

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA



XXXII Ciclo Dottorato di Ricerca in
Ingegneria delle macchine e dei sistemi per l'energia, l'ambiente e i trasporti
Curriculum: Ingegneria dei sistemi di trasporto e logistici

Metodi innovativi di monitoraggio e di analisi di dati di traffico per la soluzione di problemi di ottimizzazione stocastica di impianti semaforici coordinati

Dottorando: **Andrea Marella**

Tutor: **Prof. Nicola Sacco**

Indice

1. Introduzione	4
2. I sistemi di trasporto: monitoraggio e modellazione	5
2.1. I sistemi di trasporto	5
2.2. La domanda di mobilità	6
2.3. Metodi e tecnologie classiche per il monitoraggio dei dati di traffico	13
2.3.1. Tecniche di rilevamento manuale	14
2.3.2. Tecniche di rilevamento automatiche	17
2.4. Tecniche innovative per il monitoraggio dei dati di traffico	25
2.4.1. DataFromSky	27
2.4.2. Il software di monitoraggio	32
2.4.3. Floating Car Data (FCD)	36
2.5. La pianificazione e la progettazione dei sistemi di trasporto	38
2.6. La modellazione del traffico stradale	39
2.6.1. Formulazioni generali	41
2.7. Il calcolo dell'area di influenza	49
3. I modelli del controllo semaforico	55
3.1. Nota introduttiva	55
3.2. Le intersezioni semaforizzate	56
3.3. Algoritmo di controllo e di ottimizzazione di impianti semaforici	60
3.4. Problemi di ottimizzazione stocastica	61
3.5. Modello di programmazione matematica stocastica per il coordinamento semaforico	62
4. Analisi sperimentale	65
4.1. Descrizione dell'area in studio	65
4.2. Calcolo del bacino di utenza dell'area di studio	67
4.3. Calcolo della matrice o/d dell'area di studio	71
4.4. Calcolo della matrice o/d dettaglio	75
4.5. Validazione statistica dei dati	89
4.6. Calcolo dei valori di saturazione reali	103
4.7. Modello di ottimizzazione stocastica	105
4.7.1. Risolutore IBM ILOG CPLEX	105
4.8. Risultati dell'ottimizzazione	110
4.8.1. Scenario 0: stato di fatto	110
4.8.2. Scenario 1: ottimizzazione	115

4.8.3.	Scenario 2: variazione della sequenza delle fasi	120
5.	Conclusioni	121
6.	Allegati	122
6.1.	Script di R.....	122
6.2.	Script di CPLEX	126
7.	Indice delle figure	129
8.	Bibliografia.....	131

1. Introduzione

Lo sviluppo dell'informatica e l'implementazione dei progetti di Smart City hanno permesso in pochi anni di disporre di un'enorme quantità di dati. Come mettere a frutto queste informazioni è l'obiettivo del presente lavoro. Il campo dell'*Intelligent Transportation Systems* (ITS) è uno dei settori nel quale la ricerca sui nuovi dati, combinata con l'*Artificial Intelligent* (AI), ha iniziato a mostrare risultati interessanti. L'ITS permette di fornire servizi innovativi e avanzati relativi alle modalità di trasporto e gestione del traffico e consente agli utenti di fare scelte più intelligenti quando utilizzano le reti di trasporto. Questo ha effetto diretto sull'efficacia dell'infrastruttura nelle città intelligenti urbane.

La ricerca scientifica nel settore del traffico e dei trasporti ha messo a disposizione big data sul traffico in modo diretto con la necessità di studiare modelli di analisi e di rappresentazione dei dati che vanno oltre alla classica modellistica (c.d. *simulation agent model based*). Grazie ai big data sul traffico e le tecniche di IA e *Machine Learning* (ML) è oggi possibile studiare nuovi modelli di previsione dei comportamenti degli utenti della strada (c.d. *data-driven models*).

Questo lavoro vuole essere un concreto esempio dell'utilizzo di differenti sistemi innovativi di monitoraggio dei dati di traffico, di modelli di traffico e di ottimizzazione applicati in un caso reale. Le intersezioni semaforizzate analizzate sono state oggetto di una campagna di monitoraggio di video aereo con innovativa strumentazione, dell'applicazione di software di computer vision ed elaborazione dei dati di traffico, di elaborazione di dati FCD, e, infine, di risoluzione di un problema di programmazione stocastica per il coordinamento ottimale.

Nella stesura dell'elaborato, trattandosi di uno studio misto di ricerca applicata e di un caso reale, è stata orientata più possibile al mantenimento di un forte contatto con il campo professionale e di reale applicabilità dei risultati.

2. I sistemi di trasporto: monitoraggio e modellazione

2.1. I sistemi di trasporto

I sistemi di trasporto sono costituiti da elementi fisici e organizzativi che interagiscono tra loro per produrre opportunità di trasporto oltre che dalla domanda di mobilità che utilizza tali opportunità. La domanda di mobilità, a sua volta, è il risultato delle interazioni tra le varie attività sociali ed economica localizzate in una determinata area.

(Cascetta E., 2006)

Il diritto alla mobilità non è solo una buona prassi di pianificazione dei trasporti ma è un principio fondante della Costituzione Italiana. L'articolo 16 sancisce che: *"Ogni cittadino può circolare e soggiornare liberamente in qualsiasi parte del territorio nazionale, salvo le limitazioni che la legge stabilisce in via generale per motivi di sanità o di sicurezza. Nessuna restrizione può essere determinata da ragioni politiche.*

Ogni cittadino è libero di uscire dal territorio della Repubblica e di rientrarvi, salvo gli obblighi di legge."

Anche la Carta Europea definisce i diritti di mobilità e di sicurezza nella circolazione e, inoltre, esiste una specifica Carta dei diritti del Pedone (Parlamento Europeo, 1988), che sancisce, nei primi due articoli:

I. Il pedone ha diritto a vivere in un ambiente sano e a godere liberamente dello spazio pubblico nelle adeguate condizioni di sicurezza per la propria salute fisica e psicologica.

II. Il pedone ha diritto a vivere in centri urbani o rurali strutturati a misura d'uomo e non d'automobile e a disporre di infrastrutture facilmente raggiungibili a piedi o in bicicletta.

Il diritto alla mobilità, come si è visto, trova già riconoscimento nelle carte costituzionali dei maggiori paesi occidentali e nella Carta dei diritti dell'Unione Europea ma nella quotidianità non è sempre facile che ogni persona possa circolare liberamente in qualsiasi parte del territorio nazionale anzi, per chi si muove per motivi di studio o lavoro e per le persone con disabilità, spesso è vero il contrario.

Il diritto alla mobilità e il potere usufruire di un sistema di trasporto pubblico concretamente accessibile, rappresenta un aspetto essenziale della libertà delle persone e della qualità della loro vita; tanto è vero che esiste una proposta di legge costituzionale che inserisca il diritto alla mobilità per tutti i cittadini.

Questa proposta di legge introdurrebbe un nuovo articolo nella Carta Costituzionale affinché l'accesso al trasporto pubblico sia garantito, nei modi stabiliti dalla legge, anche a chi sia privo di mezzi, e questo deve avvenire per porti e aeroporti, grandi reti di trasporto e di navigazione. Un primo passo per adeguare il nostro paese agli standard europei e per dare una cornice a quell'organismo di controllo sui diritti dei passeggeri che l'Ue ci chiede da tempo e su cui oggi ci sanziona.

Il diritto alla mobilità si deve coniugare successivamente con un'efficiente organizzazione del trasporto, affinché i cittadini siano liberi di scegliere il migliore mezzo di trasporto per le proprie esigenze.

Con una popolazione mondiale di oltre 7 miliardi di persone e oltre 1 miliardo di veicoli circolanti è necessario che via sia una corretta organizzazione del sistema della mobilità delle persone, e delle merci. È in questo processo strategico-decisionale che intervengono i modelli per i sistemi di trasporto. A tale considerazione vanno aggiunti i costi: sociali, ambientali e produttivi. Con circa 1,24 milioni di decessi su

strada ogni anno nel mondo, il costo sociale (in termini di costi umani, sanitari e mancata produttività) è stato stimato a circa 100 miliardi di dollari. La congestione stessa del traffico, si prevede inoltre che il numero dei veicoli in circolazione nei Paesi in via di sviluppo crescerà da 1 a 2 miliardi nei prossimi 15 anni, è un costo enorme. Il costo economico globale nel 2013 è stato stimato approssimativamente in 875 milioni di dollari, con una crescita negli ultimi 10 anni di oltre 150%.

È evidente, dopo questa premessa, come il ruolo dei decisori e dei tecnici, nell'organizzazione dei sistemi di trasporto, è tutt'altro che secondaria. È necessario, pertanto, intervenire nelle scelte di pianificazione dei prossimi anni con maggiore determinazione e tenendo fortemente presente l'evoluzione tecnologica futura. ITS (Intelligent Transport Systems), Smart City e ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*) saranno sicuramente le tecnologie che più influenzeranno la pianificazione e la progettazione dei sistemi di trasporti.

Le tematiche stesse trattate nel presente lavoro esprimono un forte elemento di impatto nei sistemi di trasporto futuri: la conoscenza di informazioni da una nuova prospettiva (quella aerea) non può fare altro che aprire nuove considerazioni per il monitoraggio, la pianificazione e la progettazione dei sistemi di trasporto.

2.2. La domanda di mobilità

Con domanda di mobilità si intende la quantità di individui che effettuano uno spostamento da una zona di origine ad una di destinazione, per un determinato scopo e modo di viaggio seguendo un percorso scelto.

La conoscenza della domanda di mobilità attuale può essere ottenuta effettuando indagini sul campo volte a rilevare le caratteristiche degli spostamenti che si manifestano nell'area di studio.

Gli scopi specifici di tali indagini e la scala territoriale alla quale ci si muove possono essere molto diversi e, di conseguenza, molto diverse le fasi operative. Dai problemi di pianificazione di aree estese ai progetti di singole infrastrutture o di impianti fino ai problemi di gestione di reti stradali o di aziende di trasporto, c'è tutta una gamma di casi che richiedono, ciascuno, un progetto di indagini specifico.

In tutti i casi ci si avvale del metodo del campionamento: dall'universo degli individui che chiedono di spostarsi, si estrae un campione dimensioni adeguate e si registrano tutte le caratteristiche degli spostamenti effettuati dagli individui. Dai valori campionari si risale alla stima dei valori che le stesse caratteristiche assumono nell'universo.

Se si vuole, ad esempio, stimare il numero di individui dell'universo che hanno una data caratteristica, si contano quanti individui del campione la posseggono e si moltiplica il numero ottenuto per il rapporto tra dimensione dell'universo e la dimensione del campione (coefficiente di amplificazione). Se si vuole stimare, invece, la media di una grandezza che caratterizza tutti gli individui dell'universo, si calcola la media tra gli individui del campione e si assume come stima dell'universo.

Le indagini sulla mobilità possono essere così classificate:

- *indagini sui flussi*: consistono nella rilevazione delle caratteristiche dei flussi di veicoli o di persone attraverso una sezione stradale;
- *indagini su aree ristrette*: sono quelle tendenti all'analisi del traffico in transito attraverso un nodo della rete dei trasporti (un incrocio, una piazza, una stazione) o dall'analisi interessata ad un insediamento puntuale generatore o attrattore di mobilità (un edificio sede di residenze, servizi o attività produttive);

- *indagini lungo linee di valico*: si propongono di analizzare il traffico che attraversa una linea ideale che divide in due parti un'area abitata (*screen line*) o che ne segna i confini (cordone);
- *indagini su aree vaste*: sono le indagini più complesse e sono finalizzate alla rilevazione di tutto il traffico che interessa un territorio urbanizzato, sede, quindi, di una molteplicità di luoghi di origine e di destinazione. Vengono generalmente denominate indagini *origini/destinazioni* - o/d.

In questa trattazione verrà affrontata una tecnica innovativa di rilevamento che permette, attualmente, di soddisfare due delle tipologie pocanzi descritte: le indagini sui flussi (o su sezione) e le indagini su aree ristrette (o su nodi).

Il rilevamento dei flussi che impegnano una rete stradale è la più agevole delle possibili indagini sulla mobilità in quanto richiede la sola predisposizione di postazioni – automatiche o manuali – in corrispondenza delle sezioni i cui flussi interessa conoscere.

I parametri di un flusso che ordinariamente sono oggetto di rilevamento vengono suddivisi nelle seguenti categorie.

- **Volume del flusso**: numero di veicoli che attraversano una determinata sezione stradale nell'unità di tempo. È evidente come già intrinsecamente nella definizione di flusso, è rappresentata la variabilità nel tempo o dimensione temporale della domanda. La variabilità nel tempo di un volume di traffico può essere rappresentata nelle seguenti dimensioni.
 - *Traffico orario*: è il flusso in 60 minuti consecutivi e il maggiore nell'arco delle 24 ore è detto *flusso dell'ora di punta*.
 - *Traffico giornaliero medio (TGM) - Average Daily Traffic (ADT)*: è il numero di veicoli che transita nelle 24 ore; solitamente viene distinto in flusso diurno (dalle 6.00 alle 22.00) e flusso notturno (dalle 22.00 alle 6.00).
 - *Traffico giornaliero medio annuo (TGMA)¹ - Annual average daily traffic (AADT)*: è il numero medio giornaliero di veicoli che transitano in una sezione durante un anno solare diviso per il numero di giorni di quell'anno.
 - *Intensità di traffico su n minuti* (generalmente 10 o 15 minuti): è il numero di veicoli che transiterebbe in 60 minuti se si mantenesse costante il flusso di veicoli registrato negli *n* minuti più carichi; il rapporto tra flusso orario ed intensità di traffico in *n* minuti è chiamato *fattore dell'ora di punta (fhp) - Peak Hour Factor (PHF)* su *n* minuti.
 - *Portata dell'i-esima ora di punta o Third rush hour*: è il flusso orario che transita per una sezione stradale e che è superato, nel corso dell'anno solare, solo (*i* – 1) volte.

Sostanzialmente si hanno tre scale temporali differenti (annuale, giornaliero ed orario), nelle quali ciascun flusso assume un diverso significato; il più idoneo al dimensionamento della strada è però il traffico orario. Il traffico annuale non può tener conto di eventuali concentrazioni in alcuni periodi l'anno, così come il TGM non può tener conto delle variazioni giornaliere che possono essere considerevoli, per questo il traffico di progetto è opportuno che si riferisca a scale orarie. È noto come in un anno esistano 8.760 (24 ore/giorno moltiplicato per 365 giorni/anno) traffici orari e si potrebbe ritenere opportuno utilizzare il valore più alto.

¹ Per i censimenti pluriennali, il traffico giornaliero medio annuo (TGMA), nelle singole postazioni di osservazione, è normalmente calcolato con una metodologia ricavata dalla cosiddetta "*Formula di Ginevra*", usata dal 1975. Per utilizzare questa metodologia si deve essere in possesso dei dati di traffico, misurati dalle 7.00 alle 19.00 per i periodi diurni e dalle 19.00 alle 7.00 per i periodi notturni, ottenuti in giornate particolari dell'anno. In particolare si richiedono misure effettuate in due sabati, due domeniche, un lunedì, un venerdì e due giorni infrasettimanali (da martedì a giovedì) per il periodo invernale (definito da ottobre a marzo) e altrettante per il periodo estivo (da aprile a settembre).

Tuttavia, considerazioni di tipo statistico consentono di affermare che, supposti noti gli 8.760 flussi orari, disposti in ordine decrescente in un grafico, indipendentemente dal tipo di strada il diagramma risulta avere andamento decrescente molto ripido fino a un determinato punto, dopodiché un andamento quasi orizzontale.

Dal punto di vista economico converrà allora assumere tale punto come traffico orario di progetto, soprattutto se si considera che tale punto corrisponde alla trentesima ora quando l'analisi è effettuata in ambito extraurbano, con ciò ammettendo che la strada risulti sottodimensionata per sole 29 ore l'anno.

Il parametro base per il dimensionamento della piattaforma di una strada extraurbana è quindi il *"traffico della trentesima ora di punta"*.

La stima di tale parametro si basa sulla constatazione che esso assume sempre valori compresi tra il 12% e il 18% del TGM, quindi mediamente si può assumere pari al 15% del TGM.

In ambito urbano si osserva come la brusca variazione del diagramma degli 8.760 flussi orari avvenga intorno alla 500^a ora di punta.

- **Composizione del flusso:** la composizione del flusso veicolare è costituita dall'indicazione percentuale delle diverse tipologie di veicoli che compongono il flusso. La classificazione² è variabile e dipende dall'obiettivo dell'indagine e dal committente che la richiede (Società concessionarie autostradali, ANAS, Enti locali). Una classificazione tipica segue il seguente elenco ed è spesso legata alle caratteristiche fisiche del veicolo: peso totale in tonnellate e lunghezza massima in metri.
 - veicoli a due ruote³;
 - autovetture: veicoli adibiti al trasporto di persone - massimo 9 - con massa complessiva a pieno carico non superiore a 3,5 t e lunghezza inferiore a 5 metri;
 - veicoli commerciali leggeri (VCL): veicoli adibiti al trasporto di merci con massa complessiva a pieno carico non superiore a 3,5 t e lunghezza compresa tra 5 e 10 metri);
 - veicoli commerciali pesanti (VCP): autocarri con massa complessiva a pieno carico superiore a 3,5 t e inferiore a 5 t e lunghezza compresa tra 5 e 10 metri);
 - autobus: veicoli adibiti al trasporto collettivo di persone di lunghezza compresa tra 10 e 12 metri;
 - autoarticolati: veicoli di lunghezza massima pari a 16,50 m o con massa complessiva a pieno carico non superiore a 24 t;
 - autotreni: veicoli di lunghezza massima pari a 18,75 m o con massa complessiva a pieno carico non superiore a 44 t;
 - veicoli eccezionali: veicoli oltre i limiti di sagoma e massa limite imposti dal Codice della Strada.

² Spesso, nella scelta della classificazione dei veicoli, si fa riferimento a quanto proposto nel Titolo III - Dei veicoli - dal Nuovo codice della strada (Decreto Legislativo 30 aprile 1992 n. 285 e successive modificazioni). In particolare per quanto riguarda gli articoli 47 (Classificazione dei veicoli), 61 (Sagoma limite) e 62 (Massa limite) e dai corrispondenti articoli del Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada - Decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992, n. 495.

³ Generalmente tale categoria viene considerata a motore ovvero motorini e motocicli; negli ultimi anni, come conseguenza di una pianificazione urbana sempre più dedicata agli utenti deboli, si registrano indagini che individuano anche i veicoli a due ruote non a motore: le biciclette.

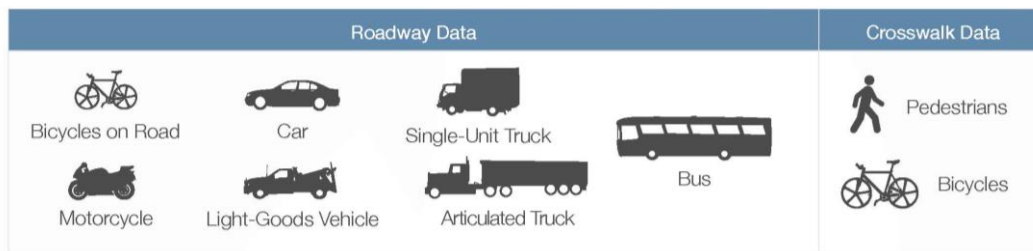


Figura 1. Esempio di classificazione veicoli secondo la FHWA.

La classificazione va scelta con riferimento agli obiettivi del rilevamento che si sta effettuando: in genere i veicoli vanno distinti in veicoli per il trasporto di persone e veicoli per trasporto di merci. All'interno di ciascuna di queste due classi, vanno distinti in relazione al loro impegno di capacità stradale; a tale scopo si fa riferimento al loro *coefficiente di equivalenza*. In questo caso si parla più propriamente di *veicolo equivalente*.

Il termine *Coefficiente di Equivalenza dei Veicoli (CEV)* fu introdotto per la prima volta nell' *Highway Capacity Manual (HCM)* del 1965, che rappresenta il testo più accreditato in ambito internazionale per lo studio del deflusso veicolare. Il concetto di CEV nasce dalla considerazione che, al di là dello spazio fisico di ingombro maggiore rispetto alle autovetture, i mezzi pesanti hanno un impatto superiore nel deflusso di una corrente veicolare. In particolar modo per le strade in forte pendenza, le condizioni di deflusso sono fortemente influenzate dal diverso comportamento rispetto alle autovetture (si pensi ad esempio alle differenti accelerazioni e velocità che i mezzi pesanti hanno su un tratto autostradale in salita). I comportamenti non omogenei tra mezzi pesanti e autovetture all'interno di una corrente di traffico portano ad una caduta di prestazioni in termini di deflusso di cui si cerca di tener conto attraverso l'uso dei CEV. Il CEV è pertanto definito come il numero di autovetture che provocherebbero un effetto equivalente sul deflusso di una generica corrente di traffico composta da mezzi pesanti ed autovetture. Tali coefficienti variano in funzione dei parametri pocanzi descritti e della fonte, in genere comunque si assumono tali intervalli di valori:

Tabella 1 – Intervalli dei Coefficienti di Equivalenza dei Veicoli

Classe veicolo	Valore coefficiente CEV
Biciclette	0,3÷0,5
Veicoli a due ruote (a motore)	0,5
Autovetture	1
Veicoli commerciali leggeri	1,5÷2
Veicoli commerciali pesanti	2÷2,5
Autobus	3,5÷5
Autoarticolato	3÷3,5
Autotreno	3,5÷5

- Velocità del flusso.
 - *Velocità istantanea* (v_i) di un veicolo: è la derivata dello spazio rispetto al tempo nel diagramma di moto $s(t)$ del veicolo.

$$v_i = \frac{d_s}{d_t} \quad (2.1)$$

- *Velocità media temporale* (\bar{v}_t) su di un tratto di strada: è il rapporto tra la lunghezza del tratto ed il tempo impiegato a percorrerlo ovvero è la media delle velocità istantanee dei veicoli che attraversano una sezione stradale in un intervallo temporale.

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (2.2)$$

- *Velocità media spaziale* (\bar{v}_s) su di un tratto di strada: è la velocità media dei veicoli transitanti su di un tronco stradale durante uno specifico intervallo temporale e viene calcolata usando il tempo di percorrenza medio e la lunghezza del tronco.

$$\bar{v}_s = \frac{L}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} \quad (2.3)$$

- *Velocità commerciale* (v_c) su di un certo percorso: è il rapporto tra la lunghezza del percorso ed il tempo impiegato, comprese le eventuali soste.
- *Velocità massima possibile* è la massima velocità con la quale un conducente può percorrere una data strada, nelle prevalenti condizioni di strada, traffico e ambiente, senza superare mai i normali limiti di sicurezza.
- *Velocità massima* (V_{max}): è la massima velocità registrata in una sezione stradale durante un'indagine di traffico; di norma è superiore ai normali limiti di sicurezza.
- *Velocità limite*⁴: velocità entro la quale il conducente deve condurre il proprio veicolo al fine di non incorrere in sanzioni.
- *Velocità operativa o velocità al n-esimo percentile* (V_{85}) (generalmente 85esimo percentile): tale parametro viene correntemente utilizzato per descrivere il comportamento dell'utente medio, riferendosi alle attuali condizioni di guida. Rappresenta la velocità operativa, definita come l'ottantacinquesimo percentile (solo il 15% degli utenti supera la velocità misurata) della distribuzione delle velocità rilevate su un elemento o su un tronco omogeneo di tracciato, in condizioni di flusso libero.

In sintesi, le variabili che sono oggetto di rilevazione sono: il flusso, la sua composizione e la velocità. È evidente come tali variabili sono le stesse della *Teoria del deflusso di traffico*. Tale teoria descrive l'interazione dei veicoli che utilizzano la stessa infrastruttura e le conseguenze che questo effetto ha nel moto dei veicoli all'aumentare del numero di veicoli. Tale fenomeno è chiamato *congestione*, si verifica nella maggior parte dei sistemi di trasporto, determinando in generale un peggioramento delle prestazioni complessive dell'infrastruttura, quali velocità media o il tempo di percorrenza.

⁴ Fare riferimento a quanto proposto nel Titolo V - Norme di comportamento - dal Nuovo codice della strada (Decreto Legislativo 30 aprile 1992 n. 285 e successive modificazioni). In particolare per quanto riguarda gli articoli 141 (Velocità) e 142 (Limiti di velocità) e dai corrispondenti articoli del Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada - Decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992, n. 495.

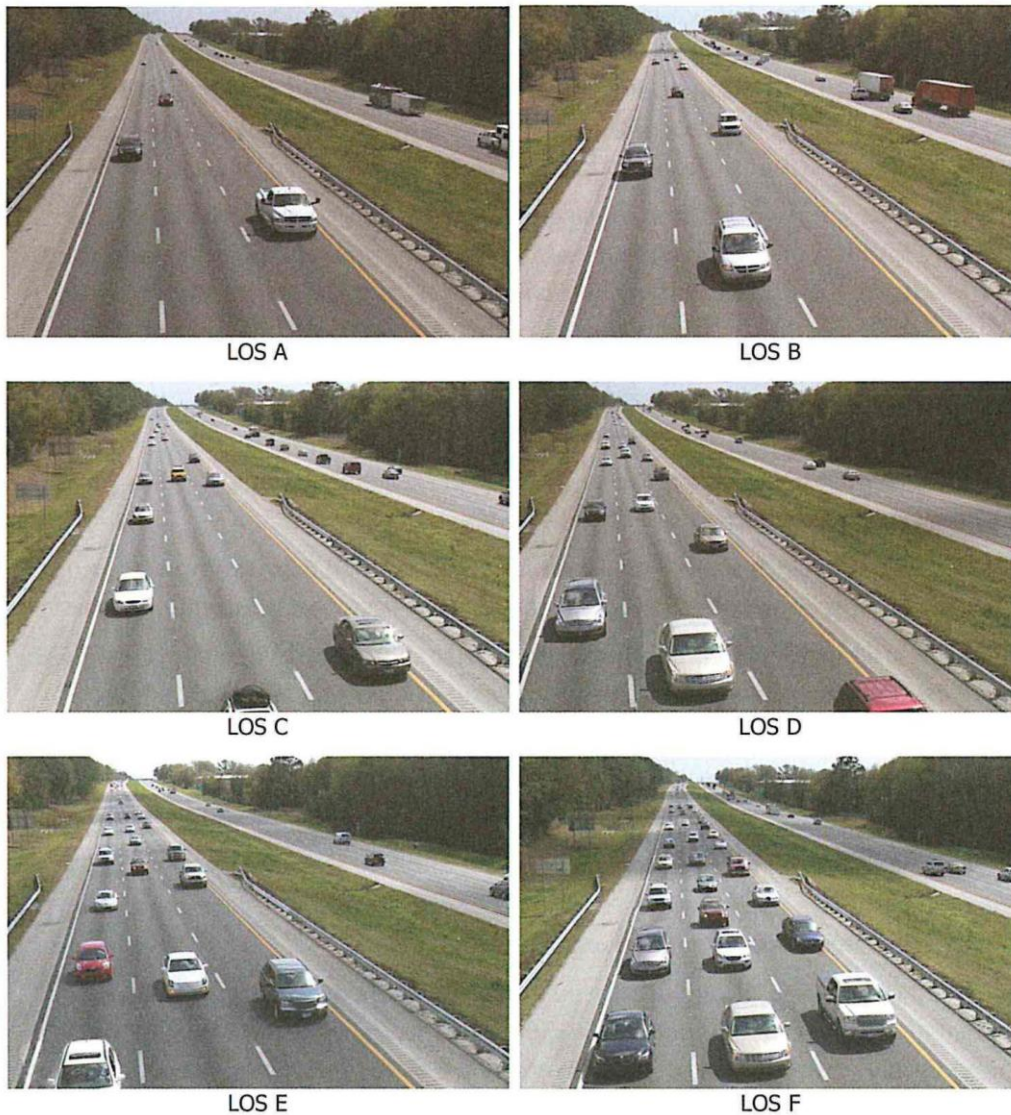


Figura 2. Livelli di servizio per un'autostrada (HCM 2010)

Le definizioni fondamentali sono:

- **Flusso** f (veic/h), è il numero di veicoli che attraversano una data sezione stradale nell'unità di tempo.
- **Velocità** v (km/h), è la velocità media spaziale dei veicoli presenti in un tronco stradale.
- **Densità** k (veic/km), è il rapporto tra il numero dei veicoli presenti in un tronco stradale in un determinato tempo e la lunghezza del tronco stesso.

In condizioni stazionarie tra flusso, densità e velocità (spaziale media) vale l'equazione stazionaria di conservazione, detta anche relazione fondamentale del traffico stradale:

$$f = k \cdot \bar{v}_s \quad (2.4)$$

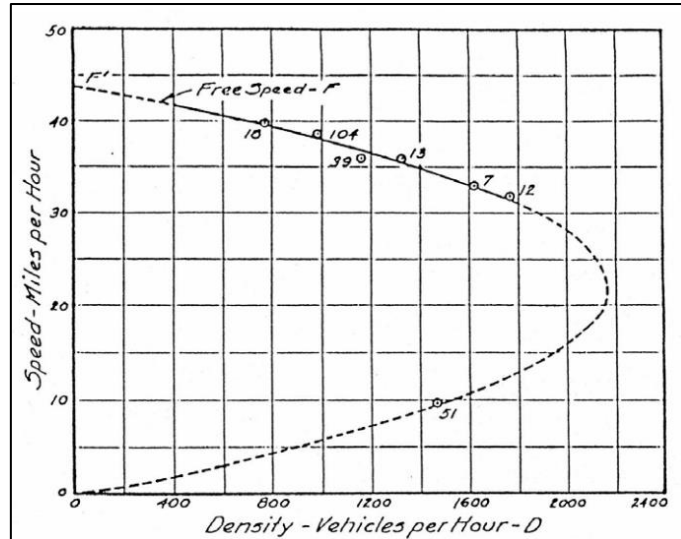


Figura 3. Il primo diagramma fondamentale proposto da Greenshield (Greenshield B. D., 1935).

Esistono diversi modelli per rappresentare la relazione fondamentale; un'espressione matematica del diagramma più conosciuta è quella di Greenshield (Greenshield B. D., 1935). Per tale modello la relazione flusso-velocità è rappresentata dalla seguente equazione:

$$f(v) = k_{jam} \left(v - \frac{v^2}{v_0} \right) \quad (2.5)$$

Dal grafico si osserva come il flusso possa essere prossimo allo zero in due condizioni: quando la densità è prossima a zero (ovvero non ci sono veicoli nel tronco stradale) e quanto la velocità è prossima a zero (i veicoli sono presenti, ma sono fermi o sono in una condizione di arresto-partenza o *stop-and-go* per effetto della *congestione* o *jam*). Nel primo caso la velocità assume il valore massimo (teorico) o velocità a flusso nullo (*free flow speed*) v_0 , mentre nel secondo caso la densità assume valore massimo (teorico) o densità di blocco (*jam density*) k_{jam} . Pertanto, una corrente di traffico, raggiunge il massimo della relazione velocità-flusso quando si verifica il flusso massimo, anche chiamato capacità Q , che può attraversare la strada; i corrispondenti valori di velocità e densità sono detti velocità critica v_k e densità critica d_k .

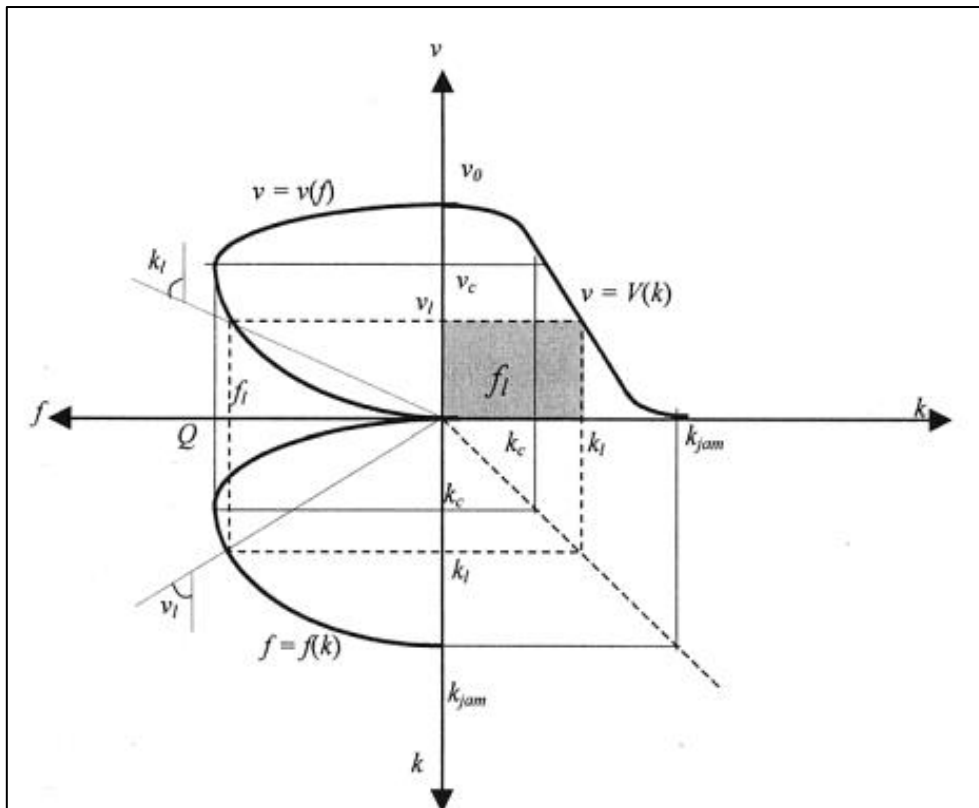


Figura 4. Diagramma fondamentale del traffico: relazioni tra velocità, flusso e densità.

2.3. Metodi e tecnologie classiche per il monitoraggio dei dati di traffico

Descritte le variabili fondamentali su cui indagare, al fine di descrivere compiutamente il traffico stradale, vengono ora le principali tecniche di rilevamento.

I rilievi per il monitoraggio del traffico stradale sono da sempre il punto di partenza per una corretta pianificazione e progettazione delle infrastrutture stradali. Lo studio della tecnica della circolazione (*Traffic Engineering*) è stato da sempre accompagnato da rilievi sul campo delle principali caratteristiche del traffico al fine di validare la corrispondenza dei modelli matematici con la realtà.

La conoscenza dei dati di traffico risulta fondamentale non solo agli ingegneri dei trasporti, ma anche a tutte quelle organizzazioni che, per obblighi normativi o per pianificazione della rete, sono chiamate a gestire e a mantenere il patrimonio stradale italiano. Le differenti modalità messe in campo negli ultimi decenni sono numerose: tubi pneumatici, spire induttive, strumentazioni con tecnologia radar, laser e molte altre.

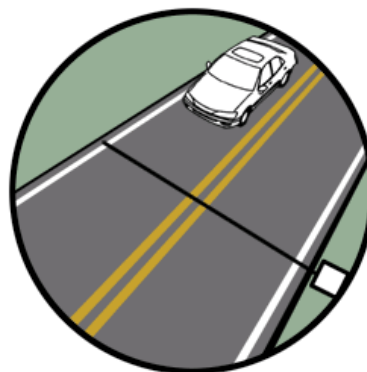
La necessità di raccogliere con continuità e accuratezza dati di traffico, su lunghi periodi ed a tutte le ore (sia diurne sia notturne), ha indotto la ricerca tecnologica del settore a produrre strumenti e sistemi automatici di rilevamento sempre più raffinati.

In linea di principio, un sistema automatico di misura dei parametri del traffico è costituito da quattro componenti base: un rilevatore (anche chiamato dispositivo), un interprete, un registratore ed un elaboratore. Il rilevatore è il componente sensibile alla grandezza che si vuole misurare (passaggio del veicolo, velocità del veicolo, ecc.); per ogni informazione rilevata esso genera un segnale che viene ricevuto e poi decifrato dall'interprete; il segnale codificato viene quindi trasmesso al registratore che,

appunto, registra i dati necessari per l'elaborazione; quest'ultima può effettuarsi o in tempo reale o in una fase successiva, a seconda del tipo di sistema utilizzato.



Conteggio di traffico manuale



Conteggio di traffico automatico

Figura 5. Rappresentazione della modalità di monitoraggio.

Nonostante le tecniche di rilevamento e i dispositivi stessi di monitoraggio stradale siano stati molto sviluppati nel corso degli anni, un dato certo è che la tecnica tutt'oggi ancora molto utilizzata è il rilevamento manuale. A differenza delle prime ricerche nel campo dei trasporti in cui l'operatore era utilizzato per qualsiasi studio, oggi, questo dato vale solamente per alcune tipologie di indagini. Quello che è certo è che non può sostituire lunghe campagne di rilievo ma è valido soltanto per la conoscenza di determinati parametri (per esempio i flussi di svolta) in quanto l'utilizzo dell'operatore umano è la modalità di rilevamento con il minore costo e con il più alto livello di replicabilità e di adattabilità.

È pertanto possibile suddividere le modalità di rilievo delle caratteristiche del flusso stradale in due categorie principali: tecniche di rilevamento manuale e tecniche di rilevamento automatico. Prima di passare alla descrizione di questi due metodi è utile definire meglio quali sono gli obiettivi del monitoraggio e quali sono le variabili da monitorare.

2.3.1. Tecniche di rilevamento manuale

I metodi manuali di acquisizione dei dati di traffico si basano sulla rilevazione diretta eseguita da un operatore umano. Questo approccio è preferito per il conteggio dei veicoli su brevi periodi di tempo, perché l'operatore umano possiede non solo la capacità di rilevare i veicoli e riconoscerne il tipo, ma anche quella di valutare le manovre dei veicoli ed il comportamento del guidatore. Tuttavia, l'osservatore umano presenta dei limiti naturali che possono non garantire la correttezza e l'esattezza delle informazioni rilevate. Il primo è rappresentato dalla non istantanea velocità di registrazione dei dati; infatti, i tempi di reazione relativamente lunghi (variabili tra 0,5 e 2 secondi) non consentono in questo caso un rilievo accurato di eventi che si verificano simultaneamente.

Il secondo limite è da attribuire all'affaticamento, che determina una minore attendibilità all'aumentare del tempo di rilevamento (si ritiene che un addetto al rilevamento sia efficiente per un periodo massimo di circa 3 ore).

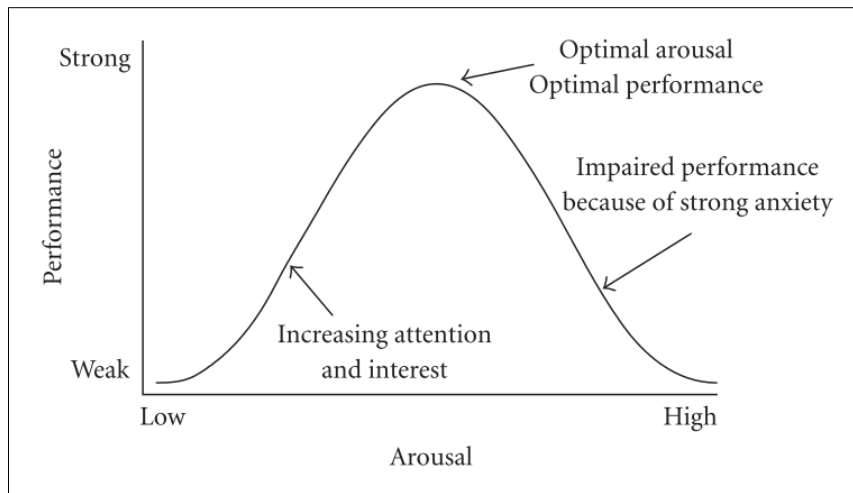


Figura 6. Grafico della legge di Yerkes - Dodson sulla riduzione della capacità di attenzione nel tempo.

Per il motivo suddetto, i metodi manuali di misura dei parametri del traffico sono generalmente utilizzati per rilevamenti di breve durata. Nella teoria classica dell'ingegneria dei trasporti, soprattutto negli anni '50-'60 quando i dispositivi tecnologici erano poco sviluppati, venivano utilizzati gli operatori per il rilevamento del traffico stradale anche sulle sezioni stradali.

La prima tecnica era quella con l'applicazione del metodo dell'*osservatore fisso*: un unico osservatore, posizionato per un tempo T in corrispondenza di una sezione stradale, poteva soltanto effettuare il conteggio dei veicoli in transito per la sezione. Il metodo manuale dell'osservatore fisso rappresenta la più semplice e antica tecnica di valutazione dei parametri caratteristici principali di un flusso veicolare in un tronco stradale (portata, densità, velocità media).

Il rilevamento con il metodo dell'*osservatore mobile*. La tecnica dell'osservatore mobile (elaborata da Wardrop nel 1954) consente la valutazione i principali parametri del flusso veicolare che interessano ciascuno dei due sensi di marcia di un tronco stradale (portata, densità, velocità media, tempo di percorrenza medio). Tale metodo si basa su una serie di rilevamenti effettuati a bordo di un veicolo di osservazione mobile, al quale si fa percorrere il tratto stradale di interesse (lungo L) in ciascuno dei due sensi di marcia. Durante il percorso vengono registrati: i tempi impiegati (in ore) per l'andata e il ritorno - detti t_a e t_r - la differenza s , tra il numero di auto delle quali si è sorpassati e delle quali si sorpassa, e, nel solo percorso di ritorno, il numero n di auto in marcia nel senso opposto. Un'accettabile stima del flusso, espresso in veicoli/ora, nel senso di andata è dato dalla formula:

$$f = \frac{s + n}{t_a + t_r} \quad (2.6)$$

La media dei tempi, espressi in ore, impiegati dai veicoli in andata può essere uguale alla formulazione seguente, che permetterà di conseguenza anche il calcolo della velocità media.

$$\bar{t}_i = t_a - \frac{s}{f} \quad (2.7)$$

È utile sottolineare come questo metodo sia corretto solamente nel caso in cui il tratto sia sufficientemente lungo ed il flusso sia di tipo stazionario.

Si evidenzia, come, grazie all'evoluzione tecnologica attuale, la tecnica di rilevamento con il metodo dell'osservatore mobile, sia oramai obsoleta. Lo stesso, però, non si può dire per la prima tecnica descritta. Il metodo dell'osservatore fisso, infatti, è una delle tecniche tutt'oggi più utilizzate in special

modo per le *indagini su aree ristrette*. È solo grazie alla rapida replicabilità e, soprattutto, del costo operativo basso, che il metodo dell'operatore fisso viene impiegato per le indagini sui nodi. Se da un punto di vista le indagini sui flussi risultino fondamentali sia per lo sviluppo di modelli di deflusso sia per la calibrazione di modelli di traffico, d'altra parte la conoscenza dei flussi sui nodi risultano altrettanto importanti per la pianificazione e la progettazione di un sistema di trasporto.

A completamento di quanto descritto nel paragrafo 2.2., inerente alla domanda di mobilità, si descrivono ora i principali parametri ricavabili da un'indagine sui nodi.

Per quanto riguarda questa tipologia di indagine è possibile replicare parte di quanto già detto per le indagini sui flussi. È pertanto interesse dell'ingegnere di trasporti, con questa tipologia di indagine, indagare sulla quantificazione dei flussi e la loro classificazione. A differenza delle indagini sulla velocità che non possono essere di certo rilevate ai nodi con la tecnica dell'operatore fisso.

Quello che appare subito evidente è la complessità dell'indagine. Se da una parte le indagini sui flussi su sezione sono prevalentemente eseguite su strade con una corsia per senso di marcia e pertanto con due direzioni da indagare (escludendo le strade extraurbane secondarie e le autostrade con più corsie per senso di marcia), lo stesso non si può dire per le indagini sui nodi.

Saranno infatti $n \cdot (n - 1)$ le direzioni sulle quali indagare, con n pari al numero di rami.

Risulta chiaro come in una semplice intersezione semaforizzata, come nel *flussogramma* rappresentato in figura, con soli 4 rami il numero complessivo di flussi da indagare saranno ben 12. Se a questo si aggiunge la classificazione k dei diversi veicoli, generalmente più semplificata rispetto al caso di indagini sui flussi con $k = 3 \div 5$, la campagna di monitoraggio risulta davvero complessa.

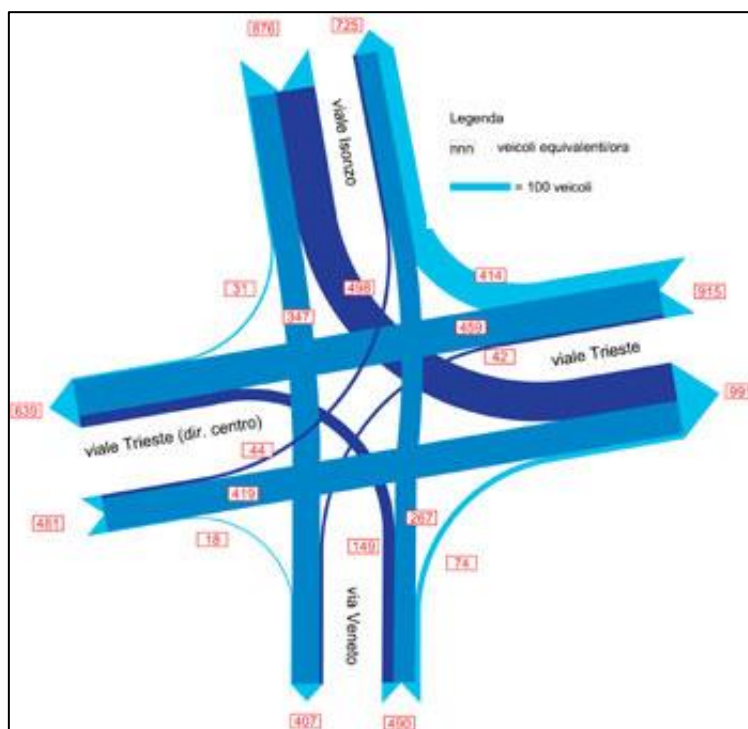


Figura 7. Esempio di flussogramma per un'intersezione a 4 rami

Sarà infatti pari a:

$$k \cdot [n \cdot (n - 1)] \tag{2.8}$$

dove n è il numero di rami e k il numero di classi di veicoli, il numero complessivo di flussi che un operatore fisso dovrà monitorare. Completando l'esempio di intersezione semaforizzata avremo, per esempio con $k = 3$, un numero complessivo di flussi pari a 36. Appare evidente come un singolo operatore non sia sufficiente a monitorare, anche solo per pochi minuti, un'intersezione con 4 rami, dove facilmente si raggiungono $1.500 \div 2.000$ veicoli/ora. È necessario, pertanto, raggruppare un numero adeguato di operatori fissi, generalmente uno per ramo, e dotare loro di appositi strumenti (come i così detti "conta colpi") al fine di facilitarne il compito. Si sottolinea, infine, che a differenza delle indagini sui flussi le indagini sui nodi non vengono prolungate per molte ore o giorni, ma solamente nelle fasce di punta, individuate da precedenti indagini sui flussi con tecniche di rilevamento automatiche.



Figura 8. Immagini conta colpi elettronici

2.3.2. Tecniche di rilevamento automatiche

La necessità di raccogliere con continuità e accuratezza dati di traffico, su lunghi periodi ed a tutte le ore (sia diurne sia notturne), ha indotto la ricerca tecnologica del settore a produrre strumenti e sistemi automatici di rilevamento sempre più raffinati. Le più diffuse tecnologie di rilevamento di uso corrente possono essere distinte in rapporto al tipo di rilevatore adoperato che può essere posto sulla pavimentazione (intrusivo), oppure entro o in prossimità della carreggiata (non intrusivo). La rapida evoluzione tecnologica registrata negli ultimi anni nel campo delle misure dei parametri della circolazione ha consentito la recente sperimentazione di metodi di rilevamento automatici innovativi, basati sul trattamento automatico delle immagini filmate con telecamere. Metodi più avanzati sono basati sul rilievo di segnali/immagini attraverso satelliti.

I più diffusi metodi di rilevamento automatico sono i seguenti:

- tubi pneumatici;
- cavi triboelettrici;
- spire induttive;
- sensori magnetodinamici o VIM (*Vehicle Magnetic Imaging*);
- sensori a microonde;
- sensori a raggi infrarossi;
- sensori WIM (*Weight In Motion or Weighing In Motion* – pesatura dinamica);
- sensori acustici;
- fotografia aerea;
- immagini video;
- tecnologie di tipo satellitare.

Al fine di dare una rappresentazione con maggiore corrispondenza con la realtà, verranno descritti solamente i metodi di rilevamento automatico che sono più diffusi e che coprono una fascia di mercato più ampia.

Alcune ricerche condotte negli Stati Uniti (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2001) hanno stimato che nel mondo sono installati circa 1,59 milioni di strumenti per il rilievo del traffico, che effettuano monitoraggio su circa 1,36 milioni di corsie stradali. L'investimento complessivo è stimato essere attorno a 2,04 miliardi di dollari. La maggior parte di tali strumenti è costituita da spire magnetiche (63%), seguono a distanza i rilevatori ultrasonici (21.3%), che cominciano ad avere larga diffusione. I rilevatori radar, a microonde, piezoelettrici, a raggi infrarossi e i sensori video sono invece scarsamente presenti sul mercato rispetto ai primi due.

Il rilevamento con spire induttive

Il sistema di rilevamento dei dati del traffico con spire ad induzione magnetica è, oggigiorno, la tecnica di misura più ampiamente utilizzata.

Tale sistema risulta costituito da una o più spire induttive posizionate in corrispondenza della carreggiata e collegate ad un apparecchio rilevatore posizionato ai margini della carreggiata. Una spira induttiva è un avvolgimento di filo elettrico costituita normalmente da uno o due giri di filo disposti secondo una forma quadrata o rettangolare (con lati di 2-3 m); il filo utilizzato è quello usuale degli impianti elettrici, con sezione di almeno 2,5 mm² per ragioni di resistenza meccanica.

Le spire possono essere installate sopra la pavimentazione stradale per rilevamenti temporanei, oppure annegate nel manto stradale, con la funzione di rilevatori permanenti. Nel primo caso, il filo è fissato alla pavimentazione stradale con appositi ganci e coperto con strisce di bitume al fine di impedirne il danneggiamento al passaggio dei veicoli.

Nel secondo caso, il filo è alloggiato all'interno di solchi (con profondità massima di 20 cm) praticati nella pavimentazione bituminosa per mezzo di una fresa. Le spire interrate sono sicuramente più protette rispetto a quelle appoggiate sulla superficie stradale, ma ciò non esclude che siano soggette a tensioni e torsioni, dal momento che il letto stradale tende a muoversi al passaggio dei veicoli pesanti e ai cambiamenti di temperatura. In ogni caso, una corretta installazione garantisce alle spire annegate una elevata durata. Una singola spira installata su una corsia stradale consente la misura della portata veicolare sulla base del seguente principio di funzionamento. La corrente elettrica fornita da un generatore a batteria (di cui è dotato l'apparecchio di misura) attraversa il filo costituente la spira, generando un campo magnetico. Quando la massa metallica di un autoveicolo transita sulla spira si verifica una variazione di questo campo magnetico riducendo l'intensità della corrente circolante nella spira. Questa variazione produce un segnale elettrico (che dura per tutto il tempo di permanenza del veicolo nella zona di rilevazione) consentendo così la segnalazione della presenza del veicolo e quindi il conteggio.

L'apparecchio registratore è dotato di un timer interno per cui il conteggio può essere tradotto in portate veicolari su prefissati intervalli di tempo. È opportuno precisare che il tempo di occupazione da parte di un veicolo della zona di rilevazione dipende dalla lunghezza del veicolo stesso, nonché dal suo tempo di passaggio.



Figura 9. Esempio di spire induttive su un manto stradale

I vantaggi della tecnica di rilevamento con spire induttive risiedono nella facilità di installazione dei sensori e nel costo contenuto, imputabile in massima parte ai lavori di installazione. Questa tecnica di misura può comportare, tuttavia, una certa distorsione dei dati; infatti, le spire conteggiano accuratamente i veicoli viaggianti ad alta velocità, ma generano errori considerevoli nei casi di basse velocità o di veicoli in fase di arresto.

Il rilevamento con tubi pneumatici

La tecnica di rilevamento con tubi pneumatici rappresenta il più antico sistema automatico di misura delle portate stradali. Essa fa ricorso ad un sensore costituito da un tubo pneumatico posizionato sulla carreggiata e collegato ad un apparecchio contatore disposto al margine della strada. Il tubo pneumatico è costituito da un tubo di gomma pieno d'aria, disponibile, a seconda delle applicazioni, in varie lunghezze e con diametri interni da $\frac{1}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " (considerato lo spessore, il suo diametro esterno è dell'ordine dei 12 mm); esso è steso sulla pavimentazione stradale in modo ortogonale alla direzione dei flussi di traffico ed è tenuto in posizione da appositi ganci fissati sulla superficie bituminosa.

Quando le ruote di un veicolo schiacciano il tubo pneumatico, al suo interno si genera un'onda di pressione che si propaga verso le estremità e, giunta in corrispondenza dell'apparecchio di misura, aziona un interruttore a membrana (*air switch*) inserito in un circuito elettrico alimentato a batteria generando un impulso nel contatore. L'apparecchio rilevatore effettua il conteggio dei veicoli facendo corrispondere ad ogni coppia di azionamenti dell'interruttore a membrana (ovvero al passaggio consecutivo di due assi sul tubo) un'unità di vettura equivalente; i conteggi sono pertanto espressi in unità di vetture equivalenti.



Figura 10. Esempio di installazione di tubi pneumatici.

I vantaggi del rilevamento con tubi pneumatici risiedono nella facilità di installazione e rimozione dei sensori, nel costo contenuto e nella possibilità di garantire un funzionamento con batterie di autonomia di alcuni giorni. Gli svantaggi di tale tecnica sono però diversi:

- l'imprecisione di conteggio nel caso di flussi elevati (errori superiori al 20 %);
- l'impossibilità di ricavare i dati del transito dei veicoli multi-assiali (infatti un camion con sei assi viene rilevato come tre veicoli equivalenti);
- l'incapacità, quando il tubo è fissato su una strada a più corsie, di selezionare gli impulsi d'aria e ripartirli per corsia di appartenenza (tale problema potrebbe comunque essere superato con l'utilizzo di una logica elettronica in grado di effettuare la discriminazione);
- il rischio di rottura meccanica del tubo ad opera soprattutto dei mezzi pesanti;
- il pericolo di stacco del tubo dalla pavimentazione stradale, il che potrebbe trasformare il tubo stesso in una specie di frusta con conseguenti rischi per pedoni e motociclisti.

Il rilevamento con cavi triboelettrici

La tecnica di rilevamento con cavi triboelettrici è molto simile a quella che fa ricorso a tubi pneumatici. Tale sistema presuppone l'impiego di un cavo triboelettrico disposto nella pavimentazione stradale (in direzione ortogonale ai flussi di traffico) e collegato ad un rilevatore posizionato al margine della strada. Il cavo triboelettrico è costituito da un conduttore centrale (in fili di acciaio) circondato da materiale dielettrico, da un anello esterno di fili di acciaio intrecciati liberamente attorno al dielettrico e da un robusto rivestimento di plastica esterno.

Il rilevamento con sensori magnetodinamici

I sensori magneto-dinamici o sensori VMI (*Vehicle Magnetic Imaging*) sono più moderni sensori di tipo intrusivo capaci di rilevare una vasta gamma di dati di traffico (passaggio dei veicoli, velocità di transito, lunghezza veicolare, tempo di occupazione della sezione stradale, distanziamento temporale).

Un sensore magneto-dinamico ha l'aspetto di una piastra rettangolare di piccole dimensioni, ed è costituito essenzialmente da un microprocessore alimentato da batterie ricaricabili. Se impiegato come rilevatore semi-permanente (ovvero per rilevamenti prolungati su una stessa sezione stradale), il sensore VMI deve essere alloggiato all'interno di una fessura verticale praticata nella pavimentazione stradale, in maniera tale che esso risulti protetto non solo nei confronti delle sollecitazioni derivanti dal transito dei veicoli ma anche nei riguardi di eventuali atti vandalici. Se utilizzato invece come rilevatore portatile (ossia per rilevamenti di breve durata da svolgersi in diverse sezioni stradali) il sensore magnetodinamico può essere installato sulla superficie del piano viabile, purché inserito all'interno di un idoneo alloggiamento metallico da fissare con appositi chiodi alla pavimentazione bituminosa; l'alloggiamento deve essere progettato per resistere alle sollecitazioni e va installato sovrapponendo ad esso un'adeguata copertura protettiva. In entrambi i casi, il sensore VMI deve essere posizionato in corrispondenza della mezziera della corsia stradale oggetto di rilevamento.



Figura 11. Esempio di prodotto VMI e installazione su manto stradale

I sensori magneto-dinamici rilevano il passaggio dei veicoli stradali basandosi sull'analisi della variazione del campo magnetico terrestre, indotte dalla interferenza delle componenti metalliche del veicolo. In corrispondenza di ogni cambiamento del campo magnetico terrestre indotti dall'influenza magnetica del veicolo transitante, i circuiti GMR (*Giant Magneto Ratio*) presenti all'interno del rilevatore producono un segnale elettrico, il quale risulta direttamente proporzionale alla massa magnetica veicolare che lo ha provocato.

Tali segnali elettrici sono analizzati dal microprocessore del sensore e quindi immagazzinati nella sua memoria interna. Ultimata la registrazione in sito, i dati memorizzati possono essere trasferiti ad un computer che, utilizzando un appropriato software di analisi, organizza e restituisce un'ampia gamma di informazioni sul flusso di traffico rilevato; in particolare si possono ottenere conteggi veicolari, misure di velocità, tempi di occupazione, lunghezze veicolari, distanziamenti temporali.

I vantaggi della tecnica di rilevamento con sensori VMI risiedono nella facilità di installazione e rimozione dei rilevatori (dovuta alle loro dimensioni contenute), nella possibilità di garantire lunghi periodi di conteggio grazie al funzionamento con batterie di autonomia elevata (circa 90 giorni), nella precisione di conteggio, nella possibilità di rilevare veicoli viaggianti sia ad alta che a bassa velocità, nonché nella possibilità di acquisizione di ulteriori dati di traffico di interesse.

Il rilevamento con sensori a microonde

In alternativa ai tradizionali sensori installati sulla pavimentazione bituminosa, il rilevamento del passaggio e della velocità dei veicoli attraversanti una sezione stradale può essere effettuato mediante l'impiego di moderne tecnologie fuori terra, come i sensori a microonde o *microwave radar*. Tali sensori possono essere di due tipi. La prima tipologia è rappresentata dal *Doppler microwave radar*, ovvero dal radar ad effetto Doppler. Il dispositivo, chiamato anche "cinemometro", è costituito essenzialmente da un'antenna direzionale che emette, in un fascio assai ristretto, onde elettromagnetiche con frequenza costante dell'ordine dei 10 GHz (microonde); l'antenna ha anche una funzione ricevente e viene installata fuori dalla sede viaria, fissandola o ad un palo posto a bordo strada o ad un portale già esistente oppure al di sotto di un cavalcavia sovrastante la strada stessa.

Il principio di funzionamento del sensore si basa sull'effetto Doppler-Fizeau, consistente nella modificazione della frequenza di un'onda elettromagnetica in presenza di moto relativo tra sorgente e ricevente. In dettaglio, quando l'onda (di frequenza f) emessa dall'antenna (sorgente fissa) incontra un veicolo in transito, quest'ultimo, a causa dell'effetto Doppler, riceve un'onda di frequenza variata (f'); una frazione di quest'onda viene riflessa dal ricevente e, sempre per il principio Doppler, viene rilevata dall'antenna con frequenza nuovamente variata (f''): in tal caso, infatti, il veicolo si comporta da sorgente mobile di onde di frequenza f' mentre l'antenna funge da ricevente fisso. In definitiva, la frequenza f'' dell'onda riflessa ricevuta dall'antenna risulta differente da quella dell'onda emessa (f) e il rilevamento da parte del sensore di tale variazione di frequenza denota il passaggio del veicolo. La differenza tra la frequenza emessa e la frequenza riflessa viene chiamata "frequenza Doppler-Fizeau" (F_d); essa risulta proporzionale alla velocità istantanea v del veicolo rilevato, inversamente proporzionale alla lunghezza dell'onda emessa λ e dipende inoltre dall'angolo φ che il fascio d'onde emesso forma con il vettore velocità del veicolo; in altri termini:

$$F_d = f'' - f = \frac{2 \cdot v \cdot \cos\varphi}{\lambda} \quad (2.9)$$

dove F_d è espressa in Hz, v in m/s, λ in m e φ è, in genere, assunto pari a 25°.

In virtù della proporzionalità tra la “frequenza Doppler-Fizeau” e la velocità del veicolo, il sensore a microonde è in grado di effettuare non soltanto il conteggio dei veicoli che attraversano il suo campo di rilevamento, ma anche la misura diretta della loro velocità istantanea.



Figura 12. Esempio di prodotto rilevatore con tecnica radar.

La precisione di rilevazione delle velocità da parte di tale sensore è di circa 2 km/h fino a 100 km/h; tuttavia, una tolleranza di 10 km/h è accettata. Va inoltre sottolineato che i *Doppler microwave radar* non possono rilevare i veicoli fermi o viaggianti a velocità molto basse (approssimativamente inferiore a 3 km/h). La seconda tipologia di sensori a microonde è rappresentata dal *true-presence microwave radar*. La differenza sostanziale rispetto al primo tipo di radar a microonde risiede essenzialmente nella frequenza dell'onda elettromagnetica emessa; mentre il *Doppler microwave radar* emette un'onda con frequenza costante, il *true-presence microwave radar* emette invece un'onda continua a frequenza modulata, la cui frequenza cioè varia continuamente nel tempo. Oltre al conteggio dei veicoli attraversanti il suo campo di azione ed alla misura diretta delle loro velocità, tale tipo di sensore consente di rilevare anche i veicoli fermi, per cui se collegato ad una centrale di controllo remota permette di segnalare in tempo reale eventuali incidenti. Entrambe le tipologie di radar a microonde presentano il vantaggio di non essere influenzate dalle condizioni atmosferiche, evitando problemi di degrado delle prestazioni a causa del maltempo o della nebbia. Tuttavia, tali sensori risultano più costosi rispetto ai tradizionali rilevatori installati sulla superficie stradale, anche se nel lungo termine possono dimostrarsi più economici grazie al modesto onere di manutenzione.

Il rilevamento con sensori WIM

I sensori WIM (*Weight In Motion*) rappresentano quella classe di detectors a pressione capaci di effettuare la pesatura dinamica dei veicoli in transito. Intraprese a partire dagli anni 70 per rispondere alle esigenze di classificazione dei veicoli e di repressione delle infrazioni sui carichi d'asse, le ricerche tecnologiche hanno portato negli ultimi anni allo sviluppo di una vasta serie di rilevatori WIM, tra i quali si segnalano i cavi piezoelettrici, le piastre capacitive ed i sensori a celle di carico.



Figura 13. Esempio di prodotto WIM

Vengono infine descritte le ultimi tre tipologie di rilevamento automatico: la fotografia aerea, l'immagine video e la tecnologia satellitare. Sebbene questi metodi non interessino una fascia significativa di mercato, rappresentano tecnologie sempre maggiormente utilizzate nella ricerca scientifica.

Nello specifico del presente lavoro, in particolar modo, le riprese aeree e il trattamento di immagini video, vengono coniugate in un unico dispositivo, descritto nel capitolo seguente, denominato *Sistema aeromobile a pilotaggio remoto*.

Il rilevamento con fotografia aerea

Nella seconda metà del Novecento si è andato diffondendo l'uso della fotografia aerea come strumento di conoscenza di massima delle caratteristiche e dei problemi del territorio. Nell'ambito dell'ingegneria del traffico, la fotografia aerea può essere considerata una particolare tecnica di osservazione ed analisi dei flussi di traffico di una porzione territoriale anche molto ampia; essa consente di risalire ai parametri principali (densità, velocità media e portata) del flusso veicolare di ciascun tronco dell'area di studio, nonché di valutare, con opportune metodologie, ulteriori parametri di interesse (ritardo agli incroci, durata del tempo di attesa in coda, percentuali delle manovre di svolta, ecc.).

Le fotografie aeree (fotogrammi) sono scattate da un aereo in volo orizzontale con speciali attrezzature fotografiche a fuoco fisso e scatto automatico. Tale monitoraggio sfrutta la tecnica dell'aerofotogrammetria, di cui si rimanda a testi specifici.

Dall'osservazione e analisi delle immagini fotografiche scattate lungo un tronco stradale (fotointerpretazione), è possibile risalire in primo luogo alla valutazione della densità veicolare k . La media spaziale della velocità v del flusso è ricavabile a partire dalla valutazione delle velocità medie dei singoli veicoli transitanti nel tronco stesso; queste ultime sono calcolate osservando la posizione assunta nelle diverse prese da veicoli di facile individuazione e determinando gli spazi percorsi nel tempo noto trascorso tra gli scatti. La

conoscenza della densità e della media spaziale della velocità in un tronco stradale consente di risalire al flusso veicolare q , attraverso la relazione fondamentale del deflusso, descritta precedentemente in [2.4].

Le difficoltà legate alla tecnica della fotografia aerea sono rappresentate essenzialmente dai costi elevati, dall'influenza delle condizioni meteorologiche, dalla durata limitata della ricognizione aerea (ordine di mezz'ora), dalla possibile copertura nei fotogrammi di alcuni tronchi stradali (a causa della non sempre possibile ortogonalità tra l'asse della camera da presa e la superficie terrestre), nonché dal non facile lavoro di fotointerpretazione.

Il rilevamento con immagini video

Le tradizionali tecnologie di rilevamento automatico del traffico veicolare sinora analizzate offrono l'indubbio vantaggio di consentire misure prolungate nel tempo e con un buon livello di affidabilità, ma presentano gli inconvenienti di essere adatte al rilievo di pochi specifici parametri del deflusso (per lo più portata e velocità) e di avere un dominio spaziale di analisi piuttosto ridotto (rappresentato dalle sole sezioni stradali in cui sono posizionati i sensori di rilevamento). Le esigenze di superare i limiti suddetti hanno indirizzato, ormai da diversi anni, la ricerca scientifica verso lo studio e la sperimentazione di sistemi innovativi di rilevamento, basati su strumenti e tecnologie avanzate in grado, altresì, di accrescere i livelli di precisione ed affidabilità. Attualmente, gli sforzi più importanti della sperimentazione nel campo dei rilevatori di traffico sono rivolti all'affinamento dei sistemi di monitoraggio video utilizzando come sensori le telecamere.



Figura 14. Esempio di installazione di telecamere per il monitoraggio del traffico.

Intraprese negli Stati Uniti negli anni settanta e intensificate a livello internazionale a partire dagli anni 80, le ricerche su tali sistemi hanno raggiunto in quest'ultimo decennio risultati significativi che lasciano ancora intravedere nuove possibilità di sviluppo.

Il crescente interesse verso la tecnica di video-sorveglianza del traffico stradale è strettamente legato agli enormi vantaggi che essa può offrire rispetto ai sistemi di rilevamento tradizionali; tale tecnica, infatti, consente:

- fornire una grande quantità di informazioni, rendendo possibile il rilevamento non soltanto dei classici parametri del deflusso veicolare (quali portata, velocità e densità) ma anche di dati di traffico impossibili o difficoltosi da acquisire con i metodi tradizionali (quali tipologia dei veicoli in transito, tasso di occupazione di un tronco stradale, presenza e lunghezza di coda, manovre di svolta, cambi di corsia, arresto dei veicoli, ecc.);
- di avere un esteso dominio spaziale di analisi, il che rende possibile non soltanto rilevamenti puntuali su sezioni di infrastruttura, ma anche il monitoraggio di un ampio tratto del ramo stradale di interesse;
- di migliorare la qualità delle informazioni, potendo garantire, in condizioni ordinarie, percentuali di errore molto contenute;
- di effettuare applicazioni multiple, che vanno dal monitoraggio dei flussi di traffico alla sorveglianza dello stato e delle condizioni dell'infrastruttura viaria osservata.

In linea generale, un sistema di monitoraggio video si basa sull'impiego di telecamere, le quali consentono di rilevare con continuità le scene di traffico che si svolgono su un tronco stradale. Le telecamere offrono dunque una rappresentazione spazio-temporale del deflusso veicolare che non ha eguali in termini di informazione potenziale. Tuttavia, la determinazione dei parametri del traffico a partire dalle immagini filmate risulta tutt'altro che semplice e immediata.

Per ottenere le informazioni di interesse occorre infatti un'attenta analisi ed elaborazione delle immagini provenienti dalle telecamere; in altre parole, è necessario un "trattamento" del filmato attraverso delle metodologie rigorose che consentano sia di interpretare il contenuto di ciascuna immagine (analisi spaziale) sia di correlare sequenzialmente i contenuti delle immagini stesse (analisi temporale).

Il rilevamento mediante tecnologie di tipo satellitare

Da diversi anni, lo sviluppo della telematica applicata al trasporto stradale consente l'installazione sui veicoli di terminali di bordo dotati di sistemi di localizzazione satellitare e collegati via etere a centrali operative remote. Lo scopo della telematica di bordo è quello di garantire agli utenti della strada sia servizi di assistenza e protezione, sia servizi di informazione (infomobilità). I primi rispondono alle esigenze degli automobilisti di poter essere soccorsi in caso furti, aggressioni, incidenti stradali, malori e avarie meccaniche; i secondi permettono agli utenti della strada di ricevere in tempo reale notizie e informazioni utili sul percorso da seguire o sul comportamento da mantenere.



Figura 15. La nuova frontiera: video satellitari.

Le tecnologie alle quali si fa riferimento in questo paragrafo si basano generalmente sull'abbinamento di un sistema di telecomunicazioni (tipo GSM *Global System for Mobile communications*) e di un sistema di identificazione o localizzazione satellitare (tipo GPS).

Fino ad ora, la tecnica di rilevamento dei dati di traffico con l'impiego di veicoli capaci di ricevere segnali dai satelliti hanno avuto carattere essenzialmente sperimentale; di recente alcune sperimentazioni sono state orientate alla stima dei tempi di viaggio per il tramite di un campione di veicoli test, fornendo risultati nel complesso incoraggianti.

2.4. Tecniche innovative per il monitoraggio dei dati di traffico

Il ricercatore che vuole studiare la mobilità e il traffico, a fatica riesce a reperire le informazioni sulle nuove forme di mobilità; spesso si affida alle applicazioni mobili di supporto alla navigazione (Maps e Waze by Google, TomTom, Here Maps, Infoblue & Octo Telematics, Viasat, Movit by Intel, Shotl, Flitsmeister e Mapbox) che utilizzano i dati condivisi dagli utenti, per fornire informazioni in tempo reale e migliorare

gli algoritmi di routing. Shotl e Movit, sono recenti realtà che forniscono le prime interazioni tra sistemi di mobilità differenti ed offrono un supporto alla navigazione.

Quasi tutte le applicazioni forniscono anche l'accesso ai dati, tramite API, ad utenti professionali (sotto forma dei c.d. FCD - *Floating Car Data*) che possono integrare mappe, dati, informazioni sulle proprie applicazioni oppure fornire analisi sul traffico. Tali applicazioni, a seconda del provider, forniscono due tipi di dati: posizione in tempo reale (da qui derivano velocità e tempi di percorrenza) e livelli di traffico (c.d. *traffic tiles*). Alcuni provider (TomTom, Infoblu e Viasat) forniscono anche l'entità del campione rilevato. Nessuna app offre sistemi di incentivazione ad utilizzo di forme alternative di mobilità e il dato "elementare" dei volumi di traffico in termini di veicoli/ora. Tale informazione, sebbene sia molto tecnica e complessa da stimare, permetterebbe di fornire a molti decisori un prezioso elemento per una corretta valutazione e pianificazione del traffico.

Per tale informazione è necessario affidarsi a servizi professionali suddivisi a loro volta in postazioni fisse di rilevamento oppure *on demand*. Entrambe le categorie utilizzano le stesse tecnologie (spire induttive, radar, telecamere, scanner Bluetooth & WiFi e termocamere) ma con differente modalità di installazione: fissa o temporanea. La prima è utilizzata dalle concessionarie autostradali, agenzie del traffico, città metropolitane, enti pubblici per ottenere informazioni in tempo reale sulla propria rete di competenza. Le postazioni temporanee o mobili sono invece servizi affidati a liberi professionisti o società di consulenza sul traffico e trasporti che forniscono dati dettagliati su aree di limitata estensione e con un numero di postazioni di rilevamento molto basso rispetto alla reale estensione delle strade. Tali informazioni non vengono condivise tra gli utilizzatori e sono locali.

Inoltre, vi è da evidenziare un aspetto più di tipo sociale che tecnico.

L'attività di monitoraggio e di analisi che si intende sviluppare opera primariamente nel settore dello studio dei dati per fornire una conoscenza dei livelli di traffico. Attualmente le campagne ed analisi di traffico sono richieste da parte prevalentemente di pubbliche amministrazioni e da società di investimento private. Nel primo caso sono a corredo di progettazione o di studi di nuove viabilità comunali e sovracomunali oppure all'interno di incarichi più importanti nel campo della pianificazione dei trasporti (Piani Urbani del Traffico, Piani Urbani della Mobilità Sostenibile, Piani Regionali dei Trasporti, etc.). Nel secondo caso è la normativa che richiede monitoraggi di traffico: al momento di apertura di nuove strutture di vendita medio-grandi, lo studio di impatto sulla viabilità e lo studio di interventi di viabilità risultano obbligatori. Gli studi di traffico possono essere richiesti anche a corredo di piani di investimenti economici, per progetti stradali strategici (nuove autostrade o per rinnovo di concessioni autostradali) e per valutare la redditività di nuove strutture commerciali (catene di media e grande distribuzione).

Le motivazioni principali di una scarsa diffusione di tali studi potrebbero essere i seguenti.

- La scarsa consapevolezza del dato di traffico stradale e dei benefici che una riorganizzazione accurata potrebbe portare alla comunità. Il traffico, spesso assimilato alla sola congestione delle auto, come per la sicurezza stradale (incidenti), sono elementi dati per "inevitabili" dalla comunità: un costo da pagare (non solamente in termini di consumo del mezzo o dei pedaggi autostradali) per avere la comodità di spostarsi liberamente. Questa consapevolezza, in realtà, grazie alle nuove forme di mobilità (Mobility as a Service - MaaS) e all'attenzione della difesa dell'ambiente (da qui le politiche per la riduzione del traffico), sta registrando un interesse sempre maggiore da parte non solo delle autorità competenti in materia ma anche dei cittadini.
- La complessità nel rilevamento dei dati e nell'utilizzo di strumentazioni (più o meno complesse) sono le cause di un allontanamento dell'interesse generale. Le operazioni di monitoraggio ed analisi del traffico, spesso lasciate ad esperti del settore (ingegneri del traffico), e viste più come un obbligo che una vera e propria risorsa, non fanno che aumentare il distacco del trattamento di queste tematiche tra i tecnici professionisti e la popolazione stradale (quella che alla fine

utilizza sotto varie forme ogni giorno la strada). Generalmente, le tematiche che non vengono discusse in un contesto sociale sono quelle di cui si conoscono meno informazioni o, apparentemente, sono le più complesse da trattare. Anche della voce "complessità" è possibile avere una visione differente. Grazie alla diffusione delle conoscenze tramite internet e alla possibilità di raggiungere un elevato numero di utenti, potenzialmente anche tematiche non immediate possono essere di interesse generale. Se venissero dati strumenti semplici per arrivare a misurare e a comprendere l'importanza del dato di traffico, potrebbe essere possibile che le persone si interesserebbero a capire quali siano i fenomeni che regolano il traffico nel percorso quotidiano.

I costi elevati. La strumentazione che la società incaricata di monitoraggi di traffico ha dovuto acquistare per avviare l'attività, la necessità di avere nozioni tecniche non facili da ottenere e la bassa offerta di aziende capaci di offrire tale servizio hanno come conseguenza costi mediamente alti. Difficilmente una rilevazione semplice di traffico costa meno di un migliaio di euro. Se si ragiona poi su campagne di traffico con differenti postazioni (su strada o su intersezione) per avere un'idea generale del traffico (spesso solo sulle principali direttrici e negli orari di punta) su una città di media dimensione (es. 50.000 abitanti) i costi possono arrivare facilmente alla decina di migliaia di euro. È evidente che tali costi possono essere sostenuti da chi ha interesse al miglioramento della viabilità (pubbliche amministrazioni) o da chi ha l'obbligo per legge redigere tali campagne di monitoraggio (investitori privati), ma difficilmente sono a disposizione su larga scala facilmente accessibili. Il risultato sono informazioni molto dettagliate, di quantità limitate rispetto all'estensione totale della rete stradale, con aggiornamenti saltuari (spesso ogni 5-10 anni oppure oltre) e con scarsa diffusione della conoscenza del dato stesso. Inoltre, queste informazioni rilevate sul campo vengono successivamente rielaborate con modelli matematici (modelli di simulazione del traffico) che permettono di stimare i dati anche su strade nelle quali il campionamento non è stato eseguito. Tale aspetto, utile per avere una visione globale della città, introduce ulteriori elementi di incertezza al dato realmente rilevabile sulle strade reali.

2.4.1. DataFromSky

La diffusione mondiale dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (APR), o *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* o semplicemente droni, ha investito in maniera massiccia anche il panorama italiano. Dal punto di vista professionale, tale tecnologia sta segnando una rivoluzione di indubbio interesse soprattutto per il settore dell'ingegneria civile. Rilievi fotogrammetrici, monitoraggi ambientali e, nel settore dei trasporti, rilievi avanzati del traffico stradale sono oramai alla portata delle società di ingegneria.

Si immagini di avere la possibilità di osservare il traffico da nuova prospettiva: quella aerea. Quali potrebbero essere le informazioni rilevabili? Come e quanto si modificherebbero le scelte progettuali? Queste sono alcune delle domande che il gruppo di lavoro si è posto all'inizio della progettazione del sistema.

DataFromSky è un sistema completo che permette di effettuare, grazie all'acquisizione di un video aereo tramite APR, complesse analisi di traffico di un'intersezione o di un'area di traffico. Al di là delle differenti modalità di volo, delle conoscenze richieste in campo aeronautico e sulle nuove procedure normative che verranno descritte nella presente relazione, ciò che ha richiesto maggiore sforzo è stata l'analisi automatica delle immagini video aeree.

Pur esistendo alcuni software per il tracciamento di oggetti, per lo più utilizzati nel campo della fisica sperimentale, non esisteva uno strumento che potesse elaborare specificamente rilievi di traffico da droni. La società RCE Systems, con sede a Brno in Repubblica Ceca, ha così deciso di mettere in campo le proprie competenze in materia di *computer vision* e di avviare all'inizio del 2014 lo sviluppo di specifico applicativo.

Gli algoritmi di analisi hanno richiesto un lungo studio e sono stati sviluppati da un team di ex ricercatori della Facoltà di Ingegneria Civile di Brno. La successiva collaborazione con lo studio Trafficlab ha permesso di raffinare gli algoritmi e di adattare il software alle reali necessità dell'ingegneria dei trasporti. L'attività di divulgazione commerciale è passata attraverso la partecipazione di importanti appuntamenti fieristici sul tema, quali il Dronitaly 2014 di Milano e il *Smart Mobility Forum* edizioni 2014 e 2015. Entrambi gli appuntamenti, costellati da seminari, convegni e incontri con gli utilizzatori finali hanno riscosso un notevole successo e hanno permesso di affrontare i primi studi pilota anche in Italia.

I sistemi APR sono sicuramente interessanti in quanto abbattano notevolmente i costi di cattura dei flussi video, ma va detto che hanno limiti (in termini di volumi di spazio per il volo) imposti dalla normativa italiana emessa dall'Enac dal "*Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto*" in vigore dal 30/04/2013. Attualmente esistono due volumi di spazio: V70 (70 m di altezza massima dal terreno e raggio di 200 m) e V150 (150 m di altezza massima dal terreno e raggio di 500 m). A queste vanno aggiunte alcune limitazioni in funzione del rischio: operazioni specializzate critiche e non critiche. La definizione di operazioni specializzate critiche è comprensiva, anche se non in modo esaustivo, di operazioni che si svolgono in aree che prevedono il sorvolo su aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani e infrastrutture e dove sono in vigore limiti di spazi aerei. Al momento della stesura del presente lavoro, esistono solamente due operatori abilitati da Enac per voli in tali aree (sicuramente le aree più interessanti per i rilievi di traffico). Al di là delle problematiche sulle aree, attualmente è possibile volare in ambito urbano mettendo in sicurezza l'area.

Il piano di volo

Il primo passaggio per eseguire analisi di traffico avanzate attraverso l'analisi video è essere in possesso del flusso video. Sebbene le attuali caratteristiche ottiche delle videocamere in commercio, anche di fascia economica, permettano di rilevare, in funzione dell'altitudine, ampie inquadrature, il problema principale risulta come ottenere tale video.

Oltre alle considerazioni di sicurezza aeronautica, è possibile coprire con un APR un'area di ripresa di 1 ettaro con un volo da un'altitudine di 70 m e con una videocamera con caratteristiche ottiche medie ($c = 1,5$ mm, sensore da 1/6" e risoluzione 10 MPixel). Tale operazione permette di registrare flussi video con caratteristiche compatibili con gli algoritmi di analisi; la release attuale degli algoritmi di analisi sono in grado di rilevare veicoli con una dimensione minima di 16 x 16 pixel.

Note le dimensioni reali medie di un veicolo da rilevare, è possibile calcolare il minimo valore di GSD (*Ground Sampling Distance*) per l'elaborazione con i modelli di analisi video, compreso in un intervallo pari a 0,1-0,2 m/pixel. È pertanto possibile stimare, sebbene sia molto funzione delle differenti caratteristiche ottiche della camera, una copertura massima con un singolo APR fino a 5 ettari. In assenza di vincoli di quota, la pianificazione del volo avviene calcolando la quota di volo che garantisca una risoluzione geometrica del video compatibile con le caratteristiche del software. In questa condizione, l'area di acquisizione di un singolo APR può giungere fino a 5 ettari.

$$GSD = (Z \cdot d_{pixel}) / c \quad (2.10)$$

dove:

GSD = *Ground Sampling Distance* [m]

Z = quota [m]

d_{pixel} = dimensione pixel dell'immagine [m]

c = focale della camera [m]

Acquisito e scaricato il video è possibile passare al passaggio successivo: il pre-processamento delle immagini attraverso la calibrazione della scena video, il settaggio delle caratteristiche di traffico da monitorare e il processo di elaborazione dati. Per ognuna di queste operazioni è stato sviluppato uno strumento dedicato, eccezione fatta per il primo punto. Per quanto concerne la calibrazione della scena video, infatti, è necessario elaborare manualmente alcuni file di configurazione con alcuni parametri ottici della camera, informazioni sulla georeferenziazione e della distorsione geometrica dell'immagine video. Per quanto riguarda il procedimento di settaggio delle caratteristiche di traffico è disponibile uno strumento denominato *DataFromSky Annotation Tool*.

Tale strumento permette, attraverso un'immagine estratta e georiferita, di impostare le caratteristiche di traffico da monitorare con un semplice strumento di editing vettoriale.

L'operazione risulta immediata e di facile compilazione permettendo di settare spire e corsie virtuali e misure di traffico con la possibilità di scegliere tre tipologie: in ingresso, di passaggio e in uscita dalla scena video. Ovviamente è possibile codificare tali caratteristiche di traffico con i nomi delle strade e con codici differenti. Il secondo strumento software sviluppato è *DataFromSky Trajectory Extractor* e permette il processamento vero e proprio del flusso video. Attraverso tramite tale strumento è possibile inserire:

- il file dell'immagine di riferimento della scena video da rilevare (georiferita);
- il file con i parametri della camera (precedentemente calibrati);
- i punti GPC (Ground Point Control) di riferimento tra l'immagine di riferimento e i punti corrispondenti;
- il file di configurazione delle caratteristiche di traffico (precedentemente elaborato con il software *DataFromSky Annotation Tool*);
- il file video.

Al termine dei settaggi è possibile avviare il processo di analisi video, che elaborerà le informazioni secondo l'architettura precedentemente descritta.

Al termine dell'elaborazione, è disponibile un ultimo strumento: *DataFromSky Viewer*. Come dice la parola Tale software permette di visualizzare i risultati dell'analisi attraverso il caricamento del file video e del file con i risultati delle elaborazioni video (precedentemente elaborato con il software *DataFromSky Trajectory Extractor*). Il Viewer permette di visionare il video registrato ed analizzato per una visione accurata del rilievo di traffico al fine di osservare le traiettorie e le manovre critiche. Lo strumento permette altresì di visionare le caratteristiche in tempo reale dei veicoli rilevati e il progressivo conteggio dei veicoli in ingresso e in uscita dalle spire (matrice O/D).

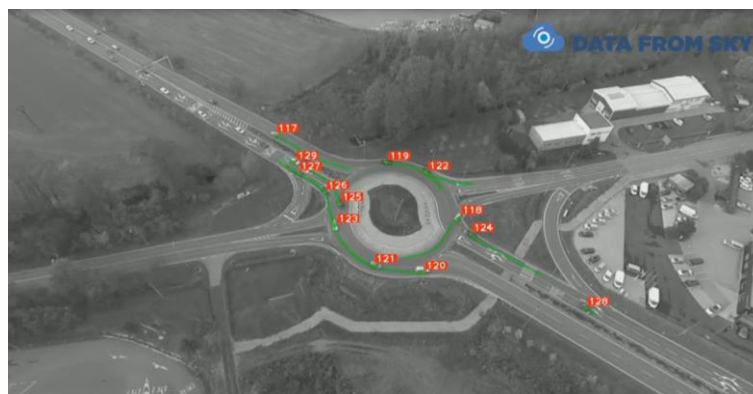
Oltre ai dati di traffico

Come già accennato, la possibilità di avere una nuova prospettiva di monitoraggio del traffico stradale, quella aerea, permette all'utente finale di ottenere un'ampia gamma di dati, prima non disponibili. Da una ripresa aerea, grazie al tracciamento dei veicoli con il sistema, si è in grado di eseguire le seguenti elaborazioni.

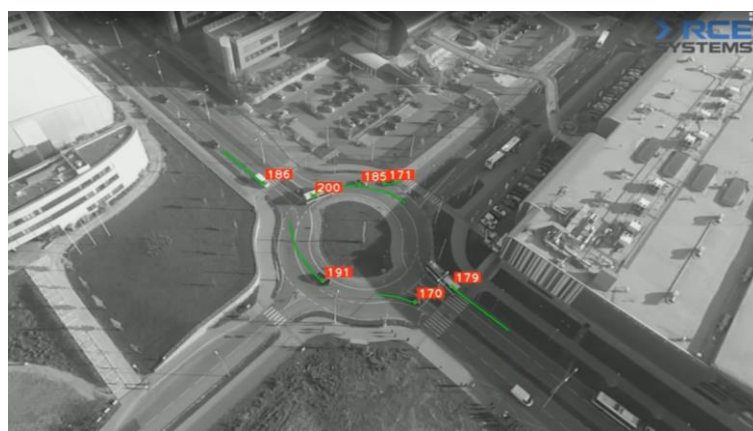
- Rilevare traiettorie, posizioni e distanze percorse dei veicoli in ogni istante di elaborazione del video: è possibile analizzare nel dettaglio le traiettorie veicolari e conoscerne le coordinate in un sistema di riferimento locale o georeferenziate (proiezione a scelta dell'utente come per esempio UTM, Gauss Boaga, etc.) per ogni frame di elaborazione del video. Le traiettorie saranno così

facilmente esportabili in software CAD o GIS; al fine, per esempio, per il calcolo dei tassi di occupazione delle corsie.

- Conoscere velocità, accelerazioni, decelerazioni e decelerazioni laterali istantanee e medie sul percorso per ogni veicolo identificato; tali valori oltre ad approfondire in modo unico la progettazione geometrica e funzionale dell'intersezione, possono essere utilizzati per l'analisi delle Teoria dei Conflitti stradali.
- Calcolare i tempi e le distanze di entrata, uscita e di percorrenza: al fine di valutare in maniera dettagliata i percorsi e le principali aree di rischio.
- Conteggi e classificazione dei veicoli attraverso l'individuazione (tramite un apposito strumento di editing vettoriale) di spire e corsie virtuali di monitoraggio di ingresso, uscita e di transito. Tali informazioni permettono di ricostruire la reale matrice o/d del nodo in esame e, in caso di voli a quote maggiori, anche su intere reti stradali.
- Conoscere due importanti parametri per eseguire una corretta progettazione funzionale del nodo e fondamentali nella micro-simulazione: il tempo di gap critico (o Time gap, Tg) e il tempo di immissione (o Follow-up Time, Tf).
- Rilevare eventuali anomalie della scena ripresa come, ad esempio, potenziali eventi critici e di emergenza.
- Visualizzare le immagini video post processate e ottenere dati dettagliati, per ogni frame di visualizzazione, sulle caratteristiche dinamiche per ogni veicolo o per ogni spira o corsia virtuale.



<https://vimeo.com/110981765>



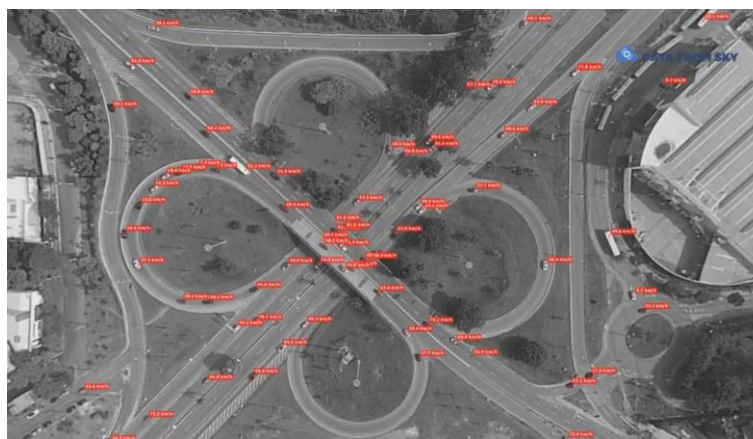
<https://vimeo.com/122096921>



<https://vimeo.com/110981766>



<https://vimeo.com/117601820>



<https://vimeo.com/123820723>

Figura 16. Alcuni esempi pubblicati su Vimeo.

Tutti i risultati delle analisi sono esportabili in un file di testo in formato CSV editabile con i più comuni software di analisi dati (Excel, LibreOffice, R, etc.). La traiettoria di ogni veicolo rilevato sarà registrata con coordinate nel sistema di riferimento locale dell'intersezione o con una proiezione a scelta dell'utente. Il file CSV conterrà per ogni record i seguenti campi:

- Id veicolo
- Id spirale di ingresso
- Tempo di ingresso (ms)

- Id spira di uscita
- Tempo di uscita (ms)
- Distanza totale percorsa (m)
- Velocità media (m/s);
- Traiettoria, definita dalle seguenti caratteristiche per ogni n_{esimo} frame video.
 - coordinata x_n [m];
 - coordinata y_n [m];
 - $frame_n$ [ms];
 - velocità istantanea v_n [m/s];
 - accelerazione laterale a_n^L [m/s²];
 - accelerazione tangenziale a_n^T [m/s²].

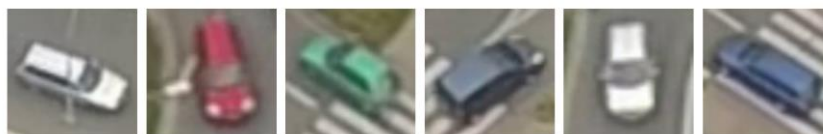
È altresì disponibile un file CSV con i risultati della matrice O/D codificata in funzione delle caratteristiche di traffico settate precedentemente.

2.4.2. Il software di monitoraggio

Complessivamente il sistema può essere suddiviso in tre parti principali: pre-processamento, rilievo e tracciamento dei veicoli.

Nella fase di pre-processamento l'immagine video acquisita viene filtrata e geo-codificata per essere posizionata in un'inquadratura di riferimento. La robustezza e l'efficienza dei metodi di rilevamento delle immagini aeree sono state molto studiate in passato. Gli algoritmi si basano su un processo complesso che permette la rettifica dell'immagine con metodi di tipo radiale e di distorsioni tangenziali.

Nel processo di geo-codifica inoltre è stata utilizzata la tecnica di trasformazione della prospettiva del modello. È stato così possibile sviluppare un innovativo dispositivo di rilevamento multistrato altamente performante e calibrato manualmente su un campione di oltre 80.000 casi positivi e 80.000 negativi. Il dispositivo di rilevamento è in grado di imparare dai propri errori e migliorare nel tempo.



Esempi di casi positivi



Esempi di casi negativi

Figura 17. Esempi di immagini per l'apprendimento del modello.

La fase di tracciamento è estremamente impegnativa a causa della presenza di disturbi, interferenze e di uno sfondo sovrapposto, dinamico e in continuo cambiamento rispetto all'obiettivo. Una serie di sub-modelli è stata utilizzata per affrontare questi cambiamenti.

Il primo passaggio per eseguire analisi di traffico avanzate attraverso l'analisi video è essere in possesso del flusso video. Sebbene le attuali caratteristiche ottiche delle videocamere in commercio, anche di fascia economica, permettano di rilevare, in funzione dell'altitudine, ampie inquadrature, il problema principale risulta come ottenere tale video.

Acquisito e scaricato il video è possibile procedere ai passaggi successivi: il pre-processamento delle immagini attraverso la calibrazione della scena video, il settaggio delle caratteristiche di traffico da monitorare e il processo di elaborazione dati. Per ognuna di queste operazioni è stato sviluppato uno strumento dedicato, eccezione fatta per il primo punto.

Per quanto concerne la calibrazione della scena video, infatti, è necessario elaborare manualmente alcuni file di configurazione con alcuni parametri ottici della camera, informazioni sulla georeferenziazione e della distorsione geometrica dell'immagine video. Per quanto riguarda il procedimento di settaggio delle caratteristiche di traffico è disponibile uno strumento denominato *DataFromSky Annotation Tool*.

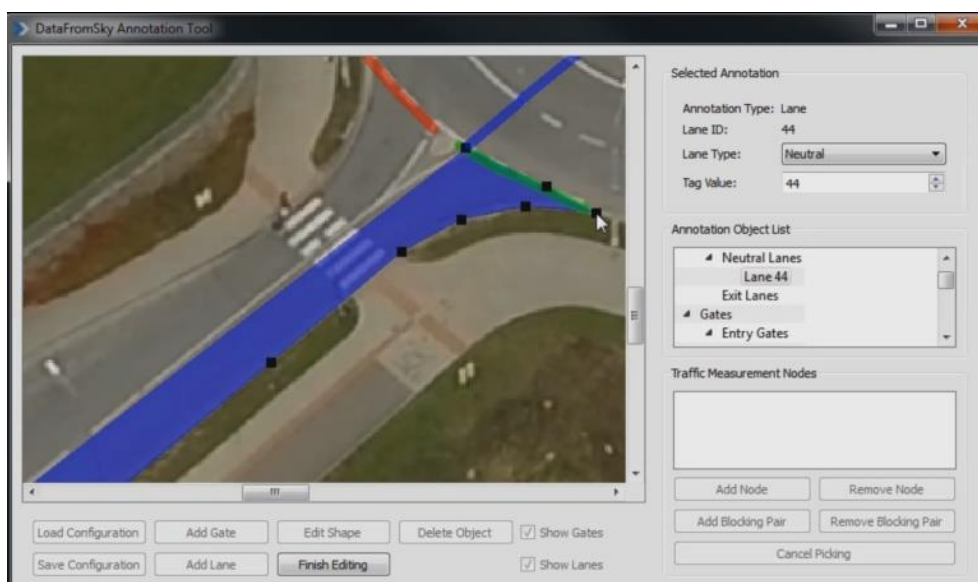


Figura 18. DataFromSky Annotation Tool: lo strumento di editing vettoriale delle corsie, spire e nodi di traffico virtuali.

Tale strumento permette, attraverso un'immagine estratta e georiferita, di impostare le caratteristiche di traffico da monitorare con un semplice strumento di editing vettoriale. Tale operazione risulta immediata e di facile compilazione permettendo di settare spire e corsie virtuali e misure di traffico con la possibilità di scegliere tre tipologie: in ingresso, di passaggio e in uscita dalla scena video. Ovviamente è possibile codificare tali caratteristiche di traffico con i nomi delle strade e con codici differenti. Il secondo strumento software sviluppato è *DataFromSky Trajectory Extractor* e permette il processamento vero e proprio del flusso video. Attraverso tramite tale strumento è possibile inserire:

- il file dell'immagine di riferimento della scena video da rilevare (georiferita);
- il file con i parametri della camera (precedentemente calibrati);
- i punti GPC (*Ground Point Control*) di riferimento tra l'immagine di riferimento e i punti corrispondenti;
- il file di configurazione delle caratteristiche di traffico (precedentemente elaborato con il software *DataFromSky Annotation Tool*);
- il file video.

Al termine dei settaggi è possibile avviare il processo di analisi video, che elaborerà le informazioni secondo l'architettura precedentemente descritta.



Figura 19. Schermata del software DataFromSky Trajectory Extractor con cattura dei veicoli.

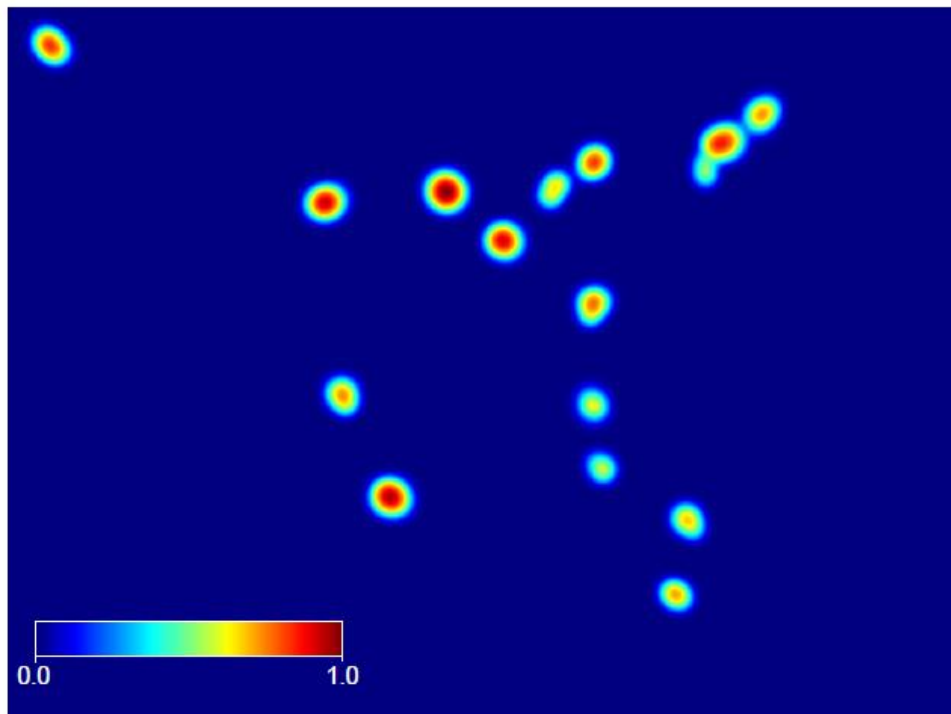


Figura 20. Schermata del software DataFromSky Trajectory Extractor valori di probabilità di cattura dei veicoli.

Al termine dell'elaborazione, è disponibile un ultimo strumento: *DataFromSky Viewer*. Tale software permette di visualizzare i risultati dell'analisi attraverso il caricamento del file video e del file con i risultati delle elaborazioni video (precedentemente elaborato con il software *DataFromSky Trajectory Extractor*). Il

Viewer permette di visionare il video registrato ed analizzato per una visione accurata del rilievo di traffico al fine di osservare le traiettorie e le manovre critiche. Lo strumento permette altresì di visionare le caratteristiche in tempo reale dei veicoli rilevati e il progressivo conteggio dei veicoli in ingresso e in uscita dalle spire (matrice o/d).

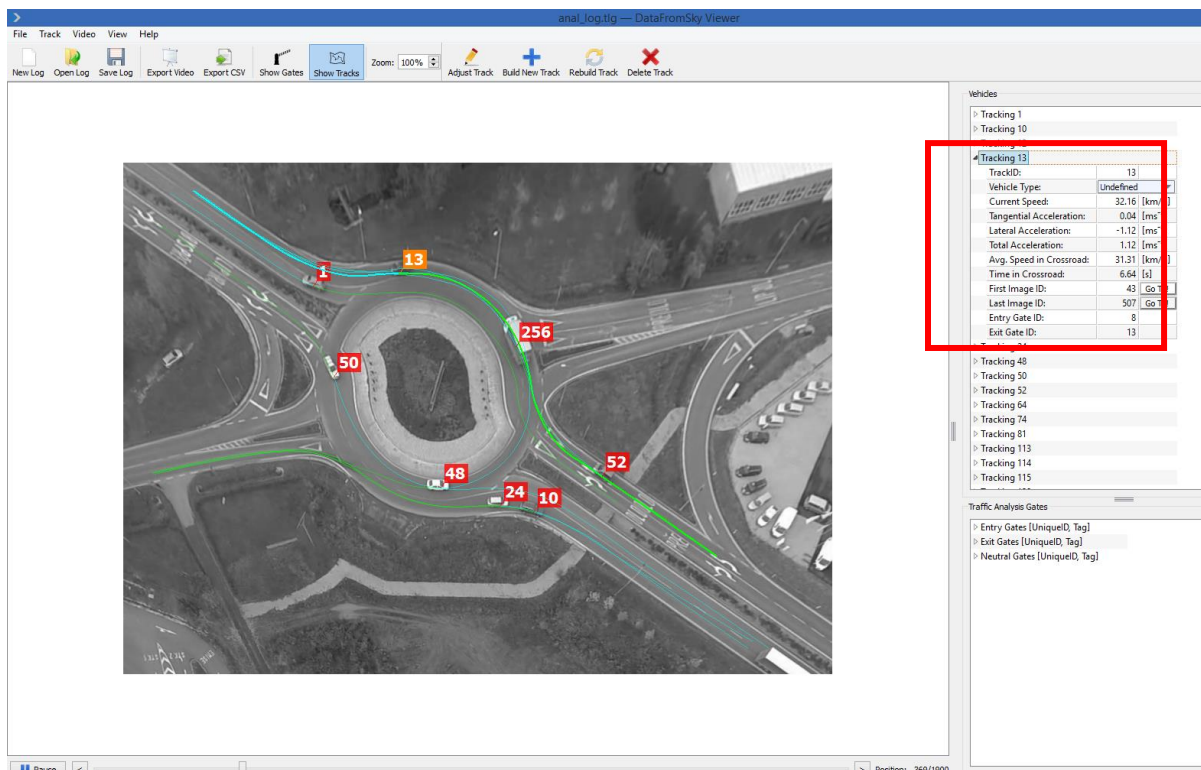


Figura 21. DataFromSky Viewer: tutti i dati in tempo reale veicolo per veicolo.

Applicazioni nell'ingegneria dei trasporti

L'utilizzo di questo innovativo sistema permette il monitoraggio avanzato del traffico stradale. Innovativo in quanto, grazie alla posizione privilegiata, è possibile osservare il traffico da una nuova visuale; simile a quella disponibile nei più avanzati modellatori di micro-simulazione.

Come detto precedentemente, il sistema mette a disposizione un set di dati molto ampio e questo permette molte analisi precedentemente disponibili solamente con differenti rilievi a terra e con l'utilizzo di diversi dispositivi.

Attualmente il sistema è in grado di rilevare il seguente set di dati:

- Conteggio dei veicoli
- Categorizzazione dei veicoli
- Matrice O/D
- *Headway e Spacing*
- Identificare i veicoli (con un ID unico)
- Identificare le traiettorie veicolari
- Posizione di ingresso
- Percorso per ogni frame
- Tempo di percorrenza
- La distanza percorsa
- Modifica manuale delle traiettorie

- Conteggio del numero di veicoli che entrano/escono/transitano
- Calcolo velocità istantanea
- Calcolo della velocità media
- Calcolo accelerazione tangenziale istantanea
- Calcolo della accelerazione tangenziale media
- Calcolo accelerazione laterale istantanea
- Calcolo della accelerazione laterale media
- Calcolo accelerazione totale istantanea
- Calcolo della accelerazione totale media

Possibili applicazioni nella pianificazione dei trasporti potrebbero derivare dalla possibilità di conoscere i dati di traffico di più nodi in contemporanea, il che permetterebbe una calibrazione migliore dei modelli di traffico. La conoscenza dei valori di *Critical headway* e *Follow-up headway*, permetterebbe inoltre di non dover utilizzare i valori tabellari del manuale HCM e di calcolare le reali capacità delle intersezioni.

Per quanto concerne la sicurezza stradale, sicuramente l'analisi visiva dei comportamenti dei guidatori, l'analisi delle traiettorie e, soprattutto, l'applicazione della teoria dei conflitti stradali permetterebbe una maggiore conoscenza delle aree di conflitto.

La conoscenza delle posizioni in ogni frame video (frequenze di campionamento di 20 ms) permette di effettuare diverse considerazioni sui modelli microscopici dei comportamenti dei conducenti. È possibile risalire, come verrà dimostrato nel prossimo capitolo, come sia possibile – selezionate opportune coppie di veicoli – risalire ai coefficienti di calibrazione dei più noti modelli matematici del veicolo accodato, calcolare i tempi di reazione fino ad elaborare modelli matematici che ricostruiscono i movimenti dei singoli veicoli.

2.4.3. Floating Car Data (FCD)

Per quanto riguarda lo sviluppo del modello di domanda, specificatamente del modello di generazione con la ricostruzione del numero medio di spostamenti nell'area in studio dalle origini alle destinazioni (c.d. matrice o/d), spesso viene offerto un metodo alternativo rispetto alle classiche interviste agli automobilisti su postazioni limitate. Recenti ricerche scientifiche e casi reali, hanno permesso di dimostrare l'alta affidabilità dei *Floating Car Data* (c.d. FCD): punti GPS raccolti dai diversi provider che vengono rilevati attraverso i dispositivi di bordo installati su veicoli che interessano sia il traffico leggero che quello pesante. A livello italiano la quota di veicoli monitorati ha superato 10 milioni su un totale di 51 milioni del parco circolante e registrato alla motorizzazione (dato aggiornato ad aprile 2018). Tali dispositivi permettono di rilevare quotidianamente oltre 250 milioni di punti GPS, per un totale di 14 milioni di tracce su oltre 16 milioni di strade monitorate. Ogni punto rilevato ha le seguenti informazioni:

- identificativo della traccia GPS a cui ogni singolo punto appartiene;
- tempo di rilevamento delle coordinate GPS;
- coordinate GPS;
- velocità del veicolo;
- direzione del veicolo (in gradi);
- tipologia di punto rispetto alla sua collocazione sulla traccia (punto iniziale, intermedio o finale).

I vantaggi della metodologia proposta con l'utilizzo dei dati FCD riguardano principalmente il maggior livello di precisione di un dato rilevato rispetto a uno desunto da interviste, oltre alla possibilità di avere un monitoraggio per un periodo di tempo più esteso (nel caso particolare un giorno) e per un'area molto

vasta. Dato che sarebbe complicato e troppo oneroso economicamente da ottenere tramite interviste; i dati FCD oltretutto forniscono una significatività statistica migliore. Per quanto concerne il tasso di campionamento (rispetto al 1-3% con le indagini classiche) è potenzialmente possibile raggiungere una percentuale superiore al 5%. I valori così ottenuti delle tracce FCD verranno poi espansi all'universo degli spostamenti dell'area regionale tramite un confronto dettagliato dai dati di traffico rilevati su sezioni reali tramite radar ed utilizzando anche i dati delle analisi disaggregate effettuate nel corso degli ultimi anni messi a disposizione dall'Anas, dalle società concessionari autostradali e dai dati dei principali uffici del traffico dei principali comuni regionali. I vantaggi della metodologia proposta con l'utilizzo dei dati FCD riguardano principalmente il maggior livello di precisione di un dato rilevato rispetto a uno desunto da interviste, oltre alla possibilità di avere un monitoraggio per un periodo di tempo più esteso (nel caso particolare un giorno) e per un'area molto vasta.

Al fine, non solo di una calibrazione dei dati su tutta l'area di indagine, ma di avere a disposizione una fotografia dettagliata su tempi di percorrenza, velocità e flussi stimati pre Covid-19, in questa ricerca sono stati messi a disposizione i dati FCD (Floating Car Data) forniti da TomTom® in forma FREEMIUM. I dati derivano da molte fonti dati quali: navigatori satellitari installati di serie sul 80% veicoli in commercio, fonti governative, utenti app, etc. Il campione così esteso permette di avere informazioni per ogni singolo arco di strada fino a 12 mesi prima.

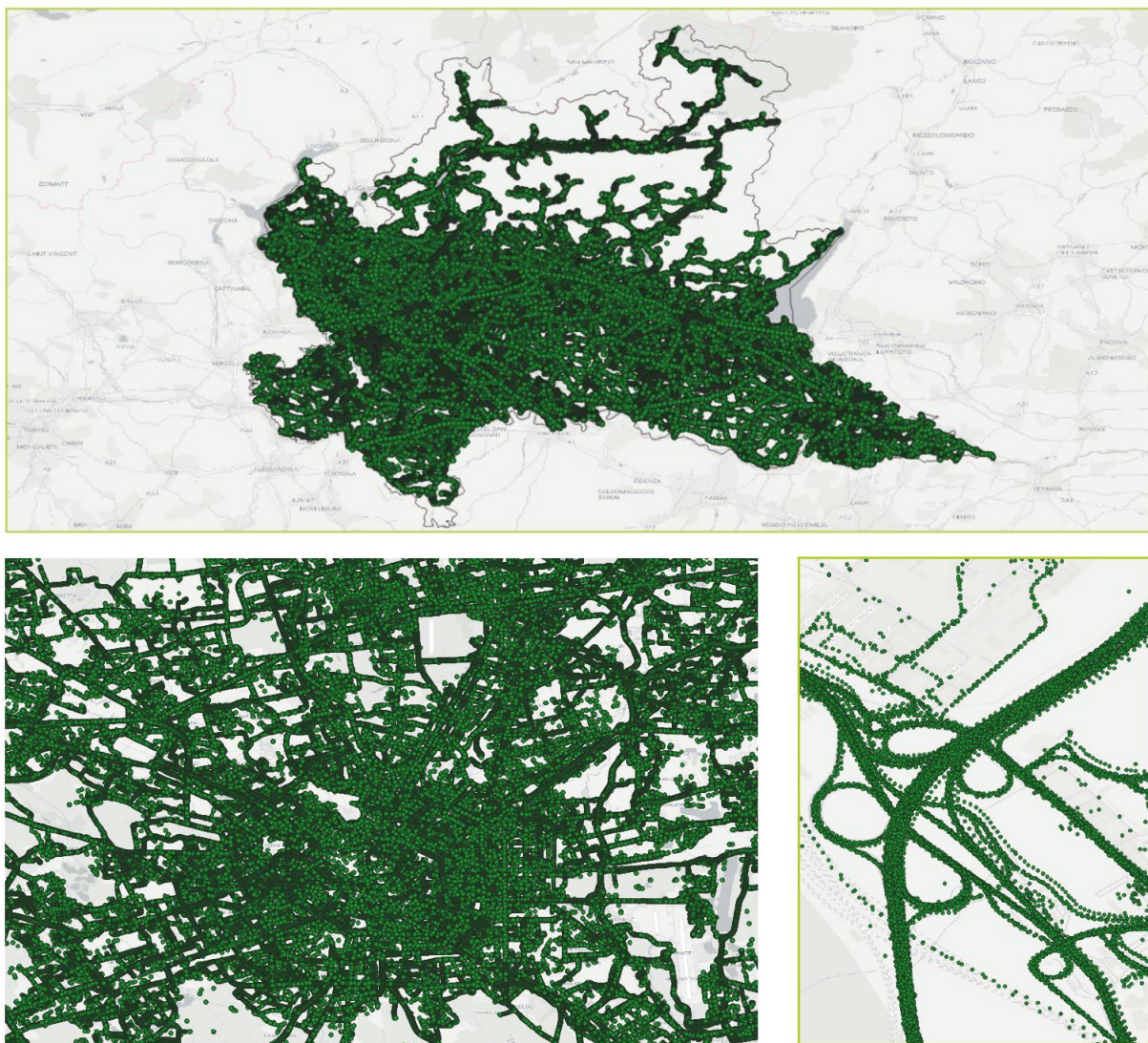


Figura 22. Esempio dell'insieme dei dati FCD della Regione Lombardia

2.5. La pianificazione e la progettazione dei sistemi di trasporto

Una delle caratteristiche dei sistemi di trasporto è che le modifiche del loro assetto hanno ricadute molteplici sui diversi soggetti, o gruppi di soggetti, che compongono la collettività.

Ad esempio, la realizzazione di una infrastruttura di trasporto non solo può modificare le caratteristiche del servizio di trasporto per gli utenti dell'intera rete nella quale essa si inserisce, ma produce anche altri effetti economici, finanziari, sociali e ambientali che riguardano, in modo diverso, diversi soggetti quali gli utenti del sistema, gli imprenditori, i proprietari dei suoli, coloro che svolgono attività commerciali, oltre agli operatori, alle istituzioni e alle aziende che, a vario titolo, sono responsabili del sistema di trasporto e del territorio.

La scelta degli interventi da realizzare può essere effettuata in più modi; l'approccio "razionale" alle decisioni prevede che queste siano prese attraverso la valutazione, per quanto possibile quantitativa, degli effetti di vario tipo che possano derivare dalle diverse ipotesi di intervento per le diverse parti coinvolte. Questo approccio, comunemente adottato nel caso di decisioni "aziendali", diventa ancor più necessario quando le decisioni sono prese per conto della collettività e a questa bisogna renderne conto. Le dinamiche naturali della società e del territorio, il modificarsi delle attitudini degli utenti e dei decisori, il verificarsi di contingenze particolari, la disponibilità di risorse fanno sì che nella realtà le decisioni e le realizzazioni si susseguano nel tempo.

L'accettazione di questo assunto ha portato, negli anni, a modificare la concezione stessa della pianificazione; si è passati così dalla pianificazione intesa come la redazione di un piano, ovvero come un'attività "chiusa" nella quale sono previsti interventi per un periodo di tempo sufficientemente ampio (interventi che spesso non vengono realizzati nel loro complesso proprio per il mutare delle condizioni rispetto a quelle nelle quali erano stati decisi), al processo di pianificazione inteso come una sequenza di elaborazioni (piani o progetti di sistema) finalizzate alle diverse decisioni che sono prese in diversi momenti, non rigidamente prefissati; anche in questo caso, tuttavia, la definizione e la verifica delle ipotesi di intervento avviene attraverso il "metodo razionale" definito in precedenza.

Il processo decisionale esposto è spesso considerato come una notevole semplificazione rispetto ai processi di formazione delle decisioni collettive nel mondo reale. Esso va tuttavia considerato come il paradigma di riferimento che, pur con i dovuti adattamenti, può essere applicato a problemi e a contesti decisionali apparentemente anche molto diversi tra loro.

In questa sede, più che le successive elaborazioni teoriche che hanno prodotto una vera e propria "teoria della pianificazione" come teoria delle decisioni collettive, interessa identificare il ruolo e i limiti dell'ingegneria dei sistemi di trasporto all'interno del più ampio processo decisionale. È utile a tal fine considerare, anche se solo schematicamente, le diverse macro-attività che compongono il processo decisionale relativo ad un sistema di trasporto.

Come si può osservare, sul lato destro della figura sono riportate le attività tecniche e decisionali che compongono il processo, mentre sul lato sinistro le fasi di analisi e modellizzazione del sistema di trasporto funzionali a tali attività.

Nella fase di individuazione degli obiettivi e dei vincoli vengono definiti gli obiettivi che il decisore (o i decisori) si pone con la realizzazione degli interventi considerati e i vincoli cui è sottoposto. Obiettivi e vincoli possono essere espliciti o impliciti; essi dipendono dal soggetto che effettua l'analisi e, in qualche modo, definiscono le tipologie di intervento incluse nel progetto (ad esempio nuove infrastrutture nel lungo periodo oppure riorganizzazione delle risorse disponibili nel breve periodo).

Come si è detto, gli interventi sul sistema di trasporto possono essere progettati secondo diverse possibili ottiche. Fra gli obiettivi tipici di una impresa (ad esempio una azienda che produce servizi di trasporto) dovrebbero esserci la massimizzazione dei ricavi al netto dei costi di produzione dei servizi. I vincoli possono essere rappresentati dalla normativa vigente, dal budget disponibile, dagli eventuali obblighi di servizio o di tariffa, da limitazioni tecniche sulla capacità produttiva dei fattori impiegati ecc.

Nel caso di decisore pubblico, gli obiettivi dell'intervento sono molteplici, spesso non chiaramente definiti e in contrasto fra loro, così come lo sono gli interessi di una società articolata. Un decisore pubblico può, ad esempio, proporsi l'aumento della sicurezza, la riduzione del costo generalizzato dello spostamento per gli utenti del sistema di trasporto, l'aumento dell'accessibilità ai servizi, lo sviluppo equilibrato del territorio, la salvaguardia dei valori ambientali, ma anche il contenimento del deficit o lo sviluppo di alcuni settori dell'economia.

Obiettivi e vincoli, comunque, sintetizzano esplicitamente o implicitamente i valori e le attitudini prevalenti nell'azienda o nella collettività che li esprime; basti pensare al diverso peso che le considerazioni energetiche o ambientali hanno assunto negli ultimi decenni.

Inoltre, gli uni e gli altri condizionano le fasi successive e in particolare le ottiche secondo le quali si analizza la situazione attuale e le tipologie di intervento utilizzabili per i progetti alternativi, e quindi la definizione del sistema di studio, ovvero l'individuazione di quali elementi e relazioni vanno incluse nella rappresentazione del sistema allo scopo di valutare correttamente gli effetti degli interventi progettati.

Nella fase di analisi della situazione attuale sono raccolti i dati sul sistema di trasporto che sarà oggetto dell'intervento e sul sistema delle attività che con esso interagisce. Questi dati sono finalizzati all'analisi delle attuali condizioni di funzionamento del sistema e alla individuazione delle principali insufficienze o "criticità" rispetto agli obiettivi e ai vincoli dell'intervento. In altri termini sono individuati e qualificati gli aspetti problematici che le ipotesi di progetto sono chiamate a risolvere.

2.6. La modellazione del traffico stradale

La progettazione e la valutazione richiedono la quantificazione delle interazioni tra gli elementi dei sistemi di trasporto esistenti ed ipotizzati. Mentre i valori di alcuni elementi dei sistemi di trasporto reali possono essere ottenuti da una misura diretta, come è stato precedentemente descritto con i rilevamenti, è di norma costoso estendere queste misurazioni a tutti gli elementi coinvolti. D'altro canto, i sistemi ipotetici ovviamente non possono essere oggetto di misura. Per queste ragioni gli strumenti di simulazione giocano un ruolo centrale nella progettazione e nella valutazione dei sistemi di trasporto.

Gli strumenti matematici consentono la simulazione delle interazioni tra i vari elementi di un sistema di trasporto oggetto di studio. È utile fornire in questo capitolo introduttivo una rassegna delle varie classi di modelli che compongono i sistemi di modelli utilizzati per simulare un dato sistema di trasporto. I modelli e le loro relazioni dovrebbero essere confrontati con le componenti fisiche del sistema che essi simulano.

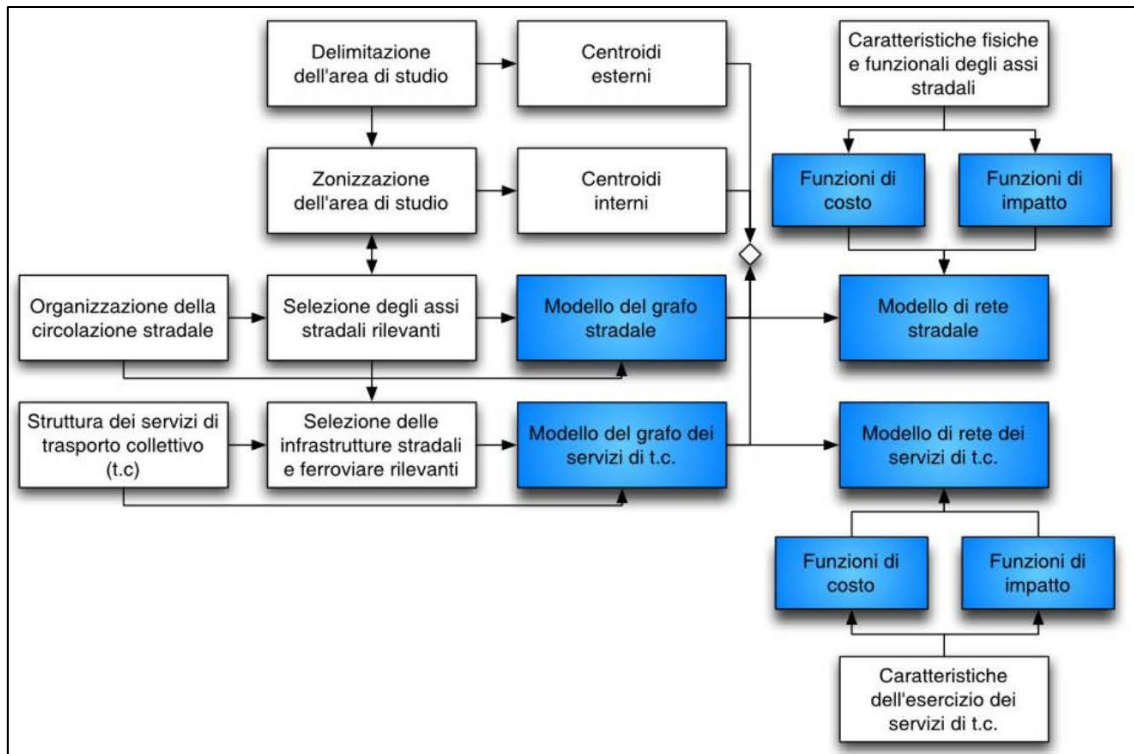


Figura 23. Fasi funzionali per la costruzione del modello di rete di un sistema di trasporto bimodale

I *modelli di offerta* simulano il servizio di trasporto fornito per lo spostamento tra i diversi centroidi. Più specificamente, i modelli di offerta simulano le prestazioni delle infrastrutture e i servizi per gli utenti, e gli impatti esterni (inquinamento, consumo energetico, incidenti). I risultanti attributi di livello di servizio, quali tempo e costo di viaggio, sono variabili di ingresso per i modelli di domanda. Per simulare le prestazioni dei singoli elementi (infrastrutture) e gli effetti della congestione, specialmente per i sistemi stradali, i modelli di offerta si servono dei risultati della teoria del deflusso accennata precedentemente. Inoltre, per simulare le connessioni fra punti del territorio e/o fasi dello spostamento si utilizzano i modelli di rete.

I *modelli di domanda* simulano gli aspetti rilevanti della domanda di mobilità in funzione del sistema delle attività e del livello di servizio fornito dal sistema di offerta. Le caratteristiche tipicamente simulate includono il numero di spostamenti nel periodo di riferimento (livello di domanda) e la loro distribuzione tra i diversi intervalli temporali all'interno del periodo di riferimento, fra diversi punti del territorio, le diverse modalità di trasporto e i diversi percorsi possibili. I modelli di domanda possono essere applicati alla domanda passeggeri così come a quella delle merci. I modelli di domanda sono generalmente derivati dalla teoria dell'utilità aleatoria.

L'analisi e la progettazione di interventi sui sistemi di trasporto richiedono la stima della domanda attuale e/o la previsione di quella futura o "futuribile". Tali stime possono essere ottenute utilizzando fonti di informazione e strumenti statistici diversi.

Per stimare la domanda attuale è possibile effettuare delle indagini, tipicamente delle interviste, su di un campione di utenti e da queste, utilizzando le tecniche della statistica inferenziale, ottenere delle stime dirette della domanda. In alternativa si può stimare la domanda (attuale o futura) con i modelli matematici; quello più utilizzato è chiamato *modello a quattro stadi*. La stima da modello richiede che i modelli siano specificati (cioè sia scelta la forma funzionale e le variabili che vi compaiono), calibrati (cioè siano stimati i valori dei coefficienti in essi contenuti) e validati (cioè ne sia valutata la capacità di riprodurre i dati disponibili).

I *modelli di assegnazione* (o di interazione domanda offerta su rete) simulano, infine, come la domanda da un'origine ad una destinazione e i flussi di percorso usano i vari elementi del sistema di offerta. I modelli di assegnazione consentono il calcolo dei flussi su arco, ovvero del numero di utenti che utilizza ciascun arco della rete che rappresenta l'offerta di trasporto nel periodo di riferimento.

Esistono infine, i *modelli microscopici e discreti*. Tali modelli descrivono i movimenti dei singoli veicoli come il risultato di scelte individuali e delle interazioni con gli altri veicoli e con l'ambiente stradale. La scelta del percorso, le decisioni riguardanti accelerazione o cambio di corsia di ciascun veicolo sono, in generale, modellizzate esplicitamente. Inoltre, ciascuna entità del flusso ha le proprie caratteristiche che possono includere: le caratteristiche del veicolo, le prestazioni dello stesso, quali massima accelerazione, massima velocità, e le caratteristiche del conducente, come tempo di reazione e velocità desiderata.

2.6.1. Formulazioni generali

In questo paragrafo verranno enunciate brevemente le formulazioni generali utilizzate nella modellazione dei sistemi di trasporto. È chiaro come queste occupino libri e manuali interi e non è scopo del presente lavoro ripercorrerle nel dettaglio, ma è importante dare una visione generale delle formulazioni per far comprendere come si svolgono i processi di modellazione dei sistemi di trasporto.

Modello di offerta

La struttura della rete è rappresentata mediante un grafo

$$G = \{N, L\} \tag{2.11}$$

definito da un insieme N di elementi detti nodi e da un insieme di coppie di nodi, detti archi L . I grafi utilizzati per le reti di trasporto sono orientati: gli archi hanno un verso di percorrenza e le coppie di nodi che li definiscono sono pertanto coppie ordinate. A ciascun arco a può essere associato un flusso di arco $f_{i,j}$, che rappresenta il numero medio di unità omogenee che utilizzano l'arco (i,j) nell'unità di tempo. In un sistema di trasporto, gli archi rappresentano fasi o attività di possibili spostamenti tra zone di traffico differenti. I nodi rappresentano eventi significativi che delimitano le fasi dello spostamento o punti, individuati da una specifica coordinata temporale, che permettono la scelta del percorso. I *centroidi*, corrispondono infine a particolari nodi dove sono origine o destinazioni finali di determinati spostamenti.

A ciascuna fase dello spostamento possono essere associate alcune grandezze percepite dagli utenti, quali ad esempio, il tempo di viaggio, i costi monetari, i tempi di attesa, etc. Tali variabili sono note come attributi di *livello di servizio o prestazione* e in generale corrispondono alla disutilità o costi per gli utenti.

L'insieme di relazioni che legano i costi di percorso ai flussi di percorso è noto come modello di offerta. Il modello di offerta può essere così definito:

$$g(h) = \Delta^T c(\Delta h) + g^{NA} \tag{2.12}$$

Dove i costi dei flussi percorso $g(h)$, sono legati ai costi d'arco $\Delta^T c(\Delta h)$ e ai costi percorso non additivi g^{NA} . I costi d'arco derivano dal vettore complessivo dei costi di percorso g e dalla definizione di flusso su arco f , come definiti nelle formulazioni seguenti:

$$g = \Delta^T c \tag{2.13}$$

$$f = \Delta h \tag{2.14}$$

dove Δ rappresenta la matrice di incidenza archi-percorso e c rappresenta il vettore del costo generalizzato.

Un particolare considerazione va fatta sui costi. Come già accennato precedentemente, è evidente come gli utenti che percorrono un sistema di trasporto percepiscano, o meno, un *livello di servizio o prestazione*. Tale percezione, dovendo essere rappresentata in un modello, è stata rappresentata in un vettore delle prestazioni r_n , composto dalle n variabili di ciascun arco, le cui componenti sono l'*additività* e la *non-additività* di arco.

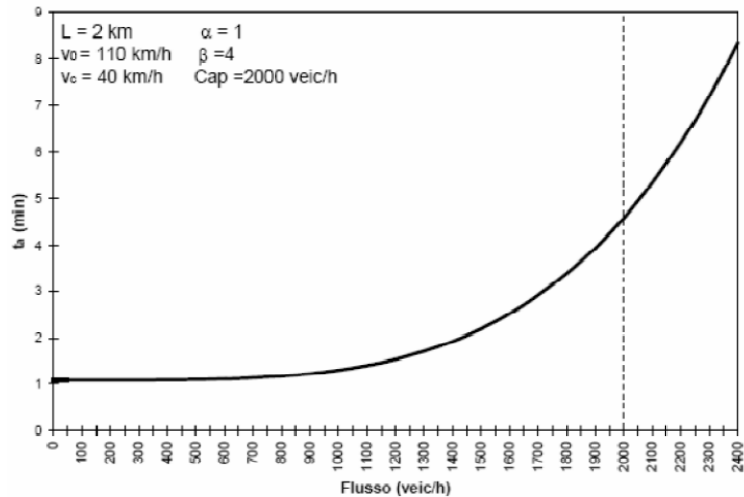


Figura 24. Esempio della funzione di costo più comune: *Bureau of Public Roads - BRP*

Con il termine di *additività* si intendono tutte quelle variabili che possono essere sommate tra di loro al fine di ottenere il valore delle variabili di prestazioni di tutti gli archi. Esempi di variabili additive sono il tempo di viaggio o alcuni costi monetari, che possono essere associati ad alcuni o a tutti gli archi. Le altre variabili, quelle *non-additive*, non possono quindi essere ottenute come la somma delle corrispondenti variabili di arco. Esempi tipici sono il costo monetario nel caso di pedaggi o i tempi di attesa.

È chiaro ora il vettore *costo generalizzato di arco* c definito precedentemente rappresenti la parte additiva delle variabili e la sua formulazione generale è la seguente:

$$c_{i,j} = \alpha_1 tr_{i,j}(f) + \alpha_2 tw_{i,j}(f) + \alpha_3 mc_{i,j}(f) \quad (2.15)$$

dove:

$tr_{i,j}(f)$ è la funzione che lega il tempo di percorrenza sull'arco (i, j) al vettore dei flussi f ;

$tw_{i,j}(f)$ è la funzione che lega il tempo di attesa sull'arco (i, j) al vettore dei flussi f ;

$mc_{i,j}(f)$ è la funzione che lega il costo monetario sull'arco (i, j) al vettore dei flussi f ;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sono i coefficienti di omogeneizzazione delle diverse componenti del tempo.

A questo punto sarà sufficiente formalizzare le diverse funzioni di costo a seconda delle diverse tipologie di arco: di percorrenza (strade urbane, extraurbane e autostrade), di attesa (intersezioni semaforizzate o regolate da precedenza) e di sosta.

Modelli di domanda

Come è stato detto nell'introduzione del paragrafo, un modello di domanda di mobilità può essere definitivo come una relazione matematica che consente di associare a un dato sistema di attività e di

offerta di trasporto il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento con le sue caratteristiche rilevanti.

L'obiettivo modello di emissione o generazione è quello di definire i potenziali di generazione ed attrazione per le diverse zone dell'area di studio; il modello di distribuzione è adibito a conoscere la distribuzione spaziale degli spostamenti da zona a zona conoscendo i potenziali di attrazione e distribuzione.

La delimitazione dell'area di studio consiste nel definire i confini del sistema che si andrà ad analizzare e a modellare, ed è molto importante in quanto verrà considerato:

l'ambiente esterno ai confini unicamente per i suoi riflessi all'interno del sistema, per l'ovvia necessità di semplificare il più possibile la modellazione;

l'ambiente all'interno dell'area di studio si estingueranno tutti gli effetti delle modifiche che andremo ad apportare al sistema.

L'area di studio deve comprendere tutte le componenti del trasporto che ci interessano ed è delimitata da un confine detto cordone. La zonizzazione, ossia la divisione in zone dell'area di studio, è la fase più delicata delle operazioni preliminari, in quanto discende direttamente dalla scala e dagli obiettivi del problema.

Nel caso in studio gli spostamenti, in termini generali, interni-interni sono stati aggregati per tutta la Provincia di Como (spostamenti entro la Provincia), quelli interni-esterni sono quelli in uscita (origine) dalla Provincia di Como e vanno verso l'esterno e quelli esterni-interni sono quelli in entrata (destinazione) la Provincia di Como.

Gli spostamenti in transito sono stati indirettamente già considerati nei casi precedenti e comunque di modesta entità. Il motivo è da ricercare che attualmente si sta filtrando da un'area regionale (matrice o/d Regione Lombardia versione 2020), che sicuramente include anche gli spostamenti esterni-esterni dell'area di studio in quanto di dimensioni ridotte.

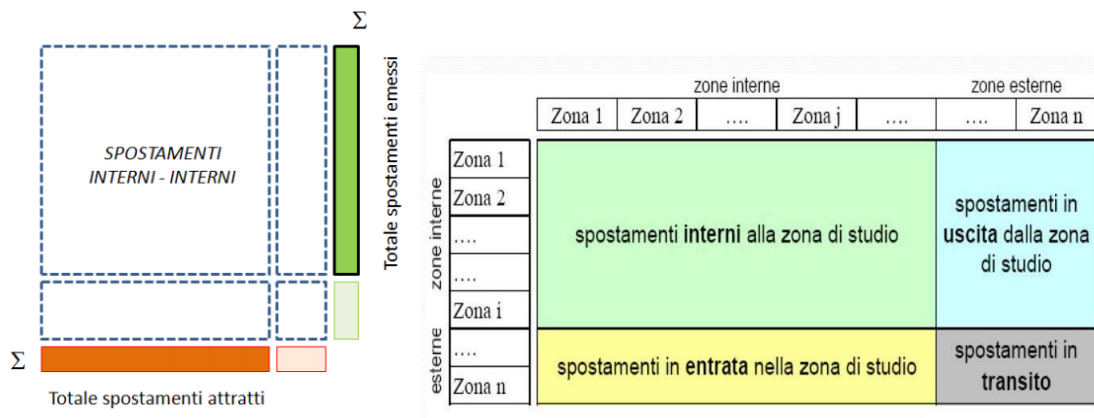


Figura 25. Relazione tra spostamenti interni ed esterni

Capire qual è l'area di influenza dell'infrastruttura in progetto è obiettivo del presente capitolo e non è un'operazione semplice. È infatti fondamentale capire le origini e le destinazioni, ancora più della loro quantificazione numerica. Sono infatti esse che determinano le relazioni o/d che sono alla base dei risultati degli scenari futuri: una nuova offerta di trasporto, come è in oggetto di studio l'interramento di Arosio, potrebbe determinare un minore costo (tempo di percorrenza) tra uno o più archi e, di conseguenza, avere un'attrattività maggiore negli utenti. Questo potrebbe generare un effetto positivo (tempi di percorrenza totali dei tragitti più corti) ma anche più utenti che, visti i tempi ridotti, utilizzeranno

il nuovo percorso (aspetto negativo).

Al momento dell'impostazione di tale studio, il gruppo di lavoro si è interrogato sulla reale applicabilità e fattibilità dell'utilizzo del classico modello a quattro stadi descritto precedentemente. La decisione finale è stata quella di utilizzare una metodologia innovativa che si basa su tecniche miste: sistemi informativi territoriali ed analisi spaziali. Questo è valido almeno per quanto concerne una stima preliminare dei flussi e, soprattutto, per lo studio dell'area di influenza.

La complessità del comportamento stradale degli utenti, per effetto delle numerose componenti da cui esso stesso è influenzato, e la difficoltà nel riprodurre sperimentalmente quanto osservato nella realtà, ha incentivato – come descritto precedentemente - l'impiego di modelli di simulazione del traffico. Tali strumenti risultano particolarmente diffusi per l'analisi di una vasta gamma di parametri e di elementi dinamici, associati a processi, come i problemi di viabilità dovuti alla congestione o connessi all'inquinamento ambientale che possono difficilmente essere descritti in maniera analitica. Questo perché il più delle volte i processi sono caratterizzati dalla complessa interazione di molteplici componenti del sistema, talvolta loro stessi di difficile definizione. La ricerca scientifica nel campo della simulazione dei trasporti raggruppa i modelli in due macrocategorie in base all'approccio che si intende adottare: simulazione o dati (*simulation-agent based e data-driven*).

In genere, quelli basati sulle simulazioni sono classificate in quattro categorie in base al livello di dettaglio e aggregazione, tra cui macroscopico, mesoscopico, microscopico e ibrido. In tali modelli il traffico è descritto come un flusso continuo basato su funzioni di densità e la modellazione specifica di componenti dettagliate, come numero di corsie o tempi di percorrenza, è indiretta o comunque poco rappresentata. Questi modelli si basano su dati raccolti in specifiche ricerche, le prime condotte negli anni '70, che hanno condotto a formulazioni da adattate a nuovi set di dati in funzione dell'area di studio. Questo tipo di modelli, sebbene siano ancora i più utilizzati, richiedono un impegno di risorse non indifferente per calibrare e per validare il modello e, una volta ottimizzato, rappresenta limitati periodi temporali (ora di punta o giorno tipo estivo o invernale). L'aggiornamento, inoltre, della sola domanda di traffico non è rappresentativa in quanto devono essere introdotte modifiche alla viabilità e richiede ulteriori dispendi di tempo in analisi.

Inoltre, nel contesto di emergenza pandemica da Covid-19 – come è stato descritto nel capitolo precedente – i dati sono cambiati e difficilmente è possibile ricostruire un'efficace relazione tra le diverse origini e destinazioni.

In termini formali può essere descritto come:

$$d[K_1, K_2, \dots, K_n] = d(SE, T, \beta) \quad (2.16)$$

Dove il flusso medio di spostamenti d aventi caratteristiche K_1, K_2, \dots, K_n è espresso da una funzione di un vettore SE di variabili socioeconomiche, relative al sistema delle attività (ad esempio il numero di famiglie residenti o di posti di lavoro) e/o alle variabili decisionali (ad esempio livello di reddito o classe di età), da un vettore T di variabili di livello di servizio ovvero relative al servizio offerto dal sistema di trasporto (ad esempio tempi di viaggio, costi monetari, distanze da percorrere) descritti nel *modello di offerta* e da un vettore β che rappresenta di coefficienti di peso o parametri.

Per caratterizzare un modello di offerta, che in realtà risulta dall'integrazione di diversi sotto modelli, è necessario definire:

- i , la categoria socioeconomica degli utenti;
- o, d , le zone di origine e di destinazione dello spostamento;
- s , il motivo per il quale ci si sposta;

- h , il periodo di riferimento o l'intervallo temporale nel quale avvengono gli spostamenti;
- m , il modo con cui lo spostamento è effettuato;
- k , il percorso utilizzato per lo spostamento rappresentato da una sequenza di archi che collegano i centroidi o e d sul modello di rete rappresentativo dell'offerta dei servizi del trasporto del modo m .

Il flusso di domanda può quindi essere formalmente indicato come $d_{od}[s, h, m, k]$ e il modello di domanda come:

$$d_{od}[s, h, m, k] = d(SE, T, \beta) \quad (2.17)$$

Al fine di dare una trattabilità analitica si preferisce di norma "*fattorizzare*" il modello di domanda nel prodotto di più sotto modelli interconnessi. La sequenza di gran lunga più utilizzata è la seguente:

$$d_{od}[s, h, m, k] = d_o[s, h](SE, T) \cdot p^i[d/osh](SE, T) \cdot p^i[m/oshd](SE, T) \cdot p^i[k/oshdm](SE, T) \quad (2.18)$$

dove:

- $d_o[s, h](SE, T)$ modello di emissione o generazione, fornisce il numero medio di utenti di categoria i che si spostano da o per il motivo s nell'intervallo temporale h ;
- $p^i[d/osh](SE, T)$ modello di distribuzione, fornisce la percentuale di utenti di categoria i che si spostano da o per il motivo s nell'intervallo temporale h e si recano nella zona di destinazione d ;
- $p^i[m/oshd](SE, T)$ modello di scelta modale o di ripartizione modale, fornisce la percentuale di utenti di categoria i che si spostano da o a d per il motivo s nell'intervallo temporale h e utilizzano il modo di trasporto m ;
- $p^i[k/oshdm](SE, T)$ modello di scelta del percorso, fornisce la percentuale di utenti di categoria i che si spostano da o a d per il motivo s nell'intervallo temporale h , utilizzando il modo di trasporto m e seguendo il percorso k .

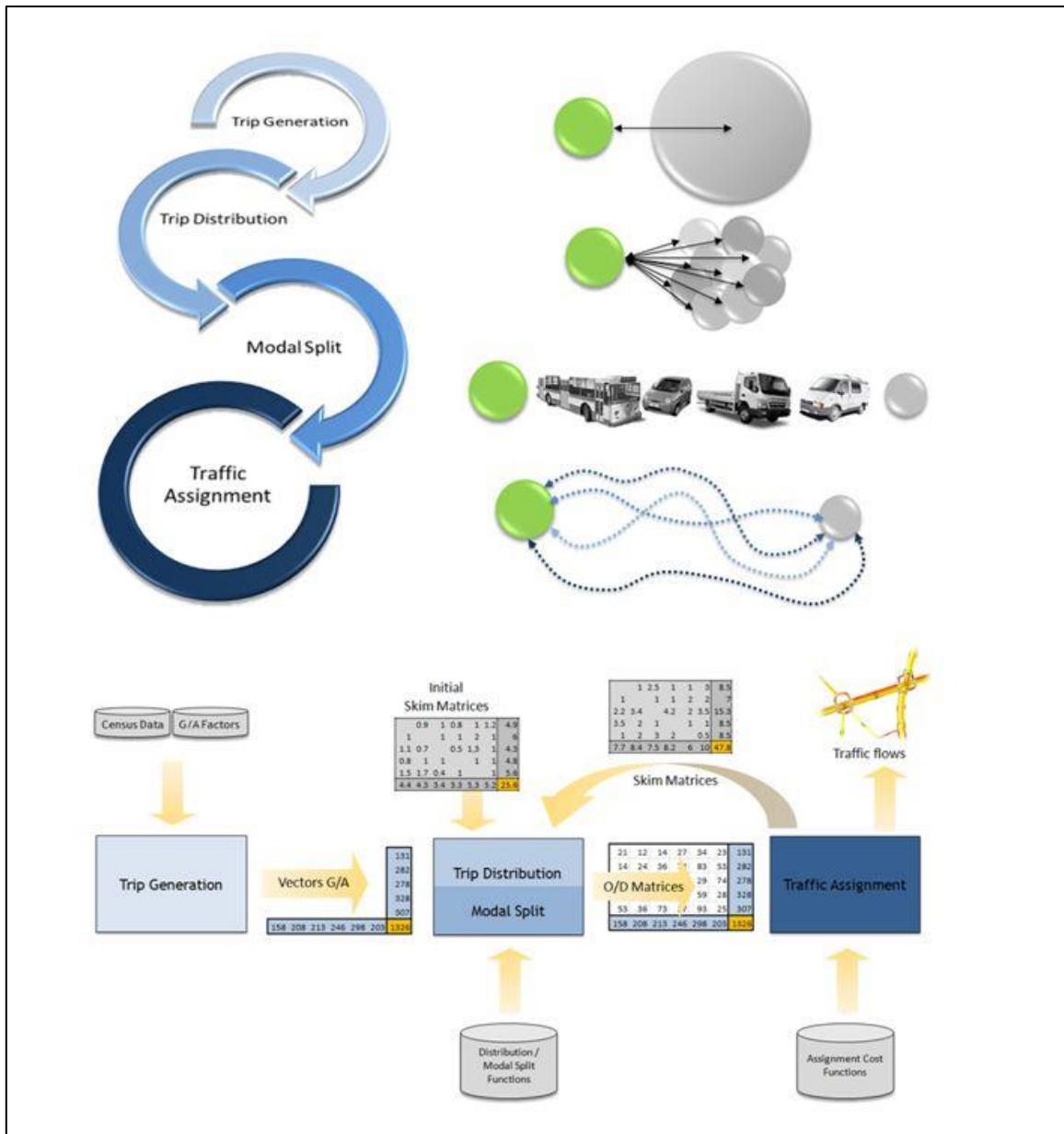


Figura 26. Schematizzazione del modello a 4 stadi

Modelli di assegnazione

I modelli di assegnazione a 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 (archi della rete di trasporto) come risultato dei flussi di domanda origine destinazione, dei comportamenti di scelta del percorso e delle reciproche interazioni fra domanda e offerta.

I modelli di assegnazione consentono di formulare questo problema combinando i modelli di domanda e di offerta descritti nei capitoli precedenti, e, pertanto, sono spesso denominati modelli di interazione domanda-offerta. Infatti, come si è visto nel capitolo quarto, i flussi di percorso dipendono dai costi dei percorsi; i flussi di domanda sono, in generale, influenzati dai costi di percorso nelle dimensioni di scelta quali quelle del modo e della destinazione. Inoltre, nel capitolo secondo si è visto che i costi di arco e quindi i costi di percorso, somma dei costi di arco, possono dipendere dai flussi per effetto della congestione. Esiste quindi una dipendenza mutua fra domanda, flussi e costi, riprodotta dai modelli di assegnazione.

I modelli di assegnazione svolgono, quindi, un ruolo centrale nella costruzione di un modello complessivo per la simulazione di un sistema di trasporto, in quanto esso si pone l'obiettivo di simulare lo stato occupato dal sistema, oppure la dispersione rispetto a un valore centrale. I risultati della simulazione a loro volta costituiscono gli elementi di ingresso per la progettazione e la verifica del sistema di trasporto.

Modelli di micro-simulazione

I modelli di simulazione microscopica sono in grado di rappresentare in maniera puntuale, precisa e specifica il traffico e la sua evoluzione istantanea, prendendo in considerazione gli aspetti geometrici di dettaglio dell'infrastruttura e il comportamento reale del conducente, legato all'accoppiamento delle caratteristiche del veicolo e del guidatore. Essi sono in grado di analizzare ed elaborare istante per istante il movimento di ogni singola unità presente sulla rete, sulla base di leggi legate al moto del veicolo e al comportamento del conducente.

Nei modelli microscopici la discretizzazione temporale del fenomeno circolatorio (il periodo viene ripartito in cicli di simulazione inferiori al secondo, come detto) consiste in un aggiornamento quasi in tempo reale dello stato delle componenti del sistema, in particolare si definisce per ogni singolo veicolo la posizione, la traiettoria, la velocità, l'accelerazione o la decelerazione e la scelta della corsia opportuna per effettuare una precisa manovra; tali parametri vengono determinati per ciascuna unità presente in rete all'istante $t + \Delta t$ in relazione al valore degli stessi all'istante precedente t e alle interferenze, o condizionamenti, tra gli stessi veicoli presenti in rete

I modelli di micro-simulazione basano il loro funzionamento su modelli in grado di rappresentare il movimento di ciascun veicolo sulla base del comportamento del conducente, che segue le regole dettate da:

- teoria dell'inseguitore, meglio nota come *Car Following*;
- teoria del cambio di corsia o *Lane Changing*;
- teoria dell'intervallo minimo di accesso o *Gap Acceptance*.

I modelli *Car Following* si basano sull'idea che ogni veicolo si muove lungo una strada seguendo il veicolo che lo precede e perciò la sua dinamica è funzione solo di quel veicolo. Questa ipotesi risulta di semplice modellazione matematica, anche se è relativamente poco complessa se confrontata con la totalità dei comportamenti che si tengono durante la guida. I modelli microscopici, in linea generale, assumono la forma riportata nelle seguenti equazioni:

$$v(t_k + \Delta t) = f(g(t_k), v(t_k), v^l(t_k), \eta(t_k), p) \quad (2.18)$$

$$x(t_k + \Delta t) = x(t_k) + v(t_k) \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

dove:

- t_k è l'istante di campionamento
- $g(t_k) = x^l(t_k) - x(t_k)$ è la distanza effettiva tra il veicolo e il suo predecessore al tempo t_k e;
- $v(t_k)$ e $x(t_k)$ rappresentano la velocità e la posizione del veicolo al tempo t_k ;
- $v^l(t_k)$ e $x^l(t_k)$ rappresentano la velocità e la posizione del veicolo che precede quello considerato, il cosiddetto *leader*;
- Δt è l'intervallo di campionamento;
- $\eta(t_k)$ è un componente stocastico di rumore inserito nel modello; ogni guidatore infatti è un'entità autonoma, dotata di un suo modo di agire e di tempi di reazioni diversi;
- p è il vettore delle componenti parametriche del modello;
- f è la funzione che lega la velocità all'istante successivo ai parametri suddetti relativi all'istante precedente.

Il modello Car Following focalizza l'attenzione su un aspetto particolare della guida: nel caso di brevi distanze tra i veicoli viene analizzato il comportamento di un conducente in base a quello del precedente. I conducenti rispondono stabilmente alle sollecitazioni provenienti dall'esterno agendo su freno o sull'acceleratore al fine di mantenersi all'interno della corrente in condizioni di sicurezza. Quindi, qualora il veicolo che precede frena, quello che segue si adegua per poi cercare di ripristinare la situazione iniziale.

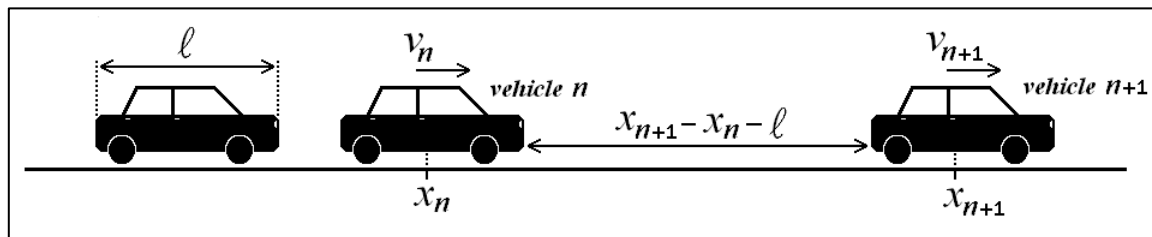


Figura 27. Schematizzazione del modello di Car Following.

Una limitazione dei modelli Car Following consiste nel fatto che, in generale, vengono usati per modellare strade ad un'unica corsia. Tuttavia, è spesso necessario considerare la possibilità di effettuare dei cambi di corsia in fase di simulazione di sistemi viari complessi. Per questo motivo i modelli Car Following vengono migliorati con l'aggiunta di una nuova componente modellistica chiamata "Lane Changing models". Il primo modello Lane Changing, introdotto da Gibbs più di un secolo fa, è stato proposto per simulare le varie situazioni urbane dove i segnali, le ostruzioni e la presenza di veicoli pesanti interessano le decisioni dei guidatori a riguardo di quale corsia percorrere. I tre fattori principali valutati nel processo di decisione sono: la necessità, l'opportunità e la sicurezza di un cambiamento di corsia.

I modelli di Lane Changing sono studiati come un caso particolare del processo di Gap Acceptance, in quanto il cambio di corsia avviene se esiste uno spazio accettabile tra due vetture sulla corsia di destinazione. I modelli Lane Changing misurano la distanza inter-veicolare posteriore tra il veicolo che deve effettuare il sorpasso e quello che sorraggiunge nella corsia adiacente e la distanza anteriore tra lo stesso e il veicolo che deve essere sorpassato. Tale distanza deve essere sufficientemente ampia da non disturbare il fluire del traffico sulla corsia di destinazione.

Il comportamento di Gap Acceptance gioca un ruolo importante nella simulazione di scelte relative a manovre da svolgere alle intersezioni o, come visto sopra, di cambio corsia. I modelli di Gap Acceptance sono formulati come un problema di scelta binario, nel quale i guidatori decidono se accettare o rifiutare un gap disponibile tra due veicoli della corrente in cui deve immettersi o che deve attraversare, confrontandolo con un gap critico (minimo gap accettabile). I gap critici sono modellati come variabili random per analizzare la variazione dei comportamenti di diversi utenti o dello stesso guidatore in differenti situazioni.

La teoria del Gap Acceptance si propone di determinare il numero di conducenti che possono utilizzare un gap di una data dimensione; ciò avviene mediante l'utilizzo di due parametri:

- il gap critico t_c o *critical gap* ovvero l'intervallo inter-veicolare minimo ritenuto sufficiente dal conducente per effettuare la manovra di immissione o di attraversamento, in condizioni di sicurezza, a partire dal ramo secondario di un'intersezione a regime di priorità; nella valutazione di tale parametro ci si basa sull'ipotesi di coerenza degli utenti, ovvero che essi mantengano un comportamento stabile e non accettino gap precedentemente rifiutati.
- Il tempo di scalamento in coda t_f o *follow-up* inteso come intervallo di tempo che intercorre tra l'immissione di un veicolo da un ramo secondario di un'intersezione e l'immissione del successivo che utilizza il medesimo gap, nell'ipotesi che vi sia coda continua sul ramo di approccio alla corrente principale. Si può quindi dire che il minimo gap temporale tra due veicoli della corrente

principale necessario per consentire a due veicoli accodati di effettuare la manovra di immissione sfruttando lo stesso gap è dato da: $t_c + t_f$

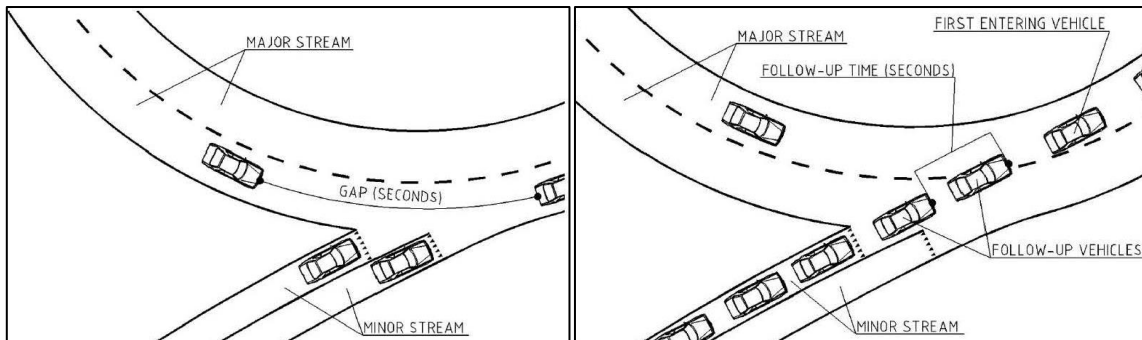


Figura 28. Definizione di gap critico e definizione di follow-up time

Questi due parametri risultano molto importanti nei modelli di micro-simulazione e spesso vengono utilizzati valori tabellari in quanto è estremamente difficile calcolarli se non con osservazioni dirette del traffico. Si dimostrerà come in questo lavoro, grazie all'utilizzo di sistemi di rilevamento innovativi, quali i "droni", sia possibile ricavare facilmente questi due parametri ed ottenere in questo modo simulazioni molto più corrispondenti alla realtà.

Dai dati di traffico storici recuperati e descritti nel paragrafo precedente, si evince come l'area in esame sia sottoposta a volumi di traffico molto elevati. Capire la quantità dei volumi è solamente il primo step per avere un set di dati completi da utilizzare come domanda per lo studio dell'offerta futura. Conoscere "quanto e da dove" la domanda viene generata è infatti il primo livello del c.d. modello a quattro stadi. Sebbene il modello di traffico che verrà implementato sia di tipo micro-mesoscopico, un riferimento al modello a quattro stadi risulta fondamentale.

Per stimare la domanda attuale è possibile effettuare delle indagini, tipicamente delle interviste, su di un campione di utenti e da queste, utilizzando le tecniche della statistica inferenziale, è possibile ottenere delle stime dirette della domanda. In alternativa si può stimare la domanda (attuale o futura) con i modelli metamatematici; quello più utilizzato è chiamato modello a quattro stadi. La stima da modello richiede che i modelli siano specificati (cioè sia scelta la forma funzionale e le variabili che vi compaiono), calibrati (cioè siano stimati i valori dei coefficienti in essi contenuti) e validati (cioè ne sia valutata la capacità di riprodurre i dati reali disponibili).

I modelli di assegnazione (o di interazione domanda offerta su rete) simulano, infine, come la domanda da un'origine ad una destinazione e i flussi di percorso usano i vari elementi del sistema di offerta. I modelli di assegnazione consentono il calcolo dei flussi su arco, ovvero del numero di utenti che utilizza ciascun arco della rete che rappresenta l'offerta di trasporto nel periodo di riferimento. Tale valore può essere considerato come il risultato base finale di un modello, in quanto è su questo che si basano confronti tra lo stato di fatto e gli scenari di progetto, tramite i livelli di servizio o altri indicatori.

2.7. Il calcolo dell'area di influenza

Come già detto il modello applicato si basa su tecniche miste: sistemi informativi territoriali e analisi spaziali studiati per risolvere le funzioni di costo e di minimo percorso attraverso i dati, *floating car data* (FCD) e matrici origini-destinazioni (o/d) storiche. Nel presente paragrafo verranno descritte nel dettaglio e descritto il processo logico per arrivare allo studio della domanda e dell'offerta.

Il modello applicato si basa sulla risoluzione di innovativa due problemi del modello classico a quattro stadi: la determinazione dei tempi di percorrenza e l'equilibrio della domanda

Nei modelli di traffico (c.f.r Figura 23) alcune delle grandezze che compongono il costo di trasporto di un arco, come il tempo o il consumo di carburante, in generale dipendono dal flusso di utenti che utilizza l'arco stesso ed alcuni altri archi della rete, a causa delle interferenze fra i diversi utenti del sistema di trasporto, la cui capacità è intrinsecamente limitata.

La funzione di costo di un arco è la relazione matematica che lega il costo medio di trasporto ai flussi che lo percorrono ed alle caratteristiche fisiche e funzionali del collegamento rappresentato. Si parla di costo medio in quanto il costo generalizzato del trasporto, ed in particolare delle componenti come il tempo di percorrenza, presenta delle oscillazioni aleatorie a parità di flussi.

Il principale assunto del problema dell'equilibrio dell'assegnazione è che ciascun utente sceglie il percorso che percepisce come migliore: se esiste un percorso più corto di quello che l'utente usa correntemente, egli cambierà per quello meno "costoso", ovvero più breve.

Questo porta ad avere dei flussi che soddisfano il principio di Wardrop (1952) dell'ottimo per l'utente, secondo cui nessun utente può decrementare il proprio tempo di viaggio conseguentemente ad un cambiamento di percorso.

La conseguenza di quanto appena detto è che l'assegnazione all'equilibrio interessa una serie di cammini, tali che tutti i percorsi tra una determinata origine ed una determinata destinazione sono caratterizzati dall'aver il medesimo tempo di percorrenza.

La ricerca della soluzione del problema dell'assegnazione all'equilibrio è equivalente a risolvere il problema della minimizzazione dell'area sottesa dalle curve flusso-ritardo.

Inoltre, alcuni autori⁵, sostengono come l'*homo economicus*, costruito artificiale capace di comparare tutte le possibili alternative e scegliere quella che massimizza la propria utilità, in realtà non esiste e crea un'ulteriore frattura tra la realtà e i modelli di simulazione.

È inoltre di recente presentazione un articolo scientifico (Willumsen L.P., 2020) dal titolo esplicativo: "*The end of the 4-stage model is nigh?*" durante l'annuale ETC Conference.

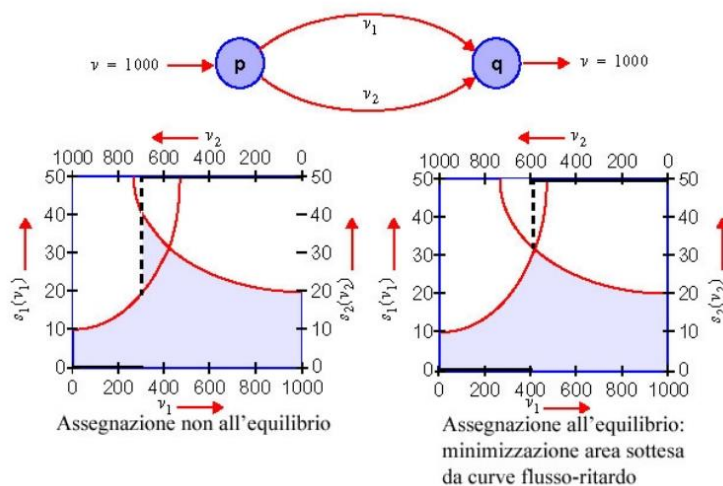


Figura 29. Esempio di assegnazione all'equilibrio della domanda

In sintesi, si è visto come lo studio del traffico sia composto da modelli di offerta, di domanda e di interazione domanda-offerta. In particolare, l'interazione o assegnazione, può essere definita come lo studio delle configurazioni di equilibrio del sistema, cioè delle configurazioni nelle quali i flussi di domanda, di percorso e di arco siano congruenti con i costi che da essi derivano. Da un punto di vista matematico, l'assegnazione di equilibrio può essere definita come il problema di trovare un vettore di flussi che riproduca sé stesso, sulla base della corrispondenza definita dai modelli di domanda e di offerta; questo tipo di problema, di norma, può essere formulato con modelli basati sulla teoria dell'ottimizzazione.

L'approccio che si vuole adottare permette di arrivare ad un equilibrio, ovvero un vettore di flussi, che partendo dalla conoscenza dei cammini minimi e dei tempi di percorrenza e grazie ad analisi spaziali, definisce il vettore dei flussi arco.

Il processo di modellazione classico è semplificato nello schema seguente.

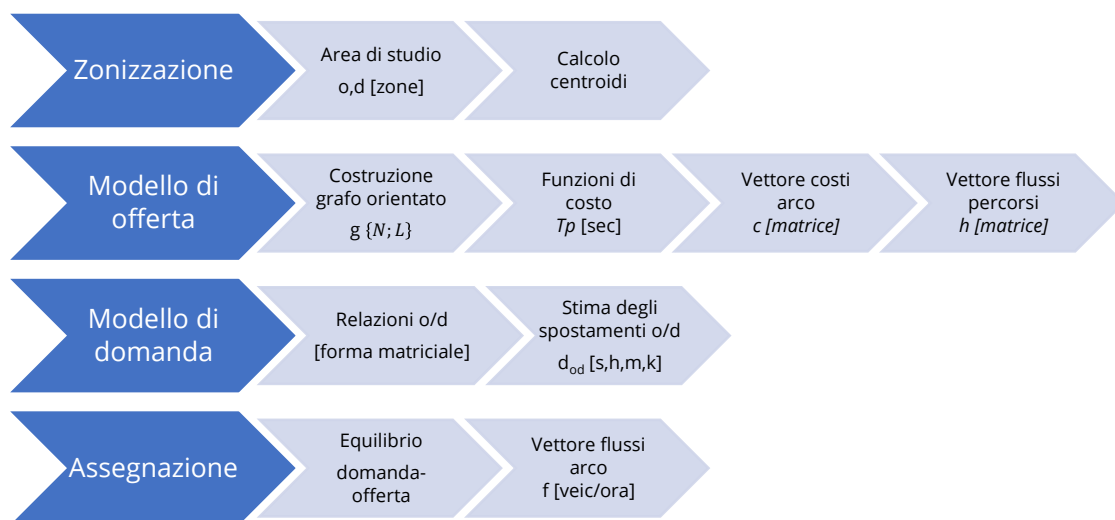


Figura 30. Schematizzazione del processo di modellazione classica

Oltre alle operazioni base indicate è necessario definire le regole della viabilità, le caratteristiche degli archi (capacità) e i modelli di scelta aleatori (es. modello gravitazionale, Logit, modelli di ottimizzazione). Il punto più delicato è la definizione delle funzioni di costo che sono fortemente influenzate dai tempi di percorrenza: la valutazione dei tempi di percorrenza statici, come avviene di norma, è fortemente limitante soprattutto nel contesto pandemico che si sta vivendo.

Inoltre, i tempi di percorrenza sono legati anche alla domanda di traffico e all'interazione tra domanda e offerta. Pensiamo, per esempio, al modello di generazione: il suo obiettivo è di sviluppare una espressione che consenta la previsione del numero degli spostamenti effettuati. Elementi di complessità discendono dalla notevole varietà delle tipologie di spostamento (lavoro, studio, tempo libero, acquisti) e delle attività (ristorazione, attività fisiche, divertimento, etc.) effettuate da un utente un giorno tipo. Proseguendo con il passo successivo, è necessario determinare la matrice dei flussi di scambio tra le coppie di zone (flussi o/d) utilizzando il modello distributivo. Anche in questo caso la distribuzione è fortemente legata al tempo di percorrenza e anche al periodo stesso in cui l'utente decide di effettuare il viaggio. Infine, l'assegnazione: la scelta di un utente di scegliere un percorso rispetto ad un altro è fortemente legato al tempo di percorrenza.

I dati FCD possono rispondere alla necessità di conoscere i tempi di percorrenza medi con l'utilizzo di

una forma di dati univoca. Il Floating car data o Floating cellular data o in sigla FCD (italiano: dati automobilistici mobili), è un metodo per determinare l'andamento del traffico su una rete stradale. È basato sulla collezione di dati geolocalizzati, velocità, direzione di viaggio e informazioni temporali provenienti da telefoni cellulari all'interno dei veicoli guidati. Questi dati sono una fonte essenziale per le informazioni sul traffico e per i sistemi di trasporto intelligenti (ITS). Questo significa che ogni veicolo con un telefono cellulare attivo agisce da sensore nella rete stradale. Basandosi su questi dati, può essere identificata la congestione del traffico, possono essere calcolati i tempi di viaggio, e creati rapidamente report sul traffico. Rispetto alle telecamere per il traffico, ad i sistemi di riconoscimento della targa, e ai circuiti a induzione posti sull'asfalto stradale, non è necessario alcun hardware addizionale da porre nella rete stradale.

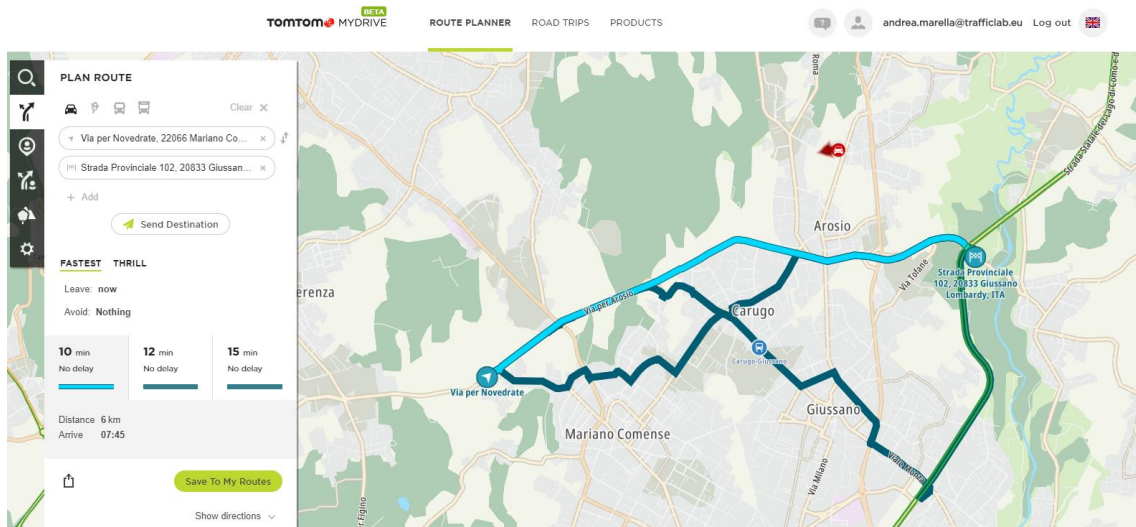


Figura 31. Esempio di algoritmo di routing con utilizzo dati FCD (TomTom)

Inoltre, tali dati forniscono il percorso (o cammino) che l'utente i percorre da un certo punto di partenza (o , origine) ad un certo punto di arrivo (d , destinazione) riprendendo la notazione precedente.

- i , la categoria socioeconomica degli utenti;
- o, d le zone di origine e di destinazione dello spostamento;

Appare evidente come il modello si stia costruendo fondando le sue radici sulla conoscenza dei dati FCD. Inoltre, lo stesso motivo s che porta a studiare e a modellare le diverse ragioni del viaggio passa in secondo piano: in questo momento infatti non è necessario capire nel dettaglio il motivo che ha generato quello spostamento, ma solo quali archi sono stati toccati nel complesso.

È ora possibile definire il processo di modellazione proposto e sintetizzato nello schema seguente.

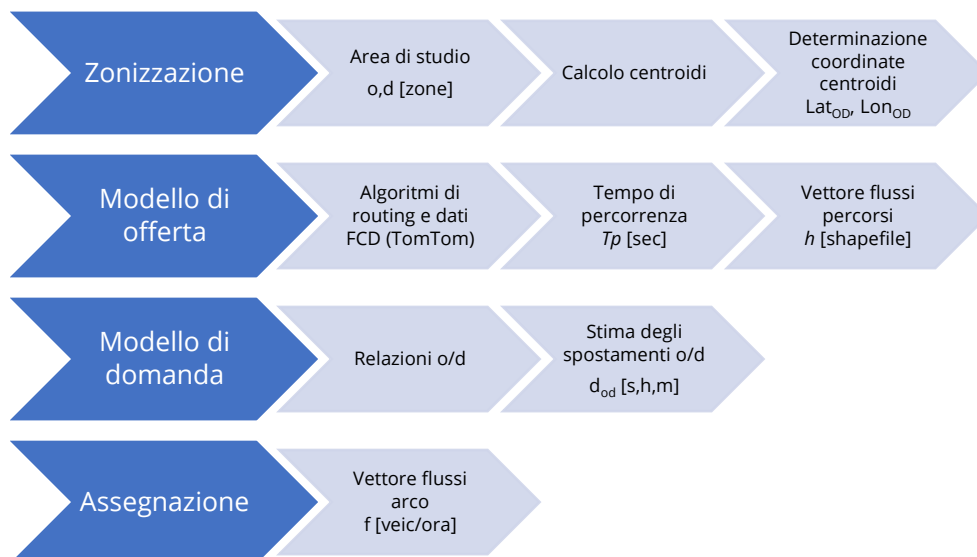


Figura 32. Schematizzazione del processo di modellazione proposto

La prima differenza con il processo classico è la determinazione delle coordinate geografiche dei centroidi. Sebbene si tratti di un procedimento alquanto semplice, il suo automatismo è fortemente legato all'estensione e alla forma della zona. È evidente come potrebbe capitare che il centroide non coincida con il centro abitato o cittadino e che, pertanto, il calcolo successivo del percorso minimo non sia coerente.

C'è da evidenziare come tale incongruenza sia presente quando il territorio è molto vasto (oppure la zona è un'aggregazione di più comuni) e i valori delle coppie degli spostamenti sono limitati. Una possibile evoluzione del metodo potrebbe utilizzare le coordinate degli uffici comunali come centroidi delle zone considerate facilmente reperibili.

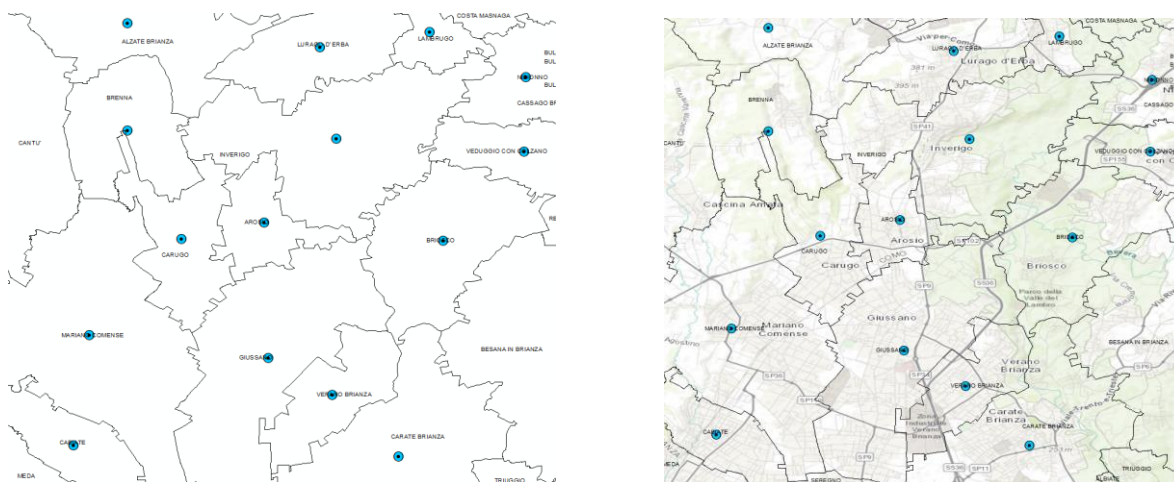


Figura 33. Esempio di centroidi coincidenti con il centro abitato

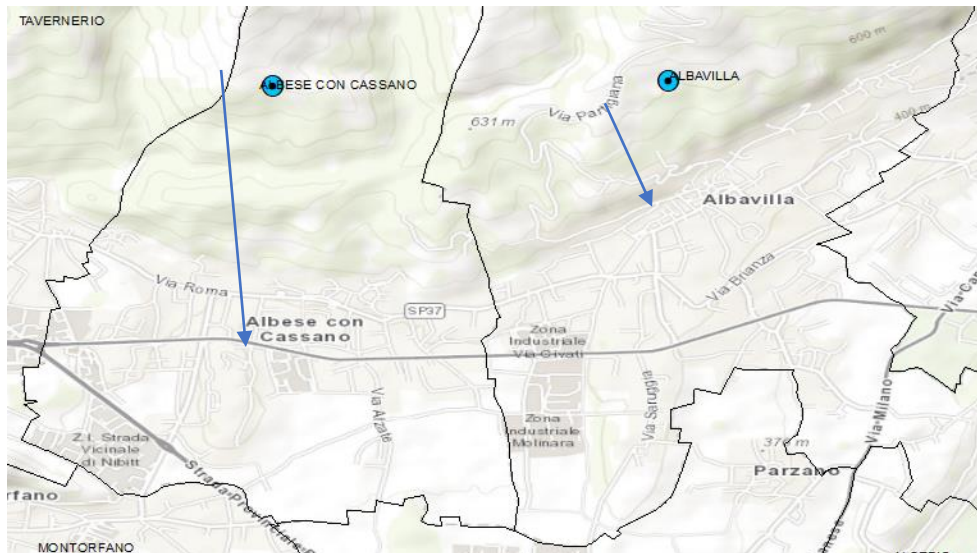


Figura 34. Esempio di centroidi non coincidenti con il centro abitato

La grande differenza tra il modello classico e quello proposto è la determinazione delle funzioni di costo e, conseguentemente, dell'assegnazione.

Nel metodo tradizionale è necessario ricostruire il modello di offerta, le caratteristiche degli archi, le funzioni di costo, etc. fino per passare alla generazione e distribuzione della domanda fino all'assegnazione. Nel metodo proposto il calcolo delle funzioni di costo viene bypassato in quanto sono noti a priori i percorsi "adottati" dagli utenti e la ricostruzione del modello di offerta è conseguente.

Nota una coppia di domanda di spostamento per motivo, periodo e modo $d_{od}[s, h, m, k]$ è possibile calcolare il percorso ottimale sul dato di traffico storico e medio sull'intera giornata e tramite algoritmi di ricerca del percorso minimo e dati FCD; il risultato, oltre al tempo di percorrenza, è una sequenza orientata di archi.

3. I modelli del controllo semaforico

3.1. Nota introduttiva

Lo sviluppo dell'informatica e l'implementazione dei progetti di Smart City hanno permesso in pochi anni di disporre di una enorme quantità di dati. La grande domanda è come mettere a frutto queste informazioni. Il campo dell'Intelligent Transportation Systems (ITS) è uno dei settori nel quale la ricerca sui nuovi dati, combinata con l'Intelligenza Artificiale (IA), ha iniziato a mostrare risultati interessanti. L'ITS permette di fornire servizi innovativi e avanzati relativi alle modalità di trasporto e gestione del traffico e consente agli utenti di fare scelte più intelligenti quando utilizzano le reti di trasporto. Questo ha effetto diretto sull'efficacia dell'infrastruttura nelle città intelligenti urbane. Non è semplice ottimizzare un sistema di trasporto che sia il più performante possibile, ad un ridotto impatto ambientale e con il minor numero di incidenti stradali. Ci sono molti fattori in gioco nel modo in cui cambia (e quindi va previsto) il traffico giornaliero. Avere un sistema che può ragionevolmente prevedere i cambiamenti nel traffico è di enorme valore per il governo, l'industria e i cittadini. La Commissione della Comunità Europea ha dichiarato che gli ITS possono ridurre i tempi di viaggio fino al 20%. Ciò non solo ridurrà i costi per la società, ma avrà anche un effetto positivo sull'ambiente.

La ricerca scientifica, nel settore del traffico e dei trasporti, ha permesso di analizzare i big data sul traffico in modo diretto e con la necessità di studiare modelli di analisi e di rappresentazione dei dati che vanno oltre alla classica modellistica (c.d. *simulation agent model based*). Grazie ai big data sul traffico e le tecniche di IA e machine learning (ML) è oggi possibile studiare nuovi modelli di previsione dei comportamenti degli utenti della strada (c.d. *data-driven models*). È così possibile offrire la modellazione degli scenari di traffico secondo moderne tecniche di analisi (superando i classici modelli deterministici o car-following) attraverso l'utilizzo di grandi quantità di dati, un tempo impossibili da reperire. In sintesi, la proposta di ricerca è quella di implementare un modello di traffico composito di una ridotta area urbana mediante le informazioni del traffico rilevate sul campo, le caratteristiche geometriche della strada e i dati analizzati in tempo reale, per offrire un modello che sia più vicino alla realtà e di semplice aggiornamento. Tutti dati a disposizione verranno utilizzati in modo ottimale per studiare modelli di previsione dei comportamenti degli utenti della strada al fine di prevedere le caratteristiche fondamentali del flusso veicolare partendo da variabili descrittive, quali: livelli di traffico, inquinamento e sicurezza stradale.

Il modello prenderà in considerazione con maggiore dettaglio i primi due aspetti; in particolare l'inquinamento sarà l'aspetto maggiormente analizzato. L'area di studio è infatti in una delle aree più inquinante dell'intera Europa. I morti da PM10 e PM2,5 si concentrano nel nostro Paese proprio nell'area padana oggetto di studio. Secondo uno studio dell'OMS l'inquinamento dell'aria continua a crescere e compromette le economie e la qualità di vita generando una vera e propria emergenza sanitaria. Si rende così necessario mettere in atto politiche ed azioni al fine di ridurre l'impatto ambientale; per fare ciò è necessario conoscere e mettere a disposizione dei decisori dati e mappe, facilmente interpretabili, al fine di valutare velocemente la buona riuscita delle soluzioni messe in atto e nel caso correggerle o modificarle.

La complessità del comportamento stradale degli utenti, per effetto delle numerose componenti da cui esso stesso è influenzato, e la difficoltà nel riprodurre sperimentalmente quanto osservato nella realtà, ha incentivato l'impiego di modelli di simulazione del traffico. Tali strumenti risultano particolarmente

efficaci per l'analisi di una vasta gamma di parametri e problemi dinamici associati a processi, come i problemi di viabilità dovuti alla congestione o connessi all'inquinamento ambientale che possono difficilmente essere descritti in maniera analitica. Questo perché il più delle volte i processi sono caratterizzati dalla complessa interazione di molteplici componenti del sistema, talvolta loro stessi di difficile definizione. Il modello che si intende implementare si basa su un processo simile a quello classico (c.d. modelli a 4 stadi) ma con un approccio totalmente innovativo.

Il sistema è stato definito composito in quanto prende in considerazione più modelli

3.2. Le intersezioni semaforizzate

Possiamo definire un ciclo semaforico come la sequenza ordinata dei segnali di verde, giallo e rosso durante il quale tutte le correnti, almeno una volta, hanno l'opportunità di attraversare l'incrocio; alla fine del ciclo si riprende con la medesima configurazione. Ogni ciclo è formato da almeno due fasi, definite come la frazione del tempo di ciclo durante la quale i segnali per ogni corrente abilitata in tale fase rimangono fissi.

Ogni fase è composta da una o più manovre, definite come le traiettorie dei veicoli che provenendo da uno stesso accesso raggiungono una destinazione comune. Una manovra può essere compatibile con un'altra se non si interseca o non confluisce in un punto comune; altrimenti è definita incompatibile.

In questo paragrafo saranno brevemente richiamate le principali definizioni e la notazione delle grandezze adottate nel seguito. In particolare, si descriveranno le grandezze rappresentative di una generica intersezione isolata e le misure di prestazione.

Si considerino dunque le seguenti definizioni riguardanti gli incroci semaforizzati.

- *Intersezione*: infrastruttura di trasporto costituita dalla confluenza di più infrastrutture stradali; nel caso in cui l'attraversamento dell'intersezione sia regolato da un semaforo, l'intersezione è detta intersezione semaforizzata;
- *Manovra*: traiettoria formata dai veicoli che provenendo da uno stesso accesso (o ingresso) attraversano l'incrocio per raggiungere una comune uscita. Due manovre sono compatibili se non s'intersecano o se non confluiscono in un punto comune. Come accennato, lo scopo primario originario della regolazione semaforica è garantire l'attraversamento sicuro delle intersezioni per tutte le manovre, tenendo in considerazione le incompatibilità presenti;
- *Corrente*: una corrente è un gruppo di manovre abilitate ad attraversare l'intersezione nello stesso istante.

Sulla base delle definizioni riportate, per un cui approfondimento si rimanda a (Cantarella e Vitetta, 2010) e a (Papageorgiou et al., 2003), è possibile definire le grandezze che caratterizzano un'intersezione utilizzate nel seguito del capitolo.

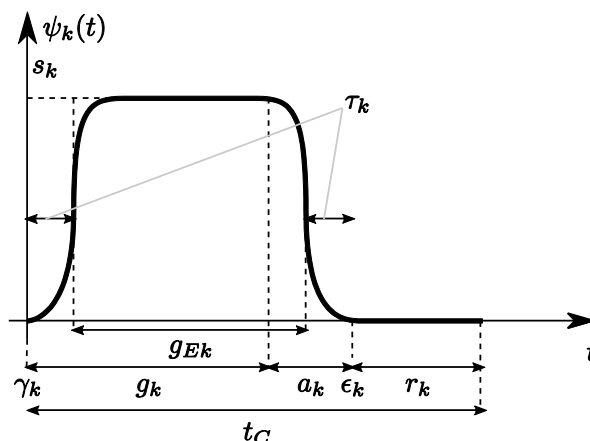


Figura 35. Flusso veicolare a un generico accesso k di un'intersezione.

In particolare, con riferimento al grafico sopra esposto s'introducono le seguenti grandezze:

- f_k : flusso di arrivo per la corrente k , cioè numero di veicoli che arriva al corrispondente accesso nell'unità di tempo;
- $\psi_k(t)$: flusso veicolare in partenza dall'accesso k all'istante t ;
- s_k : flusso di saturazione per l'accesso k , cioè massimo numero di veicoli che possono attraversare l'intersezione, provenendo dall'accesso k , nell'unità di tempo, cioè $s_k = \max_k \psi_k(t)$. Tale grandezza dipende dalle caratteristiche geometriche dell'incrocio, nonché dalla tipologia di flussi che lo interessano in media, e può essere calcolato direttamente come indicato nell'Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2010)
- γ_k : istante di inizio della fase di verde per l'accesso k ;
- ϵ_k : istante di fine della fase di giallo per l'accesso k ;
- g_k : durata del segnale verde per l'accesso k ;
- r_k : durata del segnale rosso per l'accesso k ;
- a_k : durata del segnale giallo (ambra) per l'accesso k ;
- τ_k : tempo perso per l'accesso k ;
- $t_c = r_k + g_k + a_k$: tempo di ciclo dell'intersezione;
- N_k : numero di veicoli che, provenendo dall'accesso k , attraversa l'intersezione durante un ciclo semaforico; per definizione, tale grandezza è data dall'integrale del flusso in partenza dall'accesso k durante un ciclo intero di durata t_c ;
- $g_{Ek} = N_k/s_k$: verde efficace per l'accesso k , cioè l'intervallo di tempi che consente a un numero N_k di veicoli di attraversare l'incrocio, assumendo istantaneo il passaggio da flusso nullo a flusso di saturazione s_k ;
- $r_{Ek} = t_c - g_{Ek}$: rosso efficace per l'accesso k ;
- $\tau_k = g_k + a_k - g_{Ek}$: tempo perso per l'accesso k . Tale grandezza è una misura del fenomeno d'inerzia che caratterizza i veicoli in partenza dall'accesso k , che non avviene istantaneamente al passaggio dal segnale rosso a quello verde, e dell'inerzia alla fermata, che non avviene istantaneamente al passaggio dal segnale verde a quello giallo;
- tempo di "tutto rosso": periodo di tempo in cui tutti le correnti hanno contemporaneamente segnale rosso. Tale tempo è determinato in base criteri di sicurezza degli attraversamenti.
- $tp_{(j,j+1),l}$ tempo di percorrenza tra due accessi coordinati.

A completamento delle definizioni sopra riportate, si introducono la matrice di incompatibilità M_i e la matrice delle fasi M_f .

Al fine di descrivere in maniera chiara e precisa l'incompatibilità tra due manovre si introduce la matrice quadrata di incompatibilità M_i , la quale ha tante righe e colonne quante sono le correnti che possono attraversare nell'intersezione.

$$M_i(h, k) = \begin{cases} 1 & \text{se le correnti } h \text{ e } k \text{ hanno un punto di conflitto} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.20)$$

Nella pratica, a volte, è possibile considerare due manovre incompatibili come compatibili quando una delle due ha bassi valori del flusso in arrivo (anche pedonale). In maniera simile alla matrice di incompatibilità è possibile definire la matrice delle fasi M_f , la quale fornisce indicazioni sull'abilitazione di ciascuna corrente nella propria fase ed ha tante righe quante sono le correnti e tante colonne quante sono le fasi; i suoi elementi sono:

$$M_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{se la corrente } k \text{ è abilitata nella fase } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.21)$$

La successione delle fasi, che non è univoca, ed il numero delle stesse, anch'esso non univoco, sono determinati tenendo conto di alcune considerazioni che potrebbero influenzare i parametri prestazionali o di sicurezza dell'incrocio.

Esistono principalmente due criteri inerenti alla progettazione della fasatura:

- separazione delle correnti in base alla provenienza: si assegna il via libera nella stessa fase a correnti che provengono dalla stessa corsia e che hanno destinazioni diverse; questo metodo è utilizzato quando la geometria stradale non permette la creazione di corsie dedicate alle singole manovre. Nella figura 2.2 si nota come nella prima fase, siano abilitate manovre (che, così definite, fanno un'unica corrente) provenienti dalla stessa strada e come non ci sia una corsia preferenziale dedicata, per esempio, alla manovra di svolta a destra.

Separazione delle correnti indipendentemente dalla provenienza: correnti provenienti dalla stessa strada, con destinazioni diverse, hanno il via libera in fasi differenti. Al fine di avere una progettazione di questo tipo è necessario avere corsie specializzate per ciascuna corrente.

La definizione delle fasi rappresenta un punto critico nella progettazione delle intersezioni semaforizzate, in quanto da essa dipendono tutti gli altri parametri di regolazione. Questa criticità deriva dal fatto che, essendo la fase definita come la suddivisione del tempo totale disponibile per ciclo, in verde per le diverse correnti abilitate simultaneamente, si ha che per ogni fase, altre correnti, conflittuali con quelle abilitate, saranno bloccate, provocando ritardi al deflusso veicolare.

Il numero delle fasi deve essere il più piccolo possibile in maniera da massimizzare la capacità dell'intersezione, ma deve comunque garantire il deflusso di tutte le manovre.

Le correnti che richiedono tempi di verde di durata simile vengono accorpate nella stessa fase (se compatibili). Inoltre, è bene definire le fasi in maniera che la somma dei tempi non utilizzati dalle diverse manovre a causa degli intertempi di sicurezza o alle transizioni di fase siano minimi. Con transizione di fase si intende il periodo di tempo fra l'istante in cui viene commutato al rosso il primo segnale della fase uscente e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante.

Bisogna altresì rispettare alcuni vincoli derivanti dai diversi modi di impiego delle corsie quando vengono effettuate le manovre:

- Vincolo di simultaneità: il verde semaforico deve essere simultaneo per manovre distinte che utilizzano in modo promiscuo le stesse corsie (l'opposto di questo vincolo è definito vincolo di sequenzialità, per il quale manovre veicolari distinte possono defluire in fasi separate solo se hanno a disposizione corsie dedicate).

- Vincolo di inizio ritardato del verde: viene imposto che il verde di una corrente con diritto di precedenza non può iniziare dopo il verde di una corrente compatibile condizionata (pedoni con diritto di precedenza rispetto a correnti veicolari che svoltano a destra).

Molto importante nella definizione delle fasi sono le svolte, sia a sinistra che a destra, in quanto, generalmente, hanno un elevato numero di punti in conflitto con le altre correnti.

Le svolte a sinistra si definiscono completamente protette se quando hanno il via libera, nessun'altra corrente, in conflitto con le stesse, ha il verde nello stesso periodo. Questo accade quando la corrente che percorre la strada nel verso opposto ha un volume di traffico considerevole, oppure se la svolta debba essere eseguita in maniera celere in modo da non creare perturbazioni nel flusso dei veicoli che seguono. Inoltre, nel caso di scarsa visibilità nella manovra di svolta o nel caso di una moltitudine di conflitti, inclusi i pedoni, o infine, nel caso la svolta si effettui su più corsie è bene separare la corrente di svolta da quelle antagoniste rendendola protetta.

- Una svolta è definita parzialmente protetta quando i segnali che controllano le correnti antagoniste sono al rosso solo per una parte del tempo di verde della manovra di svolta. Così facendo chi deve svoltare a sinistra lo potrà fare in maniera protetta finché il suo verde non è sovrapposto al verde delle correnti in conflitto. Dopo tale periodo c'è sovrapposizione di verdi ed i veicoli in manovra di svolta dovranno dare la precedenza. Il verde protetto per le correnti che svoltano a sinistra si può ottenere dall'allungamento del verde rispetto alle correnti in conflitto o dall'anticipo dello stesso.
- Infine, si hanno le svolte a sinistra non protette, utilizzabili nel solo caso di correnti in conflitto caratterizzate da flussi di modesta entità. Si tratta evidentemente di una soluzione poco applicabile nel contesto di traffico urbano data la pericolosità derivante dall'alto valore dei flussi e dalla scarsa visibilità.
- Le svolte a destra, contrariamente a quelle a sinistra non necessitano di particolari indicazioni (segnali direzionali appositi) e, in ragione di ciò, presentano meno problemi nella definizione delle fasi. Nonostante ciò, è possibile avere anche in questo caso le svolte a destra completamente protette o parzialmente protette nel caso in cui i flussi delle correnti antagoniste siano particolarmente elevati o nel caso in cui la velocità di esecuzione della manovra possa determinare una situazione di pericolo per le correnti in conflitto (generalmente con quelle pedonali).
- Nel caso di svolta a destra non protetta e conflitto con la corrente pedonale, è necessario segnalare, attraverso una luce gialla lampeggiante, tale eventualità.

Per quanto concerne invece i parametri di prestazione relativi ad un'intersezione isolata, si hanno:

- gli indicatori di prestazione per accesso, detto rispettivamente isolato o interagente in funzione del fatto che le prestazioni siano, o non siano, influenzate dalla semaforizzazione dell'intersezione a monte;
- gli indicatori di prestazione complessiva per l'intera intersezione, distinguendo tra intersezioni isolate, se nessuno degli accessi è influenzato dalla regolazione alle intersezioni a monte, e viceversa.

Nel seguito saranno richiamati solo gli indicatori per gli accessi e le intersezioni isolate. A tale proposito, nel caso di un generico accesso k , un primo indicatore è il *grado di saturazione*

$$\chi_k = \frac{f_k}{N_k} = \frac{f_k t_c}{s_k g_{Ek}} \quad (2.22)$$

che esprime il rapporto tra il numero totale di veicoli in arrivo all'accesso considerato durante un intero ciclo semaforico e il numero di veicoli transitati nella fase di verde. L'accesso è detto in *condizione di sottosaturazione* se $\chi_k < 1$, o in *condizioni di sovraturazione*, se $\chi_k > 1$. Nel primo caso, il numero totale di veicoli che arriva all'accesso è inferiore a quello che può transitare durante lo stesso periodo, mentre nel secondo caso accade il viceversa.

Tale indicatore può essere utilizzato anche per l'intera intersezione, assumendo come grado di saturazione quello massimo tra i gradi di saturazione di tutti gli accessi, cioè $\chi = \max_k \chi_k$.

Un ulteriore indicatore per un generico accesso k è il *fattore di capacità* ξ_k , definito come l'inverso del grado di saturazione χ_k . Questo indicatore rappresenta il massimo coefficiente per il quale si può moltiplicare il flusso in arrivo senza avere sovrasaturazione ed è maggiore di uno per gli accessi in sottosaturazione, minore o uguale a 1 nel caso opposto. In analogia al grado di saturazione, si può definire il fattore di capacità per un'intersezione come $\xi = \min_k \xi_k$.

Una seconda categoria di indicatori di prestazione per gli accessi è costituita dagli indicatori di ritardo, cioè da un insieme di modelli che forniscono indicatori del tempo perso dai veicoli a causa della presenza dell'intersezione, in funzione dei parametri della regolazione semaforica. La descrizione dettagliata di tali indicatori va oltre gli scopi del presente capitolo e si rimanda a (Cantarella e Vitetta, 2010) per una descrizione dettagliata.

Per quanto concerne il progetto della regolazione di intersezioni isolate, le variabili di progetto sono:

- la composizione delle correnti: per intersezioni che coinvolgono un numero elevato di correnti, è possibile determinare la composizione ottima delle correnti, cioè, in altre parole, la matrice delle fasi M_{fi} ;
- la durata delle fasi di verde e giallo, che può essere anche determinata in maniera non assoluta ma in relazione alla durata del tempo di ciclo, che deve tenere in considerazione i flussi in arrivo ai diversi accessi;
- il tempo di ciclo, tenendo presente che allungamenti del tempo di ciclo comportano una riduzione dei tempi persi costanti per ogni accesso, ma possono portare a tempi di attesa prolungati per i veicoli, specialmente in condizioni di sotto saturazione, a causa della lunga durata delle fasi di rosso.

Per quanto concerne, invece, le tipologie di controllo, si possono avere strategie a piani predefiniti, a selezione di piani o attuate dai flussi, come descritto in precedenza.

3.3. Algoritmo di controllo e di ottimizzazione di impianti semaforici

La parte della centrale della tesi di ricerca è studiare un algoritmo di controllo che, definiti i parametri in tempo reale, possa aumentare la capacità dell'intero sistema di controllo. Tale formulazione sarà sicuramente appartenente alla nuova generazione di Urban Traffic Control System (UTCS). A questa verranno affiancati i modelli di calibrazione ottenuti dall'ottimizzazione dei modelli comportamentali dei simulatori di traffico visti in precedenza. Obiettivo finale della ricerca è quello di studiare, ed in un secondo momento sviluppare, un algoritmo per la gestione del traffico nelle nuove città smart comprendendo le procedure di ricezione dei dati, la calibrazione ed ottimizzazione dei modelli di traffico fino alla gestione in tempo reale dei nodi e degli archi della rete da gestire tramite ottimizzazione del coordinamento tra gli impianti.

È possibile definire il coordinamento semaforico come la tecnica di progettazione dei parametri di regolazione delle intersezioni semaforizzate che permette di ridurre i tempi di attesa, e di conseguenza i ritardi complessivi, degli utenti lungo un'arteria stradale. I semafori coordinati permettono, infatti, di minimizzare il numero di volte che un utente è costretto a fermarsi lungo il suo itinerario.

In questa ricerca verrà studiato un modello stocastico di programmazione matematica per il coordinamento semaforico. In particolare, le variabili principali (flusso e tempo di percorrenza), grazie ai dati a disposizione, verranno modellate non con semplici funzioni di probabilità discrete ma con distribuzione di probabilità continua (distribuzione normale).

3.4. Problemi di ottimizzazione stocastica

Le condizioni di incertezza implicano che gli elementi da considerare nella valutazione di un problema non sono noti a priori, come invece avviene nel caso dei problemi deterministici, ma dipendono da eventi futuri del quale non si ha una conoscenza precisa. In quest'ottica la programmazione deterministica è l'esatto opposto di quella stocastica il cui obiettivo è quello di individuare le decisioni ottimali in problemi che coinvolgono dati incerti. Sfortunatamente la maggior parte dei problemi reali non coinvolge dati conosciuti ma includono parametri che non sono conosciuti nel momento in cui la decisione viene presa. Non avere una conoscenza precisa dei parametri, non significa non conoscere nulla circa le loro caratteristiche, cosa che renderebbe il problema irrisolvibile, ma significa semplicemente non conoscere nel dettaglio quale valore avrà tale parametro e quale l'altro; di questi parametri incerti si presuppone, però, la conoscenza di un possibile insieme di valori e di una data distribuzione di probabilità (ad esempio, definite attraverso l'analisi di serie storiche).

In letteratura esistono diversi metodi a supporto delle decisioni, ma in questo elaborato si utilizzerà solo la programmazione stocastica.

Per non incorrere in errore è bene dare una definizione precisa dell'ottimizzazione stocastica rispetto a quella che comunemente viene chiamata ottimizzazione robusta, entrambi metodi decisionali per la gestione esplicita dell'incertezza.

- Programmazione stocastica: è un'estensione delle metodologie deterministiche, lineari e non lineari, in cui ad ogni parametro incerto viene associata una distribuzione di probabilità e il cui obiettivo è quello di trovare una soluzione ottima sotto condizioni di incertezza.
- Ottimizzazione robusta: è una metodologia il cui scopo è determinare una soluzione che sia "buona" rispetto ad un insieme specificato di eventi aleatori o alla variabilità di alcuni parametri, senza diventare inammissibile o troppo costosa ed in cui non si fanno ipotesi di natura probabilistica circa i parametri/eventi incerti.

In altre parole la programmazione stocastica è utilizzata in ambienti in cui il rischio, collegato al verificarsi di un evento, è definito da una distribuzione di probabilità mentre per l'ottimizzazione robusto questo non avviene.

Inoltre la programmazione stocastica, che nel caso discreto si avvale di scenari, intesi come la realizzazione di un parametro incerto, ha come obiettivo quello di trovare allo stesso tempo la soluzione al problema nominale (scenario base) e le possibili correzioni che devono essere apportate al sistema stesso nel caso si realizzi uno specifico scenario. Al contrario l'ottimizzazione robusta ha come obiettivo quello di trovare una soluzione che sia ammissibile e poco costosa, in termini di costo della soluzione ottenuta, che vada bene a prescindere dal valore che poi effettivamente assumerà il parametro incerto; in questo caso si parla di soluzione ragionevole, con condizioni di ragionevolezza che sono stabilite da criteri di robustezza specificatamente definiti.

Come succede spesso nei problemi che coinvolgono le variabili aleatorie, la difficoltà principale dell'ottimizzazione stocastica è quella di definire una distribuzione di probabilità che sia idonea a rappresentare la variabilità del parametro.

3.5. Modello di programmazione matematica stocastica per il coordinamento semaforico

È possibile formulare il problema della determinazione della durata ottimale delle fasi, per intersezioni qualsiasi, come un problema di programmazione matematica di massimizzazione del fattore di capacità o di minimizzazione del ritardo, caratterizzato da un insieme di vincoli che definiscono le diverse grandezze caratteristiche delle intersezioni.

I metodi più noti basati sulla programmazione matematica sono SIGCAP, in cui la funzione obiettivo è volta a massimizzare il fattore di capacità dell'incrocio (Allsop, 1976), e SIGSET, in cui la funzione obiettivo definisce la minimizzazione del ritardo (Allsop, 1971).

In particolare, quindi, il problema di massimizzazione del fattore di capacità (SIGCAP) è un problema di programmazione matematica di tipo "max-min".

Per far fronte a questo problema, in questo lavoro sono riformulati nei termini dei cosiddetti programmi lineari stocastici a due stadi con ricorso (Birge e Louveaux, 1997). Quindi, dopo aver introdotto diversi indicatori per valutare la robustezza della soluzione, i modelli proposti vengono valutati mediante un caso di studio del mondo reale.

Si ha una funzione di costo multi-obiettivo che vuole massimizzare:

- la capacità minima tra tutte le capacità delle intersezioni coordinate
- la somma delle bande di progressione, pesate attraverso un coefficiente dato dal rapporto tra i flussi in arrivo al primo accesso (della direzione coordinata) ed il relativo flusso di saturazione

$$\max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \xi_l + \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^p \rho_{i,l} \cdot b_{i,l} \right\} \quad (3.1)$$

in cui $\rho_{i,l}$ è la definizione di rapporto di saturazione

$$\rho_i = \frac{f_i}{s_i} \quad (3.2)$$

Il primo vincolo riguarda il sequenziamento delle fasi e determina l'impossibilità che correnti in conflitto tra loro siano abilitate nello stesso intervallo di tempo. È il classico vincolo disgiuntivo che si può trovare nei problemi di *job scheduling* relativamente a due task che non possono essere svolte nello stesso istante di tempo.

$$\varepsilon_{k,l} \leq \gamma_{h,l} + M \cdot \omega_{k,h}, \quad \forall k, h : M_i(k, h) = 1, \forall l \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{h,l} \leq \gamma_{k,l} + M \cdot (1 - \omega_{k,h}), \quad \forall k, h : M_i(k, h) = 1, \forall l \quad (3.4)$$

Definizione di verde efficace

$$g_{Ek,l} = \varepsilon_{k,l} - \gamma_{k,l} - \tau_k \quad \forall k, \forall l \quad (3.5)$$

Definizione di capacità e imposizione di condizioni di sotto-saturazione dell'accesso.

$$1 \leq \xi \leq \frac{s_k}{f_{k,l}} \cdot \frac{g_{E_{k,l}}}{tc} \quad \forall k, \forall l \quad (3.6)$$

$$f_{k,l} \sim \text{LogN}(\log \mu_k, \log \delta_k^2) \quad \forall k \in A_{\text{LogN}}, \forall l \quad (3.7)$$

$$f_{k,l} \sim U(a, b) \quad \forall k \in A_U, \forall l \quad (3.8)$$

dove A_{LogN} e A_U sono gli insiemi di accessi per i quali i flussi risultano distribuiti secondo una distribuzione LogNormale e uniforme rispettivamente. Evidentemente, $A_{\text{LogN}} \cap A_U = \emptyset$.

Vincoli temporali che impongono che la fine del periodo di verde della k -esima corrente termini all'interno del tempo di ciclo e che, parimenti, inizi nel ciclo in analisi (e dunque non in quello precedente). Il periodo di verde della corrente h deve iniziare solo ed esclusivamente nel periodo $0 \leq \varepsilon_{k,l} \leq t_c$

$$\varepsilon_{k,l} \leq t_c \quad \forall k, \forall l \quad (3.9)$$

$$\gamma_{k,l} \geq 0 \quad \forall k, \forall l \quad (3.10)$$

Questo vincolo impone che il primo veicolo che attraversa la prima l'intersezione non arrivi alla seconda trovando il segnale rosso. Ciò implicherebbe che il veicolo deve fermarsi e, conseguentemente, quando scatta il verde al secondo incrocio, il primo veicolo all'interno della banda di progressione troverebbe la coda e dunque sarebbe costretto a fermarsi, o comunque a rallentare in prossimità dell'incrocio.

In questo vincolo viene anche posta la condizione di variabile aleatoria $tp_{(j,j+1)}$ tempo di percorrenza tra gli accessi coordinati j e $j + 1$.

$$\gamma_{h,l} \leq \gamma_{k,l} + tp_{(j,j+1),l} \quad \forall k, h: M_{\text{coord}}(k, h) = 1, \forall j = 1 \dots n - 1, \forall l \quad (3.11)$$

$$tp_{(j,j+1)} \sim \text{LogN}(\log \mu_{(j,j+1)}, \log \delta_{(j,j+1)}^2) \quad (3.12)$$

Simile al vincolo precedente, il vincolo 6 è relativo all'istante finale della fase coordinata. Se l'ultimo veicolo della prima intersezione non riesce a transitare nella seconda intersezione con il verde si accumulerà in coda, e nel ciclo semaforico successivo, non si avrà il sincronismo tra l'arrivo del primo veicolo contenuto nella banda e il suo passaggio prima deve essere smaltita la coda formatasi nel ciclo precedente).

$$\varepsilon_{h,l} \geq \varepsilon_{k,l} + tp_{(j,j+1),l} \quad \forall k, h: M_{\text{coord}}(k, h) = 1, \forall j = 1 \dots n - 1, \forall l \quad (3.13)$$

$$tp_{(j,j+1)} \sim \text{LogN}(\log \mu_{(j,j+1)}, \log \delta_{(j,j+1)}^2) \quad (3.14)$$

Questo vincolo definisce che l'istante di fine della banda di progressione deve essere minore o uguale al più piccolo degli istanti di inizio dei verdi coordinati.

Infatti, essendo l'ampiezza di banda l'intervallo temporale all'interno del periodo di verde per il quale si ha un flusso ininterrotto di veicoli dalla prima all'ultima intersezione, tale intervallo sarà, nella migliore delle ipotesi, uguale al più piccolo periodo di verde.

$$y_{i,l} = \min \left\{ \varepsilon_{k,l} (\varepsilon_{h,l} - tp_{(j,j+1),l}), [\varepsilon_{w,l} - (tp_{(j,j+1),l} + tp_{(j+1,j+2),l})], [\varepsilon_{z,l} - (tp_{(j,j+1),l} + tp_{(j+1,j+2),l} + \dots + tp_{(n-1,n),l})] \right\} \quad \forall k, h, w, z \in S_{i,j}, \forall l \quad (3.15)$$

$$x_{i,l} = \max \left\{ \gamma_{k,l} (\gamma_{h,l} - tp_{(j,j+1),l}), [\gamma_{w,l} - (tp_{(j,j+1),l} + tp_{(j+1,j+2),l})], [\gamma_{z,l} - (tp_{(j,j+1),l} + tp_{(j+1,j+2),l} + \dots + \tau_{(n-1,n),l})] \right\} \quad \forall k, h, w, z \in S_{i,j}, \forall l \quad (3.16)$$

Definizione della banda

$$b_{i,l} = y_{i,l} - x_{i,l} \quad \forall i = 1 \dots p \text{ coordinamenti}, \forall l \quad (3.17)$$

4. Analisi sperimentale

4.1. Descrizione dell'area in studio

La strada S.P.32 Novedratese è tra le strade in gestione alla Provincia di Como a maggiore congestione di traffico, con flussi veicolari giornalieri medi di circa 29.000 veic/giorno registrati nel Comune di Arosio.

Allo stato attuale le maggiori problematiche di congestione che interessano l'area ovest, causano incolonnamenti su Via A. de Gasperi per i veicoli provenienti dal comune di Carugo, nonché su Via G. Marconi per i veicoli provenienti dai comuni di Alzate Brianza e Orsenigo; analogamente alla zona ovest, si verificano incolonnamenti anche nella zona est ove si riversano numerosi veicoli sulla viabilità interessata, Via A. de Gasperi e Via S.M. Maddalena rispettivamente dai comuni di Inverigo, Briosco, Giussano e Seregno.

In queste condizioni, gli elevati flussi veicolari su S.P. 32 bloccano i veicoli provenienti da Via G. Marconi e Via S. Maddalena, situazione ancor più aggravata dalle inadeguate corsie di accumulo su Via A. de Gasperi che, con un evidente sottodimensionamento, non permettono la fluida immissione dei veicoli su Via Don Carlo Baj e Via Donatori di Sangue.

In questo contesto è in fase di completamento (agosto 2020) la riqualificazione urbana dell'immobile Ex-Cappellini a struttura ricettiva commerciale che genererà un ulteriore traffico indotto, in quanto polo attrattivo per gli utenti che provengono dai comuni limitrofi.

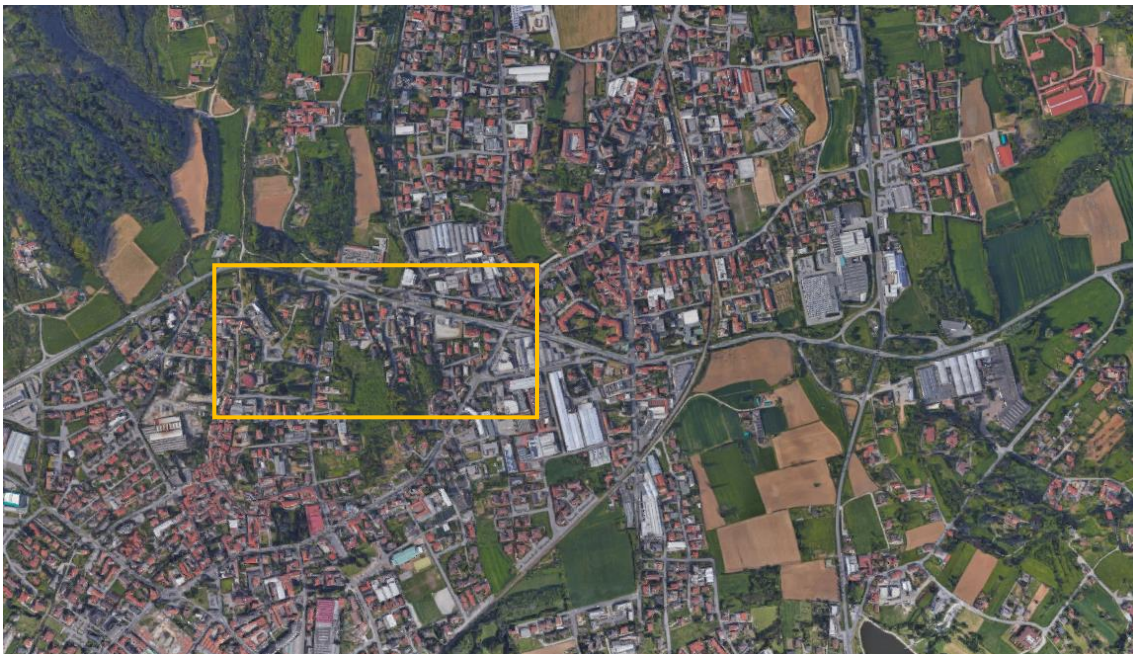


Figura 36. Immagine satellitare dell'area di studio.

Secondo dati passati (settembre 2017 - fonte Google Maps ®), gli accodamenti si estendono fino a circa 2 km in direzione sud-ovest (Cantù) e 1-1,5 km in direzione est (Briosco).

Risulterà importante, in fase di valutazione di estensione dell'area di studio, valutare tali informazioni per comprendere la meglio come l'intervento abbia un impatto diretto non soltanto sull'area comunale di

Arosio.

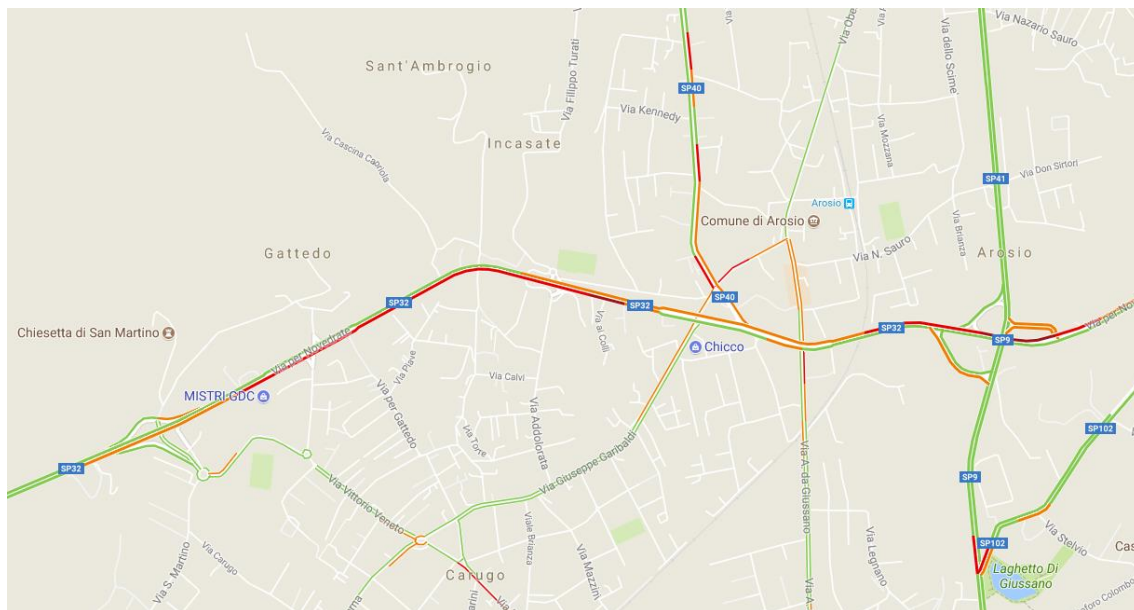


Figura 37. Estratto dei ritardi nei tempi di percorrenza (anno 2017 – fonte Google Maps ®)

Gli interventi attualmente proposti dall'Ufficio progettazione stradale della Provincia di Como consistono nell'interramento di parte del tracciato della S.P.32 e nella riqualificazione di due intersezioni. La prima è un'intersezione a rotatoria di tipo compatto, tra la S.P. 32 - Via A. de Gasperi/ Via IV Novembre - Via Marconi, e la seconda di un'intersezione a circolazione rotatoria con forma diversa da quella circolare, in virtù della conformazione dei luoghi seconda, tra la S.P. 32 - Via A. de Gasperi/ Via S.M. Maddalena.

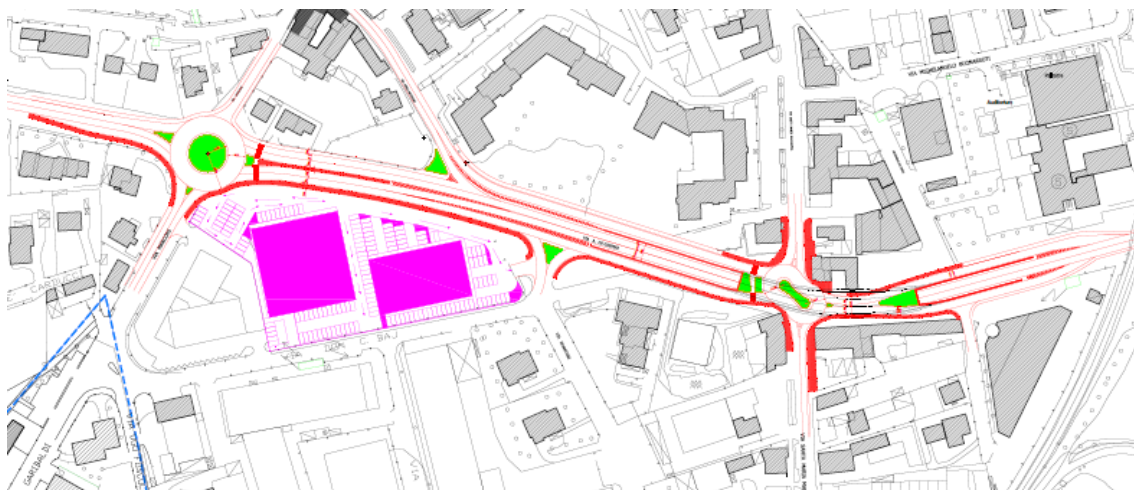


Figura 38. Planimetria di insieme degli interventi di interrimento S.P. 32 nel Comune di Arosio

In attesa di tali interventi, a seguito del completamento del centro commerciale dell'area ex-Cappellini, sono in fase di realizzazione interventi di ammodernamento degli impianti semaforici e realizzazione di una semi-rotatoria semaforizzata nell'intersezione S.P. 32, Via G. Marconi e Via IV Novembre. Attraversa una delle aree più densamente popolate dell'intera Lombardia ed è, quasi inevitabilmente, una delle arterie più congestionate del territorio comasco. È la strada provinciale 32, nota come Novedratese, l'unico collegamento trasversale importante oggi esistente nella parte meridionale del

territorio. Connette la Valassina (S.S. 36) con l'ex statale dei Giovi (S.S. 35).

Il tratto più trafficato, anche per il passaggio quotidiano di migliaia di mezzi pesanti, è quello da Arosio a Lentate sul Seveso, nella provincia di Monza-Brianza. La strada prosegue poi in direzione Lomazzo, verso la Bassa Comasca, tragitto lungo il quale però la mole di traffico risulta inferiore.

Con l'inaugurazione, alla fine del 2007, del ponte del Lottolo a Mariano Comense, all'altezza dello svincolo per Cantù, è stata eliminata una delle maggiori criticità dal punto di vista della viabilità sulla Novedratese. L'opera ha infatti eliminato gran parte degli ingorghi in quel tratto che costituiva una sorta di imbuto.

Gli interventi attualmente proposti dall'Ufficio progettazione stradale della Provincia di Como consistono nell'interramento di parte del tracciato della S.P.32 e nella riqualificazione di due intersezioni. La prima è un'intersezione a rotatoria di tipo compatto, tra la S.P. 32 - Via A. de Gasperi/ Via IV Novembre - Via Marconi, e la seconda di un'intersezione a circolazione rotatoria con forma diversa da quella circolare, in virtù della conformazione dei luoghi seconda, tra la S.P. 32 - Via A. de Gasperi/ Via S.M. Maddalena.

Come accennato in premessa, e come si vedrà anche nell'analisi del bacino di influenza, il tratto in progetto non influisce soltanto nell'area di Arosio ma supera i confini comunali andando ad interagire con una componente di traffico che può essere estesa all'intera Provincia di Como. Risulta pertanto importante andare a definire quelli che sono gli attuali interventi infrastrutturali in corso di pianificazione, di progettazione, di realizzazione e recentemente completati. Il periodo temporale considerato è ± 10 anni: passato per gli interventi completati entro tale periodo e futuro come previsione entro il quale, si ipotizza, che gli interventi pianificati potrebbero venire realizzati.

4.2. Calcolo del bacino di utenza dell'area di studio

Al fine di determinare le relazioni fondamentali e una stima degli spostamenti ci si è affidati alla matrice Origine/Destinazione della Regione Lombardia, versione 2016 e pubblicata nel mese di maggio 2020.

Nell'ambito della redazione del Programma regionale della mobilità e dei trasporti è stata realizzata la matrice o/d 2014, base dati utile per conoscere come ci si muove in Lombardia. È stata costruita grazie all'uso di un modello trasportistico che ha integrato i risultati di un sondaggio svoltosi da febbraio a maggio 2014 con i dati del Censimento ISTAT 2011 e i contributi di enti locali e stakeholder del settore della mobilità.

Per consentire un'analisi più efficace dei dati di spostamento e anche al fine di migliorare la programmazione dell'offerta di trasporto pubblica e privata, la maglia dei dati è stata affinata tramite la suddivisione in sub-aree dei comuni più grandi della Lombardia. Per le aree interne alla Lombardia, la zona di riferimento è il singolo Comune oppure, nel caso dei

capoluoghi e dei grandi centri urbani, i frazionamenti sub-comunali (Busto Arsizio, Bergamo, Brescia, Cinisello Balsamo, Como, Cremona, Legnano, Lodi, Mantova, Milano, Monza, Pavia, Rho, Sesto San Giovanni, Varese, Vigevano) ovvero, limitatamente ad alcuni piccoli Comuni periferici aggregazioni di essi. Per le aree esterne, infine, si sono considerate la Provincia della Regione confinante, la Regione italiana o lo Stato estero.

La Matrice 2014 è quindi il risultato di una serie di elaborazioni, secondo cui sono stati applicati anche più coefficienti, che hanno comportato un risultato finale, in termini di numero di spostamenti per ogni relazione Origine/Destinazione, per ogni modo e per ogni motivo, che è stato arrotondato alla seconda cifra decimale, al fine di mantenere un buon livello di approssimazione. In quest'ottica, le cifre decimali non rappresentano quindi in nessun modo frazioni di spostamento.

La matrice fa riferimento ad un giorno feriale medio e considera 1.525 zone (di cui 1.450 zone interne

alla regione). I dati sugli spostamenti sono distinti per origine, destinazione, fascia oraria, motivo e modo prevalente dello spostamento. La matrice regionale o/d 2016 include 8 modalità (auto conducente, auto passeggero, TPL gomma, TPL ferro, moto, bici, piedi e altro) e 5 motivi (lavoro, studio, occasionali, affari, rientri a casa).

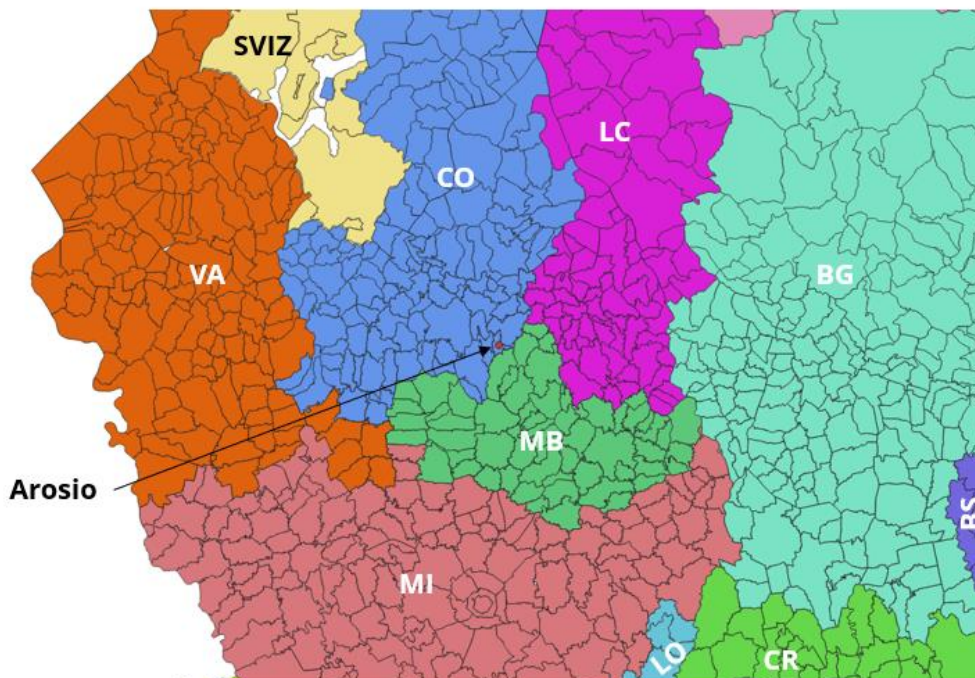
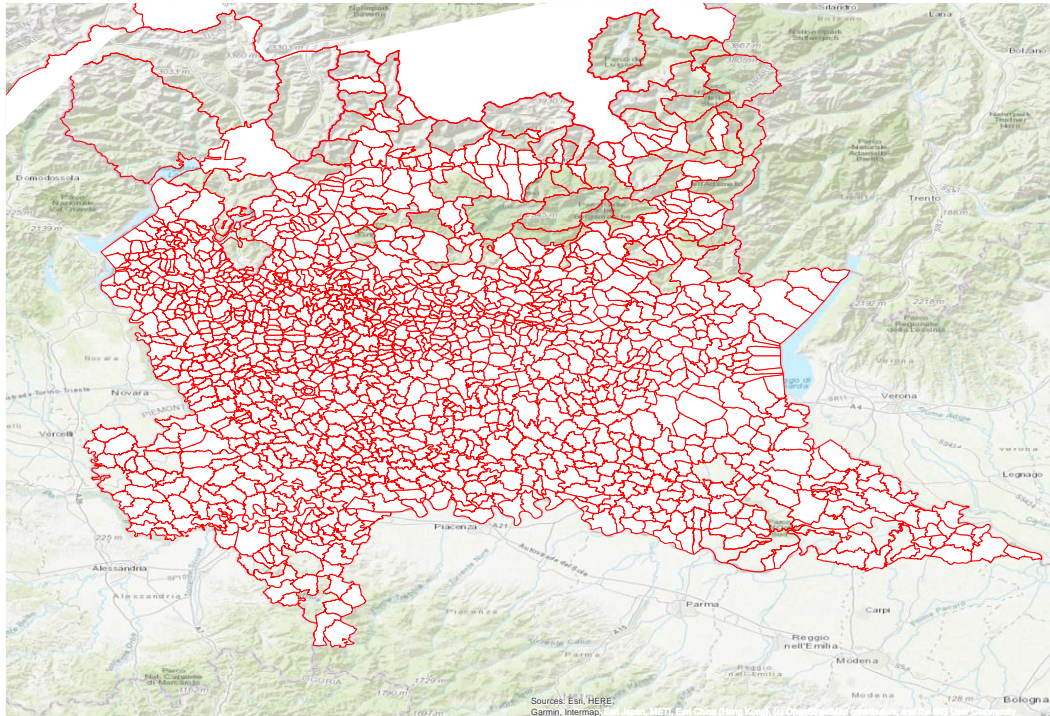


Figura 39. Zonizzazione dell'area di studio

L'area di studio regionale così individuata permette di includere tutte le principali relazioni che intervengono nel progetto. Sebbene possa sembrare un'estensione elevata, vi è da considerare che i successivi spostamenti origine e destinazione sono stati limitati alla sola Provincia di Como per le

motivazioni espresse nel paragrafo precedente.

Un'ulteriore giustificazione di una estensione così fatta è dovuta dal fatto che l'area di progetto e di analisi è centrale e localizzata al confine con tre province lombarde: Como, Monza e Brianza e Lecco. Inoltre, vi sono comuni della Provincia di Varese e di Bergamo, nonché perfino comuni nel Bresciano, che hanno relazioni di traffico non trascurabili con l'area comasca e che transitano dalla S.P. 32.

Per avere una prima idea degli spostamenti si è deciso di fare riferimento alla matrice o/d messa a disposizione della Regione Lombardia.

Al fine di facilitare la gestione dei dati sono state fatte alcune semplificazioni come, ad esempio, la somma degli spostamenti di alcune componenti modali e l'esclusione di altre. Sono state escluse le componenti della modalità "ferro" e "piedi" in quanto non modellizzate negli scenari di trasporto. Le seguenti componenti sono state successivamente sommate:

- 6 modalità (auto conducente, auto passeggero, TPL gomma, moto, bici, e altro);
- 5 motivi (lavoro, studio, occasionali, affari e rientri a casa)

Tabella 2 –Spostamenti filtrati

Origine	record	spostamenti
Totale spostamenti giornalieri con origine = PROV CO	30.116	693.764
di cui totale con spostamenti giornalieri > 1	20.658	689.930
Totale spostamenti con destinazione = PROV CO	33.289	682.902
di cui totale con spostamenti giornalieri > 1	19.577	679.290
Totale spostamenti interni PROV CO	11.050	537.361
di cui totale con spostamenti giornalieri > 1	8.449	536.338

Inizia apparire evidente la difficoltà di circoscrivere ad alcuni territori, es. la Provincia di Como, l'area di influenza dell'arteria oggetto di analisi. Le stesse statistiche regionali dell'intera matrice o/d evidenziano come sia difficile andare a filtrare tutte le relazioni che influiscono sull'area in esame. Inoltre, rispetto al totale degli spostamenti in origine e in destinazione della Provincia di Como, dovranno essere esclusi tutti quei collegamenti che per ragioni geografiche sono ovviamente esclusi dall'area di indagine. Nello specifico non devono essere considerate tutte le coppie o/d interne dei comuni. Il risultato è che per l'intera Provincia di Como, circa il 60% degli spostamenti sarebbe potenzialmente interessato all'area di studio.

Tabella 3 – Riepilogo matrice o/d

		Destinazione		
		Prov. Como	Extra Prov. CO	Totali
Origine	Prov. Como	537.361	156.403	693.764
	Extra Prov. CO	152.569	?	?
	Totali	689.930	?	16 milioni

A questo punto dell'analisi il percorso classico del modello a 4 stadi si biforca rispetto al modello innovativo messo a disposizione del gruppo di lavoro.

Come sintetizzato precedentemente si devono calcolare tutti i centroidi e le loro coordinate in formato geografico. Gli strumenti GIS entrano in campo per facilitare tale compito e per le analisi spaziali

successive.

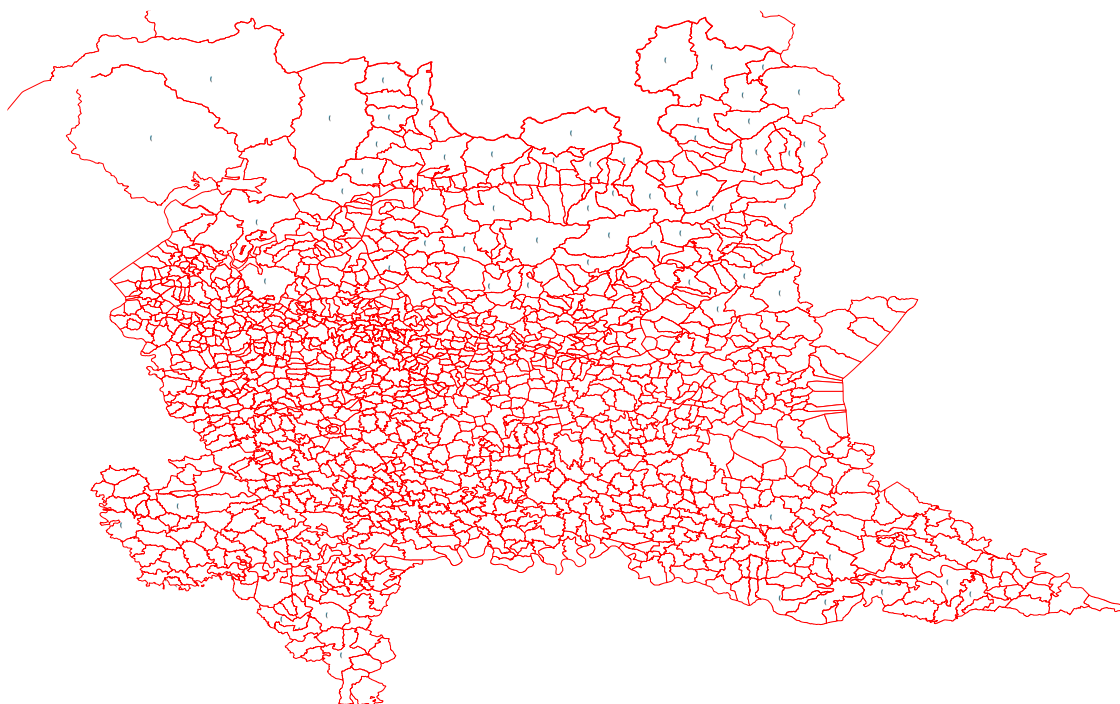


Figura 40. Calcolo dei centroidi per ciascuna zona

Note le coordinate di tutte le zone, compatibili con i codici della matrice o/ della Regione Lombardia, è stato costruito uno script in python che permettesse di legare le principali relazioni considerate significative da quelle in origine, in destinazione ed interne alla Provincia di Como.

In questo modo sono stati ricostruiti tutte i percorsi e le coordinate di origine e di partenza di tutte le coppie oggetto di studio (circa 30.000).

Tabella 4 – Riepilogo spostamenti totali

Coppie o/d	<i>record</i>	<i>spostamenti</i>
Totale spostamenti giornalieri analizzati in origine dalla PROV CO con spostamenti giornalieri > 1	11.341 54,9%	143.484 20,8%
Totale spostamenti giornalieri analizzati in destinazione alla PROV CO con spostamenti giornalieri > 1	10.401 53,1%	133.006 19,6%
Totale spostamenti giornalieri analizzati interni alla PROV CO con spostamenti giornalieri > 1	8.173 96,7%	278.120 51,9%

4.3. Calcolo della matrice o/d dell'area di studio

Grazie alla possibilità di accesso al portale **TomTom Analytics** è possibile con alcuni script in python e le API messe a disposizione del team di sviluppo di TomTom ottenere tutti i tracciati dei percorsi per tutte le coppie o/d volute. Si riporta uno script di esempio utilizzato.

```
https://graphhopper.com/api/1/route?point=45.97643454,8.92843273&point=45.80911036,9.18600288&vehicle=car
&debug=true&key=36636283-78a7-4489-8c84-0490655e2afb&type=gpx
https://graphhopper.com/api/1/route?point=45.97643454,8.92843273&point=45.80566615,8.9418219&vehicle=car
&debug=true&key=36636283-78a7-4489-8c84-0490655e2afb&type=gpx
```

I percorsi sono calcolati come ottimali, per tempi di percorrenza e distanze, dai dati storici di traffico di TomTom. Il risultato è immediato: in poco tempo è possibile ottenere tutti i tracciati stradali di maggior utilizzo che legano tutte le origini e le destinazioni considerate nello studio. La mappa qui sotto rappresenta tutti i percorsi tracciati e calcolati tramite i dati FCD di TomTom.

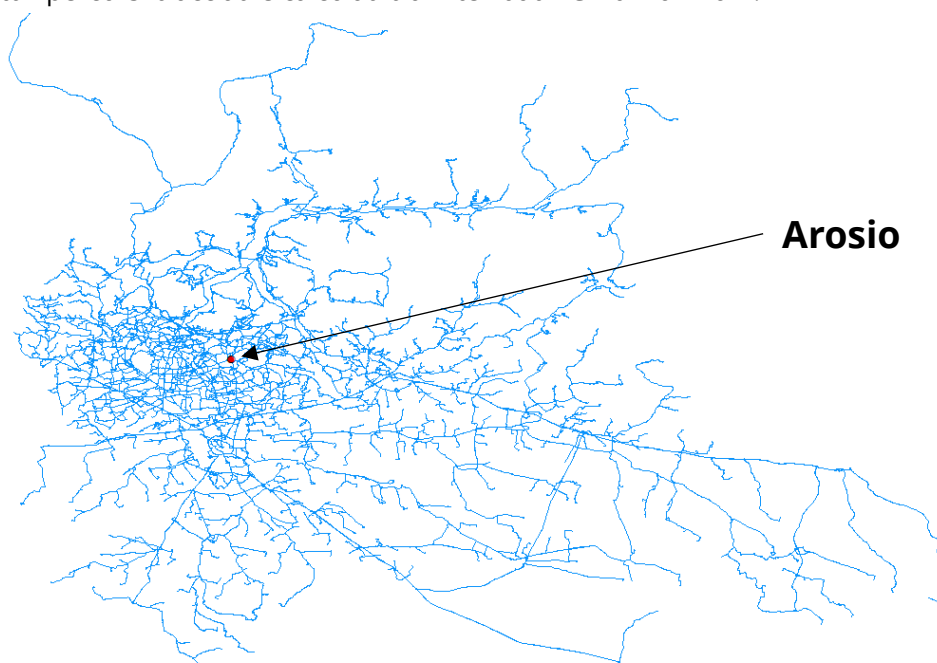


Figura 41. Visualizzazione di tutti i percorsi (origine e destinazione) della Provincia di Como

Noti tutti i percorsi, identificati che polilinee uniche, con alcune operazioni spaziali e di collegamento con la banca dati precedentemente recuperata e filtrata (matrici o/d Regione Lombardia) è possibile ricavare tutti i flussi percorsi e, soprattutto, i flussi arco.

Il risultato è la cartografia seguente. In modo innovativo e in un tempo minore, è possibile ottenere un'assegnazione dei flussi arco con una buona precisione. È possibile individuare facilmente la rete stradale (ricostruita solamente con i percorsi o/d) non soltanto dell'area in esame (nei pressi di Arosio) ma di gran parte del nord-ovest della Regione Lombardia. Questo perché sono state caricate tutte gli spostamenti della Provincia di Como.

Sebbene non siano completi di tutti gli spostamenti, è possibile osservare circa 40.000 veic/giorno sulla tratta A8, 45.000 veic/giorno sulla tratta A8, 25.000 sulla tratta SS36.

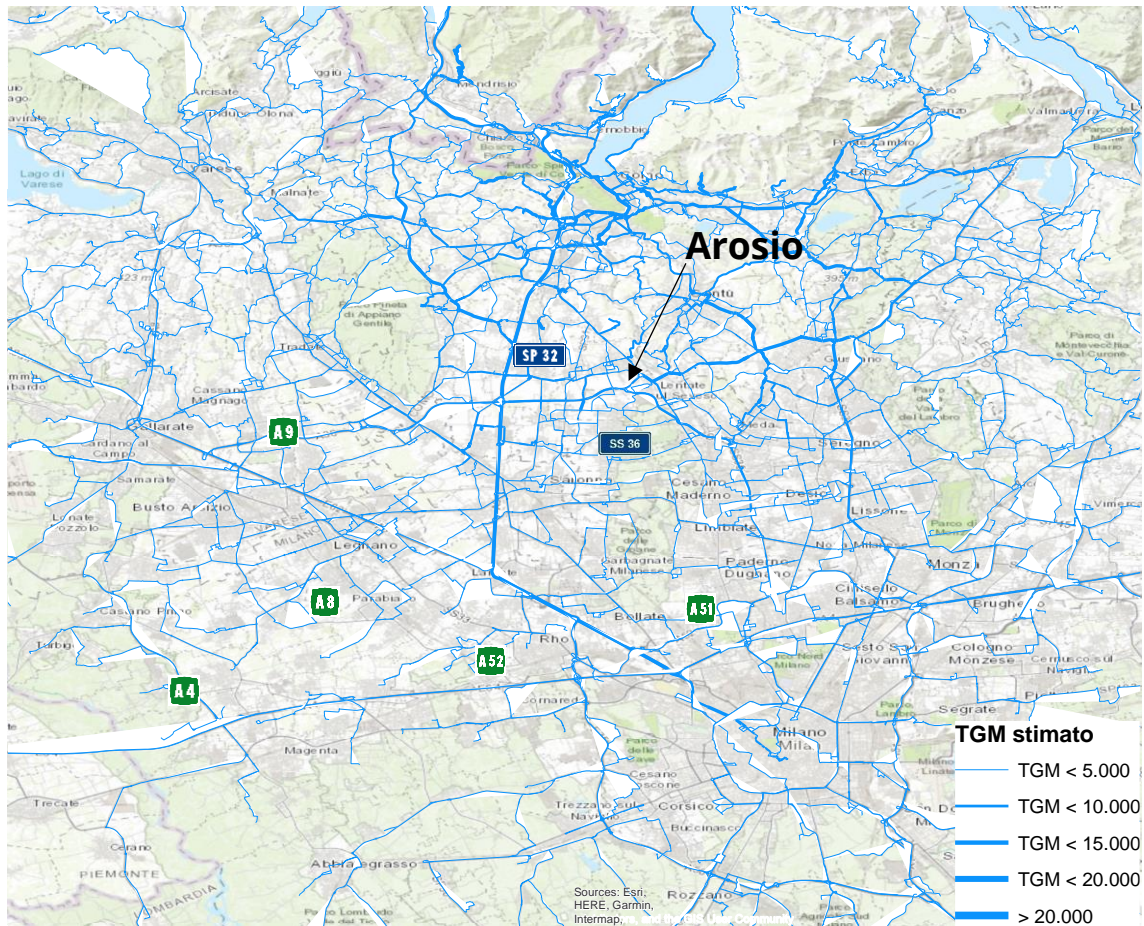


Figura 42. Visualizzazione dei flussi arco (veicoli/ora) assegnati nel complesso.

Per la tratta in esame sono stati raggiunti dati molto prossimi ai valori di traffico rilevati: circa 24.500 veicoli/giorno nella tratta da Mariano Comense a Carugo per proseguire con 23.600 in centro ad Arosio (S.P. 32). Anche le altre strade provinciali in ingresso all'area di studio hanno registrato valori affidabili, come ad esempio, i 18.700 veicoli/giorno sulla SP 9 in arrivo da Giussano.

È possibile, pertanto, affermare come sia stato possibile ricostruire, nell'area oggetto di analisi, circa il 95% degli spostamenti (25.500 veicoli/giorno stimati su 27.000 veicoli/giorno rilevati) generati ed attratti dalla matrice o/d giornaliera.

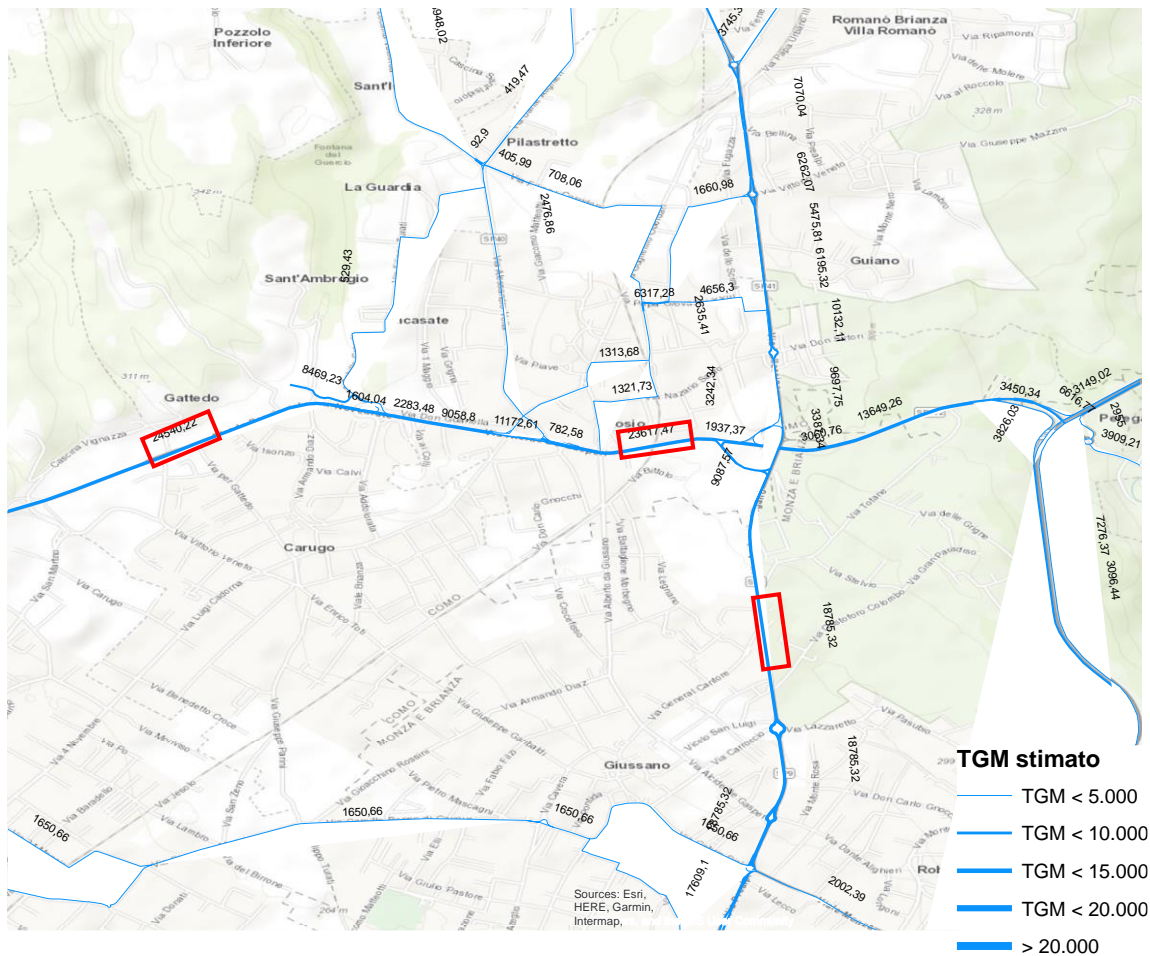


Figura 43. Visualizzazione dei flussi arco (veicoli/ora) assegnati nell'area in esame.

I risultati sono molteplici:

1. Ricostruzione della matrice o/d multimodale per l'intero giorno;
2. Ricostruzione dell'area di influenza (95% di copertura) dell'area oggetto di analisi;
3. Ricostruzione di tutte le coppie o/d dei percorsi interessati dall'area di progetto;
4. Ricostruzione del modello di distribuzione (sono note le percentuali di distribuzione spaziale degli spostamenti da zona a zona e i potenziali di attrazione e distribuzione).

Per ottenere i risultati è necessario selezionare semplicemente l'area di progetto dell'interramento di Arosio con la funzione "select by rectangle" di qualsiasi software GIS ed è possibile osservare tutti percorsi delle coppie o/d che interagiscono con l'area di progetto.

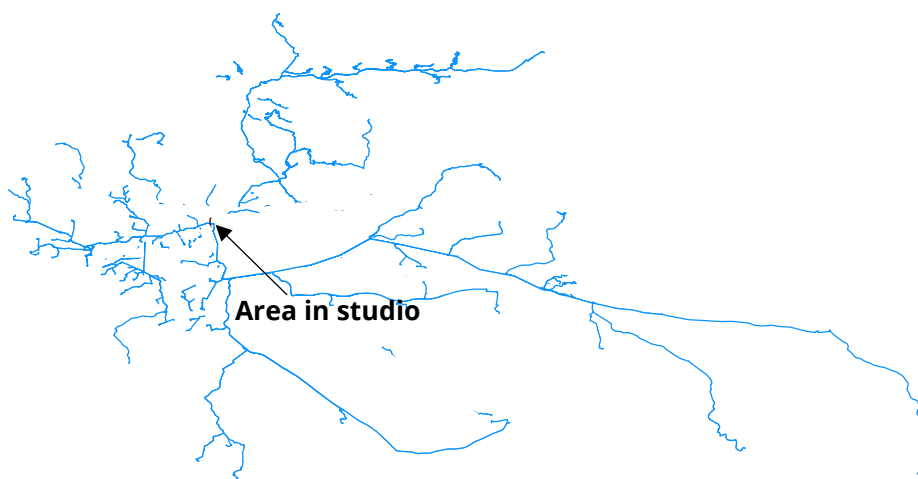


Figura 44. Visualizzazione di tutti i percorsi (origine e destinazione) dell'area di progetto.

Si riportano la matrice o/d completa dell'area di studio con suddivisione delle origini e delle destinazioni per provincia e l'elenco delle coppie o/d che generano il 50% degli spostamenti.

In allegato 1 è riportato l'elenco completo.

Come si può osservare l'area di influenza è molto ampia: esistono relazioni fino a Mantova, Pavia e Cremona che sono legate all'area in studio con transito sul tratto della Novedratese. Sebbene possano sembrare molto distanti alcune coppie o/d, si ricorda, che i percorsi sono stati generati da algoritmi di routing di TomTom ® che suggerisce il percorso ottimale in funzione del traffico storico. Inoltre, è stato ricostruito il grafo, normalmente operazione è molto limitata alla sola area di studio, che utilizza alcune tratte molto distanti come, ad esempio, BreBeMi e A1 e anche alcune arterie statali importanti come la Ex SS415 e SS35.

Tutti questi percorsi hanno nel loro tratto in partenza o in arrivo un attraversamento dell'area inquadrata precedentemente oggetto di progetto.

Tabella 5 – Matrice dell'area di studio (valori assoluti)

	BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA	TOT. ORIG.
BG			313										313
BS			26										26
CO	363	89	5.894	3	1.587	25	7.400	941	7	5	69	146	16.529
CR			10										10
LC			2.064										2064
LO			14										14
MB			7.212										7212
MI			826										826
MN			18										18
PV			12										12
SO			90										90
VA			200										200
TOT. DEST.	363	89	16.679	3	1.587	25	7.400	941	7	5	69	146	27.314

Tabella 6 – Matrice dell'area di studio (valori percentuali)

	BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA	TOT. ORIG.
BG			2%										
BS			0%										
CO	2%	1%	35% /36%	0%	10%	0%	45%	6%	0%	0%	0%	1%	100%
CR			0%										
LC			12%										
LO			0%										
MB			43%										
MI			5%										
MN			0%										
PV			0%										
SO			1%										
VA			1%										
TOT. DEST.			100%										

Una considerazione finale va fatta sul totale generato dalla matrice o/d: 27.000. Il dato è pressoché identico ai rilevamenti occorsi sulla Novedratese, considerando tutto il traffico in ingresso: da Cantù e da Brioso, lungo la S.P 32, da Via IV Novembre e da Via S.M. Maddalena/S.P. 9, rispettivamente da Carugo e Giussano, e, infine, da Alzate Brianza e da Lurago d'Erba, rispettivamente delle S.P. 40 e 41.

4.4. Calcolo della matrice o/d dettaglio

Come detto precedentemente l'area di studio è situata nel cuore della Brianza nella Provincia di Como, ai confini con le Province di Monza-Brianza e Lecco. La Novedratese è un'area molto trafficata con volumi giornalieri di circa 18.000 veicoli/giorno. Il piano di monitoraggio del traffico per lo studio in oggetto ha previsto la risoluzione della complessa matrice o/d con un innovativo metodo di analisi: registrazione di video aerei con relativa analisi delle immagini con software DataFromSky. Al fine di garantire una continuità video di almeno 2 ore e, soprattutto, sorvolare l'area ad una altitudine tale da consentire la ripresa di tutte e due le intersezioni, è stato scelto di utilizzare un pallone aerostatico vincolato a terra con gonfiaggio con gas elio.

Il primo step per un rilievo video aereo è ottenere le autorizzazioni aeronautiche; in tal caso è necessario fare richiesta ad ENAV, da parte di pilota abilitato, di emissione di NOTAM. NOTAM è l'acronimo della dicitura inglese "NOTice To AirMen" ed è il termine con cui si indicano gli avvisi utilizzati dai piloti di aeromobili o elicotteri per essere aggiornati sulle ultime informazioni disponibili di un determinato aeroporto, sulla efficienza dei radioaiuti alla navigazione e su tutto quanto possa riguardare un volo, affinché possa considerarsi effettuato in condizioni di sicurezza e speditezza. L'ENAV ha emesso una circolare apposita intitolata "Eventi e attività speciali interessanti il traffico aereo" ATM-05A, dove sono specificate le attività ammesse e non il volo con palloni aerostatici.



In particolare, nella circolare ATM-05A, si legge quanto segue:

Le attività civili di cui al punto 3.2 "g" (innalzamento di palloni o dirigibili vincolati) possono essere effettuate solo se non forano le "superfici di rispetto" degli aeroporti interessati (vedi "Regolamento per la costruzione e l'esercizio degli aeroporti" - Cap. 4) e non interferiscono

con le procedure strumentali di avvicinamento, mancato avvicinamento, decollo e di circling, tali circostanze devono essere specificatamente valutate e dichiarate dall'organizzatore. L'organizzatore, pertanto, deve presentare alla D.A. competente una richiesta di emissione NOTAM secondo le modalità indicate al punto 4.3. La D.A., a seguito di quanto previsto al punto 4.4, in presenza di prescrizioni pervenute dall'ente ATS o se l'altezza di innalzamento richiesta è superiore a 40 metri dal suolo circostante, fa pervenire all'ACU, almeno 20 (venti) giorni calendariali prima dell'inizio attività, la richiesta dell'organizzatore per l'emissione del NOTAM. In assenza di prescrizioni pervenute dall'ente ATS e se l'altezza di innalzamento richiesta non è superiore a 40 metri dal suolo circa.

Si è proceduto pertanto con tale richiesta che è stata successivamente accettata come da allegato sottostante.

ENAV\I\U\0152408\04-10-2017\DSNA/PSA [P.A0] 1.1

Direzione Servizi Navigazione Aerea
Funzione Progettazione Spazi Aerei

DSNA/PSA _____ Roma, _____

A: Milano ACC
C.A. Milano/Linate
e, p.c: Operazioni di Rotta
Operazioni di Aeroporto
Gestione Flessibile dello Spazio
Aereo (PSA) – Ciampino

Oggetto: *Drone (APR vincolato) – Arosio (CO)*

Rife: modulo accesso ai servizi PSA (prot. L1MM/SA 0146089 del 25/09/17)

In merito a quanto richiesto con documentazione a riferimento si è provveduto ad effettuare la valutazione delle interagenze dell'area relativa all'attività in oggetto nei confronti delle procedure strumentali di volo da/per gli aeroporti di competenza ENAV e della geografia ATS circostante.

Descrizione area richiesta
Limiti orizzontali: cerchio di 300m di raggio centrato sul punto di coordinate geografiche 45°42'52.8" N 009°12'19.0" E
Limiti verticali: SFC/150m (492ft) AGL
Quota libera utilizzata ai fini della valutazione=2000ft
Periodo di attività: 09 Ottobre 2017 / H24

Di seguito le risultanze dello studio

L'area in oggetto interessa:

1. la FIR di Milano (Rife. AIP Italia ENR 2.1.1.1-1)

L'area in oggetto non ha implicazioni con le procedure strumentali in vigore da e per l'aeroporto di Milano/Linate

Quanto sopra per gli aspetti di competenza significando che si rimane a disposizione per qualsiasi chiarimento.

Il Responsabile
Giuseppe SCALIA

ENAV S.p.A.
Via Salaria, 716 - 00138 Roma
Tel. +39 06 81661 - Cap. Soc. € 541.744.385,00 i V
P.IVA 02152021008 - Reg. Imp. Roma
C.E. e CCIAA 97016000586 - REA 965162
www.enav.it

pag 1 / 1

Figura 45. NOTAM di Enav



Figura 46. Estratto del momento prima del decollo.



Figura 47. Inquadramento dell'area di studio.

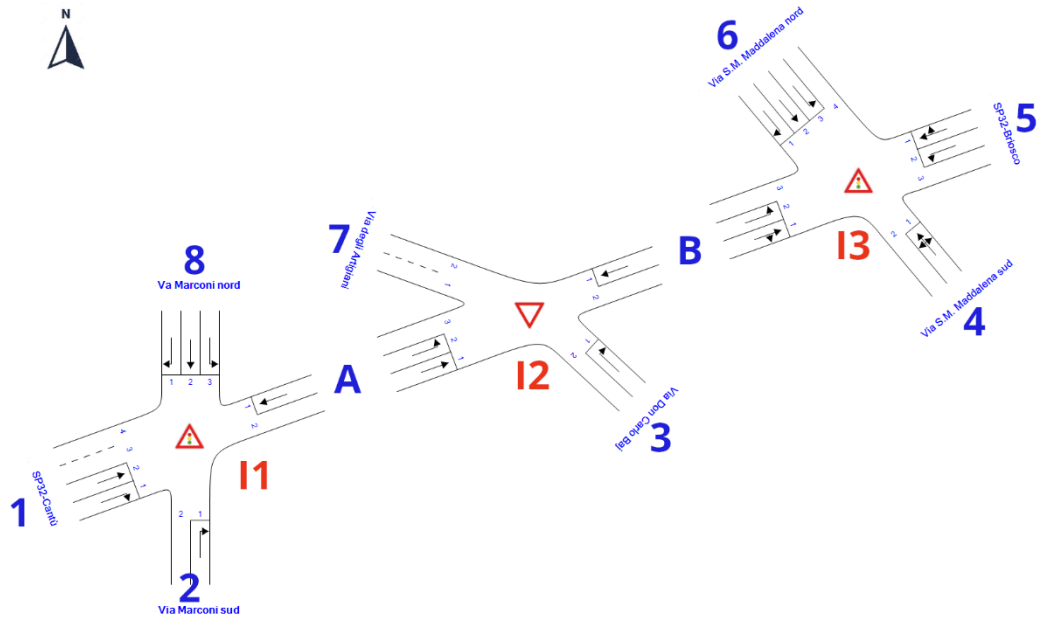


Figura 48. Schema del monitoraggio ed identificazione delle manovre e degli accessi.

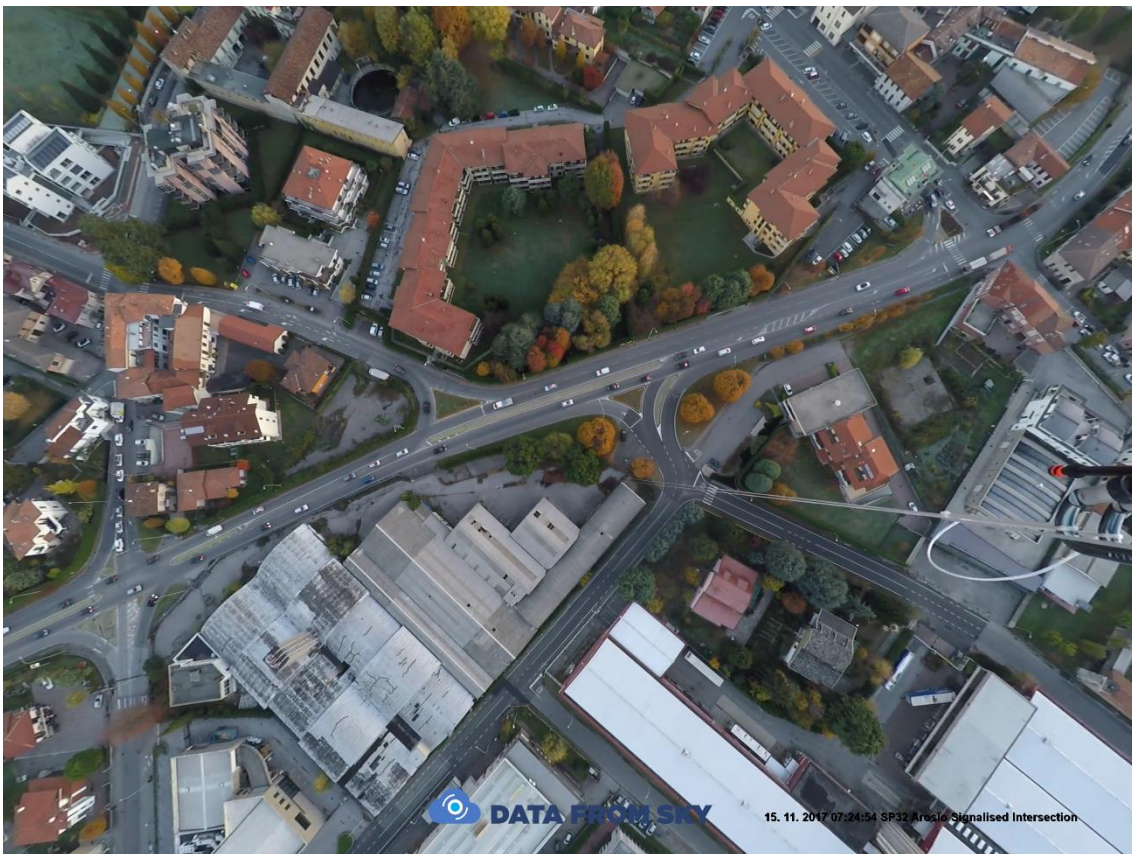


Figura 49. Dettaglio della ripresa video originale.

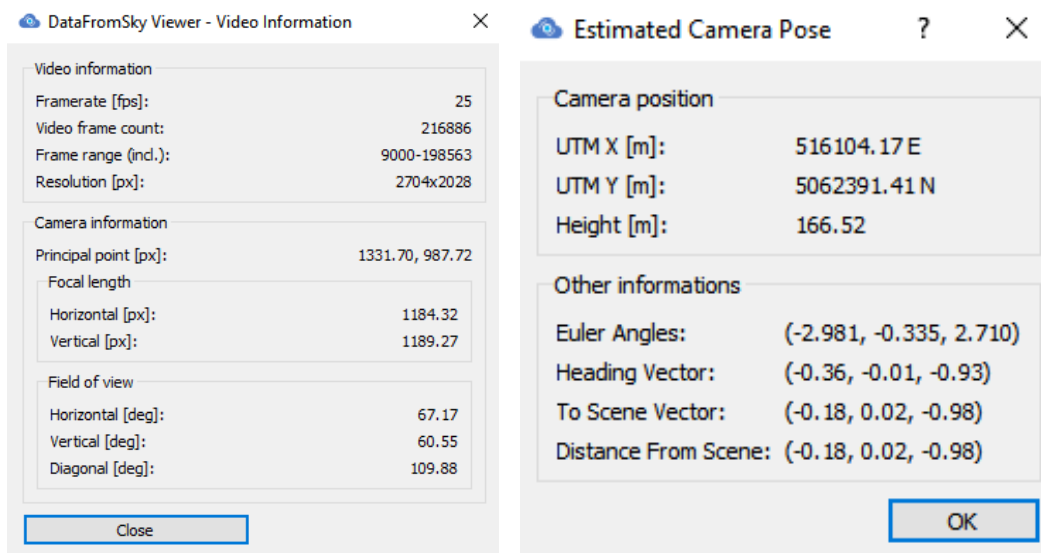


Figura 50. Informazioni sul video elaborato

A seguito della registrazione del video aereo sono state elaborate le immagini tramite software DataFromSky. Nelle immagini precedenti sono state riprodotte le principali informazioni della ripresa video con relativa stima della lunghezza focale e di ampiezza di ripresa della telecamera utilizzata.

L'altezza media di volo è stata di 166 m.

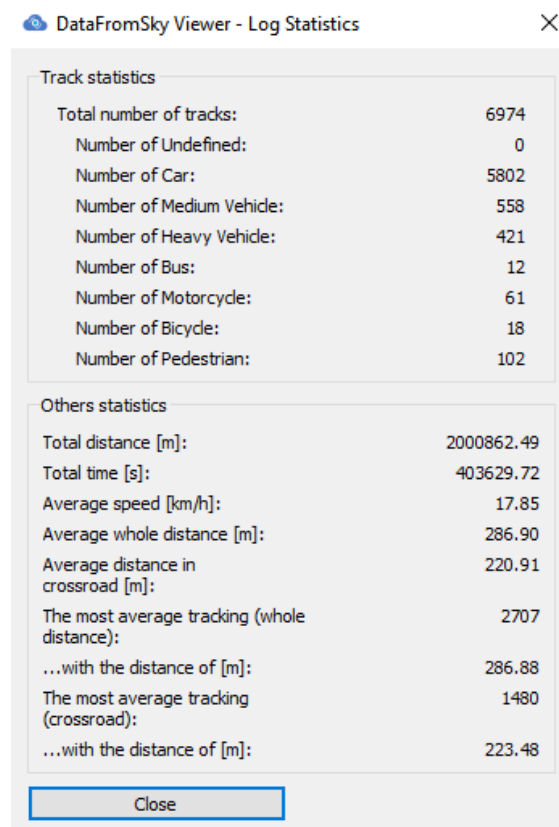


Figura 51. Statistiche sul video elaborato



Figura 52. Fotogramma originale e post elaborato con il software DataFromSky.

Il software ha un tool di analizzare tramite mappe di densità alcune informazioni base rilevate. Nelle immagini che seguono vengono proposti alcuni screenshot dell'area analizzata con indicazione delle variabili rilevate: velocità, densità, accelerazioni.

Vengono anche riprodotti i flussogrammi di tutti gli ingressi.



Figura 53. Rappresentazione della densità delle velocità di percorrenza.



Figura 54. Rappresentazione della densità dei veicoli rilevati.



Figura 55. Rappresentazione della densità del tempo di stazionamento.



Figura 56. Rappresentazione della densità dell'accelerazione tangenziale.



Figura 57. Rappresentazione della densità dell'accelerazione laterale.

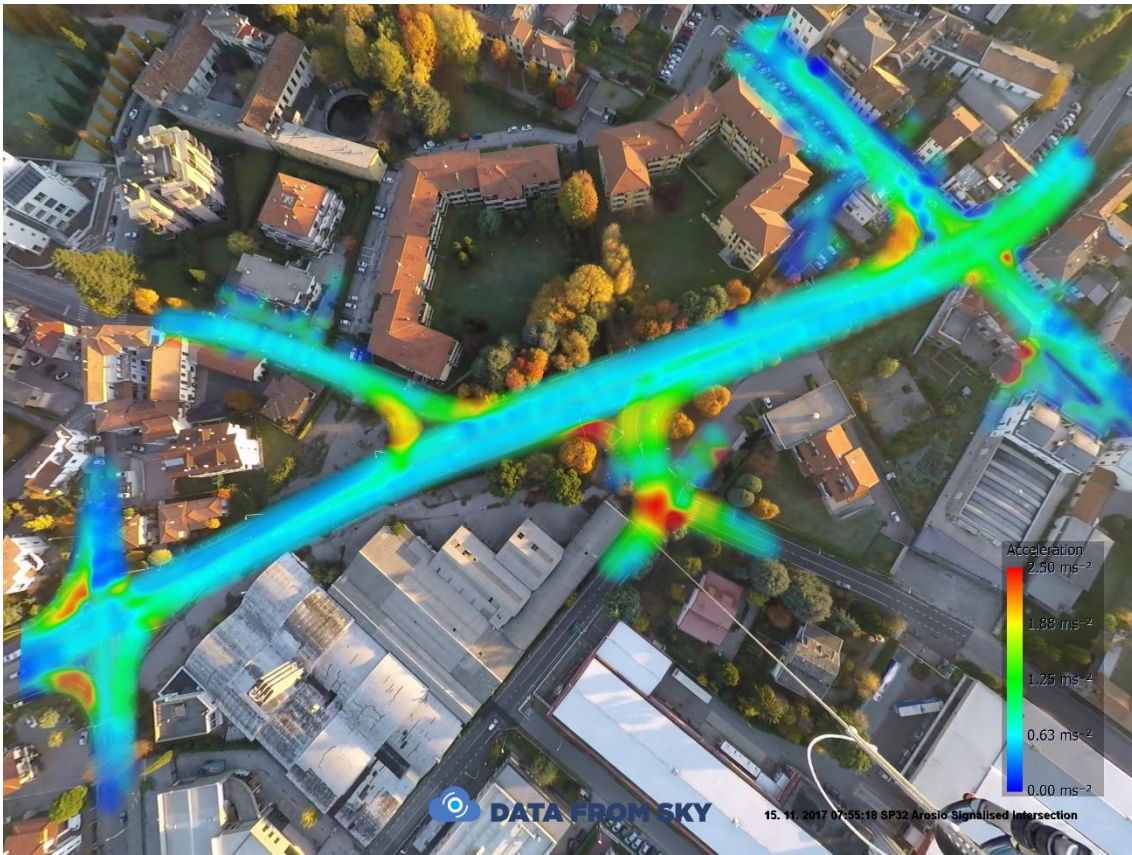


Figura 58. Rappresentazione della densità dell'accelerazione in modulo.



Figura 59. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 1$.



Figura 60. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 2$.



Figura 61. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 3$.



Figura 62. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 4$.



Figura 63. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 5$.



Figura 64. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 6$.



Figura 65. Flussogramma delle traiettorie dell'accesso $k = 7$.

L'analisi delle traiettorie permette di localizzare tutti i tracciati presenti e questo comporta anche delle inevitabili pulizie dei report ottenuti.

Il primo è legato a manovre errate o non ammesse, in quanto trattandosi di manovre vietate possono portare ad un'errata interpretazione dei dati.



Figura 66. Manovra di inversione pericolosa.

Un'altra importante operazione è quella di analisi (manuale) di tutte le traiettorie che per differenti motivi, il software non è stato in grado di classificare tra i gate virtuali di ingresso e di uscita.

Sono per esempio quelle manovre che entrano in un gate e poi stanno fermi per diverse ore ad un parcheggio oppure quelle traiettorie che, per via di piccoli movimenti del video originale, vengono perse o cancellate. Il risultato finale è comunque stato filtrato tenendo presente tutti questi bias.

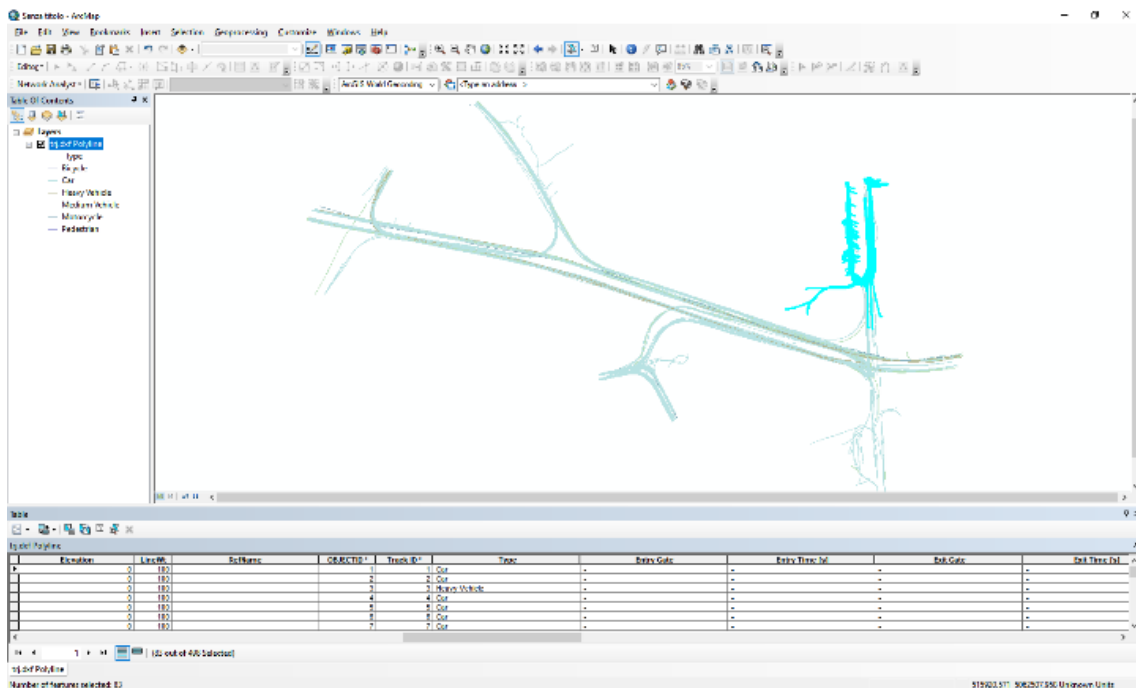


Figura 67. Identificazione delle traiettorie eliminate del parcheggio.

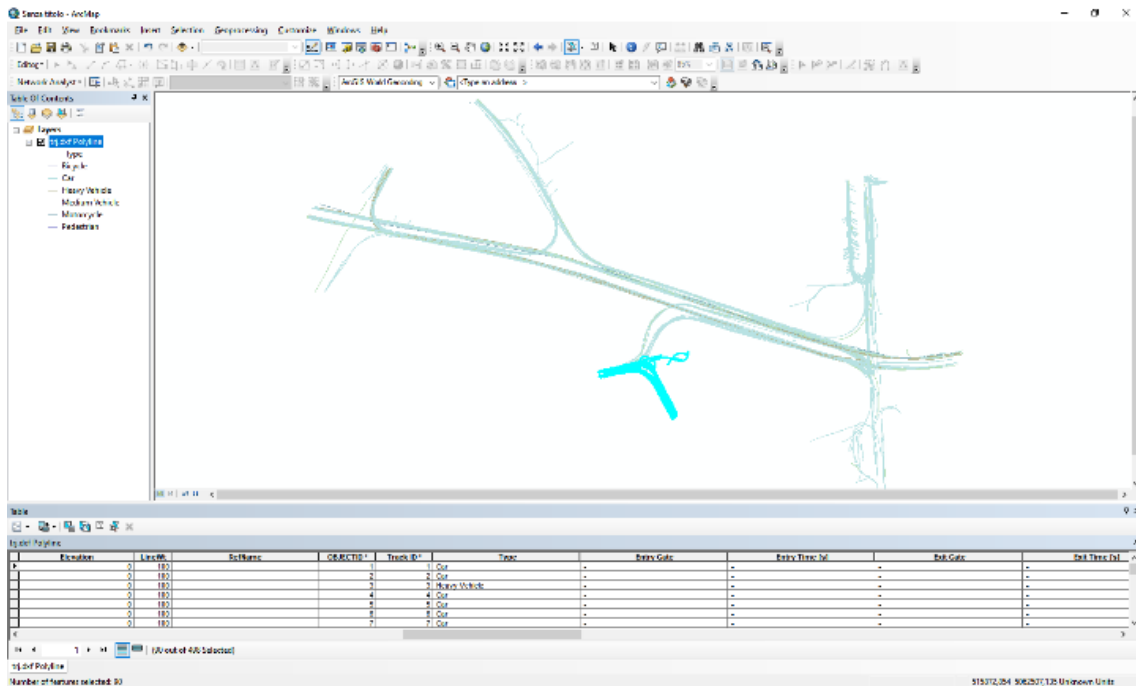


Figura 68. Identificazione delle traiettorie eliminate perché non rilevanti.

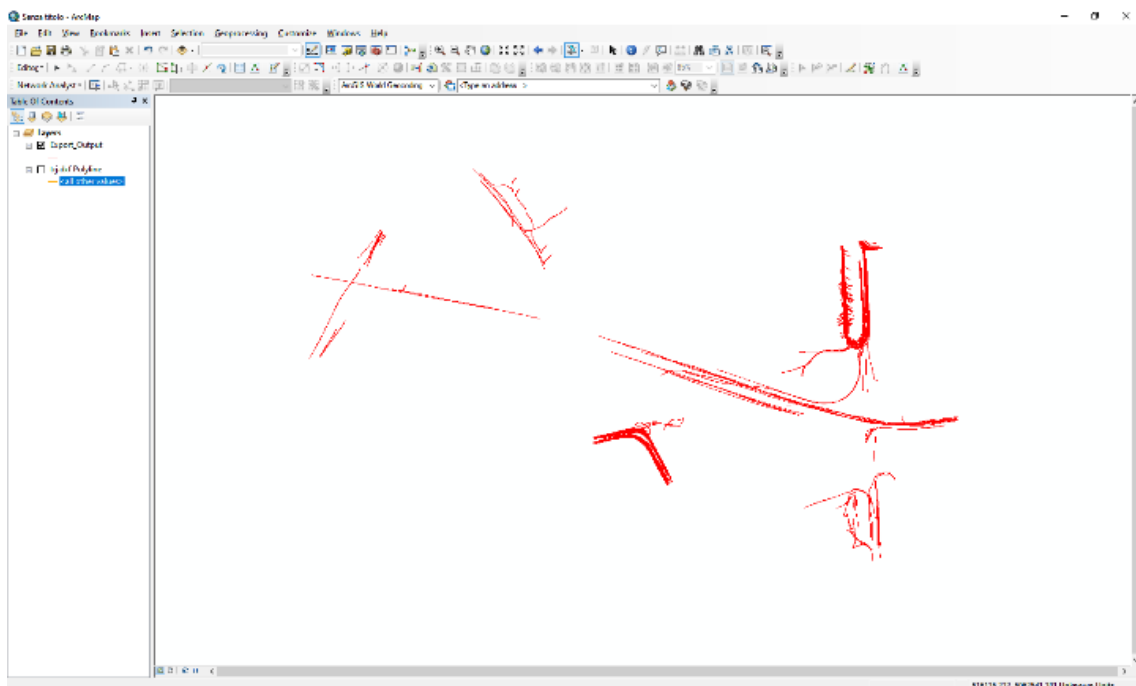


Figura 69. Identificazione delle traiettorie incomplete.

Tabella 7 – o/d finale ottenuta dall'elaborazione DataFromSky per 2 ore di analisi.

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
E1	0	34	4	33	1403	44	195
E2	0	0	0	1	55	8	385
E3	0	0	2	19	514	111	0
E4	161	0	3	0	56	178	139
E5	1334	0	96	22	0	37	80
E6	204	0	184	207	150	0	34
E8	375	312	22	58	138	3	7

4.5. Validazione statistica dei dati

I dati così ricavati, sono stati oggetto di un'approfondita analisi con il pacchetto R.

R è un linguaggio di programmazione e un ambiente di sviluppo specifico per l'analisi statistica dei dati. Venne scritto inizialmente dal matematico e statistico canadese Robert Gentleman, e dallo statistico neozelandese Ross Ihaka.

È un software libero in quanto viene distribuito con la licenza GNU GPL, ed è disponibile per diversi sistemi operativi (ad esempio Unix, GNU/Linux, macOS, Microsoft Windows). Il suo linguaggio orientato agli oggetti deriva direttamente dal pacchetto S distribuito con una licenza non open source e sviluppato da John Chambers e altri presso i *Bell Laboratories*. Dalla metà del 1997 si è aggiunto ai due sviluppatori iniziali un gruppo di programmatori (tra cui John Chambers) con diritti di scrittura sul progetto.

Ad ottobre 2014 il TIOBE Programming Community Index posiziona R al 15° posto. La sua popolarità è dovuta anche all'ampia disponibilità di moduli distribuiti con la licenza GPL e organizzati in un apposito sito chiamato "CRAN" (= "Comprehensive R Archive Network"), in analogia a CTAN e CPAN.

Tramite questi moduli è possibile estendere di molto le capacità del programma. Per dare un'idea si consideri che, oltre alle molte funzioni statistiche aggiuntive, esistono moduli che permettono la comunicazione con database (sia con driver specifici che tramite connessioni ODBC) o con sistemi GIS come ad esempio GRASS GIS. Anche se il linguaggio è fornito con un'interfaccia a riga di comando, sono disponibili diverse interfacce grafiche che consentono di integrare R con diversi pacchetti tra cui Emacs tramite Emacs-mode ESS (*Emacs Speaks Statistics*). Una rassegna delle GUI disponibili può essere trovata sul sito R GUI projects. Nell'ambito del progetto fin dal 2001 venne pubblicata R News, una rivista elettronica a cadenza irregolare (da due fino a 5 edizioni annue) riguardante l'utilizzo di moduli o l'applicazione di R per alcuni problemi di statistica applicata. Da maggio 2009 R News è stata sostituita dal più ampio The R Journal.

Vengono caricati i pacchetti necessari alle elaborazioni e caricati i dataframe dei tempi di percorrenza e dei flussi.

	k1	k7	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
1	21.92	26.88	0	0	240	0	0	0	0	0
2	20.56	26.76	360	120	1020	0	1200	0	1200	180
3	21.76	24.60	180	120	840	480	600	120	120	300
4	21.96	25.76	1020	0	720	120	840	0	900	60
5	21.16	26.28	780	60	1140	60	780	0	840	240
6	19.04	29.40	660	120	420	0	360	60	660	240
7	26.20	30.24	1020	240	1200	60	1380	0	1140	180
8	23.64	30.32	360	60	360	360	60	420	0	600
9	24.96	30.88	1260	0	1440	0	1620	0	1620	300
10	24.72	32.80	240	60	780	480	780	120	180	480
11	25.04	30.36	1200	60	1020	60	1020	0	840	180

Figura 70. Rappresentazione del data frame.

```
> summaryStats(data_tp)
      N      Mean      SD Median  Min   Max NA's N.Total
k1 1440 50.2787 24.2944  44.68 17.48 141.64    0   1440
k7 1176 31.2049 14.4153  27.12 16.72  98.60  264   1440
> summaryStats(flussi)
      N      Mean      SD Median Min  Max
f1 126 767.1429 419.3211   810  0 1500
f2 126 212.8571 149.2266   180  0  780
f3 126 828.0952 395.3828   840 60 1620
f4 126 247.1429 320.6141    60  0 1320
f5 126 1128.0952 626.3503  1200  0 2580
f6 126 230.9524 343.0462    0  0 1500
f7 126 743.3333 490.6795   840  0 1680
f8 126 352.3810 297.9273   240  0 1200
```

Un pacchetto sicuramente interessante è `fitdist`: permette infatti di fittare diverse distribuzioni statistiche e restituisce, oltre ai risultati della probabile distribuzione anche alcuni grafici come quelli della densità, PP, QQ e delle funzioni di ripartizione o di distribuzione, o delle probabilità cumulate (CDF).

Il procedimento è stato ripetuto per tutte le variabili da analizzare: i tempi di percorrenza dall'accesso 1 a 5 e da 7 a 3, le direzioni da coordinare e per tutti i flussi degli accessi (1-8).

La validazione dei dati da un punto di vista statistico ha permesso di osservare quanto segue.

- I **tempi di percorrenza** rilevati per gli accessi da coordinare seguono relativamente bene due distribuzioni: la LogNormale e la Cauchy. Da un punto di vista statistico la Cauchy potrebbe fittare meglio i dati e simulare meglio il problema stocastico, ma ci si è resi conto che al momento della generazione dei casi, la distribuzione di Cauchy genera casi anche negativi e questo genera un conflitto nella determinazione del problema di ottimizzazione. Si è optato pertanto in una distribuzione LogNormale. Sono stati anche elaborati dei campioni casuali con una forzatura nella troncatura, in quanto la generazione di grandi numeri, 500 e 1.000, generava valori di flusso troppo elevati e soprattutto incompatibili con alcune combinazioni reali. In pratica era possibile una combinazione di flussi generati casualmente che invertiva le direzioni principali/secondarie andando a sfalsare completamente la realtà. I campioni, pertanto, sono stati creati partendo dalle distribuzioni LogNormali fittate dai dati osservati e con un campione limitato a 100 casi in

modo da non generare valori con una coda massima troppo elevati. Gli istogrammi riportati evidenziano come i campioni per il problema stocastico rispecchino tali distribuzioni.

- I **valori dei flussi** hanno comportamenti molto differenti in funzione dei volumi di traffico rilevati e gli accessi. Come si vede nei grafici ci sono alcuni accessi (1, 3, 5 e 7) che fittano relativamente bene con una distribuzione Uniforme, mentre altri (2, 4, 6 e 8) che fittano bene con una distribuzione LogNormale. La spiegazione pratica è che gli accessi principali hanno un carico di traffico molto costante, il che dimostra la distribuzione Uniforme; gli accessi secondari invece non godono di questa proprietà in quanto generalmente di valore inferiore (a volte anche un decimo) rispetto alla principale rispecchiando più facilmente una distribuzione LogNormale.

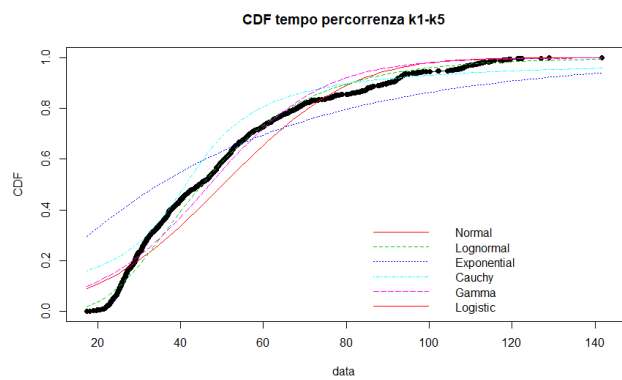
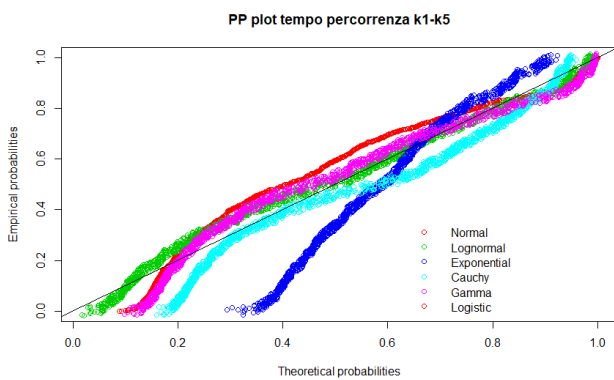
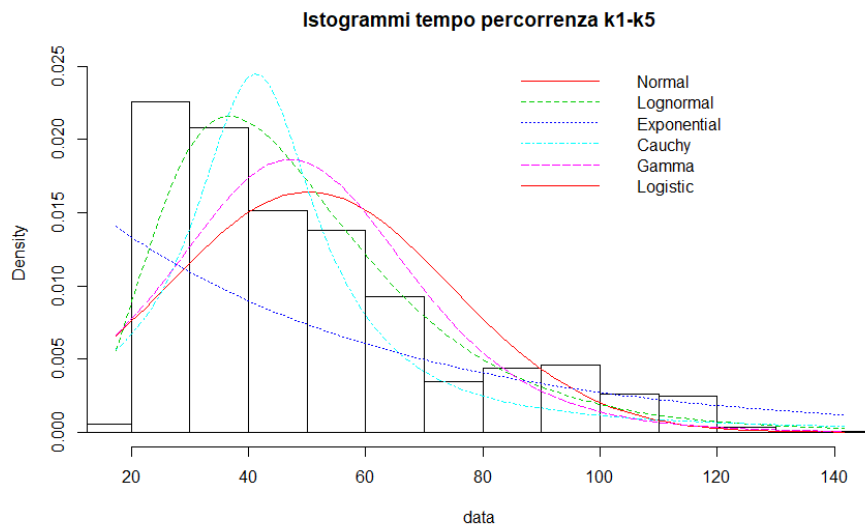
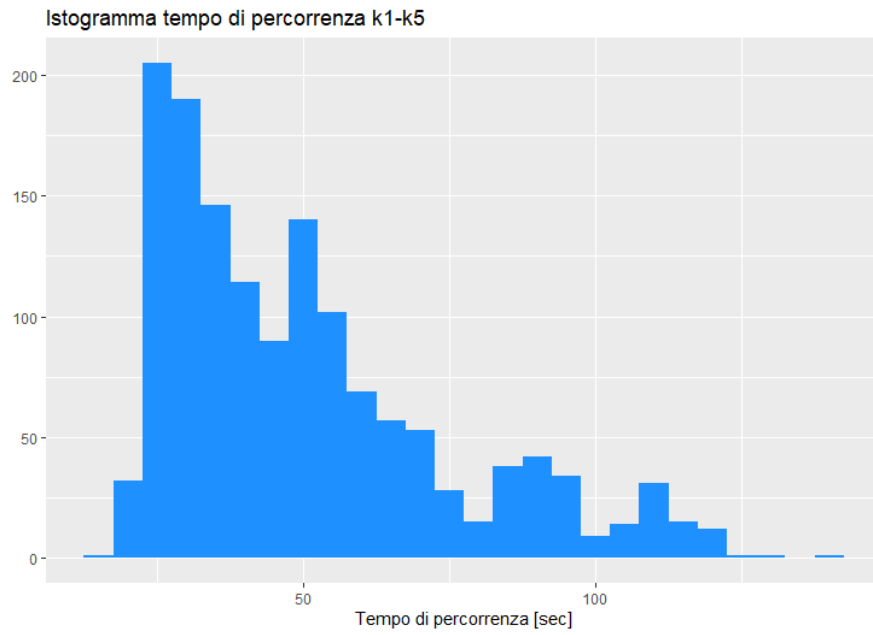
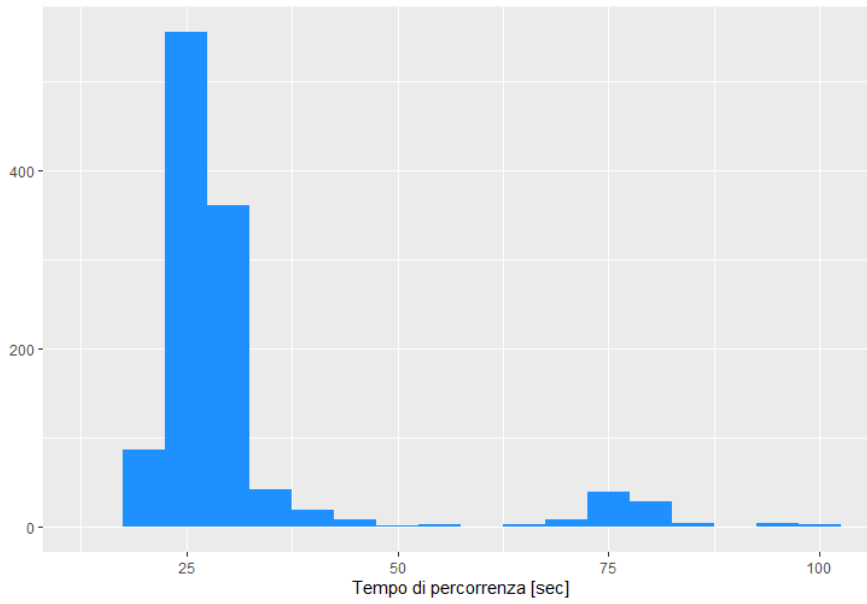
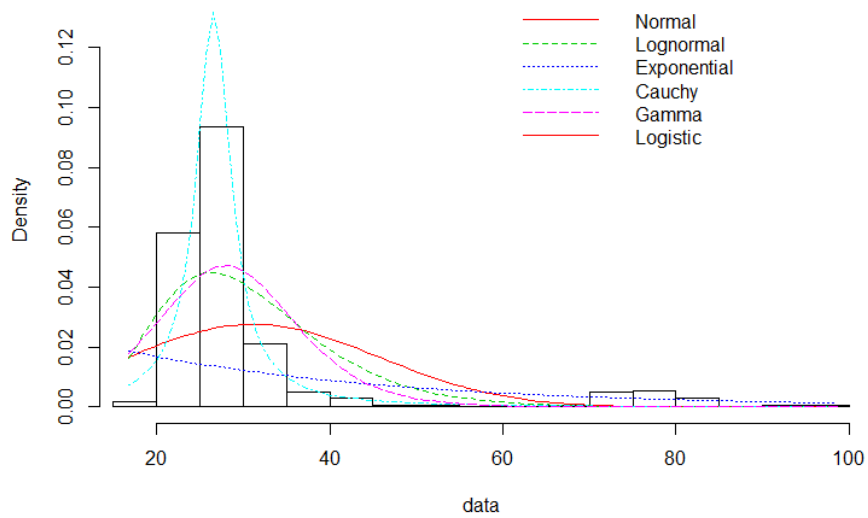


Figura 71. Analisi statistica del tempo di percorrenza tra gli accessi $k = 1$ e $k = 5$.

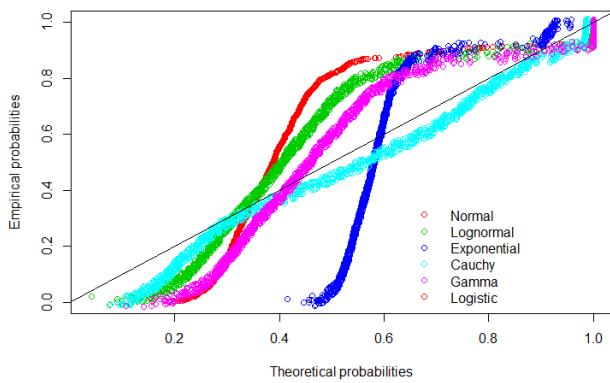
Istogramma tempo di percorrenza k7-k3



Istogrammi tempo percorrenza k7-k3



PP plot tempo percorrenza k7-k3



CDF tempo percorrenza k7-k3

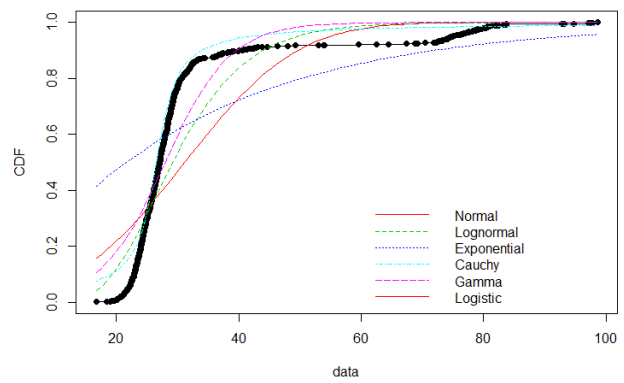
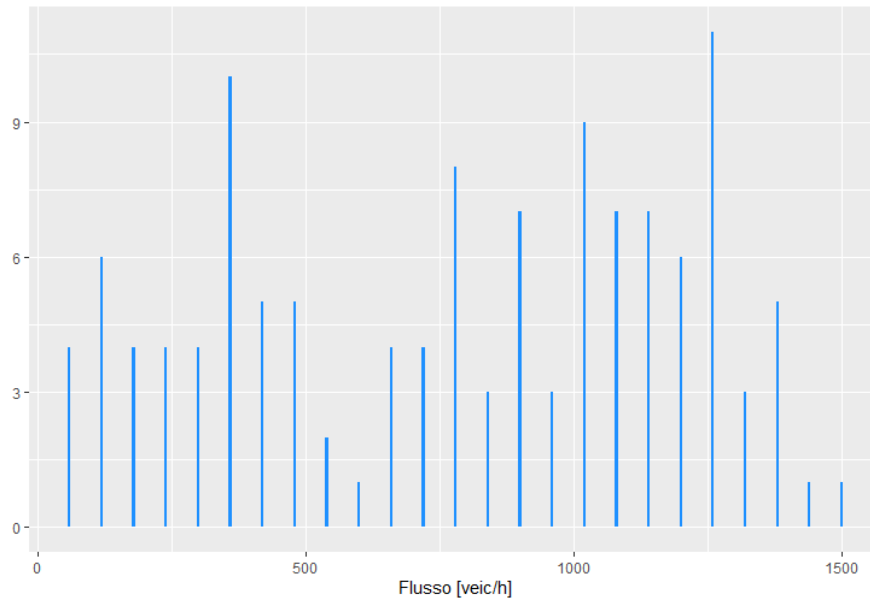
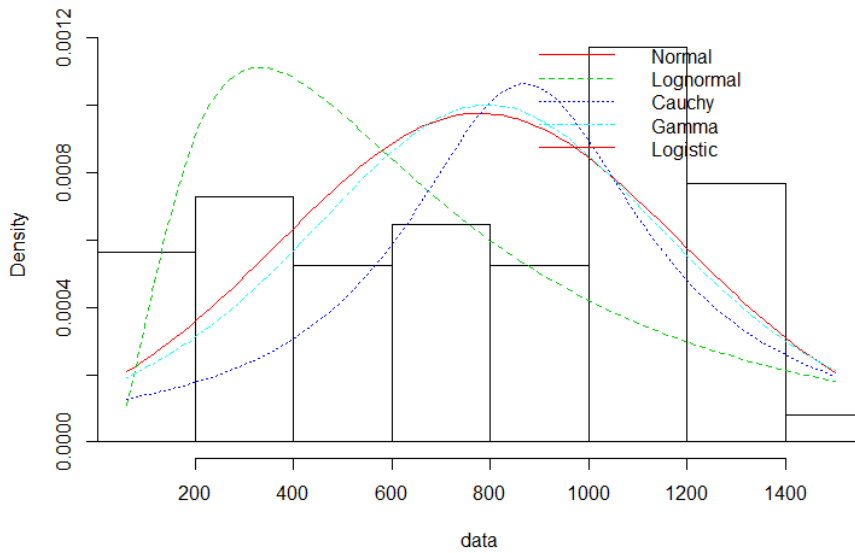


Figura 72. Analisi statistica del tempo di percorrenza tra gli accessi $k = 7$ e $k = 3$.

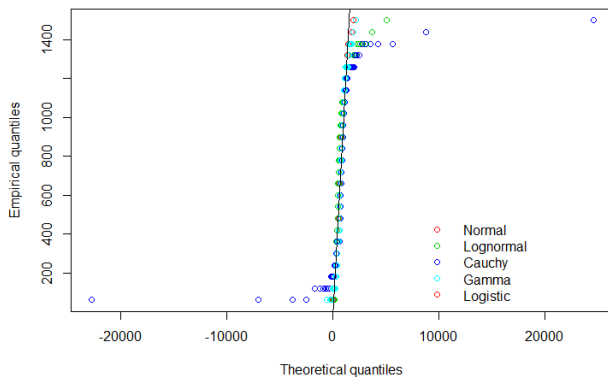
Istogramma flusso f1



Istogrammi flussi k1



PP plot flussi k1



CDF flussi k1

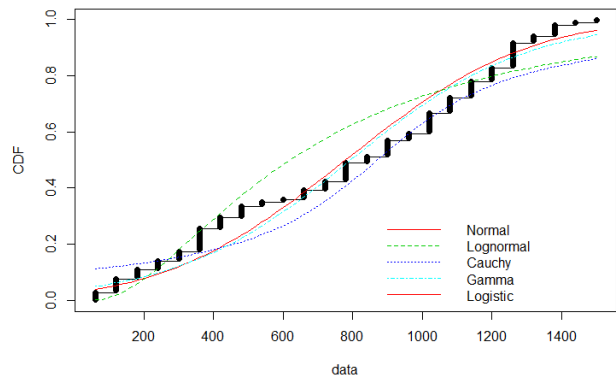
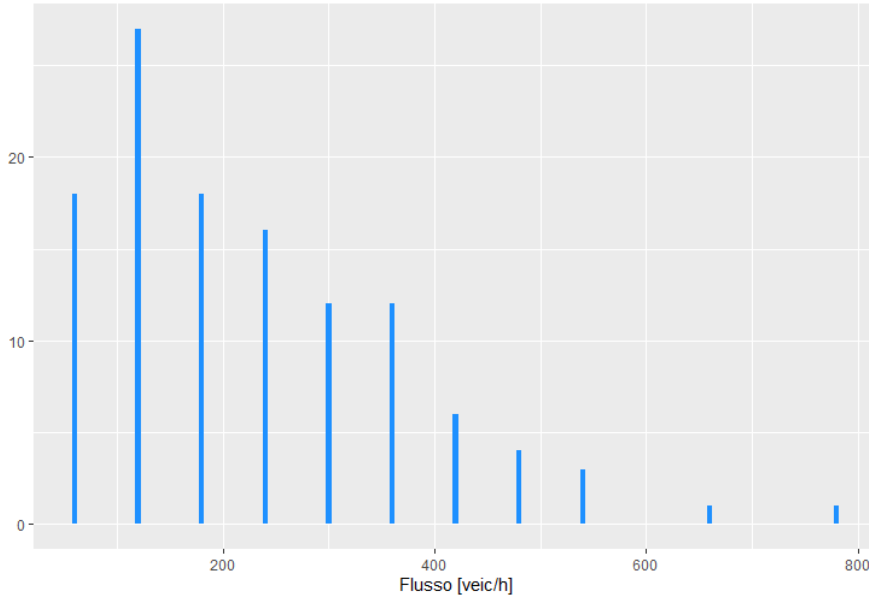
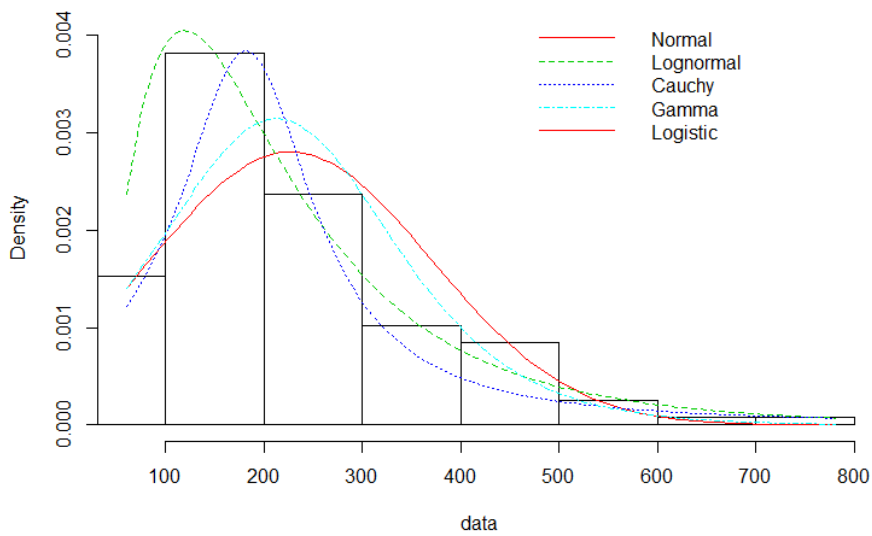


Figura 73. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 1$.

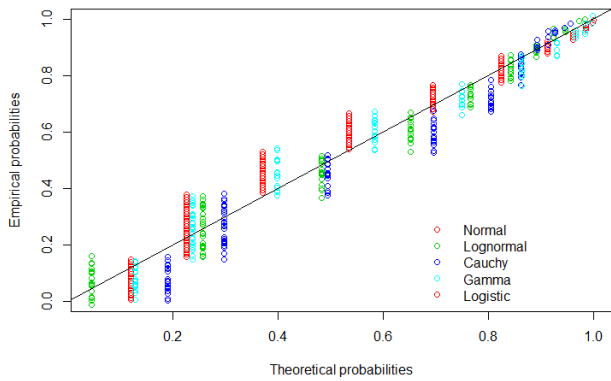
Istogramma flusso f2



Istogrammi flussi k2



PP plot flussi k2



CDF plot flussi k2

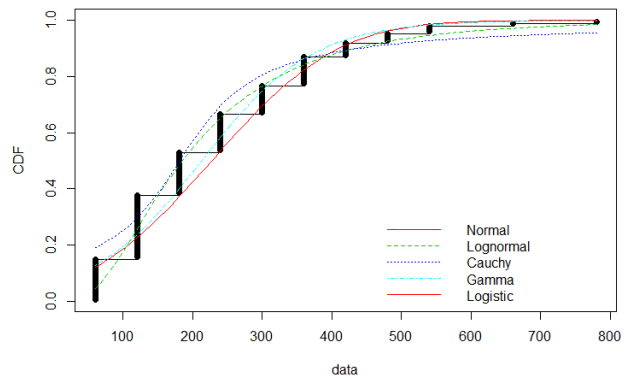


Figura 74. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 2$.

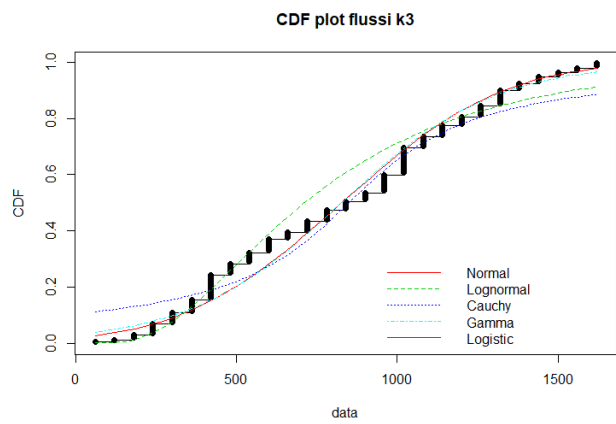
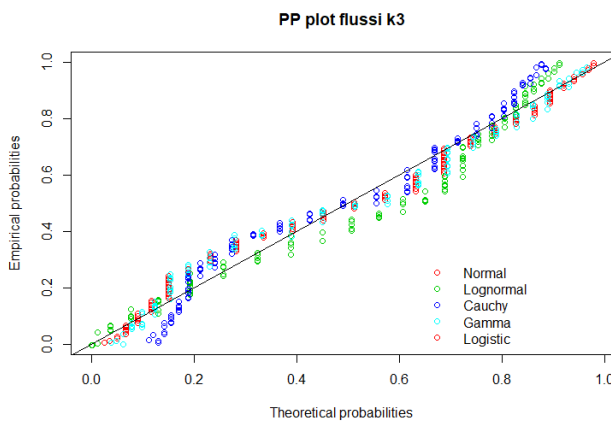
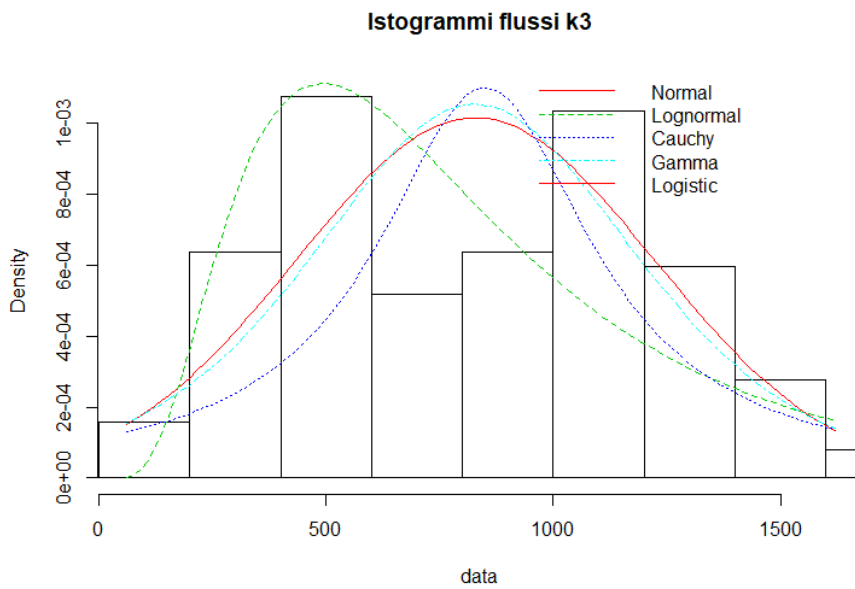
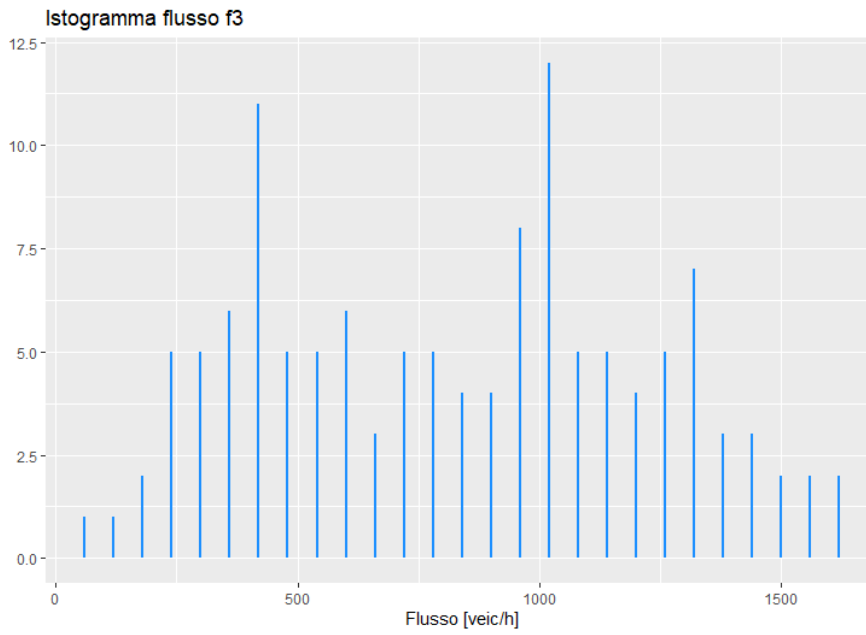
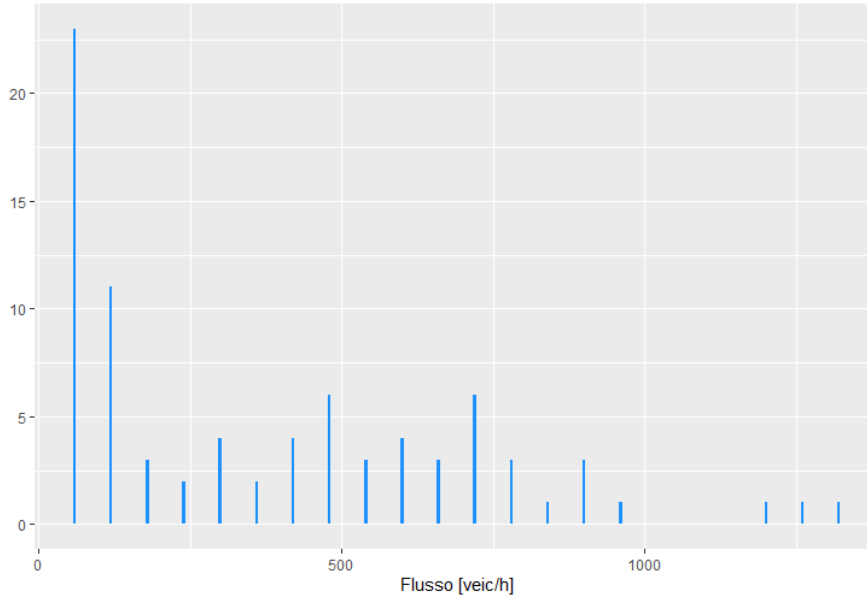
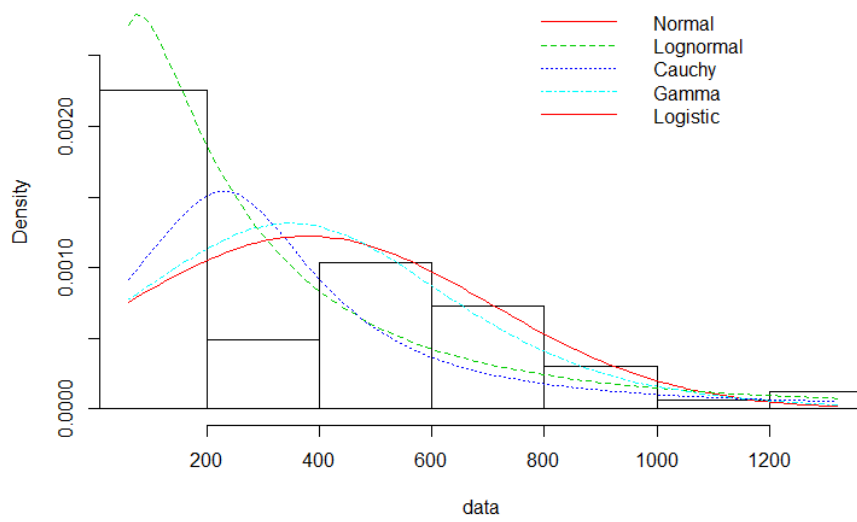


Figura 75. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 3$.

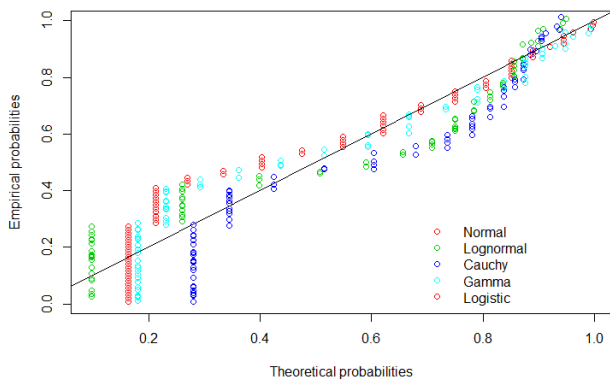
Istogramma flusso f4



Istogrammi flussi k4



PP plot flussi k4



CDF plot flussi k4

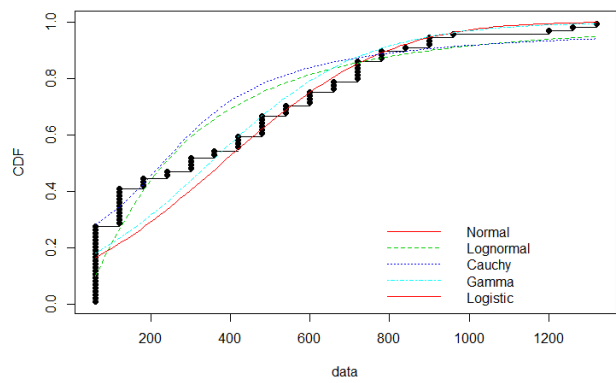
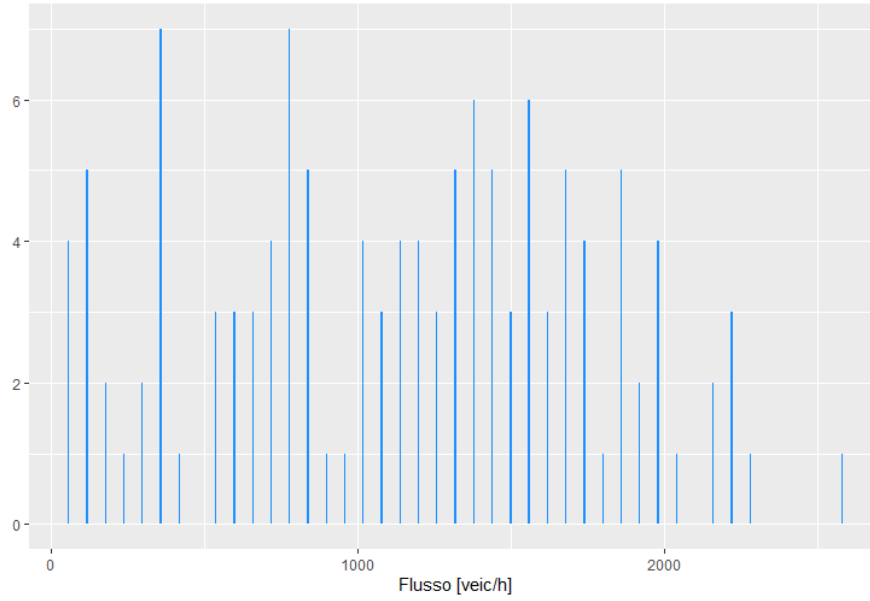
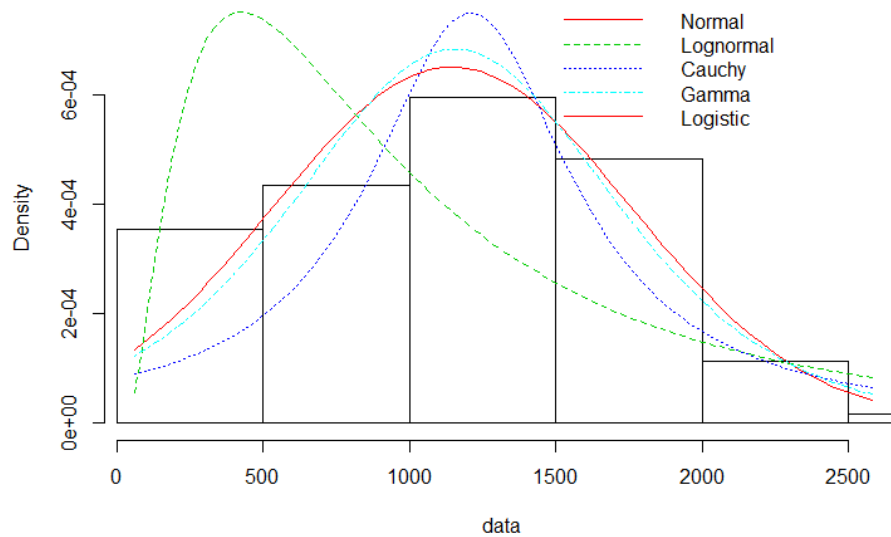


Figura 76. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 4$.

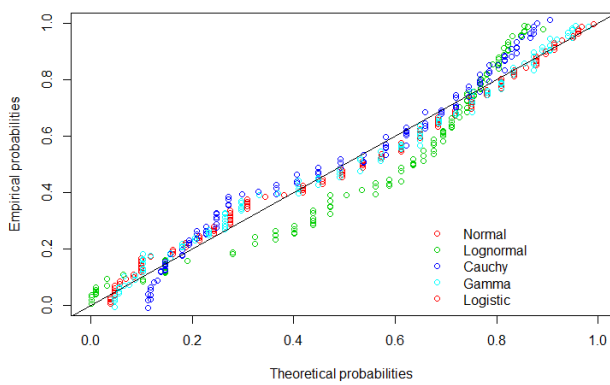
Istogramma flusso f5



Istogrammi flussi k5



PP plot flussi k5



CDF plot flussi k5

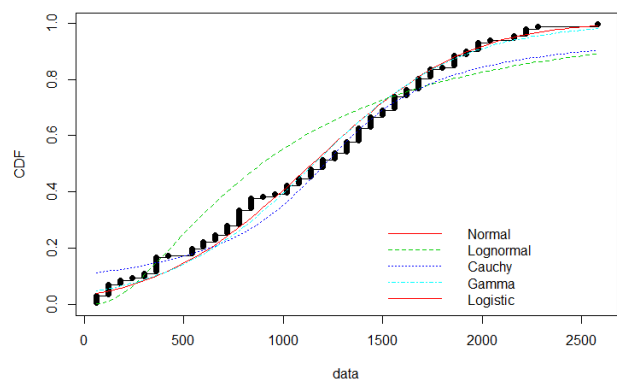
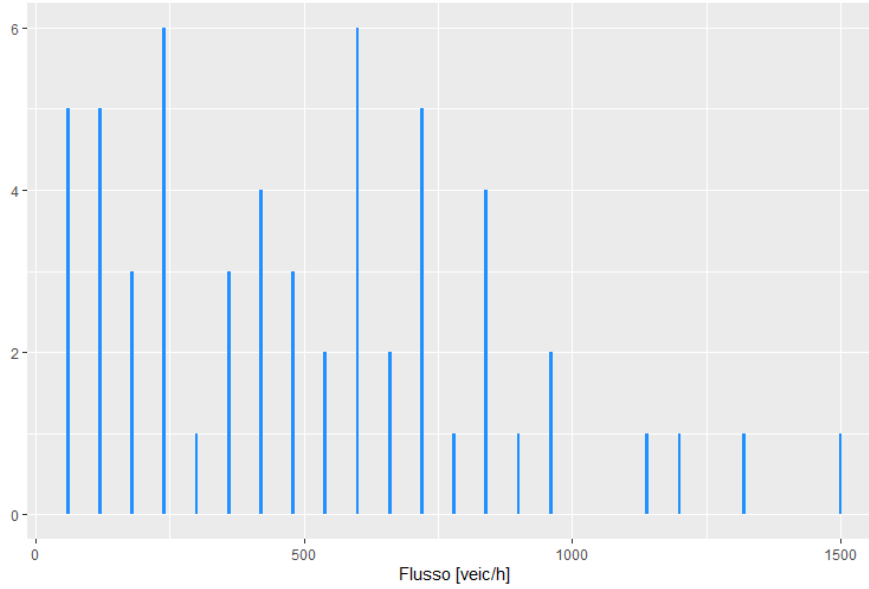
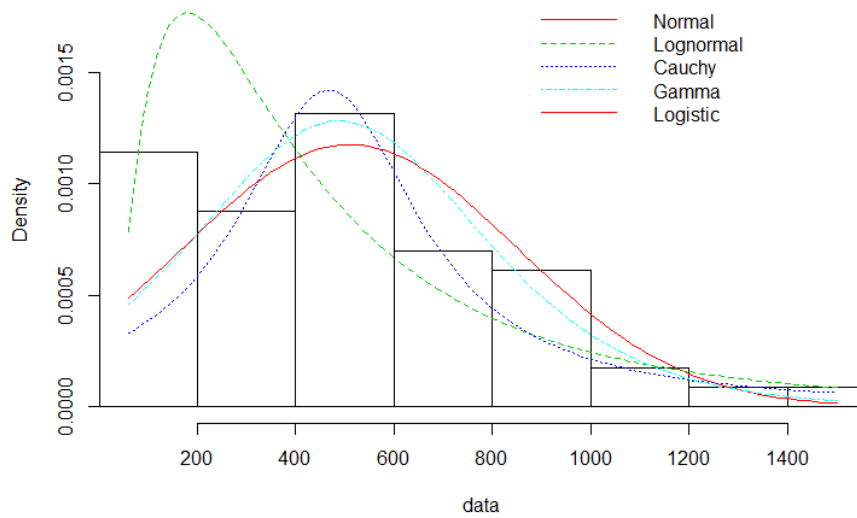


Figura 77. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 5$.

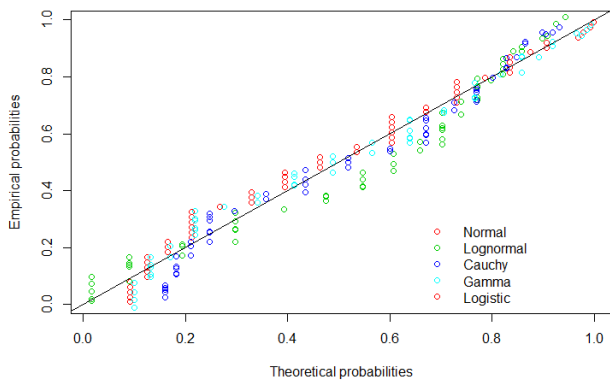
Istogramma flusso f6



Istogrammi flussi k6



PP plot flussi k6



CDF plot flussi k6

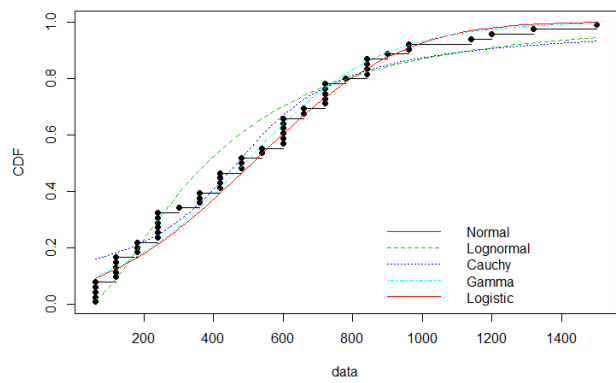
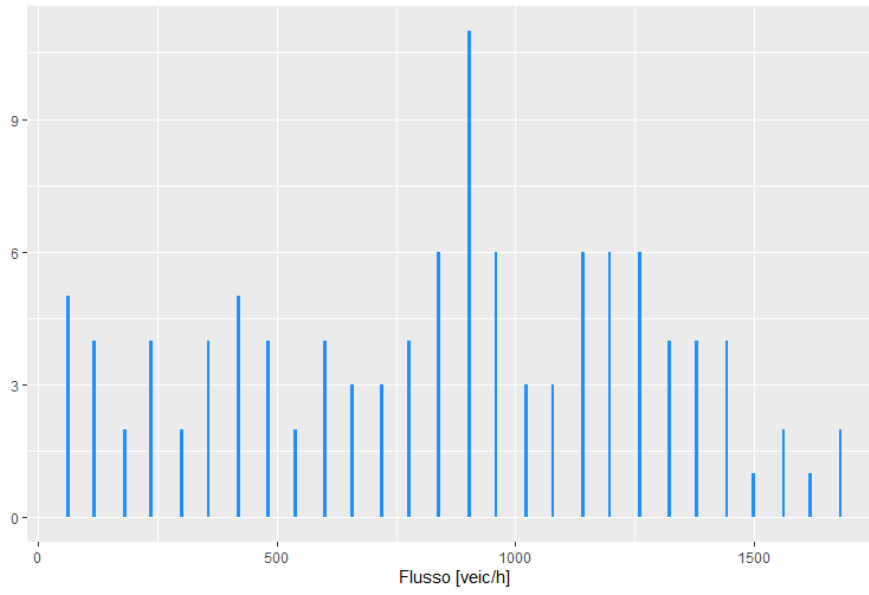
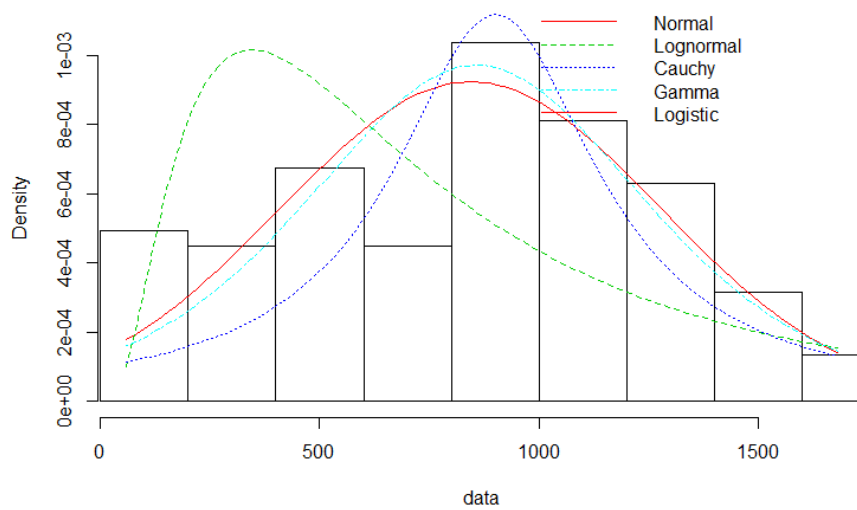


Figura 78. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 6$.

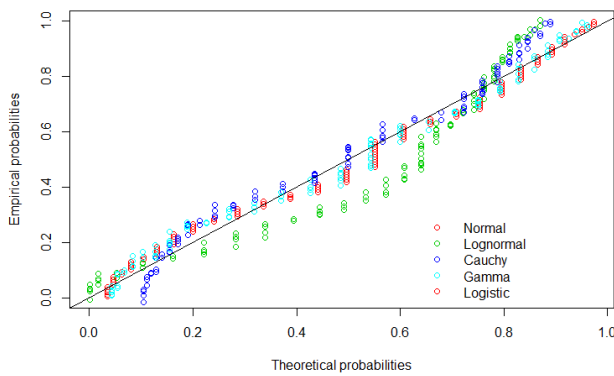
Istogramma flusso f7



Istogrammi flussi k7



PP plot flussi k7



CDF plot flussi k7

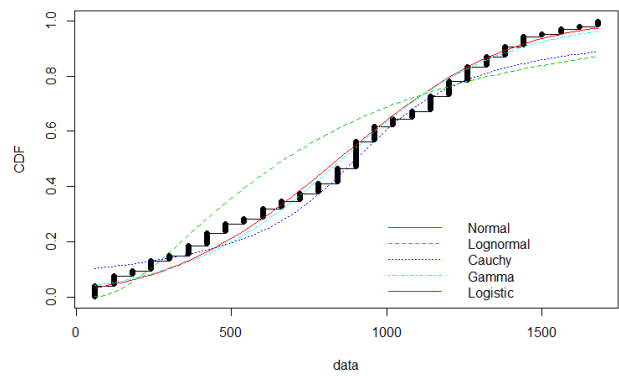


Figura 79. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 7$.

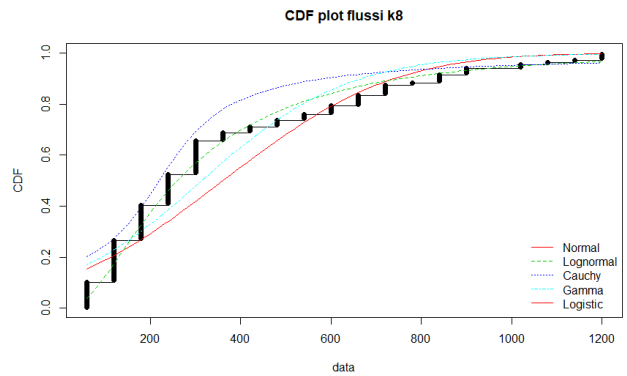
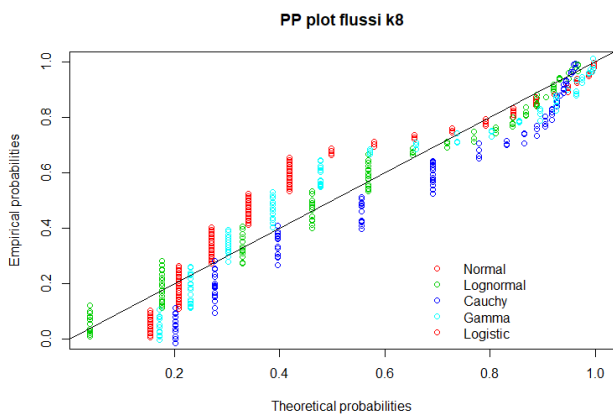
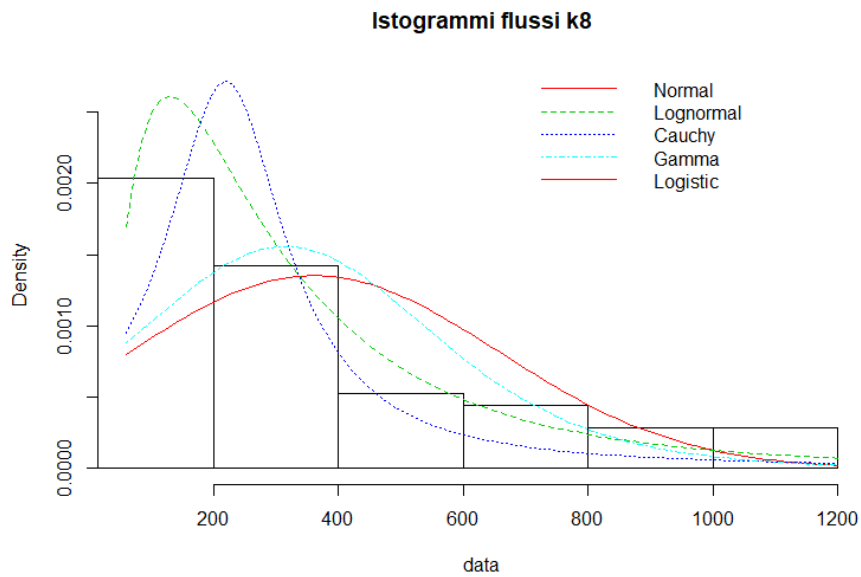
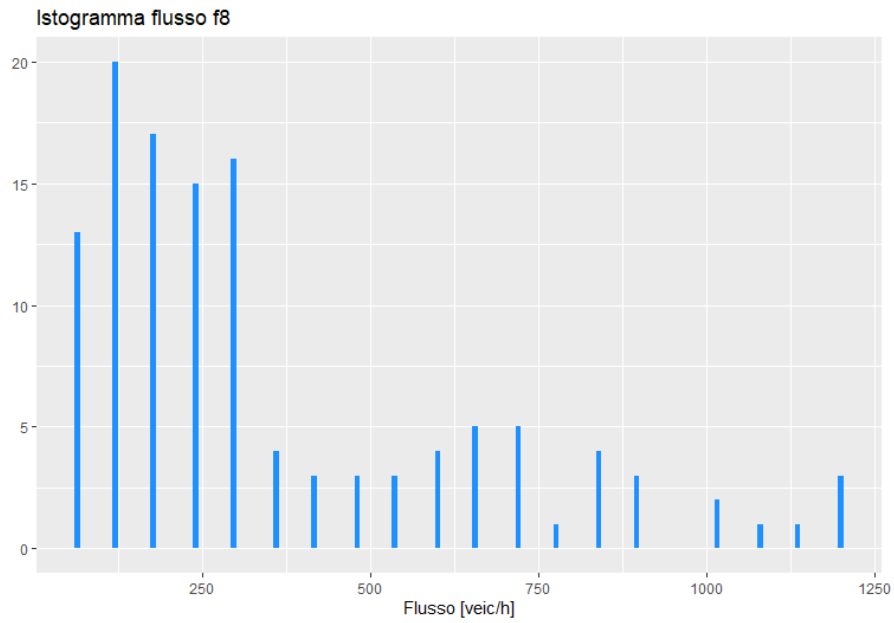


Figura 80. Analisi statistica dei flussi dell'accesso $k = 8$.

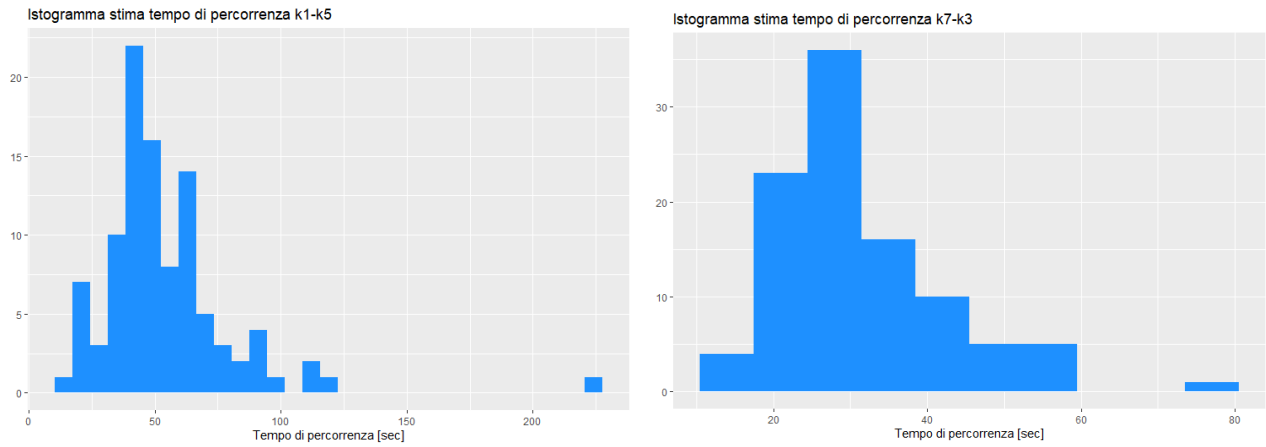


Figura 81. Istogrammi dei campioni creati dei tempi di percorrenza.

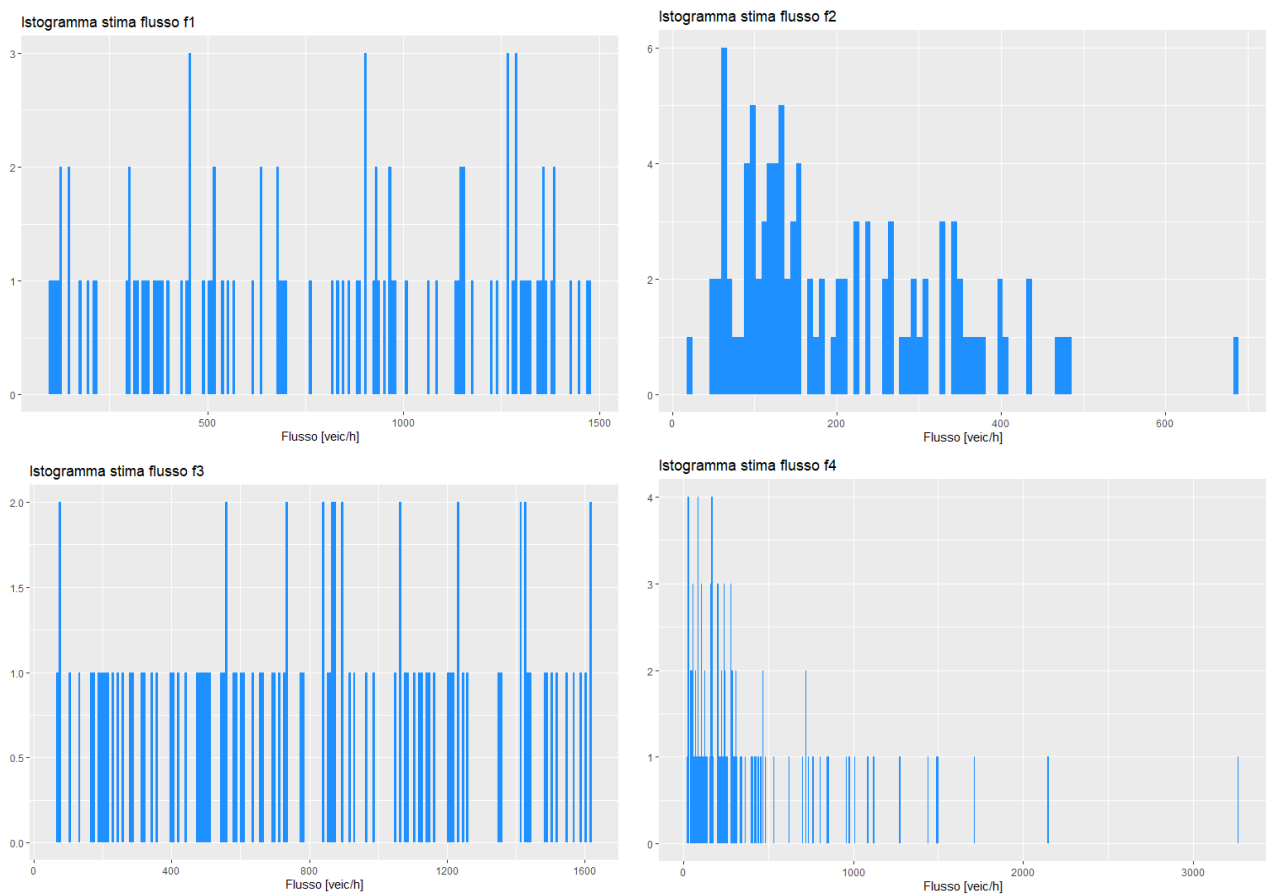


Figura 82. Istogrammi dei campioni creati dei flussi degli accessi $k = 1 \div 4$.

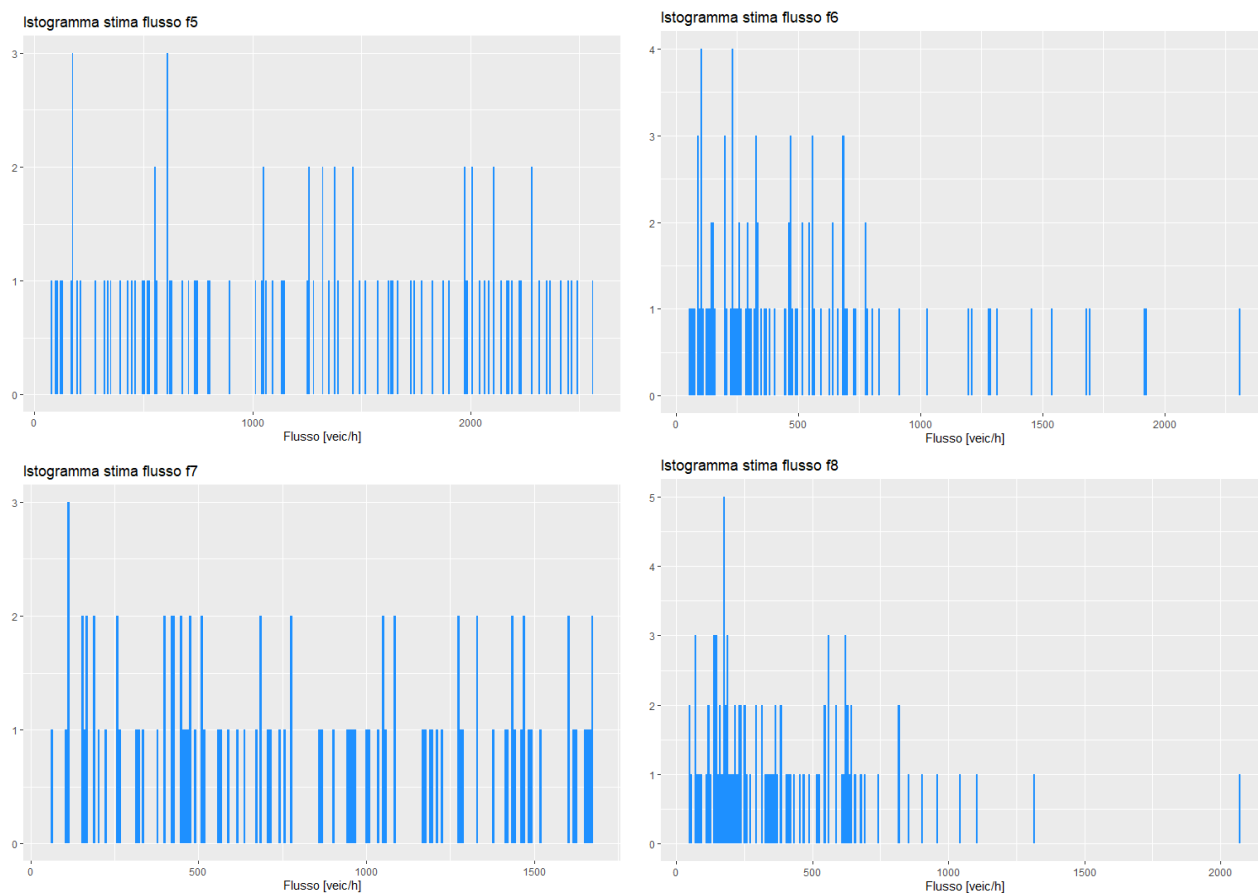


Figura 83. Istogrammi dei campioni creati dei flussi degli accessi $k = 5 \div 8$.

4.6. Calcolo dei valori di saturazione reali

DataFromSky recentemente ha messo a disposizione degli utenti uno strumento molto utile: il calcolo dell'headway medio per ciascun gate virtuale settato. Nello specifico, il software è in grado di filtrare tutti i veicoli che sono transitati da un determinato gate e memorizzare i tempi di headway con il veicolo precedente, in questo modo è possibile risalire al calcolo del flusso medio. Per le intersezioni semaforizzate questo strumento risulta particolarmente utile in quanto è possibile calcolare i flussi di saturazione reali secondo quanto previsto dall'HCM.

Nell'appendice H dell'HCM, si trova una metodologia che permette di calcolare direttamente il flusso di saturazione sul campo. Si assume che il flusso di saturazione s_k venga raggiunto raggiunga dopo circa 10 o 14 secondi dall'inizio del segnale verde che corrisponde all'asse anteriore della quarta vettura che attraversa la linea d'arresto (secondo HCM).

Dunque, se il flusso all'accesso k viene misurato nella sezione definita dalla linea d'arresto allo scattare del verde o comunque al passaggio dell'asse anteriore della prima vettura, il flusso di saturazione si calcola a partire dalla quarta autovettura. La tecnica di misurazione presentata dal manuale americano si articola in tre differenti passi metodologici successivi, in cui è raccomandata una squadra operativa composta da almeno due persone.

Il primo passo consiste nella definizione topologica dell'area (larghezze, pendenze, tipologia di area...) e dalla scelta di un punto di osservazione che permetta di vedere chiaramente sia la linea d'arresto che il semaforo.

Il secondo passo consiste nella "registrazione":

- Si annota l'ultimo veicolo in coda quando inizia il periodo di verde
- Si monitora l'evoluzione temporale dell'ultimo veicolo attraverso un timer
- Si annota sul foglio di lavoro la tipologia di veicolo (pesante o leggero), le svolte a destra e quelle a sinistra.

Il terzo ed ultimo passo utilizza, per facilitare l'operatore nel suo compito, un registratore vocale (o strumenti con analoghe funzioni) ed un cronometro. All'inizio del verde si aziona il cronometro e si segnala al registratore l'avvio della misurazione. Si conta ad alta voce ogni veicolo nella coda che attraversa, con il suo asse anteriore, la linea di stop e si segna il tempo di passaggio. Si comunica al registratore i tempi del quarto, del decimo e dell'ultimo veicolo che attraversano la linea. Alla fine del periodo di verde si registra quale sia il numero dell'ultimo veicolo passato.

Il periodo di misurazione inizia, come detto prima, quando il quarto veicolo sorpassa con l'asse anteriore la linea d'arresto o la linea di riferimento prescelta, e termina quando l'asse anteriore dell'ultimo veicolo in coda supera la stessa linea (l'ultimo veicolo può anche essere arrivato in coda quando il segnale era già commutato al verde).

Le misurazioni vengono effettuate ciclo per ciclo. Una volta registrati tutti i tempi si utilizzano le semplici relazioni esistenti intertempo tra i veicoli ed il loro intertempo.

Si prende il tempo dell'ultimo veicolo registrato e si sottrae ad esso il tempo del quarto veicolo ottenendo il tempo di passaggio sulla linea d'arresto di (n-4) veicoli. A questo punto dividendo per (n-4) si ottiene l'intertempo tra due veicoli.

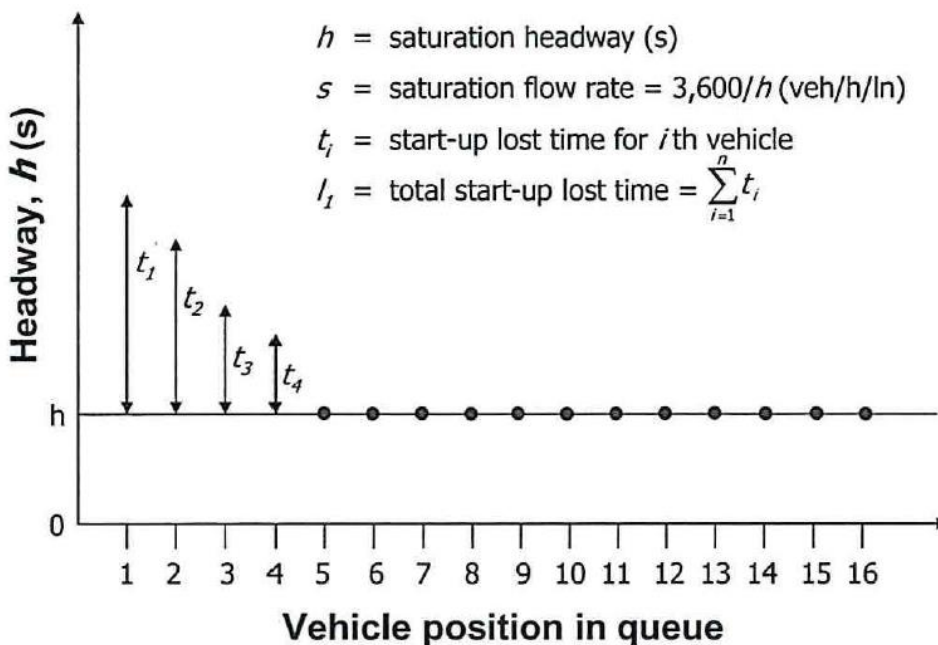


Figura 84. Definizione dell'headway e saturazione secondo HCM in un'intersezione semaforizzata.

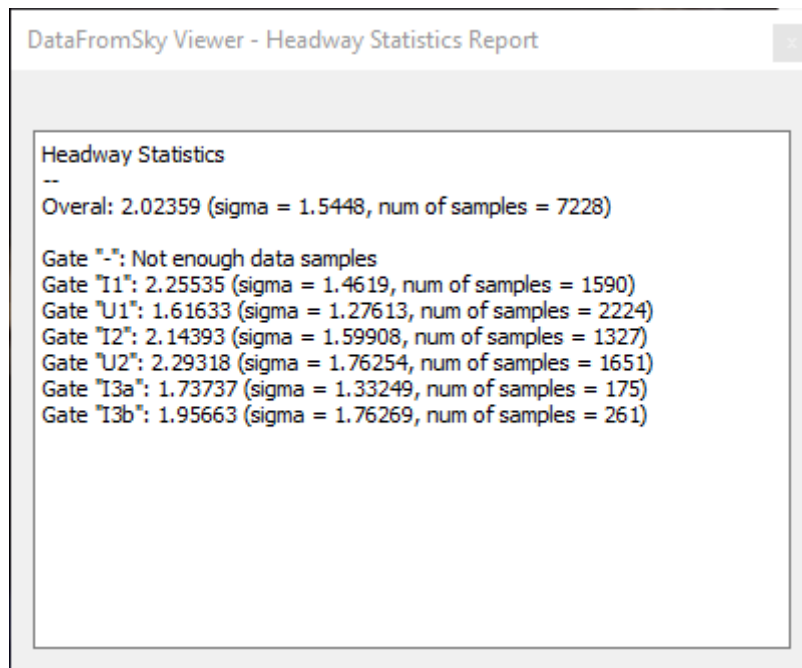


Figura 85. Risultato del calcolo dei valori di headway per ogni accesso con DataFromSky

4.7. Modello di ottimizzazione stocastica

4.7.1. Risolutore IBM ILOG CPLEX

I casi studio che saranno analizzati nel prossimo paragrafo sono stati implementati sul solver commerciale CPLEX, dedicato alla risoluzione e all'ottimizzazione di problemi di programmazione matematica di vario tipo, ed in particolare di:

- Programmazione matematica lineare (anche intera e mista)
- Programmazione matematica con funzione obiettivo quadratica e convessa e vincoli lineari (nel caso di minimizzazione)
- Alcuni problemi di programmazione quadratica con vincoli del secondo ordine

Fu originariamente sviluppato da Robert E. Bixby nel 1968 e commercializzato a partire dal 1988 dalla *CPEX Optimization Inc.*, la quale fu acquistata da ILOG che a sua volta, nel 2009, fu acquistata dalla IBM. CPLEX deve il suo nome al metodo del semplice (*simplex method*) e al linguaggio in cui è stato implementato, cioè C, anche se, ad oggi, offre interfacce verso altri ambienti e linguaggi di programmazione.

Più precisamente questo software permette all'utente, attraverso l'algoritmo del semplice (nelle sue varianti primale o duale), attraverso metodi di punto interno, o ancora, attraverso procedure basate sull'enumerazione implicita di tipo branch and bound e altre tecniche particolari, di risolvere problemi di programmazione lineare intera, anche di notevoli dimensioni, e diverse estensioni di questi problemi, cioè:

- problemi di flusso in una rete, un caso speciale di programmazione lineare che CPLEX può risolvere molto velocemente sfruttando la struttura del problema;
- problemi di programmazione quadratica (Quadratic Programming - QP), in cui la funzione obiettivo comprende anche termini quadratici;

- problemi di programmazione con vincoli quadratici (Quadratic Constrained Programming – QCP), che includono quei problemi che tra i vincoli esibiscono termini quadratici; infatti CPLEX può risolvere problemi utilizzando tecniche di Second Order Cone Programming (SOCP);
- problemi di programmazione mista-intera (Mixed Integer Programming – MIP), in cui i valori che possono assumere alcune o tutte le variabili, nella funzione obiettivo, sono ristretti al campo intero.

Viene ora descritto passo a passo il programma creato con relativo listato.

```
//Definizione costanti
float Tc=...;
int giallo=...;
int tuttorosso=...;
int tempoperso=giallo+tutorosso;
```

In questa prima sezione vengono definite le costanti del problema. Innanzitutto il tempo ciclo, considerato costante in quanto la variazione di tale valore introduce solamente una relazione diretta con la capacità (al crescere del tempo cresce la capacità e il ritardo). Non è oggetto pertanto di ottimizzazione. È stata discussa la possibilità di introdurre un ritardo massimo accettato dagli utenti, ma poi non si è convenuto di affrontare tale vincolo in quanto sarebbe stato difficile valutare quale sarebbe stato il valore ottimale di attesa di un utente iesimo.

Successivamente vengono inseriti i tempi di giallo e di tutto rosso che sommati indicano il tempo perso alla fine della fase. Non è stato introdotto un tempo perso all'avvio della fase in quanto difficile da valutare (è funzione del tempo di reazione del conducente). In una futura versione del software DataFromSky è in sviluppo un algoritmo che permette la valutazione del tempo di reazione degli utenti, in quel caso sarà possibile integrare il problema. Uno sviluppo successivo, al fine di rendere il problema ancora più realistico, è l'introduzione della matrice di sicurezza: è norma introdurre differenti tempi di giallo e di tutto rosso in funzione della sicurezza della manovra, è pertanto utile introdurre una matrice dei tempi di intergreen (o di sicurezza) differenti per ogni accesso.

```
//Definizione flussi e saturazione
int totflussi = ...;
range flow = 1..totflussi;
float sat [flow] = ...;
```

In questa sezione sono stati definiti gli accessi in ingresso al sistema e il flusso di saturazione. Per il calcolo dei flussi di saturazione è stata sfruttata un'interessante funzione di DataFromSky: il calcolo del tempo di headway [sec] per ogni accesso impostato. Il sistema riesce a calcolare e filtrare per ogni accesso l'intervallo temporale tra un veicolo e il successivo; tale valore (molto complesso da valutare sul campo) permette di valutare la saturazione per ogni accesso.

```
//Introduzione aleatorietà tempo di percorrenza tp
int tottp = ...;
range tpvar = 1..tottp;
float tp1[tpvar] = ...;
float tp7[tpvar] = ...;
//Introduzione aleatorietà flussi f
int totf = ...;
range fvar = 1..totf;
float flussi[flow][fvar] = ...;
```

In questa sezione è stata inserita l'aleatorietà del sistema nelle variabili tempi di percorrenza e dei flussi.

In pratica nel risolutore CPLEX, come in tutti i software simili, la stocasticità del problema deve essere introdotta generando campioni casuali che si distribuiscano secondo distribuzioni statistiche derivate dai dati originali.

```
//Definizione matrice di incompatibilità
int M[flow][flow] = ...;
dvar boolean omega[incomp];
tuple Pair{
    key int f1;
    key int f2;
};
{Pair} incomp = {<l,j> | l,j in flow: l>j && M[l][j] == 1};//
```

È stata definita la matrice di incompatibilità delle fasi, con ottimizzazione del risolutore utilizzando solamente metà di tale matrice in quanto gode della proprietà della simmetria (non può esistere che una manovra i esima sia incompatibile con una manovra j esima e non viceversa). Nelle prime versioni del problema tale semplificazione non c'era e il risolutore applicava la matrice dell'incompatibilità completa. Il tempo di risoluzione è migliorato riducendosi di circa il 50%.

```
//Definizione dipendendenze
dvar float Inizio[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ Fine[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ VerdeEfficace[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ Capacita[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ C1[tpvar][fvar];
dvar float+ C2[tpvar][fvar];
dvar float+ TotBanda[tpvar][fvar];
```

Qui sono stati definiti i punti di inizio e di fine di ciascuna fase al variare di ciascun accesso, tempo di percorrenza e flusso simulato. Sono state anche introdotte tutte le altre costanti che sono necessarie a definire il sistema: verde efficace, capacità (per ciascuna intersezione) e il valore complessivo della banda.

```
//Definizione pesi e F.O. TotBanda e capacità media;
float alfa = .1;//pesoTotBanda
float beta = 1;//pesoCapacità
maximize alfa*B_media + 10*beta*(C1_media + C2_media);
C1_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) C1[i][k];
C2_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) C2[i][k];
B_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) TotBanda[i][k];
```

In questa sezione è stata impostata la funzione obiettivo ed alcuni pesi. In pratica il risolutore cerca una soluzione ottimale che massimizza la media della banda per ogni coppia di campioni simulati di tempi di percorrenza e di flussi nel nostro caso 100 sono i campioni dei tempi di percorrenza, 100 sono i flussi simulati e 8 gli accessi. Pertanto il sistema deve ottimizzare 80.000 casi che sono distribuiti secondo differenti distribuzioni statistiche. A questa massimizzazione aggiunge una seconda funzione che è la media delle capacità delle due intersezioni per ogni tempo di percorrenza e per ogni flusso.

Sono stati introdotti anche due pesi: alfa e beta, rispettivamente per valutare il peso della variabilità dei tempi di percorrenza e dei flussi.

Da questo punto in poi vengono impostati alcuni vincoli tra cui, il calcolo delle capacità per le singole intersezioni, i verdi efficaci e la banda. Vengono descritti nel dettaglio.

```
//Calcolo della capacità per singole intersezioni
subject to
```



```

{
forall (i in tpvar, k in fvar)
{
forall (j in 1..4)
C1[i][k] <= Capacita[j][i][k];
forall (j in 5..8)
C2[i][k] <= Capacita[j][i][k];
}

// Vincolo sulla durata minima del VerdeEfficace
forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
Veff_min: VerdeEfficace[j][i][k] >= (Tc*(flussi[j][k]/sat[j]));

//Vincolo della banda
forall (i in tpvar, k in fvar)
{
Fine[5][i][k] >= Fine[1][i][k] + tp1[i];
Fine[3][i][k] >= Fine[7][i][k] + tp7[i];
}

forall (i in tpvar, k in fvar)
{
Inizio[5][i][k] <= (Inizio[1][i][k]) + tp1[i];
Fine[1][i][k] - Inizio[1][i][k] <= Fine[5][i][k] - Inizio[5][i][k];
Inizio[3][i][k] <= (Inizio[7][i][k]) + tp7[i];
Fine[7][i][k] - Inizio[7][i][k] <= Fine[3][i][k] - Inizio[3][i][k];
}

//Calcolo della banda
forall (i in tpvar, k in fvar)
Vinc_banda: TotBanda[i][k] == VerdeEfficace[1][i][k] + VerdeEfficace[7][i][k];

```

In questa parte sono definiti i principali parametri che caratterizzano il coordinamento semaforico.

Si definisce sfasamento assoluto (offset) l'intervallo di tempo [s] che stabilisce l'inizio del periodo di verde della fase coordinata nell'intersezione j rispetto alla prima intersezione (istante di riferimento). E' chiaro che lo sfasamento assoluto della prima intersezione è pari a zero.

Analogamente si definisce sfasamento relativo l'intervallo di tempo che stabilisce l'istante di inizio del periodo di verde tra due intersezioni successive; se, mentre lo sfasamento assoluto, è un valore compreso nell'intervallo $[0, T_c]$, lo sfasamento relativo può essere minore di zero.

Si definisce ampiezza di banda l'intervallo di tempo, all'interno del periodo di verde per il quale i veicoli che, passando con il verde alla prima intersezione coordinata, riescono a proseguire senza fermate intermedie fino all'ultima. Il numero dei veicoli che attraversa l'arteria stradale all'interno dell'ampiezza di banda è definito capacità di banda [veic/ciclo].

Di norma il calcolo della banda è definito, applicato al nostro caso in studio nella dierzione 1-5, come:

Inizio banda = inizio[1] + tp[1] se inizio [5] ≤ inizio[1] + tp[1], altrimenti inizio[5] e

Fine banda = fine[1] + tp[1] se fine [5] ≤ fine[1] + tp[1], altrimenti fine [5]

Nel nostro caso è stato impostato:

$Inizio[5][i][k] \leq (Inizio[1][i][k]) + tp1[i]$ e $Fine[5][i][k] \geq Fine[1][i][k] + tp1[i]$

il calcolo della banda si semplifica con la somma dei verdi efficaci. In pratica avremo che tutto il verde efficace della manovra di partenza sarà coordinato con la manovra successiva.

//Definizione della sequenza delle fasi

```

forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
  Vinc_Verde: VerdeEfficace[j][i][k] == Fine[j][i][k] - Inizio[j][i][k] - tempoperso;

forall (j in flow,i in tpvar, k in fvar)
  Vinc_Fine: Fine[j][i][k] <= Tc;

forall(j in flow,i in tpvar, k in fvar)
  Vinc_cap: Capacita[j][i][k] ==
(sat[j]*VerdeEfficace[j][i][k])/(Tc*(flussi[j][k]));

//Definizione dell'incompatibilità delle fasi
forall(i in tpvar, l,j in flow, k in fvar: l>j && M[l][j] == 1)
{
  Fine[l][i][k] <= Inizio[j][i][k] + Tc*omega[<l,j>];
  Fine[j][i][k] <= Inizio[l][i][k] + Tc*(1-omega[<l,j>]);
}

forall(j in flow,i in tpvar, k in fvar)
  Vinc_Inizio: -Tc <= Inizio[j][i][k] <= Tc;

forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
  Vinc_Inizio_Fine: Fine[j][i][k] >= Inizio [j][i][k];

```

Le sezioni precedenti definiscono i vincoli per la sequenza delle fasi e dell'incompatibilità delle manovre.

Infine, è possibile salvare il risultato in formato csv per una più facile lettura dei risultati.

```

//Salvataggio file su csv
execute{
  var ofile = new IloOplOutputFile("results.csv");
  ofile.write("Flow;tpavr;fvar;Inizio;Fine;TotBanda;Veff;Capacità \n");
  for(var i in thisOplModel.flow)
    for(var k in thisOplModel.tpvar)
      for(var j in thisOplModel.fvar)
        ofile.write(i + ";" + k + ";" + j + ";" +
thisOplModel.Inizio[i][k][j] + ";" + thisOplModel.Fine[i][k][j] + ";" +
thisOplModel.TotBanda[k][j] + ";" + thisOplModel.VerdeEfficace[i][k][j] + ";" +
thisOplModel.Capacita[i][k][j] + "\n");
}

```

Il risultato è il calcolo della sequenza delle fasi, dei verdi efficaci per ogni combinazione di tempi di percorrenza e di flussi, per ogni singolo accesso.

Il problema nella prima versione, senza ottimizzazione della matrice di incompatibilità, impiegava circa 7h12min a trovare la soluzione ottimale. Con l'ottimizzazione si è passati a 2h52min.

I vincoli impostati sono 830.000, le variabili 350.000 ma soprattutto i valori binari sono stati dimezzati a 10.

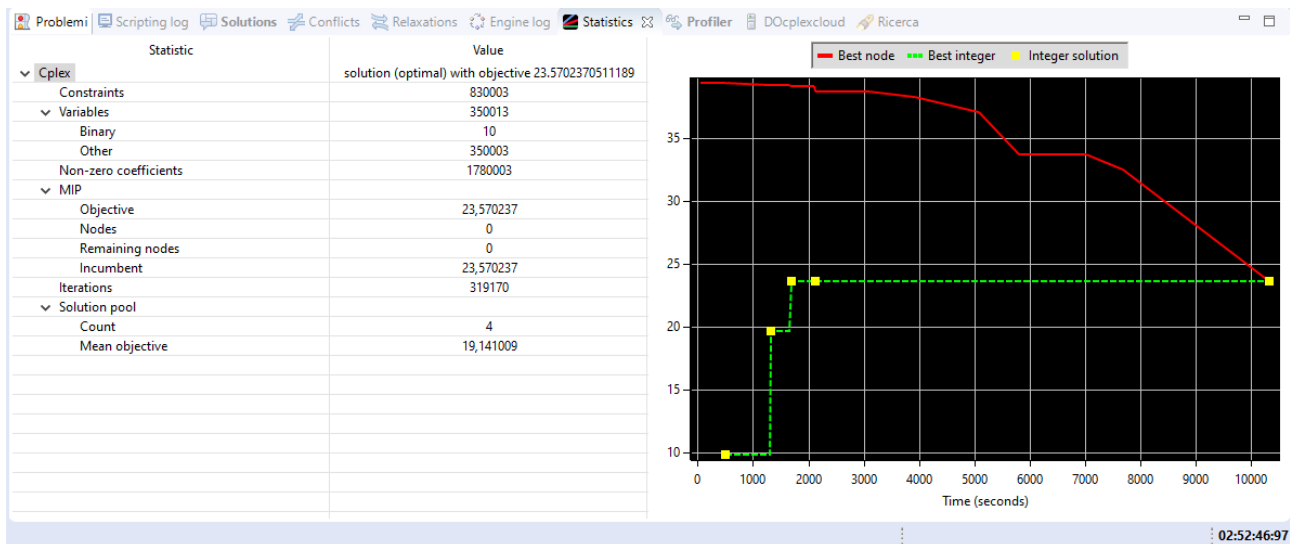


Figura 86. Risultato della ricerca della funzione obiettivo.

4.8. Risultati dell'ottimizzazione

Il modello è stato applicato a diversi scenari per valutarne la bontà e l'efficacia.

4.8.1. Scenario 0: stato di fatto

Il primo scenario è quello dello stato di fatto con utilizzo dei tempi di percorrenza e dei flussi generati dalle distribuzioni reali. In pratica, sono stati imposti i valori di [inizio] e [fine] delle fasi, di conseguenza anche dei verdi efficaci, e il modello ha calcolato la funzione obiettivo.

Qui di seguito si riporta il dettaglio della modifica dello script di base.

```
forall (i in tpvar, k in fvar){
  //intersezione 1
  Inizio[1][i][k] == 0;
  Fine [1][i][k] == 91; //Accesso 1
  Inizio[2][i][k] == 136;
  Fine [2][i][k] == 176; //Accesso 2
  Inizio[3][i][k] == 0;
  Fine [3][i][k] == 91; //Accesso 3
  Inizio[4][i][k] == 136;
  Fine [4][i][k] == 176; //Accesso 4
  //intersezione 2
  Inizio[5][i][k] == -17;
  Fine [5][i][k] == 80; //Accesso 5
  Inizio[6][i][k] == 111;
  Fine [6][i][k] == 160; //Accesso 6
  Inizio[7][i][k] == -2;
  Fine [7][i][k] == 71; //Accesso 7
  Inizio[8][i][k] == 111;
  Fine [8][i][k] == 160; //Accesso 8
}
```

Il risultato è stato calcolato in modo molto rapido, in quanto il modello non doveva calcolare i tempi di

inizio e di fine delle fasi, perché imposti, ma solamente la soluzione ottima con i valori dati.

```
// solution (optimal) with objective 24.7682635360473
// Quality There are no bound infeasibilities.
// There are no reduced-cost infeasibilities.
// Max. unscaled (scaled) Ax-b resid.      = 4,06966e-15 (4,06966e-15)
// Max. unscaled (scaled) c-B'pi resid.    = 0 (0)
// Max. unscaled (scaled) |x|              = 176 (176)
// Max. unscaled (scaled) |slack|         = 321 (321)
// Max. unscaled (scaled) |pi|            = 10 (10)
// Max. unscaled (scaled) |red-cost|      = 0 (0)
```

```
B_media = 154;
C1_media = 0.68004;
C2_media = 0.25679;
```

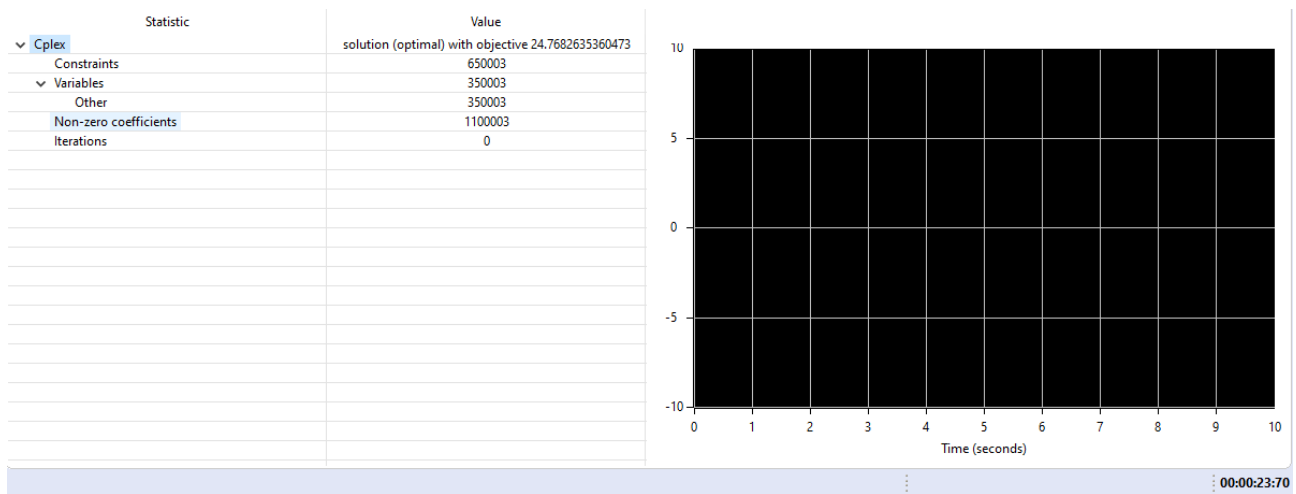


Figura 87. Risultato del modello applicato allo scenario 0 (stato di fatto)

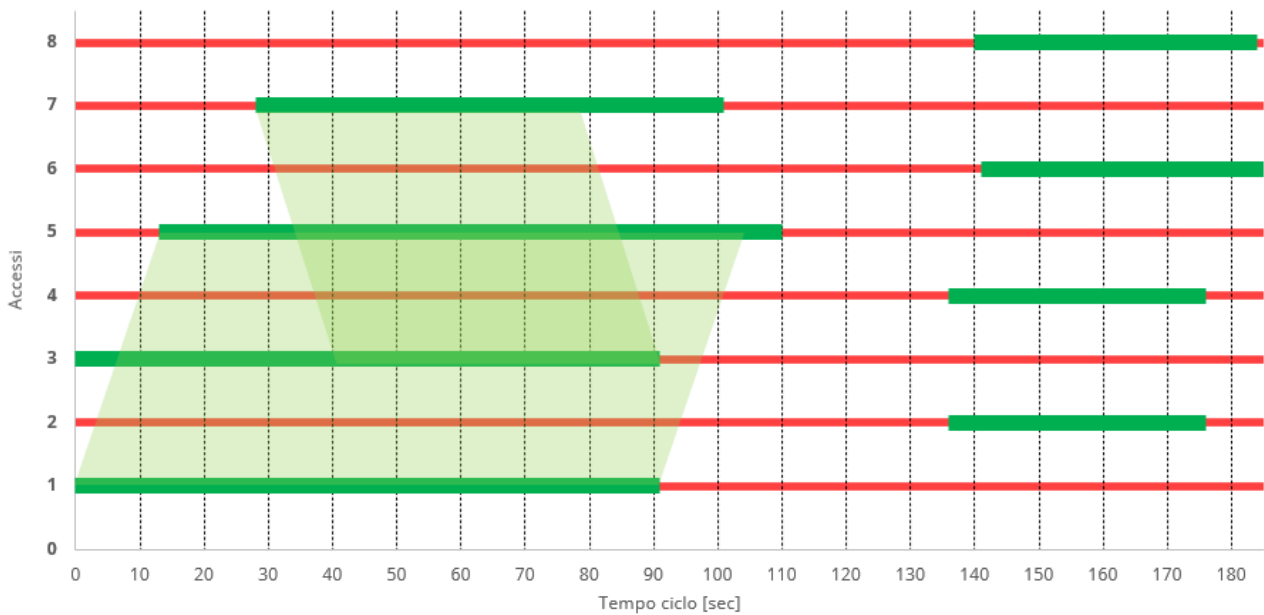


Figura 88. Diagramma delle fasi dello scenario stato di fatto.

Da un'analisi statistica eseguita con R si evince come la distribuzione delle capacità sia di tipo log-normale esattamente come la distribuzione della maggior parte dei dati di input (tempi di percorrenza ed accessi principali).

```

      N   Mean   SD Median   Min   Max
Cap_Int1 40000 1.7988 1.6736 1.1898 0.0933 12.2179
Cap_Int2 40000 0.6541 0.7402 0.4242 0.0552  8.9103

```

Questo primo scenario è stato utilizzato per una duplice finalità: validare il problema di ottimizzazione con l'introduzione di variabili aleatorie come il tempo di percorrenza e i flussi e per osservare le capacità con lo schema semaforico attualmente in uso.

Tabella 8 – Risultato del modello con scenario dello stato di fatto

Reale (100 campioni)	C1	0.68004
	C2	0.25679
	Banda	154
	FO	24.768

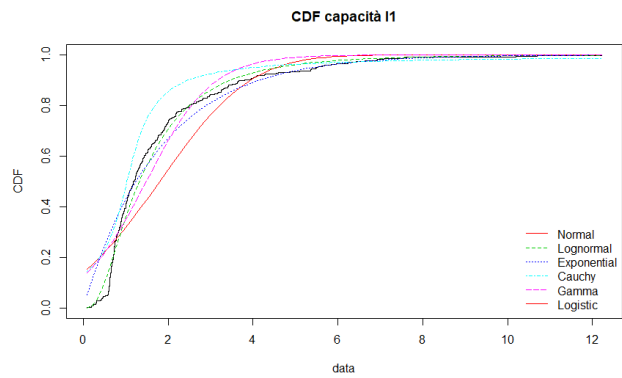
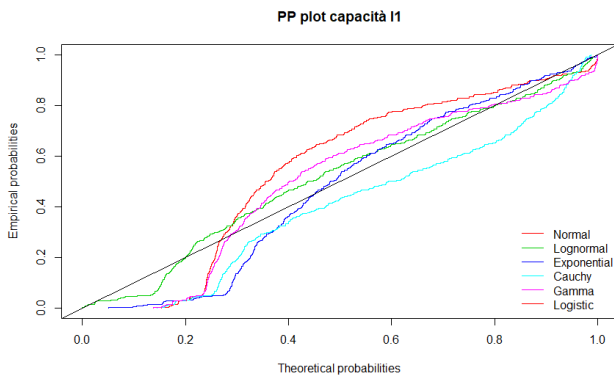
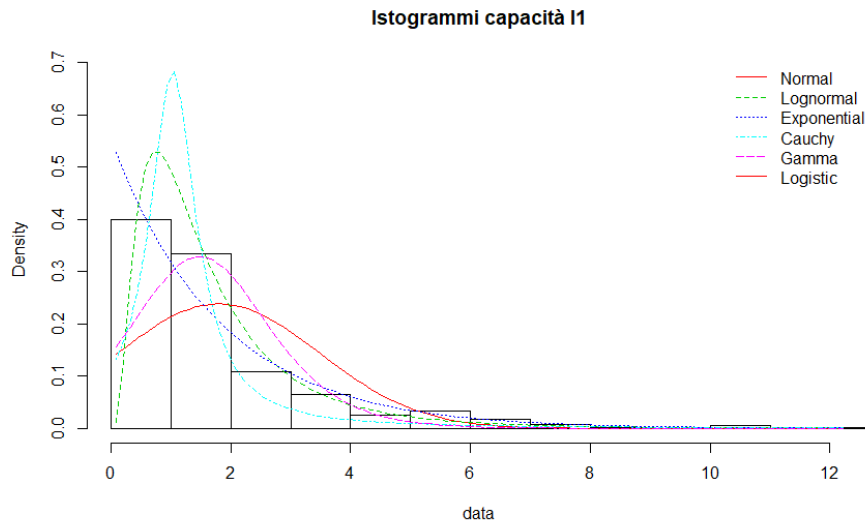
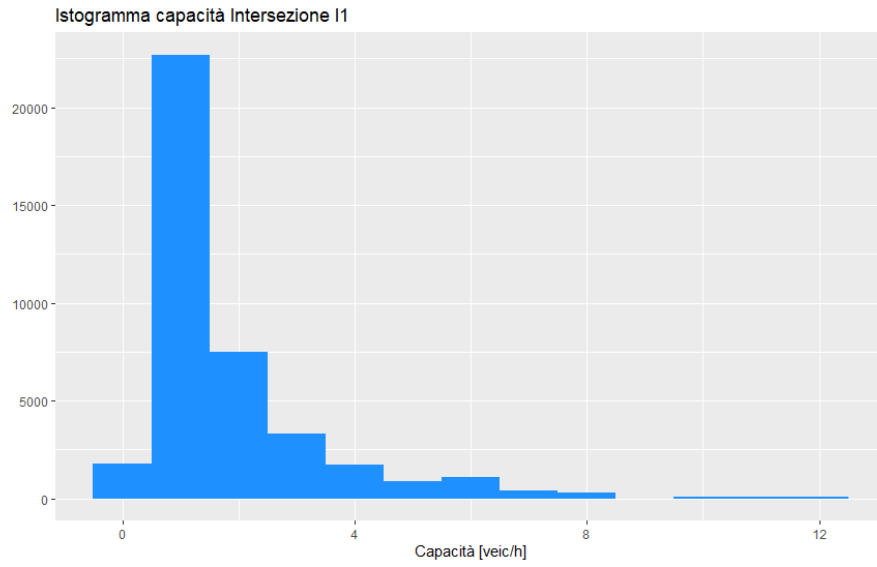


Figura 89. Analisi statistica dello scenario stato di fatto dell'intersezione 1.

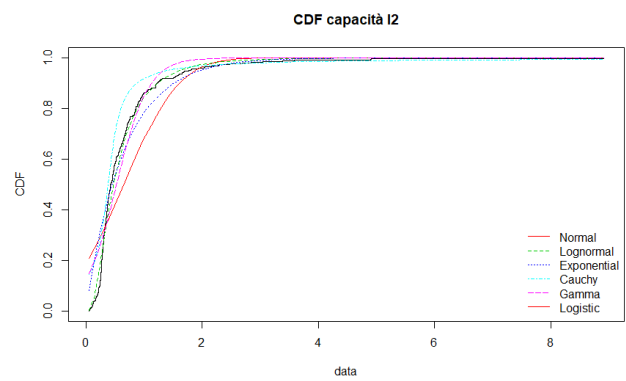
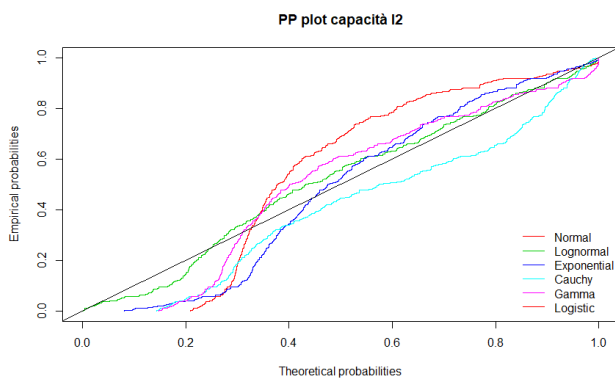
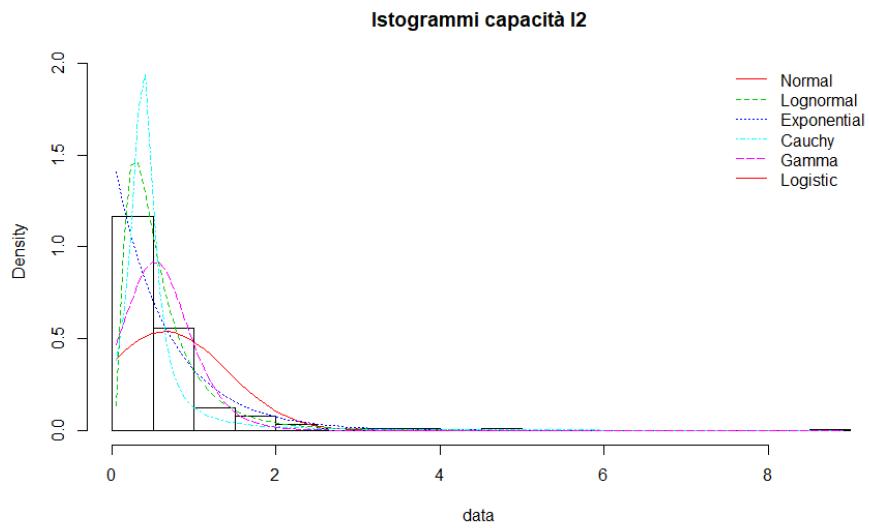
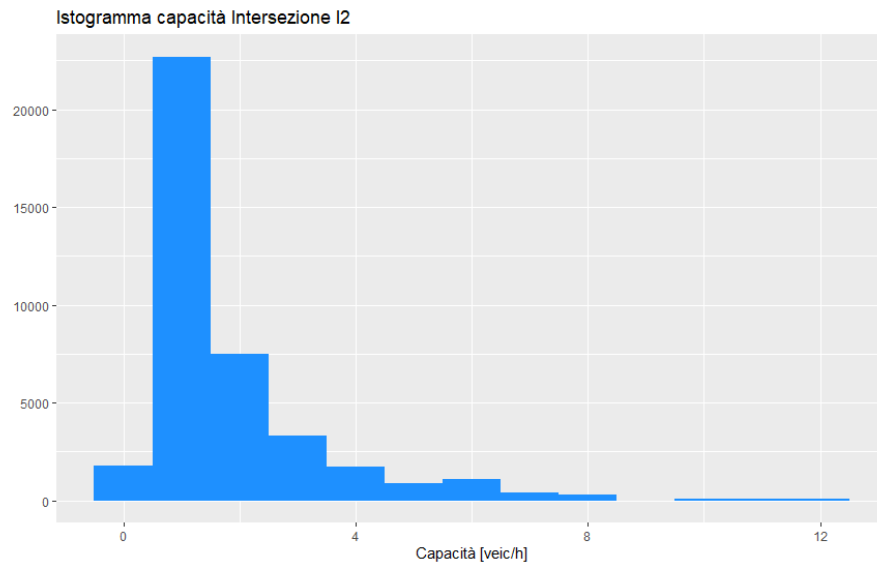


Figura 90. Analisi statistica dello scenario stato di fatto dell'intersezione 2.

4.8.2. Scenario 1: ottimizzazione

Il secondo scenario è quello definito come ottimo con i 100 campioni di tempo di percorrenza nelle due direzioni da coordinare (da 1 a 5 e da 7 a 3) e dei flussi per ogni accesso, creato secondo quanto descritto nel paragrafo della validazione statistica dei dati.

Il risultato dell'ottimizzazione sono 10.000 campioni (100 tempi di percorrenza x 100 campioni di flusso) per ogni accesso con indicazione dell'esatta sequenza delle fasi [inizio] e [fine] con rispettivi valori di banda e capacità delle singole intersezioni.

Rispetto al caso reale si ottiene un miglioramento della funzione obiettivo di circa il 4,5%, ma soprattutto un netto incremento della capacità medie della prima intersezione che risulta più critica.

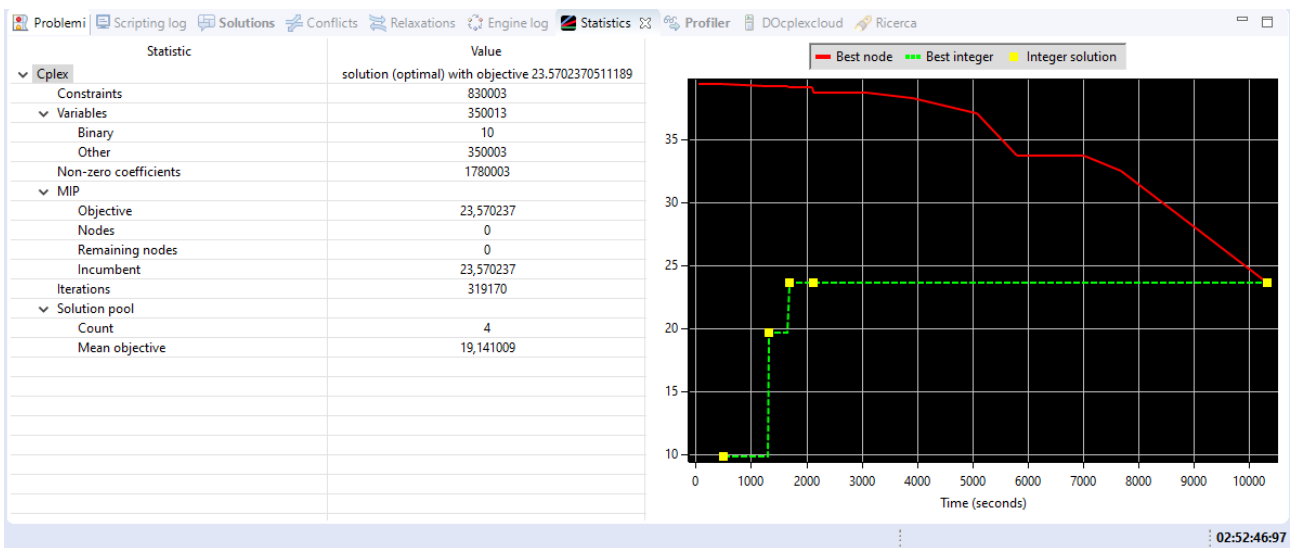


Figura 91. Risultato del modello applicato allo scenario 1 (ottimizzato)

Tabella 9 – Risultato del modello con scenario dello stato di fatto

			Delta Sc0
Ottimo (100 campioni)	C1	0.80423	18.2%
	C2	0.20477	-20.3%
	Banda	135.59	-12.0%
	F0	23.6467	-4.5%

Dall'analisi della sequenza delle fasi, si dimostra come il modello ottimizza non solo la durata dei verdi di ciascuna fase ma realizza anche una sequenza delle fasi differente. Il coordinamento viene proposto alla fine del ciclo e viene assegnato un tempo di verde minimo a quasi tutte le correnti secondarie.

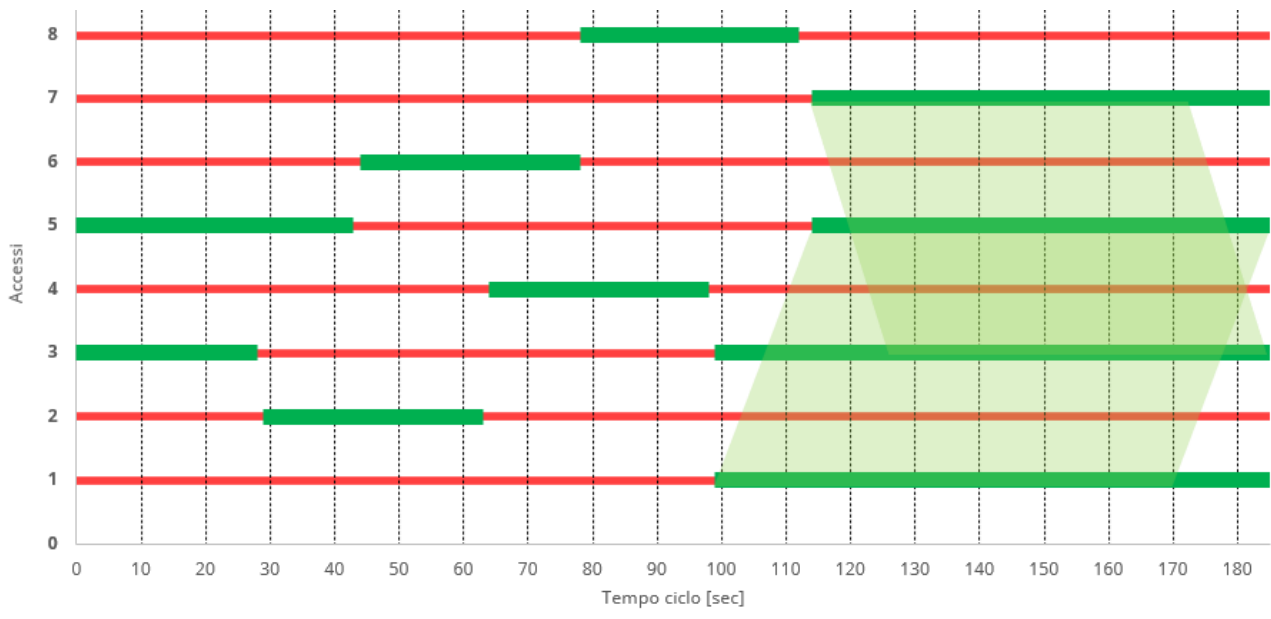
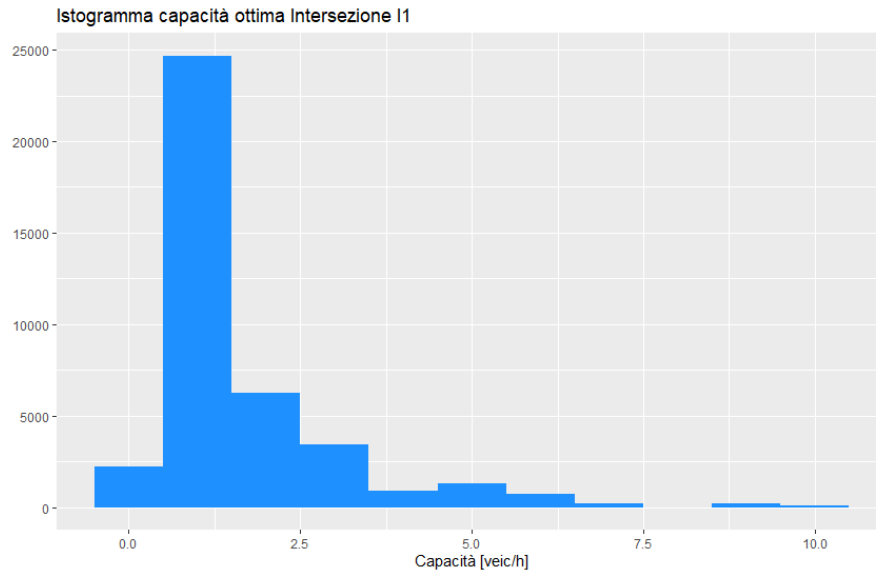
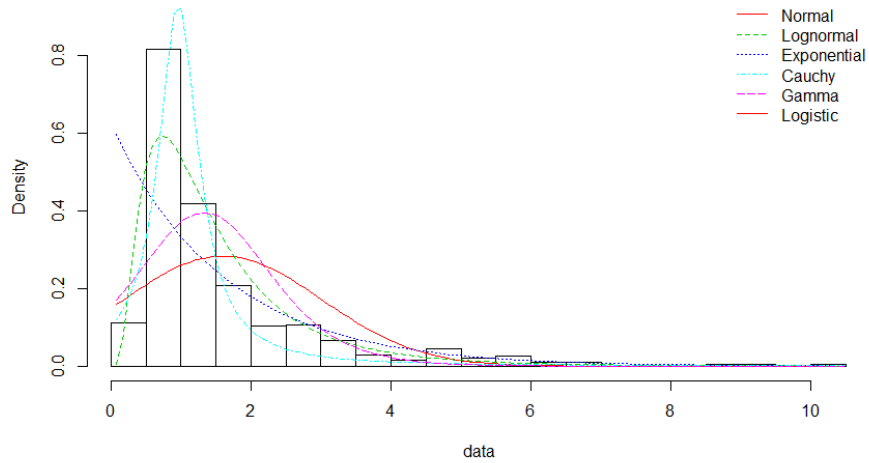


Figura 92. Diagramma delle fasi dello scenario ottimizzato.

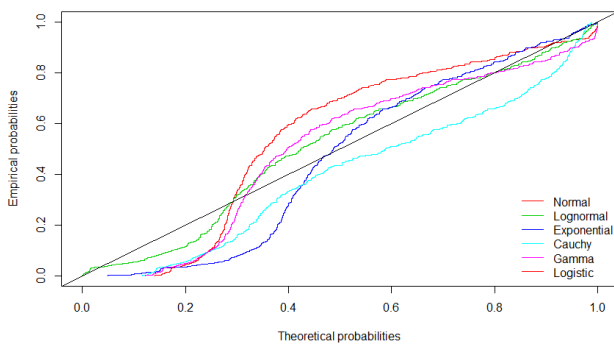
	N	Mean	SD	Median	Min	Max	NA's	N.Total
Ott_C1	40000	1.5955	1.4073	1.0650	0.0799	10.4725	0	40000
Ott_C2	40000	0.5085	0.5141	0.3790	0.0377	6.0752	0	40000
TotBanda	80000	134.8095	23.8476	137.3017	69.2069	181.7286	0	80000



Istogrammi capacità ottima I1



PP plot ottima I1



CDF ottima I1

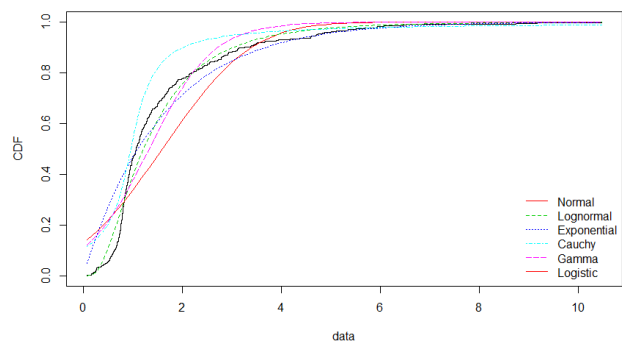
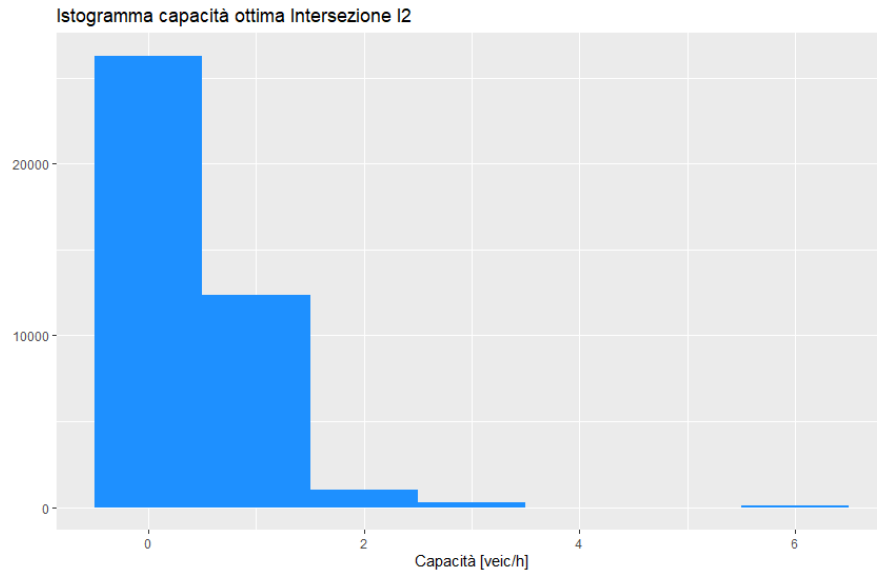
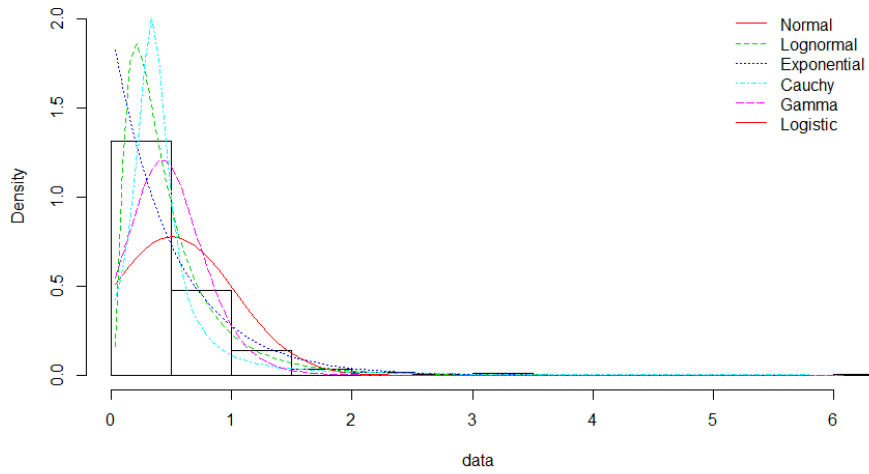


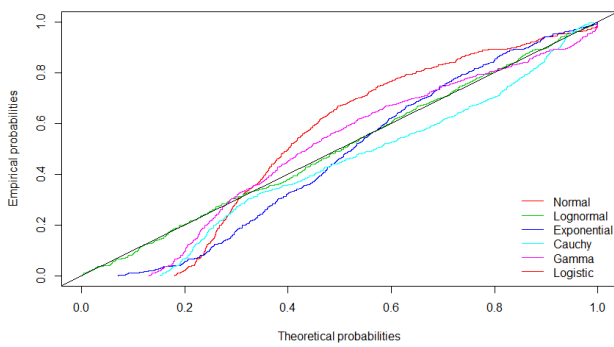
Figura 93. Analisi statistica dello scenario ottimizzato dell'intersezione 1.



Istogrammi capacità ottima I2



PP plot ottima I2



CDF ottima I2

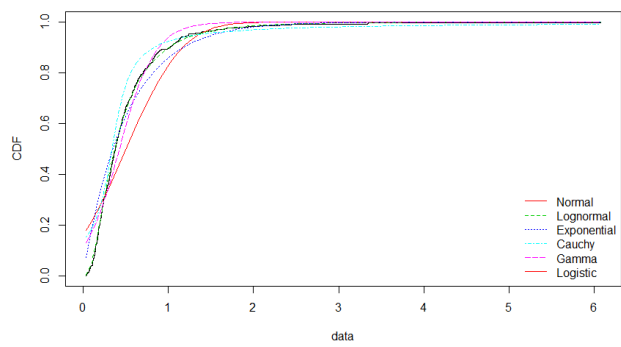


Figura 94. Analisi statistica dello scenario ottimizzato dell'intersezione 2.

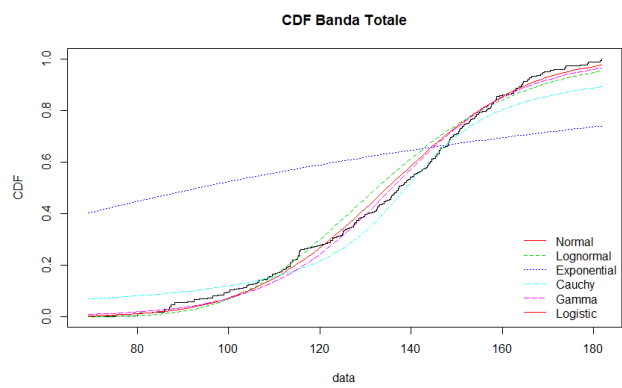
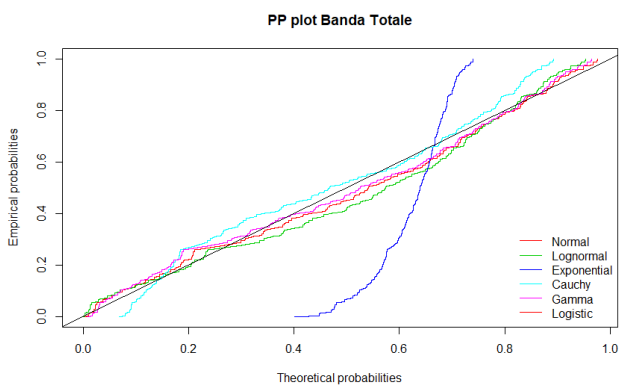
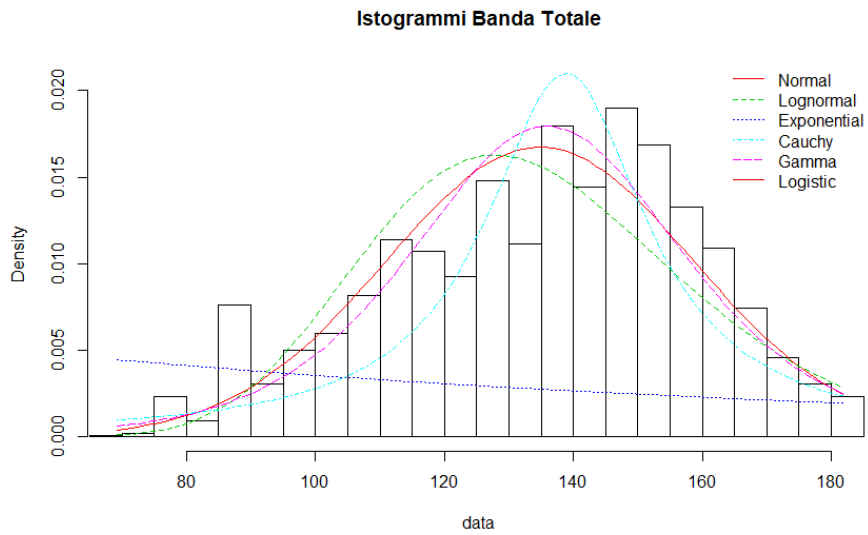
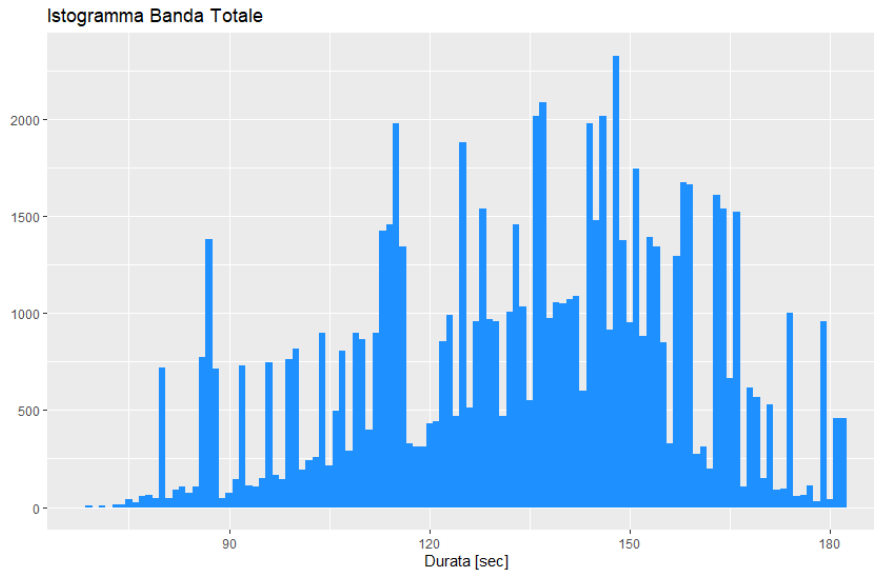


Figura 95. Analisi statistica dello scenario ottimizzato relativo alla banda.

4.8.3. Scenario 2: variazione della sequenza delle fasi

Al fine di comprendere meglio la capacità di ottimizzazione del sistema, si è proceduto con una terza simulazione dando la possibilità al modello di ottimizzare anche la sequenza delle fasi. In questo caso è possibile far variare, oltre che la durata, anche la sequenza delle fasi tenendo fissa la matrice di incompatibilità. Si dà la libertà al modello di ottimizzare per ogni campione di tempo di percorrenza (*i in tpvar*) e per ogni campione di flusso (*k in fvar*) l'ordine delle fasi.

È evidente da subito che tale comportamento nella realtà non è applicabile, in quanto genererebbe conflittualità nelle intersezioni, in quanto gli utenti - soprattutto quelli pendolari - sarebbero destabilizzati da sequenze di fasi sempre variabili. Anche l'installazione nella realtà risulterebbe complessa, in quanto gli impianti dovrebbero non solo acquisire in tempo reale le informazioni dei flussi e dei tempi di percorrenza in quell'istante, ma il software del regolatore semaforico dovrebbe anche avere un risolutore matematico al suo interno.

Lo script è stato modificato introducendo nella matrice omega la variabilità dei tempi di percorrenza e dei flussi.

```
forall(i in tpvar, l,j in flow, k in fvar: l>j && M[l][j] == 1)
{
  Fine[l][i][k] <= Inizio[j][i][k] + Tc*omega[<l,j>][i][k];
  Fine[j][i][k] <= Inizio[l][i][k] + Tc*(1-omega[<l,j>][i][k]);
}
```

Il risultato in termini numerici è un'ottimizzazione non migliore della precedente e quindi nemmeno interessante da applicare nella realtà.

Tabella 10 – Risultato del modello con scenario dello stato di fatto

			Delta Sc0
Ottimo (100 campioni)	C1	0.77265	13.6%
	C2	0.22197	-13.6%
	Banda	142.14	-7.7%
	F0	24.1602	-2.5%

5. Conclusioni

La ricerca condotta ha messo in evidenza le potenzialità di diversi innovativi metodi per il monitoraggio avanzato delle reti di trasporto. Grazie alla possibilità di analisi con tecniche di computer vision è stata dimostrata la quantità e la bontà di messa a punto di set di dati molto dettagliati con possibilità di calcolo molto approfondito dai quali sono state derivate le distribuzioni campionarie per la rappresentazione delle aleatorietà del sistema. Una seconda tecnica è stata quella per il calcolo dell'area di influenza delle intersezioni oggetto di studio: l'utilizzo di *runtime* di specifiche API messe a disposizione da TomTom®, hanno permesso di calcolare con dettaglio l'area di influenza e di generare una matrice o/d d'area con notevole correlazione con i volumi di traffico reali. Infine, l'utilizzo di un modello di ottimizzazione stocastica ha permesso di ottimizzare la sequenza, la durata e il coordinamento delle intersezioni oggetto di studio.

Tutto il lavoro è stato svolto mantenendo sempre un forte contatto con la realtà dell'intersezione e la fattibilità tecnica della soluzione trovata.

Possibili scenari futuri sono l'applicazione di ulteriori due tecniche innovative di analisi e di monitoraggio dei sistemi di trasporto: l'utilizzo di immagini satellitari con GSD (*Ground Sample Distance*) inferiori a 0,5 m per il riconoscimento delle densità veicolari per arco ed integrazione di API per il calcolo delle velocità medie di percorrenza, con relativa ricostruzione dei flussi di traffico.

Un secondo scenario è l'utilizzo di algoritmi di *machine learning* per la previsione del traffico. Un nuovo approccio basato sui dati potrebbe prevedere le condizioni del traffico stimando lo stato dai dati di traffico storici, senza la necessità di "spiegare" al modello complesse dinamiche di rete intrinseche basate sui meccanismi del flusso di traffico.

In generale il presente lavoro vuole dimostrare come metodi innovativi per monitorare ed analizzare il traffico sono possibili e di reale accessibilità; è necessario però che i professionisti incaricati lo propongano ai propri committenti.

Per quanto concerne i risultati ottenuti appaiono interessanti in quanto, grazie alla variabilità indotta dalla stocasticità degli eventi, è possibile simulare numerose combinazioni delle principali variabili della progettazione degli impianti semaforici coordinati come il tempo di percorrenza e i flussi. È evidente come, rispetto alla pratica della progettazione ordinaria o della fasatura manuale, con il metodo proposto è possibile trovare la soluzione di ottimo che vada bene nelle differenti combinazioni delle variabili di progetto. I risultati ottenuti con la simulazione permettono di ottenere un miglioramento delle capacità e della banda e non prevedono grandi modifiche alla sequenza delle fasi, aspetto che potrebbe generare confusione nell'utenza. Il programma potrebbe essere facilmente implementato con un risolutore open source (per es. SciPy, una libreria Python) per migliorare facilmente la progettazione in campo.

6. Allegati

6.1. Script di R

Si riporta lo script di R utilizzato per il paragrafo della validazione statistica.

```
library(fitdistrplus)
library(ggplot2)
library(readxl)
library(pastecs)
library(EnvStats)
library(truncdist)

data_tp <- read_excel("Z:/00 UNIGE/STUDENTE/Dottorato/TESI/export/data_tp.xlsx",
                     sheet = "data")
flussi <- read_excel("Z:/00 UNIGE/STUDENTE/Dottorato/TESI/export/flussi.xlsx")
View(data_tp)
View(flussi)
ftp1norm <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"norm")
ftp1lnorm <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"lnorm")
ftp1exp <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"exp")
ftp1cauchy <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"cauchy")
ftp1gamma <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"gamma")
ftp1logis <- fitdist(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0],
"logis")
plot.legend <- c("Normal", "Lognormal", "Exponential", "Cauchy", "Gamma", "Logistic")
denscomp(list(ftp1norm, ftp1lnorm, ftp1exp, ftp1cauchy, ftp1logis), legendtext =
plot.legend, main = "Istogrammi tempo percorrenza k1-k5")
ppcomp(list(ftp1norm, ftp1lnorm, ftp1exp, ftp1cauchy, ftp1logis), legendtext =
plot.legend, main = "PP plot tempo percorrenza k1-k5")
cdfcomp(list(ftp1norm, ftp1lnorm, ftp1exp, ftp1cauchy, ftp1logis), legendtext =
plot.legend, main = "CDF tempo percorrenza k1-k5")
qplot(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0], geom="histogram"
, binwidth=5, main="Istogramma tempo di percorrenza k1-k5", xlab="Tempo di percorrenza
[sec]", fill=I("dodgerblue1"))

> summary(ftp1norm)
Fitting of the distribution ' norm ' by maximum likelihood
Parameters :
      estimate Std. Error
mean 50.27872  0.6399912
sd   24.28596  0.4525421
Loglikelihood: -6636.725  AIC: 13277.45  BIC: 13288
Correlation matrix:
      mean sd
mean   1  0
sd     0  1
> summary(ftp1lnorm)
Fitting of the distribution ' lnorm ' by maximum likelihood
```

```

Parameters :
      estimate Std. Error
meanlog 3.8119619 0.011926776
sdlog 0.4525893 0.008433319
Loglikelihood: -6390.908 AIC: 12785.82 BIC: 12796.36
Correlation matrix:
      meanlog sdlog
meanlog 1 0
sdlog 0 1
> summary(ftp1exp)
Fitting of the distribution ' exp ' by maximum likelihood
Parameters :
      estimate Std. Error
rate 0.01988913 0.0005227957
Loglikelihood: -7081.318 AIC: 14164.64 BIC: 14169.91
> summary(ftp1cauchy)
Fitting of the distribution ' cauchy ' by maximum likelihood
Parameters :
      estimate Std. Error
location 41.26251 0.5932859
scale 12.99177 0.4361558
Loglikelihood: -6784.042 AIC: 13572.08 BIC: 13582.63
Correlation matrix:
      location scale
location 1.0000000 0.2254822
scale 0.2254822 1.0000000
> summary(ftp1gamma)
Fitting of the distribution ' gamma ' by maximum likelihood
Parameters :
      estimate Std. Error
shape 4.8937552 0.176400361
rate 0.0973348 0.003694535
Loglikelihood: -6437.958 AIC: 12879.92 BIC: 12890.46
Correlation matrix:
      shape rate
shape 1.0000000 0.9494874
rate 0.9494874 1.0000000
> summary(ftp1logis)
Fitting of the distribution ' logis ' by maximum likelihood
Parameters :
      estimate Std. Error
location 47.13940 0.6152218
scale 13.41576 0.2971240
Loglikelihood: -6623.281 AIC: 13250.56 BIC: 13261.11
Correlation matrix:
      location scale
location 1.0000000 0.1066247
scale 0.1066247 1.0000000
#Generazione campioni casuali distrb. LogNormale e Uniforme

#Calcolo errore medio
campione=100
Errstimak1<-((mean(stimak1<-rlnorm(campione,mean_tp1,sd_tp1))-
mean(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0]))/mean(data_tp$k1
[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0])*100

```

```

Errstimak7<- (mean(stimak7<-rlnorm(campione,mean_tp7,sd_tp7))-
mean(data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)][data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)]>0]))/mean(data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)][data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)]>0])*100
Errstimaf1<- (mean(stimaf1<-
runif(campione,min((flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0))),max(
(flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0]))))-
mean(flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0]))/mean(flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0])*100
Errstimaf2<- (mean(stimaf2<-rlnorm(campione,mean_f2,sd_f2))-
mean(flussi$f2[!is.na(flussi$f2)][flussi$f2[!is.na(flussi$f2)]>0]))/mean(flussi$f2[!is.na(flussi$f2)][flussi$f2[!is.na(flussi$f2)]>0])*100
Errstimaf3<- (mean(stimaf3<-
runif(campione,min((flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0))),max(
(flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0]))))-
mean(flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0]))/mean(flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0])*100
Errstimaf4<- (mean(stimaf4<-rlnorm(campione,mean_f4,sd_f4))-
mean(flussi$f4[!is.na(flussi$f4)][flussi$f4[!is.na(flussi$f4)]>0]))/mean(flussi$f4[!is.na(flussi$f4)][flussi$f4[!is.na(flussi$f4)]>0])*100
Errstimaf5<- (mean(stimaf5<-
runif(campione,min((flussi$f5[!is.na(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0))),max(
(flussi$f5[!is.na(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0]))))-
mean(flussi$f5[!is.na(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0]))/mean(flussi$f5[!is.na(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0])*100
Errstimaf6<- (mean(stimaf6<-rlnorm(campione,mean_f6,sd_f6))-
mean(flussi$f6[!is.na(flussi$f6)][flussi$f6[!is.na(flussi$f6)]>0]))/mean(flussi$f6[!is.na(flussi$f6)][flussi$f6[!is.na(flussi$f6)]>0])*100
Errstimaf7<- (mean(stimaf7<-
runif(campione,min((flussi$f7[!is.na(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0))),max(
(flussi$f7[!is.na(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0]))))-
mean(flussi$f7[!is.na(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0]))/mean(flussi$f7[!is.na(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0])*100
Errstimaf8<- (mean(stimaf8<-rlnorm(campione,mean_f8,sd_f8))-
mean(flussi$f8[!is.na(flussi$f8)][flussi$f8[!is.na(flussi$f8)]>0]))/mean(flussi$f8[!is.na(flussi$f8)][flussi$f8[!is.na(flussi$f8)]>0])*100
mean(Errmed<-
(c(Errstimak1,Errstimak7,Errstimaf1,Errstimaf2,Errstimaf3,Errstimaf4,Errstimaf5,Errstimaf6,Errstimaf7,Errstimaf8)))

```

#Calcolo errore medio della varianza

```

ErrstimaVARk1<- (var(stimak1)-
var(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0]))/var(data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)][data_tp$k1[!is.na(data_tp$k1)]>0])*100
ErrstimaVARk7<- (var(stimak7)-
var(data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)][data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)]>0]))/var(data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)][data_tp$k7[!is.na(data_tp$k7)]>0])*100
ErrstimaVARf1<- (var(stimaf1)-
var(flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0]))/var(flussi$f1[!is.na(flussi$f1)][flussi$f1[!is.na(flussi$f1)]>0])*100
ErrstimaVARf2<- (var(stimaf2)-
var(flussi$f2[!is.na(flussi$f2)][flussi$f2[!is.na(flussi$f2)]>0]))/var(flussi$f2[!is.na(flussi$f2)][flussi$f2[!is.na(flussi$f2)]>0])*100
ErrstimaVARf3<- (var(stimaf3)-
var(flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0]))/var(flussi$f3[!is.na(flussi$f3)][flussi$f3[!is.na(flussi$f3)]>0])*100

```

```

ErrstimaVARf4<- (var(stimaf4)-
var(flussi$f4[!is.na(flussi$f4)][flussi$f4[!is.na(flussi$f4)]>0]))/var(flussi$f4[!is.na
(flussi$f4)][flussi$f4[!is.na(flussi$f4)]>0])*100
ErrstimaVARf5<- (var(stimaf5)-
var(flussi$f5[!is.na(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0]))/var(flussi$f5[!is.na
(flussi$f5)][flussi$f5[!is.na(flussi$f5)]>0])*100
ErrstimaVARf6<- (var(stimaf6)-
var(flussi$f6[!is.na(flussi$f6)][flussi$f6[!is.na(flussi$f6)]>0]))/var(flussi$f6[!is.na
(flussi$f6)][flussi$f6[!is.na(flussi$f6)]>0])*100
ErrstimaVARf7<- (var(stimaf7)-
var(flussi$f7[!is.na(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0]))/var(flussi$f7[!is.na
(flussi$f7)][flussi$f7[!is.na(flussi$f7)]>0])*100
ErrstimaVARf8<- (var(stimaf8)-
var(flussi$f8[!is.na(flussi$f8)][flussi$f8[!is.na(flussi$f8)]>0]))/var(flussi$f8[!is.na
(flussi$f8)][flussi$f8[!is.na(flussi$f8)]>0])*100
mean(ErrVARmed<-
(c(ErrstimaVARK1,ErrstimaVARK7,ErrstimaVARf1,ErrstimaVARf2,ErrstimaVARf3,ErrstimaVARf4,
ErrstimaVARf5,ErrstimaVARf6,ErrstimaVARf7,ErrstimaVARf8)))
ErrVARmed

```

#Istogrammi dei campioni stimati

```

qplot(stimak1,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima tempo di percorrenza
k1-k5",xlab="Tempo di percorrenza [sec]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimak7,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima tempo di percorrenza
k7-k3",xlab="Tempo di percorrenza [sec]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf1,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f1",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf2,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f2",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf3,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f3",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf4,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f4",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf5,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f5",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf6,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f6",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf7,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f7",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))
qplot(stimaf8,geom="histogram",binwidth=7,main="Istogramma stima flusso f8",xlab="Flusso
[veic/h]", fill=I("dodgerblue1"))

```

```
> Errmed
```

```
[1] 7.3277240 -0.1676064 2.3607328 -10.4447581 -1.5249162 9.2287893 8.9600431
3.0264724 -1.1155169 9.3001832
```

```
>mean(Errmed<-
```

```
(c(Errstimak1,Errstimak7,Errstimaf1,Errstimaf2,Errstimaf3,Errstimaf4,Errstimaf5,Errstimaf6,Errstimaf7,Errstimaf8)))
```

```
[1] 2.695115
```

```
> ErrVARmed
```

```
[1] 22.012449 -42.228508 6.565186 -21.542825 30.462951 135.655814 48.735756 80.546664
30.792750 10.980488
```

```
>mean(ErrVARmed<-
```

```
(c(ErrstimaVARK1,ErrstimaVARK7,ErrstimaVARf1,ErrstimaVARf2,ErrstimaVARf3,ErrstimaVARf4,ErrstimaVARf5,ErrstimaVARf6,ErrstimaVARf7,ErrstimaVARf8)))
```

```
[1] 30.19807
```


6.2. Script di CPLEX

Si riporta lo script di CPLEX utilizzato per il paragrafo del modello di ottimizzazione stocastica.

```
//Definizione costanti
float Tc=...;
int giallo=...;
int tuttorosso=...;
int tempoperso=giallo+tutorosso;

//Definizione flussi e saturazione
int totflussi = ...;
range flow = 1..totflussi;
float sat [flow] = ...;

//Introduzione aleatorietà tempo di percorrenza tp
int tottp = ...;
range tpvar = 1..tottp;
float tp1[tpvar] = ...;
float tp7[tpvar] = ...;

//Introduzione aleatorietà flussi f
int totf = ...;
range fvar = 1..totf;
float flussi[flow][fvar] = ...;

//Definizione matrice di incompatibilità
int M[flow][flow] = ...;
dvar boolean omega[incomp];
tuple Pair{
    key int f1;
    key int f2;
};
{Pair} incomp = {<l,j> | l,j in flow: l>j && M[l][j] == 1};//

//Definizione dipendenzenze
dvar float Inizio[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ Fine[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ VerdeEfficace[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ Capacita[flow][tpvar][fvar];
dvar float+ C1[tpvar][fvar];
dvar float+ C2[tpvar][fvar];
dvar float+ TotBanda[tpvar][fvar];

//Definizione pesi e F.O. TotBanda e capacità media;
float alfa = .1;//pesoTotBanda
float beta = 1;//pesoCapacità
maximize alfa*B_media + 10*beta*(C1_media + C2_media);
C1_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) C1[i][k];
C2_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) C2[i][k];
B_media == 1.0/(tottp*totf)*sum(i in tpvar, k in fvar) TotBanda[i][k];

//Calcolo della capacità per singole intersezioni
subject to
{
forall (i in tpvar, k in fvar)
{
forall (j in 1..4)
```

```

    C1[i][k] <= Capacita[j][i][k];
forall (j in 5..8)
    C2[i][k] <= Capacita[j][i][k];
}

// Vincolo sulla durata minima del VerdeEfficace
forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
    Veff_min: VerdeEfficace[j][i][k] >= (Tc*(flussi[j][k]/sat[j]));

//Vincolo della banda
forall (i in tpvar, k in fvar)
{
    Fine[5][i][k] >= Fine[1][i][k] + tp1[i];
    Fine[3][i][k] >= Fine[7][i][k] + tp7[i];
}

forall (i in tpvar, k in fvar)
{
Inizio[5][i][k] <= (Inizio[1][i][k]) + tp1[i];
    Fine[1][i][k] - Inizio[1][i][k] <= Fine[5][i][k] - Inizio[5][i][k];
    Inizio[3][i][k] <= (Inizio[7][i][k]) + tp7[i];
    Fine[7][i][k] - Inizio[7][i][k] <= Fine[3][i][k] - Inizio[3][i][k];
}

//Calcolo della banda
forall (i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_banda: TotBanda[i][k] == VerdeEfficace[1][i][k] + VerdeEfficace[7][i][k];

//Definizione della sequenza delle fasi

forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_Verde: VerdeEfficace[j][i][k] == Fine[j][i][k] - Inizio[j][i][k] - tempoperso;

forall (j in flow,i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_Fine: Fine[j][i][k] <= Tc;

forall(j in flow,i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_cap: Capacita[j][i][k] ==
(sat[j]*VerdeEfficace[j][i][k])/(Tc*(flussi[j][k]));

//Definizione dell'incompatibilità delle fasi
forall(i in tpvar, l,j in flow, k in fvar: l>j && M[l][j] == 1)
{
    Fine[l][i][k] <= Inizio[j][i][k] + Tc*omega[<l,j>];
    Fine[j][i][k] <= Inizio[l][i][k] + Tc*(1-omega[<l,j>]);
}

forall(j in flow,i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_Inizio: -Tc <= Inizio[j][i][k] <= Tc;

forall (j in flow, i in tpvar, k in fvar)
    Vinc_Inizio_Fine: Fine[j][i][k] >= Inizio [j][i][k];

//Salvataggio file su csv
execute{
    var ofile = new IloOplOutputFile("results.csv");
    ofile.write("Flow;tpavr;fvar;Inizio;Fine;TotBanda;Veff;Capacità \n");
    for(var i in thisOplModel.flow)
        for(var k in thisOplModel.tpvar)

```

```
        for(var j in thisOplModel.fvar)
            ofile.write(i + ";" + k + ";" + j + ";" +
thisOplModel.Inizio[i][k][j] + ";" + thisOplModel.Fine[i][k][j] + ";" +
thisOplModel.TotBanda[k][j] + ";" + thisOplModel.VerdeEfficace[i][k][j] + ";" +
thisOplModel.Capacita[i][k][j] + "\n");
    }
```

7. Indice delle figure

FIGURA 1. ESEMPIO DI CLASSIFICAZIONE VEICOLI SECONDO LA FHWA.	9
FIGURA 2. LIVELLI DI SERVIZIO PER UN'AUTOSTRADA (HCM 2010)	11
FIGURA 3. IL PRIMO DIAGRAMMA FONDAMENTALE PROPOSTO DA GREENSHIELD (GREENSHIELD B. D., 1935).	12
FIGURA 4. DIAGRAMMA FONDAMENTALE DEL TRAFFICO: RELAZIONI TRA VELOCITÀ, FLUSSO E DENSITÀ.	13
FIGURA 5. RAPPRESENTAZIONE DELLA MODALITÀ DI MONITORAGGIO.	14
FIGURA 6. GRAFICO DELLA LEGGE DI YERKES - DODSON SULLA RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ DI ATTENZIONE NEL TEMPO.	15
FIGURA 7. ESEMPIO DI FLUSSOGRAMMA PER UN'INTERSEZIONE A 4 RAMI	16
FIGURA 8. IMMAGINI CONTA COLPI ELETTRONICI	17
FIGURA 9. ESEMPIO DI SPIRE INDUTTIVE SU UN MANTO STRADALE	19
FIGURA 10. ESEMPIO DI INSTALLAZIONE DI TUBI PNEUMATICI.	19
FIGURA 11. ESEMPIO DI PRODOTTO VMI E INSTALLAZIONE SU MANTO STRADALE	20
FIGURA 12. ESEMPIO DI PRODOTTO RILEVATORE CON TECNICA RADAR.	22
FIGURA 13. ESEMPIO DI PRODOTTO WIM	23
FIGURA 14. ESEMPIO DI INSTALLAZIONE DI TELECAMERE PER IL MONITORAGGIO DEL TRAFFICO.	24
FIGURA 15. LA NUOVA FRONTIERA: VIDEO SATELLITARI.	25
FIGURA 16. ALCUNI ESEMPI PUBBLICATI SU VIMEO.	31
FIGURA 17. ESEMPI DI IMMAGINI PER L'APPRENDIMENTO DEL MODELLO.	32
FIGURA 18. DATAFROMSKY ANNOTATION TOOL: LO STRUMENTO DI EDITING VETTORIALE DELLE CORSIE, SPIRE E NODI DI TRAFFICO VIRTUALI.	33
FIGURA 19. SCHERMATA DEL SOFTWARE DATAFROMSKY TRAJECTORY EXTRACTOR CON CATTURA DEI VEICOLI.	34
FIGURA 20. SCHERMATA DEL SOFTWARE DATAFROMSKY TRAJECTORY EXTRACTOR VALORI DI PROBABILITÀ DI CATTURA DEI VEICOLI.	34
FIGURA 21. DATAFROMSKY VIEWER: TUTTI I DATI IN TEMPO REALE VEICOLO PER VEICOLO.	35
FIGURA 22. ESEMPIO DELL'INSIEME DEI DATI FCD DELLA REGIONE LOMBARDIA	37
FIGURA 23. FASI FUNZIONALI PER LA COSTRUZIONE DEL MODELLO DI RETE DI UN SISTEMA DI TRASPORTO BIMODALE	40
FIGURA 24. ESEMPIO DELLA FUNZIONE DI COSTO PIÙ COMUNE: <i>BUREAU OF PUBLIC ROADS</i> - BRP	42
FIGURA 25. RELAZIONE TRA SPOSTAMENTI INTERNI ED ESTERNI	43
FIGURA 26. SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO A 4 STADI	46
FIGURA 27. SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO DI <i>CAR FOLLOWING</i> .	48
FIGURA 28. DEFINIZIONE DI GAP CRITICO E DEFINIZIONE DI FOLLOW-UP TIME	49
FIGURA 29. ESEMPIO DI ASSEGNAZIONE ALL'EQUILIBRIO DELLA DOMANDA	50
FIGURA 30. SCHEMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI MODELLAZIONE CLASSICA	51
FIGURA 31. ESEMPIO DI ALGORITMO DI ROUTING CON UTILIZZO DATI FCD (TOMTOM)	52
FIGURA 32. SCHEMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI MODELLAZIONE PROPOSTO	53
FIGURA 33. ESEMPIO DI CENTROIDI COINCIDENTI CON IL CENTRO ABITATO	53
FIGURA 34. ESEMPIO DI CENTROIDI NON COINCIDENTI CON IL CENTRO ABITATO	54
FIGURA 35. FLUSSO VEICOLARE A UN GENERICO ACCESSO K DI UN'INTERSEZIONE.	57
FIGURA 36. IMMAGINE SATELLITARE DELL'AREA DI STUDIO.	65
FIGURA 37. ESTRATTO DEI RITARDI NEI TEMPI DI PERCORRENZA (ANNO 2017 – FONTE GOOGLE MAPS®)	66
FIGURA 38. PLANIMETRIA DI INSIEME DEGLI INTERVENTI DI INTERRAMENTO S.P. 32 NEL COMUNE DI AROSIO	66
FIGURA 39. ZONIZZAZIONE DELL'AREA DI STUDIO	68
FIGURA 40. CALCOLO DEI CENTROIDI PER CIASCUNA ZONA	70
FIGURA 41. VISUALIZZAZIONE DI TUTTI I PERCORSI (ORIGINE E DESTINAZIONE) DELLA PROVINCIA DI COMO	71
FIGURA 42. VISUALIZZAZIONE DEI FLUSSI ARCO (VEICOLI/ORA) ASSEGNATI NEL COMPLESSO.	72
FIGURA 43. VISUALIZZAZIONE DEI FLUSSI ARCO (VEICOLI/ORA) ASSEGNATI NELL'AREA IN ESAME.	73
FIGURA 44. VISUALIZZAZIONE DI TUTTI I PERCORSI (ORIGINE E DESTINAZIONE) DELL'AREA DI PROGETTO.	74
FIGURA 45. NOTAM DI ENAV	76

FIGURA 46. ESTRATTO DEL MOMENTO PRIMA DEL DECOLLO.	77
FIGURA 47. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.	77
FIGURA 48. SCHEMA DEL MONITORAGGIO ED IDENTIFICAZIONE DELLE MANOVRE E DEGLI ACCESSI.	78
FIGURA 49. DETTAGLIO DELLA RIPRESA VIDEO ORIGINALE.	78
FIGURA 50. INFORMAZIONI SUL VIDEO ELABORATO	79
FIGURA 51. STATISTICHE SUL VIDEO ELABORATO	79
FIGURA 52. FOTOGRAMMA ORIGINALE E POST ELABORATO CON IL SOFTWARE DATAFROMSKY.	80
FIGURA 53. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DELLE VELOCITÀ DI PERCORRENZA.	80
FIGURA 54. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DEI VEICOLI RILEVATI.	81
FIGURA 55. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DEL TEMPO DI STAZIONAMENTO.	81
FIGURA 56. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DELL'ACCELERAZIONE TANGENZIALE.	82
FIGURA 57. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DELL'ACCELERAZIONE LATERALE.	82
FIGURA 58. RAPPRESENTAZIONE DELLA DENSITÀ DELL'ACCELERAZIONE IN MODULO.	83
FIGURA 59. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 1$.	83
FIGURA 60. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 2$.	84
FIGURA 61. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 3$.	84
FIGURA 62. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 4$.	85
FIGURA 63. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 5$.	85
FIGURA 64. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 6$.	86
FIGURA 65. FLUSSOGRAMMA DELLE TRAIETTORIE DELL'ACCESSO $k = 7$.	86
FIGURA 66. MANOVRA DI INVERSIONE PERICOLOSA.	87
FIGURA 67. IDENTIFICAZIONE DELLE TRAIETTORIE ELIMINATE DEL PARCHEGGIO.	87
FIGURA 68. IDENTIFICAZIONE DELLE TRAIETTORIE ELIMINATE PERCHÉ NON RILEVANTI.	88
FIGURA 69. IDENTIFICAZIONE DELLE TRAIETTORIE INCOMPLETE.	88
FIGURA 70. RAPPRESENTAZIONE DEL DATA FRAME.	90
FIGURA 71. ANALISI STATISTICA DEL TEMPO DI PERCORRENZA TRA GLI ACCESSI $k = 1$ E $k = 5$.	92
FIGURA 72. ANALISI STATISTICA DEL TEMPO DI PERCORRENZA TRA GLI ACCESSI $k = 7$ E $k = 3$.	93
FIGURA 73. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 1$.	94
FIGURA 74. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 2$.	95
FIGURA 75. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 3$.	96
FIGURA 76. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 4$.	97
FIGURA 77. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 5$.	98
FIGURA 78. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 6$.	99
FIGURA 79. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 7$.	100
FIGURA 80. ANALISI STATISTICA DEI FLUSSI DELL'ACCESSO $k = 8$.	101
FIGURA 81. ISTOGRAMMI DEI CAMPIONI CREATI DEI TEMPI DI PERCORRENZA.	102
FIGURA 82. ISTOGRAMMI DEI CAMPIONI CREATI DEI FLUSSI DEGLI ACCESSI $k = 1 \div 4$.	102
FIGURA 83. ISTOGRAMMI DEI CAMPIONI CREATI DEI FLUSSI DEGLI ACCESSI $k = 5 \div 8$.	103
FIGURA 84. DEFINIZIONE DELL'HEADWAY E SATURAZIONE SECONDO HCM IN UN'INTERSEZIONE SEMAFORIZZATA.	104
FIGURA 85. RISULTATO DEL CALCOLO DEI VALORI DI HEADWAY PER OGNI ACCESSO CON DATAFROMSKY	105
FIGURA 86. RISULTATO DELLA RICERCA DELLA FUNZIONE OBIETTIVO.	110
FIGURA 87. RISULTATO DEL MODELLO APPLICATO ALLO SCENARIO 0 (STATO DI FATTO)	111
FIGURA 88. DIAGRAMMA DELLE FASI DELLO SCENARIO STATO DI FATTO.	111
FIGURA 89. ANALISI STATISTICA DELLO SCENARIO STATO DI FATTO DELL'INTERSEZIONE 1.	113
FIGURA 90. ANALISI STATISTICA DELLO SCENARIO STATO DI FATTO DELL'INTERSEZIONE 2.	114
FIGURA 91. RISULTATO DEL MODELLO APPLICATO ALLO SCENARIO 1 (OTTIMIZZATO)	115
FIGURA 92. DIAGRAMMA DELLE FASI DELLO SCENARIO OTTIMIZZATO.	116
FIGURA 93. ANALISI STATISTICA DELLO SCENARIO OTTIMIZZATO DELL'INTERSEZIONE 1.	117
FIGURA 94. ANALISI STATISTICA DELLO SCENARIO OTTIMIZZATO DELL'INTERSEZIONE 2.	118
FIGURA 95. ANALISI STATISTICA DELLO SCENARIO OTTIMIZZATO RELATIVO ALLA BANDA.	119

8. Bibliografia

- Abbafy J., *et al.*, Programmazione stocastica e applicazioni, Egea Tools, 2010
- Alfieri R., L'invasione dei droni. Il futuro è sopra di noi. Commento al nuovo regolamento Enac, Hoepli, 2015
- Allsop R.B., Delay minimizing settings for fixed time traffic signals at a single road junction, *Traffic Engineering & Control*, Vol.17 pp- 164-185, 1971
- Allsop R.B., SIGCAP: A computer program for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junction, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 17 pp.338-341, 1976
- Anuj P., A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Traffic Surveillance, 2008
- Apeltauer J., *et al.*, Automatic vehicle trajectory extraction for traffic analysis from aerial video data, *Photogrammetric Image Analysis High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, 2015
- Armitage Peter, *Statistica Medica*, Editore Feltrinelli, 1977
- Arsava. T., *et al.*, Arteria Traffic Signal Coordination Utilizing Vehicular Traffic Origin Destination Information. International Conference on Intelligent Transportation Systems, Quindao China pp. 2132-2137, 2014
- Astarita V., *et al.*, A new microsimulation model for the evaluation of traffic safety performances, University of Calabria, 2012
- Birge J.R., Louveaux F., *Introduction to stochastic programming*, Springer, 2011
- Blalock H. M., *Statistica per la ricerca sociale*, Il Mulino Editore, 1978
- Bonneson J., *et al.*, *Traffic signal operations handbook*, Federal Highway Administration, 2011
- Camus R., *et al.*, *Progettazione e verifica funzionale delle intersezioni semaforizzate*, Maggioli Editore, 2010
- Cantarella G.E., *Sistemi di trasporto: tecnica ed economia*, UTET Scienze Tecniche, 2007
- Cascetta E., *Modelli per i sistemi di trasporto - Teoria e applicazioni*, Utet, 2006
- Chandler R. E., *et al.*, *Traffic dynamics: studies in car following*, Research Staff General Motors Corporation Detroit Michigan Operations Research Vol. 6 No. 2 pp. 165-184, 1958
- Coifman B., *et al.*, *Roadway Traffic Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle*, 2003
- De Coensel B., Botteldoren D., *Traffic signal coordination: a measure to reduce the environmental impact of urban road traffic*, InterNoise, 2011
- De Coensel B., *et al.*, *Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions*, *Environmental Modelling & Software* Vol. 35 pp. 74-83, 2012
- Di Febbraro A., *et al.*, *Global Sensitivity Analysis of the Optimal Capacity of Intersections*, 19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town South Africa August 24-29, 2014

Di Febraro A., Sacco N., On Evaluating Traffic Lights Performance Sensitivity via Hybrid Systems Models, EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 2013

Parlamento Europeo, risoluzione (doc. A 2-154/88) sulla tutela del pedone e la carta europea dei diritti del pedone, 1988

Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto", Edizione 3, 2020

Federal Aviation Administration (FAA), Unmanned Aircraft Systems (UAS) into in the National Airspace System (NAS), 2012

Federal Highway Administration (FHWA), Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), 2009

Gartner N., *et. al.*, A multi-band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization, Journal of Transportation Research B vol. 25B n.1 pp. 55-74, 1991

Gartner N., *et. al.*, Optimization of traffic signal settings by mixed integer linear programming, Transportation Science vol.9 pp. 344-363, 1976

Gaudry M., Lassarre S., Structural road accident models, Pergamon Edition, 2003

Ghiani G., Musmanno R., Modelli e metodi decisionali in condizioni di incertezza e rischio, McGraw-Hill, 2009

Greenshield B. D., A study in highway capacity, Highway Research Board, 1935.

Guan T., Frey C.W., Predictive fuel efficiency optimization using traffic light timings and fuel consumption model, Proceedings of the 16th International IEEE annual conference on Intelligent Transportation System Netherlands, 2013

Heintz F., *et. al.*, From images to traffic behaviour - A UAV tracking and monitoring application, 10th International Conference on Information Fusion, 2007

Hydén C., *et al.*, Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation Traffic and Roads, Department of Technology and Society Faculty of Engineering LTH Lund University Sweden, 2010

Hydén C., The development of a method for traffic safety evaluation: the Swedish traffic conflict technique, Doctoral Thesis Lund University Department of Traffic Planning and Engineering, 1987

Hydén, C., Traffic conflicts technique: state-of-the-art with Video-Processing, Traffic Safety Work Transportation Department University Kaiserlauten, 1996

IBM ILOG OPL, Language User's Manual, 2016

Improta G., Cantarella G.E., Control system design for an individual signalized junction, Transportation research Part B vol. 18b pp. 147-167, 1986

Kapseong R., *et. al.*, Lessons Learned: Application of Small UAV for Urban Highway Traffic Monitoring, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007

Kerson M.D., *et. al.*, MAXBAND: A versatile program for setting signal on arteries and triangular networks, MIT, 1981

Kyte M., Tribelhorn M., Operation, Analysis and Design of signalized Intersections. A module for the introductory course in Transportation Engineering, First edition, 2014

- Little J.D., *et. al.*, Maxband: a program for setting signals on arteries and triangular networks, Transportation Research Record vol. 795 pp.40-46, 1981
- Little J.D., The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming. Working Paper, Alfred P. Sloan School of Management MIT, 1966
- Lo H. K., A Novel Traffic Signal Control Formulation. Transportation Research Vol. 33A No. 6 pp. 433–448, 1999
- Madireddy M., *et. al.*, Assesment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emission using an integrated approach, Transportation Research Part D: Transport and environment Vol. 16 pp. 504-508, 2011
- Mannini L., Stima delle condizioni di deflusso del traffico stradale, Università degli studi ROMA TRE Scuola Dottorale in Ingegneria Sezione Scienze dell'Ingegneria Civile, 2012
- Masali L., Multicotteri & Droni - Guida pratica, 2014
- McShane C., The origins and globalization of traffic control signals, Journal of Urban History Vol. 25 n. 3 pp. 379-404, 1999
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, Linee guida per le analisi di sicurezza delle strade, Roma 2000
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, Linee guida per la redazione dei Piani della Sicurezza Stradale Urbana, Roma 2000
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, Linee guida per la progettazione di Sistemi di informazione all'utenza, Roma 2000
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, Rapporto finale per la definizione dei principali temi di ricerca per il miglioramento della sicurezza delle infrastrutture nel breve, medio e lungo periodo, Roma 2000
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Sistemi di monitoraggio del traffico. Linee guida per la progettazione. Documento approvato dalla Commissione di studio per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade del CNR - Ispettorato generale per la circolazione e la sicurezza stradale, 2001
- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Nuovo Codice della strada, d.lgs. 30/04/1992 n. 285 e s.m.i., 2020
- Willlumsen L.P., Better traffic and revenue forecasting, Maida Vale Press, 2014
- Willlumsen L.P., Nommon-Kineo Mobility Analytics, ES and UK, ETC Conference Papers, 2020
- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Regolamento di esecuzione e di attuazione del codice della strada, D.P.R. 16/12/1992 n° 495 e s.m.i., 2020
- Montgomery D.C., Runger G.C., Applied Statistics and Probability for Engineers, John Wiley & Sons, 5° Edition, 2011
- Per Øyvind K., Traffic flow forecasting with deep learning, Master of Science in Informatics, 2017
- Pipes L.A., An operational analysis of the traffic dynamics, Journal of Applied Physics n. 24 pp.271-281, 1953

Proceedings of the Annual Conference of the Europe Chapter of the Human Factors and ergonomics Society, Simulator and Traffic Psychology, Haren 7-8 November, 1996

PuriK A., *et. al.*, Statistical Profile Generation for Traffic Monitoring Using Real-time UAV based Video Data, Mediterranean Conference on Control & Automation, 2007.

Reti urbane di trasporto: linee guida per l'analisi e il progetto, Quaderni del Centro Studi, Consiglio Nazionale Ingegneri n. 142, 2014

Rinelli S., Intersezioni stradali semaforizzate, Utet Libreria, 2000

Ross Sheldon M., Probabilità e statistica per ingegneri, Apogeo, 2003

Sacco N., Robust Optimization of Intersection Capacity, Transportation Research Procedia 17th meeting of EURO Working Group on Transportation Vol.3 pp. 1011-1020, 2014

Saddocchi S., Manuale di analisi statistica multivariata, Franco Angeli Editore, 1980

Salvo G., *et. al.*, Urban traffic analysis through an UAV, 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 2014

Saunier N, *et. al.*, Probabilistic Collision Prediction for Vision-Based Automated Road Safety Analysis, Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference, 2007

Shapiro A., *et. al.*, Lectures on stochastic programming: modeling and theory, Society of Industrial and Applied Mathematics, 2009

Srinivasan S., *et. al.*, Airborne traffic surveillance systems: video surveillance of highway traffic, Proceedings of the ACM 2nd international workshop on Video surveillance & sensor networks, 2004

The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the United States - Association for Unmanned Vehicle Systems International Report, 2015

Transport Research Laboratory, The use of traffic signal in developing cities, United Kingdom, 1996

Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, National Academy of Science, 2010

Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, National Academy of Science, 2000

Van den Haak W.P., *et. al.*, Validation of Google floating car data for applications in traffic management, TNO 2018

Vitetta A., Linee guida per l'analisi e il progetto di reti urbane di trasporto. Metodologie e stato dell'arte, Progetto di Rilevante Interesse Nazionale, Maggioli Editore, 2013

Vitetta A., Linee guida per l'analisi e il progetto di reti urbane di trasporto. Applicazioni, Progetto di Rilevante Interesse Nazionale, Maggioli Editore, 2013

Wardrop J.G., Some theoretical aspects of road traffic research, Proceedings Institute of Civil Engineers PART II 1:325-378, 1952

Wong C.K, *et. al.*, Optimization methods for off-line traffic signal setting: recent advances and perspective future research. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology Vol. 5 n. 2, 2005

Xianfeng Y., *et. al.*, A multi-path progression model for synchronization of arterial traffic signals, Transportation Research Part C Vol. 53 pp. 93-11, 2015

Xiao-feng L., *et. al.*, An optimization model of UAV route planning for road segment surveillance, Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2014

Yafen Y., Robust optimal traffic signal timing, Transportation research Part B, Vol. 42, pp. 911-924, 2008

Yue L., Gang-Leng C., Arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage, Transportation Research Part C, Vol. 19 130-144, 2011

Zhang C., *et. al.*, AM-Band: An Asymmetrical Multi-Band model for arterial traffic signal coordination, Transportation Research Part C, 2015

Zhang Y., Lv J., Effect of signal coordination on traffic emission, Transportation Research Part D. Vol. 17 pp. 149-153, 2012