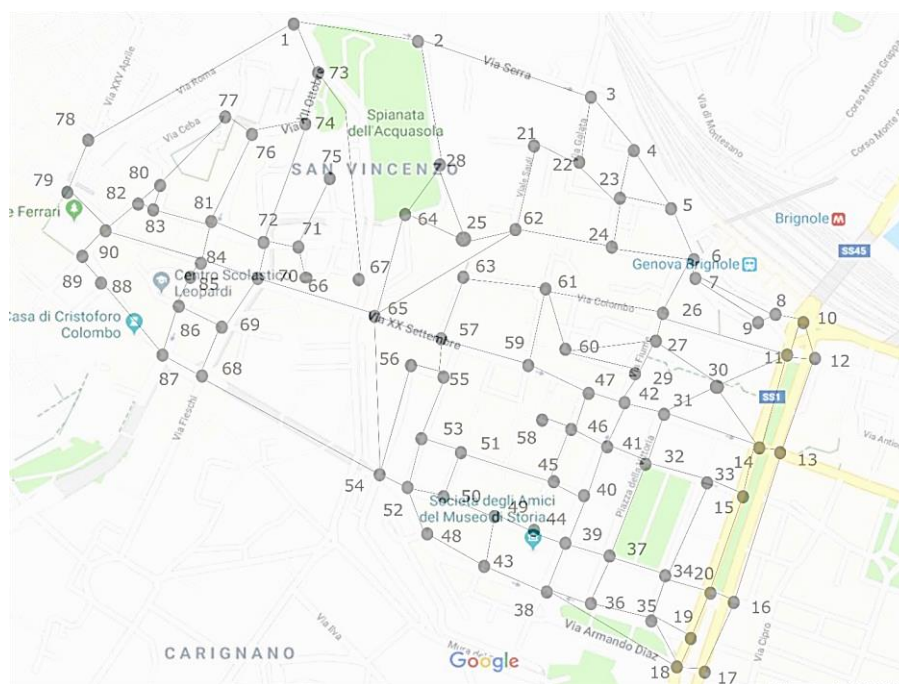


Figura 21: Grafo del caso di studio: Genova Centro.

Il grafo è composto da 135 archi e 90 nodi, caratterizzati dalle vie e dalle zone di incrocio e di seguito sono riportati in tabella:

<b>Nodo</b>	<b>Descrizione</b>
1	Piazza Corvetto
2	Via C. Carcassi - Via S. Giacomo e Filippo
3	Via Serra – Via Galata
4	Piazza Brignole
5	Via Varese – Via E. de Amicis
6	Via S. Vincenzo – Piazza G. Verdi
7	Brignole Capolinea Bus
8	Brignole Stazione
9	Brignole Piazza delle Americhe
10	Piazza delle Americhe Nord
11	Via P. Thaon di Revel - Aurelia
12	Piazza delle Americhe – Via G. Tommaso Invrea
13	Via Brigata Bisagno – Corso Buenos Aires
14	Via Brigata Bisagno - Cadorna
15	Piazza della Vittoria – Via Brigate Bisagno
16	Via Brigata Bisagno – Via Plisacane
17	Via C. Barabino – Via Brigata Bisagno
18	Via A. Diaz – Via Brigata Bisagno (Lato Questura)
19	Via A. Diaz – Via Brigata Bisagno (Lato Piazza della Vittoria)
20	Piazza della Vittoria – Via Brigate Bisagno
21	Viale Sauli – Via Galata
22	Via Galata – Via Galata
23	Via Ricci – Via Tollot – Via Varese
24	Via San Vincenzo – Via Ricci
25	Salita della Misericordia – Via San Vincenzo
26	Via Colombo – Via Fiume
27	Via Fiume
28	Via C. Carcassi – Salita della Misericordia
29	Via Palmaria – Via Fiume
30	Parcheeggi moto/auto Brignole
31	Piazza della Vittoria – Via L. Cadorna
32	Piazza della Vittoria (Vodafone)
33	Piazza della Vittoria (Inps)
34	Piazza della Vittoria (Unieuro)
35	Piazza della Vittoria – Via A. Diaz
36	Piazza della Vittoria – Via A. Diaz (Museo di Storia Naturale)
37	Piazza della Vittoria
38	Giardini Melvis Jones
39	Via Brigata Liguria – Via Ippolito d’Aste

40	Via Brigata Liguria – Via Malta
41	Via Brigata Liguria – Via Perani
42	Via Brigata Liguria – Via Cadorna – Via Fiume – Via XX Settembre
43	Via Maccaggi – Via Cesarea
44	Via Ippolito d’Aste – Via Granello
45	Via Malta – Via Granello
46	Via Granello – Via Perani
47	Via Granello – Via XX Settembre
48	Via Fiasella – Via Maccaggi
49	Via Cesarea – Via Malta
50	Via Fiasella – Via Ippolito d’Aste
51	Via Malta – Via Fiasella
52	Via Maccaggi – Via Ippolito d’Aste – Via Maragliano
53	Via Malta – Via Maragliano
54	Imbocco Galleria C. Colombo
55	Via Maragliano – Via della Pace
56	Via della Pace – Via Frugoni
57	Via Maragliano - Via XX Settembre
58	Via Brera
59	Via Cesarea – Via XX Settembre
60	Vico delle Gazzelle – Via Palmaria
61	Piazza Colombo
62	Viale Sauli – Via San Vincenzo
63	Via Colombo - Via San Vincenzo
64	Via Carcassi – Via U. Foscolo
65	Via XX Settembre – Via San Vincenzo
66	Via delle Casacce – Via V Dicembre
67	Via Bosco – Via Podestà
68	Via Fieschi – Galleria C. Colombo
69	Via Fieschi – Via Porta degli Archi
70	Via Fieschi – Via XX Settembre
71	Via Garaventa – Via Casacce
72	Via Vernazza – Via V Dicembre
73	Via XII Ottobre – Viale IV Novembre
74	Via XII Ottobre – Via Panmantone
75	Passo Santa Caterina Fieschi Adorno
76	Via XII Ottobre
77	Largo San Giuseppe
78	Piazza G. Labò
79	De Ferrari Metro
80	Largo delle Fucine
81	Largo XII Ottobre

82	Largo Fucine – Via Vernazza
83	Largo Fucine – Via Vernazza
84	Via XX Settembre – Via Lomellini
85	Via Morceto – Via Ceccardi
86	Via Morceto – Via Ceccardi
87	Via Ceccardi – Piazza Dante
88	Via Boccardo – Via Dante
89	Via Dante – Piazza De Ferrari
90	Via Vernazza – Piazza De Ferrari

Per un corretto processo di pianificazione a analisi del territorio è bene suddividere l'area in esame in zone, ovvero eseguire il processo di zonizzazione. Ogni zona sarà una porzione di territorio con caratteristiche omogenee rispetto alle attività, all'accessibilità, alle infrastrutture ed ai servizi di trasporto. Di seguito viene riportata la schematizzazione in zone per il caso di studio (Figura 22), ogni area è stata identificata con un numero romano da uno a dieci (zona di traffico). Quindi si sono ottenute 10 aree a ogni delle quali corrisponde un centroide interno, ovvero un punto del territorio rappresentativo del baricentro delle masse degli spostamenti di origine e destinazione di una zona di traffico.

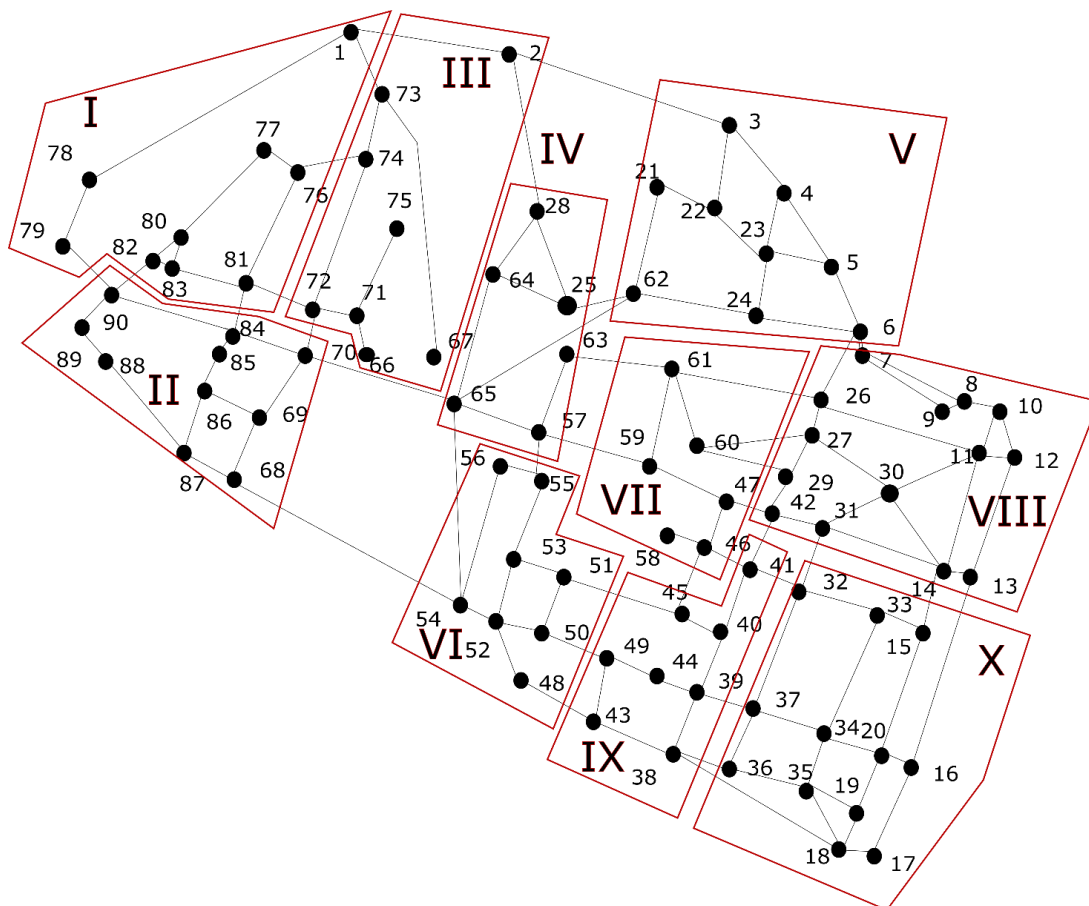


Figura 22: Grafo del caso di studio suddiviso in zone.



Per analizzare il caso di studio di Genova è stato necessario calcolare matrici caratteristiche del grafo. Come prima è stata costruita quella delle lunghezze degli archi, (riportati nella matrice  $C$  utilizzata nei modelli descritti nel capitolo 4). Grazie al software open source Google Maps è stato possibile calcolare le lunghezze degli archi  $l_{ih}, (i, h) \in L$  e inserirle nella matrice.

Per quanto riguarda la domanda di mobilità, dall'analisi delle zone in cui si è scelto di suddividere l'area e i relativi dati di traffico è stata estratta la matrice origine-destinazione dalla matrice complessiva della città Metropolitana aggiornata al 2018, riportata in Tabella 8. In Figura 23 è rappresentata la mappa della zona di Genova Centro utilizzata per l'analisi dei dati di traffico e il calcolo della matrice  $OD$ .

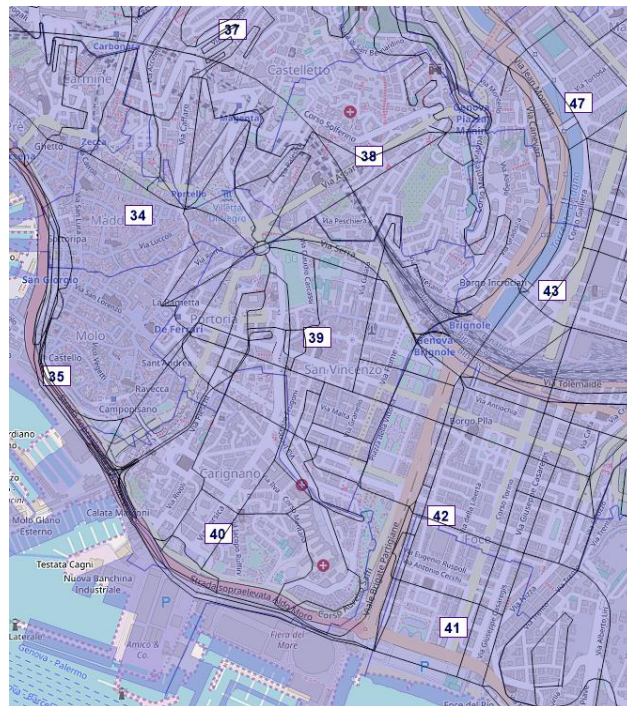


Figura 23: Zone di traffico di Genova

Tabella 7: Matrice origine-destinazione ( $M_{OD}$ ) dell' ora di punta mattutina.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
I	-	5	30	32	11	5	20	20	14	7
II	11	-	4	20	33	10	5	20	17	7
III	20	33	-	18	120	77	38	19	130	17
IV	7	3	30	-	5	3	2	7	8	10
V	7	3	15	17	-	5	3	7	7	7
VI	10	5	100	9	3	-	130	20	17	10
VII	22	5	10	20	7	5	-	30	5	5
VIII	22	7	53	10	10	8	9	-	5	5
IX	10	3	27	10	6	20	10	3	-	3
X	11	3	5	7	48	10	11	7	2	-

## 5.2 Risultati

### 5.2.1 Assegnazione all'equilibrio multiclasse

Il modello di riferimento è quello citato nel capitolo 3.3.1. Il dato in output fondamentale per la determinazione della scelta del percorso, per le modifiche urbanistiche e per la valutazione del sistema è il Costo Totale, il quale varia al variare del parametro  $\alpha$  ovvero il parametro di penetrazione del mercato dei veicoli automatici ( $\alpha=0$  traffico veicolare manuale,  $\alpha=1$  traffico veicolare solo automatico).

I primi risultati sono stati analizzati successivamente l'implementazione del modello di assegnazione. È stato valutato il costo totale all'equilibrio al variare del parametro  $\alpha$  per il reticolo stradale del centro città di Genova.

Questa prima valutazione è necessaria per testare il modello sul grafo e valutare eventuali errori o incongruenze per poi continuare con le simulazioni e l'applicazione degli altri modelli. Come primo risultato si è ottenuto che all'aumentare del parametro  $\alpha$  il costo totale all'equilibrio diminuisce, come mostrato in Figura 24.

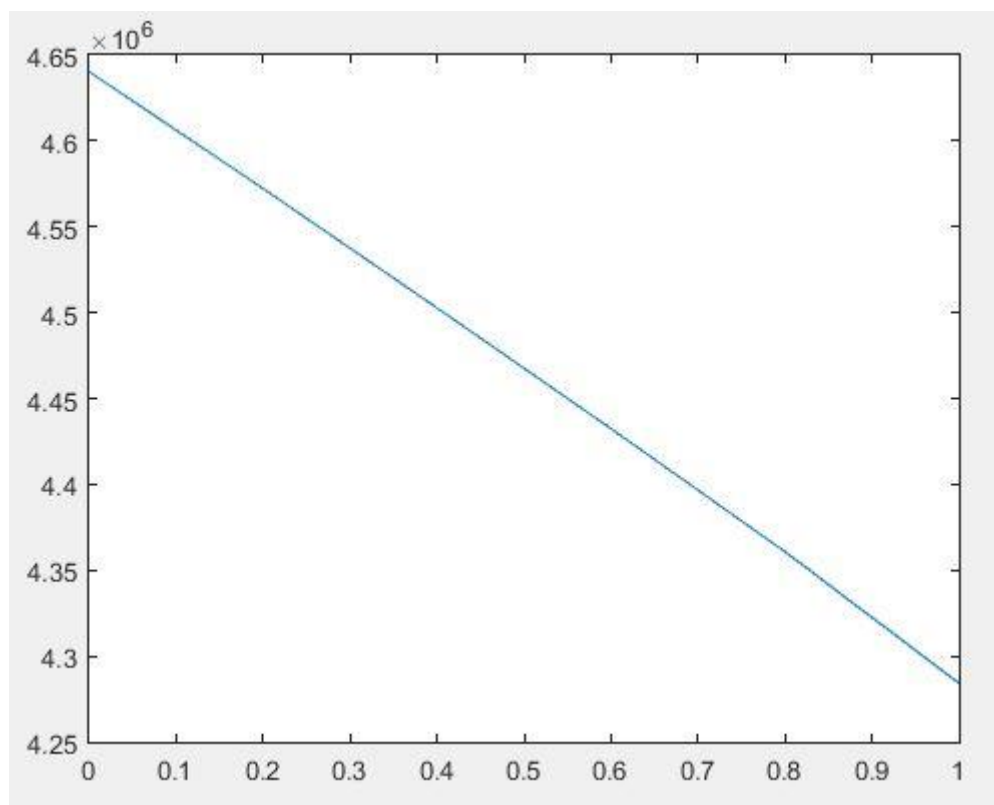


Figura 24: Grafico del costo totale all'equilibrio al variare di  $\alpha$ .

All'aumentare del parametro  $\alpha$  il Costo Totale diminuisce perché è stato valutato (nel capitolo 3) che all'aumentare del numero di veicoli autonomi, HFA, all'interno del deflusso veicolare la capacità



assumerà valori più elevati. Questi primi risultati confermano i benefici legati all'utilizzo dei veicoli automatici, i quali saranno in grado di distribuirsi al meglio lungo la rete stradale andando a ridurre i fenomeni di congestione stradale e le problematiche connesse, anche nel caso di studio di considerato.

Altra valutazione importante per testare il modello, è l'analisi dei flussi all'equilibrio al variare del parametro  $\alpha$ . Su alcuni archi il valore dei flussi aumenta all'aumentare del parametro  $\alpha$ , questa è una conseguenza dell'utilizzo di veicoli autonomi. Grazie ai sistemi di automazione i veicoli di nuova generazione potranno gestire uno spacing minore rispetto ai veicoli manuali quindi a parità di tratto stradale il numero di AVs potrà essere superiore rispetto a quelli manuali. Invece su alcuni tratti della rete il flusso è diminuito, questo sta ad indicare una semplice ripartizione del flusso lungo la rete.

## 5.2.2 Network Design

In questo capitolo applicheremo il modello di network design completo al caso di studio. Quindi come soggetto dell'analisi è stata scelta la parte centrale della città di Genova, come descritto nel capitolo 5.1. L'idea è di valutare la chiusura di determinati archi stradali senza andare a modificare le prestazioni della rete, garantendo un percorso minimo per ogni coppia origine destinazione.

In figura 25 sono riportati i risultati della simulazione, nel simulatore sono stati caricati i dati relativi alla rete di trasporto. Con le frecce verdi sono indicati gli archi e le direzioni chiuse e con le frecce nere gli archi e le direzioni che rimangono a disposizione del deflusso veicolare; quando un arco è disegnato solamente con la riga nera vuol dire che non ha subito modifiche ed è aperto in entrambi i sensi. Come si può vedere nella funzione obiettivo, riportata nel capitolo 4.2.2 nella scrittura del codice, alla variabile  $O$  è associato un peso. Nelle simulazioni è risultato che all'aumentare di questo peso, aumenta il numero di archi possibili da chiudere rispettando sempre la condizione di garantire delle corrette prestazioni del sistema infrastrutturale. Precisamente si è passati da 45 su 270 archi da chiudere (per un valore del peso pari a 10) arrivando a un massimo di 79 su 270 archi (per un valore del peso pari a 10000). Tenendo in considerazione gli archi a doppio senso di marcia, si ha un totale di 270 archi stradali. Si noti che, "eliminando" 79 archi, ha una riduzione del 29 % del numero di archi della rete stradale del centro città, che possono essere "riconsegnati" al sistema urbano, ed in particolare al verde cittadino.

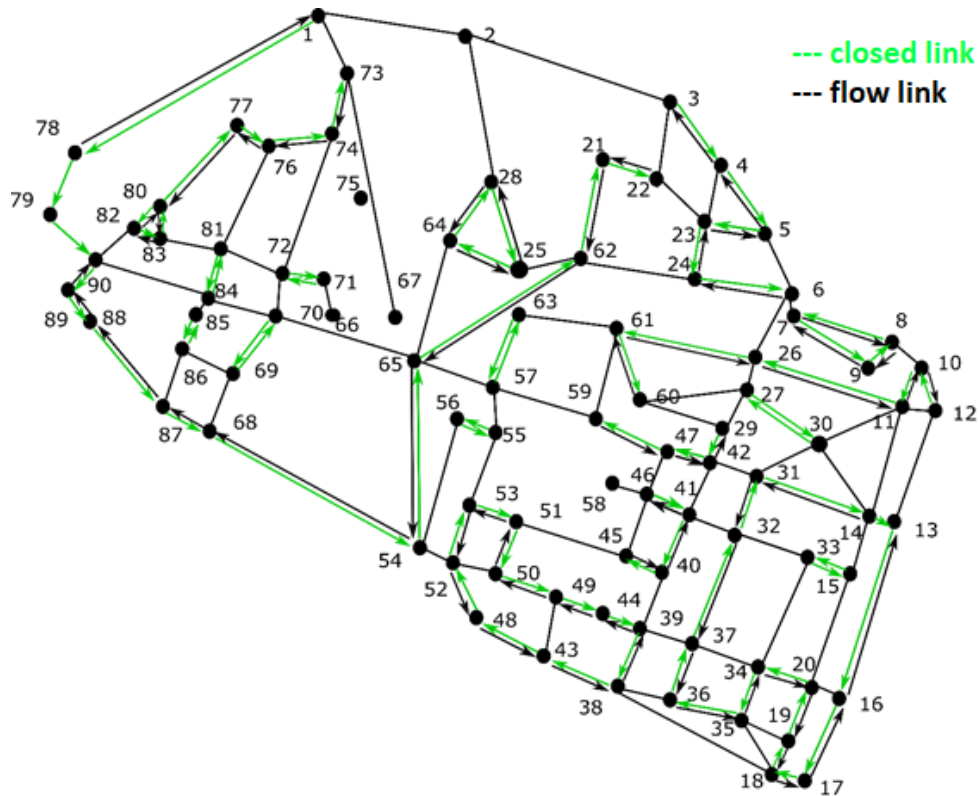


Figura 25: Risultati del problema di network design completo applicato alla rete del centro di Genova.

### 5.2.3 Analisi urbanistica della soluzione

Nella tabella seguente sono indicate tutte le vie chiuse successivamente l'applicazione del modello di ND Completo, con nodi di origine e destinazione, e le dimensioni dell'area recuperata (lunghezza per larghezza). Quindi a fine tabella è riportata la somma totale delle aree recuperate ed è pari a 25068 m<sup>2</sup>. Considerando l'area di studio complessiva di 840000 m<sup>2</sup>, si riesce a recuperare un 3% del suolo cittadino.

Nodo Origine	Nodo Destinazione	Via	Dimensione (lunghezza X larghezza) [m X m]
90	89	Piazza De Ferrari	47x6
89	88	Via Dante	60x6
88	87	Via Dante	140x6
87	68	Piazza Dante	65x6
86	85	Via G. Carducci	50x6
85	86	Via G. Carducci	50x6

84	81	Via S.Lomellini	57x3
83	80	Largo delle Fucine	45x3
82	83	Via E. Vernazza	22x3
81	84	Via S.Lomellini	57x3
80	82	Largo delle Fucine	45x3
79	90	Piazza de Ferrari	90x3
78	79	Via Roma	85x3
77	76	Piazza Piccapietra	50x3
76	74	Via XII Ottobre	67x3
74	73	Via XII Ottobre	78x3
73	1	Via XII Ottobre	110x3
72	71	Via E. Vernazza	80x3
71	72	Via E. Vernazza	80x3
70	69	Via Fieschi	78x3
69	70	Via Fieschi	78x3
68	54	Galleria C. Colombo	300x3
65	62	Via San Vincenzo	270x3
64	28	Via C. Carcassi	120x3
63	57	Via della Consolazione	110x3
62	21	Viale Sauli	110x3
61	60	Vico della Gazzella	130x3
60	29	Via della Palmaria	150x3
57	63	Via della Consolazione	110x3
56	55	Via Maragliano	53x3
55	56	Via Maragliano	53x3
54	65	Via Frugoni	200x3
53	51	Via Malta	59x3
52	53	Via Maragliano	81x3
51	50	Via Maccaggi	80x3
50	49	Via Ippolito D'Aste	81x3
49	44	Via Ippolito D'Aste	56x3
48	52	Via Castello	100x3
47	59	Via XX Settembre	93x6
46	41	Via Perani	57x3
45	46	Via Granello	86x3
44	39	Via Ippolito D'Aste	60x3
43	48	Via Maccaggi	95x3
42	47	Via XX Settembre	59x3
41	40	Via B. Liguria	84x3
40	45	Via Malta	55x3
39	38	Via B. Liguria	69x3
38	43	Via Maccaggi	100x3

37	32	Piazza della Vittoria	160x3
36	37	Piazza della Vittoria	81x3
35	36	Via A. Diaz	92x3
34	35	Piazza della Vittoria	81x3
33	15	Piazza della Vittoria	70x3
32	31	Piazza della Vittoria	78x3
31	14	Via L. Cadorna	150x3
30	27	Via G. Hanset	50x3
29	42	Via Fiume	73x3
28	25	Salita della Misericordia	150x3
27	30	Via G. Hanset	50x3
26	61	Via Colombo	200x3
25	64	Salita della Tosse	90x3
24	6	Via San Vincenzo	120x3
23	24	Vico del Corallo	81x3
21	22	Via Galata	64x3
20	34	Piazza della Vittoria	60x3
19	20	Viale Brig. Bisagno	70x6
18	19	Viale Brig. Bisagno	45x6
17	18	Via A. Diaz	36x6
16	17	Viale Brig. Bisagno	120x6
15	33	Piazza della Vittoria	64x3
14	13	Viale Brig. Bisagno	20x3
12	10	Piazza G. Verdi	20x3
11	26	Viale P.T. di Revel	200x6
10	11	Piazza G. Verdi	20x3
9	8	Piazza G. Verdi	3x3
8	7	Piazza G. Verdi	10x3
7	9	Piazza G. Verdi	10x3
5	23	Via Varese	81x3
4	5	Via Amicis	120x3
3	4	Via Amicis	56x3
1	78	Via Roma	300x6
<b>Totale Aree Recuperate</b>			<b>25068 m<sup>2</sup></b>

Il risultato analizzato è la condizione massima, quindi sono stati chiusi il numero massimo di archi. Un intervento urbanistico di queste dimensioni va progettato gradatamente, quindi sarà bene chiudere una parte degli archi massimi ottenuti e valutare gli effetti sulla città e sugli utenti, i quali molto spesso hanno difficoltà ad accettare cambiamenti radicali.

Di conseguenza si è valutato di chiudere solo una parte degli archi, 27 archi precisamente. Si è scelto di chiudere archi piccoli in zone poco trafficate, al fine di rendere meno impattante l'intervento di network design. Il risultato è riportato in Figura 26.

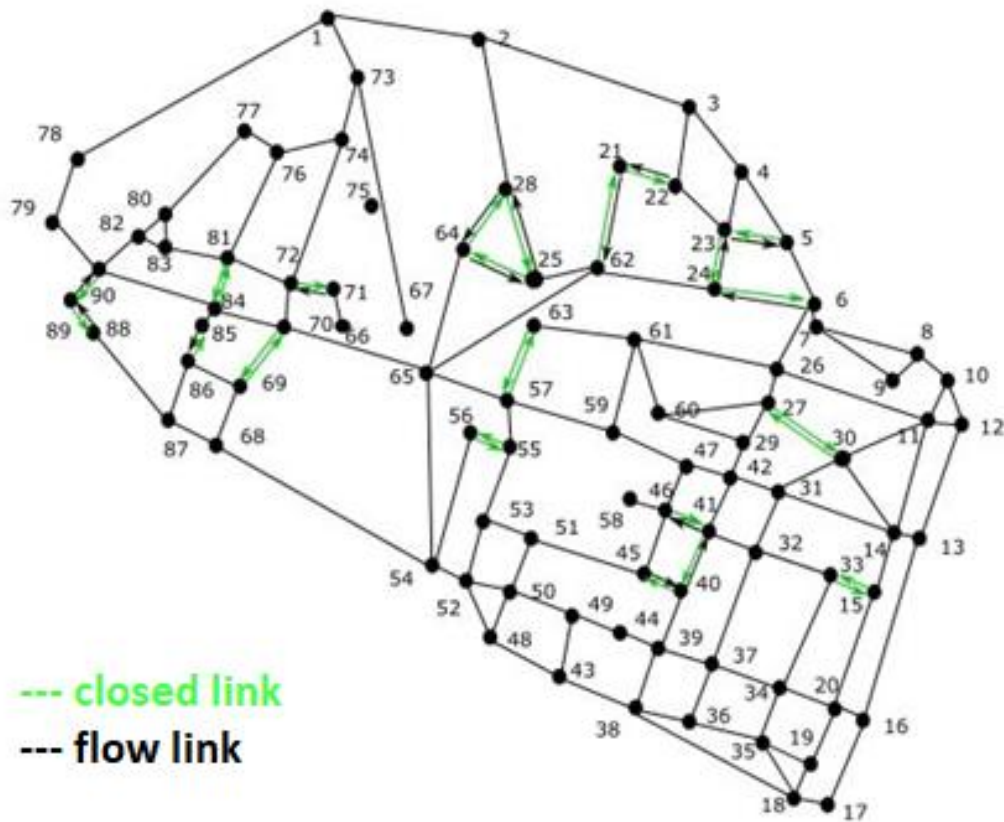


Figura 26: Ulteriori risultati del problema di network design completo applicato alla rete del centro di Genova

Nodo Origine	Nodo Destinazione	Via	Dimensione (lunghezza X larghezza) [m X m]
90	89	Piazza De Ferrari	47x6
89	88	Via Dante	60x6
88	87	Via Dante	140x6
81	84	Via S.Lomellini	57x3
85	86	Via G. Carducci	50x6
72	71	Via E. Vernazza	80x3
70	69	Via Fieschi	78x3
69	70	Via Fieschi	78x3
64	28	Via C. Carcassi	120x3
63	57	Via della Consolazione	110x3
57	63	Via della Consolazione	110x3
56	55	Via Maragliano	53x3

55	56	Via Maragliano	53x3
46	41	Via Perani	57x3
41	40	Via B. Liguria	84x3
40	45	Via Malta	55x3
33	15	Piazza della Vittoria	64x3
30	27	Via G. Hanset	50x3
28	25	Salita della Misericordia	150x3
27	30	Via G. Hanset	50x3
25	64	Salita della Tosse	90x3
24	6	Via San Vincenzo	120x3
23	24	Vico del Corallo	81x3
15	33	Piazza della Vittoria	64x3
5	23	Via Varese	81x3
<b>Totale Aree Recuperate</b>			<b>16407 m<sup>2</sup></b>

Anche per questa analisi a fine tabella è riportata la somma totale delle aree recuperate ed è pari a 16407 m<sup>2</sup>. Considerando l'area di studio complessiva di 840000 m<sup>2</sup>, si riesce a recuperare un 0,02% del suolo cittadino. Il risultato ottenuto è inferiore al risultato precedente, ma risulta comunque un recupero del suolo urbano.

I risultati hanno confermato che attraverso l'utilizzo di veicoli autonomi sarà possibile chiudere parte dell'infrastruttura esistente garantendo le prestazioni del sistema. Questo risultato ha come conseguenza il recupero di spazio urbano da dedicare ai cittadini. Sarà importante andare a decidere e calcolare come varieranno gli spazi urbani e le loro caratteristiche. Sono diversi i punti legati al tema della salute nel contesto urbano e altrettante le azioni da eseguire per mettere in pratica il concetto di sostenibilità; dal miglioramento della qualità dell'aria all'utilizzo di energie rinnovabili, passando dal paesaggio e finendo alla morfologia stessa degli spazi urbani. La sostenibilità urbana, infatti, viene incoraggiata anche dal recupero e dalla riqualificazione degli spazi urbani al miglioramento dell'ambiente e agli interventi sulle strutture stesse delle città. Dall'aumento degli spazi verdi, per migliorare la qualità dell'aria e favorire la riduzione delle isole di calore, all'utilizzo di fonti rinnovabili e di materiali a impatto ambientale ridotto. È esperienza diretta e documentata in letteratura che le aree verdi contribuiscono alla qualità della vita in città (Bonaiuto et al., 2003; Chiesura, 2004). Le loro funzioni sociali, culturali ed estetiche sono riconosciute come elementi cruciali degli spazi aperti cittadini per le possibilità che offrono di ricreazione, socializzazione e svago all'aria aperta, nonché per i valori storici e culturali che conservano e trasmettono (Tyrvaïnen et al., 2005). In queste aree spesso si concentra la "voglia di natura" dei cittadini, nonché il desiderio di evadere dall'inquinamento, dal traffico e dal cemento (Mirabile, 2004). Numerosi studi sono stati condotti a partire dagli anni '80 da ricercatori statunitensi nel campo della psicologia ambientale al fine di documentare non solo i benefici ludici e di svago offerti dalle aree naturali della città, ma anche i benefici per l'equilibrio psicologico e la salute mentale delle persone (Kaplan & Kaplan, 1989; Kaplan, 1993, 2001; Austin e Kaplan, 2001).

## 5.3 Effetti del design ottimo sugli indicatori ambientali urbanistici

Quest'ultima parte dell'elaborato si concentra sull'analisi urbanistica e territoriale della zona considerata nel Capitolo 5 del centro città di Genova, dopo aver valutato l'impatto dei veicoli autonomi nel deflusso veicolare e precisamente dopo aver analizzato le modifiche alla rete stradale e aver individuato quanti archi stradali potranno essere dedicati alla mobilità dolce o al verde urbano. In Figura 28 è possibile vedere lo schema del reporting ambientale e urbanistico. In input sono stati utilizzati i risultati e le considerazioni successive l'implementazione dei modelli di assegnazione e di network design. Successivamente sono stati considerati e calcolati tre indicatori che permettono di valutare le modifiche urbanistiche territoriali. Prima dell'analisi e il calcolo degli indicatori è stata svolta uno studio urbanistico territoriale della zona considerata per il caso di studio. Con l'espressione "reporting ambientale" si intende una descrizione dello stato attuale di un determinato ambiente e della sua prevista evoluzione futura in base alle scelte compiute; tale rappresentazione può essere utilizzata come promozione ed ausilio per processi di governance, come valido riferimento scientifico e come informazione rivolta ai cittadini per aumentare il grado di consapevolezza pubblica sulle ragioni e sui metodi di uno sviluppo sostenibile. Gli indicatori ambientali devono provvedere a fornire informazioni sui fattori (aria, acqua, economia, società, spazi ecc.) che influenzano la qualità dell'ambiente e la possibilità di sviluppo sostenibile. L'utilità degli indicatori ambientali risiede nella capacità di fornire dati di sintesi in grado di guidare l'analisi sullo stato di un certo ambiente, di guidare processi decisionali in campo politico economico e sociale verso forme di sfruttamento più sostenibile del territorio e di monitorare le risposte a tali decisioni.

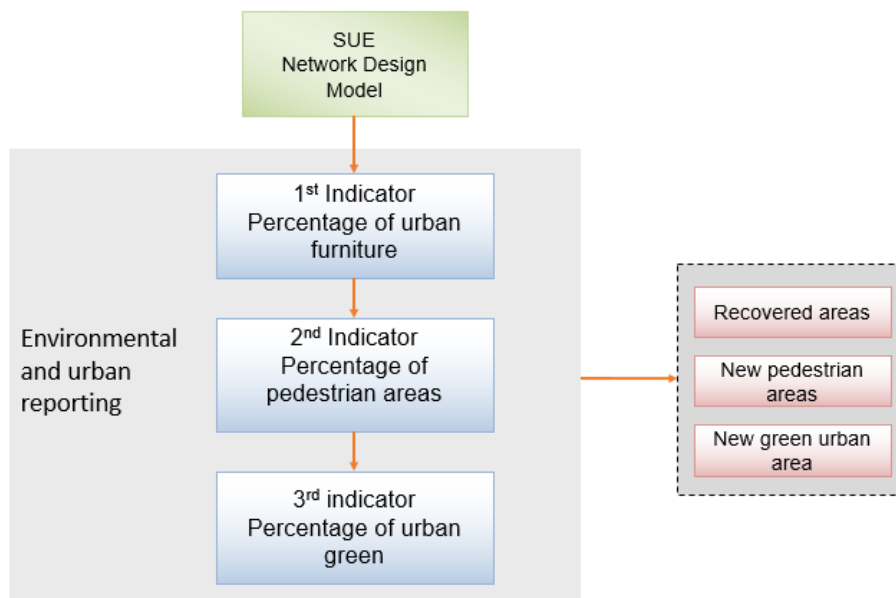


Figura 27: Schematizzazione del reporting ambientale e urbanistico.

Dopo aver applicato i modelli di assegnazione e network design, lo studio e l'analisi ha seguito i seguenti punti:

1. individuazione delle caratteristiche urbanistiche e possibili sviluppi futuri;
2. definizione dei parametri necessari alla valutazione ambientale urbanistica;
3. definizione e analisi degli indici di sostenibilità per i centri urbani.

### 5.3.1 Individuazione delle caratteristiche urbanistiche e possibili sviluppi futuri

Come già anticipato nel cap. 5, l'area di studio è quella riferita al centro della Città di Genova. Genova è un comune italiano di 578924 abitanti, capoluogo dell'omonima città metropolitana e della regione Liguria, sesto comune italiano e terzo del Nord Italia per popolazione, quinto per movimento economico, parte del triangolo industriale Milano-Torino-Genova. Genova ha una morfologia territoriale molto particolare, è una città che si estende in lunghezza, legata sia all'esistenza di molteplici centri storici, intorno ai quali sono cresciuti gli insediamenti in successive espansioni, sia alla conformazione morfologica, stretta tra il mare e i rilievi montuosi immediatamente retrostanti in cui sono insediati i Comuni dell'area metropolitana. La città si sviluppa lungo la linea costiera per una lunghezza di circa 30 Km e lungo due grandi vallate perpendicolari alla costa, la Valpolcevera e la Valbisagno.

La zona del centro città di Genova considerata per il caso di studio è quella di Via XX Settembre e le aree vicine con annesso connessioni stradali. Il centro è caratterizzato da servizi di urbanizzazione, come servizi di trasporto quindi tratte di linee di trasporto pubblico e fermate attrezzate dei sistemi di metropolitana e autobus. Ma anche di servizi per l'istruzione come centri bibliotecari o universitari, o servizi di cultura come teatri o cinema. Inoltre nell'area considerata sono presenti zone verdi e pedonali, dotate di verde urbano attrezzato o di verde urbano d'arredo come aiuole. Questi ultimi rappresentano punti singolari all'interno del centro città e sono da valorizzare o espandere perché rappresentano momenti di interruzione nella massa edificata ed infrastrutturata. Il grado di edificabilità del centro città è molto elevato, la zona è caratterizzata sia da edifici abitativi che strutture principalmente dedicate alle attività lavorative del settore terziario. Il tessuto urbano compatto è funzionale a un principio di prossimità che ha ispirato la forma urbana delle città medievali. Questa condizione aumenta le possibilità di contatto e gli interscambi, ottimizzando al contempo l'utilizzo di una delle risorse naturali più preziose, il suolo. Malgrado questo, un eccessivo livello di compattezza non rappresenta necessariamente una condizione ottimale. Va infatti considerata la necessità di aree pubbliche a sufficienza, spazi verdi, piazze in misura adeguata al peso insediativo espresso.

Le situazioni di debolezza presenti nel territorio metropolitano, legate soprattutto alle oggettive condizioni della collocazione e conformazione geografica di questo territorio e, in parte maggiore, alla stratificazione degli usi del territorio che nel tempo ha prodotto la configurazione attuale sono legate ai modi con cui si è utilizzato il territorio piuttosto che a fattori naturali avversi. È necessario promuovere diversi e consapevoli atteggiamenti nei confronti dell'uso del territorio, che devono essere orientati ad evitare la compromissione dei valori e dei fattori di competitività presenti e dall'altro a tendere al recupero delle situazioni di debolezza riscontrate. All'interno della strategia



di sviluppo urbano da realizzare con orizzonte al 2020 (PON METRO) si parla di smart city, quindi di sviluppo urbano, crescita economica e una più equa redistribuzione delle risorse che non possono prescindere dalla realizzazione di infrastrutture tecnologiche e dall'offerta di servizi innovativi ai cittadini e alle imprese che vivono e operano nella "Smart City". Una città smart promuove uno sviluppo sostenibile che ha come paradigmi la riduzione dell'ammontare dei rifiuti, la differenziazione della loro raccolta, la loro valorizzazione economica; la riduzione drastica delle emissioni di gas serra tramite la limitazione del traffico privato, l'ottimizzazione delle emissioni industriali, la razionalizzazione dell'edilizia così da abbattere l'impatto del riscaldamento e della climatizzazione; la razionalizzazione dell'illuminazione pubblica; la promozione, protezione e gestione del verde urbano; lo sviluppo urbanistico basato sul risparmio di suolo, la bonifica delle aree dismesse. Pone particolare attenzione alla disciplina dell'assetto idrogeologico con l'obiettivo della messa in sicurezza delle aree antropizzate e alla prevenzione del rischio attraverso adeguate norme d'uso del territorio.

### 5.3.2 Definizione dei parametri necessari alla valutazione ambientale urbanistica

Per capire e valutare la situazione attuale in materia di verde urbano si è ritenuto utile e necessario partire dall'analisi di quello che ad oggi si conosce e si dispone in termini di stato dell'arte in materia di verde urbano. La riqualificazione e il risanamento sono i nuovi obiettivi che l'urbanistica contemporanea si pone al fine di conferire alla città un equilibrato livello di qualità su tutto il territorio, ponendo quindi in secondo piano la tendenza all'espansione. Per valutare la situazione ambientale del centro città di Genova sono state studiate le aree verdi e/o pedonali già esistenti. Quelle presenti nel territorio urbano selezionato sono le seguenti:

- tre aree verdi: Giardini Acquasola, Area verde Armando Diaz;
- sei aree pedonali: Via San Vincenzo, Via Galata, Via Colombo, Via Porta degli Archi, Piazza De Ferrari, Largo Eros Lanfranco e Piazza della Vittoria.

Le aree verdi sono di tipo verde di quartiere, ovvero tutte quelle aree di modeste dimensioni attrezzate per soddisfare le esigenze per lo svago e il tempo libero del quartiere. I Giardini Acquasola rappresentano un vero e proprio parco nel cuore della città e si estendono per 8000 m<sup>2</sup>. L'Area verde Armando Diaz ricopre un territorio di circa 9000 m<sup>2</sup>. Invece le aree pedonali sono dotate di verde d'arredo ovvero semplici aiuole, e coprono circa 12000 m<sup>2</sup>.

### 5.3.3. Definizione e analisi degli indici di sostenibilità per i centri urbani

L'incremento della densità urbana nelle aree centrali ha avuto come esiti la perdita di spazi, di piazze, di giardini, la riduzione di quei generatori della comunità urbana che sono le attrezzature collettive importanti come luoghi di incontro e di socialità. Quindi la pianificazione urbana si trova oggi a riscoprire necessità di un intervento non solo di tipo procedurale o normativo, ma anche capace di intervenire a livello fisico e sociale. Per rendere operativa la sostenibilità urbana ed integrarla nelle politiche territoriali occorre definire un sistema di indicatori che permetta di valutare il livello di sostenibilità di una città o di un'area metropolitana, e quali sono le politiche (e

la loro efficacia) e le azioni attuate per migliorare tale livello. L'identificazione e l'utilizzo degli indicatori di sostenibilità a supporto delle politiche di sviluppo sostenibile sono obiettivi ormai ampiamente riconosciuti dai principali organismi internazionali ed europei. Con il progetto Indicatori Comuni Europei (European Common Indicators, ECI) promosso nel 1999 dalla Commissione Europea (DGXI) e dal Gruppo di esperti sull'Ambiente Urbano da questa istituita si individua un set ristretto di indicatori capaci di rappresentare le azioni locali verso la sostenibilità. Attraverso lo studio fatto nel cap. 4 si è valutata la quantità di territorio che si andrà a recuperare e di conseguenza a ricollocare e ripianificare nel tessuto urbano. Quindi in riferimento agli indicatori ECI sono stati scelti i seguenti, che permettono di mettere in relazione lo spazio urbano disponibile prima e dopo l'analisi:

- **indicatore uno: percentuale di arredo urbano;**
- **indicatore due: percentuale di aree pedonali;**
- **indicatore tre: percentuale di verde urbano.**

I seguenti indicatori sono stati costruiti partendo da alcune tipologie trovate in letteratura, dove ogni grandezza da valutare era espressa in relazione alla popolazione. Ipotizzando uno sviluppo demografico costante e mettendo in relazione la grandezza misurata oggi (Grandezza) e misurata dopo le analisi trasportistiche e di network design (Grandezza') si è arrivati a formulare il seguente indicatore generico:

$$Indicatore = \frac{Grandezza' \times 100}{Grandezza}$$

In questo modo è possibile valutare la percentuale di aumento della grandezza rispetto al valore odierno.

**Indicatore uno: percentuale di arredo urbano (Urban Furniture).** Con il termine arredo urbano, verde di corredo a spazi o edifici pubblici si intendono aree verdi create a fini estetici e/o funzionali ad aspetti di rappresentanza; si intendono con tale termine gli spazi a verde con una prevalente funzione ornamentale e di cornice a spazi, piazze e/o edifici pubblici contermini. L'indicatore riferito all'arredo urbano è il seguente:

$$\%_{UF} = \frac{UF' \times 100}{UF}$$

Con UF la percentuale di arredo urbano esistente, UF' la percentuale di arredo urbano che sarà installata successivamente le analisi di network design.

**Indicatore due: percentuale di aree pedonali (Pedestrian Areas).** Con area pedonale si intende una zona interdotta alla circolazione dei veicoli, salvo quelli in servizio di emergenza, i velocipedi e i veicoli al servizio di persone con limitate o impedito capacità motorie, nonché eventuali deroghe per i veicoli ad emissioni zero aventi ingombro e velocità tali da poter essere assimilati ai velocipedi. In particolari situazioni i comuni possono introdurre, attraverso apposita segnalazione, ulteriori restrizioni alla circolazione su aree pedonali. L'indicatore relativo alle aree pedonali è il seguente:

$$\%_{PA} = \frac{PA' \times 100}{PA}$$

Con PA la percentuale di aree pedonali, UF' la percentuale di aree pedonali che sarà installata successivamente le analisi di network design.

**Indicatore tre: percentuale di verde urbano (Urban Green).** Il verde, anche all'interno delle aree urbane, costituisce un fondamentale elemento di presenza ecologica ed ambientale, che contribuisce in modo sostanziale a mitigare gli effetti di degrado e gli impatti prodotti dalla presenza delle edificazioni e dalle attività dell'uomo. Con verde urbano si considerano piccole aree verdi presenti in diversi punti del tessuto urbano. Gli spazi verdi di quartiere sono utilizzati prevalentemente dagli abitanti della zona, che utilizzano queste aree con funzione ricreativa, di svago e di incontro. L'indicatore relativo al verde urbano è il seguente:

$$\%_{UG} = \frac{UG' \times 100}{UG}$$

Con UG la percentuale di verde urbano, UG' la percentuale di verde urbano che sarà installata successivamente le analisi di network design.

### 5.3.4 Risultati del reporting ambientale e urbanistico

Per rendere operativa la sostenibilità urbana ed integrarla nelle politiche territoriali occorre definire un sistema di indicatori che permetta di valutare il livello di sostenibilità di una città o di un'area metropolitana. Nel capitolo precedente infatti sono stati costruiti e definiti i tre indicatori ambientali, in questa sezione verranno calcolati tenendo in considerazione i dati e le caratteristiche urbanistiche del caso di studio della città di Genova, precisamente del centro città come ampiamente descritto nel Capitolo 5.

Nella Tabella 9 sono riportati i valori ottenuti tramite la prima valutazione di network design, ovvero ipotizzando la chiusura del massimo numero di archi pari a 79, come riportato nel Capitolo 5.2.2. A questo valore di archi chiusi corrisponde un 2,9% di suolo urbano precisamente 25068 m<sup>2</sup> disponibili per interventi urbanistici, in particolare si è scelto di riutilizzare il territorio per aree pedonali e verdi. È stato deciso di dividere in tre parti uguali l'area ottenuta quindi di dedicare 8356 m<sup>2</sup> sia la verde urbano, che alle aree pedonali che all'arredo urbano.

Tabella 8: Valutazione indici di sostenibilità.

$\%_{UG}$	$UG'$	$UG$	$\%_{PA}$	$PA'$	$PA$	$\%_{UF}$	$UF'$	$UF$
19 %	8356 m <sup>2</sup>	43440 m <sup>2</sup>	65 %	8356 m <sup>2</sup>	12831 m <sup>2</sup>	Aumento	8356 m <sup>2</sup>	- -

Per l'analisi dell'indicatore  $\%_{UG}$ , relativo al verde urbano, sono state considerate le tre aree verdi del centro di Genova precisamente Giardini Acquasola, Area verde Armando Diaz e Piazza della

Vittoria. Le aree verdi si estendono per circa 43440 m<sup>2</sup>. Di conseguenza è risultato un possibile aumento del 19% di aree verdi.

L'analisi dell'indice %<sub>PA</sub>, relativo alle aree pedonali, ha tenuto in considerazione le zone pedonali già esistenti nel centro di Genova, citate nella Tabella 7 del Capitolo 5, pari a un'area complessiva di 12831 m<sup>2</sup>. Perciò è risultato un possibile aumento del 65% delle aree destinate alla mobilità soft.

Infine, per l'analisi dell'ultimo indicatore quello relativo all'arredo urbano %<sub>UF</sub> non è stato possibile fare il confronto con le aree già presenti nel territorio urbano in quanto non esistono. Di conseguenza però si può affermare un possibile aumento delle aree da destinare all'arredo urbano.

Nella Tabella 10, invece, sono riportati i valori ottenuti tramite la seconda valutazione di network design, ovvero ipotizzando la chiusura di un numero ridotto di archi pari a 27, come riportato nel Capitolo 5.2.2. A questo valore di archi chiusi corrisponde un valore inferiore di suolo urbano precisamente 16407 m<sup>2</sup>. Anche per questa seconda analisi si è scelto di riutilizzare il territorio per aree pedonali e verdi, e si è deciso di dividere in tre parti uguali l'area ottenuta quindi di dedicare 5469 m<sup>2</sup> sia la verde urbano, che alle aree pedonali che all'arredo urbano.

Tabella 9: Ulteriore valutazione indici di sostenibilità.

% <sub>UG</sub>	UG'	UG	% <sub>PA</sub>	PA'	PA	% <sub>UF</sub>	UF'	UF
12 %	5469 m <sup>2</sup>	43440 m <sup>2</sup>	65 %	5469 m <sup>2</sup>	12831 m <sup>2</sup>	Aumento	5469 m <sup>2</sup>	- -

Anche per questo caso si sono valutati i tre indici, come riporta la Tabella 10. Per l'analisi dell'indicatore %<sub>UG</sub>, relativo al verde urbano, sono sempre state considerate le tre aree verdi del centro di Genova precisamente Giardini Acquasola, Area verde Armando Diaz e Piazza della Vittoria. Le aree verdi si estendono per circa 43440 m<sup>2</sup>. Di conseguenza è risultato un possibile aumento 12% del di aree verdi.

L'analisi dell'indice %<sub>PA</sub>, relativo alle aree pedonali, anche questa seconda volta ha tenuto in considerazione le zone pedonali già esistenti nel centro di Genova, citate nella Tabella 7 del Capitolo 5, pari a un'area complessiva di 12831 m<sup>2</sup>. Perciò è risultato un possibile aumento del 42% delle aree destinate alla mobilità soft.

Infine, per l'analisi dell'ultimo indicatore quello relativo all'arredo urbano %<sub>UF</sub> non è stato possibile fare il confronto con le aree già presenti nel territorio urbano in quanto non esistono come nel caso precedente. Di conseguenza però si può affermare un possibile aumento delle aree da destinare all'arredo urbano.

# Capitolo 6 Conclusioni

Lo scopo principale della pianificazione urbana è regolarizzare l'utilizzo del territorio ed organizzare lo sviluppo delle attività umane svolte su di esso. Proprio per questo è una disciplina che coinvolge diversi aspetti come quelli geologici, architettonici, ingegneristici e produttivi di un'area. Lo scopo di una buona pianificazione territoriale è organizzare una corretta interazione tra le attività umane e il territorio su cui esse sono svolte, in modo da dare vita ad uno sviluppo territoriale sicuro ed uno sviluppo produttivo economicamente sostenibile. I principi che ispirano le moderne teorie della pianificazione devono seguire linee progettuali coerenti con i principi di sviluppo sostenibile e di tutela dell'ambiente. Parallelamente a uno sviluppo territoriale sostenibile, sono stati studiati e proposti nuovi sistemi di trasporto mirati a una mobilità inclusiva e sicura sia dal punto di vista ambientale che della vita dell'uomo. I veicoli autonomi rientrano in questi nuovi sistemi di trasporto sostenibili e offrono caratteristiche fondamentali per la mobilità sostenibile. È stato valutato che attraverso il loro utilizzo si andrà a ridurre la congestione stradale, a diminuire il quantitativo di emissioni inquinanti e ad aumentare la sicurezza stradale. Le aree verdi urbane rappresentano una risorsa fondamentale per la sostenibilità e la qualità della vita in città. Oltre alle note funzioni estetiche e ricreative, esse contribuiscono a mitigare l'inquinamento delle varie matrici ambientali (aria, acqua, suolo), migliorano il microclima delle città e mantengono la biodiversità. Tuttavia, ad oggi, tali funzioni e benefici risultano scarsamente integrate nelle politiche di gestione degli spazi aperti e, più in generale, nella pianificazione urbanistica locale. In generale, sono necessarie nuove linee guida che mirino a mettere in relazione le nuove modalità di pianificazione territoriale con i futuri sistemi di trasporto.

Il presente elaborato presenta uno studio innovativo riguardante la futura cooperazione fra territorio urbano e veicoli autonomi. Inizialmente si propone un'analisi dello stato dell'arte in materia di veicoli autonomi e modelli di deflusso veicolare misto, modelli di network design e sostenibilità. Successivamente sono stati elaborati due modelli in grado di proporre una gestione più sostenibile delle città, capaci di integrare i servizi ambientali delle aree verdi e degli spazi aperti urbani nella pianificazione urbanistica locale tenendo in considerazione i futuri sistemi di trasporto autonomi. Il primo modello proposto è un modello di assegnazione multiclasse, andando così a valutare le prestazioni del flusso veicolare misto composto sia da veicoli manuali che veicoli autonomi. Importante dato in input necessario al modello di assegnazione è la funzione di flusso e di costo relativa all'introduzione dei veicoli autonomi. Entrambe le funzioni sono state valutate e calcolate studiando e interpretando la teoria esistente trovata in letteratura, arrivando a definirle e calcolarle al variare della percentuale di veicoli autonomi nel flusso veicolare. Come risultato del modello di assegnazione, si è ottenuto una diminuzione del costo totale di viaggio all'aumentare della penetrazione di veicoli autonomi all'interno del traffico urbano; inoltre è risultato che alcuni archi stradali non verranno scelti dai veicoli autonomi. Quindi dopo un'analisi trasportistica concentrata sull'interazione del modello di offerta e di domanda di trasporto nel caso di traffico veicolare misto; ci si è soffermati su l'analisi territoriale. Considerando il comportamento dei veicoli di non scegliere alcuni archi stradali della rete proposta, si è ipotizzato di chiudere queste aree dedicate alla mobilità. Successivamente è stato studiato e formulato un problema di network

design che ha permesso di valutare quali e quanti archi stradali possono essere chiusi al traffico veicolare mantenendo intatte le caratteristiche e le prestazioni della rete di trasporto. Entrambi i modelli sono stati validati attraverso due casi reali, e in seguito sono stati utilizzati per analizzare il caso di studio scelto ovvero il centro città di Genova. Grazie all'utilizzo del software Matlab, è stato possibile valutare e calcolare il numero di archi chiusi. I primi risultati hanno mostrato che la chiusura di 79 archi stradali non modificherà le prestazioni del sistema. Però si è assunto di considerare un primo intervento urbanistico pari alla chiusura di solo 27 archi stradali per rendere più graduale l'accettazione degli utenti e meno invasivo l'impatto sulla città. Anche con la chiusura di minor archi stradali, le prestazioni della rete non cambieranno.

Questo elaborato ha permesso di constatare che l'utilizzo di nuovi sistemi di trasporto come i veicoli autonomi porteranno dei benefici in termini di sostenibilità in ambito urbano. I risultati ottenuti, nei casi applicativi e negli scenari di test eseguiti, hanno evidenziato come i veicoli autonomi comportino un miglioramento in termini di prestazione della rete di trasporto. Successivamente si è valutato che la chiusura di archi stradali non modifica o peggiora le prestazioni del sistema. In particolare sono stati calcolati degli indicatori di sostenibilità, i quali hanno permesso di mettere in relazione le dimensioni delle aree pedonali e delle aree verdi della città di Genova prima e dopo la chiusura di archi stradali. Quindi hanno permesso di evidenziare un possibile aumento delle percentuali relative alle aree pedonali e al verde urbano. L'approccio proposto nel seguente elaborato rappresenta un'analisi e valutazione delle interazioni trasporto-territorio considerando gli scenari futuri che si andranno a manifestare nelle città del domani, quando i sistemi di trasporto subiranno dei grossi cambiamenti. La commissione europea ha definito gli obiettivi principali per uno sviluppo a ridotto impatto ambientale: costruzione di aree verdi, rigenerazione urbana e ambientale, pianificazione urbana compatta, accessibilità a tutte le zone della città, trasporti sostenibili e interconnessi, sviluppo di zone pedonali e ciclabili per favorire lo sviluppo di mobilità non motorizzata, sistemi di trasporto integrati su tutto il territorio urbano. Per raggiungere i seguenti obiettivi saranno necessari nuove linee guida per la pianificazione urbana e territoriale, ma saranno importanti approcci e studi come quello proposto nel seguente elaborato.

# Bibliografia

- ANPA (2000). "Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale".
- Arch. Alessandra Barresi Coll. Arch. Elisabetta Amagliani (2010). "Città antica e città contemporanea; forme dell'urbanizzazione e dinamiche delle trasformazioni; l'urbanistica della città europea, teoria e prassi", Facoltà di Architettura Corso di laurea in Architettura Corso di: Fondamenti di urbanistica.
- Arpac (2004)– Formez.
- Banca Mondiale (2013). "Building sustainability in an urbanizing world".
- Bonaiuto (2003). "Indexes of perceived residential environment quality and neighbourhood attachment in urban environments: a confirmation study on the city of Rome", *Landscape and Urban Planning*, 65, 41-52 (I.F. 1,953 / 2,557). DOI 10.1016/S0169-2046(02)00236-0.
- Bose, Ioannou, (2003). "Mixed manual/semi-automated traffic: a macroscopic analysis", In *Transportation Research Part C*, vol.11, 439–462.
- Boyce, Ben Ayed, Blair (1988). "A general bilevel programming formulation of the network design problem", *Transp. Res.* 22B, 311–318.
- Brueckner (2001). "Urban Sprawl: Lessons from Urban Economics", *Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs*, pp. 65-97.
- Buchanan (1963). "Traffic in Towns", Great Britain Ministry of Transport.
- Cantarella (1997) "A general fixed-point approach to multimode multi-user equilibrium assignment with elastic demand", *Transportation Science*, 31: 107-128.
- Cantarella, Di Febbraro (2017). "Transportation Systems with Autonomous Vehicles: models and algorithms for equilibrium assignment", *Transportation Research Procedia* 27 (2017) 349–356.
- Cantarella, Pavone, Vitetta (2006). "Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings", *European Journal of Operational Research* 175, 1682–1695.
- Cantarella, Vitetta (2006). "The multi-criteria road network design problem in an urban area", *Transportation* 33:567–588.
- Cascetta (2001). "Transportation systems engineering: Theory and methods", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Cascetta (2006). "Modelli per i sistemi di trasporto – Teoria e applicazioni", UTET.
- Cascetta (1998). "Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto", UTET.
- Cascetta, Russo, Viola, Vitetta (2002). "A model of route perception in urban road networks", *Transportation Research Part B* 36 577–592.

Chandler, Herman, Montroll (1958). Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research* 6, 165–184.

Chang, I Lai (1997). “Analysis of characteristics of mixed traffic flow of autopilot vehicles and manual vehicles,” *Transpn Res.-C*, Vol. 5, No. 6, pp. 333-348.

Cheba, Saniuk (2016). “Urban mobility – identification, measurement and evaluation”, *Transportation Research Procedia* 14(14):1230-1239.

Chiesura (2004). “The role of urban parks for the sustainable city”, *Landscape and Urban Planning*, 68 (1) (2004), pp. 129-138.

Commissione Europea (2011). *Libro Bianco*.

Conca (2013). “Analisi delle interazioni trasportistiche tra Città e Porto: applicazione di un modello al caso studio di Genova e definizione di possibili scenari future”, *Tesi di dottorato di Ricerca in Logistica Trasporti e Territorio*.

Decreto Legislativo N. 285 del 30/04/1992

Di Febbraro, Sacco, (2016). “Open Problems in Transportation Engineering with Connected and Autonomous Vehicles”, *Transportation Research Procedia* 14:2255-2264.

Di Febbraro, Rebor, Sacco, Torre (2016). “A Multiclass Assignment Problem in Scenarios with Increasing Road Automation”, *Paper number ITS-EU-SP0298*.

Direttiva 2007/2/CE.

European Commission Directorate General for Regional Policy (2011). “Cities of tomorrow. Challenges, visions, ways forward”.

Farahani, Miandoabchi, W.Y. Szeto, Rashidi (2013). “A review of urban transportation network design problems”, *European Journal of Operational Research* 229, 281–302.

Friesz, Shah (2001). “An overview of nontraditional formulation of static and dynamic equilibrium network design”, *Transp. Res.* 35B, 5–21.

Gambardella (2015). *Tesi di dottorato in progettazione urbana e urbanistica, SMART PLANNING. Urban Planning for new urban system*, tutor: Michelangelo Russo.

Geofrey Yator (2013). “Issues in urban design planning and management”, *Slide*.

Gibelli, Salzano (2006). “No sprawl”, 250 p., ill., Brossura.

Giffinger, Fertner, Kramar, Meijers (2007). “City-ranking of European Medium-Sized Cities”.

Goldner (1971). “Projective Land Use Model (PLUM)”.

Guihaire (2008). “Transit network design and scheduling: a global review”, *Transportation Research Part A* 42(10), 1251–1273.

Gudmundsson, Hall, Marsden, Zietsman (2016). “Sustainable Transportation Indicators, Frameworks, and Performance Management”.



HABITAT III (2016). New Urban Agenda.

Harris (1997). "THE NATURE OF CITIES" AND URBAN GEOGRAPHY IN THE LAST HALF CENTURY. *Urban Geography* 18:1, pages 15-35.

Hoogendoorn, van Arem, (2014). "Automated Driving, Traffic Flow Efficiency, and Human Factors," 9th World Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2422, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 113–120.

Hoyt (1939). "The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities" Washington: Fed. Housing Admin.

International Transport Forum (2016). "A New Paradigm for Urban Mobility".

International Transport Forum (2016). "Shared Mobility".

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2017). "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici".

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2009). Gestione ecosistemica delle aree verdi urbane: analisi e proposte.

ISPRA- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2015). "La realizzazione in Italia del progetto Corine Land Cover 2006".

Istituto Nazionale della Statistica (2017). Forme, livelli e dinamiche dell'urbanizzazione in Italia.

Kaplan (2001). "The nature of the view from home: Psychological benefits", *Environment and Behavior*, 33, 507–542.

Kaplan, Austin (2004). "Out in the country: Sprawl and the quest for nature nearby", *Landscape and Urban Planning*, 69, 235–243.

Kaplan (1995). "The restorative benefits of nature: Towards an integrative framework", *Journal of Environmental Psychology*, 15, 169–182.

Kaplan, Kaplan (1989). "The experience of nature: A psychological perspective", New York: Cambridge University Press.

Kepaptsoglou, Karlaftis (2009). "Transit route network design problem: review", *Journal of Transportation Engineering* 135 (8),491–505.

Kim, Yook, Ko, Kim, (2015). "An Analysis of Expected Effects of the Autonomous Vehicles on Transport and Land Use in Korea", New York University: New York, NY, USA.

La Rocca (2010). "Soft Mobility and Urban Transformation", *TeMaLab journal of Mobility, Land Use and Environment* ISSN 1970-9870 Vol 3 – SP.

Legge 10/2013 "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani".

Lowry, I.S. (1964) "A model of metropolis", RM-4035-RC.

Magnanti, Wong (1984). "Network design and transportation planning: models and algorithms", *Transp. Sci.* 18, 1–55.

Maniezzo V. Algoritmi Genetici, slide universitarie. Università di Bologna

Marsal-Llacuna López-Ibáñez (2014). "Smart Urban Planning: Designing Urban Land Use from Urban Time Use", *Journal of Urban Technology* 21(1):39-56.

Meerow, Newell, Stults (2016). "Defining urban resilience: A review", *Landscape and Urban Planning* Volume 147, Pages 38–49.

Migdalas (1995). "Bi level programming in traffic planning: models, methods and challenge", *Journal of Global Optimization* 7(4),381–405.

Mirabile (2004). "Attitudes in the social context: The impact of social network composition on individual level attitude strength", *Journal of Personality and Social Psychology*, 87, 779-795. doi:10.1037/0022-3514.87.6.779.

Mitchell, Rapkin C. (1954) "Urban traffic: a function of land use", Columbia University Press (New York).

Mumford L. (1961). "The city in history", Harcourt Brace and Jovanovich Inc.

OECD ITF (2015). "Urban mobility system upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic".

Park, Burgess, McKenzie (1925). "The city", University of Chicago Press.

Raposo, Ciuffo, Makridis, Thiel (2017). "From Connected Vehicles to a Connected, Coordinated and Automated Road Transport (C2ART)", Directorate C Energy, Transport and Climate, Sustainable Transport Unit Joint Research Centre, European Commission Ispra.

Riganti P. (2008). Città, attività, spostamenti. La pianificazione della mobilità urbana.

Rodrigue, Comtois, Slack (2006). "The Geography of transportation systems", Routledge.

SAE document J3016, (2014). "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Automated Motor Vehicles".

Strand, JNilsson, Karlsson, Nilsson (2014). "Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures" *Transportation Research Part F* 27 218–228.

Torre (2015), Modellazione e analisi del ruolo del livello tecnologico dell'infrastruttura nel processo di scelta del percorso dei veicoli autonomi, Tesi di Laurea per il conseguimento del titolo di Dottore Magistrale in Ingegneria della Sicurezza: Trasporti e Sistemi Territoriali.

Tyrväinen (2007). "Tool for mapping social values of urban woodlands and other green areas", *Landscape and Urban Planning*, 79 (2007), pp. 5-19.

U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (2014). "Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application".

Verburg, Dijst, Schot, Veldkamp (2004). "Land-use change modeling: Current practice and research priorities", *GeoJournal* 61(4):309-324.

Vicari (2004). *La città contemporanea*.

Wefering F., Rupprecht S., Bührmann S., BöehlerBaedeker S. (2014). "Guidelines Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan".

Wegener M., Furst F. (1999). *Land-Use Transport Interaction: State of Art*.

Willem van Willigen (2014). "Look Ma, No Hands! Aspects of Autonomous Vehicle Control", Department of Computer Science Faculty of Sciences, Vrije Universiteit.

Yang, Bell (1998). "Models and algorithms for road network design: a review and some new developments", *Transport Reviews* 18(3),257–278.

Yokota, Ueda, Murata (1998). "Evaluation of AHS effect on mean speed by static method", Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, Seoul Korea. Paper no. 3201

## Sitografia

AMT Genova <https://www.amt.genova.it/amt/>

Demografia in cifre <http://demo.istat.it/index.html>

Google Maps

Piano Urbanistico Comunale [http://www.comune.genova.it/sites/default/files/1\\_10\\_doc.pdf](http://www.comune.genova.it/sites/default/files/1_10_doc.pdf)