

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



Dottorato di Ricerca in
“Analisi dei Sistemi Ambientali”
XXIV Ciclo

Tesi di Dottorato

ANALISI AMBIENTALE DI UN SISTEMA URBANO: INQUINAMENTO DA TRAFFICO E LOGISTICA URBANA

Relatori:

Prof.ssa Maria Rosaria Posteraro
(Dipartimento di Matematica e Applicazioni)

Prof. Antonio Sforza
(Dipartimento di Ingegneria Elettrica e
Tecnologie dell'Informazione)

Candidato:

Barbara Sbordone

ANNO ACCADEMICO 2013 - 2014

SOMMARIO

INTRODUZIONE E STRUTTURA DELLA TESI.....	4
PARTE PRIMA – ANALISI E MODELLAZIONE DELL’INQUINAMENTO DA TRAFFICO.....	9
INTRODUZIONE ALLA PARTE PRIMA	10
CAPITOLO 1 – L’INQUINAMENTO DA TRAFFICO URBANO	13
1.1. L’INQUINAMENTO ATMOSFERICO DA TRAFFICO STRADALE	14
1.2. I PRINCIPALI INQUINANTI DA TRAFFICO	17
1.3. LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO IN MATERIA DI QUALITÀ DELL’ARIA.....	23
1.4. IL MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL’ARIA	27
1.5. LE CENTRALINE DI MONITORAGGIO DEGLI INQUINANTI.....	29
1.6. ANALISI DEI DATI DI INQUINAMENTO	32
CAPITOLO 2 – I MODELLI DI INQUINAMENTO DA TRAFFICO.....	70
2.1. I MODELLI DI EMISSIONE DEGLI INQUINANTI.....	71
2.2. I MODELLI DI DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI.....	77
2.3. IL MODELLO STANDARD EUROPEO PER LA STIMA DELLE EMISSIONI DA TRAFFICO.....	89
2.4. I SOFTWARE PER LA STIMA DELL’INQUINAMENTO DA TRAFFICO.....	95
PARTE SECONDA - LOGISTICA URBANA E MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE SU RETE ...	98
INTRODUZIONE ALLA PARTE SECONDA	99
CAPITOLO 3 – LA LOGISTICA URBANA.....	104
3.1. LA LOGISTICA E LE SUE COMPONENTI	104
3.2. IL TRASPORTO DELLE MERCI NELLE AREE URBANE: LA CITY LOGISTICS.....	109
3.3. LA FILIERA LOGISTICA URBANA E I VEICOLI PER IL TRASPORTO DELLE MERCI.....	111
3.4. GLI INTERVENTI DI LOGISTICA URBANA.....	115
3.5. LE PIATTAFORME LOGISTICHE E LA DISTRIBUZIONE DELLE MERCI	123
3.6. IL QUADRO NORMATIVO IN MATERIA DI LOGISTICA URBANA.....	128
3.7. LE ESPERIENZE DI LOGISTICA URBANA IN ALCUNE CITTÀ ITALIANE.....	137
3.8. LE ESPERIENZE DI LOGISTICA URBANA IN ALCUNE CITTÀ EUROPEE.....	162
CAPITOLO 4 – MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE SU RETE PER LA LOGISTICA URBANA	173
4.1. I PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE SU RETE	174
4.2. MODELLI DI LOCALIZZAZIONE	176
4.3. MODELLI DI ROUTING	188
4.4. MODELLI INTEGRATI DI LOCATION-ROUTING.....	197
4.5. MODELLO DI FLOW INTERCEPTING FACILITY LOCATION-ROUTING.....	201
4.6. GLI APPROCCI RISOLUTIVI	206
CAPITOLO 5 – UN CASO DI STUDIO	212
5.1 APPLICAZIONE DI UN MODELLO DI LOCATION-ROUTING PER LA LOCALIZZAZIONE DI TRANSIT POINT NELL’AREA URBANA DI NAPOLI	212
CONCLUSIONI.....	232

BIBLIOGRAFIA	235
APPENDICE 1 – LE AGENZIE REGIONALI PER LA PROTEZIONE DELL’AMBIENTE	240
APPENDICE 2 – I MODELLI MATEMATICI PER LA GESTIONE DELLA MOBILITÀ	261
APPENDICE 3 - L’UTILIZZO DEI SISTEMI GIS NEL SETTORE DELLA LOGISTICA URBANA	269

Introduzione e struttura della tesi

La mobilità delle persone e delle merci è considerata una componente importante della crescita economica e dello sviluppo della società. Nel contesto europeo, i trasporti costituiscono uno dei settori economici più rilevanti, ma anche uno dei principali fattori di deterioramento della qualità ambientale e della vivibilità delle città. Si stima che il 72% della popolazione vive nelle aree urbane e che in queste si produce l'85% del PIL (European Commission, 2009). In questo scenario i trasporti costituiscono la principale fonte di emissioni di PM₁₀ e PM_{2.5}, le cosiddette polveri sottili, che rappresentano i principali agenti inquinanti fortemente dannosi per la salute.

Nei processi decisionali della pianificazione dei trasporti, la componente ambientale, unita ai requisiti tecnici ed economici, rappresenta un elemento discriminante. In particolare, la pianificazione dei trasporti e la gestione dei flussi di traffico devono avere come principale obiettivo la riduzione della congestione stradale e, di conseguenza, la riduzione dei livelli di inquinamento atmosferico ed acustico nelle città. Esiste, dunque, una reale esigenza di integrare le politiche di gestione della qualità dell'aria con quelle di gestione del traffico.

Nell'ambito della gestione della mobilità urbana è ormai evidente la necessità di sviluppare nuove forme di accessibilità ai centri cittadini, con particolare attenzione alle città d'arte e alle aree con spiccata vocazione turistica, in modo da ottimizzare gli spostamenti, favorendo, contemporaneamente, l'utilizzo di veicoli eco-compatibili.

Numerose sono le strategie di intervento per il miglioramento dell'efficienza del sistema dei trasporti in un'area urbana, da adottare in modo complementare ed integrato. In particolare, tra le strategie finalizzate alla riduzione della congestione stradale e del conseguente inquinamento, vi sono interventi strettamente progettuali, quali, ad esempio, la costruzione di infrastrutture stradali e di parcheggi di interscambio, e interventi tattico-strategici, quali il riassetto della circolazione, cambi di sensi di marcia, regolazione coordinata dei semafori, potenziamento del trasporto pubblico, creazione di zone pedonali e di Zone a Traffico Limitato (ZTL).

In questo contesto, il tema della distribuzione urbana delle merci è strategico. La dimensione del trasporto urbano delle merci è evidenziata da una stima della Conferenza Europea dei Ministri dei Trasporti (CEMT, 2003), secondo la quale il trasporto urbano delle merci in Europa pesa per oltre il 30% sul totale del traffico merci (in tonnellate-km trasportate) e contribuisce per il 20% all'occupazione della rete stradale (in termini di veicoli equivalenti), per il 60% alle emissioni complessive di particolato e per il 23% alle emissioni di anidride carbonica (Ministero delle

Infrastrutture e dei Trasporti, 2006). Pertanto, si sta consolidando l'opinione secondo cui la pianificazione del trasporto delle merci in ambito urbano rientra a pieno titolo tra gli obiettivi generali di miglioramento della sostenibilità del sistema dei trasporti e di perseguimento di standard più elevati di qualità della vita nelle aree urbane e metropolitane. L'attenzione verso le attività di trasporto che generano inquinamento e congestione è cresciuta notevolmente a livello locale e la distribuzione urbana delle merci è diventato un tema di interesse primario, oggetto di sperimentazioni in un crescente numero di comuni che hanno attivato molteplici misure per la regolazione degli accessi (ZTL, fasce orarie, standard ambientali dei veicoli), tecnologie di controllo, infrastrutture dedicate, in combinazioni diverse e con esiti differenti. Questo insieme di problematiche e di strumenti di intervento legati alla gestione delle merci in area urbana, con particolare riferimento alla localizzazione e al dimensionamento dei centri di interscambio, all'individuazione di opportuni veicoli di trasporto (in termini di tipologia e dimensione) e alla determinazione di percorsi dei veicoli commerciali nel centro urbano, si definisce tradizionalmente con il termine "Logistica Urbana" (City Logistics). Pertanto, nella seconda parte della tesi verrà dato particolare risalto alle politiche di tipo strategico-infrastrutturale, ritenendo tali politiche più idonee a realizzare forti riduzioni dei livelli di inquinamento.

Alla luce di queste considerazioni, l'attività di ricerca svolta durante il dottorato ha fatto riferimento a due problematiche scientifiche, affrontate da vari punti di vista, teorico-metodologico e normativo-gestionale:

- l'inquinamento atmosferico urbano, con particolare riferimento agli inquinanti collegabili al traffico veicolare privato di persone e merci;
- la distribuzione delle merci nelle aree urbane e metropolitane, con particolare riferimento agli interventi di City Logistics proponibili per la salvaguardia ambientale e per il miglioramento della qualità della vita nelle città.

Le due problematiche sono inquadrabili nei contesti più generali dell'analisi ambientale di un sistema urbano e della mobilità sostenibile.

I due filoni di ricerca sono correlati, secondo l'assunto comunemente adottato in letteratura che il trasporto veicolare, e il trasporto delle merci in particolare, sia tra le cause principali di inquinamento ambientale (inquinamento acustico ad atmosferico, alterazione del paesaggio naturale ed antropizzato, etc.).

In questo contesto, il lavoro di tesi propone un approccio metodologico di tipo modellistico volto ad affrontare le due tematiche in modo contestuale con l'obiettivo di definire interventi per il miglioramento della vivibilità dei centri urbani, attraverso la riduzione della congestione stradale e dell'inquinamento atmosferico.

La tesi è pertanto strutturata in due parti:

- Analisi e modellazione dell'inquinamento da traffico
- Logistica Urbana e modelli di Ottimizzazione su Rete

Nella prima parte è presentata la problematica dell'inquinamento atmosferico connesso al traffico veicolare, con particolare riferimento ai modelli matematici presenti in letteratura per la stima delle concentrazioni di inquinanti. L'analisi quantitativa del processo di inquinamento viene affrontata attraverso l'utilizzo di un insieme di modelli matematici, ognuno dei quali descrive singolarmente fenomeni che contribuiscono a generare l'inquinamento. Nello studio dell'inquinamento da traffico i sub-sistemi coinvolti sono quelli dei trasporti (sorgenti di emissione), dell'atmosfera e dei recettori. Pertanto, per la stima dell'inquinamento in una determinata area urbana, è necessario implementare modelli di simulazione del traffico (modelli di offerta, modelli di domanda, modelli di assegnazione), modelli di emissione e modelli di dispersione degli inquinanti.

Nel lavoro di tesi sono considerate solo le emissioni provenienti dal traffico veicolare, ma va specificato che i fenomeni di inquinamento sono il risultato di una complessa interazione tra fattori che portano ad un accumulo degli inquinanti ed altri che ne determinano la diluizione e la rimozione in atmosfera.

Nella prima parte, sono, inoltre, riportati una serie di dati di inquinamento con riferimento alla scala territoriale europea (dati forniti ed elaborati dall'European Environmental Agency), nazionale (dati forniti ed elaborati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e locale. Per quanto riguarda la scala locale, sono stati elaborati ed analizzati dati relativi alle concentrazioni di PM_{10} e CO per il Comune di Napoli, relativi al biennio 2012-2013, rilevati dalle centraline di monitoraggio dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente in Campania (ARPAC). Al fine di individuare una possibile relazione tra i fenomeni piovosi e l'inquinamento da PM_{10} , oltre ai dati di concentrazione, sono stati analizzati i dati di piovosità, rilevati dall'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino dell'Università "Federico II" di Napoli.

Il contributo originale della prima parte è rappresentato dall'analisi critica dei dati di inquinamento della città di Napoli.

La seconda parte della ricerca riguarda il tema della logistica urbana (City Logistics) e i modelli matematici di Ottimizzazione su Rete per l'implementazione di una strategia di intervento. In dettaglio, il problema della distribuzione delle merci è stato affrontato con particolare riguardo a definizioni ed approcci proposti in letteratura, obiettivi, attori e tipologie di intervento. Sono inoltre descritte, al fine di offrire una panoramica delle politiche di logistica urbana, le strategie messe in atto da alcune amministrazioni italiane ed estere, finanziate prevalentemente nell'ambito di progetti europei. E' inoltre illustrato il quadro normativo in materia di logistica urbana, con riferimento alle linee guida e agli strumenti di programmazione e pianificazione a scala comunitaria, nazionale e locale.

La seconda parte è inoltre incentrata sui problemi decisionali di ottimizzazione delle catene logistiche, con riferimento ai modelli e metodi di Ottimizzazione su Rete. Nell'ambito della ricerca sono stati oggetto di studio alcuni modelli di ottimizzazione per l'implementazione di una strategia di Logistica Urbana, basata sulla localizzazione di piattaforme logistiche per la distribuzione delle merci e sull'instradamento dei veicoli. Il problema di localizzazione consiste nell'individuare la posizione ottima di nodi logistici, luoghi in cui avviene la rottura del carico, con passaggio della merce da veicoli a capacità maggiore a veicoli di dimensioni ridotte ed eco-compatibili per la distribuzione della merce ai clienti finali. Al problema di localizzazione si aggiunge, inoltre, quello dell'identificazione del circuito ottimo dei veicoli sulla rete stradale, dalle piattaforme logistiche ai punti di domanda localizzati nelle città (problema di Routing).

Oltre ai modelli classici di localizzazione e di routing, sono stati oggetto di studio modelli integrati che ottimizzano simultaneamente i due problemi, della localizzazione dell'infrastruttura logistica e della determinazione del percorso ottimo dei veicoli (modelli integrati di Location - Routing). L'interdipendenza tra la componente di Location e quella di Routing si rivela particolarmente indicata a descrivere ed affrontare i problemi di logistica distributiva.

L'attenzione è stata rivolta, inoltre, a particolari modelli di Location-Routing, attualmente in fase di sperimentazione, dove l'approccio utilizzato per affrontare il problema di localizzazione è basato sull'intercettazione dei flussi (Flow Intercepting Facility Location).

E' stato, infine, affrontato un caso di studio relativo al sistema distributivo nell'area urbana di Napoli. In particolare, è stata descritta un'ipotesi di localizzazione di "transit point" e di instradamento dei veicoli per servire i clienti della rete di distribuzione al dettaglio. Il modello di Location-Routing è stato implementato mediante l'ausilio del software di ottimizzazione X-press-MP della FICO.

L'attività di ricerca è stata sviluppata presso il "Dipartimento di Matematica e Applicazioni" (DMA) e presso il gruppo di Ricerca Operativa del "Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell'Informazione" (DIETI) dell'Università "Federico II" di Napoli, attivo nel settore dell'Ottimizzazione su Rete e delle tematiche ad esso connesse.

L'attività è stata svolta con la supervisione del tutor, prof.ssa Maria Rosaria Posteraro (DMA), e del co-tutor, prof. Antonio Sforza (DIETI).

Ringraziamenti

Doverosi ringraziamenti vanno rivolti ai tutor, alla Prof.ssa Paola Adamo del Dipartimento di Agraria dell'Università "Federico II", per gli utili consigli in materia di inquinamento atmosferico, e all'Ing. Claudio Sterle del DIETI, per gli utili consigli sulla modellazione del caso di studio.

PARTE PRIMA – ANALISI E MODELLAZIONE DELL'INQUINAMENTO DA TRAFFICO



Introduzione alla Parte Prima

Nella prima parte della tesi è presentata la problematica dell'inquinamento atmosferico connesso al traffico veicolare, con particolare attenzione ai processi di formazione, emissione e dispersione degli inquinanti. In questa parte è illustrato il quadro normativo di riferimento relativo al controllo e alla gestione della qualità dell'aria. In dettaglio, in Italia, la normativa vigente è rappresentata dal D.Lgs 155/2010, che recepisce la direttiva europea 2008/50/CE relativa alla "qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa". Il Decreto fornisce un quadro unitario in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria.

La normativa nazionale in materia di qualità dell'aria affida alle Regioni e alle Province Autonome le attività di valutazione e di pianificazione, finalizzate a conoscere il contesto territoriale e ad identificare le misure più efficaci per il rispetto dei valori limite di qualità dell'aria.

La prima parte della ricerca è, inoltre, focalizzata sui modelli matematici, presenti in letteratura, per la stima delle concentrazioni dei principali inquinanti connessi al traffico veicolare. In particolare, la valutazione dell'inquinamento atmosferico può essere effettuata mediante indagini dirette, attraverso la misurazione delle concentrazioni di inquinanti con apposite stazioni di monitoraggio, o mediante indagini indirette, attraverso l'implementazione di un sistema di modelli matematici, descritti nei successivi paragrafi.

La qualità dell'aria nelle aree urbane è determinata in modo significativo dalla domanda di mobilità e dal modo in cui essa viene soddisfatta dall'offerta di trasporto, secondo l'assunto generalmente adottato in letteratura che vi sia una relazione tra l'inquinamento e il traffico stradale. Pertanto, per la stima dell'inquinamento in una determinata area è necessario implementare modelli di simulazione del traffico (modelli di offerta, modelli di domanda, modelli di assegnazione) che forniscono i flussi circolanti sulla rete stradale nel periodo di riferimento. A partire dai modelli di traffico, che definiscono i dati di input per la stima dell'inquinamento, è possibile implementare i modelli di emissione e di dispersione degli inquinanti.

In particolare, sono stati oggetto di studio alcuni modelli di emissione, che rappresentano la formulazione matematica delle relazioni tra le emissioni e i parametri da cui esse dipendono (tipologia di combustibile, cilindrata, velocità, caratteristiche delle infrastrutture, etc.), e che forniscono le quantità di inquinanti emesse dai veicoli.

Un modello di calcolo frequentemente utilizzato in Europa, introdotto dall'European Environmental Agency (EEA) per l'elaborazione di scenari e inventari delle emissioni atmosferiche è il COPERT (COmputer Programme for Estimating Emissions from Road Transport). Le principali variabili necessarie per la stima delle emissioni sono: tipologia dei veicoli (tipo di carburante, cilindrata, anno di produzione etc.), velocità media dei veicoli, lunghezza del tratto percorso dai veicoli, tipologia di strada percorsa (urbana, extraurbana, etc.) e condizioni climatiche (temperatura media mensile, etc.).

Oltre ai modelli di emissione, sono stati oggetto di approfondimento alcuni modelli di dispersione degli inquinanti (modelli euleriani a box, modelli gaussiani, modello di canyon stradale) che forniscono la conoscenza spazio-temporale degli inquinanti in atmosfera, simulando i processi di trasporto, reazione chimica e rimozione degli inquinanti stessi.

Nel lavoro di tesi sono considerate solo le emissioni provenienti dal traffico veicolare, ma va specificato che i fenomeni di inquinamento sono il risultato di una complessa interazione tra fattori che portano ad un accumulo degli inquinanti ed altri che ne determinano la diluizione e la rimozione e in atmosfera.

Nella prima parte sono infine riportati una serie di dati di inquinamento con riferimento alla scala territoriale europea (dati forniti ed elaborati dall'European Environmental Agency) e nazionale (dati forniti dall'Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale).

Inoltre, sono stati elaborati ed analizzati dati relativi alle concentrazioni di PM₁₀ e CO per il Comune di Napoli, relativi al biennio 2012-2013, rilevati dalle centraline di monitoraggio dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente in Campania (ARPAC). L'analisi dei dati è stata strutturata secondo quattro andamenti: negli anni, nell'anno, nel mese e nel giorno.

Al fine di individuare una possibile relazione tra i fenomeni piovosi e l'inquinamento da PM₁₀, oltre ai dati di concentrazione, sono stati analizzati i dati di piovosità, rilevati dall'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino dell'Università "Federico II" di Napoli. Il contributo originale della prima parte è rappresentato dall'analisi critica dei dati di inquinamento della città di Napoli. In particolare, l'analisi di tali dati ha consentito lo sviluppo di considerazioni su scala territoriale locale che hanno indotto la definizione di proposte di intervento di tipo strutturale e metodologico.

In letteratura la tematica è ampiamente trattata. Il lavoro di Costabile e Allegrini (2007) analizza la relazione tra la qualità dell'aria e l'inquinamento atmosferico legato

al traffico veicolare. Gli autori propongono una metodologia di valutazione integrata dei flussi di traffico e dell'inquinamento atmosferico.

Il lavoro di Aldrin e Haff (2005) presenta un modello per la stima dell'inquinamento atmosferico dove si tiene conto dei volumi di traffico e di alcune variabili meteorologiche (in particolare direzione e velocità del vento e umidità). La metodologia proposta è stata sperimentata nella città di Oslo.

Il contributo di Gualtieri e Tartaglia (1998) descrive un modello per la valutazione dell'inquinamento atmosferico causato dal traffico veicolare nelle aree urbane, con riferimento alle caratteristiche geometriche dei siti e alla morfologia dei luoghi. Il modello proposto, implementato nell'area urbana di Firenze, è integrato in un sistema GIS che consente l'uso di coordinate spaziali per descrivere la struttura delle aree urbane, delle reti stradali e della distribuzione degli inquinanti in atmosfera.

Capitolo 1 – L'inquinamento da traffico urbano

L'inquinamento atmosferico costituisce uno degli effetti a maggiore impatto sull'ambiente di un sistema di trasporto. Il trasporto su strada, in particolar modo, influisce sui fenomeni di inquinamento, sia per la sua netta predominanza rispetto all'utilizzo di altre modalità di trasporto, sia perché l'emissione di sostanze inquinanti è diffusa sul territorio prevalentemente nelle aree urbane.

La rilevanza del problema è ampiamente riconosciuta dalla normativa di settore che esercita attività di controllo a priori, sulle emissioni dei veicoli, e a posteriori, imponendo dei valori di soglia per la concentrazione di alcuni inquinanti nell'atmosfera. La normativa introduce, inoltre, strumenti di pianificazione per il controllo a lungo termine della qualità dell'aria e provvedimenti di breve termine per fronteggiare le situazioni di allarme.

Il D.Lgs 152/2006 (Norme in Materia Ambientale) definisce inquinamento atmosferico "ogni modificazione dell'aria atmosferica, dovuta all'introduzione nella stessa di una o più sostanze in qualità e con caratteristiche tali da ledere o da costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente oppure tali da ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente".

Il D.Lgs 155/2010, che recepisce la direttiva comunitaria 2008/50/CE relativa alla "qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", fornisce un quadro normativo unitario in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria.

Nel presente capitolo si riportano alcuni principi fondamentali del Decreto, oltre che le disposizioni ritenute rilevanti ai fini della ricerca, soprattutto per ciò che riguarda le attività di monitoraggio della qualità dell'aria.

1.1. L'inquinamento atmosferico da traffico stradale

Lo stato di inquinamento atmosferico è il risultato di un processo che comprende tutti i fenomeni a cui prendono parte le sostanze inquinanti a partire dalla loro genesi fino all'espletamento della loro azione sull'ecosistema [Stern 1976].

Il processo di inquinamento può essere scomposto in sub-processi, quali la formazione, l'emissione, la dispersione e l'azione delle sostanze inquinanti (Fig. 1.1). Nell'ambito di questi sub-processi sono coinvolti diversi sottosistemi dell'ecosistema globale: le sorgenti, responsabili dell'immissione delle sostanze inquinanti nell'aria e a volte anche della loro formazione, l'atmosfera, che rappresenta il mezzo attraverso il quale essi evolvono, e i recettori, ovvero tutti gli elementi dell'ecosistema (compresa l'aria stessa) che risentono dell'azione dannosa delle sostanze inquinanti. In particolare, i quattro sub-processi dell'inquinamento atmosferico sono:

- la formazione delle sostanze inquinanti: il processo dell'inquinamento da traffico veicolare è originato dal fatto che i veicoli stradali utilizzano come propellenti sostanze idrocarburiche combustibili derivate dal petrolio o da gas naturali dotate di elevate potenzialità inquinanti. La fase sostanziale del processo di formazione delle sostanze inquinanti immesse nell'atmosfera avviene all'interno degli apparati di propulsione dei veicoli;
- l'emissione: le sorgenti di inquinamento che immettono sostanze nocive nell'atmosfera possono essere naturali (vulcani, vegetazione, batteri) o antropiche (processi industriali, processi di trasformazione dell'energia, produzione dei rifiuti solidi, attività di trasporto).

Il D.L. del 21 maggio 2004 n°71 ("Attuazione della direttiva 2001/81/CE relativa ai limiti nazionali di emissione di alcuni inquinanti atmosferici") definisce l'emissione come "il rilascio nell'atmosfera di sostanze provenienti da fonti puntuali o diffuse". I veicoli di trasporto possono essere considerati come sorgenti puntuali in movimento; le strade, invece, possono essere schematizzate come sorgenti lineari costituite da un insieme di sorgenti puntuali distribuite nello spazio lungo una linea e quindi caratterizzate dall'emissione di tutti i veicoli che le percorrono.

Le sorgenti di emissione sono caratterizzate dal tipo di sostanza inquinante emessa e dall'intensità dell'emissione. L'intensità dell'emissione è generalmente espressa in termini di quantità di sostanza emessa da una sorgente elementare per unità di tempo e per unità di spazio dalla sorgente stessa. Nel caso in cui l'estensione

spaziale della sorgente sia trascurabile, la sua intensità è esprimibile in termini di flusso temporale, ovvero come quantità di sostanza per unità di tempo;

- la dispersione: è il fenomeno di evoluzione degli inquinanti dal momento dell'emissione a quello in cui avviene la loro rimozione. Le sostanze inquinanti, una volta immesse nell'atmosfera, sono soggette a processi fisico-chimici che determinano la loro distribuzione nello spazio e nel tempo; tali fenomeni sono influenzati dal comportamento dell'atmosfera (processi di inversione termica) e dalle condizioni meteorologiche (vento e precipitazioni). Il risultato dell'azione contemporanea dei processi di trasporto, reazione chimica e rimozione degli inquinanti dà luogo alla presenza, in un certo punto dello spazio e in un certo istante di tempo, di una determinata quantità della generica sostanza inquinante che altera la naturale composizione dell'aria atmosferica. La misura di tale quantità è definita "concentrazione" e rappresenta la quantità di inquinante presente in un volume unitario di aria.
- l'azione: l'azione delle sostanze inquinanti dipende dalla loro entità, dalla tipologia e dal tempo di permanenza nell'atmosfera. In particolare, la presenza contemporanea di più sorgenti inquinanti, condiziona ulteriormente la qualità dell'aria con effetti sul clima, sulla flora, sulla fauna e sull'uomo. Gli impatti negativi degli inquinanti sono dovuti principalmente alla loro concentrazione nell'aria, la quale è solitamente misurata in microgrammi ($1\mu\text{g} = 10^{-6}\text{g}$) di inquinante per metro cubo di aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

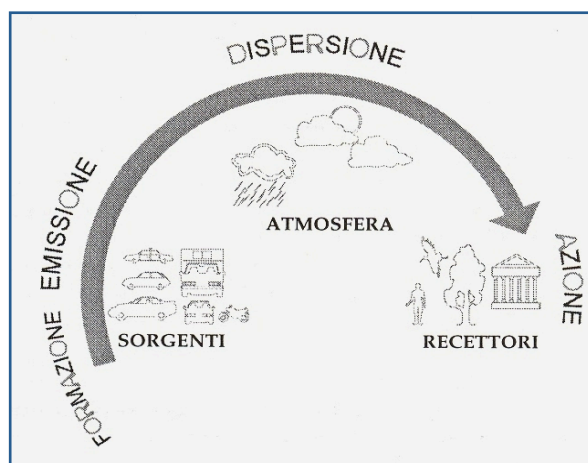


Fig. 1.1 - Schema del processo di inquinamento atmosferico [Tartaglia, 1999]

I processi di inquinamento dell'aria possono essere classificati a seconda del loro dominio spaziale in: processi localizzati (o di microscala) e diffusi (o di mesoscala). I primi sono quelli che causano conseguenze maggiormente percepibili e si manifestano in tempi minori; fra questi possono essere classificati i fenomeni di inquinamento delle aree urbane. I processi diffusi, invece, interessano grandi masse d'aria e intervengono nei fenomeni meteorologici e climatici dell'intero pianeta; tali processi causano conseguenze più difficilmente misurabili che si evolvono nel lungo periodo.

I casi di inquinamento acuto sono causati, nelle aree urbane, dalla combinazione di diverse fonti inquinanti, in quanto, al traffico automobilistico si aggiungono altre fonti di inquinamento atmosferico, come, ad esempio, le attività industriali ed il riscaldamento domestico.

La letteratura mostra filoni di ricerca volti ad identificare le relazioni tra le concentrazioni dei principali inquinanti presenti in un contesto urbano e i fattori che possono contribuire al fenomeno dell'inquinamento atmosferico; tra questi:

- la composizione del parco veicolare;
- le condizioni di deflusso;
- la morfologia dei luoghi;
- il grado di attivazione di misure di controllo;
- le condizioni meteorologiche, che possono favorire o complicare la dispersione delle sostanze inquinanti;
- la presenza di altre fonti naturali ed antropiche.

1.2. I principali inquinanti da traffico

La normativa vigente definisce inquinante una “qualsiasi sostanza presente nell’aria ambiente che può avere effetti dannosi sulla salute umana o sull’ambiente nel suo complesso”. Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati in diversi modi. Un primo metodo di classificazione riguarda il loro stato fisico e consiste nel suddividere gli inquinanti in:

- sostanze gassose (come gas e vapori);
- sostanze in sospensione o particolato allo stato solido o liquido.

Con riferimento alla sorgente di emissione delle sostanze inquinanti, queste possono essere di:

- origine naturale, emesse da sorgenti non correlate da attività umane (vulcani, oceani, processi naturali);
- origine antropica, emesse da sorgenti correlate ad attività umane (trasporti, industria, conversione di energia, etc).

Le sostanze possono anche essere classificate in base alla loro genesi [Vismara 1989]; si distinguono pertanto gli:

- inquinanti primari, emessi direttamente dalle sorgenti;
- inquinanti secondari, che si formano in atmosfera in seguito a reazioni chimiche tra inquinanti primari e altre sostanze normalmente presenti nell’aria.

Gli inquinanti possono essere classificati anche in relazione al proprio comportamento chimico, cioè possono essere:

- inquinanti inerti, ovvero non soggetti, in condizioni tipiche di esistenza in atmosfera, alla partecipazione a reazioni chimiche;
- inquinanti secondari, soggetti in condizioni tipiche di esistenza in atmosfera alla partecipazione a reazioni chimiche.

I principali inquinanti prodotti dai sistemi di trasporto sono:

- il Monossido di Carbonio (CO),
- i composti organici nella forma di particolato (PTS),
- gli Ossidi di Zolfo (SO_x),
- gli Ossidi Azoto (NO_x),
- l’Anidride Carbonica (CO₂),
- l’Ozono (O₃),
- gli Idrocarburi (HC), in particolare quelli non metanici (NMHC) e quelli policiclici aromatici (IPA),
- il Piombo (Pb) e i suoi composti.

Il Monossido di Carbonio

La presenza di Monossido di Carbonio è fortemente legata ai flussi di traffico. In Fig.1.2 si nota come la concentrazione di CO, misurata in una sezione stradale durante l'arco di una giornata, ha un andamento simile a quello dei flussi veicolari che percorrono la stessa strada.

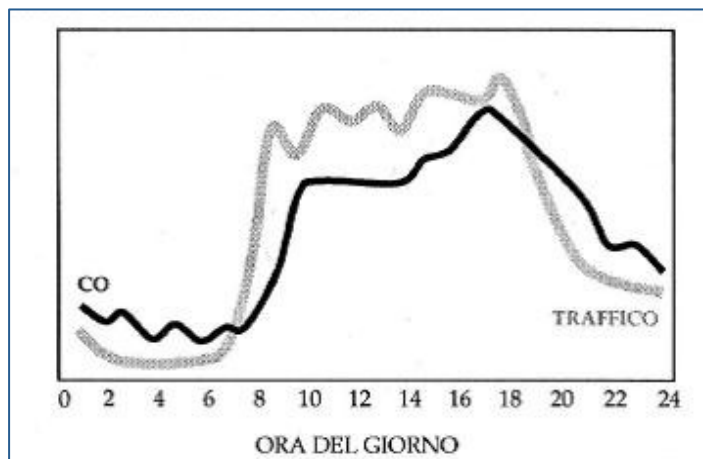


Fig.1.2 - Andamento qualitativo della concentrazione di CO e del flusso di traffico in [veicoli/ora] nell'arco di una giornata in una strada urbana [Horowitz, 1982]

Il Monossido di Carbonio presenta anche una forte variabilità spaziale (Fig.1.3): in una strada isolata la sua concentrazione mostra di solito valori massimi nell'intorno dell'asse stradale e decresce molto rapidamente allontanandosi da esso, fino a diventare trascurabile a una distanza di alcune decine di metri [Horowitz, 1982].

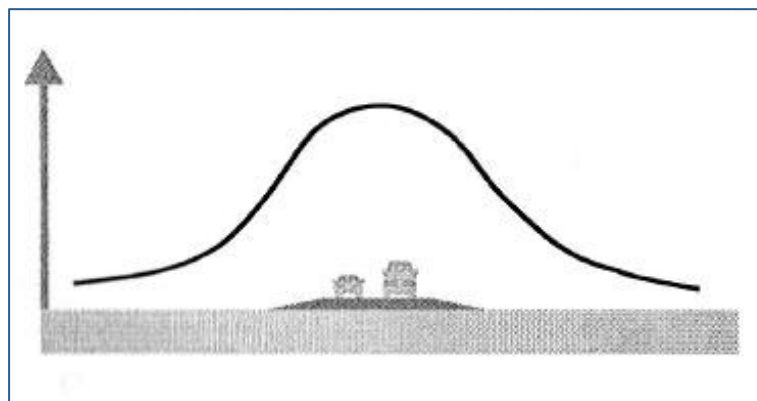


Fig.1.3 – Andamento qualitativo della concentrazione di CO in una sezione stradale [Horowitz, 1982]

Il Particolato atmosferico

Il D.Lgs 155/2010 individua il particolato atmosferico come l'inquinante più preoccupante per la salute pubblica, in ragione della sua azione di invasività a danno dell'apparato respiratorio.

Il particolato atmosferico (o aerosol atmosferico) comprende una miscela di particelle molto differenziate per origine e composizione e con una distribuzione dimensionale che può variare da 0,005 a 100 μm di diametro aerodinamico equivalente, che corrisponde al diametro di una particella sferica, di densità unitaria, che ha lo stesso comportamento aerodinamico della particella in esame.

La normativa ha posto l'attenzione sulle particelle con diametro inferiore a 10 μm , aggregazione nota come PM_{10} o particolato fine. In particolare, esistono tre diverse tipologie di polveri sottili di diverso diametro aerodinamico: inalabili, toraciche e respirabili; le ultime due categorie producono effetti nocivi per la salute dell'uomo.

All'interno del PM_{10} si distinguono il $\text{PM}_{2,5}$ (particelle con diametro inferiore ai 2.5 μm) e il PM_1 (inferiori a 1 μm). Tra il PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ esiste una forte sovrapposizione dimensionale: il 60% del PM_{10} è costituito dalla frazione inferiore a 2.5 μm . Le particelle con diametro inferiore a 2.5 μm sono di origine primaria, in quanto generate prevalentemente dai processi di combustione dovuti al traffico, all'industria e al riscaldamento domestico; sono invece di origine secondaria se formate da processi di trasformazione chimica dovuti ad interazioni con altre tipologie di inquinanti quali ossidi di zolfo, ossidi di azoto e composti organici volatili.

Gli Ossidi di Zolfo

Il Biossido di Zolfo (SO_2) e i suoi prodotti di ossidazione (triossido di zolfo, acido solforico e solfati) sono comunemente indicati con il termine generico di ossidi di zolfo SO_x . L' SO_2 è un gas incolore, solubile in acqua e dall'odore pungente. Le principali sorgenti antropiche sono i processi di combustione delle sostanze che contengono zolfo (principalmente i combustibili fossili come il carbone e gli oli combustibili utilizzati nei processi industriali); inoltre, i vulcani attivi e l'aerosol marino costituiscono le principali sorgenti naturali. Gli Ossidi Zolfo possono essere trasportati dalle masse d'aria in movimento anche a lunghe distanze dai punti di emissione.

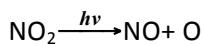
Gli Ossidi di Azoto

Gli Ossidi di Azoto si formano durante qualsiasi processo di combustione dove l'aria sia il comburente, in ragione della presenza di azoto e di ossigeno. Una delle principali fonti di NO_x è il traffico stradale: nei gas di scarico degli autoveicoli sono contenute quantità più elevate di monossido di azoto (NO) rispetto al biossido di azoto (NO_2), il loro rapporto è circa 95 a 5. L'NO si forma per ossidazione dell'azoto contenuto nell'aria del fluido evolvente, la sua produzione è favorita dalle alte temperature e dall'abbondante presenza ossigeno. Il Monossido di Azoto immesso nell'atmosfera subisce una ulteriore ossidazione convertendosi in NO_2 (che sarà quindi un inquinante secondario). Tale processo è dovuto a trasformazioni di tipo fotochimico, indotte dalla luce ultravioletta presente nei raggi del sole, per questo motivo si avrà una maggiore concentrazione di NO_2 in rapporto all'NO nei mesi estivi. Queste reazioni chimiche portano alla formazione di Ozono e di altri inquinanti secondari, che prendono il nome di smog fotochimico presente in molte città con condizioni meteorologiche sfavorevoli. La concentrazione degli NO_x nell'atmosfera dipende dall'intensità delle emissioni (come per il CO), dal loro trasporto e dalla diffusione per effetto del vento e delle turbolenze atmosferiche.

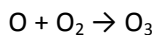
L'Ozono

L'Ozono (O_3) è presente nelle zone più alte dell'atmosfera dove si forma naturalmente a causa di reazioni chimiche attivate dalla radiazione solare, è perciò un inquinante secondario. Le cause di inquinamento da Ozono sono le stesse che provocano lo smog fotochimico, ovvero l'emissione di idrocarburi e Ossidi di Azoto dovuta ai mezzi di trasporto.

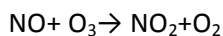
L' NO_2 assorbe energia dai raggi ultravioletti della luce solare e, per effetto di ciò, si scinde in molecole di NO e di ossigeno:



L'ossigeno atomico è molto reattivo, si combina con l'Ossigeno molecolare (O_2) presente nell'atmosfera formando l'ozono (O_3):



L'Ozono reagisce con NO formando di nuovo Biossido di Azoto e O_2 :



Tale reazione ostacola la presenza contemporanea di concentrazioni di NO e O₃, per questo motivo le concentrazioni di Ozono tendono ad essere basse in presenza delle sorgenti di NO.

Il fenomeno appena descritto può essere schematizzato rappresentando l'andamento delle concentrazioni di NO, NO₂ e O₃ in una sezione stradale (Fig. 1.4).

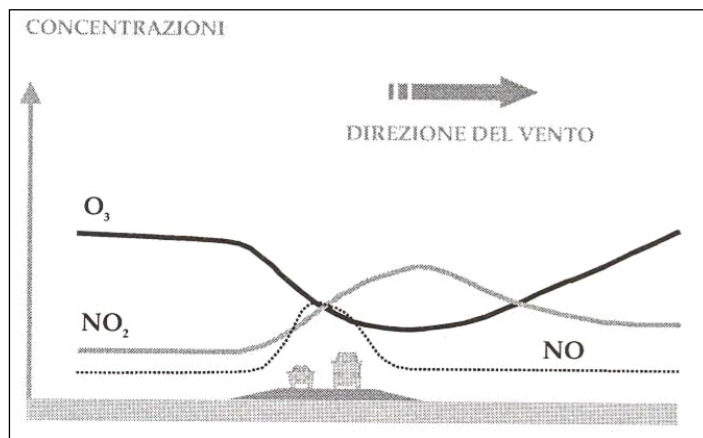


Fig.1.4 – Andamento qualitativo delle concentrazioni di NO, NO₂ e O₃ in una sezione stradale [Horowitz, 1982]

Nelle prime ore del mattino si ha generalmente la concentrazione massima di NO prodotta dalla punta di traffico mattutina; questo viene poi convertito in NO₂ nel giro di qualche ora. La successiva formazione di O₃ inizia soltanto quando il processo di produzione di NO₂ si avvicina al completamento, a questo punto la concentrazione di O₃ cresce rapidamente raggiungendo un massimo tra le 12 e le 15; nelle ore serali la concentrazione di Ozono va diminuendo.

Nella Fig.1.5 si riporta l'andamento qualitativo delle concentrazioni dei tre inquinanti nell'arco di una giornata in un'area urbana.

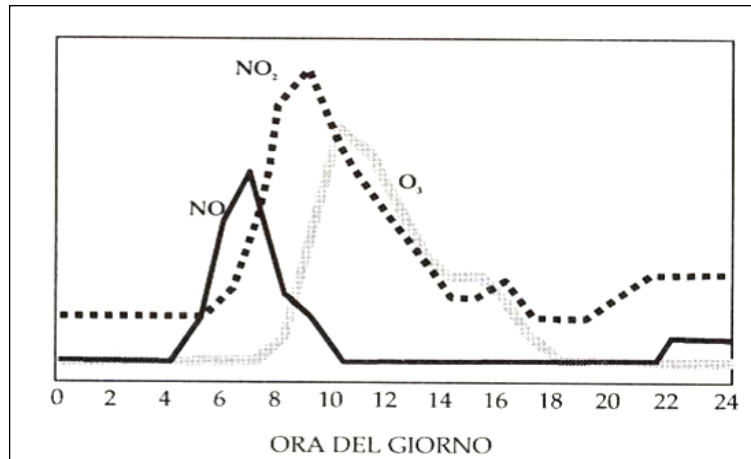


Fig.1.5 – Andamento qualitativo delle concentrazioni di NO, NO₂ e O₃ nell'arco di una giornata in un'area urbana [Horowitz, 1982]

Le reazioni fotochimiche sono molto complesse, per tale motivo è difficile stimare l'evoluzione e la distribuzione spatio-temporale dei prodotti di tali reazioni. Il monitoraggio corretto di questo inquinante va fatto nelle località più periferiche della città e nei parchi, perché il vento trasporta l'O₃ dalle aree urbane a quelle suburbane e rurali.

1.3. La normativa di riferimento in materia di qualità dell'aria

Nei processi decisionali di pianificazione territoriale, la componente ambientale, unita ai requisiti tecnici ed economici, rappresenta un elemento discriminante. La normativa prevede già nello studio di fattibilità di un'opera pubblica, a monte delle tre fasi della progettazione, la produzione di elaborati volti a giustificare le scelte effettuate dal punto di vista ambientale. Tutti gli interventi progettuali effettuati nelle reti di trasporto hanno un certo impatto ambientale sulle varie componenti del contesto in cui è inserita l'opera, tra questi vi sono sicuramente i danni al paesaggio urbano, i fenomeni di inquinamento acustico e dell'aria, il deterioramento degli edifici di interesse storico etc. Una volta individuate le criticità del complesso sistema dei trasporti, mediante opportune metodologie di valutazione, il processo di pianificazione mira all'individuazione del migliore scenario progettuale, sottoponendo le diverse alternative anche a criteri di valutazione ambientale.

I principali strumenti legislativi a tutela della qualità dell'aria sono le Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, recepite in Italia con il D.Lgs. 155/2010, che pongono limiti alle concentrazioni degli inquinanti in aria e obbligano Stati/Regioni/Province Autonome a predisporre piani per il risanamento della qualità dell'aria in caso di non conformità, il Protocollo di Goteborg, nato nell'ambito della "Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution" e la Direttiva 2001/81/CE (la cosiddetta Direttiva NEC - National Emission Ceiling), recepita con il D.Lgs. 171/2004, che pongono limiti alle emissioni nazionali. Esiste, poi, una specifica normativa che regola l'emissione dei principali inquinanti da sorgenti e settori specifici. Alcuni dei principali riferimenti sono:

- le direttive che introducono dei limiti alle emissioni da veicoli, inclusi i Regolamenti (CE) 692/2008 e 595/2009 che introducono i più recenti Euro standard (5 e 6);
- la Direttiva 2003/17/CE sulla qualità di benzina e gasolio;
- la Direttiva 1999/32/CE sulla riduzione di zolfo nei combustibili liquidi;

In questo contesto, la normativa vigente, D.Lgs 155/2010, fornisce un quadro normativo unitario in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria. Si riportano di seguito le finalità e i principi fondamentali del Decreto, ritenuti rilevanti.

Le principali finalità del Decreto sono le seguenti:

- individuazione di obiettivi di qualità dell'aria ambiente volti ad evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi per la salute umana e per l'ambiente nel suo complesso;
- valutazione della qualità dell'aria ambiente sulla base di metodi e criteri comuni su tutto il territorio nazionale;
- ricavare informazioni sulla qualità dell'aria ambiente come base per individuare le misure da adottare per contrastare l'inquinamento e gli effetti nocivi dell'inquinamento sulla salute umana e sull'ambiente e per monitorare le tendenze a lungo termine, nonché i miglioramenti dovuti alle misure adottate;
- garantire al pubblico le informazioni sull'aria ambiente;
- realizzare una migliore cooperazione tra gli Stati dell'Unione Europea in materia di inquinamento atmosferico.

I principi fondamentali delle disposizioni del decreto sono i seguenti:

- “il sistema di valutazione e gestione della qualità dell'aria rispetta ovunque standard qualitativi elevati ed omogenei al fine di assicurare un approccio uniforme su tutto il territorio nazionale e di assicurare che le stesse situazioni di inquinamento siano valutate e gestite in modo analogo”;
- “il sistema di acquisizione, di trasmissione e di messa a disposizione dei dati e delle informazioni relativi alla valutazione della qualità dell'aria ambiente è organizzato in modo da rispondere alle esigenze di tempestività della conoscenza da parte di tutte le amministrazioni interessate e del pubblico e si basa su misurazioni e su altre tecniche di valutazione e su procedure funzionali a tali finalità secondo i canoni di efficienza, efficacia ed economicità”;
- “la zonizzazione dell'intero territorio nazionale è il presupposto su cui si organizza l'attività di valutazione della qualità dell'aria ambiente. A seguito della zonizzazione del territorio, ciascuna zona o agglomerato è classificata allo scopo di individuare le modalità di valutazione mediante misurazioni e mediante altre tecniche in conformità alle disposizioni del decreto”;
- “la zonizzazione del territorio richiede la previa individuazione degli agglomerati e la successiva individuazione delle altre zone. Gli agglomerati

sono individuati sulla base dell'assetto urbanistico, della popolazione residente e della densità abitativa. Le altre zone sono individuate, principalmente, sulla base di aspetti come il carico emissivo, le caratteristiche orografiche, le caratteristiche meteo-climatiche e il grado di urbanizzazione del territorio, al fine di individuare le aree in cui uno o più di tali aspetti sono predominanti nel determinare i livelli degli inquinanti e di accorpate tali aree in zone contraddistinte dall'omogeneità degli aspetti predominanti”;

- “la valutazione della qualità dell'aria ambiente è fondata su una rete di misura e su un programma di valutazione. Le misurazioni in siti fissi, le misurazioni indicative e le altre tecniche di valutazione permettono che la qualità dell'aria ambiente sia valutata in conformità alle disposizioni del decreto”;
- “la valutazione della qualità dell'aria ambiente condotta utilizzando determinati siti fissi di campionamento e determinate tecniche di valutazione è considerata idonea a rappresentare la qualità dell'aria all'interno dell'intera zona o dell'intero agglomerato di riferimento qualora la scelta dei siti e delle altre tecniche sia operata in conformità alle disposizioni del decreto”;
- “ai fini della valutazione della qualità dell'aria ambiente è evitato l'uso di stazioni di misurazione non conformi e, nel rispetto dei canoni di efficienza, di efficacia e di economicità, l'inutile eccesso di stazioni di misurazione. Le stazioni di misurazione che non sono inserite nella rete di misura e nel programma di valutazione non sono utilizzate per le finalità del decreto”;
- “la rete di misura è soggetta alla gestione o al controllo pubblico. Il controllo pubblico è assicurato dalle Regioni o dalle Province Autonome o, su delega, dalle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente. Le stazioni di misurazione non soggette a tale gestione o controllo non sono utilizzate per le finalità del decreto”;
- “la valutazione della qualità dell'aria ambiente è il presupposto per l'individuazione delle aree di superamento dei valori, dei livelli, delle soglie e degli obiettivi previsti dal decreto”;
- “i piani e le misure da adottare ed attuare in caso di individuazione di una o più aree di superamento all'interno di una zona o di un agglomerato devono

agire, secondo criteri di efficienza ed efficacia, sull'insieme delle principali sorgenti di emissione, ovunque localizzate, che influenzano tali aree, senza l'obbligo di estendersi all'intero territorio della zona o dell'agglomerato, né di limitarsi a tale territorio”.

Secondo quanto previsto dal D.Lgs 155/2010 (come dal precedente D.Lgs 351/1999), i soggetti responsabili della valutazione e gestione della qualità dell'aria (Regioni e Province Autonome) hanno l'obbligo di predisporre un Piano di Qualità dell'Aria nei casi in cui i livelli degli inquinanti superino i valori limite o i valori obiettivo stabiliti dal decreto stesso. L'obiettivo principale dei Piani di Qualità dell'Aria è di individuare misure e provvedimenti efficaci al fine di garantire il rispetto dei limiti entro i termini stabiliti. Le Regioni e le Province Autonome devono trasmettere al Ministero dell'Ambiente e all'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) i Piani di Qualità dell'aria entro 18 mesi dalla fine dell'anno di riferimento, ossia quello in cui sono stati registrati i superamenti.

Nei successivi paragrafi sono riportate alcune disposizioni della normativa vigente, con riferimento alle attività di monitoraggio degli inquinanti atmosferici.

1.4. Il monitoraggio della qualità dell'aria

Il monitoraggio di un inquinante atmosferico consiste nella determinazione quantitativa della sua presenza e della sua distribuzione spazio-temporale in atmosfera. Il monitoraggio della qualità dell'aria è una delle problematiche più complesse nel campo della salvaguardia ambientale ed è mirato a determinare le concentrazioni dei composti potenzialmente pericolosi per la salute dell'uomo e per l'ambiente (Ferretti e Nimis, 2001; Lorenzini e Nali, 2005).

La conoscenza e il monitoraggio della composizione dell'aria, in termini qualitativi e quantitativi, risultano necessari per:

- la verifica del rispetto dei limiti delle concentrazioni di inquinanti imposti dalla normativa;
- le analisi territoriali e la pianificazione: le informazioni relative alla distribuzione spazio-temporale degli inquinanti rappresenta un elemento strategico nell'ambito dei processi decisionali per la localizzazione di attività sul territorio (aree residenziali, impianti industriali, ospedali etc.);
- la verifica dell'impatto sulla componente "aria" a seguito della realizzazione di un intervento: il monitoraggio è una componente fondamentale dei processi decisionali e di pianificazione pertanto deve essere effettuato ex ante, ex post e in itinere.

La normativa nazionale sul tema dell'inquinamento atmosferico fissa, per ciascun inquinante o classe di inquinanti, valori ammissibili predefiniti di concentrazione (soglie di inquinamento ammissibile o standard di qualità dell'aria).

Tali norme fissano quattro "livelli" ammissibili di concentrazione:

- valori limite di qualità dell'aria: per valori di concentrazione superiori a tali limiti i rischi per la salute si ritengono intollerabili;
- livelli di allarme: valori che richiedono interventi di mitigazione immediati per evitare il raggiungimento dei valori limite. Inoltre, se tali valori venissero registrati per lunghi periodi potrebbero essere dannosi per la salute;
- livelli di attenzione: valori che, se permangono a lungo, possono portare al raggiungimento dei livelli di allarme;
- valori guida di qualità dell'aria: valori di concentrazione che, se mantenuti, assicurano nel tempo la salvaguardia della salute e dell'ambiente.

Le recenti normative a livello comunitario, nazionale e regionale hanno determinato la necessità e dettato i criteri per un riordino del sistema di monitoraggio della qualità dell'aria.

In particolare, il D. Lgs. 155/2010, art. 2, definisce la valutazione della qualità dell'aria come: "l'utilizzo dei metodi previsti dal decreto per misurare, calcolare, prevedere o stimare i livelli di un inquinante nell'aria ambiente". Il controllo della qualità dell'aria si effettua, quindi, attraverso l'integrazione di diverse tecniche di rilevazione e valutazione, quali:

- le misure di concentrazione degli inquinanti gassosi e del particolato che forniscono informazioni relative allo stato di alterazione delle condizioni ambientali;
- l'elaborazione dei dati di qualità dell'aria, l'applicazione di algoritmi stocastici e deterministici che permettono la costruzione della distribuzione territoriale dei livelli di concentrazione e deposizione e la valutazione del diverso contributo delle singole sorgenti emissive.

1.5. Le centraline di monitoraggio degli inquinanti

Il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico consiste nella misurazione degli agenti aerodispersi potenzialmente pericolosi per la salute o per l'ambiente, al fine di rilevare la qualità dell'aria. I valori monitorati dalle apposite strumentazioni vengono comparati con i limiti imposti dalla normativa.

La stima diretta delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici può essere condotta avvalendosi di vari metodi, sia manuali che automatizzati. I metodi manuali sono tecniche specifiche che devono essere eseguite quando si raccoglie e si analizza un campione di inquinante aerodisperso. I metodi automatizzati fanno riferimento, in genere, a strumenti in grado di raccogliere ed analizzare le concentrazioni degli inquinanti in modo continuo. Tali strumenti devono, ovviamente, rispondere a requisiti tecnici prestabiliti ed essere approvati da uno dei centri indicato dall'autorità competente.

Per ciascun inquinante la normativa individua lo specifico metodo di riferimento per la misurazione, il principio chimico-fisico di misura e le modalità di funzionamento della strumentazione utilizzata per il monitoraggio.



Fig. 1.6 - Centralina di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico

Il monitoraggio di biossido di zolfo (SO_2), degli ossidi di azoto (NO e NO_2), dell'ozono (O_3) e del monossido di carbonio (CO) viene realizzato mediante l'impiego di strumentazione automatica (analizzatori) contenuta nelle centraline fisse e/o mobili. Il campionamento dell'aria avviene con frequenza oraria e ciascuno strumento

determina la concentrazione dell'inquinante specifico mediante un principio analitico caratteristico. I metodi di riferimento per la misurazione delle concentrazioni di biossido di zolfo, ossidi di azoto, monossido di carbonio sono descritti nel Decreto Legislativo 155/2010 (Allegato VI).

Un analizzatore è tipicamente costituito da un sistema di aspirazione dell'aria (una pompa) che ne preleva una parte immettendola in una piccola camera, detta "cella di misura" che contiene i dispositivi necessari ad effettuare le misurazioni.

Le stazioni di monitoraggio, sulla base del D.Lgs 155/2010, sono classificate in base al tipo di zona dove la centralina è localizzata (urbana, periferica, rurale) e alla tipologia di emissione dominante (traffico, fondo, industria).

Per quanto riguarda il tipo di zona, la normativa propone la seguente classificazione:

- sito fisso di campionamento urbano: sito fisso inserito in aree edificate in continuo o almeno in modo predominante;
- sito fisso di campionamento suburbano (o periferico): sito fisso inserito in aree largamente edificate in cui sono presenti sia zone edificate che zone non urbanizzate;
- sito fisso di campionamento rurale: sito fisso inserito in tutte le aree diverse da quelle individuate per i siti di tipo urbano e suburbano. In particolare, il sito fisso si definisce rurale remoto se è localizzato ad una distanza maggiore di 50 km dalle fonti di emissione.

Tipo di stazione (Decisione 2001/752/CE)	Traffico (T)
	Background (B)
	Industriale (I)
Tipo di area (Decisione 2001/752/CE)	Urbana (U)
	Suburbana (S)
	Rurale (R)
Caratteristiche dell'area (Criteria for EUROAIRNET, 1999)	Residenziale (R)
	Commerciale (C)
	Industriale (I)
	Agricola (A)
	Naturale (N)

Fig. 1.6bis – Classificazione delle centraline di monitoraggio

In base alla tipologia di emissione dominante la normativa, inoltre, classifica le stazioni di misurazione in:

- stazioni di misurazione di traffico: stazioni ubicate in posizione tale che il livello di inquinamento sia influenzato prevalentemente da emissioni da traffico, provenienti da strade limitrofe con intensità di traffico medio alta;

- stazioni di misurazione di fondo (o di background): stazioni ubicate in posizione tale che il livello di inquinamento non sia influenzato prevalentemente da emissioni da specifiche fonti (industrie, traffico, riscaldamento residenziale, ecc.), ma dal contributo integrato di tutte le fonti poste sopravento alla stazione rispetto alle direzioni predominanti dei venti nel sito;
- stazioni di misurazione industriale: stazioni ubicate in posizione tale che il livello di inquinamento sia influenzato prevalentemente da singole fonti industriali o da zone industriali limitrofe.

Nella seguente tabella sono riportati i valori limite imposti dalla normativa (D.Lgs 155/2010 – cfr. Allegato XI) per i principali inquinanti da traffico monitorati dalle centraline.

Inquinante	Periodo di mediazione	Limite	Superamenti in un anno
PM ₁₀	media giornaliera	50 µg/m ³	< 35
	media annuale	40 µg/m ³	
PM _{2.5}	media annuale	25 µg/m ³	
NO ₂	media oraria	200 µg/m ³	< 18
	media annuale	40 µg/m ³	
SO ₂	media oraria	350 µg/m ³	< 24
	media giornaliera	125 µg/m ³	< 3
CO	media massima giornaliera su 8 ore*	10 mg/m ³	

*La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore si determina con riferimento alle medie consecutive su 8 ore, calcolate sulla base di dati orari ed aggiornati ogni ora; ogni media su 8 ore in tal modo calcolata è riferita al giorno nel quale la serie di 8 ore si conclude: la prima fascia di calcolo è quella compresa tra le ore 17:00 del giorno precedente e le ore 1:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per un giorno è quella compresa tra le ore 16:00 e le ore 24:00 del giorno stesso.

1.6. Analisi dei dati di inquinamento

In questa sezione sono riportati dati di inquinamento atmosferico relativamente ai contesti territoriali europeo, nazionale e locale. I dati a scala europea e nazionale sono forniti ed elaborati prevalentemente dall'European Environmental Agency (EEA) e dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Per quanto riguarda la scala locale, sono stati raccolti ed analizzati dati relativi al Comune di Napoli, forniti dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Campania (ARPAC).

Il contesto europeo

L'European Environmental Agency (EEA) fornisce dati relativi all'inquinamento atmosferico in Europa (database AirBase). In questo contesto, si riportano alcune elaborazioni effettuate dall'EEA ritenute rilevanti ai fini della ricerca.

Il grafico in Fig.1.7 mostra l'andamento delle emissioni connesse al settore dei trasporti di alcuni inquinanti dal 1990 al 2010. Il maggior decremento percentuale è stato registrato per il Monossido di Carbonio (CO), con una riduzione del 76%. Gli altri inquinanti hanno subito una riduzione meno rilevante. In particolare, tra il 2009 e il 2010, tutte le emissioni, ad eccezione degli Ossidi di Azoto (NO_x), sono diminuite (tra il 2.5% e il 10%). L'incremento degli NO_x, secondo l'EEA, può essere ricondotto all'aumento del trasporto merci su strada.

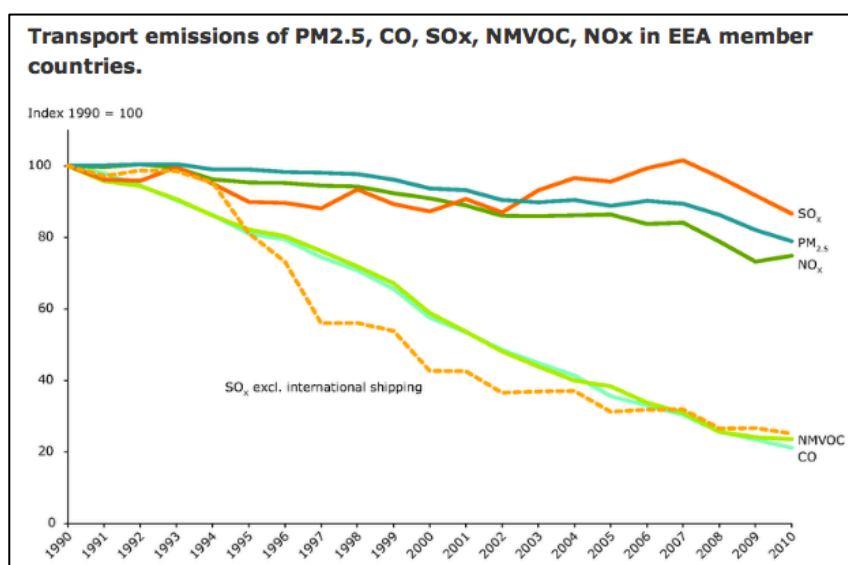


Fig. 1.7 – Emissioni dovute al settore dei trasporti nei paesi dell'UE (Fonte: EEA)

I grafici riportati in Fig.1.8 mostrano il contributo, in Europa, del settore dei trasporti al totale delle emissioni in atmosfera di sei inquinanti, relativamente all'anno 2009. Inoltre, in tale figura, è indicata la ripartizione percentuale delle emissioni per ciascuna modalità di trasporto (trasporto su strada, trasporto su ferro etc.). Gli Ossidi di Azoto (NO_x), il Monossido di Carbonio (CO), il $\text{PM}_{2.5}$ e il PM_{10} apportano il maggiore contributo percentuale alle emissioni dovute all'intero settore dei trasporti. Inoltre, il maggior contributo percentuale del trasporto su strada è dovuto agli NO_x (33%) e al CO (27%).

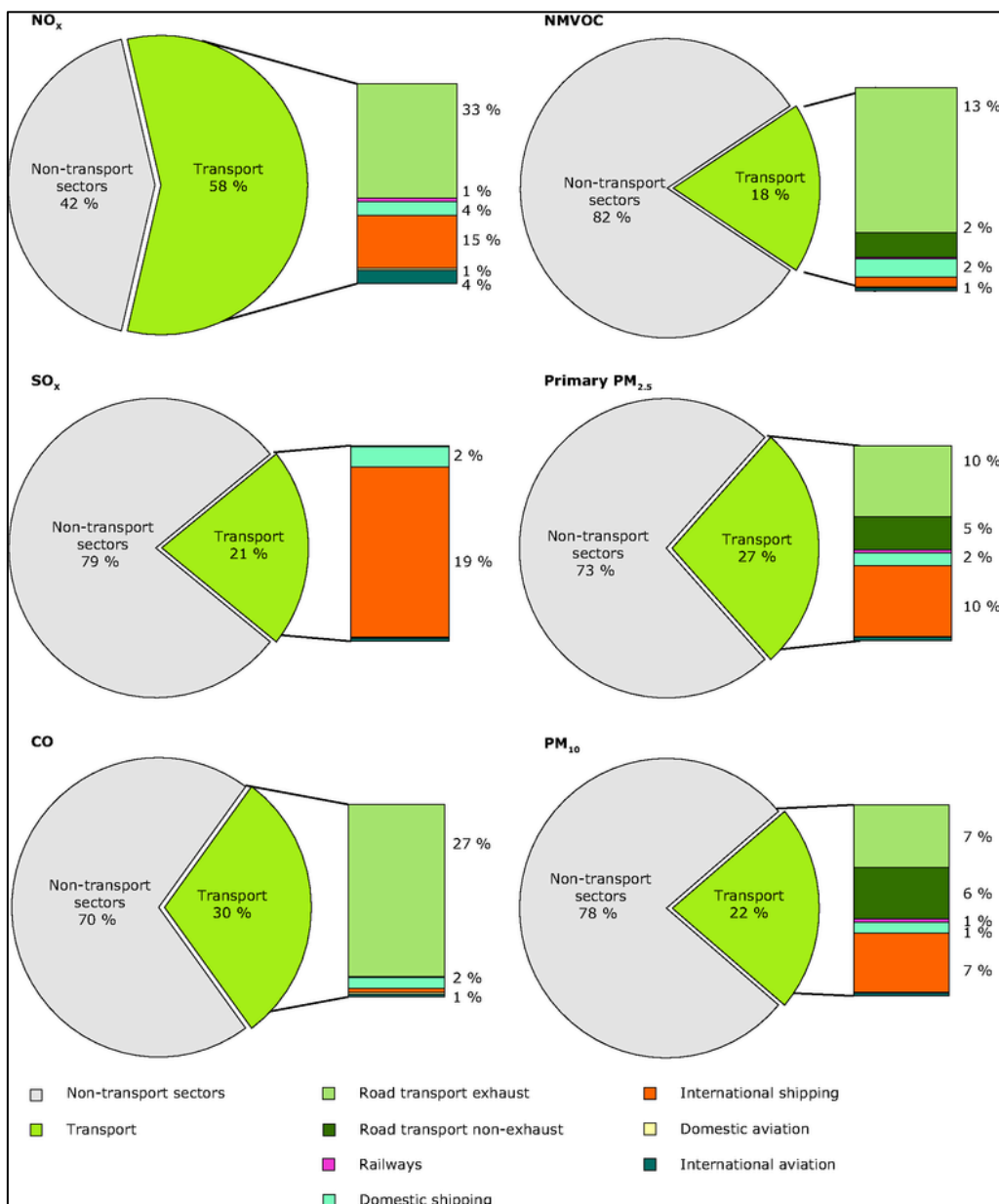


Fig. 1.8 – Il contributo del settore dei trasporti al totale delle emissioni dei principali inquinanti nel 2009 nei paesi dell'UE (Fonte: EEA)

In Tab. 1, sono indicate le percentuali di alcuni inquinanti (CO, PM_{2,5}, e NO_x), distinte per paese, relativamente alle emissioni dovute al trasporto su strada (anno 2011). In particolare, si nota che le emissioni di Ossidi di Azoto (NO_x), come già riscontrato, sono fortemente influenzate dal settore dei trasporti per tutti i paesi presi in considerazione (Fig.1.9). In Italia, la quota parte di Monossido di Carbonio (CO), sempre generato dal traffico veicolare, presenta valori più elevati rispetto agli altri paesi, mentre il PM_{2,5} presenta valori percentuali più o meno costanti per tutti i paesi.

Paese	% CO	% PM _{2,5}	%NO _x
Italia	39%	21%	52%
Austria	23%	19%	45%
Svezia	30%	22%	42%
Francia	14%	18%	56%
Germania	30%	21%	37%
Spagna	13%	22%	33%

Tab.1 – Percentuale di inquinanti per Paese dovuti al trasporto su strada, anno 2011 (Fonte EEA)

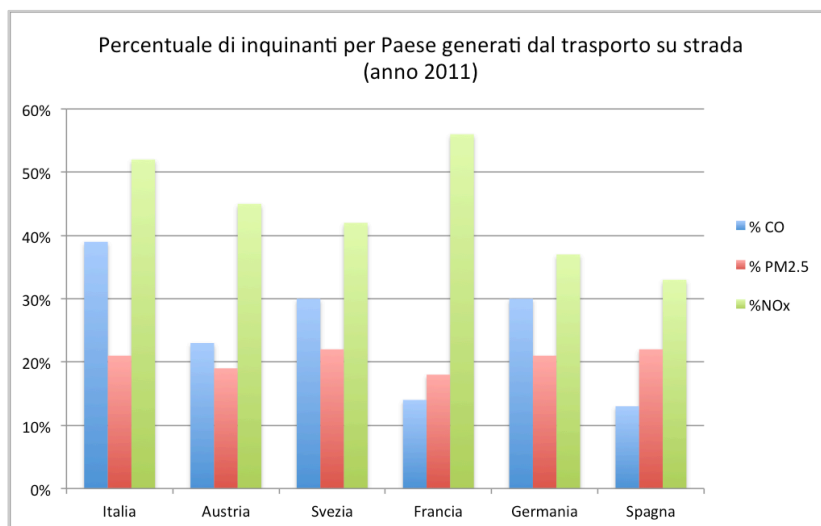


Fig.1.9 -Percentuale di inquinanti per Paese dovuti al trasporto su strada, anno 2011 (Fonte: elaborazione su dati EEA)

Nelle Fig. 1.10-1.13 sono indicate per l'Italia e per ciascun inquinante (NO_x , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, CO), le quantità di emissioni dal 1990 al 2010 e la ripartizione percentuale per settore di emissione (trasporto su strada, processi industriali, agricoltura etc.). Dai grafici riportati nelle figure in questione, si nota che il $\text{PM}_{2.5}$ è l'inquinante che presenta una minore riduzione percentuale nel periodo oggetto di studio.

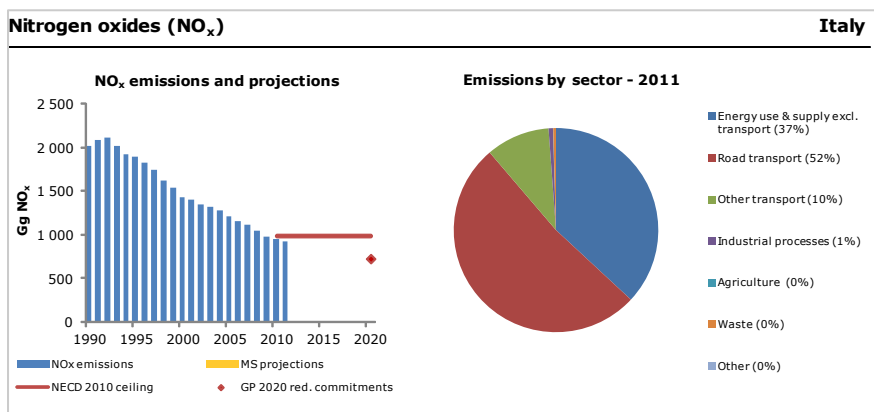


Fig.1.10 – Emissioni di NO_x 1990-2010 e ripartizione per settore (Fonte: EEA)

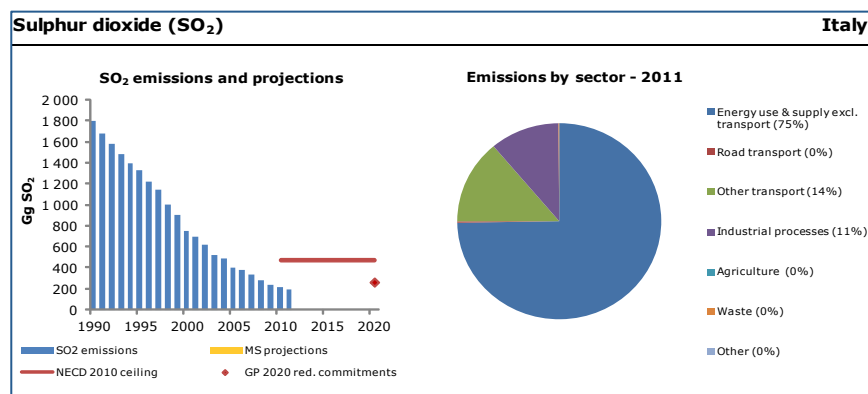


Fig.1.11 – Emissioni di SO_2 1990-2010 e ripartizione per settore (Fonte: EEA)

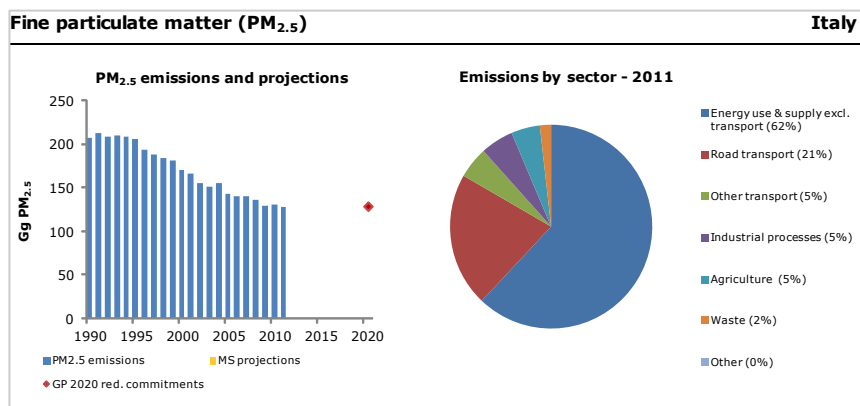


Fig.1.12 – Emissioni di PM_{2.5} 1990-2010 e ripartizione per settore (Fonte: EEA)

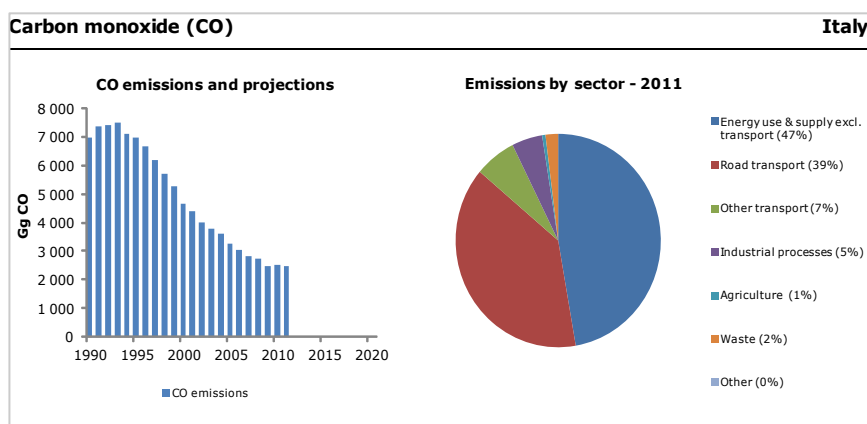


Fig.1.13 – Emissioni di CO 1990-2010 e ripartizione per settore (Fonte: EEA)

Si riportano, inoltre, alcune mappe tematiche relative alla distribuzione dei principali inquinanti da traffico su scala europea. In Fig. 1.14, sono riportate le concentrazioni medie annuali di PM₁₀, relativamente al 2011, calcolate su medie giornaliere, mentre in Fig.1.15 sono riportate le concentrazioni medie annue di CO basate sulle medie massime giornaliere calcolate su 8 ore. Come prevedibile, i valori più elevati di concentrazioni inquinanti sono riscontrati in corrispondenza delle principali aree urbane. In particolare, con riferimento alle concentrazioni di PM₁₀ (Fig. 1.14), il valore limite annuale di concentrazione (pari a 40 µg/m³) è stato superato più frequentemente in Polonia, in Italia, in Slovacchia, nelle regioni dei Balcani e in Turchia. Al momento non sono reperibili informazioni su tale comportamento.

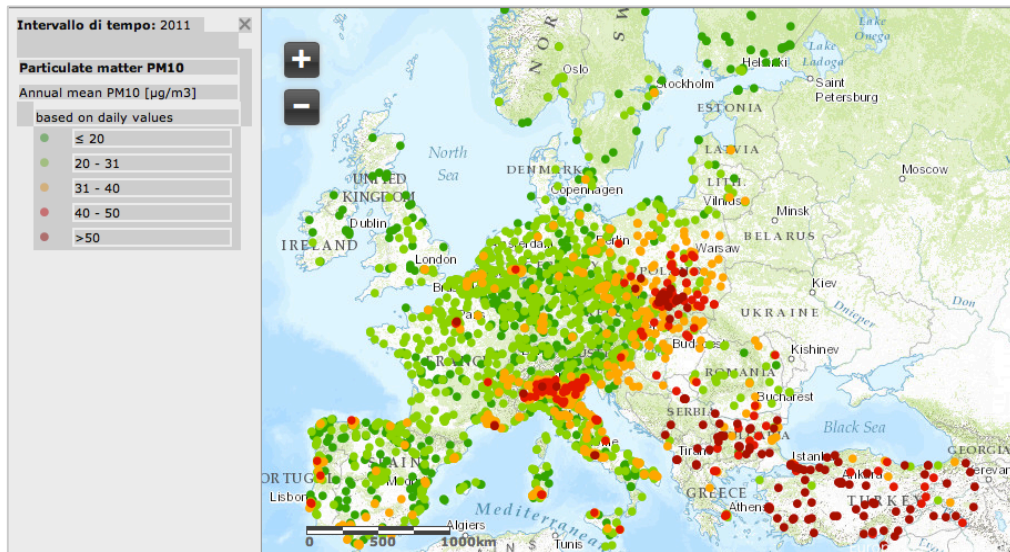


Fig. 1.14 – Distribuzione delle concentrazioni medie annue di PM_{10} , anno 2011 (Fonte: EEA)

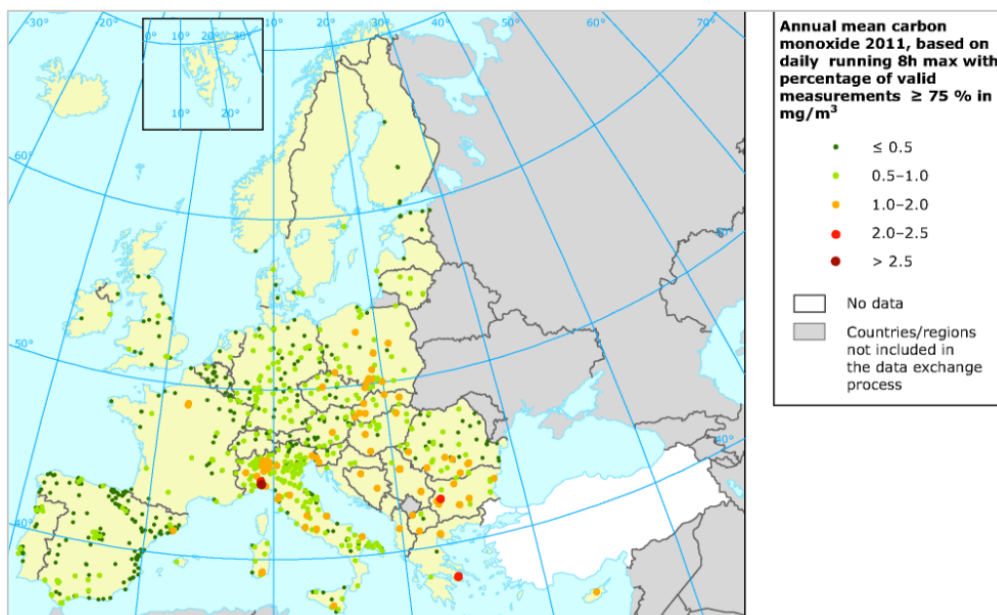


Fig. 1.15 – Distribuzione delle concentrazioni medie annue di CO, anno 2011 (Fonte: EEA)

L'European Environmental Agency, a partire dai dati di concentrazione di PM₁₀ forniti dal database AirBase, ha stimato l'esposizione della popolazione nelle città europee a livelli di concentrazione superiori alla soglia limite imposta dalla normativa (limite giornaliero: 50 µg/m³, da non essere superato per più di 35 volte durante l'anno). La stima dell'esposizione è effettuata sulla base delle misure di inquinanti rilevate dalle stazioni di background (non di traffico). Nel 2011, circa il 33% della popolazione nelle aree urbane dell'Unione Europea è stata esposta a valori di concentrazione superiori al limite di normativa (Fig.1.16).

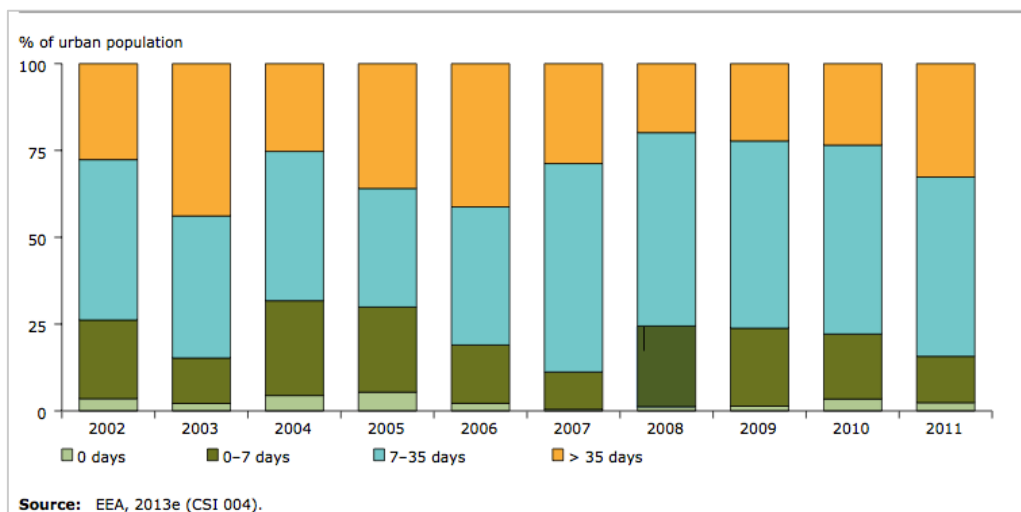


Fig. 1.16 – Percentuale di popolazione nelle aree urbane dell'UE esposta a livelli di concentrazione superiori alla soglia (Fonte: EEA)

Inoltre, in Fig.1.17 è indicata la percentuale di stazioni, appartenente alla rete EU27, dove viene superato il limite di Monossido di Carbonio pari a 10 mg/m³. Si può notare che per le centraline di traffico, la percentuale di stazioni appartenenti alle classi di concentrazione da 1-5 mg/m³ e da 5-10 mg/m³ è maggiore rispetto alle altre tipologie di stazioni.

Infine, in Fig. 1.18, è riportato l'andamento delle concentrazioni di CO tra il 1999 e il 2009 distinto per tipologia di stazione. Si può notare che le concentrazioni relative alle stazioni di traffico risultano sempre maggiori rispetto a quelle registrate dalle altre due tipologie di stazioni.

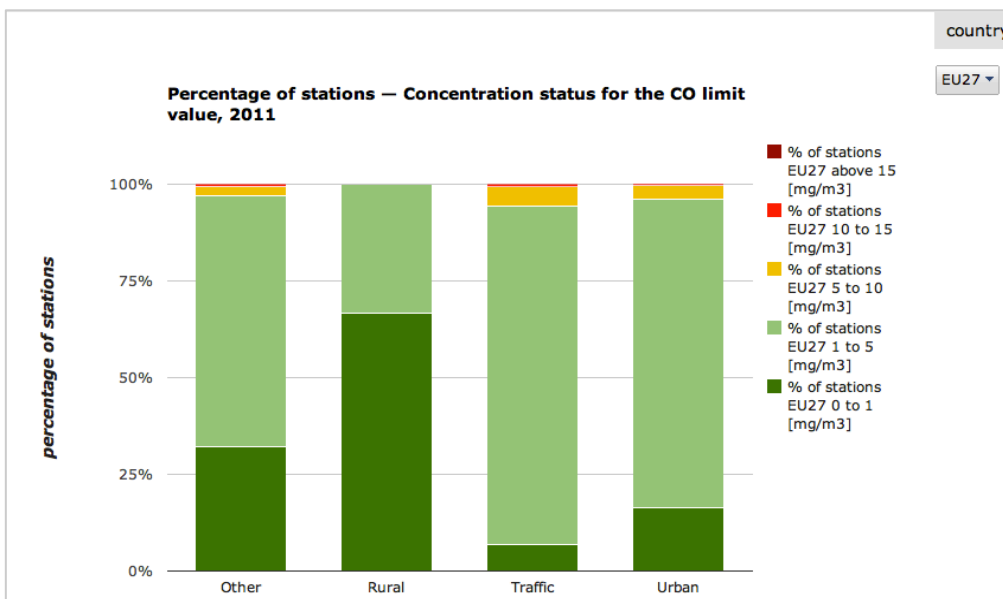


Fig. 1.17 – Percentuale di superamenti di CO per i paesi EU27, per tipologia di stazione, anno 2011 (Fonte: EEA)

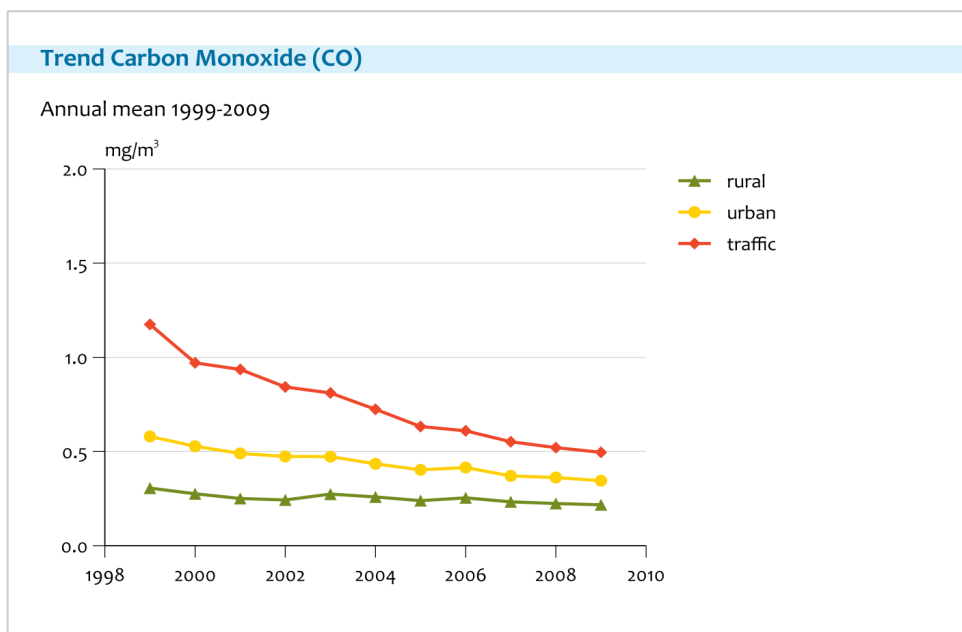


Fig. 1.18 – Concentrazioni di CO per tipologia di stazione (1999-2009) (Fonte: EEA)

Il contesto nazionale

Per quanto riguarda lo scenario italiano, si riportano alcune elaborazioni effettuate dell'EEA relativamente all'anno 2011. In Fig.1.19 è indicata la localizzazione delle 509 stazioni che rilevano il PM₁₀, appartenenti alla rete di rilevamento dell'EEA. In Fig.1.21 è riportata la distribuzione spaziale delle concentrazioni medie annuali. Tali medie sono state calcolate sulla base dei valori di concentrazione media giornaliera, tenendo conto solo delle centraline con percentuale di valori validi superiori al 75%. Nei grafici in Fig. 1.22 e in Fig.1.23 sono indicati, rispettivamente, gli andamenti dal 2002 al 2011 delle concentrazioni di PM₁₀ e O₃ per ciascuna tipologia di centralina (rurale, traffico, urbana).

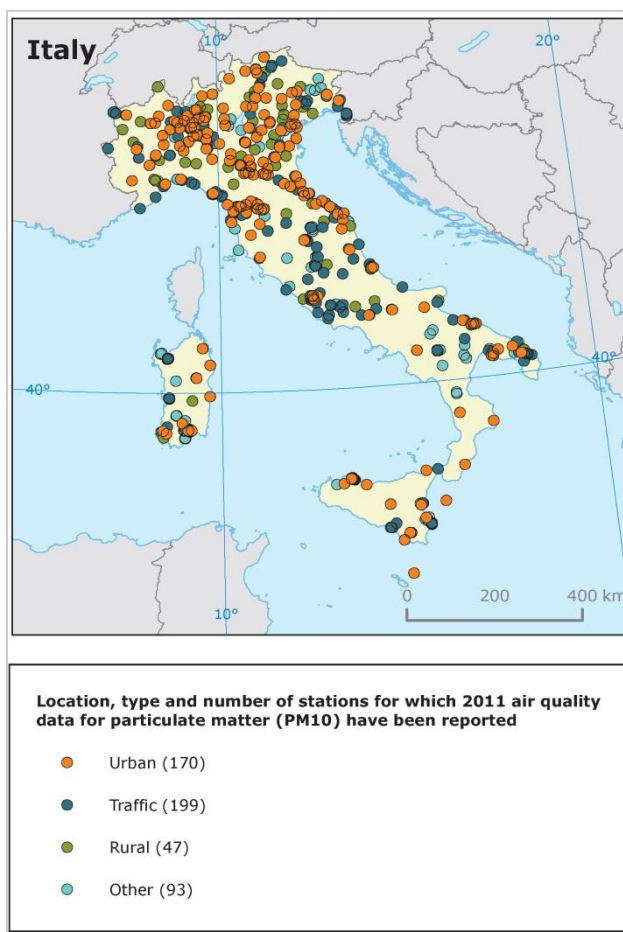


Fig. 1.19 – Localizzazione, tipologia e numero di stazioni di monitoraggio per le analisi di PM₁₀ del 2011 (Fonte: EEA)

Station classification	Number of stations	Percentage
Other	93	18.3
Rural	47	9.2
Traffic	199	39.1
Urban	170	33.4
Total	509	100.0

Fig. 1.20 – Numero e tipologia di stazioni di monitoraggio di PM₁₀ del 2011 (Fonte: EEA)

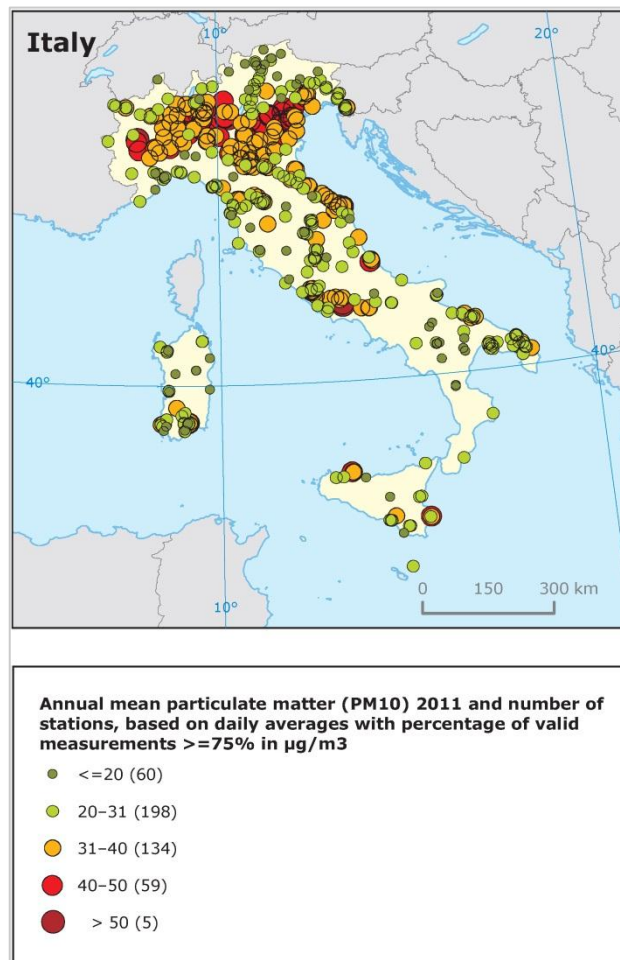


Fig. 1.21 – Media annuale di PM₁₀ del 2011 (Fonte: EEA)

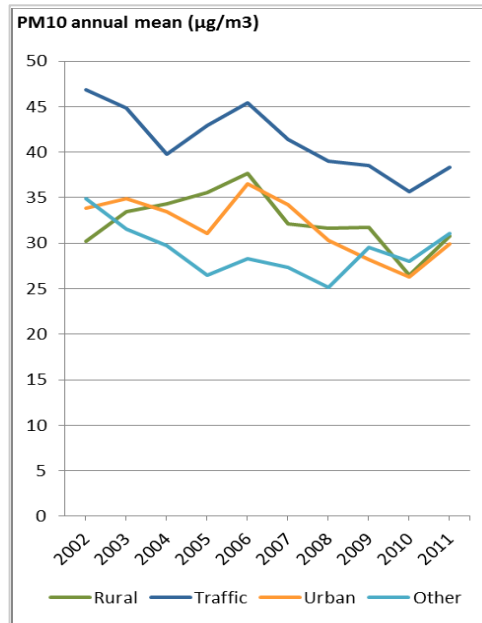


Fig. 1.22 – Andamento delle concentrazioni medie annuali di PM₁₀ (2002-2011) per tipologia di stazione di monitoraggio in Italia

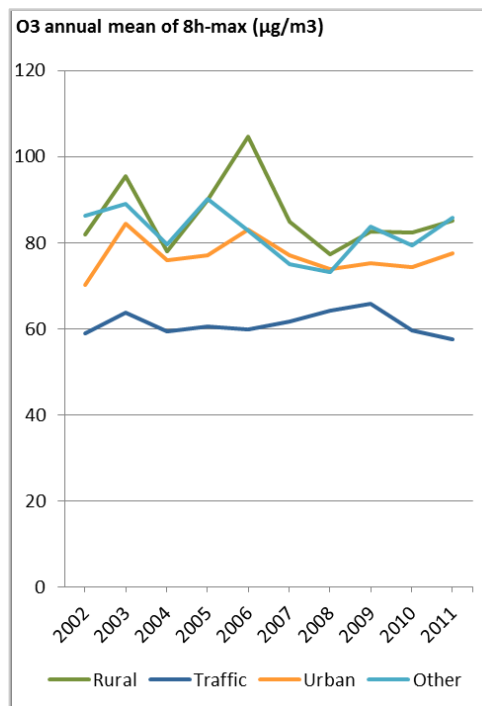


Fig. 1.23 – Andamento delle concentrazioni medie annuali di O₃ (2002-2011) per tipologia di stazione di monitoraggio in Italia

Si riportano, inoltre, alcune elaborazioni a scala comunale effettuate dall'Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale (ISPRA), sulla base dei dati forniti dalle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale e da altre banche dati europee sull'inventario delle emissioni, relative agli anni 2000-2010. L'approccio utilizzato dall'ISPRA è basato su una metodologia di stima uniforme su tutto il territorio nazionale, al fine di fornire uno scenario delle emissioni nelle città italiane.

Per quanto riguarda il materiale particolato proveniente da sorgenti antropiche (PM_{10}), è stato stimato che il settore maggiormente emissivo è quello del riscaldamento domestico, seguito dai trasporti su strada. Inoltre, in alcune città, la presenza di attività industriali può ricoprire un ruolo predominante (ad esempio: Brindisi e Taranto). In media, il contributo del settore del riscaldamento alle emissioni di particolato è pari a circa il 37%, mentre quello dovuto ai trasporti su strada è stimato intorno al 31%. Come evidenziato in Fig. 1.24, l'ISPRA ha stimato che le emissioni maggiori di PM_{10} primario siano riferibili alle città di Roma, Taranto, Milano, Napoli e Torino.

Per quanto riguarda gli Ossidi di Azoto, il trasporto su strada costituisce la principale sorgente emissiva, in quanto risulta il contributo più rilevante in 49 città su 60. In particolare, dalle stime realizzate per il 2010, risulta che il trasporto su strada sia superiore al 70% delle emissioni in 27 città su 60. Inoltre, in alcune specifiche realtà come Brindisi, Taranto e Sassari il contributo maggiore è dovuto alle emissioni derivanti dall'industria o, come per Napoli, Livorno e Genova, dalla presenza di porti e dalle attività ad essi connesse. Come evidenziato in Fig. 1.25, l'ISPRA ha stimato che le emissioni maggiori di NO_x per il 2010 siano riferibili alle città di Genova, Milano, Roma, Napoli e Taranto.

Nelle Fig.1.26 e 1.27 è riportato un confronto delle emissioni di PM_{10} e di CO per gli anni 2000 e 2010 in cinque aree urbane (Genova, Torino, Milano, Roma, Napoli). In tutte le città, e per entrambi gli inquinanti, si riscontrano diminuzioni delle emissioni; tali diminuzioni risultano essere più significative per il CO. La città di Roma, confrontata con le altre aree urbane, presenta valori più elevati di emissioni sia nel 2000 che nel 2010.



Fig. 1.24 – Emissioni di PM₁₀ primario in 60 aree urbane, anni 2000-2010 (Fonte: ISPRA)



Fig. 1.25 – Emissioni di NOx in 60 aree urbane, anni 2000-2010 (Fonte: ISPRA)

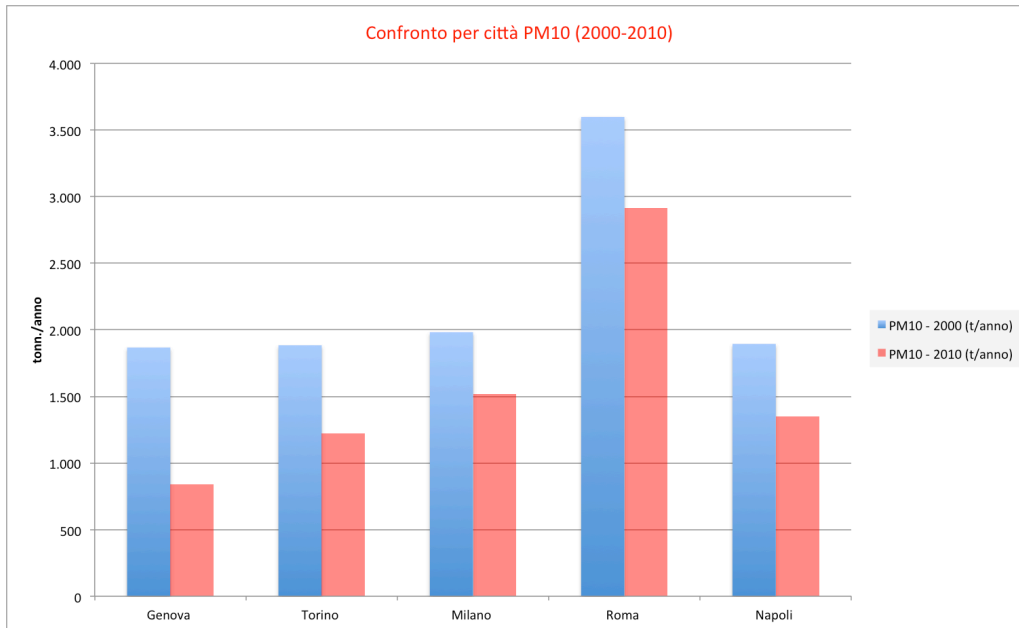


Fig. 1.26 – Emissioni di PM₁₀ in 5 aree urbane, anni 2000-2010 (Fonte: elaborazione su dati ISPRA)

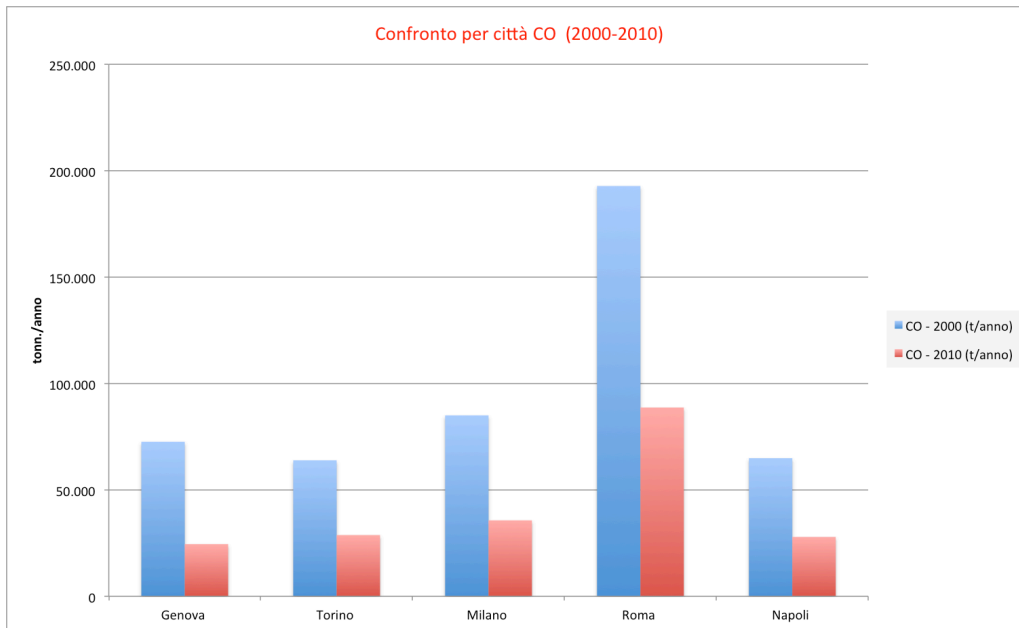


Fig. 1.27 – Emissioni di CO in 5 aree urbane, anni 2000-2010 (Fonte: elaborazione su dati ISPRA)

Infine, secondo una stima effettuata dall'ISTAT sulla mobilità urbana, nel 2011, la quota di autovetture che rispondono agli standard emissivi dei gas di scarico più restrittivi (Euro 4,5,6), che rappresentano il 46.9% dei veicoli immatricolati, è aumentata del 3.8% rispetto all'anno precedente; mentre la percentuale di veicoli Euro 0, Euro 1 ed Euro 2 si è ridotta, dal 2009 al 2011, di circa il 6.4% (Fig.1.28).

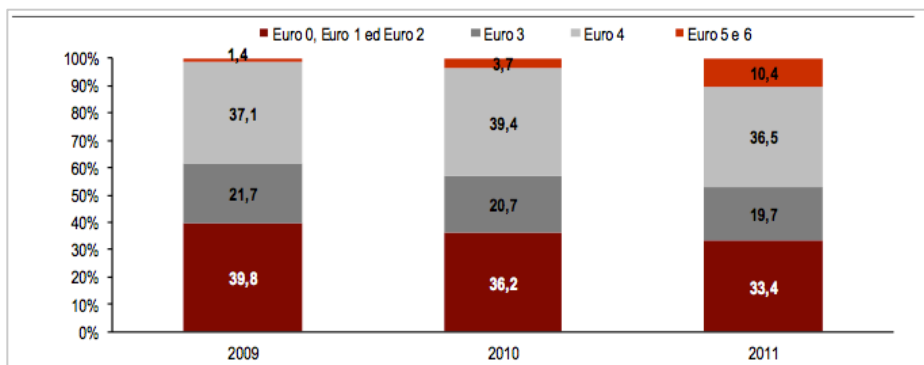


Fig. 1.28- Composizione percentuale di autovetture per standard emissivo nel complesso dei comuni Capoluogo di Provincia, anno 2011 (Fonte: ISTAT)

Inoltre, le autovetture alimentate a benzina, pur rappresentando il 57,7% delle auto circolanti, sono diminuite di 1,3 punti percentuali tra il 2010 e il 2011. Le auto a gasolio sono in aumento, raggiungendo il 35,7% del parco circolante, e le auto ad alimentazione ibrida e a metano rappresentano il 6,6% del parco circolante.

Il contesto comunale: analisi dei dati per il Comune di Napoli

La rete di rilevamento della qualità dell'aria del Comune di Napoli è costituita da nove centraline (di cui una, la NA4, è stata dismessa) la cui localizzazione è indicata in Tab. 2 e in Fig. 1.29. La classificazione delle centraline, relativamente al tipo di stazione e alla tipologia di area, risponde a quanto stabilito dalla direttiva 2001/752/CE del 17 ottobre 2001. In particolare, sul territorio comunale sono presenti:

- Stazioni di background suburbano (BS): stazioni utilizzate per monitorare i livelli medi dell'inquinamento all'interno di aree suburbane, localizzate all'interno di aree verdi (parchi, impianti sportivi) non sottoposte direttamente a sorgenti di inquinamento. Tali centraline misurano tutti gli inquinanti primari e secondari, allo scopo di fornire una misura di fondo da utilizzare come riferimento;
- Stazioni di traffico urbane (TU): stazioni urbane localizzate in aree con forti gradienti di concentrazione degli inquinanti. Tali centraline devono essere ubicate a 4 metri dal bordo stradale e ad almeno 25 metri da incroci, semafori, fermate autobus;
- Stazioni di traffico suburbane (TS): trovano ubicazione in zone ad elevato traffico e misurano gli inquinanti emessi direttamente dal traffico veicolare.

CODICE	LOCALIZZAZIONE	TIPO	SO2	NO2	CO	PM10	O3
NA1	Osservatorio Astronomico -salita MoiarIELlo, 16	BS	X	X	X	X	X
NA2	Ospedale Santobono - via M.Fiore,6	TU	X	X		X	
NA3	Primo Policlinico - piazza Miraglia, 192-193	TU	X	X	X	X	
NA4	Scuola M. Silio Italico - via G. Cesare, 68	TU		X	X	X	
NA5	Scuola E. Vanvitelli - via L. Giordano, 128	TU		X		X	
NA6	Museo Nazionale - piazza Museo Nazionale, 1	TU		X	X	X	
NA7	Ferrovie dello Stato - corso Novara, 10	TU		X	X	X	
NA8	Ospedale Nuovo Pellegrini - via F.M. Briganti, 255	TS		X		X	X
NA9	ITIS S. Giovanni - via Argine	TS		X		X	X

Tab. 2 – Localizzazione e tipologia delle centraline di monitoraggio dell'ARPAC – Comune di Napoli

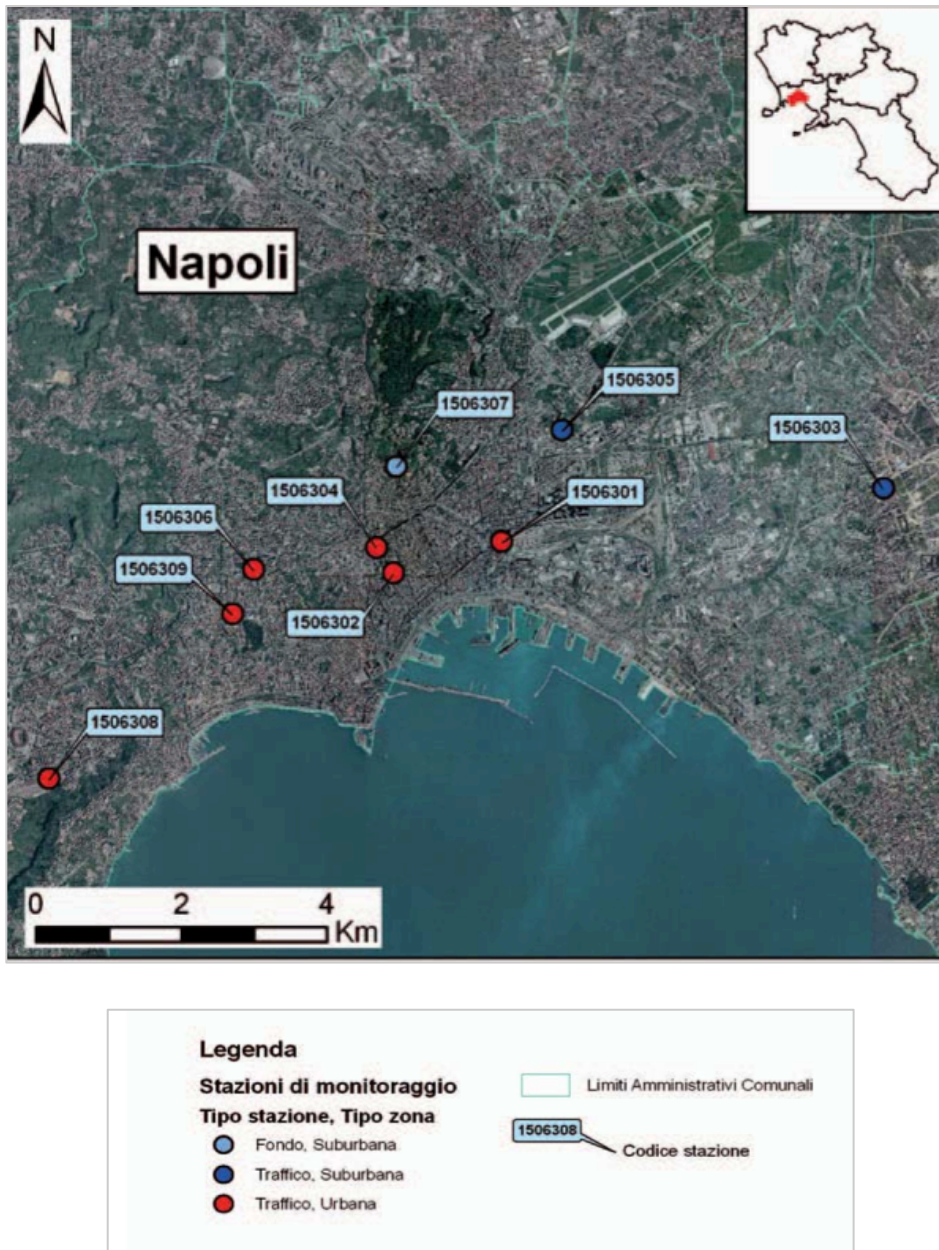


Fig.1.29- Localizzazione delle centraline di monitoraggio dell'ARPAC sul territorio comunale

Sono stati elaborati ed analizzati i dati relativi al biennio 2012-2013 per il Monossido di Carbonio (CO) e per il Particolato Solido (PM₁₀), forniti dall'ARPAC per tutte le stazioni di monitoraggio localizzate sul territorio comunale.

L'analisi è stata strutturata secondo quattro andamenti: negli anni, nell'anno, nel mese e nel giorno. Inoltre, al fine di individuare una possibile relazione tra la piovosità e le concentrazioni di PM₁₀, sono stati messi a confronto i dati di piovosità e di inquinamento.

Si precisa che l'analisi è stata focalizzata prevalentemente su due centraline di monitoraggio: NA1, localizzata nell'area dell'Osservatorio Astronomico, e NA7, localizzata nell'area, ad alto traffico veicolare, della Stazione di Piazza Garibaldi. Tale scelta è dettata dal fatto di voler confrontare i valori di concentrazione rilevati da una stazione di background (NA1) con quelli di una stazione di traffico (NA7).

Si riportano di seguito i risultati delle elaborazioni per il PM₁₀ e per il CO.

Nelle Fig.1.30 e 1.31, relative rispettivamente al 2013 e al 2012, sono indicate le medie annuali di PM₁₀ rilevate da ciascuna centralina di monitoraggio. Per entrambi gli anni si nota che nella stazione NA7 si registra il superamento del valore di soglia annuale imposto dalla normativa, pari a 40 µg/m³.

In Fig. 1.32 è riportato il confronto diretto, per ciascuna centralina, tra le medie annuali di PM₁₀ del 2012 e del 2013, da cui emerge che in quasi tutte le stazioni di monitoraggio è stato registrato un lieve aumento delle concentrazioni, nel passaggio dal 2012 al 2013.

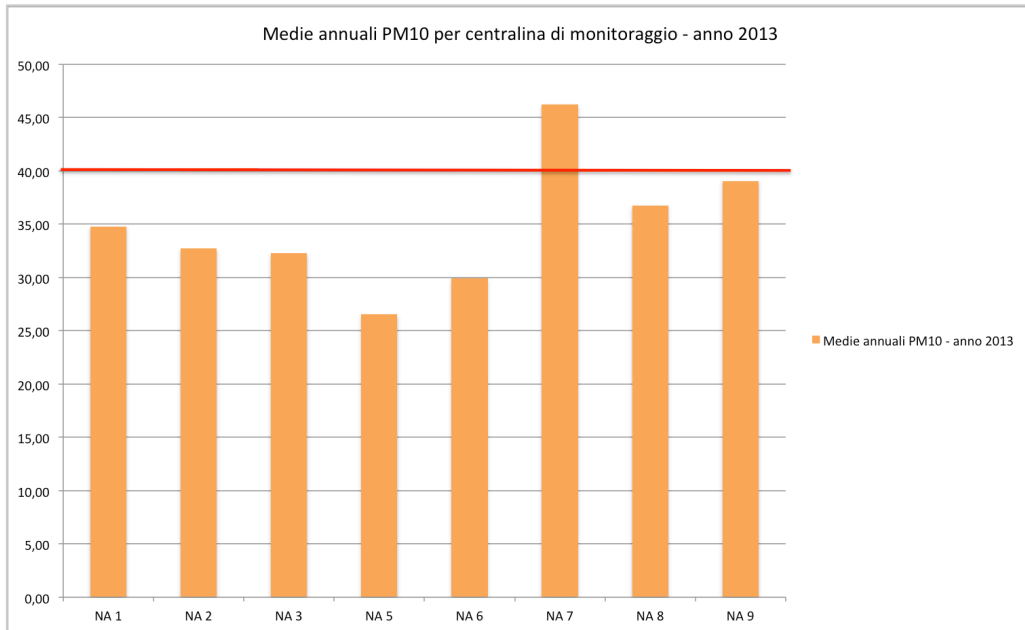


Fig.1.30- Medie annuali PM₁₀ (µg/m³) per centralina di monitoraggio, anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

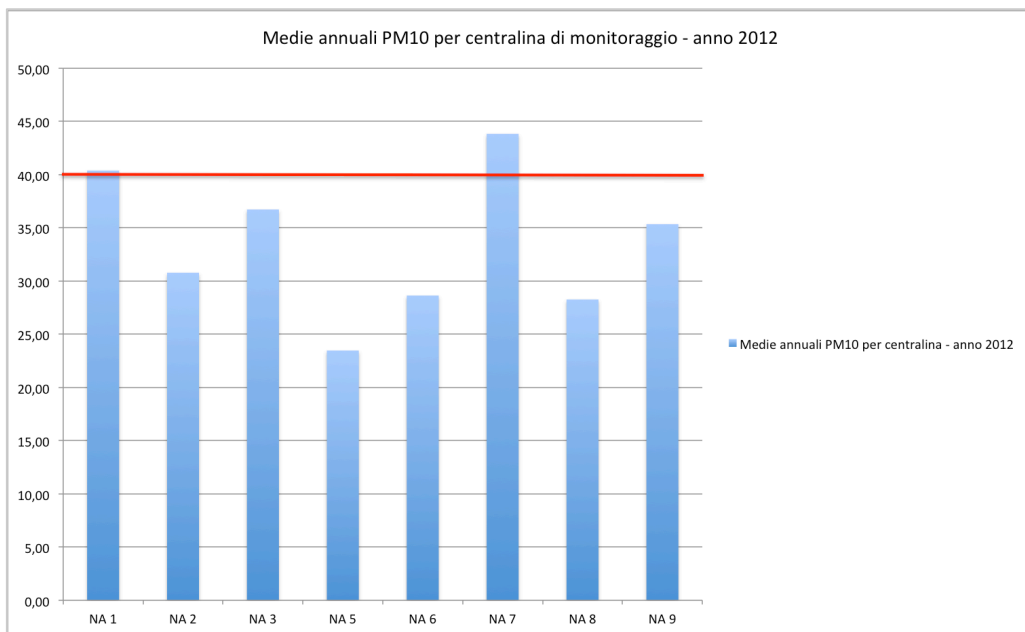


Fig.1.31- Medie annuali PM₁₀ (µg/m³) per centralina di monitoraggio, anno 2012 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

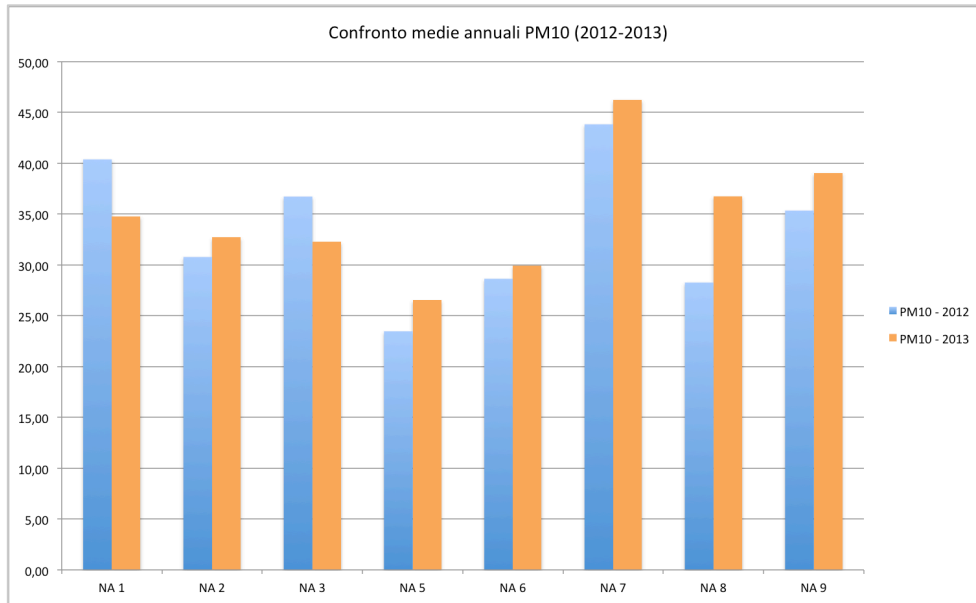


Fig.1.32- Confronto medie annuali PM₁₀ (µg/m³) per centralina di monitoraggio, anno 2012 -2013
(Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

In Fig. 1.33, analogamente a quanto riportato per il PM₁₀, è indicato il confronto tra le concentrazioni di CO per il 2012 e il 2013, per le centraline che rilevano tale inquinante (NA1, NA3, NA6, NA7).

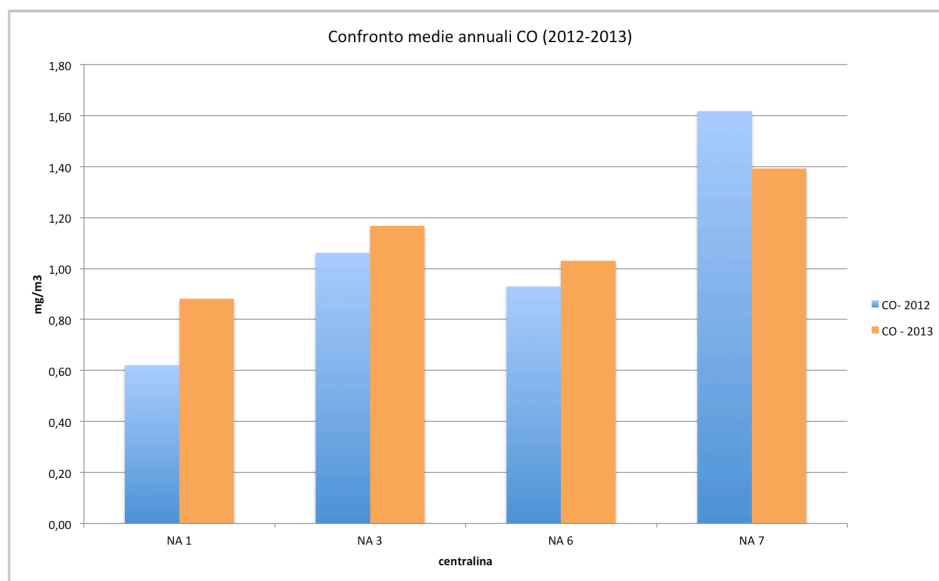


Fig.1.33- Confronto medie annuali CO (mg/m³) per centralina di monitoraggio, anno 2012 -2013
(Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

Nelle Fig.1.34 e 1.35 vi è il confronto delle medie mensili di PM₁₀ tra il 2012 e il 2013 per le centraline NA1 (Osservatorio Astronomico) e NA7 (Ferrovia).

In Fig.1.36, per l'anno 2013, sono indicate, al variare dei mesi, le concentrazioni di PM₁₀ per tutte le stazioni di monitoraggio. Si può notare che i valori più elevati di concentrazione si riscontrano, in tutte le centraline, nei mesi di Gennaio e Febbraio e nei mesi di Novembre e Dicembre. Inoltre, come già osservato in precedenza, la centralina NA7, localizzata in un'area caratterizzata da un elevato traffico, presenta valori prevalentemente più elevati rispetto alle altre centraline.

In Fig. 1.37 è riportato l'andamento mensile, per ciascuna centralina, sempre per l'anno 2013, delle concentrazioni di CO.

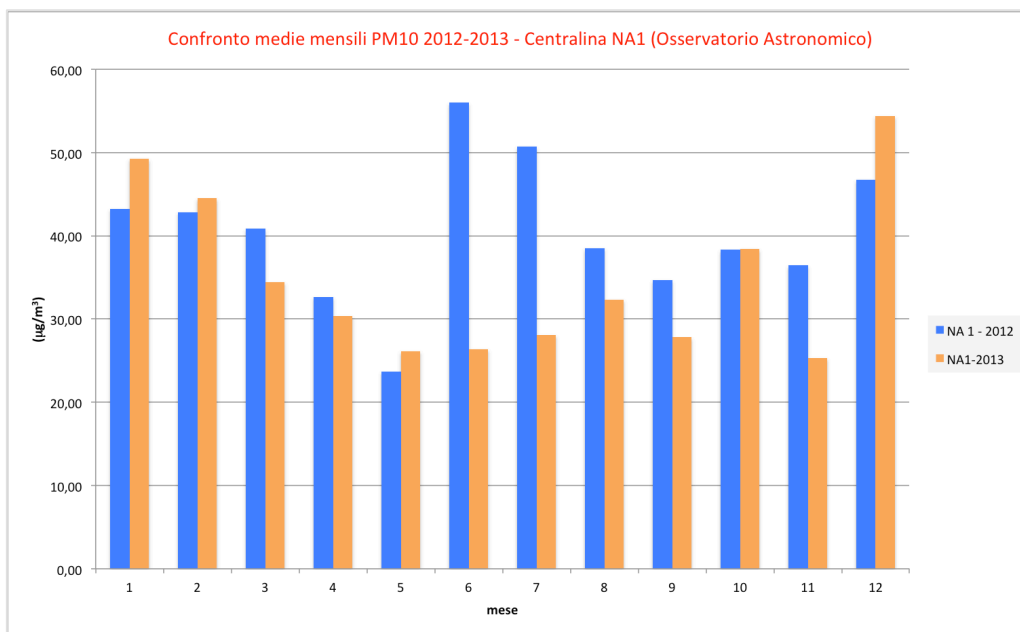


Fig.1.34 - Confronto medie mensili PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA1, anno 2012-2013
(Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

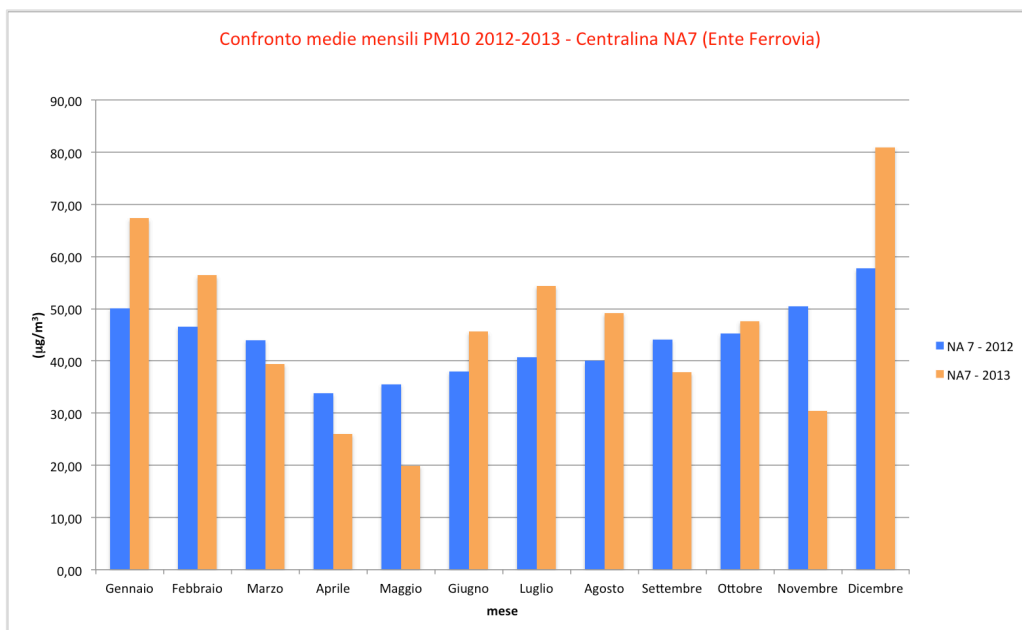


Fig.1.35 - Confronto medie mensili PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA7, anno 2012-2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

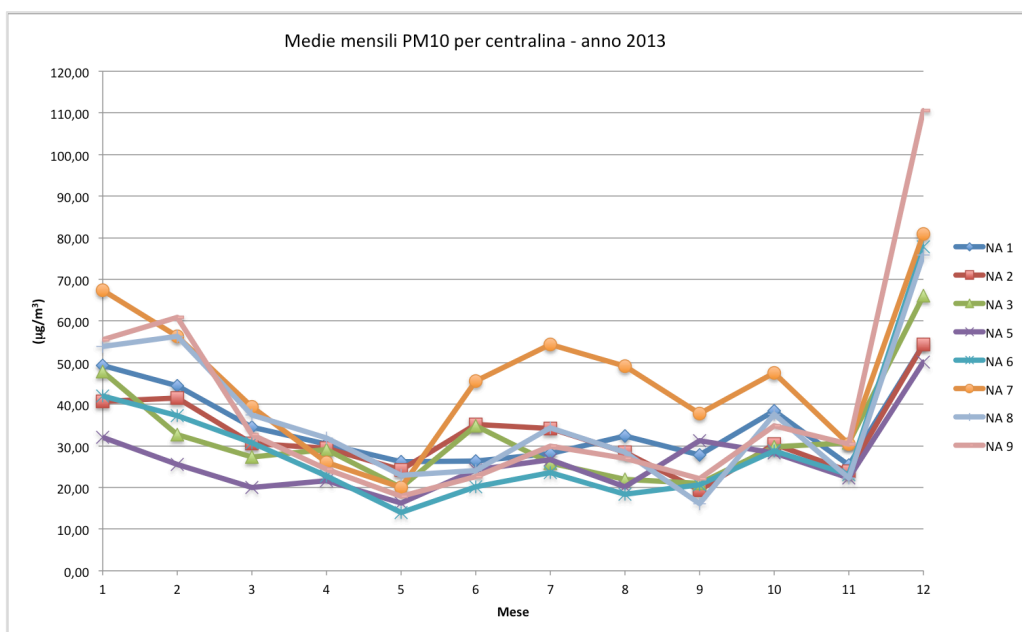


Fig.1.36- Confronto medie mensili PM₁₀ (µg/m³) per centralina di monitoraggio, anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

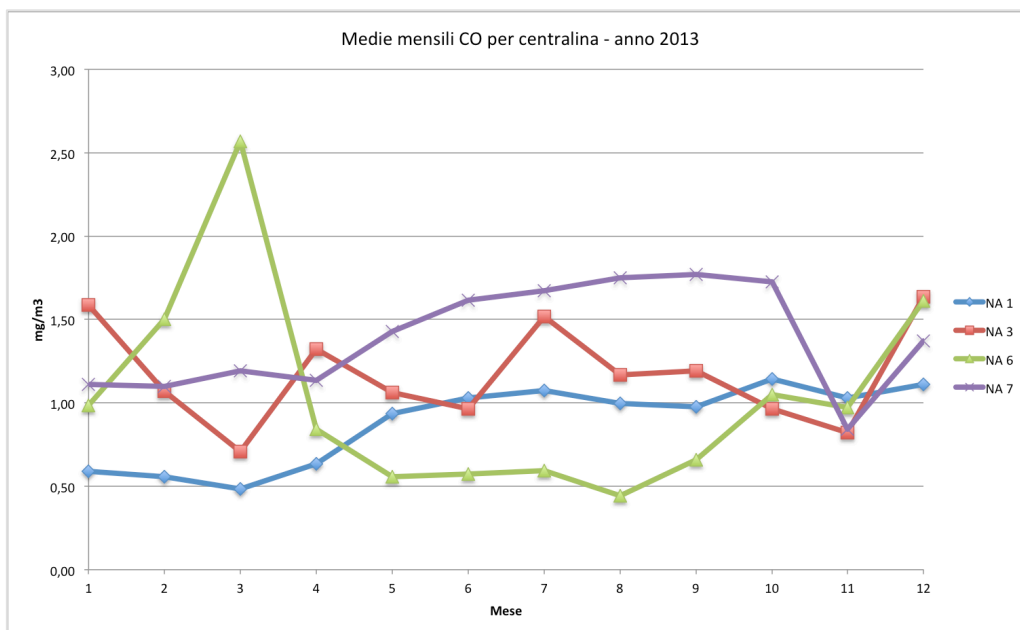


Fig.1.37 - Confronto medie mensili CO (mg/m^3) per centralina di monitoraggio, anno 2013
(Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

Nelle Fig.1.38-1.40 è indicato l'andamento delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{10} per l'anno 2013, rispettivamente per i quadrimestri: Gennaio-Aprile, Maggio-Agosto, Settembre-Dicembre, ponendo a confronto i dati forniti dalle due centraline NA1 e NA7. Si può riscontrare che i valori di concentrazione del PM_{10} registrati dalla centralina dell'Osservatorio Astronomico (NA1) sono prevalentemente inferiori rispetto da quelli rilevati dalla centralina della Stazione Garibaldi (NA7). Tuttavia, si può notare che in alcuni giorni dei mesi di Aprile-Maggio e Ottobre-Novembre i valori di concentrazione rilevati dalla stazione NA1 di background sono più alti rispetto a quelli misurati dalla stazione di traffico NA7. Infine, si può osservare una corrispondenza dei picchi di inquinamento rilevati dalle due centraline.

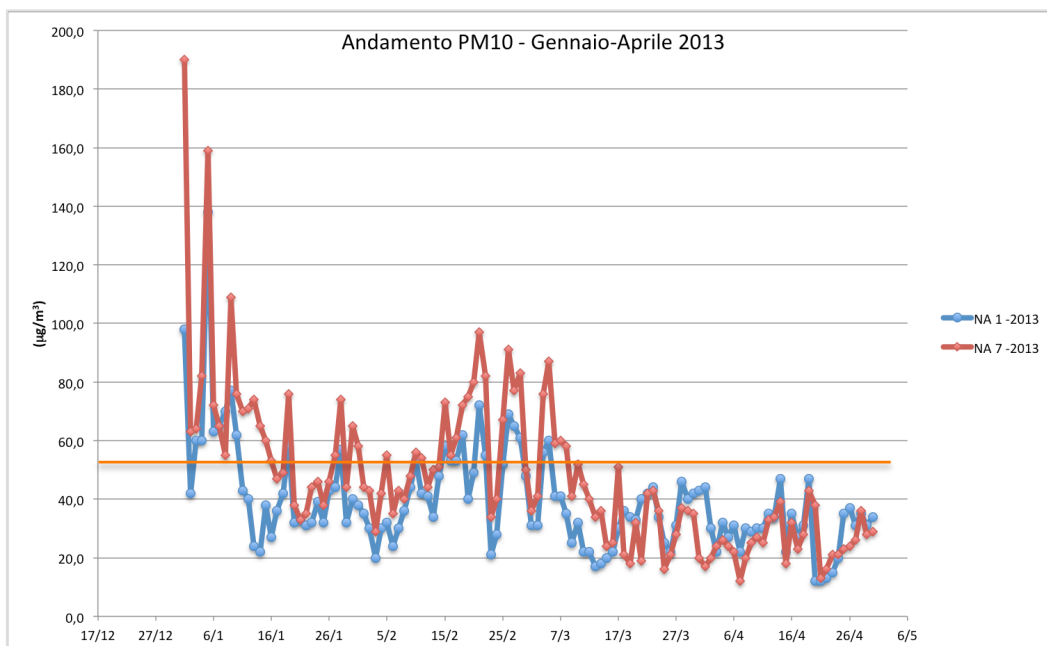


Fig.1.38 - Andamento medie giornaliere PM₁₀ (µg/m³) per le centraline NA1 e NA7, mesi Gennaio-Aprile, anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

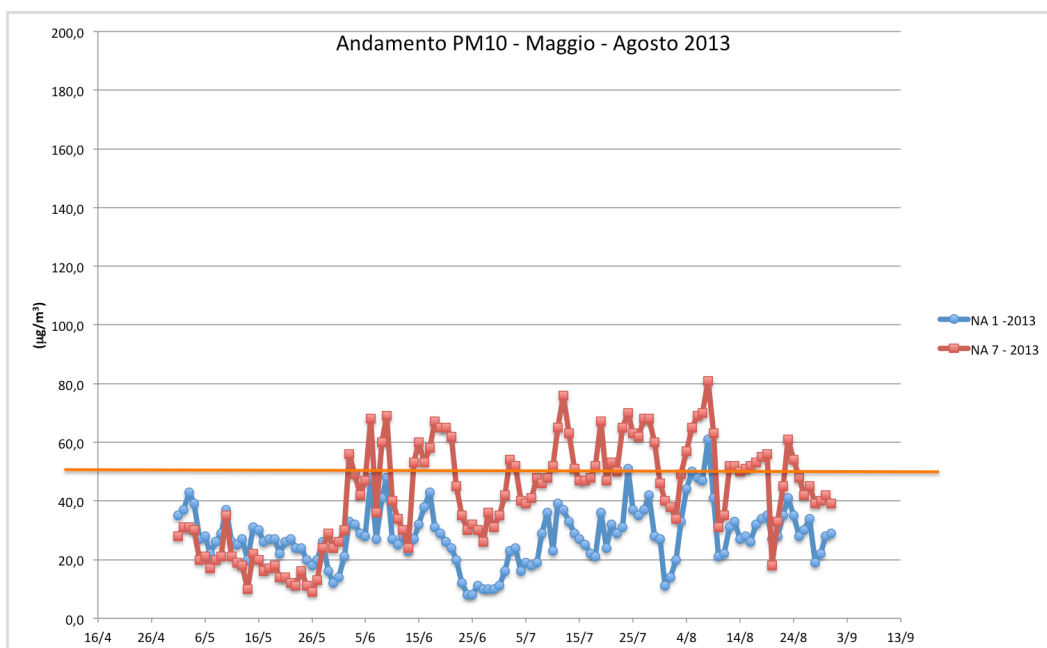


Fig.1.39 - Andamento medie giornaliere PM₁₀ (µg/m³) per le centraline NA1 e NA7, mesi Maggio-Agosto, anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

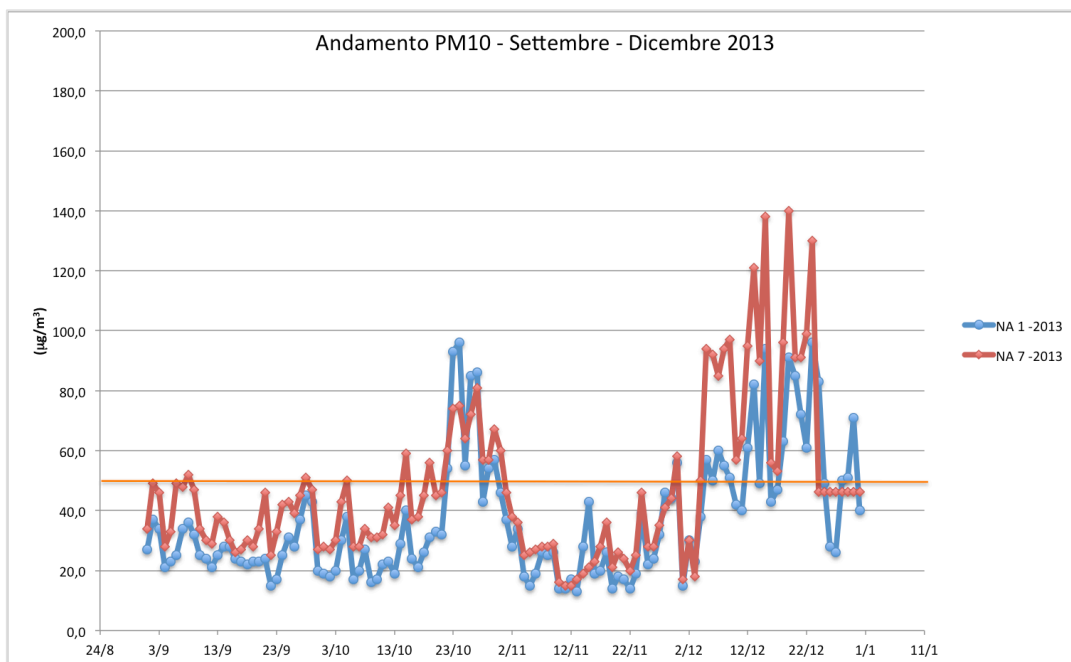


Fig.1.40 - Andamento medie giornaliere PM₁₀ (µg/m³) per le centraline NA1 e NA7, mesi Settembre-Dicembre, anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

Nelle Fig.1.41 e 1.42 è riportato il numero di giorni in cui avviene il superamento del livello di soglia (50 µg/m³) imposto dalla normativa per il particolato solido per le due centraline NA1 e NA7, per gli anni 2013 e 2012. Per il 2013, come già rilevato nelle tre precedenti figure, il maggior numero di superamenti avviene, per entrambe le centraline, nei mesi di Gennaio, Febbraio e Dicembre. Analoga situazione è riscontrata per l'anno 2012 (Fig.1.42).

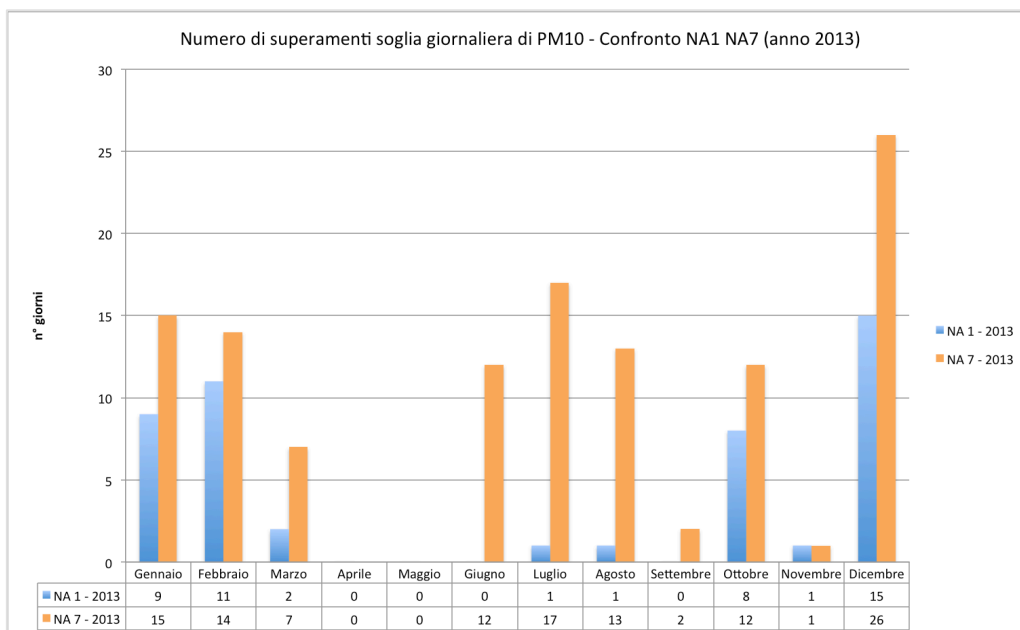


Fig.1.41 – Numero di giorni con superamenti del valore di soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per le centraline NA1 e NA7 anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

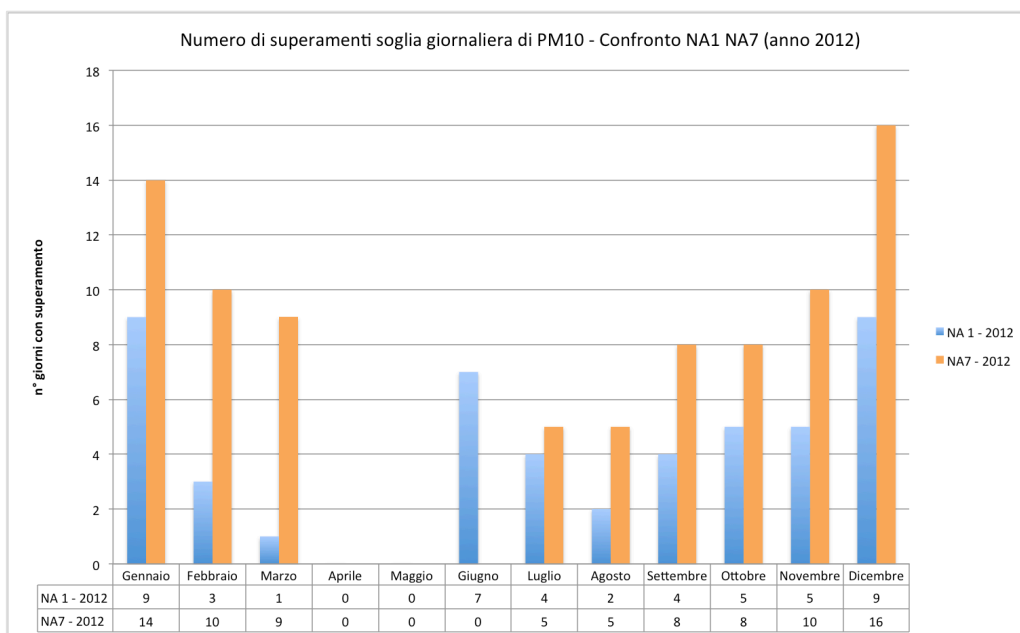


Fig.1.42 – Numero di giorni con superamenti del valore di soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per le centraline NA1 e NA7 anno 2012 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

Il numero di superamenti totali per la centralina NA1 nell'anno 2013 è pari a 48, mentre per la centralina NA7 è pari a 119. Il numero di superamenti totali per la centralina NA1 nell'anno 2012 è pari a 49, mentre per la centralina NA7 è pari a 85. Dai dati riportati in Tab.3 si nota, specialmente per la centralina NA7, un costante aumento, dal 2011 al 2013, del numero di superamenti e della media annuale di concentrazione di PM₁₀.

Anno	Centralina NA1		Centralina NA7	
	n° superamenti	media annuale	n° superamenti	media annuale
2011	29	33,85	62	40,33
2012	49	40,73	85	43,76
2013	48	34,8	119	46,24

Tab.3 – Numero di superamenti e media annuale anni 2011-2013 per le centraline NA1 e NA7

Per quanto riguarda l'andamento nel mese, nelle Fig. 1.43 e 1.44 è riportato, per il mese di febbraio del 2013, l'andamento del Monossido di Carbonio e del PM₁₀, per la centralina NA7. Nel caso del CO, si riscontrano sistematicamente i valori minimi in corrispondenza dei giorni di sabato e di domenica; per il PM₁₀ tale fenomeno non è altrettanto evidente (Fig.1.44).

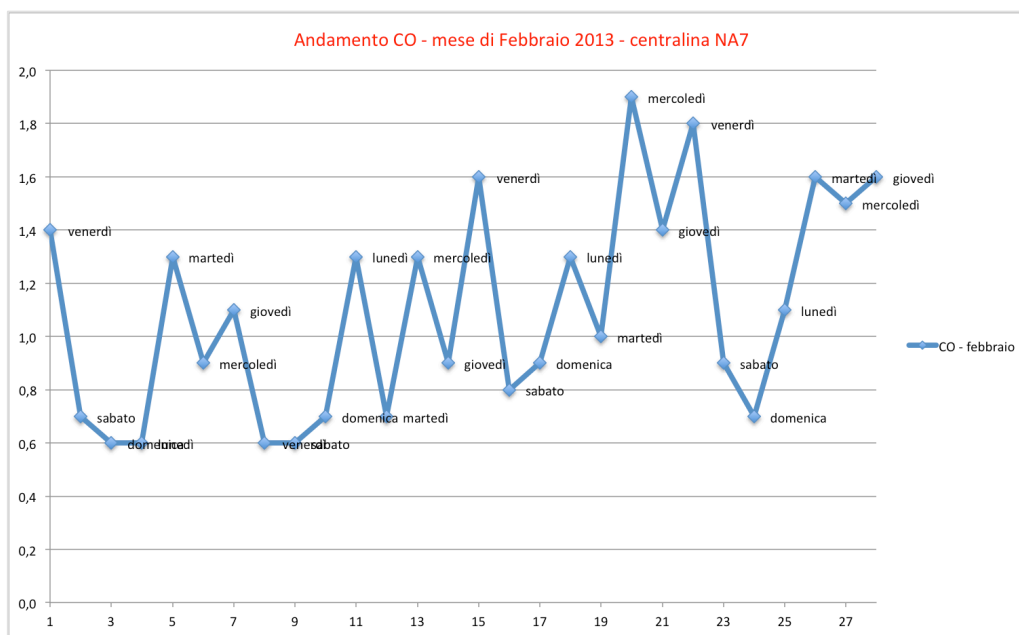


Fig.1.43 – Andamento mensile CO (mg/m³) per la centralina NA7, Febbraio 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

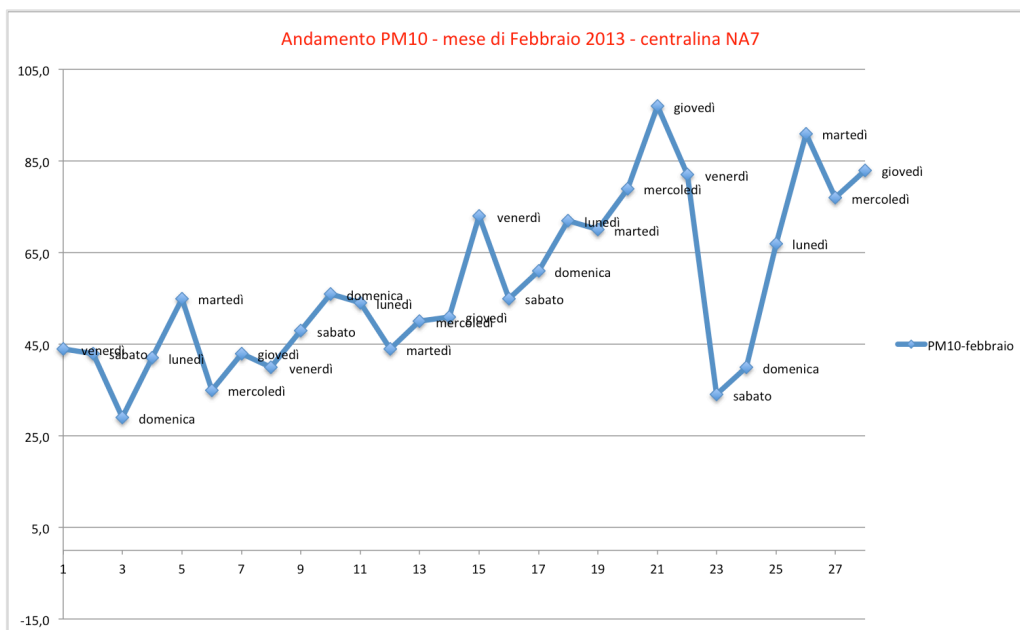


Fig.1.44 – Andamento mensile PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA7, Febbraio 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC)

I dati relativi alle concentrazioni di PM₁₀ sono stati messi a confronto con i dati di piovosità (espressi in mm), al fine di individuare una possibile relazione tra il fenomeno di inquinamento da PM₁₀ e i fenomeni di pioggia.

I dati di pioggia, per il 2012 e il 2013, sono stati forniti dall'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino (Università "Federico II" di Napoli) e rilevati da una centralina automatica sita sulla torretta dell'edificio di S. Marcellino (quota 50 m s.l.m.m.).

In Fig. 1.45 sono messi a confronto i soli dati di piovosità relativi ai due anni oggetto di studio. Per l'anno 2012 i mm di pioggia totali sono stati pari a 880.2 mm, mentre per il 2013 pari a 848.2 mm, con un decremento pari circa al 3%.

In Fig. 1.46 sono riportate le medie mensili della concentrazione di PM₁₀, considerando sempre la centralina NA7, e quelle relative alle piogge. Si può notare che nei mesi da Maggio a Settembre, in corrispondenza di valori minimi di precipitazioni, i livelli di particolato si sono mantenuti a livelli piuttosto elevati, per poi subire un calo nei piovosi mesi di Ottobre e Novembre.

In Fig. 1.47 è riportato un confronto, per il mese di Dicembre del 2012 e del 2013, tra le concentrazioni di particolato e i dati di piovosità. Il mese di Dicembre è stato selezionato in quanto presenta una notevole differenza di piovosità da un anno all'altro. Si può notare che per entrambi gli anni in corrispondenza dei picchi di

pioggia si rilevano diminuzioni di concentrazione. Inoltre, i valori di PM₁₀ del 2012 (mm pioggia totali mese= 143.5 mm; concentrazione media mensile PM₁₀= 57.7 µg/m³) sono inferiori per il mese in questione rispetto a quelli dell'anno 2013 (mm pioggia totali mese= 57.6 mm; concentrazione media mensile PM₁₀= 80.9 µg/m³).

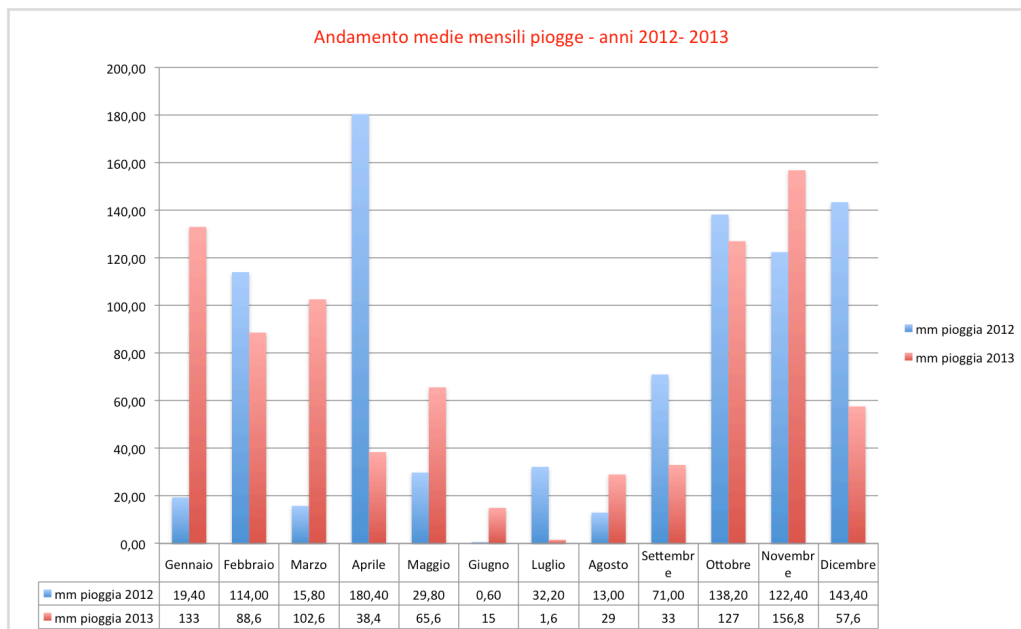


Fig.1.45 – Andamento mensile piogge anni 2012 e 2013 (Fonte: elaborazione su dati dell'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

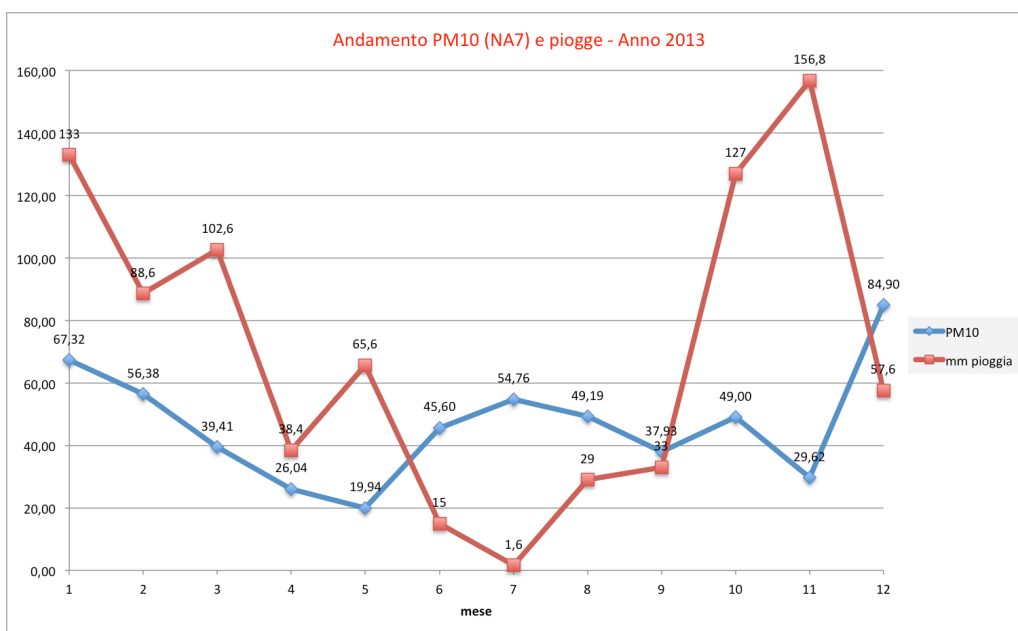


Fig.1.46 – Confronto tra l'andamento delle concentrazioni mensili di PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA7 e dati di pioggia (mm) per l'anno 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC/Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

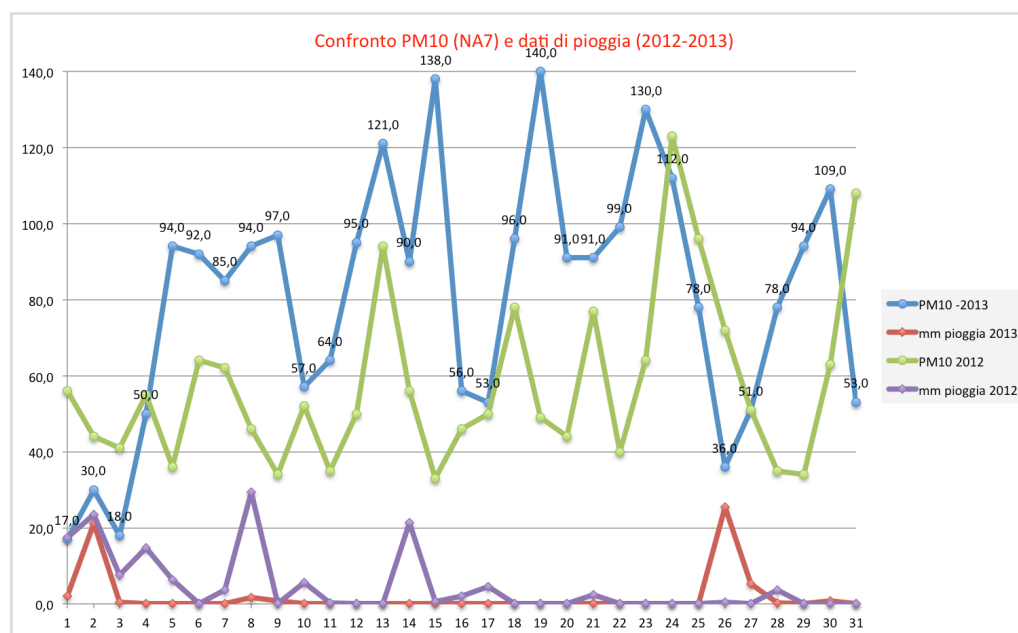


Fig.1.47 – Confronto andamento mensile PM₁₀ (µg/m³) e piogge per il mese di Dicembre, anni 2012 e 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC/ Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

In Fig.1.48 è riportato l'andamento delle concentrazioni di PM₁₀ e delle piogge giornaliere, per la centralina NA7 e per il mese di febbraio del 2013. In particolare, si riscontrano picchi minimi delle concentrazioni di inquinanti in corrispondenza dei picchi massimi di pioggia. Inoltre, in caso di persistente mancanza di pioggia (dal 13 al 21 di Febbraio) si riscontra il progressivo aumento delle concentrazioni di PM₁₀, da 45.0 a 95.0 µg/m³. In Fig. 1.49 vi è un confronto analogo, per le centraline NA7 e NA3. Infine, in Fig.1.50 sono riportati gli andamenti della concentrazione di inquinante e i dati di pioggia per il mese di Gennaio 2014.

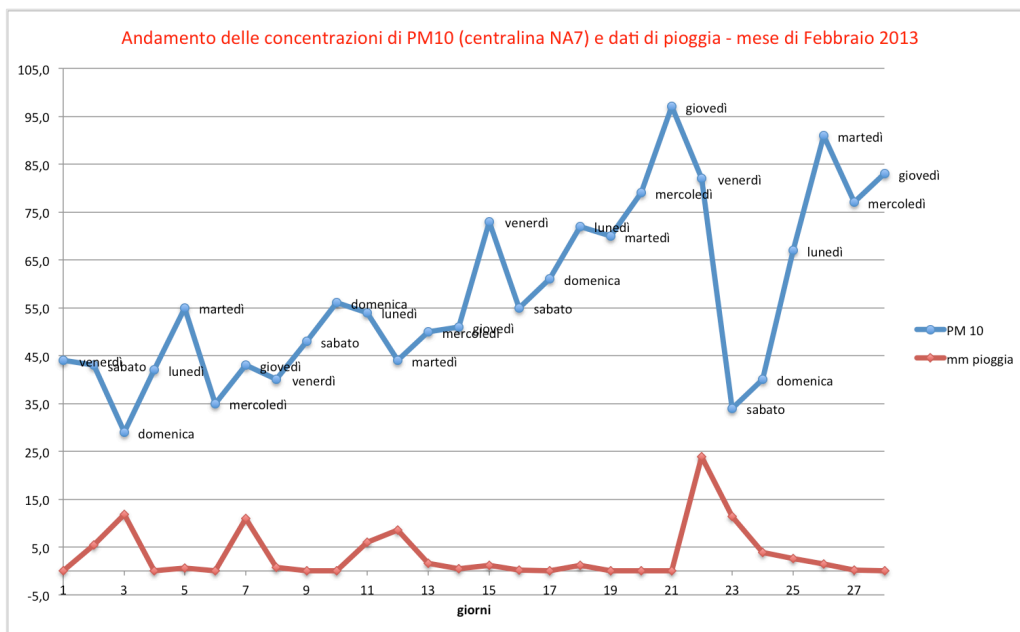


Fig.1.48 – Confronto tra l'andamento delle concentrazioni di PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA7 e dati di pioggia (mm) per il mese di Febbraio 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC/ Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

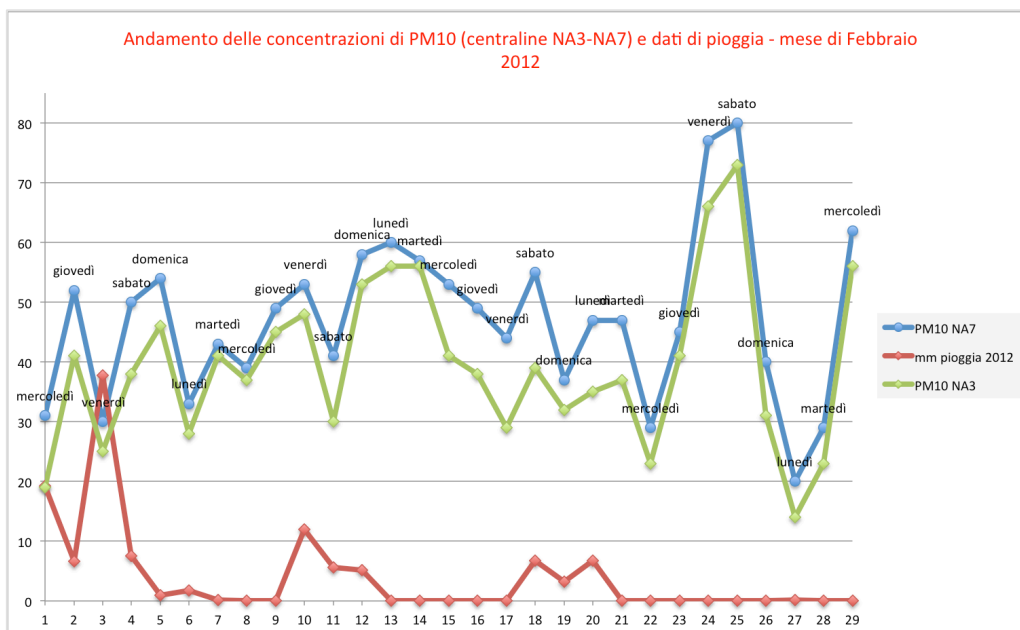


Fig.1.49– Confronto tra l'andamento delle concentrazioni di PM₁₀ (µg/m³) per le centraline NA7 e NA3 e dati di pioggia (mm) per il mese di Febbraio 2013 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC/ Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

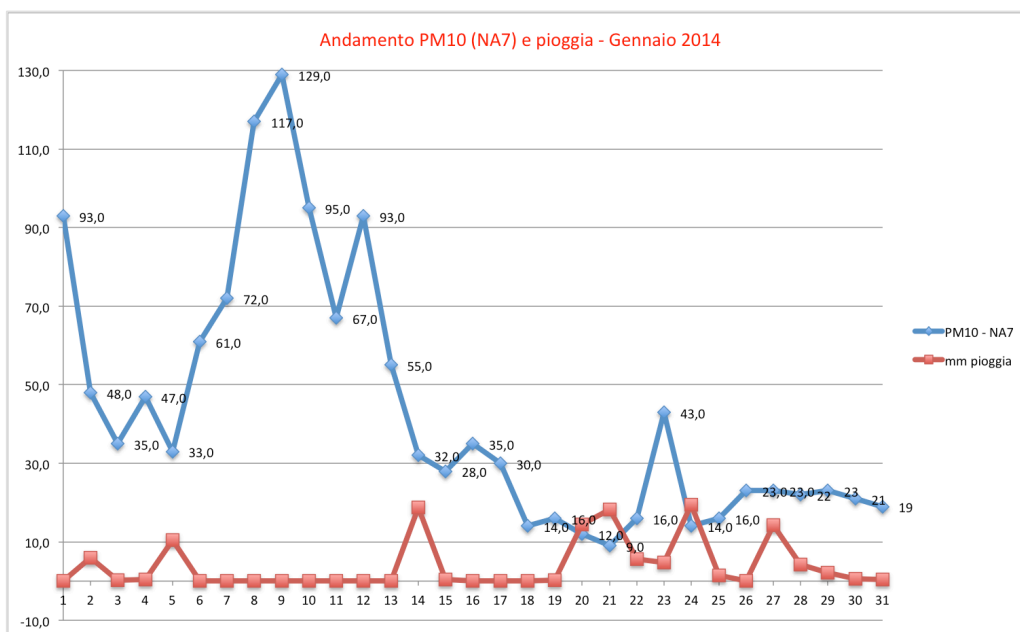


Fig.1.50 – Confronto tra l'andamento delle concentrazioni di PM₁₀ (µg/m³) per la centralina NA7 e dati di pioggia (mm) per il mese di Gennaio 2014 (Fonte: elaborazione su dati ARPAC/ Osservatorio Meteorologico di San Marcellino)

Al fine di studiare l'andamento nel giorno, in Fig.1.51 sono messi a confronto gli andamenti per il PM₁₀ e per gli NO₂ in un giorno di Dicembre del 2008 per la centralina NA7. I due inquinanti presentano andamenti pressoché paralleli, i cui picchi massimi si verificano in corrispondenza delle punte di traffico mattutino e serale.

In Fig.1.52 si riscontra, per il giorno considerato, il superamento del valore di soglia limite giornaliero imposto dalla normativa per entrambe le centraline NA1 ed NA7, con valore medio di concentrazione pari rispettivamente a 70.5 e 72.0 µg/m³. Per entrambe le centraline si può inoltre riscontrare la presenza di un picco in corrispondenza della punta di traffico mattutina. Infine, in Fig.1.53 è riportato l'andamento delle concentrazioni medie orarie per il Monossido di Carbonio e per un giorno di Novembre del 2008. Si può notare che i valori registrati dalla stazione NA1 sono inferiori rispetto a quelli rilevati dalla centralina NA7.

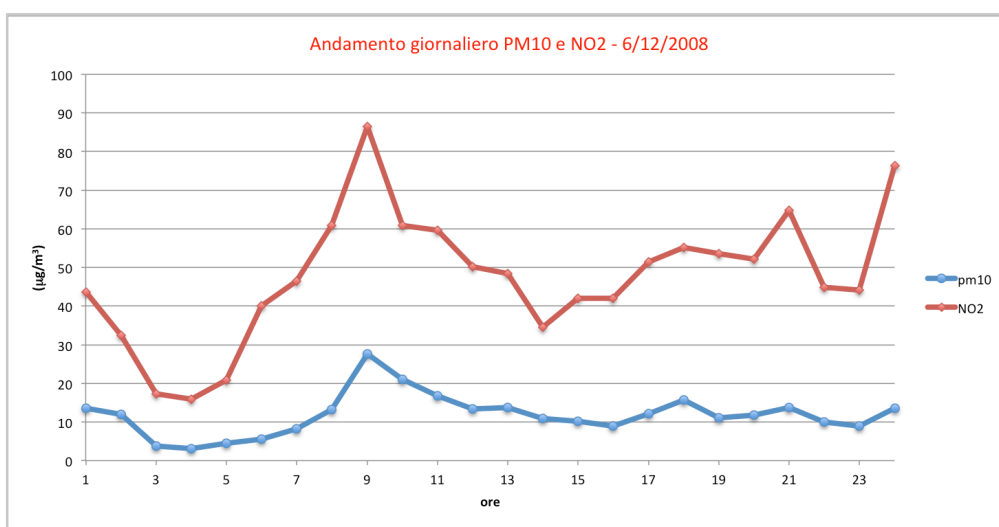


Fig.1.51 – Confronto tra l'andamento delle concentrazioni medie orarie di PM₁₀ (µg/m³) e NO(µg/m³) per la centralina NA7

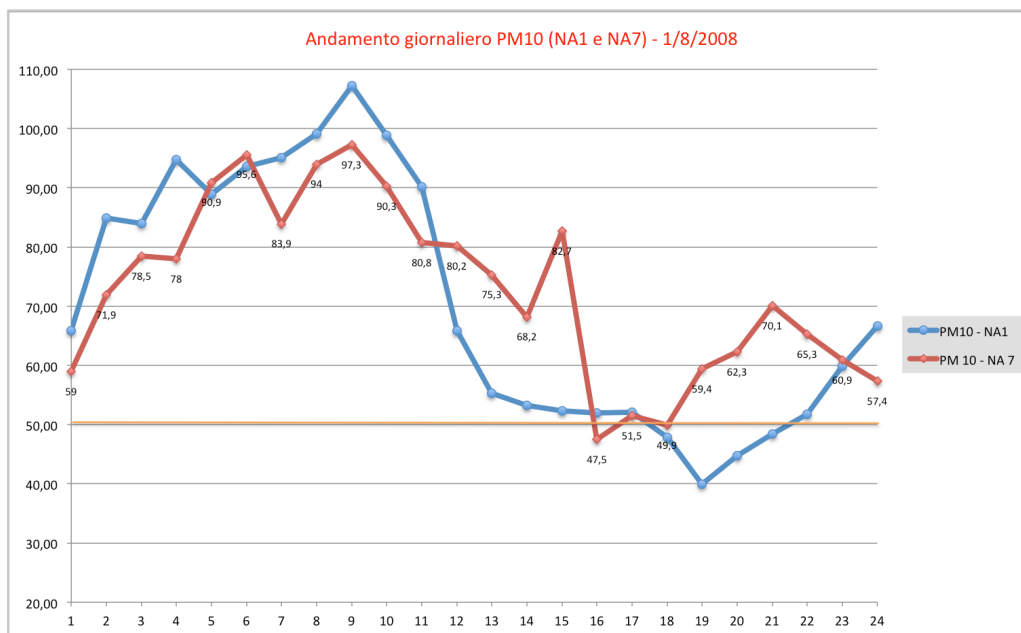


Fig.1.52 – Andamento delle concentrazioni medie orarie di PM₁₀ (µg/m³) per le centraline NA1 e NA7 per un giorno di Agosto 2008 in cui avviene il superamento del valore di soglia giornaliero.

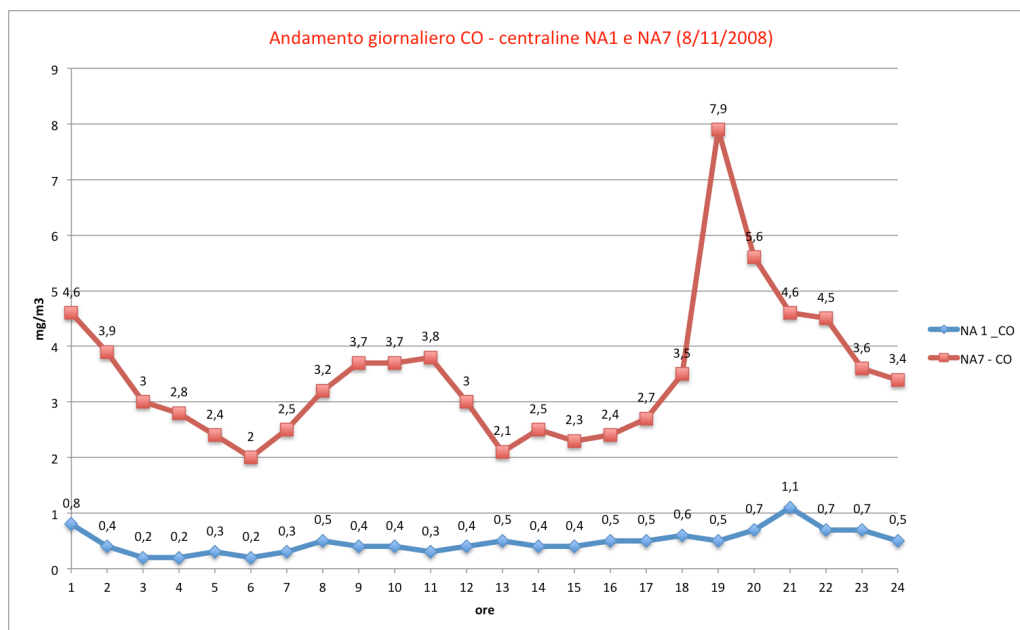


Fig.1.53 – Andamento delle concentrazioni medie orarie di CO (mg/m³) per le centraline NA1 e NA7 per un giorno di Novembre 2008.

Riassumendo, per quanto riguarda l'andamento negli anni, sono state messe a confronto le medie annuali delle concentrazioni inquinanti rilevate dalle 7 centraline che registrano il PM₁₀ e dalle 4 che misurano il CO. Da queste si può notare che solo per la centralina NA7, localizzata presso la stazione ferroviaria di Piazza Garibaldi, è stato superato in entrambi gli anni il valore di soglia annuale di PM₁₀ imposto dalla normativa. Inoltre, nel passaggio dal 2012 al 2013, si è riscontrato un lieve aumento delle concentrazioni di entrambi gli inquinanti.

Per quanto concerne l'andamento nell'anno, si è riscontrato che, sia per il 2012 che per il 2013, i mesi di Gennaio e Dicembre sono caratterizzati da livelli più elevati di concentrazione di PM₁₀. Inoltre, è stato riscontrato che i valori di concentrazione registrati dalla centralina NA1 sono prevalentemente inferiori a quelli rilevati dalla centralina NA7. E' da precisare, però, che nei giorni di alcuni mesi (Aprile-Maggio, Ottobre-Novembre) i valori rilevati dalla stazione NA1 sono più elevati rispetto a quelli misurati nella stazione NA7. Inoltre, dal calcolo del numero di superamenti del valore di soglia giornaliero (50 µg/m³), si è dedotto che i mesi più critici sono Gennaio, Febbraio e Dicembre per entrambi gli anni.

Si è poi riscontrato che i valori minimi di concentrazione di CO sono raggiunti in corrispondenza dei giorni di sabato e di domenica.

Infine, per quanto riguarda l'andamento nel giorno, si è fatto riferimento alle medie orarie. L'andamento delle concentrazioni presenta nella maggior parte dei casi un picco negli orari di punta del traffico (mattutina e serale).

Dall'analisi dei dati di piovosità, messi a confronto con le concentrazioni di PM₁₀, è emersa una corrispondenza abbastanza evidente tra i picchi di pioggia e i cali di inquinamento.

L'analisi di tali dati ha consentito lo sviluppo di considerazioni su scala territoriale locale che hanno indotto lo sviluppo di proposte di intervento di tipo strutturale e metodologico. Tali proposte riguardano:

- a) il potenziamento della rete di rilevamento, attraverso centraline fisse e mobili;
- b) la calibrazione dei modelli di simulazione dei fenomeni;
- c) la definizione di procedure di carattere normativo.

In particolare, l'analisi dei dati ha consentito di riscontrare differenze ridotte tra i valori di concentrazione di PM₁₀ misurati da una stazione di background urbano e quelli misurati da una stazione di traffico. In altri casi, è stato addirittura rilevato che le concentrazioni per una stazione di background presentano valori superiori rispetto

a quelli contemporaneamente misurati da una stazione di traffico. Tale considerazione può indurre ad attribuire l'inquinamento atmosferico non solo al traffico veicolare, ma anche ad altre sorgenti di origine naturale (attività vulcaniche, tempeste di sabbia, etc.) ed antropica (attività industriali, riscaldamento domestico, cantieri etc.).

Nella ricerca ci si è posti, inoltre, il problema di cogliere il nesso tra i superamenti del valore di soglia imposto dalla normativa, rilevati dalle singole centraline, e le decisioni di regolamentazione che riguardano un intero contesto urbano (targhe alterne, blocchi del traffico, etc.).

Come possibili risposte alle incertezze sollevate da tali osservazioni, emerge, in primo luogo, la necessità di potenziare ed ampliare la rete delle centraline di monitoraggio (sia per gli inquinanti che per i flussi di traffico), anche attraverso sistemi mobili di misura, in modo da incrementare la disponibilità puntuale di dati. Sulla base dell'ampliamento della rete di rilevamento sarebbe possibile strutturare e predisporre un'adeguata campagna di monitoraggio dei flussi di traffico e delle concentrazioni di inquinanti, al fine di calibrare i modelli di simulazione del traffico e i modelli di inquinamento. In tal modo, si potrebbe costruire una rete di centraline virtuali che consentirebbe, da un lato di incrementare i livelli di conoscenza dei fenomeni oggetto di studio, e dall'altro di indirizzare, sulla base di tali informazioni, le politiche di gestione della mobilità e della qualità dell'aria. Si potrebbe quindi pensare di localizzare le centraline di ciascuna tipologia (urbana, traffico e background), tenendo conto dei bacini di traffico individuati dal Piano Urbano del Traffico della città di Napoli. Infatti, distribuire opportunamente le centraline sul territorio urbano consentirebbe anche alle amministrazioni di adottare provvedimenti riguardanti i singoli bacini di traffico e non l'intero territorio comunale.

Infine, sulla base di una maggiore disponibilità di dati, si potrebbe valutare l'opportunità di rivedere i valori limite imposti dalla normativa (in termini di concentrazioni e di superamenti), tenendo conto delle diverse tipologie di stazioni (urbane, traffico, background), delle condizioni meteo-climatiche del bacino europeo e del Mediterraneo, all'interno del quale l'Italia è inserita, dei micro-climi locali e dell'orografia dei luoghi.

E' possibile, quindi, affermare che un risultato dell'attività svolta è rappresentato dalla definizione di un processo metodologico di intervento volto a definire interventi sia sul piano organizzativo-gestionale che sul piano normativo.

Capitolo 2 – I modelli di inquinamento da traffico

La valutazione dell'inquinamento atmosferico può essere effettuata mediante la misurazione delle concentrazioni di inquinanti con apposite strumentazioni e attraverso il supporto di modelli matematici, mediante i quali è possibile controllare che gli standard di qualità dell'aria non vengano superati nelle condizioni di progetto. L'analisi quantitativa del processo di inquinamento viene effettuata attraverso l'utilizzo di un insieme di modelli matematici, ognuno dei quali descrive singolarmente i fenomeni che contribuiscono a generare l'inquinamento. Nello studio dell'inquinamento da traffico i sub-sistemi coinvolti sono quelli dei trasporti (sorgenti di emissione), dell'atmosfera e dei recettori.

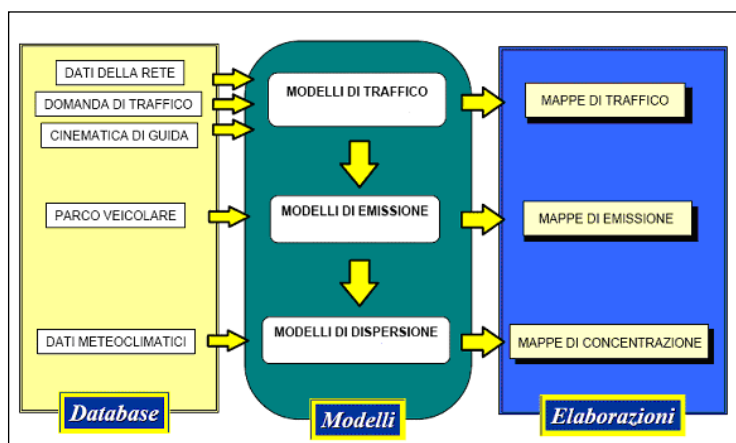


Fig. 2.1 – Relazione tra i modelli di traffico e i modelli di emissione e dispersione

La qualità dell'aria nelle aree urbane è determinata in modo significativo dalla domanda di mobilità e dal modo in cui essa viene soddisfatta dall'offerta di trasporto. Pertanto, per la stima dell'inquinamento in una determinata area urbana è necessario implementare modelli di simulazione del traffico, modelli di emissione e modelli di dispersione degli inquinanti (Fig.2.1).

Si rimanda all'Appendice 2 per la descrizione, non esaustiva, del processo di simulazione di un sistema di trasporto attraverso i modelli di offerta, i modelli di domanda e i modelli di assegnazione.

2.1. I modelli di emissione degli inquinanti

La simulazione del processo di emissione delle sostanze inquinanti, da parte dei veicoli stradali, è necessaria per la valutazione degli effetti provocati dall'inquinamento atmosferico. La produzione della maggior parte di sostanze inquinanti, emesse da un motore a combustione interna, è determinata dal fatto che le reazioni di ossidazione del combustibile in presenza di aria non si svolgono in condizioni ideali. La difficoltà di spiegare analiticamente i processi chimico-fisici che governano la produzione degli inquinanti porta ad assumere, come variabili indipendenti dei modelli di simulazione delle emissioni, alcuni parametri relativi alle caratteristiche costruttive del veicolo, stato della meccanica del veicolo, condizioni dell'ambiente esterno e condizioni di funzionamento. In particolare, tra i fattori che influenzano le emissioni si possono distinguere i parametri rappresentativi delle caratteristiche costruttive dei veicoli, distinte in caratteristiche generali del veicolo (peso a vuoto, efficienza aerodinamica, etc.) e caratteristiche dell'apparato di propulsione (tipo di combustibile utilizzato, caratteristiche del fluido evolvente, tipo di dispositivi di controllo delle emissioni, caratteristiche di cilindrata e di potenza). Una seconda categoria di parametri comprende quelli che influenzano lo stato della meccanica del veicolo, come ad esempio lo stato di usura, lo stato di manutenzione, le condizioni di regolazione. In un terzo gruppo possono essere classificati i parametri che rappresentano le condizioni operative del veicolo nelle situazioni reali di traffico e che riguardano le caratteristiche di funzionamento dell'apparato di propulsione. Tali caratteristiche possono essere descritte da due categorie di variabili tra loro dipendenti: quelle legate alla dinamica del motore (velocità di rotazione del motore e l'entità del carico ad esso fornito) e quelle che descrivono lo stato termodinamico del fluido evolvente all'interno del cilindro (temperatura del motore, umidità e densità dell'aria).

Le caratteristiche costruttive, di stato della meccanica e operative del veicolo sono a loro volta influenzate dalle condizioni dell'ambiente esterno, quali, ad esempio, i vincoli di produzione (condizioni tecnologiche, decisionali e legislative). Le caratteristiche operative dell'ambiente esterno che condizionano quelle del veicolo possono essere raggruppate in diversi sottoinsiemi: lo stato dell'aria esterna (temperatura ambiente, pressione atmosferica, umidità relativa dell'aria), le caratteristiche della via (pendenza longitudinale, sinuosità, caratteristiche della pavimentazione), le condizioni di traffico (caratteristiche di deflusso), il tipo di uso attuale del veicolo (massa trasportata, lunghezza degli spostamenti, comportamento del guidatore).

I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni che sussistono tra le emissioni inquinanti dei veicoli e i parametri da cui esse dipendono sopra descritti.

Per sviluppare un modello di emissione è necessario individuare le variabili indipendenti significative. Di solito i modelli sono elaborati separatamente per ciascun tipo di inquinante e per ciascuna categoria veicolare, con lo scopo di ovviare al problema dell'influenza simultanea delle variabili. La velocità di marcia è un fattore che esercita un notevole peso sui livelli di emissione. A tal proposito i modelli di emissione possono essere distinti in due categorie, modelli che si riferiscono alle caratteristiche istantanee del moto (modelli dinamici) e modelli riferiti a condizioni medie del moto (modelli statici):

- modelli dinamici: consentono di calcolare i valori istantanei dell'emissione sulla base dell'andamento delle variabili indipendenti in funzione del tempo. I modelli dinamici, descrivendo i fenomeni nel dettaglio, trovano applicazione per la simulazione di situazioni di complessità limitata, dove si possano esplicitare le variabili indipendenti e le loro caratteristiche istantanee. Vengono utilizzati soprattutto quando la dipendenza del fenomeno dal tempo non può essere trascurata; esempi sono lo studio delle emissioni di un singolo veicolo o di singoli tronchi stradali.
- modelli statici: permettono il calcolo dei valori medi delle emissioni nell'intervallo di tempo prescelto in funzione dei valori medi delle variabili indipendenti, sono perciò adatti a stimare le emissioni in condizioni stazionarie. I modelli statici non consentono la stima puntuale delle variazioni dei tassi di emissione, e vengono utilizzati nel caso di reti stradali di notevole dimensione, dove non è sempre possibile ricavare dati su velocità ed accelerazioni istantanee dei veicoli. Un'altra applicazione per questa tipologia di modelli è l'analisi delle emissioni dei veicoli che viaggiano in condizioni di moto uniforme o di moto non uniforme caratterizzato dai valori medi delle velocità (flusso di traffico interrotto). E' necessario stimare le velocità medie e i flussi sugli archi della rete, mediante analisi dirette o con l'uso di modelli che simulano il funzionamento del sistema di trasporto.

I modelli dinamici di emissione necessitano di dati sulle velocità e sulle accelerazioni istantanee dei veicoli e di dati relativi alle densità dei flussi di traffico che servono a riportare le emissioni dei singoli veicoli a emissioni degli interi flussi.

L'approccio indipendente dal tempo riveste un'importanza particolare, sia perché ad esso fanno riferimento i modelli matematici per la pianificazione e lo studio delle reti di trasporto, sia perché la maggior parte dei modelli di simulazione del processo di dispersione degli inquinanti, conseguente a quello della loro emissione, è riferita a condizioni stazionarie.

I modelli dinamici

Nel modello dinamico proposto [Tartaglia, 1995] l'emissione appare come somma di più funzioni, ognuna delle quali consente di determinarne l'aliquota in termini di alcune variabili significative, quali:

- variabili dipendenti dal tempo: dinamica del motore (la velocità di marcia del veicolo incide molto sull'emissione); stato del fluido; pendenza dell'infrastruttura stradale; intensità del traffico automobilistico (congestione)
- variabili indipendenti dal tempo: caratteristiche costruttive del veicolo; stato della meccanica (si può ritenere costante per piccoli intervalli di tempo).

In una prima fase il modello calcola le emissioni di base, ovvero le emissioni relative a determinate condizioni di regime (termico, di stato della meccanica e ambientale) le cui variabili indipendenti sono solo quelle relative al funzionamento dell'apparato di propulsione. Le variazioni dovute a condizioni non di regime vengono calcolate, successivamente, come funzioni correttive del modello di base.

L'emissione totale di inquinante i di un singolo veicolo appartenente ad un certo gruppo veicolare g è dato dalla seguente somma:

$$e^{i,g} = e_{base}^{i,g} + e_p^{i,g} + e_T^{i,g} + e_M^{i,g}$$

dove:

$e_{base}^{i,g}$ rappresenta l'emissione di base;

$e_p^{i,g}$ rappresenta l'emissione dovuta alla pendenza longitudinale dell'infrastruttura;

$e_T^{i,g}$ rappresenta l'emissione a freddo del motore;

$e_M^{i,g}$ rappresenta l'emissione dovuta a stato della meccanica diverso da quelle di regime (veicolo nuovo).

Le funzioni di emissione di base sono diverse al variare dei modi cinematici, cioè dei cicli di guida, caratterizzati da variazioni di velocità e accelerazione.

Fissate le caratteristiche costruttive del gruppo veicolare g , il tipo di inquinante i , il modo cinematico, o ciclo di guida, m (di durata t_m), l'emissione di base istantanea, espressa in unità di massa per unità di tempo, si ottiene mediante la seguente equazione differenziale:

$$\frac{d}{dt} e_{base}^{i,g,m}(t) = f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t))$$

dove $v(t)$ e $a(t)$ sono la velocità e l'accelerazione del veicolo al tempo $t \leq t_m$.

La massa totale di inquinante i emessa dal veicolo durante l'intero modo cinematico sarà quindi:

$$e_{base}^{i,g,m} = \int_0^{t_m} f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t)) dt$$

La determinazione del modello necessita di misure sperimentali dei valori di e_{base} per differenti modi in funzione delle velocità e delle accelerazioni istantanee. In tal modo si possono stimare le funzioni f_{base} che costituiscono il vero e proprio modello di previsione delle emissioni di base. Note le funzioni di base è possibile calcolare le emissioni di un veicolo, appartenente al gruppo veicolare g , in moto secondo un ciclo di guida noto composto da un insieme di n_m modi:

$$e_{base}^{i,g} = \sum_{m=1}^{n_m} \int_0^{t_m} f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t)) dt$$

Il modello è poi completato da un insieme di funzioni correttive che forniscono un'aliquota supplementare di emissioni per tener conto delle variabili che non compaiono nel modello di base. In particolare, l'incremento di emissioni dovuto alla pendenza longitudinale della via (espresso in $gr./veicolo*s$) è, per ogni gruppo veicolare, funzione del prodotto tra pendenza p e velocità istantanea:

$$\frac{d}{dt} e_p^{i,g}(t) = f_p^{i,g}(p * v(t))$$

Se si indica con t_k il tempo totale di percorrenza speso su ogni tratto k a pendenza diversa da zero e con n_p il numero di tratti non in piano presenti lungo il percorso,

l'entità complessiva della massa aggiuntiva di emissioni di inquinanti i dovuti alla pendenza è:

$$e_p^{i,g} = \sum_{k=1}^{n_p} \int_0^{t_k} f_p^{i,g} (p * v(t)) dt$$

L'aliquota aggiuntiva dovuta al funzionamento a freddo del motore è funzione della legge di riscaldamento dell'apparato di propulsione, che a sua volta dipende dalla temperatura esterna e dalle caratteristiche istantanee del moto $v(t)$ e $a(t)$. L'aliquota di massa inquinante può essere espressa in funzione del tempo come segue:

$$\frac{d}{dt} e_T^{i,g}(t) = f_T^{i,g}(t)$$

Fissato con t_{reg} il tempo necessario all'apparato di propulsione per raggiungere lo stato termico di regime dopo la partenza a freddo, l'entità delle emissioni dovute al transitorio termico è:

$$e_T^{i,g} = \int_0^{t_{reg}} f_T^{i,g}(t) dt$$

L'ultimo contributo da considerare è quello derivante da condizioni di stato della meccanica diverse da quelle di regime (veicolo nuovo).

Una volta definito il modello di emissione di un singolo veicolo, le emissioni dovute ad un flusso di veicoli di diverse caratteristiche costruttive si calcolano sommando i contributi dovuti ai vari gruppi veicolari. Se si ipotizza che tutti i veicoli si muovano secondo il medesimo ciclo di guida e si indica con N il numero di veicoli appartenenti al flusso e con c_g la percentuale di veicoli del gruppo veicolare g presenti nel flusso, le emissioni totali espresse in unità di massa si esprimono come segue:

$$E^i = \sum_{g=1}^{n_g} c_g * N * (e_{base}^{i,g} + e_p^{i,g} + \gamma_{tr} e_T^{i,g} + e_M^{i,g})$$

γ_{tr} è la percentuale di veicoli sottoposti a transitorio termico.

In termini espliciti si ha:

$$E^i = N * \left\{ \sum_{m=1}^{n_m} \int_0^{t_m} \sum_{g=1}^{n_g} c_g * f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t)) dt + \sum_{k=1}^{n_p} \int_0^{t_k} \sum_{g=1}^{n_g} c_g * f_p^{i,g}(p * v(t)) dt + \gamma_{tr} * \int_0^{t_{reg}} \sum_{g=1}^{n_g} c_g * f_T^{i,g}(t) dt + \sum_{g=1}^{n_g} c_g * e_M^{i,g} \right\}$$

I modelli statici

Il calcolo delle emissioni statiche di base è basato sull'ipotesi che, sebbene l'influenza sui profili istantanei di emissione dei cicli di guida sia notevole, i fattori totali di emissione sono esprimibili in funzione della velocità media del moto. I modelli statici esprimono le emissioni medie in un certo intervallo temporale di riferimento in funzioni dei valori medi di alcune variabili indipendenti. Anche nei modelli statici, l'emissione totale è la somma delle emissioni di base, delle emissioni a freddo dovute al transitorio termico del motore, di quelle dovute alla pendenza della via o ad altre variazioni della resistenza al moto e di quelle dovute allo stato della meccanica.

Fissata una sostanza inquinante e un gruppo veicolare, le emissioni di base si esprimono in funzione della sola velocità media. L'incremento di emissione dovuto al transitorio termico del motore, oltre ad essere funzione della velocità media dipende dalla temperatura dell'ambiente esterno, dalla frazione di spostamento mediamente percorsa con motore freddo e dalla lunghezza media degli spostamenti.

Come già osservato, i modelli di tipo statico non consentono la stima puntuale delle variazioni dei tassi di emissione durante un generico spostamento; essi necessitano di informazioni sulle caratteristiche operative del traffico (stato medio dei veicoli, parametri medi del moto e lunghezza degli spostamenti considerati).

In letteratura, il lavoro di Pronello e Andrè (2000) "Pollutant emissions in road transport models", finalizzato ad analizzare il problema riguardante l'uso combinato di modelli di traffico e di emissione, fornisce un quadro introduttivo sui modelli di emissione. Oltre a distinguere i modelli in statici e dinamici, i modelli di emissione sono classificati in:

- modelli bottom-up (o di microscala), che a partire da un modello di emissione a livello stradale, tramite un processo di integrazione, calcolano gli inventari a scala urbana;
- modelli top-down (o di macroscala) che utilizzano gli algoritmi sviluppati per la scala territoriale nazionale per la scala urbana o locale.

2.2. I modelli di dispersione degli inquinanti

L'obiettivo principale dello studio del comportamento degli inquinanti in atmosfera è la conoscenza della loro distribuzione spaziale e temporale. Il raggiungimento di tale obiettivo è reso possibile grazie all'utilizzo di modelli matematici che simulano i processi di trasporto, reazione chimica e rimozione degli inquinanti stessi.

I modelli di dispersione sono classificati in modelli di tipo deduttivo (o teorici) e modelli di tipo induttivo (o empirici). I primi descrivono i processi che avvengono nell'atmosfera attraverso la formalizzazione di relazioni di causa-effetto supposte vere a priori e sviluppate secondo procedimenti teorici; tali modelli possono essere di natura deterministica o probabilistica a seconda del tipo di legame che si suppone di esistere tra le relazioni.

I modelli empirici sono sviluppati a partire da osservazioni sperimentali, dei valori delle principali variabili che intervengono nel fenomeno della dispersione, risalendo poi alle leggi generali del fenomeno. Il principale limite di questi modelli consiste nel fatto che essi sono in grado di simulare solo le particolari condizioni nelle quali sono stati sviluppati, o condizioni non molto dissimili da queste.

Una seconda classificazione dei modelli matematici di dispersione è basata sui sistemi di riferimento adoperati, e si riferisce prevalentemente ai modelli di tipo teorico. La descrizione del fenomeno di dispersione può essere condotta secondo due tipi di approcci (euleriano e lagrangiano), a cui corrisponde l'uso di due diversi sistemi di riferimento spaziali.

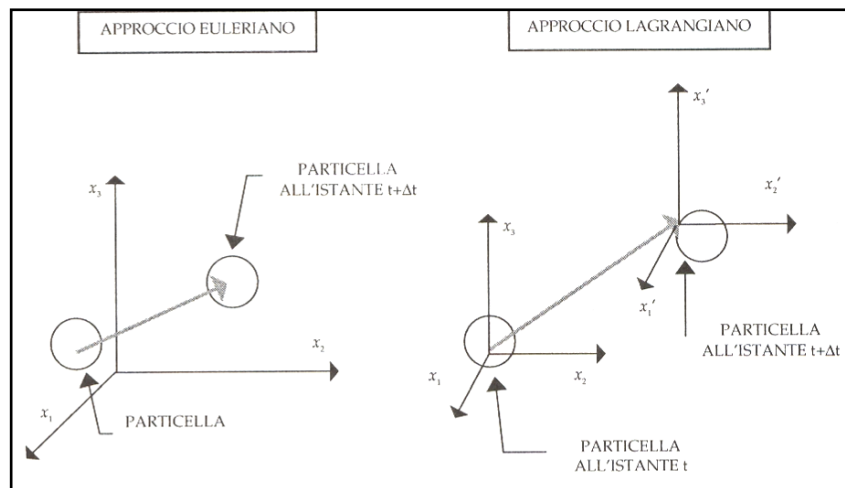


Fig. 2.2 – Differenza tra l'approccio lagrangiano e euleriano nella descrizione della dispersione degli inquinanti

L'approccio euleriano descrive l'evoluzione spaziale di una certa sostanza nell'atmosfera a partire da un sistema di riferimento fisso. I modelli teorici euleriani sono basati sull'equazione di continuità della sostanza che si disperde nell'atmosfera; tale equazione può essere risolta introducendo delle ipotesi semplificative.

L'approccio lagrangiano descrive il fenomeno rispetto ad un sistema di riferimento solidale con la sostanza in moto nell'atmosfera; i modelli teorici lagrangiani si basano sulla descrizione del moto delle singole particelle attraverso una distribuzione di probabilità della loro posizione spazio-temporale.

Questi due tipi di approcci possono poi portare, introducendo delle ipotesi semplificative, a modelli di tipo gaussiano, che sono quelli più utilizzati nella pratica.

Si descrivono nei successivi paragrafi tre modelli di dispersione degli inquinanti riportati in letteratura: i modelli euleriani a box, i modelli gaussiani, i modelli di canyon stradale.

I modelli euleriani a box

Si tratta di modelli di dispersione basati su una semplificazione dell'equazione della conservazione della massa di una sostanza inquinante che si disperde in atmosfera.

Alla base di questo modello vi è l'ipotesi che l'area di studio è una porzione parallelepipedica di atmosfera, delimitata superiormente da uno strato di inversione termica e nella quale la sostanza inquinante si disperde istantaneamente, dando luogo a concentrazioni uniformi su tutto il volume di controllo. Sotto quest'ultima ipotesi la concentrazione della sostanza inquinante nel box è funzione solo del tempo e non dello spazio:

$$c_i = c_i(t)$$

Si suppone inoltre che la velocità del vento sia costante in tutto il volume e che l'altezza di quest'ultimo coincida con l'altezza di mescolamento (è per definizione l'altezza alla quale avviene l'inversione termica) ed aumenti con il tempo.

Scelto un opportuno sistema di riferimento (x_1, x_2, x_3) , le dimensioni della base del box saranno Δx_1 e Δx_2 (Fig.2.5). Si ipotizza inoltre che il vettore velocità del vento sia diretto lungo l'asse x_1 .

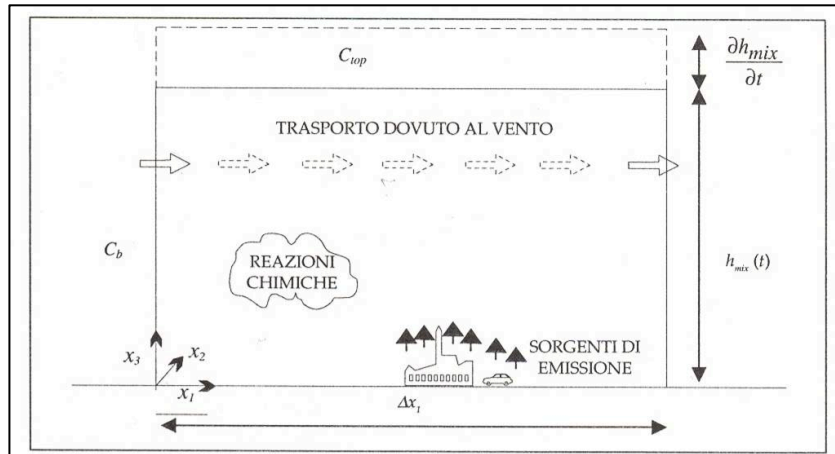


Fig. 2.5 – Schema del modello a box

L'altezza di mescolamento h_{mix} è funzione del tempo, all'aumentare di tale altezza di una quantità Dh_{mix} , all'istante di tempo $t+Dt$, varia la concentrazione nel box; si suppone inoltre, che nel volume di controllo ci sia un insieme di sorgenti di emissione che produca un contributo di concentrazione per unità di area e di tempo pari a $Q_A^i(t)$. Sia, infine, R_i la variazione di concentrazione dovuta alle reazioni chimiche tra le sostanze inquinanti che avvengono all'interno del box; essa è funzione delle concentrazioni di tutte le sostanze reagenti presenti nel volume di controllo.

Le condizioni al contorno, che consentono la descrizione matematica del fenomeno, comprendono: il valore $c_{i,top}(t)$ della concentrazione media al tempo t , sul lato superiore del box, e il valore $c_{i,b}(t)$ della concentrazione media immediatamente fuori dal lato sottovento del box.

Nelle condizioni ipotizzate, le variazioni di concentrazione nel tempo, dell' i -esima sostanza presente nel box, sono dovute a quattro diverse cause: l'aumento dell'altezza di mescolamento, le emissioni, le reazioni chimiche e il trasporto della sostanza dovuto al vento. Tali quantità sono evidenziate nell'equazione differenziale di base del modello a box, che esprime la variazione nel tempo della concentrazione dell' i -esima sostanza presente nel box:

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{1}{\Delta x_1} (c_{i,b} - c_i(t)) \cdot \bar{v} + \frac{1}{h_{mix}(t)} \cdot \frac{dh_{mix}(t)}{dt} \cdot (c_{i,top} - c_i(t)) + \frac{Q_A^i}{h_{mix}(t)} + R_i$$

Introducendo l'ipotesi semplificativa di stazionarietà del fenomeno ($\frac{dc_i}{dt} = \frac{dh_{mix}}{dt} = 0$), si ottiene una soluzione esplicita dell'equazione:

$$c_{i,eq} = c_{i,b} + \frac{\Delta x_1 \cdot Q_A^i}{h_{mix} \cdot v} + \frac{\Delta x_1 \cdot R_i}{v}$$

I modelli a box possono essere impiegati con la conoscenza, per ciascuna sostanza, delle espressioni in funzione del tempo dei tassi di emissione medi, della velocità media del vento e delle concentrazioni medie al contorno relative all'intera area presa in considerazione. Tale modello se da un lato ha il vantaggio di descrivere il fenomeno con equazioni differenziali ordinarie (e non a derivate parziali), dall'altro non può essere utilizzato per determinare le concentrazioni a livello locale.

I modelli gaussiani

Sia l'approccio euleriano che quello lagrangiano per la descrizione della dispersione conducono, sotto alcune ipotesi, ad una espressione in forma gaussiana della concentrazione media.

In particolare, nel caso dell'approccio lagrangiano, per conoscere l'andamento della concentrazione al variare del tempo è necessario seguire la posizione delle singole particelle. La descrizione delle traiettorie delle particelle non è determinabile puntualmente, si fa perciò riferimento ad un'impostazione probabilistica, ottenendo una distribuzione della concentrazione di tipo gaussiano.

Le ipotesi semplificative alla base di questi modelli sono la stazionarietà e l'omogeneità della turbolenza atmosferica e l'ipotesi del pennacchio ristretto, cioè che nella direzione della velocità del vento, gli effetti della turbolenza sulla dispersione siano trascurabili rispetto a quelli dovuti al vento stesso.

Nella Fig.2.6 si riporta uno schema della dispersione gaussiana in un sistema di riferimento (x,y,z), orientato secondo il vento, che consentirà di descrivere l'equazione della dispersione. L'equazione della dispersione fornisce una stima della distribuzione spaziale della concentrazione c_i della sostanza i in condizioni di stazionarietà in cui c_i non dipende dal tempo. Si consideri una sorgente puntiforme di emissione la cui intensità sia costantemente uguale a Q_p ; la sorgente di emissione viene posta sull'asse z ad altezza h dal suolo, ma per effetto dell'innalzamento del pennacchio l'emissione avviene ad un'altezza effettiva $H=h+\Delta h$, dove Δh rappresenta l'innalzamento del pennacchio.

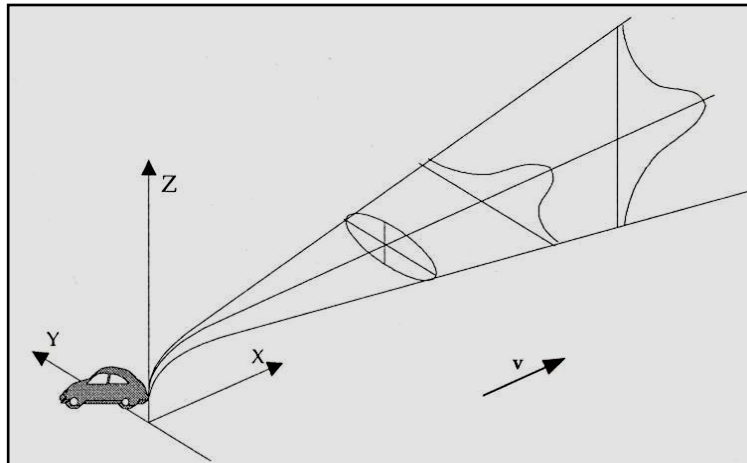


Fig. 2.6 – Schema della dispersione con distribuzione gaussiana in un sistema di riferimento orientato secondo la direzione del vento

Con riferimento ad un determinato intervallo di tempo in cui viene raggiunto l'equilibrio a partire da uno stato di concentrazione nulla, la concentrazione media di equilibrio può essere espressa dalla seguente equazione che è quella della distribuzione normale bivariata (Fig. 2.6 bis) nei piani (x,y) e (x,z):

$$(c_i(x, y, z)) = \frac{Q_p}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} * \exp \left[-\left(\frac{y}{\sqrt{2} \sigma_y} \right)^2 \right] * \exp \left[-\left(\frac{z-H}{\sqrt{2} \sigma_z} \right)^2 \right]; x, z \geq 0$$

I parametri σ_y e σ_z rappresentano le deviazioni standard della distribuzione di c_i e dipendono dal tempo.

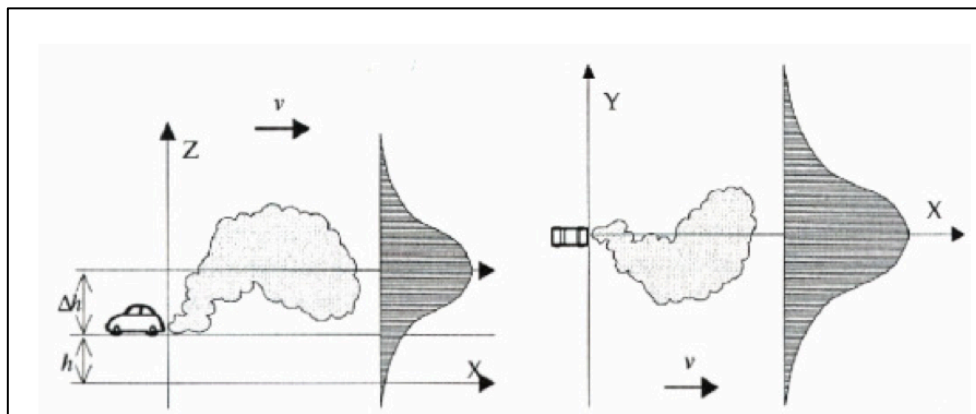


Fig. 2.6 bis – Viste nei piani (x,z) e (x,y) dello schema della dispersione gaussiana in un sistema di riferimento orientato secondo il vento

I modelli gaussiani sono frequentemente utilizzati nella pratica, ma l'assunzione delle varie ipotesi che portano all'espressione della concentrazione è un fattore limitante; le applicazioni di questi modelli hanno mostrato un'accuratezza piuttosto limitata .

L'ipotesi di stazionarietà dell'atmosfera è una condizione che si verifica difficilmente, in particolare nei pressi della superficie del suolo, la quale influenza notevolmente le caratteristiche di turbolenza dei moti dell'aria; infatti la traiettoria delle particelle disperdenti è disturbata dalla superficie del suolo che, a seconda dei casi, respinge, assorbe, o provoca la deposizione al suolo degli inquinanti.

L'ipotesi di omogeneità dell'atmosfera e di assenza di moti verticali dell'aria non sono realistiche nelle vicinanze del suolo, i cui effetti di attrito sui moti dell'aria causano un incremento della velocità del vento all'aumentare della quota. Questo fenomeno è facilmente visibile in luoghi con orografia complessa e in presenza di costruzioni e ostacoli, come avviene nei centri urbani; anche in presenza di terreno piatto e in assenza di ostacoli, la presenza di vie di trasporto e del relativo flusso veicolare provoca caratteristiche di disomogeneità dell'aria.

Il modello di canyon stradale

Tra i modelli di dispersione empirici vi è il modello canyon, nel quale la complessa struttura dello strato limite urbano viene scomposta in forme semplici che si ripetono nello spazio. Lo schema geometrico di riferimento è quello di una strada fiancheggiata da due file laterali di edifici, denominata appunto "strada a canyon" o "canyon urbano".

Sperimentalmente si è visto che la dispersione degli inquinanti all'interno di un canyon urbano è influenzata dalle caratteristiche geometriche del sito, quali la sua larghezza W , l'altezza degli edifici laterali H e la sua lunghezza L , e dalle condizioni di flusso atmosferico, quali la velocità media del vento v , misurata in corrispondenza dei tetti degli edifici, e la velocità media v_c del vento all'interno del canyon.

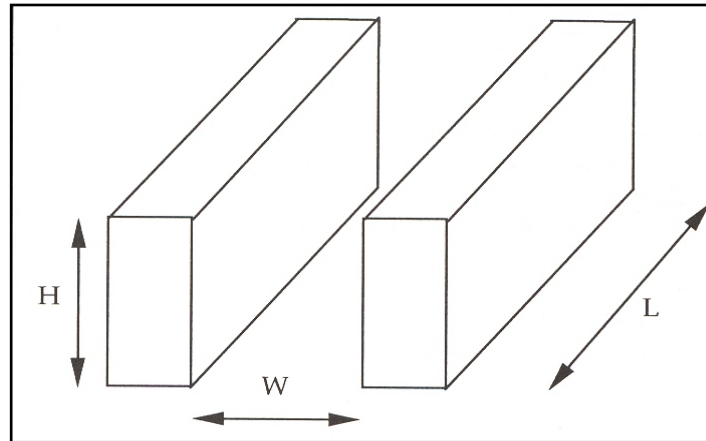


Fig. 2.7 - Le caratteristiche geometriche di un canyon

Un parametro significativo dal punto di vista geometrico è il coefficiente di forma α_c

dato dal rapporto tra l'altezza e la larghezza del canyon: $\alpha_c = \frac{H}{W}$.

Una delle caratteristiche del canyon è la tendenza a favorire l'instaurarsi di una circolazione locale dell'aria secondo un flusso elicoidale con asse parallelo a quello longitudinale del canyon (Fig. 2.8). Questo tipo di circolazione, parzialmente isolata dall'ambiente circostante, può limitare il trasporto verso l'esterno delle sostanze inquinanti, influenzando il processo di dispersione.

Gli studi sperimentali effettuati su strade di questo tipo hanno mostrato che le condizioni necessarie all'instaurarsi del vortice elicoidale sono le seguenti:

- direzione del vento, al livello dei tetti, perpendicolare all'asse del canyon;
- velocità media del vento, al livello dei tetti, superiore a 2 m/sec;
- coefficiente di forma del canyon compreso tra 1 e 1,5;

Per coefficienti di forma compresi tra 2 e 3, si ha la formazione di due vortici (b) distinti sovrapposti, come mostrato nella Fig. 2.8.

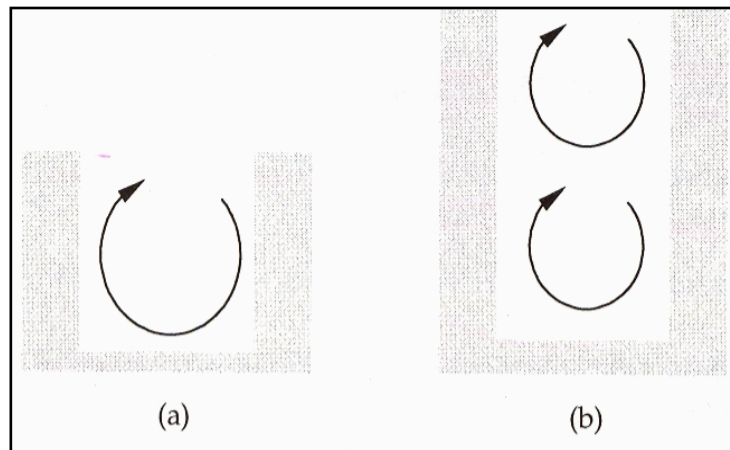


Fig. 2.8 – Circolazione isolata dell'aria in un canyon urbano per due valori del coefficiente di forma

In questo modello si presuppone che la concentrazione di inquinante all'interno del canyon sia somma di due contributi, uno *locale* c_c che dipende direttamente dalle emissioni dei veicoli che transitano nel canyon ed uno *di area* c_a che dipende dalla dispersione degli inquinanti emessi nelle zone circostanti.

La concentrazione totale nel canyon è data quindi dalla seguente formula:

$$C = C_c + C_a$$

L'inquinante al quale sono stati riferiti la maggior parte degli studi di modelli a canyon è il CO, grazie alle sue caratteristiche di non reattività. Uno dei modelli sperimentali più utilizzati è quello di Hoydich e Dabberdt (1988) dove si determina il contributo locale della concentrazione di CO sotto opportune ipotesi semplificative. Precisamente si suppone che siano uguali le altezze degli edifici posti ai due lati della strada e che si formi un unico vortice elicoidale (coefficiente di forma circa pari a 1). Sotto queste ipotesi la concentrazione nelle zone sottovento è mediamente maggiore di quella che si riscontra nel lato sopravvento della strada (Fig. 2.9).

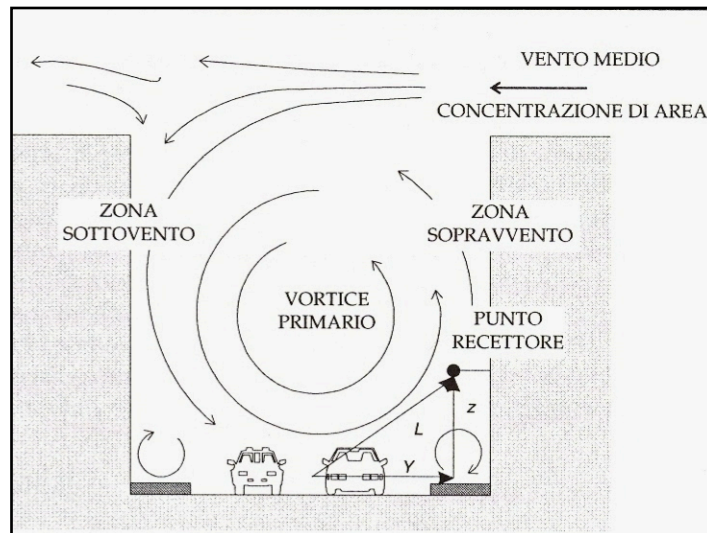


Fig. 2.9 - Le caratteristiche geometriche di un canyon

Il contributo locale alla concentrazione si suppone direttamente proporzionale all'entità delle emissioni locali Q_L (g/m s) nel canyon ed inversamente proporzionale alla velocità media del vento al livello del suolo e alle dimensioni verticali della zona di mescolamento Z:

$$c_c \cong \frac{Q_L}{v_s \cdot Z}$$

La velocità media del vento al suolo v_s è assunta proporzionale, attraverso una costante dimensionale k_v , alla somma tra la velocità media del vento (v) misurata al livello dei tetti e la velocità media del flusso d'aria indotta dal moto dei veicoli, supposta pari a 0,5 m/s, pertanto:

$$v_s = k_v(v + 0,5)$$

L'estensione verticale della zona di mescolamento (Z, espressa in metri) è supposta differente a seconda dell'esposizione; nei luoghi sottovento è ipotizzata proporzionale alla somma della distanza L_r (m), tra l'asse della strada e il punto in cui si calcola la concentrazione, detto punto recettore, e della lunghezza di mescolamento L_0 indotta dal campo di moto:

$$Z = k_l(L_r + L_0)$$

dove k_l è la costante dimensionale di proporzionalità. Scelto un opportuno sistema di riferimento (Fig. 2.9) ortogonale (x, y, z) con l'asse x coincidente con l'asse longitudinale della strada e l'asse z verticale diretto verso l'alto, si ha:

$$L_r = \sqrt{y^2 + z^2}$$

La concentrazione sottovento (leeward) $c_{c,L}$ è pari a:

$$c_{c,L} = K_L \frac{Q_L}{(v + 0,5) \cdot (Lr + L_0)}$$

dove la lunghezza L_0 , che rappresenta una stima della larghezza media dei veicoli, è pari a 2 metri e la costante è pari al seguente rapporto $k_L = 1/k_v k_i$; tale costante è stata posta in alcuni studi sperimentali pari a 7 (Johnson et al. (1971) e Ludwig e Dabbert (1972)).

Nella zona sopravento del canyon si assume l'estensione verticale della zona di mescolamento proporzionale alla larghezza W della strada; indicando con k_w la costante di proporzionalità: $Z = k_w W$.

La concentrazione locale nei luoghi del canyon situati sopravento (windward) si calcola con la seguente formula:

$$c_{c,W} = K_W \frac{Q_l}{(v + 0,5) \cdot W} \cdot \frac{H - z}{H}$$

in cui il coefficiente dato dal rapporto $(H-z)/H$ tiene conto dell'aumento della concentrazione all'aumentare della distanza dalla sommità dei tetti, e quindi dell'estensione dell'arco elicoidale di vortice sovrastante; il coefficiente $K_W = 1/k_v k_w$ è stato stimato sperimentalmente, ed è pari proprio a K_L .

Un'applicazione sperimentale del modello di Hoydich e Dabbert, al caso di una strada a canyon della città di Firenze, ha consentito di estendere il modello per consentire il calcolo della concentrazione complessiva di CO in un punto del canyon, senza trascurare, quindi, il contributo della concentrazione di area.

L'espressione della concentrazione ottenuta è:

$$C = k_c \cdot C_c + k_0$$

dove:

c è la concentrazione totale dell'inquinante nell'aria;

c_c è il contributo locale della concentrazione calcolato con il modello di Hoydich e Dabbert (depurato dei coefficienti);

k_c e k_0 sono coefficienti di calibrazione che variano per il settore sottovento, sopravvento e intermedio del canyon.

Sebbene la schematizzazione empirica del fenomeno di dispersione degli inquinanti, nelle strade a canyon, è stata inizialmente studiata solo per gli inquinanti inerti, sono stati sviluppati modelli empirici anche per la previsione dell'andamento della concentrazione degli ossidi di azoto (che subiscono numerose trasformazioni chimiche, una volta immessi nell'atmosfera).

Il modello di Gualtieri e Tartaglia (1993) fornisce la seguente espressione della concentrazione degli ossidi di azoto (espressa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$):

$$NO_x = a \left[\frac{Q_s}{v + 0,5} \right] \cdot F + bT + cH + \sum_i d_i \cdot Rad_i + k_0$$

dove:

Q_s ($\text{g}/\text{m s}$) è l'emissione media;

F (m^{-1}) è un fattore di forma dipendente dal settore di direzione del vento;

v (m/s) è la velocità media del vento al livello dei tetti;

T ($^{\circ}\text{C}$) è la temperatura dell'aria esterna;

H (m) è l'altezza di mescolamento, calcolata in base alle variabili meteorologiche;

Rad_i è la radiazione solare oraria dove la relativa sommatoria è estesa alle 23 ore precedenti quella a cui il calcolo è riferito;

a, b, c, d_i, k_0 sono coefficienti dimensionali, calibrati secondo una regressione lineare.

Il fattore di forma F è espresso, a seconda della zona di esposizione al vento, in funzione dell'altezza media degli edifici H , della larghezza del canyon, dalla distanza del punto recettore dall'asse stradale x , dall'altezza del recettore e dalla lunghezza di mescolamento L_0 indotta dal moto veicolare.

In letteratura sono presenti numerosi studi sulle strade a canyon. Tra questi si può citare il lavoro di Weber et al. (2013) nel quale sono state misurate per un periodo di sei mesi le concentrazioni di particolato in una strada a canyon a Essen, in Germania, sotto differenti condizioni meteorologiche. I risultati di tali rilievi sono stati messi a confronto con le misure effettuate in un'area suburbana. Gli autori hanno rilevato che

in media la concentrazione di inquinante misurata in corrispondenza della strada a canyon era pari a circa il doppio di quella misurata nel sito suburbano.

Nel lavoro di Venegas et al. (2014) è proposto un modello per la stima dell'inquinamento da traffico in una strada a canyon della città di Buenos Aires, basato su dati di traffico e dati meteorologici. I risultati ottenuti sono stati messi a confronto con i dati misurati dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente di Buenos Aires. E' stata riscontrata una buona correlazione tra i dati di concentrazione oraria stimati e quelli misurati.

Nel contributo di Hulsmann et al. (2014) sono state messe a confronto le concentrazioni simulate mediante un modello integrato traffico-inquinamento con quelle misurate in un canyon urbano della città di Monaco, in Germania. Inoltre, nello studio sono stati mostrati gli effetti di una strategia di intervento basata sull'introduzione di limiti di velocità.

2.3. Il modello standard europeo per la stima delle emissioni da traffico

I modelli per l'elaborazione di scenari e inventari delle emissioni atmosferiche più utilizzati si basano sull' "Emission Factor Approach", secondo il quale le emissioni di un dato inquinante relative ad un certo settore sono il prodotto delle singole attività che generano emissioni e dei rispettivi "Emission Factor".

Un modello di calcolo frequentemente utilizzato in Europa per la stima delle emissioni di inquinanti atmosferici provenienti dai veicoli stradali, è denominato COPERT 4 (Computer Programme for Estimating Emissions from Road Transport).

La metodologia COPERT è stata introdotta dall'EEA (European Environment Agency – Agenzia Europea per l'Ambiente), nell'ambito del progetto CORINAIR (COordination Information AIR) per la redazione dei rapporti sullo stato dell'ambiente, e dai National Reference Center per la realizzazione degli inventari nazionali delle emissioni. Lo standard europeo per la compilazione degli inventari delle emissioni è quello del progetto CORINAIR.

La classificazione delle sorgenti emissive usata per CORINAIR si basa su categorie chiamate SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), suddivise in tre livelli di disaggregazione (settore, sottosettore, attività/tecnologia); il primo livello di aggregazione prevede 11 settori.

SNAP	Settore
01	Combustione – Energia e industria di trasformazione
02	Combustione – Non industriale (riscaldamento etc.)
03	Combustione - Industria
04	Processi produttivi
05	Estrazione, distribuzione combustibili fossili/geotermico
06	Uso di solventi
07	Trasporti stradali
08	Altre sorgenti mobili (mezzi agricoli, industriali, per giardinaggio, navigazione, ferrovia)
09	Trattamento e smaltimento di rifiuti
10	Agricoltura (fertilizzanti, fitofarmaci, allevamenti)
11	Altre sorgenti (natura)

Fig. 2.10 – Classificazione delle sorgenti di emissione CORINAIR

Per ciascun settore sono disponibili diversi metodi di calcolo. La metodologia CORINAIR per la stima delle emissioni da traffico stradale è basata sul calcolo dei

fattori di emissione dei principali inquinanti, a partire dalla conoscenza delle seguenti variabili:

- tipologia di veicolo (tipo di carburante, anno di produzione, cilindrata per veicoli leggeri o motocicli e per peso per i veicoli di trasporto merci), considerata suddividendo il parco veicolare in 38 gruppi appartenenti a 10 categorie;
- velocità media;
- lunghezza del tratto percorso;
- presenza o meno del ciclo di preriscaldamento (vista l'esistenza dei tre contributi emissivi: a freddo o in transitorio termico, a caldo o a regime termico evaporativo);
- tipologia di strada percorsa (urbana, extraurbana, autostrada);
- condizioni climatiche (temperatura media mensile).

Le sostanze inquinanti esaminate da modello sono 10: gli Ossidi di Azoto (NO_x), l'Ossido di Bioazoto (N_2O), gli Ossidi di Zolfo (SO_x), il metano CH_4 , gli idrocarburi volatili non metallici, il Monossido di Carbonio (CO), l'Anidride Carbonica (CO_2), l'Ammoniaca (NH_3), il particolato (PM_{10}) e i composti del Piombo.

Si tratta di un modello disaggregato, in quanto consente di ottenere i valori delle emissioni per ogni categoria veicolare.

In particolare, le quantità di sostanze emesse in atmosfera dagli autoveicoli dipendono sia dalle emissioni dei veicoli (fattori di emissione), che dalla numerosità delle flotte (di veicoli a benzina, diesel, GPL, etc.) e dalle relative percorrenze. A ciascuna classe veicolare e per ogni inquinante il modello associa delle funzioni di stima delle emissioni e dei consumi dipendenti dalla velocità. Tali funzioni rappresentano delle curve medie di emissione e di consumo di carburante; esse vengono ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie e marche di veicoli e si riferiscono a prove realizzate in vari paesi europei, su diverse varietà di cicli di guida.

Le emissioni di inquinante i da veicoli su strada sono calcolati come la somma di tre tipologie di contributi:

- emissioni a caldo, prodotte durante il funzionamento del motore alla temperatura di esercizio;
- emissioni a freddo, prodotte nella fase di riscaldamento del motore;
- emissioni evaporative costituite solo dai NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compound).

Poiché diverse situazioni di guida comportano differenti condizioni di funzionamento del motore (e quindi differenti tipologie di emissione), il modello considera tre differenti condizioni di guida che avvengono su percorsi urbani, rurali e sulle autostrade.

Il modello COPERT calcola le emissioni a caldo in funzione della media annua dei chilometri percorsi e della velocità media dei veicoli, da cui dipende il fattore di emissione:

$$E_{hot,i} = \sum_{jk} n_j * m_{jk} * e_{hot,ijk} \quad \left(\frac{tonn.}{anno} \right)$$

dove:

n_j : numero di veicoli della classe j-esima

m_{jk} : distanza media percorsa da ogni veicolo di categoria j sulla strada di classe k (km/veicolo)

$e_{hot,ijk}$: fattore di emissione per l'inquinante i, rilevato per la categoria di veicoli j, sulla strada di classe k.

Le emissioni a freddo vengono calcolate come un surplus rispetto alle emissioni che si avrebbero se tutti i veicoli funzionassero sempre a temperatura di regime; in particolare:

$$E_{cold,i} = B - (A * E_{hot,i}) \quad (tonn./anno)$$

dove:

B: emissioni effettive finché il motore non raggiunge la temperatura di esercizio;

A: fattore moltiplicativo che si può esprimere come frazione di chilometri percorsi prima del raggiungimento delle condizioni di regime.

La formulazione utilizzata per il calcolo delle emissioni a freddo è la seguente:

$$E_{cold,i} = \sum_{j,k} \beta_j * n_j * m_j * e_{hot,i,j} * \left(\frac{e_{cold,i,j}}{e_{hot,i,j}} - 1 \right) \quad (tonn./anno)$$

dove:

β_j : frazione di chilometri percorsi con il motore o il catalizzatore freddo dalla categoria di veicoli j

n_j : numero di veicoli della classe j-esima

m_j : distanza media percorsa da ogni veicolo di categoria j (km/veicolo)

$e_{hot,ij}$: fattore di emissione per l'inquinante i, rilevato per la categoria di veicoli j

$e_{cold,ij}/e_{hot,ij}$: rapporto tra le emissioni a freddo e quelle a caldo per l'inquinante i e per la categoria di veicoli j.

Per quanto riguarda le emissioni evaporative esistono tre fonti principali:

- diurnal emissions: vapori emessi durante la giornata causate dall'evaporazione del carburante a seguito delle variazioni di temperatura;
- hot and warm soak emissions: causate dal calore latente del motore (al momento dello spegnimento) che causa l'evaporazione del carburante rimasto nel sistema di alimentazione;
- running emissions: vapori che si generano nel serbatoio emessi durante la marcia.

La formulazione utilizzata per il calcolo delle emissioni evaporative è la seguente:

$$E_{vap} = 365 * \sum_j n_j * (e_d + S_c + S_{fi}) + R \quad \left(\frac{tonn.}{anno}\right)$$

dove:

n_j : numero di veicoli della classe j-esima

e_d : fattore di emissione delle perdite diurne

S_c : fattore di emissione a caldo e a freddo per i veicoli a benzina dotati di carburatore

S_{fi} : fattore di emissione a caldo e a freddo per i veicoli a benzina dotati di iniezione elettronica

R: perdite durante il moto.

I dati di input sono i seguenti:

- condizioni climatiche (temperatura media mensile);
- composizione della flotta veicolare: veicoli pesanti/leggeri; classe di emissione EURO 0-5; tipologia di combustibile (diesel, benzina);
- percorrenze totali in km per categoria di veicolo e tipologia di strada (urbana, autostradale);
- velocità media per tipologia di veicoli e strada.

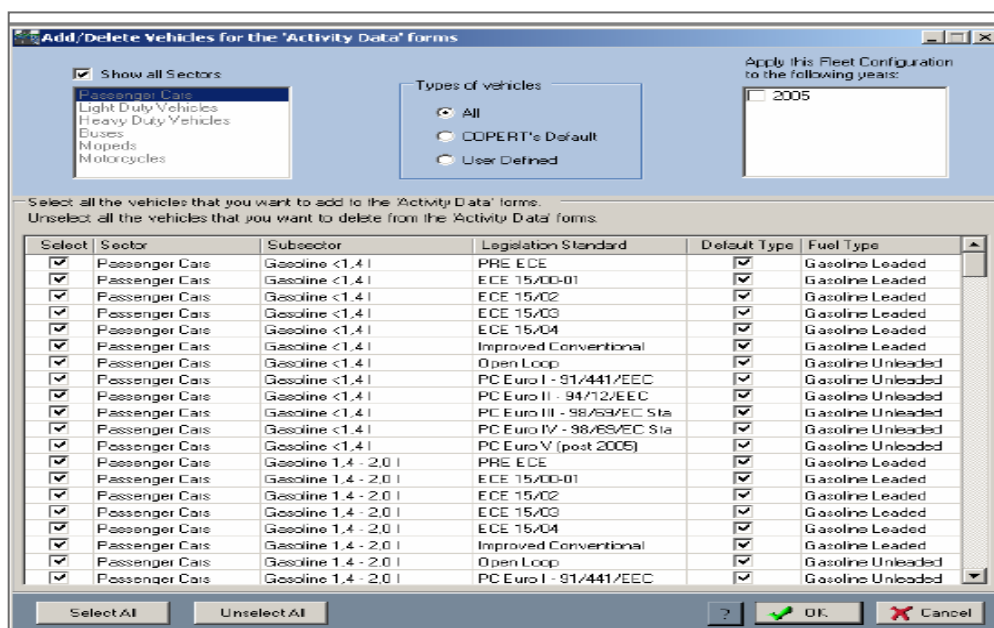


Fig.2.11 - Schermata degli input del Software COPERT 4

Gli output del modello (Fig.2.12):

- emissioni di ciascun inquinante;

- ripartizione delle emissioni per categoria di veicolo (veicoli passeggeri, veicoli commerciali leggeri e pesanti) e per categoria dell'infrastruttura stradale (urbana, extraurbana e rurale).

22/10/2008 12.46.44		Emission Results - Driving Mode oriented				COPERT 4 version 5.1	
		CO					
POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]	
CO	2007		1.311,22	0,00	0,00	1.311,22	
		Passenger Cars	576,56	0,00	0,00	576,56	
		Gasoline 1,4 - 2,0 l	529,15	0,00	0,00	529,15	
		Diesel >2,0 l	47,41	0,00	0,00	47,41	
		Light Duty Vehicles	441,29	0,00	0,00	441,29	
		Gasoline <=3,5t	351,18	0,00	0,00	351,18	
		Diesel <=3,5 t	90,11	0,00	0,00	90,11	
		Heavy Duty Trucks	293,37	0,00	0,00	293,37	
		Rigid <=7,5 t	39,37	0,00	0,00	39,37	
		Rigid 7,5 - 12 t	66,42	0,00	0,00	66,42	
		Rigid 14 - 20 t	53,06	0,00	0,00	53,06	
		Rigid 20 - 26 t	111,74	0,00	0,00	111,74	
		Rigid 26 - 28 t	22,78	0,00	0,00	22,78	

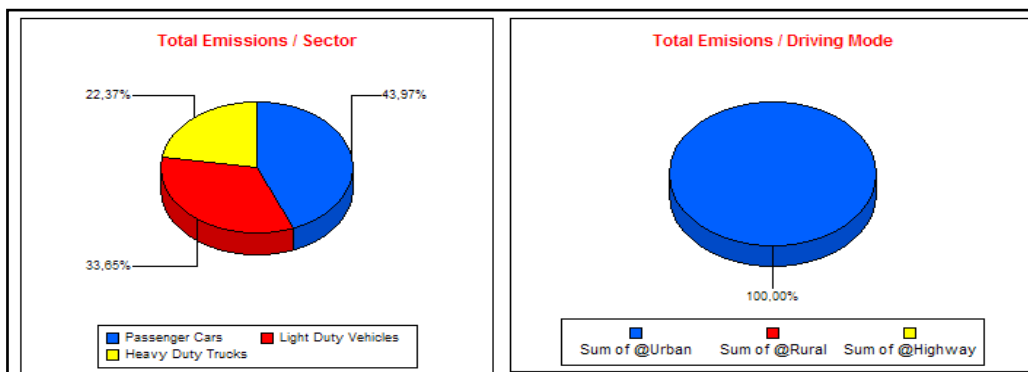


Fig.2.12 - Schermata output del Software COPERT 4

2.4. I software per la stima dell'inquinamento da traffico

I principali software per la stima dell'inquinamento da traffico urbano sono parte integrante dei software per la simulazione del traffico urbano, vista la correlazione tra i due fenomeni. Gli strumenti informatici a supporto delle scelte di pianificazione urbana e del traffico risultano necessari per la conoscenza dei livelli di concentrazione delle sostanze inquinanti emesse dai veicoli stradali.

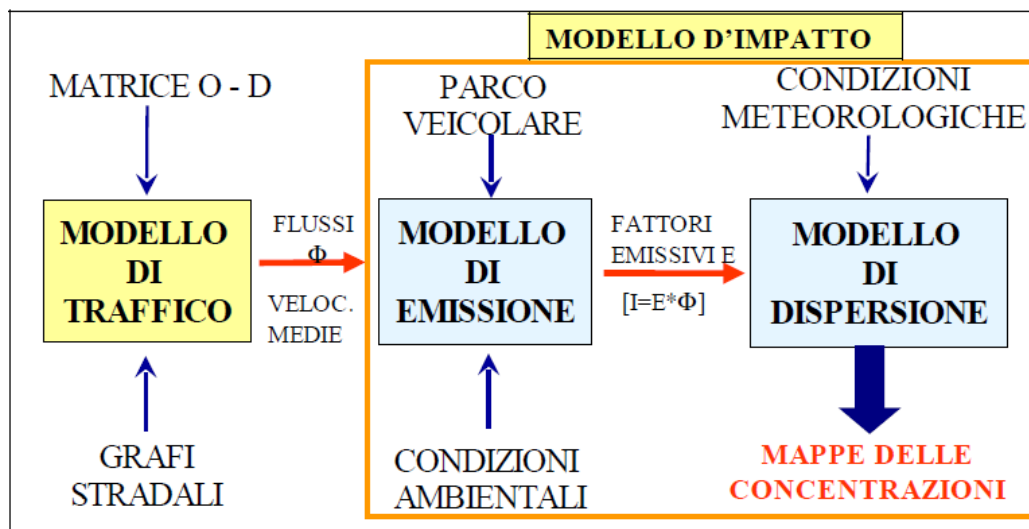


Fig 2.13 – Schema modelli necessari per la valutazione dell'inquinamento atmosferico da traffico

I sistemi GIS sono quelli maggiormente utilizzati in questo ambito, in quanto il loro utilizzo consente la georeferenziazione e visualizzazione dei dati di inquinamento e, attraverso procedure di calcolo sequenziali e semi-automatiche, a partire da determinati dati input, fornisce opportuni output che possono indirizzare scelte di tipo programmatico e/o di pianificazione.

In questo paragrafo verrà presentato uno dei sistemi modellistici per la stima dell'inquinamento da traffico, rinviando all'Appendice 3 per un approfondimento dei software commerciali utilizzati nel settore del traffico e dei trasporti che comprendono moduli per la previsione e la stima delle condizioni di inquinamento atmosferico.

Il software oggetto di approfondimento è stato sviluppato dalla ARIANET S.r.l.. Si tratta di uno strumento utilizzato per la valutazione dell'impatto delle emissioni inquinanti da traffico veicolare che dispone di una catena di modellistica integrata, articolata in 3 sottosistemi:

- CARUSO (CAR Usage System Optimization) per la stima del livello di carico veicolare sulla rete stradale: acquisizione ed elaborazione dati relativi ai volumi di traffico sull'intera rete stradale;
- TREFIC (TRaffic Emission Factor Improved Calculation) per il calcolo delle emissioni inquinanti da traffico veicolare: quantità di gas inquinanti emessi dai veicoli circolanti sulla rete stradale;
- ARIAImpact per la simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti su diverse scale spazio temporali al fine di calcolare i valori di concentrazione.

Il sistema è in grado di rilevare i dati in tempo reale e risultati delle simulazioni possono essere verificati e confrontati con le concentrazioni di gas inquinanti misurate dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria.

CARUSO è un modello di sintesi della matrice Origine/Destinazione (O/D) unito ad un modello di assegnazione dei flussi sulla rete di traffico; a partire dalle caratteristiche degli archi stradali (modello di offerta: lunghezza, velocità massima, senso di percorrenza, capacità, curva di deflusso), da misure sperimentali di traffico su alcune sezioni rappresentative e da un'eventuale stima preliminare della matrice O/D il codice calcola i flussi e le velocità dei veicoli sui singoli archi, nonché i percorsi di minimo costo e i percorsi alternativi più probabili.

TREFIC calcola le emissioni inquinanti dei veicoli secondo la metodologia ufficiale europea COPERT 4. Il codice, a partire dai dati relativi alla classificazione del parco circolante in termini di età, cilindrata, alimentazione, utilizza i dati di flusso e di velocità dei veicoli, calcolati con il modello di traffico per ricavare una stima della quantità di inquinanti emessi da ciascun arco stradale.

ARIAImpact, invece, viene utilizzato per la valutazione dell'impatto statistico a lungo termine delle emissioni inquinanti sulla qualità dell'aria, in particolare da traffico veicolare e sorgenti industriali. Il modulo di dispersione in atmosfera è un modello gaussiano. Tra gli output del modello vi sono le mappe relative alle concentrazioni medie di gas inquinanti nel periodo di riferimento e la frequenza dei superamenti dei valori limite previsti dalla normativa.

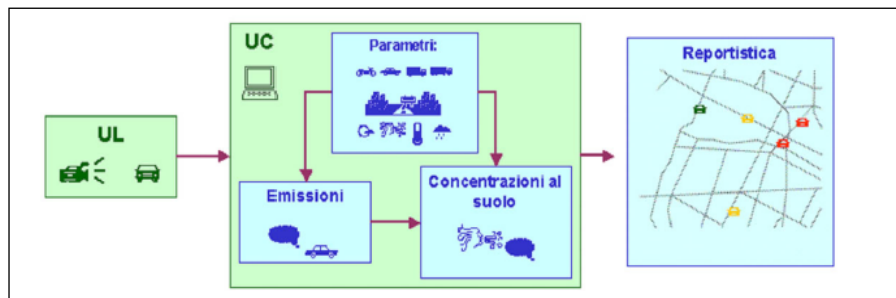
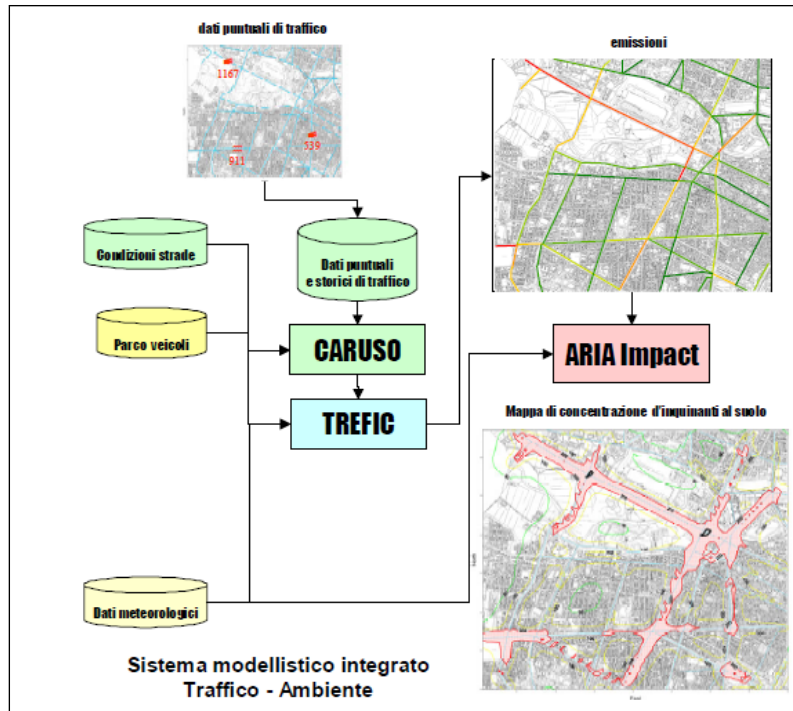


Fig 2.13 – Struttura del software sviluppato dalla Arianet S.r.l

PARTE SECONDA - LOGISTICA URBANA E MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE SU RETE



Introduzione alla Parte Seconda

La seconda parte della ricerca riguarda il tema della logistica urbana (City Logistics) e i modelli matematici di Ottimizzazione su Rete per l'implementazione di una strategia di intervento.

La logistica urbana rappresenta una delle possibili risposte al problema dell'inquinamento atmosferico prodotto dai processi di mobilità nelle aree urbane e metropolitane, descritto nella prima parte della ricerca. Le due tematiche risultano correlate secondo l'assunto comunemente adottato in letteratura che il trasporto veicolare, e il trasporto delle merci in particolare, sia tra le cause principali di inquinamento ambientale. La letteratura sul tema è molto ampia.

Nelle città di medie e grandi dimensioni il trasporto delle merci rappresenta un contributo significativo ai problemi di congestione, mancanza di aree di parcheggio, inquinamento e consumi energetici [Munuzuri et al., 2010].

Visto che il trasporto su strada è una delle maggiori fonti di inquinamento atmosferico nelle aree urbane vi è la necessità di integrare i modelli di traffico con i modelli per la stima dell'inquinamento al fine di analizzare l'impatto sull'ambiente delle politiche sul sistema di trasporto [Hulsmann et al., 2014].

Durante l'attività di ricerca è stato approfondito il concetto di "Logistica Urbana" pervenendo ad un ampliamento del suo campo di applicazione, non ridotto al solo traffico delle merci nelle aree urbane, ma inteso come insieme delle problematiche e degli strumenti per la gestione dell'intera mobilità in un determinato territorio.

Il termine Logistica Urbana può essere quindi esteso sia rispetto all'ambito territoriale di riferimento (regionale e non solo urbano) che rispetto al "contenuto" della logistica, per comprendere tutto quello che avviene sulla rete e sul territorio in termini di:

- traffico merci (piattaforme logistiche, transit point, merci pericolose, etc.)
- misure di gestione e controllo del traffico (regolazione e tariffazione degli accessi, parcheggi, semafori, etc.)
- trasporto collettivo (ferro e gomma)
- servizi di trasporto dedicato (scuole, turismo, sanità, rifiuti, protezione civile, etc.)
- monitoraggio ambientale (centraline etc.)
- monitoraggio interventi sulla rete stradale (manutenzione strade e delle aree di cantiere, etc.).

In questo contesto più ampio è da sottolineare il ruolo strategico delle attività di monitoraggio, sia dei flussi di traffico che degli inquinanti, nonché l'importanza dei sistemi di infomobilità e dei sistemi telematici di videosorveglianza.

Queste considerazioni hanno portato ad auspicare lo sviluppo di una Centrale della Logistica Urbana, vista come naturale sviluppo delle attuali centrali del traffico (Fig.3.1).

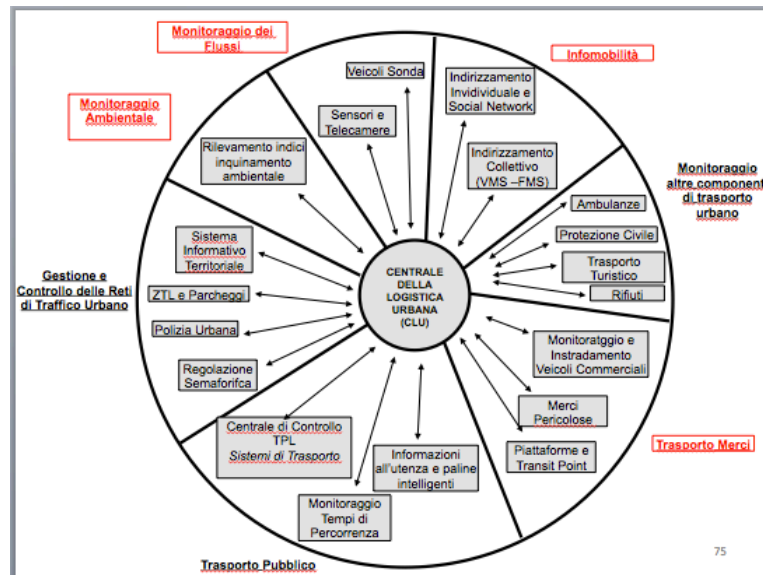


Fig. 3.1. – La Centrale della Logistica Urbana

Numerose sono le strategie di intervento per il miglioramento dell'efficienza del sistema dei trasporti in un'area urbana, da adottare in modo complementare e integrato. Gli interventi per il miglioramento della congestione delle aree urbane hanno diversa natura e possono essere classificati come segue:

- tecnologici
- tattico – gestionali
- strategico – infrastrutturali.

Gli interventi di tipo tecnologico riguardano prevalentemente il miglioramento delle prestazioni tecniche dei veicoli, attraverso l'utilizzo di mezzi a basso impatto ambientale (GPL, metano, elettrici) e a capacità ridotta per la distribuzione della merce ai clienti finali.

Gli interventi gestionali, di medio-breve periodo, riguardano la delimitazione di Zone a Traffico Limitato (ZTL) e aree pedonali, la regolazione coordinata dei semafori, l'utilizzo di sistemi di infomobilità, la riorganizzazione dei sensi di marcia, la restrizione e il divieto di accesso dei veicoli commerciali nei centri storici attraverso la definizione di opportune finestre temporali per il carico e lo scarico delle merci.

Gli interventi infrastrutturali, di lungo-medio periodo, comprendono la costruzione di nuovi assi stradali, collegamenti ferroviari e tranviari, parcheggi di interscambio, piattaforme logistiche per lo stoccaggio e lo smistamento delle merci.

Tra tutti questi interventi l'attenzione è stata focalizzata sugli interventi strettamente legati al trasporto delle merci.

In letteratura, alcuni autori [Russo e Comi, 2010] hanno proposto una classificazione delle politiche di logistica urbana e dei relativi impatti. Nel lavoro di Boogaard et al. (2012) è stato rilevato l'impatto delle Zone a Traffico Limitato e delle misure locali sul traffico sulle concentrazioni di alcuni inquinanti legati al traffico di veicoli merci in cinque aree urbane olandesi. In particolare, le misure di PM_{10} , $PM_{2.5}$ e NO_x sono state condotte in otto strade prima e dopo l'implementazione degli interventi. Al fine di controllare l'andamento generale delle concentrazioni, i siti di misura sono stati localizzati anche in zone di background suburbano. E' stato rilevato che tutte le concentrazioni di inquinanti avevano subito una diminuzione. Gli autori concludono che ad eccezione di una strada urbana dove i flussi di traffico avevano subito una riduzione drastica, le politiche locali di traffico sui mezzi pesanti non sono state sufficienti per indurre diminuzioni significative delle concentrazioni di inquinanti; vi è pertanto la necessità di intervenire con politiche di tipo strategico-infrastrutturali.

Molte amministrazioni hanno implementato misure per ridurre gli impatti negativi del trasporto delle merci nelle aree urbane, ma in alcuni casi ne è stata provata l'inefficienza [Filippi, Nuzzolo, Comi, Delle Site, 2010]. Il lavoro di Filippi et al. 2010 propone una metodologia per la valutazione ex ante delle politiche sul trasporto urbano delle merci. Lo studio è focalizzato sulla stima delle emissioni di inquinanti. La metodologia proposta, applicata all'area urbana di Roma, ha mostrato che un centro di distribuzione urbano può essere un intervento più efficiente dal punto di vista ambientale rispetto a politiche basate sul rinnovo delle flotte veicolari.

Nel lavoro di Munuzuri et al. (2010) è proposto un modello per stimare il trasporto delle merci nella città di Siviglia in Spagna. L'obiettivo del lavoro è il calcolo degli impatti ambientali (in termini principalmente di consumi energetici) in relazione ad interventi di logistica urbana. Infine, nel lavoro di Berrone et al. (2012) è proposto un

approccio per valutare l'effetto di differenti scenari di traffico sulla distribuzione degli inquinanti da traffico nelle aree urbane. In particolare, tramite l'implementazione di un modello macroscopico di traffico e di un modello di dispersione degli inquinanti, è stato studiato l'impatto di alcune strategie di mobilità sostenibile sulla riduzione dell'inquinamento da traffico.

Sulla base di queste ed altre considerazioni nella seconda parte della tesi verrà dato particolare risalto alle politiche di tipo strategico-infrastrutturale, ritenendo tali politiche più idonee a realizzare forti riduzioni dei livelli di inquinamento.

In dettaglio, nella seconda parte del lavoro, sono stati definiti il concetto di logistica e di logistica urbana, riportando gli approcci presentati in letteratura, con particolare riferimento agli ambiti di applicazione e alle possibili tipologie di intervento, finalizzate a garantire una maggiore salvaguardia ambientale e vivibilità nelle aree oggetto di studio. Sono inoltre descritte, al fine di offrire una panoramica delle politiche di logistica urbana, le strategie messe in atto da alcune amministrazioni italiane ed estere, finanziate prevalentemente nell'ambito di progetti europei. E' infine illustrato il quadro normativo in materia di logistica urbana, con riferimento alle linee guida e agli strumenti di programmazione e pianificazione a scala comunitaria, nazionale e locale.

Dal punto di vista modellistico, la seconda parte è incentrata sui problemi decisionali di ottimizzazione delle catene logistiche, con riferimento ai modelli e metodi di Ottimizzazione su Rete. Nell'ambito della ricerca sono stati oggetto di studio alcuni modelli di ottimizzazione per l'implementazione di una strategia di Logistica Urbana, basata sulla localizzazione di piattaforme logistiche per la distribuzione delle merci. Il problema di localizzazione consiste nell'individuazione della posizione ottima di nodi logistici, luoghi in cui avviene la rottura del carico, con passaggio della merce da veicoli a capacità maggiore a veicoli di dimensioni ridotte ed eco-compatibili per la distribuzione della merce ai clienti finali. Al problema di localizzazione si aggiunge, inoltre, quello dell'identificazione del percorso ottimo dei veicoli sulla rete stradale, dalle piattaforme logistiche ai punti di domanda localizzati nelle città (problema di Routing).

Nel lavoro di tesi, oltre ai problemi di localizzazione e di routing classici, sono stati oggetto di studio modelli integrati che ottimizzano simultaneamente i due problemi della localizzazione dell'infrastruttura logistica e della determinazione del percorso ottimo dei veicoli (modelli integrati di Location - Routing). L'interdipendenza tra la

componente di Location e quella di Routing si rivela particolarmente indicata a descrivere ed affrontare i problemi di logistica distributiva.

L'attenzione è stata rivolta, inoltre, a modelli di Location-Routing, attualmente in fase di sperimentazione presso il gruppo di Ricerca Operativa del DIETI, dove l'approccio utilizzato per affrontare il problema di localizzazione è basato sull'intercettazione dei flussi (Flow Intercepting Facility Location).

E' stato, infine, affrontato un caso di studio relativo al sistema distributivo nell'area urbana Napoli. In particolare, è stata descritta un'ipotesi di localizzazione di "transit point" e di instradamento dei veicoli per servire i clienti della rete di distribuzione al dettaglio. Il modello di Location-Routing è stato implementato mediante l'ausilio del software di ottimizzazione X-press-MP della FICO.

Capitolo 3 – La Logistica Urbana

Nel presente capitolo si definiscono i concetti di logistica e di logistica urbana, con particolare riferimento agli ambiti di applicazione e alle possibili tipologie di intervento finalizzate a garantire una maggiore salvaguardia ambientale e vivibilità nelle aree oggetto di studio. Si fornisce, inoltre, un quadro delle politiche di logistica urbana messe in atto da alcune amministrazioni italiane ed estere, finanziate prevalentemente nell'ambito di progetti europei, tenendo conto anche degli aspetti normativi.

3.1. La logistica e le sue componenti

Il Council of Logistics Management (CLM), una delle maggiori organizzazioni professionali di personale logistico, definisce la "logistica" come segue: "La logistica è quella parte nell'ambito del processo di gestione della supply chain che pianifica, implementa e controlla l'efficiente ed efficace flusso e immagazzinamento dei beni commerciali, dei servizi e delle relative informazioni, dal punto di origine al punto di consumo al fine di soddisfare le esigenze dei clienti". Da questa definizione si comprende il ruolo fondamentale che la logistica riveste nella realtà economica e sociale di un Paese. La logistica non è confinata alle sole operazioni connesse con la produzione industriale, ma è importante per tutti i tipi di impresa, incluso le istituzioni governative, gli ospedali, le scuole, le aziende di servizi come le banche. In Fig. 3.1 si riporta uno schema delle principali attività della logistica, nel quale viene illustrata la relazione con risorse naturali, umane, finanziarie e informative. In particolare, i fornitori procurano le risorse che la logistica gestisce nella forma di materie prime, inventario dei processi in ingresso e prodotti finiti. Le azioni di Management forniscono la struttura per le attività di logistica attraverso il processo di pianificazione, implementazione e controllo. Gli output del sistema così descritto sono il vantaggio competitivo, il profitto in termini di spazio e tempo, un movimento efficiente verso il cliente e una qualità esclusiva dell'azienda. Questi risultati sono resi possibili da prestazioni efficienti ed effettive delle attività o servizi di logistica, alcune delle quali sono elencate in Fig. 3.1bis.

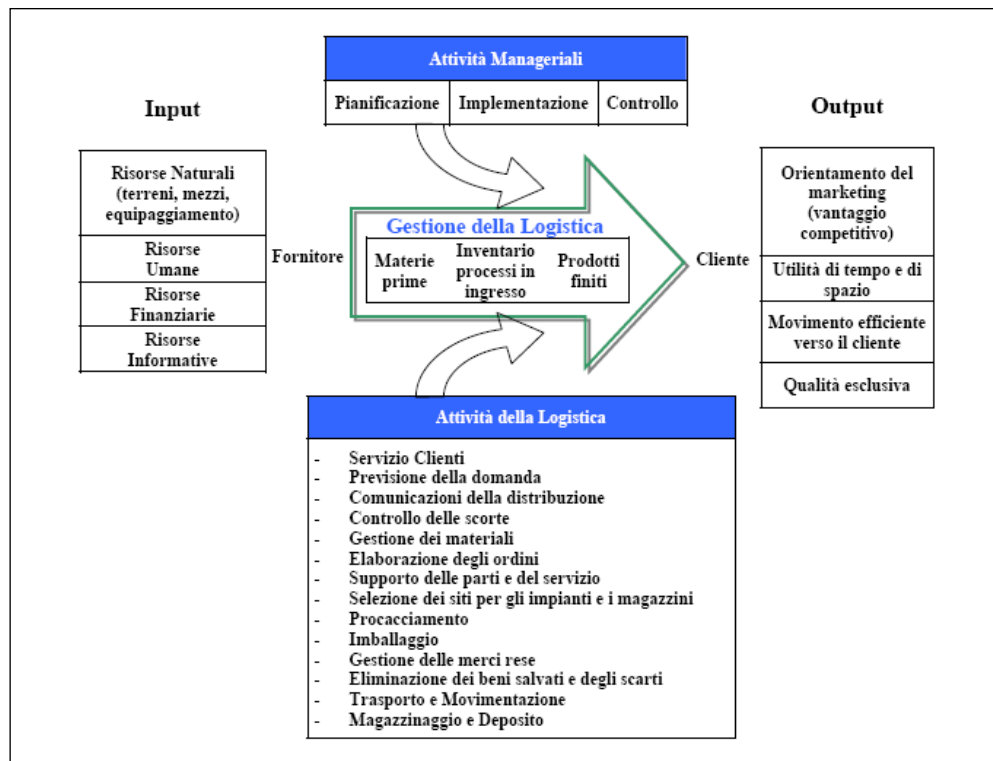


Fig. 3.1.bis - Componenti della catena logistica

In sintesi, con il termine logistica, si indica la funzione di programmazione e gestione di attività che vanno dall’approvvigionamento delle materie prime alla distribuzione dei prodotti finiti. Un sistema logistico è costituito dall’insieme di componenti e attori che interagiscono tra loro nell’espletamento delle funzioni logistiche. Tradizionalmente si distingue tra logistica interna, per indicare tutti gli aspetti di programmazione e di organizzazione interni ai sistemi di produzione (impiego di risorse, schedulazione di attività e processi, controllo di qualità etc.), e logistica esterna che comprende le attività di approvvigionamento e immagazzinamento dei materiali e le attività di organizzazione dei sistemi di distribuzione e trasporto verso i clienti finali.

L’attenzione, nel presente lavoro, è focalizzata sui problemi decisionali relativi ai processi di distribuzione e trasporto delle merci ai clienti finali localizzati nelle aree urbane.

Struttura e funzionamento dei sistemi logistici

I sistemi logistici delle imprese di produzione e di distribuzione sono rappresentabili attraverso una rete (logistics network) costituita da nodi che rappresentano gli attori della catena (fornitori, centri di produzione, magazzini, centri di distribuzione, punti di vendita) e da archi che rappresentano i flussi di scambio. In particolare, la catena logistica può essere schematizzata attraverso una rete a livelli, in cui i nodi di livello superiore riforniscono quelli di livello inferiore. In Fig. 3.2 è riportata una possibile rappresentazione di catena logistica dove il processo di produzione dei prodotti finiti si articola in una fase di trasformazione ed in una di assemblaggio, realizzate in diversi centri. A monte di questo stadio sono localizzati i fornitori dei materiali e dei componenti che alimentano il processo produttivo finale; a valle è invece situato un tipico sistema di distribuzione a due livelli con una struttura ad albero. I centri del primo livello, o Central Distribution Centre (CDC), sono magazzini riforniti direttamente dagli impianti di produzione, mentre ciascun centro del secondo livello, o Regional Distribution Centre (RDC), è un magazzino collegato ad un unico CDC.

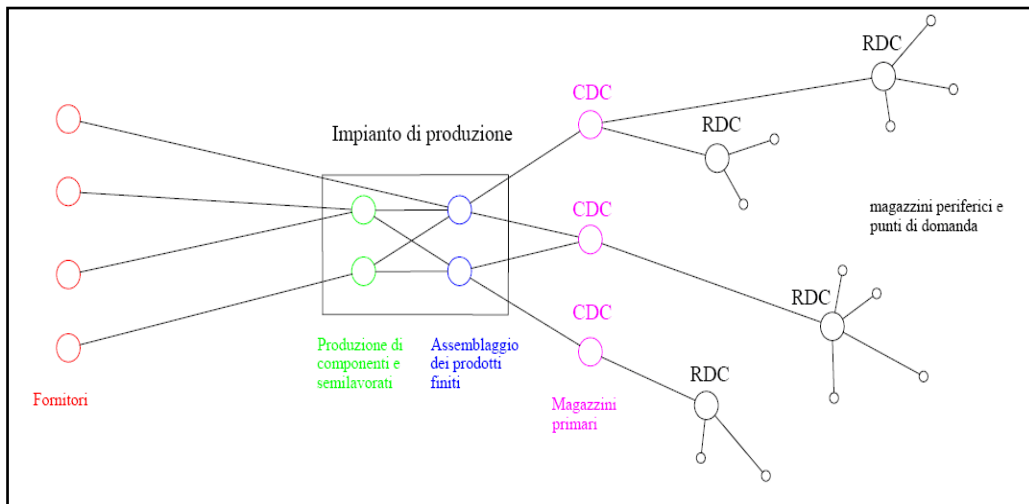


Fig. 3.2 - Schema di catena logistica

La determinazione delle modalità di distribuzione della merce è uno degli aspetti fondamentali nella gestione dell'impresa manifatturiera e rientra tradizionalmente tra le competenze del responsabile della logistica e della funzione di marketing. Essa consiste nella selezione di un appropriato insieme di canali di distribuzione e ha l'obiettivo di rendere disponibili i prodotti ai clienti nel modo più efficace.

Le strategie di distribuzione possono essere classificate in base al numero dei canali selezionati; nella distribuzione intensiva, generalmente adottata per i beni a basso costo e di largo consumo, viene utilizzato il maggior numero possibile di canali.

Nella distribuzione esclusiva, adottata per beni costosi e di prestigio, il produttore garantisce ad un unico rivenditore il diritto di distribuire i propri prodotti in una data area geografica.

In tutti gli altri casi, si preferisce selezionare, in ciascun distretto di vendita, un numero limitato di grossisti e dettaglianti (distribuzione selettiva).

Ciascun canale di distribuzione è caratterizzato dal numero e dal tipo di intermediari presenti tra il produttore ed i clienti; è opportuno considerare separatamente il caso in cui i clienti sono consumatori dal caso in cui sono utenti industriali.

Nel caso in cui il cliente è un consumatore, sono disponibili 4 canali (Fig.3.3); nel canale 1, utilizzato solo per alcune tipologie di prodotti, il consumatore viene rifornito direttamente dal produttore. Nel canale 2, i prodotti sono inviati ad un complesso di dettaglianti (retailers) e successivamente venduti ai consumatori, in tal modo il consumatore non è obbligato a viaggiare fino ai siti di produzione per acquistare la merce.

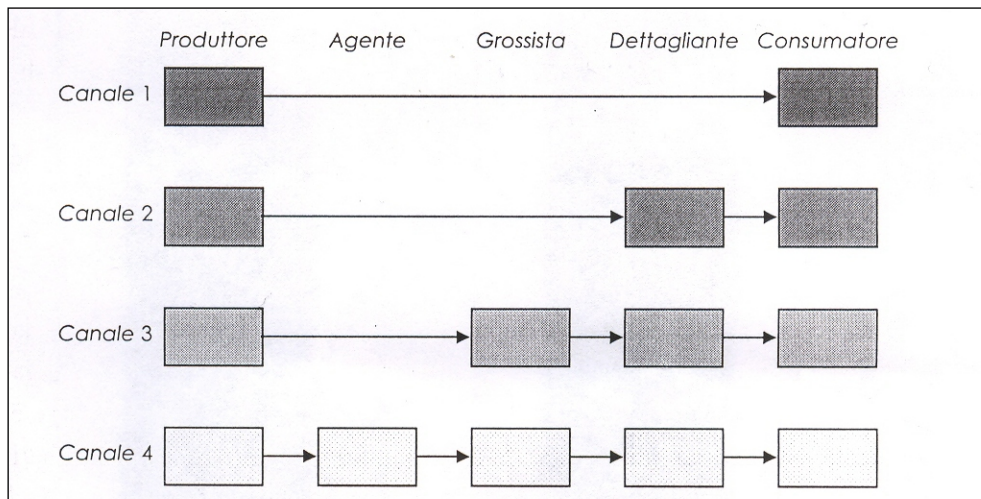


Fig.3.3 - Canali di distribuzione nel caso di prodotti di consumo

Nel caso in cui i punti di vendita necessitano di piccoli lotti di numerosi prodotti, viene spesso utilizzato il canale 3, dove il dettagliante viene rifornito dai grossisti; questi ultimi generalmente acquistano grosse partite di numerose articoli da diversi produttori e le rivendono in piccoli lotti ai dettaglianti ad un prezzo maggiorato dei costi di gestione e di un margine di profitto (Fig. 3.4).

Nel canale 4, spesso utilizzato nel settore dell'alimentare e dell'abbigliamento, le imprese produttrici si fanno rappresentare presso i grossisti da agenti.

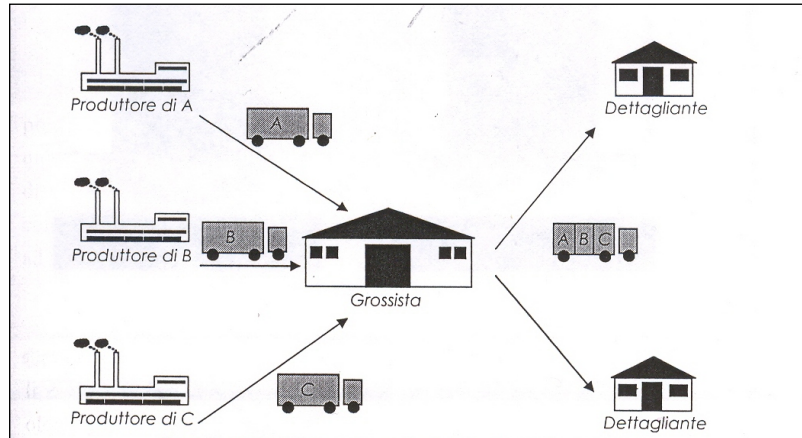


Fig.3.4 - Descrizione schematica del ruolo del grossista

Nel caso in cui il cliente è un'azienda, è spesso impiegata la modalità di distribuzione diretta (Fig.3.5); in alcuni casi il produttore si fa rappresentare da un agente.

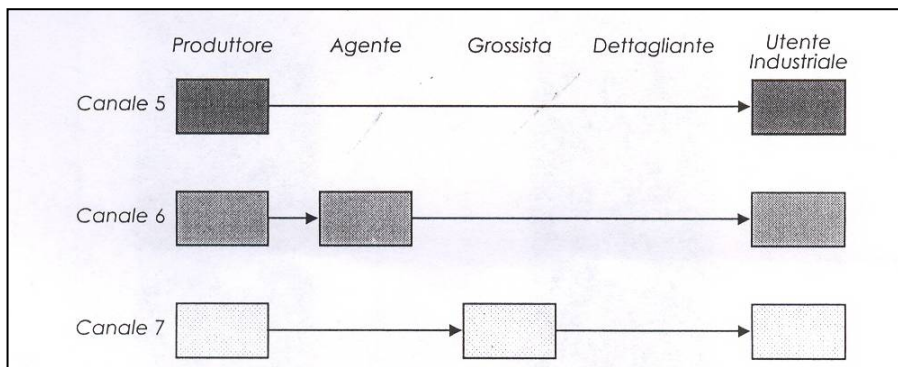


Fig.3.5 - Canali di distribuzione dei prodotti industriali

3.2. Il trasporto delle merci nelle aree urbane: la City Logistics

In ambito tecnico e scientifico si sta diffondendo sempre di più l'opinione secondo cui la pianificazione del sistema di trasporto delle merci rientri a pieno titolo tra gli obiettivi generali di miglioramento della sostenibilità del sistema dei trasporti e di perseguimento di standard più elevati di qualità della vita nelle aree urbane e metropolitane. Il trasporto delle merci in ambito urbano, contribuendo in modo determinante al processo di distribuzione dei beni ai consumatori finali, svolge un ruolo essenziale nel mantenimento delle funzioni urbane legate al commercio e alla vita sociale.

In letteratura esistono diverse definizioni e approcci relativamente alla tematica della logistica urbana. Secondo la definizione di Thompson e Taniguchi (2001), la City Logistics è "il processo finalizzato all'ottimizzazione totale della logistica e delle attività di trasporto effettuate da imprese private nelle aree urbane, tenendo in considerazione, allo stesso tempo, il traffico, la congestione e i consumi energetici entro la cornice di un'economia di mercato". Il concetto di logistica urbana richiama, quindi, l'idea di un'ottimizzazione che tenga conto dei costi e dei benefici delle soluzioni sia per il settore pubblico che per quello privato.

La City Logistics è definita anche come "l'attività che tende alla razionalizzazione della distribuzione delle merci in ambito urbano con lo scopo di perseguire obiettivi di efficienza e di efficacia nel trasporto, ivi compreso il rispetto dell'ambiente".

La logistica urbana, quindi, non si occupa solo della distribuzione delle merci, ma in senso più ampio, anche dell'ottimizzazione dell'intero sistema di mobilità, al fine di ridurre la congestione e l'inquinamento ambientale. Tra i parametri di controllo del problema vi è il livello di congestione: la riduzione della congestione induce una minimizzazione dei tempi di percorrenza sulla rete stradale e quindi dei tempi di consegna della merce ai clienti finali, incrementando così l'efficienza del processo di distribuzione.

La presenza di veicoli merci sulle infrastrutture stradali determina una riduzione della capacità con effetti sul traffico privato e sulla mobilità pedonale (in special modo nelle aree centrali delle città); d'altra parte i veicoli privati determinano impatti sul traffico merci con incrementi dei tempi di consegna della merce e sottrazione dello spazio di sosta. Il problema generale è quindi di rendere disponibili le infrastrutture e i servizi di trasporto presenti in un'area (o una porzione di area) urbana per la mobilità sia dei passeggeri che delle merci, cercando di ridurre i problemi di congestione soprattutto durante le ore di punta.

Gli obiettivi di carattere generale della City Logistics, possono essere sintetizzati come segue:

- obiettivi sociali: miglioramento della qualità della vita urbana, incremento della sicurezza delle utenze deboli della mobilità (pedoni, due ruote etc.), creazione di nuove opportunità di lavoro;
- obiettivi ambientali: riduzione dell'inquinamento acustico ed atmosferico, salvaguardia del paesaggio urbano, salvaguardia del patrimonio edilizio;
- obiettivi economici: sostenere lo sviluppo economico riducendo le diseconomie connesse al rifornimento delle reti commerciali;
- obiettivi urbanistici: contribuire alla riqualificazione dei centri urbani, recupero delle aree marginali o dismesse, conservazione della presenza del commercio e dell'artigianato locale nei centri storici.

Infine, gli obiettivi specifici connessi alla logistica urbana, riguardano la riduzione della congestione stradale (attraverso la riduzione dei veicoli merci in circolazione), la riduzione dei costi del rifornimento degli esercizi commerciali, l'ottimizzazione dell'impiego dei veicoli merci e l'uso delle infrastrutture per il rifornimento commerciale (riduzione dei tempi di consegna e dei km percorsi), la concentrazione oraria delle consegne, etc..

La distribuzione urbana delle merci è un fenomeno molto complesso in quanto riguarda un elevato numero di attori con interessi ed obiettivi non sempre conciliabili. In generale, gli attori coinvolti nei processi di logistica urbana delle merci possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

- i commercianti e i dettaglianti;
- i grossisti e gli operatori logistici;
- i corrieri e gli operatori di trasporto;
- i residenti dell'area urbana;
- gli amministratori, che rappresentano il governo o le autorità di trasporto e si occupano di risolvere il conflitto tra gli attori della city logistics.

La letteratura sulla logistica urbana è molto estesa. Le problematiche della logistica urbana sono analizzate nell'articolo di Dablanc (2010), con riferimento alla realtà internazionale, e nei volumi di Boscacci e Maggi (2004) e di Maggi (2007), con riferimento alla realtà italiana.

Nei successivi paragrafi sono descritte le principali strategie di intervento di logistica urbana.

3.3. La filiera logistica urbana e i veicoli per il trasporto delle merci

In questo paragrafo sono descritti tre diversi metodi di classificazione delle filiere logistiche urbane. Il concetto di “filiera” è stato introdotto per la prima volta in Italia nel Piano Generale dei Trasporti e della Logistica che prescrive: “Gli interventi relativi alla distribuzione delle merci in ambito urbano sono inseriti nei Piani Urbani della Mobilità, nella cui elaborazione si dovrà ragionare per “filiere compatibili” (es. distribuzione di beni alimentari, tabacchi, giornali etc.) e non per flussi di traffico” (Ministero dei Trasporti e della Navigazione, 2001).

La caratterizzazione delle diverse filiere che interessano le aree urbane è trattata in letteratura nel volume a cura di D’Elia et al. (2004), in due studi finanziati dal Ministero dei Trasporti (2007 e 2010) e nell’articolo di Danielis et al. (2010).

Una prima classificazione può essere effettuata in base alle tipologie di negozi che riforniscono:

- filiera della distribuzione al dettaglio (alimentare fresco, alimentare secco e pubblici esercizi, negozi specializzati);
- filiera della grande distribuzione (medie superfici, supermercati, ipermercati);
- filiera delle consegne a domicilio della merce.

Un’altra possibile classificazione per le filiere logistiche urbane è basata sulla categoria merceologica dei prodotti distribuiti:

- HoReCa (Hotel, Restaurant and Catering): tale filiera comprende il settore dei servizi alberghieri, dei ristoranti, dei bar e delle caffetterie;
- Tradizionale Non Food: comprende la vendita al dettaglio di merce non alimentare;
- Capi appesi: questa filiera comprende tutti i tipi di sartoria, in qualsiasi materiale, tutti gli articoli di abbigliamento e gli accessori. Sono inoltre incluse le industrie delle pellicce e del pellame;
- Tradizionale Freschi: comprende il commercio al dettaglio di frutta e verdura fresca, di carne e attività di macelleria;
- Tradizionale Secchi: questa filiera comprende le attività dei supermercati con vendita al dettaglio di una grande varietà di prodotti, tra i quali predominano prodotti alimentari e bevande;
- Tradizionale Surgelati: comprende il commercio al dettaglio di prodotti alimentari surgelati o congelati di qualsiasi tipo, compresi i prodotti di gelateria.

Altra classificazione delle filiere distributive può essere effettuata sulla base delle:

- variabili geografiche: la distanza tra negozi e centro di distribuzione o all'ingrosso; la percentuale di negozi al dettaglio presenti nelle zone centrali;
- variabili economico-industriali: le forme di coordinamento della catena: chiusa o aperta; la strategia competitiva;
- variabili commerciali: il tipo di assortimento; il valore del prodotto; le dimensioni del prodotto (massa, volume);
- variabili legate al trasporto e alla logistica: le dimensioni della consegna tipica, le dimensioni della confezione tipica, la frequenza della consegna, le finestre temporali, il numero di finestre temporali, il routing, l'utilizzo di veicoli speciali.

I veicoli per il trasporto delle merci

Le tipologie di veicoli stradali utilizzati per il trasporto delle merci sono numerose e dipendono dalla tratta su cui essi devono viaggiare. In particolare si possono distinguere:

- trattori stradali: veicoli destinati esclusivamente al traino di rimorchi e semirimorchi;
- autoarticolati: complessi di veicoli costituiti da un trattore e da un semirimorchio (Fig.3.8);
- rimorchi: veicoli destinati ad essere trainati;
- semirimorchi: veicoli costituiti in modo tale che una parte di essi si sovrapponga all'unità motrice e che una parte notevole della sua massa e del suo carico sia sopportata dall'unità motrice.

Inoltre questi possono essere distinti come segue:

- veicoli intermodali: sono gli autoarticolati o i semi-articolati, predisposti per il trattamento di un'unica grande unità di carico che può essere una cassa mobile od un container. Il cambio di modalità viene quindi effettuato senza rompere le singole unità di carico evitando eventuali danni ai singoli colli;
- veicoli tradizionali: sono i motocarri o gli autocarri (Fig.3.9) che variano per dimensione, capacità, peso e ovviamente per caratteristiche di eco-compatibilità (motori gpl, a metano, elettrici, etc.). Le attrezzature utilizzate sono diverse a seconda di quelle richieste dalla merceologia che trasportano.

Per la distribuzione urbana delle merci, la tendenza è quella di intensificare l'utilizzo di veicoli con dimensioni contenute ed eco-compatibili (Fig.3.10).



Fig. 3.8 - Autoarticolato



Fig.3.9 – Autocarro



Fig.3.10 - Furgone elettrico

3.4. Gli interventi di logistica urbana

Il presente paragrafo descrive ed analizza i principali interventi realizzati in Europa, prevalentemente a livello locale, finalizzati a bilanciare costi e benefici sociali della mobilità urbana delle merci.

Gli obiettivi degli interventi riguardano aspetti:

- sociali, tra cui la riduzione della congestione stradale, la riduzione dell'inquinamento ambientale (emissioni, rumore, vibrazioni), il miglioramento della vivibilità e attrattività delle aree commerciali e storiche, la protezione di aree urbane di particolare valore;
- imprenditoriali, cioè l'aumento dell'efficienza delle operazioni di consegna e ritiro delle merci per gli operatori.

In letteratura, rassegne sugli interventi che possono essere adottati nell'ambito della logistica urbana sono trattati nel volume di Maggi (2007), nell'articolo di Quak (2011) e nello studio Urban Freight Transport condotto per conto della Direzione Generale Mobilità e Trasporti (MOVE) della Commissione Europea dalla società di consulenza MDS Transmodal e dal Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università "La Sapienza" (2012). Inoltre, Russo e Comi (2011) hanno condotto una rassegna delle valutazioni disponibili degli impatti che gli interventi hanno avuto in alcune città.

La classificazione degli interventi di logistica urbana proposta in letteratura [Delle Site P., Filippi F. Nuzzolo A., "Linee guida dei piani di logistica urbana sostenibile] deriva dall'analisi delle misure che sono state implementate in Europa e si articola secondo le seguenti categorie:

- a) interventi di regolazione;
- b) misure di gestione della domanda;
- c) interventi di Land Use;
- d) interventi infrastrutturali;
- e) utilizzo di ICT e ITS;
- f) utilizzo di veicoli eco-compatibili.

a) Interventi di regolazione

Gli interventi di regolazione, noti anche come misure "command and control", sono misure di regole e divieti progettate per disciplinare le attività private a beneficio della collettività. Gli interventi direttamente correlati con il traffico merci in ambito urbano sono:

- Zone a Traffico Limitato (ZTL);

- Regolazione delle operazioni di carico e scarico per i veicoli merci.

Le Zone a Traffico Limitato

In Italia, si definiscono Zone a Traffico Limitato le aree in cui l'accesso e la circolazione veicolare sono limitati ad ore prestabilite o a particolari categorie di utenti e di veicoli. Secondo le rilevazioni ISTAT sui trasporti urbani, nel 2011 i comuni capoluogo di provincia hanno istituito sul proprio territorio in media 0.6 kmq di ZTL per 100 kmq di superficie (con un incremento del 4.1% rispetto al 2010). Gli obiettivi espliciti dell'istituzione di ZTL sono la riduzione del traffico e dell'inquinamento atmosferico e ambientale; negli ultimi anni si è aggiunta la necessità di creare nuove fonti di entrata per gli enti locali, di conseguenza, in alcune città, il permesso di accesso alle ZTL è a pagamento.

La regolamentazione può essere differenziata in base alla tipologia di veicolo commerciale, in base al livello di emissione, al sistema di alimentazione, al peso, alla dimensione, all'anzianità del veicolo, al tasso di riempimento, alla categoria merceologica e al tipo di trasporto (conto proprio o conto terzi).

Le restrizioni in base al peso e alla dimensione (volume) dei veicoli sono essenziali per evitare che la circolazione dei mezzi pesanti possa danneggiare l'infrastruttura stradale, la struttura degli edifici storici o possa causare congestione di traffico per difficoltà di manovra o carenza di spazi adibiti alla loro sosta. Queste misure sono facili da attuare e da far rispettare anche se in alcuni casi sono controproducenti in quanto comportano una riorganizzazione delle flotte basata su un maggior numero di veicoli di minori dimensioni, con conseguente incremento dei livelli di congestione e emissioni inquinanti.

Le restrizioni in base alle caratteristiche emissive dei veicoli si concretizzano con la costituzione di "zone a basse emissioni" (Low Emissions Zones) alle quali l'accesso è consentito solo a veicoli a basso impatto ambientale oppure può essere consentito solo se il proprietario accetta di pagare un corrispettivo giornaliero all'amministrazione per compensare le emissioni prodotte. Le LEZ mirano alla riduzione delle emissioni di particolato, degli ossidi di azoto e sono introdotte generalmente nelle grandi città europee per il rispetto degli standard di qualità dell'aria imposti a livello comunitario e locale.

Le finestre temporali (time windows) sono utilizzate per limitare l'accesso dei veicoli merci a specifiche aree urbane in determinate ore del giorno; talvolta possono essere concesse finestre orarie più flessibili a veicoli ecologici e/o con alto tasso di riempimento, mentre in alcune città sono differenziate per il trasporto in conto proprio e conto terzi. Le finestre temporali sono efficaci quando è presente un

adeguato sistema di controllo; in genere l'accesso è controllato da qualche forma di barriera fisica o di riconoscimento automatico della targa e può essere verificato dalla polizia municipale.

I divieti di consegna nelle ore notturne sono impiegati per limitare o vietare completamente l'accesso dei veicoli merci durante la notte in aree urbane, per non disturbare il sonno dei residenti con le operazioni di carico e scarico.

La regolazione delle operazioni di carico e scarico per i veicoli merci

Gli interventi di regolazione delle operazioni di carico e scarico riguardano la limitazioni alla sosta dei veicoli commerciali e l'individuazione di apposite aree adibite alla sosta per consentire tali operazioni. Tali interventi non sono efficaci se non accompagnati da azioni di controllo. In alcune città europee, tale strategia di intervento è attuata al fine di incentivare gli operatori merci ad incrementare i fattori di carico dei propri veicoli.

b) Misure di gestione della domanda

Le misure di gestione della domanda riguardano principalmente tasse e pedaggi finalizzati ad incrementare il costo del trasporto in modo da compensare le esternalità negative prodotte da trasporto stesso (congestione e inquinamento) e di modificare il comportamento degli operatori privati. Fanno parte di questa categoria di interventi anche i sussidi e gli incentivi finalizzati a ridurre i costi dei servizi di trasporto che hanno minori impatti negativi. Tra queste tipologie di intervento vi è il Road Pricing.

Per Road Pricing, in generale, si intende l'insieme delle forme di pedaggio applicate su uno o più tratti stradali oppure all'accesso e/o permanenza in una determinata area. L'entità del pedaggio può essere basata sulle distanze percorse, sulla tipologia di veicolo e sulla categoria di emissioni nocive a cui il veicolo merci o passeggeri appartiene.

c) Interventi di Land Use

Per interventi di Land Use, o utilizzo del territorio, si intende quell'insieme di interventi che modificano l'uso degli spazi, a livello locale, regionale e nazionale, determinando gli assetti commerciali e le scelte di localizzazione dei cittadini e degli operatori. Vista la stretta relazione tra gli interventi di logistica e trasporto delle merci e l'utilizzo del territorio, risulta opportuno che i due tipi di intervento siano integrati tra loro al fine di massimizzare i benefici per la collettività. L'intervento di Land Use

che ha maggiore impatto sul trasporto urbano delle merci è la zonizzazione delle attività economiche e non economiche così come la ri-localizzazione al di fuori dei contesti urbani dei generatori di traffico (es. attività logistiche o industriali, centri commerciali); la concentrazione di attività commerciali potrebbe consentire la razionalizzazione delle consegne a beneficio sia degli operatori privati che della collettività.

d) Interventi infrastrutturali

Gli interventi infrastrutturali di interesse per il trasporto urbano delle merci sono:

- piazzole di carico/scarico in sede stradale per i veicoli merci: si tratta di aree riservate alle operazioni di carico e scarico per i veicoli adibiti al trasporto merci in modo da evitare le interazioni con i veicoli privati. Tali piazzole possono essere destinate esclusivamente ai veicoli merci o possono essere utilizzate da altre categorie di utenti in determinate fasce orarie (ad esempio: disabili etc.). In alcuni casi, esistono zone di carico/scarico specifiche per veicoli a basse o nulle emissioni localizzate nelle vicinanze dei punti di consegna dei centri urbani. Le piazzole di carico/scarico possono essere anche a pagamento; in tal caso necessitano di un opportuno sistema di controllo per evitare le occupazioni illegali;
- spazi logistici per consentire il trasbordo da un veicolo ad altri veicoli adibiti alle consegne: si tratta di aree che fungono da piattaforme di transito (transit point) dove le merci, scaricate dai mezzi pesanti, vengono smistate e trasferite su veicoli con dimensione inferiore adibiti alle consegne, al fine di ottimizzare la distribuzione urbana. In particolare, tali aree, in alcuni paesi, sono definite come “spazi logistici urbani” (o spazi logistici di prossimità) e fanno riferimento a tutte quelle aree dove avvengono attività di transshipment; l’area è solitamente sorvegliata e presidiata da uno staff che può anche fornire aiuto agli autisti per effettuare le consegne. I veicoli utilizzati per la consegna della merce ai clienti finali sono solitamente furgoni elettrici, biciclette, tricicli a pedalata assistita o tram, o semplicemente a piedi con l’utilizzo di appositi carrelli.
- Centri di Distribuzione Urbana: si tratta di una piattaforma logistica che riceve da diversi operatori di trasporto le merci destinate a più clienti localizzati in una stessa area urbana. La funzionalità di tali infrastrutture è quella di

rendere più efficiente il processo di distribuzione smistando e aggregando i flussi e ottimizzando i giri di consegna della merce.

Esistono due tipi di CDU: quelli dedicati alle consegne alle attività commerciali nei centri città e quelli dedicati ai materiali da costruzione destinati a cantieri in aree urbane.

I centri di distribuzione per le attività commerciali possono svolgere diverse attività; quando le merci provenienti da più vettori vengono scaricate e sostano nella struttura solo per il tempo necessario ad essere smistate e caricate sui veicoli adibiti alla distribuzione locale, il CDU svolge le funzioni dei transit point; i carichi possono essere consolidati nella struttura che, in questo caso, viene denominata Centro di Consolidamento Urbano (CCU). L'obiettivo di tali infrastrutture è quello di ridurre il numero dei veicoli in circolazione, minimizzando il numero di veicoli con basso tasso di riempimento e di ottimizzare i percorsi. Inoltre, nei CCU le operazioni di consolidamento dei carichi possono essere affiancate da quelle di stoccaggio e magazzinaggio, nonché da servizi a valore aggiunto o di personalizzazione dei prodotti (quali, confezionamento, etichettatura, stiraggio dei capi di abbigliamento).

I centri di consolidamento per materiali da costruzione sono strutture specializzate per materiali da costruzione (Construction Consolidation Centre – CCC), localizzate ai confini delle aree urbane, che ricevono da diversi operatori materiali da costruzione destinati ai cantieri nelle aree urbane. I cantieri in un'area urbana possono ricevere diverse consegne al giorno di materiali da più fornitori, provocando traffico di mezzi pesanti e la necessità di ampi spazi all'interno dei cantieri stessi per stoccare i materiali fino al loro utilizzo. La funzione dei CCC è di consolidare i materiali in carichi completi per ciascun cantiere e consegnarli nel momento in cui tali materiali sono necessari, evitando di stocarli per lungo tempo nei cantieri. La razionalizzazione delle consegne è finalizzata anche alla riduzione del traffico e delle emissioni inquinanti.

- ferrovie, tram, metropolitane e canali navigabili utilizzati per il trasporto merci: attualmente la modalità ferroviaria è fortemente sottoutilizzata per il trasporto urbano delle merci. Le principali motivazioni sono legate a: flessibilità limitata rispetto al trasporto su gomma; competizione con i servizi dedicati ai passeggeri per la capacità delle linee; elevati costi dell'infrastruttura ferroviaria e dei relativi sistemi.

Alcune esperienze in città europee hanno dimostrato che la ferrovia può rappresentare un ruolo strategico per la distribuzione delle merci in ambito urbano, consolidando i carichi in centri localizzati al di fuori delle aree urbane per poi essere trasportate da treni shuttle dedicati verso centri di distribuzione nelle vicinanze delle aree centrali delle città. In questo caso, si parla di “Multimodal Urban Distribution Centre”; a partire da tali infrastrutture le merci vengono trasbordate dal treno a veicoli stradali a basso impatto ambientale per la consegna ai destinatari finali.

Un’alternativa alla distribuzione urbana su gomma è rappresentata dall’utilizzo dei tram, nonostante oggi sia implementata in poche città europee. Le linee di tram presentano vantaggi rispetto alla rete stradale avendo una maggiore capacità di trasporto e basso impatto ambientale. I limiti per un maggiore impiego del tram sono rappresentati da questioni pratiche legate alle attività di carico e scarico, anche se esistono delle soluzioni basate su veicoli a pianale ribassato.

La distribuzione tramite metropolitana è considerata una soluzione potenzialmente sostenibile perché è in grado di ridurre i problemi ambientali, di congestione e di utilizzo degli spazi urbani, ma le iniziative in merito non hanno ancora raggiunto una loro fase dimostrativa.

L’infrastruttura per il carico e lo scarico delle merci mediante l’uso di sistemi che utilizzano canali navigabili è stata sperimentata in alcune città europee che sono attraversate da canali o fiumi, anche se solitamente non vengono utilizzate per la distribuzione dell’ultimo miglio, in quanto le origini e le destinazioni non sono localizzate in siti adiacenti alle strutture merci fluviali. La principale categoria merceologica che può essere trasportata verso centri urbani con sistemi che fanno uso di canali navigabili sono i materiali da costruzione.

e) Uso di ICT e ITS

Il principale ambito applicativo in cui sono attualmente utilizzate le ICT (Information and Communication Technologies) e gli ITS (Intelligent Transport Systems) è quello della gestione operativa delle flotte di veicoli, al fine di accelerare le spedizioni, migliorare l’efficienza della distribuzione e ridurre i costi operativi. I sistemi AVL (Automatic Vehicle Location) e AVM (Automatic Vehicle Monitoring) vengono largamente utilizzati dalle aziende di trasporto per la gestione in tempo reale delle proprie flotte.

Gli AVL si occupano di monitorare e tracciare la posizione geografica dei veicoli e consentono agli operatori di rilevare in tempo reale la posizione dei veicoli e le possibili deviazioni o i ritardi rispetto al programmato, di informare i veicoli di incidenti o stati di traffico, di riprogrammare le corse e i percorsi sulla base di incidenti e ritardi, di informare i clienti in merito ai ritardi, di identificare i veicoli più vicini ad una specifica area, etc.. Gli AVM consentono agli operatori di monitorare lo stato operativo del veicolo, con particolare riferimento a: parametri meccanici (ad esempio, livelli dell'olio e del carburante, temperatura dell'olio), i parametri fisici a bordo (ad esempio, per la temperatura di casse refrigerate, la chiusura delle porte), lo stato dinamico dei veicoli (la velocità) e la rilevazione di anomalie nei parametri con relativa comunicazione al conducente.

Gli AVL e gli AVM utilizzano una struttura comune basata su una centrale di controllo, un sistema di bordo e una rete di comunicazione; la tecnologia di comunicazione tra i veicoli e la centrale dipende dalle esigenze operative e dalla copertura geografica; in particolare, le reti mobili GSM/GPRS garantiscono un elevato livello di copertura, mentre le reti UMTS/HSPA hanno una copertura in espansione, le reti Wi-Fi sono utilizzate in aree limitate. La tecnologia maggiormente utilizzata, in questo contesto, è il GPRS che offre un'elevata copertura a costi contenuti.

I sistemi AVL integrano le tecnologie di localizzazione satellitare con i sistemi GIS (Geographical Information Systems); il GPS è la soluzione comune per la localizzazione e navigazione.

Altre applicazioni ICT/ITS relative ai processi logistici di un singolo operatore riguardano la pianificazione dei carichi, i software di routing e scheduling, l'automatizzazione delle procedure amministrative (ordine, spedizione, consegna, fatturazione) e il tracking&tracing.

L'efficienza del processo complessivo di distribuzione urbana delle merci può essere migliorata attraverso l'integrazione di soluzioni ICT/ITS adottate dai singoli operatori con le soluzioni ITS adottate dai comuni per la gestione del traffico, in particolare si tratta di soluzioni che integrano il traffico merci con quello passeggeri.

L'utilizzo delle ITS per la prenotazione automatica e il controllo delle piazzole di carico e scarico, per il controllo degli accessi, per la diffusione di informazioni sul traffico e sugli incidenti, insieme alla condivisione delle informazioni relative ai tempi di viaggio e la durata delle operazioni di consegna, apporta benefici sia agli operatori merci che al traffico urbano nel suo complesso.

f) Uso di veicoli eco-compatibili

Le tecnologie potenzialmente utilizzabili per rendere la mobilità urbana (passeggeri e merci) a emissioni bassissime o nulle riguardano: i veicoli elettrici, ibridi, a idrogeno e a gas naturale.

3.5. Le piattaforme logistiche e la distribuzione delle merci

Le infrastrutture logistiche utilizzate per la movimentazione dei flussi di merci, analogamente al sistema di offerta del trasporto passeggeri, si distinguono in:

- infrastrutture lineari, ovvero vie di collegamento, o archi tra due nodi (strade, ferrovie, metropolitane, linee aeree e navigabili, etc.);
- infrastrutture puntuali o nodali, ovvero snodi di traffico terminali o punti di fermata intermedi; tra questi si hanno i centri di distribuzione delle merci, parcheggi, stazioni, nonché altre infrastrutture complesse poste ai margini delle città, quali interporti, porti, aeroporti, etc.. Le infrastrutture puntuali rappresentano quindi i nodi della rete logistica che connettono le infrastrutture lineari di una o più modalità di trasporto e che eventualmente ospitano anche attività diverse dal solo trasporto. La terminologia suggerita dal Consiglio dei Ministri dei Trasporti UE indica come *terminale* il “luogo equipaggiato per il cambio di modalità ed il deposito delle unità di trasporto intermodale”; sono quindi classificabili come terminali gli interporti, i porti, gli aeroporti, le piattaforme logistiche e i distripark e i logistic city.

Tali infrastrutture, così come i flussi, necessitano di politiche di gestione e pianificazione basate su un approccio sistemico, in modo che l'intera rete e non la singola infrastruttura, garantisca globalmente un servizio efficace ed efficiente. Una buona dotazione infrastrutturale risulta indispensabile affinché la logistica urbana possa raggiungere a sua volta l'efficienza nella pianificazione dei flussi, l'efficacia nel rifornimento e l'equità nella distribuzione degli oneri derivanti dall'utilizzo di grandi quantità di risorse pubbliche in termini di spazio, energia e tempo speso dai cittadini.

Nella maggior parte delle città, le merci viaggiano esclusivamente su strada: le infrastrutture lineari sono utilizzate da tutti gli utenti, e sono caratterizzate da una domanda di mobilità delle merci in conflitto spaziale e temporale con quella dei passeggeri, sia durante il movimento che durante la sosta.

Per quanto concerne, invece, le infrastrutture puntuali a supporto del trasporto delle merci, le principali funzioni da esse svolte sono le seguenti:

- organizzare il raggruppamento fisico delle consegne di ogni tipo di merce;
- collegare il traffico locale e regionale con quello a scala maggiore;

- trasferire le merci da una modalità ad un'altra, oppure da un veicolo ad un altro;
- preparare carichi completi per il trasporto tramite operazioni di consolidamento delle merci;
- svolgere eventuali servizi logistici aggiuntivi al trasporto, come ad esempio lo stoccaggio, le operazioni commerciali, la personalizzazione dei prodotti, etc..

Le infrastrutture puntuali di maggiore interesse per la logistica urbana sono:

- magazzini generali: strutture monomodali, adibite allo stoccaggio delle merci, al consolidamento e deconsolidamento dei carichi, allo svolgimento di servizi amministrativo-fiscali e di altri servizi ai mezzi;
- interporti (o freight villages): infrastrutture plurimodali; complessi organici di strutture e servizi integrati alle merci e alle persone (stoccaggio delle merci, consolidamento e deconsolidamento dei carichi, attività gestionali, funzioni informatico-telematiche, etc.);
- centri merci: infrastrutture generalmente plurimodali, molto simili agli interporti, destinate allo stoccaggio delle merci, al consolidamento e al deconsolidamento dei carichi e al trasferimento delle UTI (Unità Trasporto Intermodale: containers, casse mobili, ecc.) da una modalità di trasporto ad un'altra, o delle merci da un mezzo ad un altro (se monomodali);
- piattaforme logistiche o logistics parks: infrastrutture mono o plurimodali, in cui sono forniti servizi logistici integrati e generalmente operazioni di personalizzazione del prodotto, incluse le lavorazioni accessorie manifatturiere;
- centri distributivi urbani (CDU): piattaforme logistiche urbane, di centralizzazione delle prese e delle consegne da/per le aree urbane, spesso con funzioni di puro transito della merce, a volte anche con funzioni di stoccaggio.

Molte di queste infrastrutture sono localizzate nei pressi delle città, al servizio dello scambio tra il centro urbano e l'esterno, quando sono regionali – internazionali, oppure al servizio della sola città quando il loro raggio di riferimento è appunto soltanto quello urbano.

Il tipo di strutture utilizzate per la movimentazione delle merci in ambito urbano, e la loro localizzazione variano in relazione alla tipologia di prodotto, ai volumi e alle esigenze del cliente.

Una delle strategie che si è dimostrata efficiente nell'ambito degli interventi di City Logistics è l'apertura dei Centri di Distribuzione Urbana (o piattaforme logistiche). Si tratta di infrastrutture autonome, localizzate ai confini della città, nelle vicinanze dei punti di accesso alle autostrade o vicini a terminali logistici di primo livello.

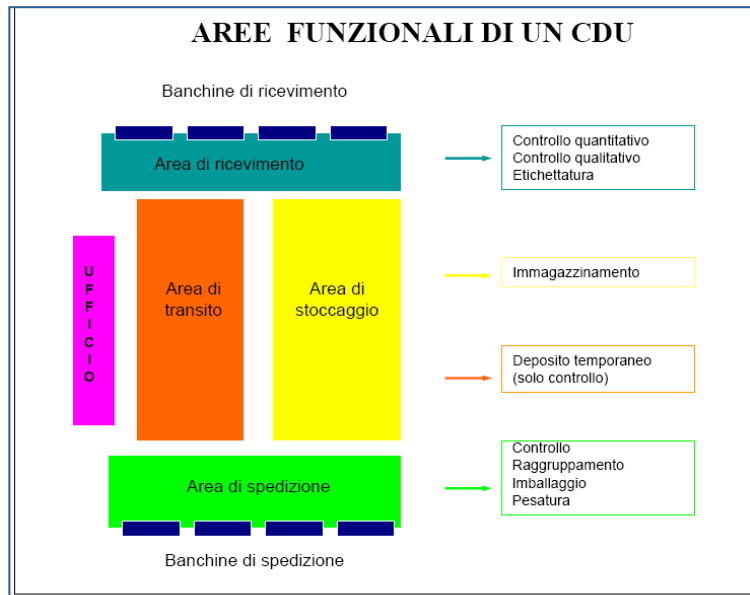


Fig.3.11 - Schema funzionale di un Centro di Distribuzione Urbano

La localizzazione di un nodo logistico è collegata alla presenza nell'area territoriale di riferimento dei seguenti requisiti di base:

- l'accessibilità rispetto ad arterie stradali e autostradali;
- la centralità rispetto al bacino di traffico da servire;
- la disponibilità di spazi adeguati nei propri scali o nelle immediate vicinanze.

Le strategie di localizzazione delle piattaforme logistiche sono fortemente legate alle caratteristiche dei settori a cui fanno riferimento. Nel caso di imprese manifatturiere, ad esempio, i siti privilegiati per la localizzazione dipendono prevalentemente dalla geografia della produzione, che detta e stabilisce quella dei luoghi di stoccaggio e distribuzione. Viceversa i punti privilegiati di localizzazione di piattaforme per la

distribuzione dei beni di largo consumo sono quelli vicino ai grandi agglomerati, che costituiscono i principali mercati di sbocco (Fig.3.12).

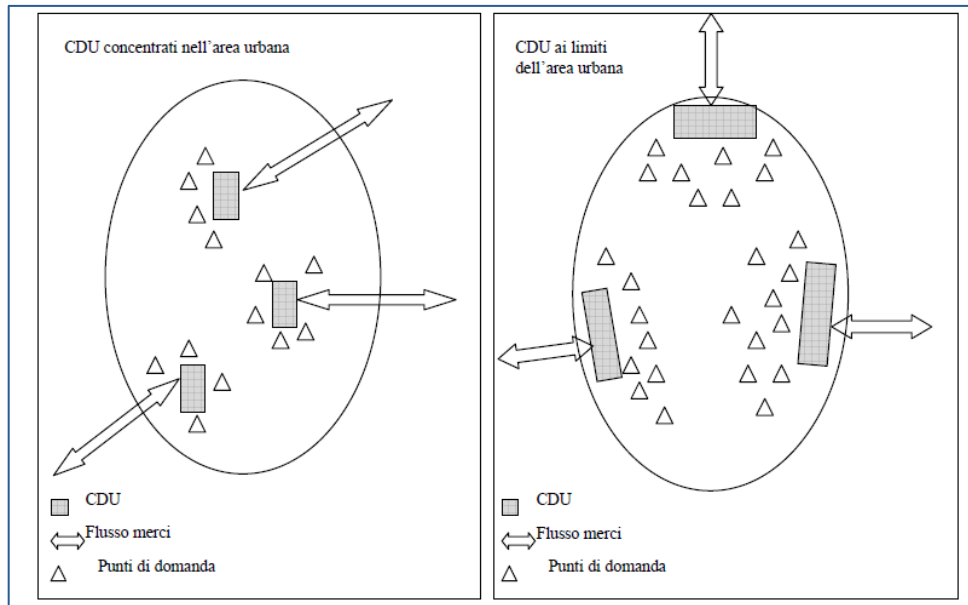


Fig.3.12 - Localizzazione di un CDU rispetto all'area urbana

Il sistema di distribuzione basato sull'utilizzo dei CDU viene indicato in letteratura come sistema di distribuzione su un solo livello: le merci passano attraverso una infrastruttura intermedia, prima di essere consegnate al cliente finale (Fig.3.12).

Negli ultimi anni sono stati presi in considerazione nuovi sistemi distributivi, basati sull'utilizzo di più strutture intermedie. In questa nuova idea di sistema di distribuzione, le merci che lasciano un CDU non sono consegnate direttamente ai clienti finali, ma passano prima per alcune strutture intermedie, indicate con il nome di "satelliti" o "transit point", localizzate nelle aree limitrofe o all'interno dei centri urbani, dove vengono trasportate e consolidate su veicoli di piccole dimensioni ed ecocompatibili, adeguati alla distribuzione in ambito urbano (Fig.3.13). Nei satelliti non avvengono operazioni di stoccaggio, ma le merci vengono solo trasferite da una tipologia di veicolo all'altra. I flussi di merce che devono essere consegnati all'interno delle aree urbane subiscono quindi due operazioni di trasferimento. Una prima operazione presso i CDU, dove la merce viene trasferita su veicoli "environmental friendly" di relativamente grandi dimensioni, definiti "urban trucks". La seconda, presso i satelliti, dove il materiale viene trasferito dagli "urban trucks" su veicoli

"environmental friendly" di piccole dimensioni, chiamati "city freighters". L'utilizzo di queste diverse flotte è sicuramente un elemento chiave, ma richiede un grande coordinamento tra i due livelli e le due flotte per due ragioni principali: i clienti devono essere serviti durante predefinite finestre temporali ed inoltre urban trucks e city freighters non hanno la possibilità di sostare a lungo nei satelliti, in quanto queste infrastrutture non sempre sono dedicate univocamente alle operazioni di carico e scarico delle merci.

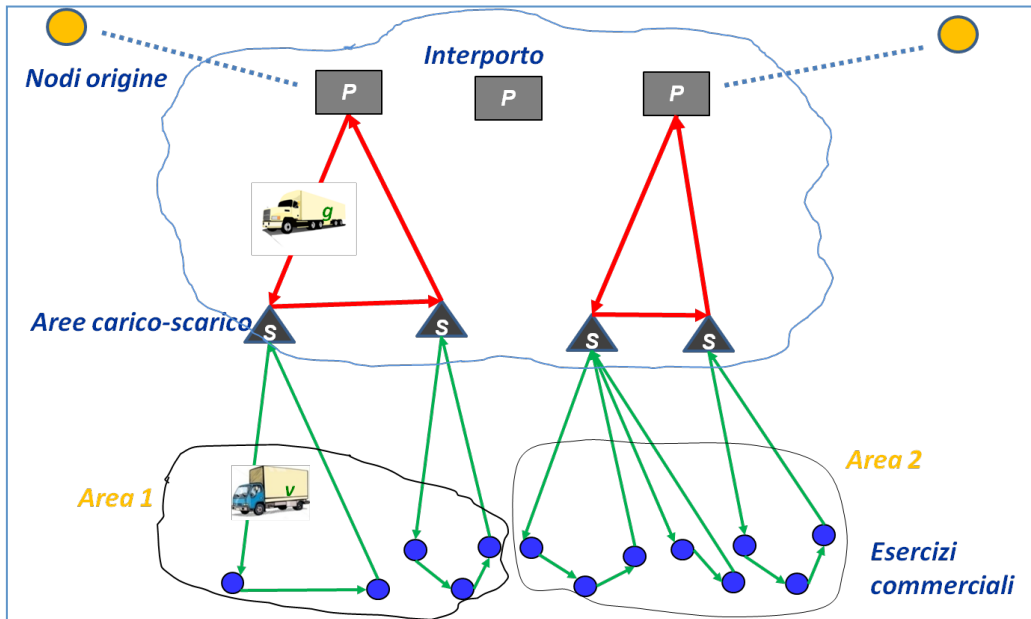


Fig.3.13 - Struttura sistema distributivo su due livelli

Nel capitolo 4 il problema della localizzazione dei nodi logistici verrà affrontata dal punto di vista modellistico.

3.6. Il quadro normativo in materia di logistica urbana

Nel presente paragrafo si riportano le linee guida in materia di logistica urbana a scala comunitaria, a scala nazionale e a scala locale, proposte nel lavoro di Delle Site P., Filippi F. Nuzzolo A., “Linee guida dei piani di logistica urbana sostenibile”.

Il decentramento dei poteri legislativi e di pianificazione dallo Stato alle Regioni e agli Enti Locali per il settore dei trasporti è stato accompagnato dal moltiplicarsi degli strumenti di pianificazione. La presenza di Piani caratterizzati da differenti livelli territoriali (comunitario, nazionale, regionale, urbano e metropolitano), temporali (strategico, tattico e operativo) e di approfondimento (Piano direttore, attuativo, studio di fattibilità) non facilita una visione completa dei problemi della mobilità.

Indirizzi a scala comunitaria

L’Unione Europea si occupa direttamente dei trasporti per quanto riguarda la rete infrastrutturale di livello continentale (Trans-European transport Network – TEN) e, nel rispetto del principio di sussidiarietà, demanda agli stati membri la definizione delle politiche dei trasporti cercando di coordinare ed indirizzare le azioni.

I documenti a scala comunitaria per la pianificazione dei trasporti e della logistica sono i seguenti:

- Libro Bianco sui trasporti - European Transport Policy for 2010: time to decide - del 2001.

Il Libro Bianco prevede un programma di azione di misure programmate fino al 2010. Il piano non riporta specifici obiettivi e misure relative al trasporto merci in ambito urbano. Tra gli obiettivi proposti vi sono: incentivare l’intermodalità, attraverso l’integrazione dei modi di trasporto; sviluppare trasporti urbani di qualità, favorendo lo scambio di buone pratiche nel rispetto degli impegni internazionali assunti a Kyoto; promuovere l’innovazione tecnologica al servizio di veicoli eco-compatibili ed efficienti; sviluppare obiettivi ambientali a medio e lungo termine per un sistema di trasporto sostenibile.

- Riesame intermedio del Libro Bianco – Mantenere l’Europa in movimento. Una mobilità sostenibile per il nostro continente del 2006; tale piano indica un’azione specifica per la logistica urbana: pubblicare un Libro Verde sul trasporto urbano.

- Libro Verde sul trasporto urbano. Verso una nuova cultura della mobilità urbana del 2007; il Libro Verde è centrato sulla politica dei trasporti a scala urbana e indica le misure che possono essere adottate per un traffico scorrevole nelle città, per una città più pulita, per un trasporto urbano accessibile e per un trasporto urbano più sicuro. In merito alla distribuzione delle merci, nell'ottica secondo cui le politiche di mobilità dovrebbero considerare in modo integrato la mobilità delle persone e delle merci, la sezione relativa al "traffico scorrevole in città" afferma che è necessario individuare: interfacce tra il trasporto a lunga percorrenza e il trasporto a breve distanza; misure per l'utilizzo di veicoli di piccole dimensioni, più pratici e più puliti; misure tecniche e urbanistiche per ridurre l'impatto dei trasporti merci nelle città; percorsi per ridurre le corse a vuoto dei veicoli; azioni di coinvolgimento di tutti gli attori e in particolar modo delle autorità locali; infrastrutture quali interporti e snodi alle porte della città.
- Piano d'Azione sulla mobilità urbana del 2010; l'Action Plan, adottato dalla Commissione a settembre del 2009, fa seguito al Libro Verde. Nel piano sono riportate 20 azioni concrete che le amministrazioni nazionali, comunali e locali dovrebbero mettere in campo. Il Piano definisce i sistemi di trasporto urbano come elementi integranti del sistema dei trasporti europeo. Le linee guida identificate dalla Commissione Europea sono le seguenti: promuovere le politiche integrate; concentrarsi sul cittadino; trasporti urbani non inquinanti; rafforzare i finanziamenti; scambio di esperienze e conoscenze; ottimizzare la mobilità urbana. Il Tema 6 – Ottimizzare la mobilità urbana, azione 19 – stabilisce che la Commissione Europea intende fornire un supporto per ottimizzare l'efficienza logistica del trasporto urbano, compreso il miglioramento dei collegamenti tra i percorsi delle merci a lunga distanza, allo scopo di garantire un'efficiente consegna nel cosiddetto "ultimo miglio".
- Libro Bianco. Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti – Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile del 2011; il piano, con riferimento al trasporto urbano delle merci, incentiva: l'utilizzo dei Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS) per una gestione del traffico in tempo reale che permetta di ridurre i tempi di consegna e la congestione; l'utilizzo di tecnologie veicolari ibride, elettriche o ad idrogeno per ridurre l'inquinamento atmosferico ed acustico.

- Direttiva EUROVIGNETTE (2006/38/CE). La direttiva Eurovignette è il testo europeo che stabilisce i principi di tariffazione dei mezzi pesanti per l'utilizzo delle infrastrutture stradali. La direttiva non obbliga gli Stati membri ad introdurre un pedaggio per i mezzi pesanti, ma definisce il quadro all'interno del quale gli Stati che lo desiderano possono applicare i pedaggi o i diritti di utenza. La Direttiva stabilisce che il pedaggio corrisponde "al pagamento di una somma determinata per un autoveicolo che effettua un tragitto ben definito sulla rete trans-europea basata sulla distanza percorsa e sul tipo di autoveicolo"; il diritto di utenza fa invece riferimento al "pagamento di una somma stabilita che dà diritto all'utilizzo dell'infrastruttura da parte di un autoveicolo per un tempo definito". I diritti di utenza sono calcolati in base al tempo, mentre il pedaggio è calcolato in base alla distanza. Nel Luglio del 2008 è stata presentata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio la proposta di una nuova direttiva sulla tariffazione dei sistemi di trasporto, al fine di modificare la presente direttiva 2006/38/CE che a sua volta modificava la 1999/62/CE.

Indirizzi a scala nazionale

I principali strumenti di pianificazione dei trasporti, in Italia, sono i seguenti:

- Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (2001)

Nel Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL), nell'ambito del capitolo relativo alla "Logistica e intermodalità per le merci", sono descritte le linee guida per ciascuna modalità di trasporto (stradale, marittimo, ferroviario e aereo), con riferimento anche al tema della "Distribuzione delle merci in ambito urbano". Il Piano sottolinea "la necessità di affrontare il problema della distribuzione delle merci in ambito urbano in una logica di concertazione tra gli attori". Nel PGTL viene stabilito che gli interventi relativi alla distribuzione delle merci in città devono essere inseriti nei Piani Urbani della Mobilità (PUM), nella cui elaborazione è necessario far riferimento a studi "per filiere compatibili" (es. distribuzione alimentare, tabacchi, giornali) e non per flussi di traffico, al fine di individuare opportune soluzioni operative. Il Piano specifica inoltre che "le indicazioni per la redazione dei PUM, sulla base delle esperienze finora condotte a livello europeo, sono quelle di:

- a) individuare le soluzioni operative anche sulla base dell'esperienza delle imprese postali e dei grandi specialisti del trasporto espresso e della consegna a domicilio;
- b) valutare la possibilità di sfruttare appieno le infrastrutture ferroviarie;

- c) valutare l'utilizzo di interporti esistenti per il consolidamento di carichi destinati a grandi superfici di vendita in centro città;
 - d) individuare soluzioni che non comportino ricadute onerose per il commercio al dettaglio".
- Piano per la logistica. Un programma di settore per la competitività del sistema Paese, del 2006; il Piano per la Logistica è un documento redatto con l'obiettivo di migliorare il settore dei trasporti e della logistica per la competitività del sistema Paese. Il Piano definisce la logistica urbana come "l'insieme delle attività fisiche e organizzative volte a garantire l'approvvigionamento e la distribuzione ai punti vendita, agli insediamenti produttivi e, più in generale, ai siti generatori di domanda di trasporto localizzati in area urbana". Il Piano individua differenti ambiti di domanda del traffico commerciale urbano: trasporto in conto proprio di commercianti, dettaglianti e artigiani che si approvvigionano presso i fornitori; trasporto in conto terzi di grossisti, distributori, produttori verso operatori commerciali e manifatturieri; trasporti di natura strumentale di artigiani, di imprese di pulizia e manutenzione che utilizzano un mezzo proprio; trasporti dei servizi pubblici (raccolta rifiuti, distribuzione postale, etc.).
 - Piano Generale della Mobilità, linee guida del 2007; il piano, riguardo la mobilità delle merci individua le seguenti aree di azione rilevanti: City Logistics e distribuzione regionale; trasporto merci, intermodalità e logistica territoriale; porte internazionali e autostrade del mare. Le finalità dell'area di azione City Logistics e distribuzione regionale sono: la riduzione dell'impatto ambientale del traffico urbano delle merci; il miglioramento dell'efficienza della distribuzione e del livello di servizio logistico per le imprese commerciali che operano in ambito urbano; il miglioramento della sicurezza stradale. Il Piano indica inoltre le misure generalmente più efficaci, quali: la regolamentazione degli orari, per ridurre la congestione nelle ore di punta; l'individuazione di piazzole di sosta per le attività di carico e scarico; la razionalizzazione dei trasporti e della logistica, massimizzando l'utilizzo dei mezzi e minimizzando il numero dei veicoli.
 - Piano Nazionale della Logistica del 2011; il piano individua le linee strategiche di intervento caratterizzate da azioni che interessano diversi settori dei trasporti e della logistica. Gli obiettivi generali sono: la riduzione della congestione e dell'inquinamento; l'efficienza della distribuzione urbana a costi competitivi. Le politiche prioritarie di intervento identificate sono: il contenimento del traffico

veicolare, l'incremento delle prestazioni del servizio per le diverse filiere e la differenziazione per fasce orarie in relazione al tipo di veicolo. Il Piano stabilisce che non è possibile individuare provvedimenti generali per il miglioramento della distribuzione delle merci in ambito urbano ma che è anche necessario elaborare un sistema di interventi e provvedimenti coordinato e diversificato in funzione delle filiere e delle loro specificità.

Indirizzi a scala locale: scala regionale, urbana e metropolitana

Il Piano Generale dei Trasporti e della Logistica del 2001 riporta le Linee guida per la redazione dei Piani Regionali dei Trasporti (PRT) che rappresentano il documento di pianificazione di riferimento a scala regionale. Gli obiettivi del PRT sono: garantire elevati livelli di accessibilità; rendere minimo il costo generalizzato della mobilità; porre attenzione alle persone a ridotte capacità motorie; salvaguardare l'ambiente ed aumentare la sicurezza; raggiungere gli obiettivi dei Piani di riassetto urbanistico e territoriale e dei Piani di sviluppo economico e sociale.

I documenti di pianificazione a scala urbana e metropolitana sono: il Piano Urbano del Traffico (PUT) e il Piano Urbano della Mobilità (PUM). Il PUT costituisce un documento di pianificazione dei trasporti a scala urbana di breve periodo di cui devono dotarsi le amministrazioni comunali con una popolazione residente superiore ai trentamila abitanti o con specifici problemi di congestione. Gli obiettivi generali del PUT sono: il miglioramento della circolazione e della sicurezza stradale; la riduzione dell'inquinamento atmosferico e acustico e il rispetto dei valori ambientali; il risparmio energetico; l'armonizzazione con gli strumenti urbanistici. Tali obiettivi sono perseguibili attraverso strategie di intervento sull'offerta, quali eliminazione della sosta sulla viabilità principale, adeguamento della capacità delle intersezioni, e interventi che agiscono sulla domanda di mobilità, quale circolazione dei pedoni, movimento dei mezzi collettivi e individuali.

Il PUM, istituito dalla Legge n.340/2000, è uno strumento di medio-lungo periodo a disposizione dei comuni. La normativa definisce il PUM come "progetto del sistema della mobilità comprendente l'insieme degli interventi sulle infrastrutture di trasporto pubblico e stradali, sui parcheggi di interscambio, sulle tecnologie, sul parco veicoli, sul governo della domanda di trasporto attraverso la struttura del Mobility Manager, sui sistemi di controllo e regolazione del traffico, sulla logistica e sulle tecnologie per la riorganizzazione della distribuzione delle merci".

I principali Progetti Europei

La crescente necessità di risolvere i problemi connessi all'inquinamento e alla congestione dei centri urbani, ha comportato la ricerca di nuove forme di organizzazione e di gestione del traffico urbano delle merci.

Nell'ultimo decennio l'attenzione verso la sostenibilità ambientale è confermata dalla promozione e dal finanziamento da parte dell'Unione Europea di programmi, progetti e iniziative riguardanti la mobilità delle persone e delle merci.

Le principali iniziative sono state promosse nell'ambito dei seguenti progetti europei:

- BESTUFS I (2000-2003) e BESTUFS II (2004-2008) – Best Urban Freight Solutions; il progetto mira ad identificare e divulgare le migliori soluzioni per il trasporto urbano delle merci (Ruesch e Glucker, 2001; Egger e Ruesch, 2002; Egger et alii, 2003);
- CIVITAS Initiative – “City Vitality Sustainability”. L'iniziativa CIVITAS riguarda il trasporto urbano ed è volta ad incoraggiare le città nello sviluppo di strategie per un trasporto urbano sostenibile, basato su misure, tecnologie ed infrastrutture innovative. L'iniziativa CIVITAS I è stata avviata all'inizio del 2002 e coinvolge 19 città in 4 progetti pilota; l'iniziativa CIVITAS II è stata avviata all'inizio del 2005 e coinvolge 17 città in altrettanti progetti pilota. Gli obiettivi del progetto sono: promuovere e realizzare misure per trasporti urbani efficienti in termini energetici, puliti e sostenibili; applicare pacchetti integrati di provvedimenti politici e tecnologici nel campo dell'energia e dei trasporti;
- CITY PORTS (2004). Il progetto è finalizzato alla creazione di una rete di progetti pilota sulla logistica distributiva delle merci; le finalità del progetto riguardano: la riduzione dell'impatto ambientale del traffico urbano delle merci; la riduzione della congestione e del traffico nelle ore di punta; la regolamentazione della mobilità urbana privata; la razionalizzazione dei trasporti, massimizzando l'utilizzo dei mezzi e minimizzando il numero dei veicoli. Nell'ambito di tale progetto si è visto che le misure di City Logistics maggiormente implementate nello scenario internazionale sono la realizzazione di Centri di Distribuzione Urbana (CDU) per il 79%, la dotazione di veicoli ecologici per il 52% e la regolazione degli accessi per il 52%, analizzando 36 casi di cui 12 italiani e 24 europei. La Regione Emilia Romagna ha coordinato tale progetto.
- eDRUL – eCommerce Enabled, Demand Responsive Urban Logistics; progetto innovativo nel campo della e-logistica partito nel 2002 e conclusosi nel 2004.

Le sperimentazioni sviluppate nell’ambito del progetto sono relative a 4 aree pilota: Lisbona, Aalborg, Eindhoven e Siena (servizio “Park and Buy”).

- ELCIDIS - Electric vehicle goods distribution systems in cities.
- LIFE-CEDM – Center for Eco-Friendly Freight Distribution.
- TADIRAM – Sviluppo di Tecnologie e Sistemi Avanzati per la Distribuzione e Raccolta delle Merci in città.
- SURFF – Sustainable Urban and Regional Freight Flows.

Il Progetto CityLog

Il Progetto CityLog, cofinanziato nell’ambito del VII Programma Quadro della Commissione Europea nel 2010 è un progetto di ricerca finalizzato al miglioramento della sostenibilità e dell’efficienza del processo di distribuzione delle merci nelle aree urbane, attraverso strumenti integrati di gestione e soluzioni innovative per quanto riguarda i veicoli di trasporto. I partner del progetto sono 18, provenienti da 6 paesi europei, coordinati dal Centro Ricerche Fiat di Orbassano, in Provincia di Torino. La partnership è segmentata tra le diverse categorie di attori coinvolti nella catena logistica:

- costruttori di veicoli (Iveco e Volvo)
- istituzioni locali (città di Berlino e Lione, la Regione Piemonte)
- operatori logistici (Tnt)
- associazioni transnazionali (Ertico – ITS Europe e Europlatforms, che riunisce gli interporti europei)
- centri di ricerca (Centro Ricerche Fiat, Tno (olandese) e Fraunhofer (tedesco)).

Le tre direttrici principali del progetto riguardano:

- lo sviluppo di sistemi telematici orientati alla logistica: miglioramento della pianificazione dei percorsi dei veicoli (routing) e supporto informativo in tempo reale agli autisti dei veicoli commerciali;
- soluzioni a “bordo veicolo” in modo tale da poter consentire l’interoperabilità tra i veicoli stessi soprattutto per quanto riguarda il transshipment;
- unità di carico innovative, progettate per essere compatibili per diverse tipologie di veicoli e per tipologia di “percorso”: progettazione di apposite configurazioni dei mezzi commerciali per migliorarne l’impiego e la flessibilità durante le consegne.

Il progetto mira al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- limitazione del numero di veicoli commerciali nei centri urbani (grazie anche al concetto di “autobus delle merci”);

- riduzione del numero delle consegne mancate, attraverso il tracciamento dei percorsi e delle merci stesse;
- ottimizzazione del processo distributivo mediante il supporto di un'agenzia di trasporto "super partes" pubblica o consortile;
- ottimizzazione in termini di tempi e costi delle operazioni di transhipment durante le fasi della distribuzione;
- sviluppo di servizi info-telematici sui veicoli di nuova generazione e negli agglomerati urbani dotati di adeguati sistemi per il monitoraggio del traffico;
- modellazione e simulazione dell'impatto del modello CityLog in diversi contesti urbani.

Il modello distributivo proposto nell'ambito del progetto è il seguente: la movimentazione delle merci dai magazzini extraurbani (interporti) verso il centro città è assegnato ad un veicolo con capacità maggiore, il cosiddetto "Autobus delle Merci"; questo trasporta le diverse unità di carico in varie aree di transhipment collocate all'interno del perimetro urbano dalle quali partono furgoni dedicati per la distribuzione della merce ai clienti finali (Fig.3.13bis).

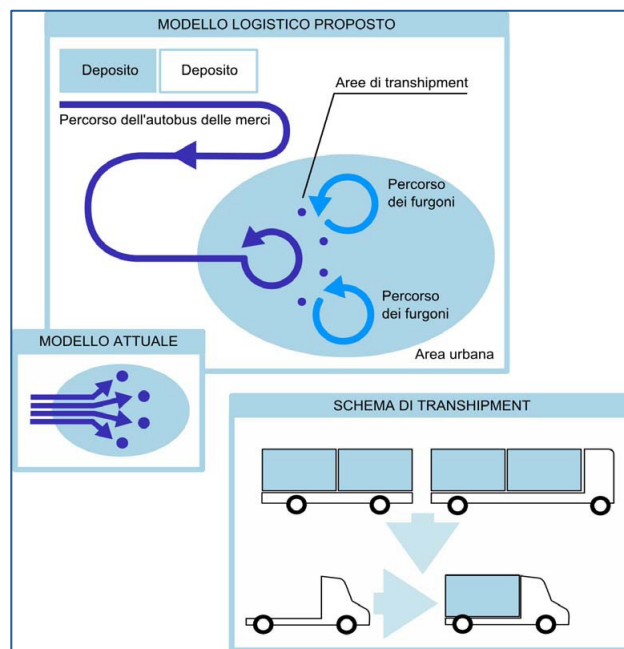


Fig.3.13bis – Modello logistico proposto nell'ambito del Progetto City Log

In base alla tipologia del viaggio/percorso e delle unità di carico possono verificarsi due scenari:

- transshipment sincrono: l'autobus delle merci e il furgone dedicato allo smistamento delle merci convergono nell'area di carico-scarico nello stesso istante; mediante opportuni sistemi per il trasferimento delle merci da un veicolo all'altro, l'unità di carico con i pacchi da consegnare ai clienti finali viene presa in carico dal furgone, mentre l'autobus delle merci riparte verso una nuova area di transshipment;
- transshipment asincrono: il furgone raggiunge l'area di carico e scarico anche quando l'Autobus delle Merci è già ripartito; l'unità di carico da trasportare viene scaricata e stoccata in apposita area.

3.7. Le esperienze di logistica urbana in alcune città italiane

Negli ultimi anni, l'attenzione verso la tematica della sostenibilità ambientale, è cresciuta notevolmente; con riferimento ai temi della logistica urbana, oltre alla promozione e all'implementazione di progetti europei, le amministrazioni locali si sono attivate per mettere in campo soluzioni efficaci per l'ottimizzazione del trasporto urbano delle merci.

In questo contesto, sono di seguito descritte le varie strategie di intervento che possono essere adottate per l'ottimizzazione dei flussi sulla rete stradale, al fine di ridurre i problemi di congestione. Tra le principali strategie di intervento vi è sicuramente la limitazione degli accessi dei veicoli commerciali nei centri storici; tali limitazioni sono orientate alla minimizzazione della congestione stradale, mediante la definizione di fasce orarie durante le quali è consentita la distribuzione delle merci agli esercizi commerciali, oppure consentendo la consegna notturna delle merci, o garantendo la possibilità di accesso ai soli veicoli ecologici.

In molte città, le iniziative nel settore della logistica urbana sono il risultato di accordi e collaborazioni tra le amministrazioni comunali, provinciali e regionali; in questo scenario, il ruolo dell'Unione Europea rappresenta un forte incentivo per le politiche integrate di lungo termine, ormai necessarie per realtà complesse come le Aree Metropolitane.

L'obiettivo di carattere generale perseguito dal Governo è di favorire la riduzione del livello di inquinamento atmosferico e della congestione nelle aree urbane, al fine di migliorare la qualità della vita nelle città; tale obiettivo viene espressamente contemplato dal Ministero dell'Ambiente.

Le aree di intervento per la logistica urbana riguardano:

- riordino infrastrutturale dei nodi urbani;
- piattaforme logistiche (fisiche e telematiche) a supporto delle attività;
- ottimizzazione delle flotte (con graduale passaggio dal conto proprio al conto terzi);
- potenziamento della flotta dei veicoli ecologici.

Un progetto City Logistics per una realtà urbana ha come obiettivo quello di individuare un insieme di interventi infrastrutturali e di servizio mediante i quali raggiungere una maggiore efficienza complessiva nel sistema di movimentazione delle merci all'interno del centro storico, riducendo l'impatto ambientale delle attività di trasporto pur mantenendo o incrementando i livelli di accessibilità.

Per quanto riguarda i provvedimenti in corso di sperimentazione nelle principali città italiane ed europee, è necessario premettere che nel settore della mobilità urbana non esistono “soluzioni” univoche e/o definitive, considerate le molteplici variabili che caratterizzano ogni realtà locale, quanto piuttosto una raccolta di “esperienze” delle quali occorre valutare l’efficacia e l’effettiva applicabilità in altre situazioni analoghe.

La classificazione degli interventi promossi dalle amministrazioni, come riportato in letteratura e in coerenza con le indicazioni riportate nel Piano della Logistica (2006), può essere la seguente:

Le politiche di logistica urbana	
Politiche di restrizione degli accessi e della sosta	<ul style="list-style-type: none"> - Finestre orarie - Limitazioni in funzione delle caratteristiche del veicolo - Limitazione in funzione dell’efficienza del servizio - Misure di pricing
Politiche di incentivazione	<ul style="list-style-type: none"> - Incentivi per il rinnovo del parco veicolare - Migliori regimi di circolazione per gli operatori che garantiscono elevati standard di efficienza
Politiche di concertazione	<ul style="list-style-type: none"> - Informazione e/o dialogo con i soggetti pubblici e privati coinvolti
Politiche di investimento	<ul style="list-style-type: none"> - Offerta di sosta - Centri di Distribuzione Urbana (CDU) - Corsie preferenziali - Tecnologie (ITS applicati alla gestione del traffico)

Nella seguente tabella sono riportati i criteri di valutazione degli interventi in funzione degli obiettivi da perseguire:

Obiettivi	Criterio di valutazione	Indicatore
Obiettivi prestazionali	Veicoli commerciali in ingresso nell'area di studio	Veic./giorno; Veic./ora
	Operazioni di carico/scarico effettuate nell'area di studio	N°/giorno; N°/ora
	Lunghezza media del singolo giro	Km/giro
	Operazioni di carico/scarico per giro	N°/giro
	Tempo medio per giro	Min/giro
	Tasso medio riempimento dei veicoli	%
Obiettivi ambientali	Veicoli merci nell'area di studio per categoria di peso	Veic./giorno
	Veicoli merci in ingresso nell'area di studio per classe emissiva	Veic./giorno
	Emissioni inquinanti	t/giorno
	Emissioni rumore	Leq dB(A)
	Consumi di carburante	l/giorno
Obiettivi economici	Costo orario delle operazioni	Euro/operazione
	Costo per km delle operazioni	Euro/Km

Nei seguenti paragrafi sono riportati i principali interventi di logistica urbana attuati o in fase di realizzazione in alcune città italiane. L'analisi delle esperienze è stata aggregata per Regione, e, in particolare, sono descritti gli interventi ritenuti significativi nelle aree urbane delle seguenti regioni:

- a) Emilia Romagna (Parma, Ferrara, Bologna, Modena);
- b) Veneto (Padova, Vicenza);
- c) Toscana (Siena, Lucca);
- d) Liguria (Genova).

a) Regione Emilia Romagna

La Regione Emilia Romagna è all'avanguardia per quanto riguarda le strategie di logistica urbana e di salvaguardia ambientale, implementate in alcune città, quali Parma, Ferrara, Bologna, Modena, dove sono attualmente in fase di sperimentazione/attuazione progetti eco-sostenibili riguardanti la distribuzione delle merci, rispettivamente: ECO-CITY, ECO-PORTO, VAN SHARING e CITYPORTO.

Si riporta di seguito un quadro di tali iniziative, descrivendone i fattori di successo/insuccesso.

L'iniziativa ECOCITY di Parma

Nel 2005 il Comune di Parma, al fine di individuare opportuni interventi di logistica urbana per alcune filiere rilevanti, ha promosso un progetto di City Logistics denominato Ecologistics. L'obiettivo generale del progetto è il raggiungimento di una maggiore efficienza dell'intero sistema dei trasporti. L'intervento prevede la regolamentazione della sosta e degli accessi dei veicoli commerciali nelle aree del centro, attraverso l'identificazione di fasce orarie e tariffe. La peculiarità del progetto è rappresentata dalla possibilità da parte degli operatori del trasporto e della logistica di partecipare attivamente al progetto stesso accreditando i propri veicoli e/o piattaforme. In tal modo, è stato creato un largo consenso tra gli operatori che hanno aderito all'iniziativa, definendo le regole di accesso e di sosta non in modo coercitivo ma sfruttando il concetto di accreditamento aperto a tutti.

I veicoli per essere accreditati:

- devono avere una portata a pieno carico inferiore alle 3.5 tonnellate ed essere almeno Euro 3 o Euro 4 (oppure alimentati a metano, elettrici o GPL);
- devono essere dotati di strumentazioni ICT per la localizzazione dei veicoli e dei carichi e per l'ottimizzazione dei percorsi;
- devono avere un coefficiente di carico pari ad almeno il 70% di quello massimo trasportabile.

Il Comune, inoltre, al fine di assicurare continuità al servizio ha identificato un soggetto gestore del servizio: il Centro Agroalimentare e Logistica Consortile (CAL). Il Centro Agroalimentare e Logistica è una società di gestione a maggioranza di capitale pubblico che ha come soci il Comune di Parma, la Regione Emilia-Romagna, la Camera di Commercio di Parma, la Cassa di Risparmio di Parma e Piacenza e la Banca del Monte di Parma.

Nel 2008, il CAL ha introdotto un servizio di distribuzione denominato EcoCity. La piattaforma logistica di supporto alla distribuzione, nella quale confluiscono i flussi di

merce provenienti dalle direttrici esterne è localizzata strategicamente nei pressi del centro città, nella sede del CAL. Nella piattaforma vengono consolidati i carichi e viene razionalizzata la fase di distribuzione per ciascun veicolo a basso impatto ambientale, aumentando i coefficienti di carico e ottimizzando la scelta dei percorsi. Il progetto interessa prevalentemente le seguenti filiere: tradizionali freschi, tradizionali secchi, collettame, capi appesi, Ho.Re.Ca. (Hotel, Restaurant, Catering).



Fig.3.14 – Veicolo del servizio EcoCity

Il 1° Aprile del 2008 è iniziata la fase preliminare del progetto durante la quale i veicoli devono richiedere l'accreditamento al Comune per l'accesso alla zona del centro storico. I veicoli che non possiedono i requisiti previsti possono usufruire del servizio EcoCity, gestito dal CAL. In particolare i mezzi che non possono entrare nel centro città raggiungono la piattaforma logistica di supporto durante la notte, depositando le merci; successivamente, queste vengono consolidate e caricate sui vettori del servizio EcoCity che effettuano l'attività di consegna nelle prime ore del mattino. La tariffazione è progettata tenendo conto del numero delle spedizioni, dei colli, del peso di ogni spedizione e del volume.

Si riporta di seguito una scheda riassuntiva del servizio ECOCITY.

ECOCITY - PARMA	
Soggetto Attuatore	Centro Agroalimentare di Parma, con il supporto del Comune
Modello	UDC (piattaforma periurbana presso il Centro Agroalimentare) Veicoli a metano Piattaforma ICT per la gestione dei percorsi e la tracciabilità delle merci Istituzione della ZTL
Veicoli	6 veicoli a metano
Periodo	Da marzo 2008
Normativa premiante	<p>Possibilità di accreditare il proprio veicolo per l'accesso, carico/scarico nella ZTL, se compatibile con gli standard dei furgoni ECOCITY:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Alimentazione almeno EURO 3 ▪ Portata massima < 3.5 t ▪ Attivazione del sistema di localizzazione per la tracciabilità del veicolo ▪ Riempimento pari almeno al 70% della capacità di carico del veicolo <p>Forte azione di marketing che identifica anche i punti di vendita che ricevono la merce dal servizio</p>

(Fonte: City Logistics EXPO 2008)

Dopo un anno dalla partenza del servizio si riportano di seguito i principali dati riepilogativi:

- 400 quintali trasportati al giorno;
- 60 aziende utilizzano il servizio Ecocity in maniera continuativa;
- 250 esercizi commerciali vengono riforniti ogni giorno;
- 1 piattaforma logistica;
- 12 veicoli ecologici alimentati a metano;
- mediamente, ogni veicolo Ecocity sostituisce tre mezzi pesanti che entravano in città prima dell'attivazione del servizio.

L’iniziativa ECOPORTO di Ferrara

Il Comune di Ferrara per la riduzione dei problemi di congestione e inquinamento ha adottato politiche di limitazione degli accessi nel centro cittadino, con determinazione di fasce orarie e sanzionamento delle trasgressioni. In particolare, il centro storico di Ferrara è dichiarato Zona a Traffico Limitato tutti i giorni dell’anno, 24 ore al giorno, e l’accesso a titolo gratuito è permesso solo ai residenti e ai domiciliati e ad alcune categorie di utenti che svolgono attività di pubblico servizio. Tutte le altre categorie, tra cui i commercianti, gli artigiani e chi effettua la distribuzione delle merci, per circolare e sostare nelle ZTL devono richiedere un permesso a pagamento. Per alcune categorie di autorizzazione è prevista una riduzione dell’80% della tariffa nel caso in cui si utilizzi un veicolo a basso impatto ambientale ossia ad alimentazione elettrica, a metano, a GPL o anche ibrida.

Nel 2002, per affrontare il problema della distribuzione delle merci, è stata realizzata la piattaforma logistica EcoPorto dedicata alla raccolta e allo smistamento delle merci provenienti dalla Provincia di Bologna e destinate ai punti di domanda localizzati nel centro storico di Ferrara. Nella fase iniziale, l’iniziativa EcoPorto è stata promossa e sostenuta dal Comune che ha incentivato e facilitato l’accesso dei veicoli eco-compatibili nella ZTL.

L’iniziativa EcoPorto è gestita da una cooperativa di servizi privata CoopSer, attiva nel settore della logistica e nei servizi alle imprese, e specializzata nella distribuzione di prodotti refrigerati. La piattaforma, situata nei pressi del casello autostradale di Ferrara Sud, si estende su di una superficie pari a 35.000 mq (di cui 7.500 sono coperti). Dalla piattaforma di EcoPorto partono le consegne delle merci, prevalentemente alimentari freschi, destinate al centro città mediante l’utilizzo di una flotta di 50 veicoli ecologici, alimentati a metano.

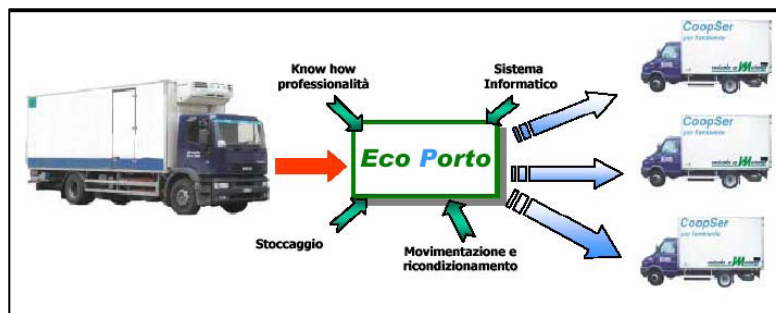


Fig.3.14bis – La piattaforma EcoPorto

La presenza di un operatore logistico che già operava nel territorio di Ferrara ha rappresentato un fattore di successo dell’iniziativa. Nel 2005, il Comune ha inoltre deciso di localizzare una seconda piattaforma logistica (nella zona settentrionale della città), EcoPorto 2, per la distribuzione urbana delle altre categorie merceologiche. Il progetto EcoPorto 2, a differenza del primo servizio, è stato finanziato con fondi regionali.

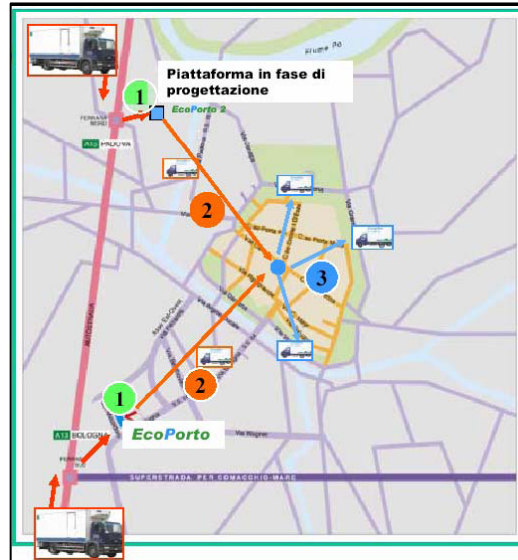


Fig.3.15 - Localizzazione delle piattaforme EcoPorto ed EcoPorto2

ECOPORTO - FERRARA	
Soggetto Attuatore	Coopser (azienda locale di distribuzione merci)
Modello	UDC (gestita da un privato) Veicoli a metano Restrizioni al traffico (ZTL e aree pedonali) Road Pricing (in fase di implementazione)
Veicoli	50 veicoli a metano
Periodo	Dal 2002
Consegne effettuate	140.000 consegne al mese
Normativa premiante	Sconti sulla tariffa di Road Pricing (80%) per i veicoli a metano/elettrici
Operatori coinvolti	Principali caricatori di alimentari deperibili

(Fonte: City Logistics EXPO 2008)

L'iniziativa VAN SHARING di Bologna

Le principali misure di logistica urbana a Bologna riguardano la regolamentazione degli accessi e della sosta dei veicoli commerciali nelle zone centrali della città.

La pianificazione del trasporto delle merci nella città, dopo il Piano Generale del Traffico Urbano, che risale all'anno 2000, è stata attuata a partire dai seguenti riferimenti normativi e programmatici:

- Piano Particolareggiato trasporto merci, 2002
- Accordi Regione, Provincia, Comune per la qualità dell'aria per il triennio 2003-2005
- Studio sulla distribuzione urbana delle merci (metodologia City Ports), 2004
- Piano straordinario per la Qualità dell'Aria (PSQA), 2005
- Piano per la distribuzione delle merci in città (Piano Merci), 2005/2006
- Nuovo Piano Generale del Traffico Urbano (PGTU), 2006.

Il tema della distribuzione delle merci è affrontato nell'ottica di integrare gli interventi introdotti dal Piano Straordinario per la Qualità dell'Aria, relativi agli strumenti telematici per la regolazione e il controllo del traffico, e gli interventi di Road Pricing, introdotti dal Piano Merci. I sistemi di telecontrollo degli accessi, SIRIO e RITA, coprono un'area pari a 3.2 kmq, che rappresenta circa l'80% dell'intero centro storico (Fig.3.16).

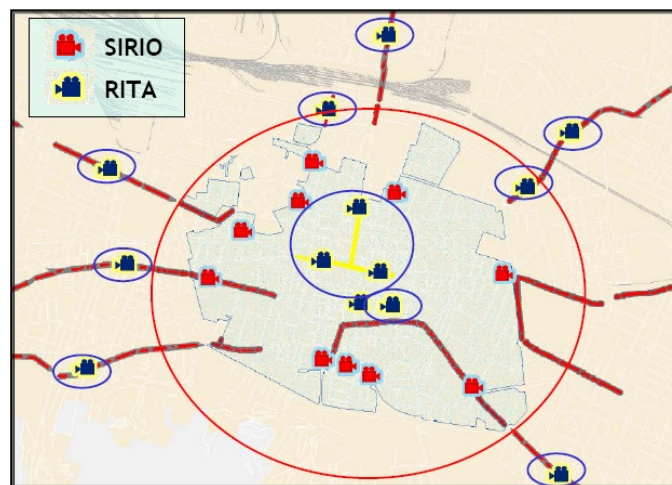


Fig.3.16 - Sistemi di telecontrollo degli accessi nella ZTL di Bologna

Il Piano Merci prevede la definizione di nuove regole, rispetto a quelle riportate nel PGTU del 2000, per l'accesso alla ZTL e per la determinazione delle procedure di

rilascio dei contrassegni per l'accesso. La volontà dell'amministrazione è di incentivare l'utilizzo di veicoli a basso impatto ambientale e il trasporto in conto terzi, attraverso la determinazione di tariffe agevolate per tali categorie. Per accedere alla ZTL è necessario il pagamento di "permessi operativi" che hanno validità biennale e tariffa annua dipendente dalla classe di eco-compatibilità del veicolo (da 25 a 300 Euro/anno).

Sono inoltre state definite delle fasce orarie per l'accesso dei veicoli commerciali legate al grado di eco-compatibilità dei veicoli; in particolare:

- veicoli NON EURO: dalle 6 alle 7,30 e dalle 14,30 alle 16,30
- veicoli EURO: dalle 6 alle 10,30 e dalle 14 alle 17
- veicoli METANO e GPL : dalle 6 alle 12.30 e dalle 14 alle 17.

Per consentire gli accessi occasionali nella ZTL, parallelamente ai "permessi operativi", sono stati introdotti dei titoli di accesso; questi sono di tipo giornaliero (5 Euro) o quadri-giornaliero (valido per 4 giorni consecutivi, 12 Euro).

Nell'Accordo di Programma sulla Qualità dell'Aria per il triennio 2006-2009, con riferimento alla Misura 5, per il Comune di Bologna è riportato il progetto VAN SHARING. Tale progetto è finalizzato prevalentemente ad incrementare il tasso di riempimento dei veicoli, riducendo, conseguentemente, il numero di viaggi nella ZTL. Il progetto prevede l'individuazione di un gestore che si impegni a:

- costituire un consorzio di operatori;
- distribuire la merce nell'area centrale mediante una flotta di almeno 20 veicoli eco-compatibili di nuova immatricolazione;
- progettare, realizzare e gestire una centrale di controllo;
- progettare, realizzare e gestire almeno 14 piazzole di carico-scarico prenotabili per il consolidamento dei carichi.

I risultati attesi dal progetto prevedono una riduzione del 31% del numero di viaggi per la distribuzione nella ZTL.

Il Centro Agroalimentare di Bologna Scpa ha recentemente presentato il progetto Logistic City, i cui obiettivi principali sono la riduzione dei volumi di traffico merci attraverso l'ottimizzazione logistica (aumento dei coefficienti di carico e ottimizzazione dei percorsi) e la sperimentazione di soluzioni innovative per l'integrazione della mobilità elettrica nei sistemi di produzione di energia elettrica emergenti. In particolare, il progetto nasce nel contesto del Piano Strategico Metropolitan di Bologna e si propone come una soluzione idonea alla Smart City, in

quanto integra tecnologie e processi riguardanti la generazione di energia fotovoltaica e la distribuzione delle merci tramite mezzi a trazione elettrica realizzati in modo da sfruttare l'energia fotovoltaica. Il progetto propone la realizzazione di una piattaforma ICT che sia in grado di tener conto delle caratteristiche di autonomia dei veicoli elettrici e di prevedere eventuali operazioni di sostituzione delle batterie lungo il percorso, sviluppando soluzioni che consentano lo scambio rapido delle batterie dei veicoli elettrici (Swap&Go), in modo da utilizzare la massima disponibilità di energia fotovoltaica e da ridurre il tempo di sosta per la ricarica dei veicoli.

L'iniziativa City Porto di Modena

Il CityPorto è un servizio di logistica urbana di cosiddetta "last mile delivery", attivo nella città di Modena dal luglio del 2007. Cityporto è un progetto promosso dal Comune di Modena e cofinanziato dalla Regione Emilia-Romagna. Il coordinamento operativo del progetto è svolto dall'Agenzia per la Mobilità e il Trasporto Pubblico, mentre l'operatività di magazzino (ricezione merci, smistamento e distribuzione) è affidata ad una cooperativa sociale.

L'obiettivo del progetto riguarda la razionalizzazione della distribuzione delle merci in città, al fine di ridurre i veicoli commerciali circolanti nel centro storico e le relative emissioni inquinanti.

Il funzionamento del servizio Cityporto è così articolato: le merci trasportate dagli operatori che hanno aderito all'iniziativa (solitamente con veicoli che non sono a basso impatto ambientale) vengono raccolte in un unico magazzino "transit point" di Cityporto, situato in posizione baricentrica rispetto alle principali vie di accesso alla città e al centro della città. Nel magazzino di Cityporto, dopo una verifica dei carichi, le merci vengono compattate e organizzate in funzione della loro destinazione. Si procede quindi ad ottimizzare il carico dei veicoli, per ottenere un alto livello di riempimento finalizzato alla riduzione del numero dei viaggi di consegna. Per la fase di distribuzione vengono utilizzati solo veicoli ecologici di ultima generazione, elettrici o a metano, in grado di accedere in qualsiasi momento al centro storico e alle Zone a Traffico Limitato.

Dal punto di vista della gestione, vengono utilizzati i documenti di viaggio degli operatori ed è operativo un sistema informativo che gestisce la tracciabilità della merce dal suo arrivo in magazzino sino alla consegna ai clienti finali. Le tariffe applicate dipendono prevalentemente dal peso delle spedizioni. Il costo medio della tariffa per ogni kg di merce trasportata è pari a € 0,07 al kg.

La tariffa si compone tipicamente di una parte fissa, di una parte variabile in funzione del peso, e da costi ulteriori costi per attività accessorie come la consegna ai piani, il preavviso telefonico, il ritiro di un contrassegno, etc..

Le tariffe delle spedizioni vengono pagate direttamente dagli operatori che conferiscono la merce al Cityporto, per cui per chi spedisce la merce (fornitore) e per chi la riceve (attività commerciale) è del tutto trasparente il fatto che sia intervenuto un vettore diverso da quello di partenza per la consegna finale.



Fig. 3.17 – Veicolo CityPorto di Modena

Si riportano di seguito i dati relativi alle attività svolte dal Cityporto di Modena dal 2007(Luglio) al 2009:

Anno	N° spedizioni e ritiri	N° colli totali trasportati	Peso totale trasportato (kg)	Peso medio per spedizione (kg)	N° medio di colli per spedizione	Media spedizioni per giorno
2007	1.907	16.447	155.721,30	81,66	9	18
2008	8.246	57.529	623.417,72	75,60	7	32
2009	7.524	48.957	502.498,49	66,79	7	31

Statistiche spedizioni (Fonte: Cityporto)

Complessivamente nei primi due anni e mezzo di attività (da luglio 2007 a dicembre 2009) sono stati percorsi dai mezzi del Cityporto circa 35.000 km con mezzi ecologici (il 78% con mezzi elettrici e 22% a metano) ed è stato stimato, in base ai numeri di viaggi e alle consegne effettuate per conto degli operatori, che questi ultimi non hanno effettuato viaggi con mezzi non ecologici per un totale di 50.000 km.

Inoltre, nella città di Modena è attivo il sistema Modena City Pass per il controllo automatico degli accessi alla Zona Traffico Limitato (ZTL) del centro storico. Le telecamere, poste in corrispondenza dei principali punti di ingresso, e attive 24 ore su 24, registrano il numero di targa di ogni veicolo in transito e lo inviano a un sistema di controllo automatico, che verifica se i mezzi sono autorizzati all'ingresso in ZTL. Con il sistema di controllo elettronico rimane l'obbligo di esporre il contrassegno dell'autorizzazione sul cruscotto del veicolo. Nel centro storico è in vigore un sistema di controllo del traffico merci basato sulla regolamentazione degli accessi (ZTL di circa 690.000 mq) e sulla definizione di un sistema di percorsi e soste per i mezzi pesanti (> 60 quintali). La ZTL comprende circa il 70% del centro storico, dove sono presenti piazzole di carico/scarico con la possibilità di sosta per 30 minuti. Il Comune su richiesta concede autorizzazioni e deroghe per il carico/scarico e per il transito nella ZTL. I pass giornalieri concessi nel 2008 sono stati 58.050 (ossia oltre 250 al giorno); il 27% dei pass concessi sono stati per movimentazione delle merci.



Fig. 3.18 – Zona a Traffico Limitato di Modena

b) Regione Veneto

Padova e Vicenza rappresentano le città con le esperienze maggiormente consolidate e di maggiore successo nel contesto regionale. Le altre città che hanno investito nel settore della distribuzione urbana delle merci sono: Mestre, Rovigo e Verona.

Il Comune di Mestre, a partire dal 2001, ha intrapreso un programma di approfondimenti e studi sul tema della City Logistics, dal titolo “Azione Pilota per realizzare un servizio di distribuzione delle merci unificato ed ecologico nel centro di Mestre”. Secondo le linee principali del progetto, la City Logistics a Mestre è incentrata sulla localizzazione di un Centro di Distribuzione Urbana nella zona di Porto Marghera, a circa 4 km dal centro, con caratteristiche infrastrutturali e tecnologiche simili a Cityporto di Padova. Infine, nel 2007 l’Amministrazione comunale ha partecipato al programma di co-finanziamento proposto dal Ministero dell’Ambiente centrato sulla “riduzione dell’impatto ambientale derivante dal traffico nelle città, con l’obiettivo di giungere ad un sostanziale miglioramento della qualità dell’aria”.

Il Comune di Rovigo, nel 2006, in collaborazione con l’Interporto ha posto le basi per la realizzazione di un progetto di City Logistics, “Rovigo Eco-distribuzione”, con finanziamenti in parte regionali. Nello studio di fattibilità sono descritte le caratteristiche principali dell’intervento che si intende realizzare, viene delimitata l’area interessata e identificata la localizzazione della piattaforma logistica; a partire da tale piattaforma, la distribuzione in città verrà effettuata con veicoli a ridotto impatto ambientale.

L’esperienza City Porto di Padova

Una best practice di successo a scala comunale è rappresentata da Padova, dove è stato realizzato un servizio di distribuzione delle merci basato sull’utilizzo di una piattaforma logistica urbana (localizzata nell’Interporto di Padova), a partire dalla quale la merce viene distribuita con veicoli ecologici (a metano ed elettrici). Tale servizio di distribuzione delle merci nel centro storico della città è stato promosso nel 2004 dal Comune, dalla Provincia, dall’Interporto e dalla Camera di Commercio. Nelle Fig. 3.19 e 3.20 è riportato lo schema distributivo in assenza e in presenza del servizio CityPorto che consente di razionalizzare i flussi di merci e di massimizzare i tassi di riempimento dei veicoli.

Nel centro storico di Padova è in vigore una ZTL, così regolamentata: dalle 8.00 alle 24.00 dei giorni feriali (salvo eccezioni); per i mezzi pesanti il limite di peso per accedere alla ZTL è di 35 q.li ed il carico/scarico delle merci è consentito dalle 13.00 alle 16.00 e dalle 19.00 alle 9.30 del giorno successivo.

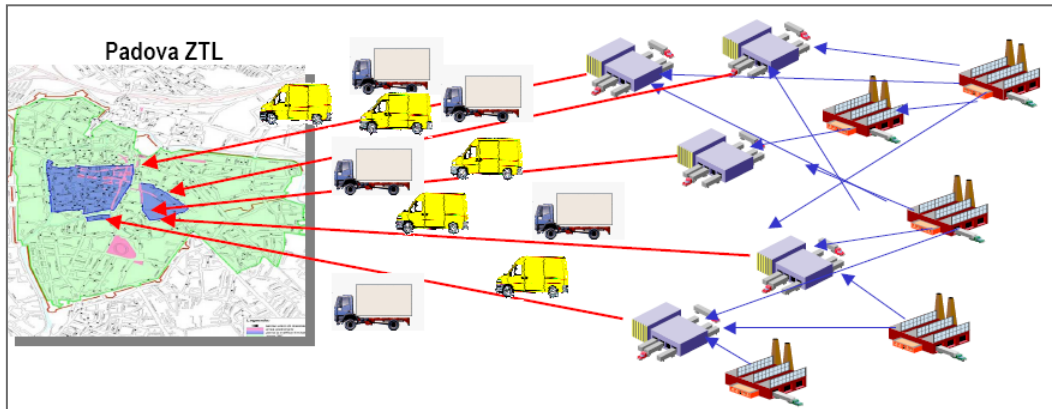


Fig.3.19 - La distribuzione delle merci in assenza del servizio CityPorto di Padova

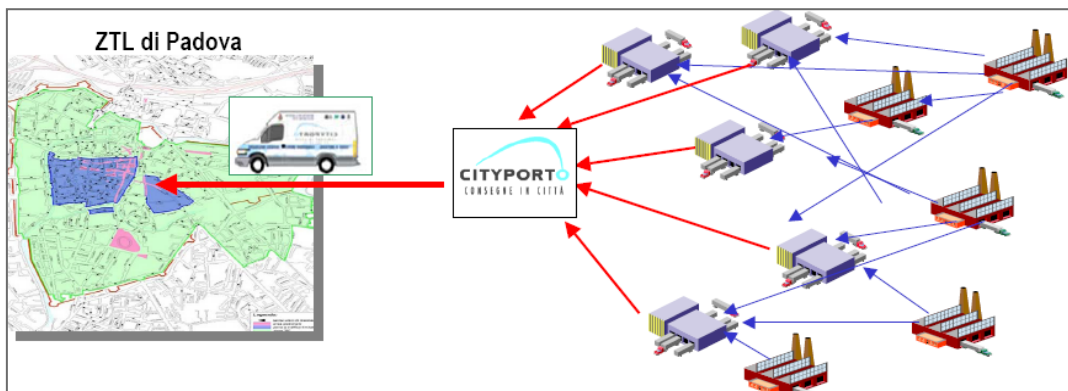


Fig.3.20 - La distribuzione delle merci mediante il servizio CityPorto di Padova

I benefici sono stati notevoli già a partire dal primo anno di esercizio, con una riduzione delle percorrenze di circa il 70% e delle emissioni di inquinanti (PM10, CO etc.). CityPorto ha stimato che l'incremento delle consegne effettuate dal 2005 al 2010 è stato del 30% circa e l'incremento del numero di colli, per lo stesso periodo, è stato dell' 85% circa (Fig.3.30bis).

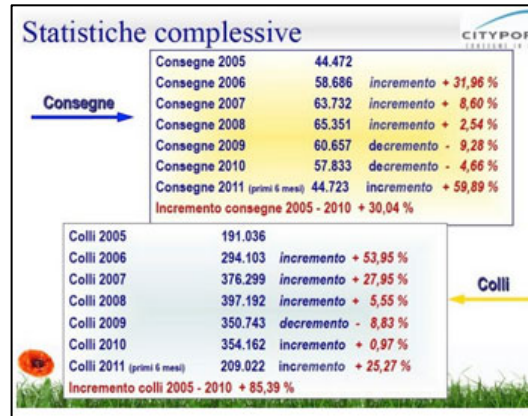


Fig.3.20bis – Statistiche servizio CityPorto

Il Ministero dell’Ambiente ha inoltre approvato il progetto denominato “Completamento e integrazione dell’esperienza nazionale di City Logistics avviata a Padova nel 2004”, che rappresenta la “Fase 2” del servizio CityPorto focalizzato sul settore delle merci a temperatura controllata. In particolare, il valore complessivo del progetto è pari a 751.000 Euro, finanziato circa al 50% da parte del Ministero dell’Ambiente. Il Comune di Padova è l’ente capofila e i partner sono: Interporto di Padova Spa (ideatore del progetto e gestore del servizio CityPorto), Aedp Logistica srl (Società di informatica del Gruppo Interporto), Gruppo CLas (Università Bocconi) e Madruzzo & Associati.

La seconda fase del progetto, avviato a Settembre del 2008, prevede la realizzazione di una struttura a temperatura controllata all’interno del magazzino di CityPorto per la raccolta e la distribuzione della merce del settore “food”. E’ inoltre previsto l’acquisto di veicoli a basso impatto ambientali dedicati al trasporto a temperatura controllata.

Cityporto Padova rappresenta, dunque, un esempio leader a livello nazionale nel settore della logistica urbana sostenibile, affermato inoltre come modello riproponibile in altre città italiane. Infatti, l’Interporto di Padova ha stipulato una serie di accordi con altre amministrazioni locali (Modena, Como, Aosta, Rovigo) per l’implementazione del servizio di consegna delle merci.

Si riporta di seguito una scheda riassuntiva del servizio CITYPORTO.

CITYPORTO - PADOVA	
Soggetto Attuatore	Interporto di Padova SpA in base ad Accordo di Programma stipulato con Comune, Provincia, APS (azienda comunale multi servizi)
Modello	UDC (Interporto) Veicoli a metano/elettrici Restrizioni al traffico (ZTL) Finestre orarie per scarico/carico
Veicoli	6 veicoli a metano (2 refrigerati)
Periodo	Dal 2004
Consegne effettuate	Oltre 6000 al mese (primi 4 mesi del 2008)
Normativa premiante	I veicoli Cityporto (di proprietà della holding pubblica APS) circolano senza finestre orarie e nelle corsie preferenziali
Operatori coinvolti	33 operatori logistici in conto terzi e 2 in conto proprio affidano la merce a CITYPORTO

(Fonte: City Logistics EXPO 2008)

L'iniziativa VELOCE di Vicenza

Nel 2005, il Comune di Vicenza, nell'ambito di un programma volto alla salvaguardia del patrimonio paesaggistico e culturale del centro storico, ha avviato un progetto di riorganizzazione della distribuzione delle merci nella Zona a Traffico Limitato, localizzata nel centro cittadino, simile a quello realizzato a Padova.

Il Progetto, denominato VELOCE "Vicenza Eco-LOGistics CEntre", ha come obiettivo la distribuzione ecologica delle merci nel centro città a partire da un Centro di Distribuzione Urbano, localizzato nell'area del Mercato Ortofrutticolo, nel comprensorio dei Magazzini Generali e della Dogana nei pressi dell'area industriale.

Il Centro Eco-Logistico è localizzato in posizione strategica, nelle vicinanze dell'asse autostradale Milano-Venezia, e a circa 1.5 km dal centro storico. Il progetto è gestito dalla società mista pubblico-privata "Vicenza Logistics City Centre S.r.l.", controllata al 55% dal Comune e partecipata dalle principali Associazioni di Categoria (Associazione degli Industriali, Apindustria, Associazione degli Artigiani, C.N.A. e Associazione dei Commercianti). L'area interessata dal progetto coincide con la ZTL e

si estende su di un'area pari a 0,37 kmq. Gli obiettivi che il Comune di Vicenza intende perseguire attraverso il progetto VELOCE sono i seguenti:

- riduzione del numero di veicoli commerciali nel centro storico;
- miglioramento della circolazione pedonale, veicolare e della sosta;
- efficienza del sistema distributivo complessivo;
- riduzione dell'inquinamento atmosferico ed acustico.

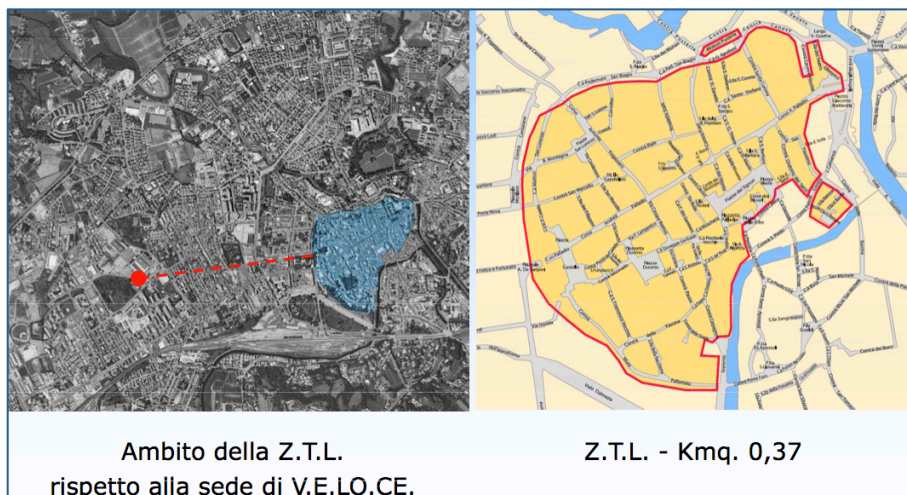


Fig.3.21 – Localizzazione del CDU e della ZTL di Vicenza

L'area del Centro Eco-logistico VELOCE comprende un magazzino coperto (270.000 mq) per lo stoccaggio temporaneo dei colli entranti in città, dove gli operatori che aderiscono all'iniziativa recapitano la merce che sarà poi distribuita con veicoli elettrici agli esercizi commerciali della ZTL. Il Centro Eco-Logistico dispone di tecnologie informatiche avanzate per il monitoraggio e la gestione delle attività che vanno dalla presa in consegna della merce alla consegna finale. In particolare, tale sistema consente ai corrieri di trasmettere i dati delle proprie spedizioni per via telematica e di verificare lo stato delle consegne via web.

A supporto dell'iniziativa, il Comune di Vicenza ha emesso l'Ordinanza n.35219 del 15 Gennaio 2005 in merito alla "circolazione dei mezzi per le operazioni di carico e scarico merci in Zona a Traffico Pedonale e nelle aree pedonali". L'ultima ordinanza del 29 Giugno 2006, ammette "la circolazione nella ZTL e nelle relative aree pedonali, comprese le operazioni di carico e scarico delle merci, con sosta ridotta al tempo strettamente indispensabile alla loro effettuazione, dalle ore 07,00 alle ore 20,00 di tutti i giorni, ai soli veicoli a ridotto impatto ambientale (alimentazione GPL, metano

ed elettrici) in possesso della Società Vicenza Logistica S.r.l. identificabili dalla scritta “VELOCE Vicenza Eco-Logistics Centre”, apposta sulla carrozzeria del veicolo e tramite la documentazione del possesso dei veicoli”. Tutti gli altri veicoli non possono accedere nella ZTL, ad eccezione dei mezzi dedicati al trasporto di prodotti alimentari freschi e deperibili, medicinali e materiali edili; l’ordinanza esclude, inoltre, i mezzi dei corrieri espresso e degli uffici postali, se il servizio viene effettuato con veicoli a basso impatto ambientale. Infine, i veicoli contrassegnati dalla scritta VELOCE possono usufruire delle corsie preferenziali, come accade anche a Padova. Il parco veicolare del servizio VELOCE è costituito da 6 unità.



Fig.3.22 - La flotta veicolare VELOCE

Nel corso del primo anno di esercizio (2005):

- sono state effettuate 23.000 consegne;
- le società di autotrasporto che hanno aderito all’iniziativa sono state 14;
- il collettame movimentato è stato pari a 695 tonnellate;
- i colli trasportati sono stati 67.000 (in media ogni consegna ha coinvolto circa 3 colli di circa 31 kg totali).

Si riporta di seguito una scheda riassuntiva del servizio VELOCE.

VELOCE - VICENZA	
Soggetto Attuatore	Vicenza Logistic City Centre srl, società di proprietà del Comune (55%) e di operatori locali di trasporto merci e associazioni di categoria (45%)
Modello	UDC Veicoli elettrici Restrizioni al traffico TOTALI nella ZTL, anche per LEV e ZEV (deroga per freschi)
Veicoli	6 veicoli elettrici
Periodo	Da gennaio 2005
Consegne effettuate	Circa 5000 al mese
Normativa premiante	I veicoli VELOCE (identificati dal logo) possono entrare nella ZTL e usare le corsie preferenziali
Operatori coinvolti	14 operatori logistici in conto terzi affidano la merce a VELOCE

(Fonte: City Logistics EXPO 2008).

c) Regione Toscana

Si riportano di seguito i casi di Siena, che rappresenta la prima città toscana che ha implementato, a partire dagli anni 90, strategie per la distribuzione urbana delle merci, e di Lucca.

Le iniziative di Siena

Nel 1999, il Comune di Siena ha iniziato ad elaborare il progetto ALIFE, finanziato dal Ministero dell'Ambiente, per la raccolta e la distribuzione delle merci all'interno della città. Il progetto prevedeva più fasi, tra cui la realizzazione di due piattaforme distributive dotate di veicoli ecocompatibili e la realizzazione di un sistema di controllo automatizzato degli accessi.

Nel 2002, Siena Parcheggi, ente coordinatore del progetto europeo eDRUL (eCommerce Enabled Demand Responsive Urban Logistics), ha sviluppato e realizzato una piattaforma tecnologica dedicata ai processi e ai servizi di distribuzione delle merci in ambito urbano. Uno dei risultati principali del progetto ha riguardato lo studio, la definizione e lo sviluppo di un modello di Agenzia della Logistica Urbana (approccio seguito anche da Lucca). In particolare, la sperimentazione ha riguardato l'implementazione del servizio pilota "Park&Ride" dedicato ai clienti di alcuni negozi localizzati nella ZTL di Siena che hanno aderito all'iniziativa; i cittadini e i turisti che non hanno accesso all'area regolamentata possono acquistare le merci che saranno poi trasportate ai parcheggi di Siena Parcheggi localizzati nelle aree esterne. La sperimentazione non ha avuto seguito dopo la fine del progetto.

Attualmente nella città di Siena, per circolare e/o sostare nella ZTL del centro storico è possibile ottenere permessi di accesso gratuito o pagamento. E' inoltre, tuttora in funzione, per il centro storico, un sistema automatico di controllo degli accessi.

Nel centro storico della città sono presenti oltre 750 esercizi commerciali al dettaglio; il quantitativo di merci consegnate al giorno è pari a circa 150-160 tonnellate, di cui il 60% è relativo al settore alimentare. Nella zona centrale circolano circa 450 veicoli merci al giorno.

A partire dagli anni 90, è attivo un servizio di distribuzione delle merci realizzato dalla Cooperativa Taxi Merci (COTAS Logistica Srl) a partire da un Transit Point di 500 mq. Mediamente vengono effettuate 10/12 viaggi ottimizzati in termini di carico e di percorso al giorno.

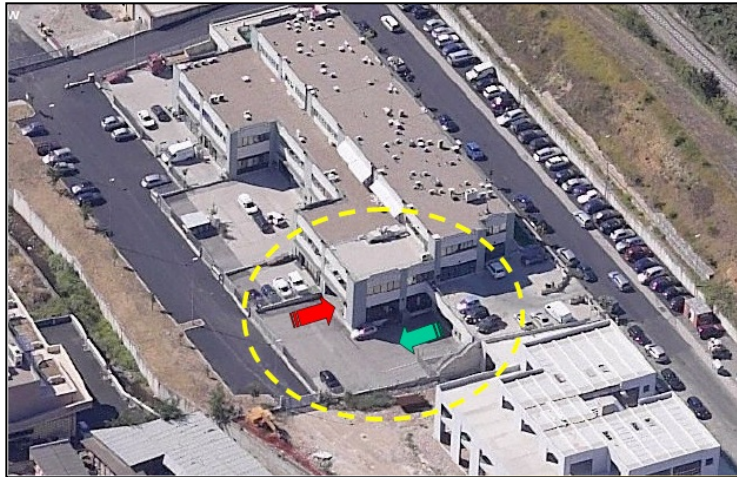


Fig. 3.23 - La base logistica COTAS

L'iniziativa LIFE-CEDM di Lucca

A Lucca negli anni 2002-2004, nell'ambito del progetto europeo MEROPE, è stato sviluppato uno studio sulla distribuzione delle merci nel centro storico, al fine di migliorare il complessivo funzionamento del sistema dei trasporti. L'amministrazione comunale ha sviluppato un servizio di distribuzione delle merci nel centro storico, supportato sia a livello europeo, con il Progetto CEDM (Centre for Eco-Friendly City Distribution) nell'ambito del Programma LIFE, che a livello regionale e nazionale con il contributo della Regione Toscana e del Ministero dell'Ambiente.

Il progetto CEDM è stato avviato nel 2005 e si è concluso nel 2008; il finanziamento complessivo del progetto è pari a 711.602,00. Euro. Si tratta di un Progetto Pilota con obiettivo di realizzare e sperimentare uno schema di logistica urbana basato sull'utilizzo di una piattaforma logistica ecologica, dotata di veicoli eco-compatibili, e di una piattaforma tecnologica a servizio della distribuzione nel centro storico di Lucca. La piattaforma CEDM è localizzata a circa 1 km di distanza dal centro città e dal casello autostradale (A11). La piattaforma tecnologica, ospitata presso la piattaforma logistica, è stata progettata per la gestione dei servizi delle attività del CDU. La piattaforma si avvale di componenti hardware e software e tecnologie di comunicazione che consentono di gestire:

- servizi di interazione tra i clienti e il sistema di distribuzione delle merci;
- allocazione dei carichi ai mezzi disponibili;
- routing dei veicoli;
- Tracking and Tracing della merce.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione sono stati buoni, in termini di riduzione dei veicoli merci circolanti nel centro storico; il Comune, visti i vantaggi ottenuti dalla sperimentazione, ha optato per avviare un servizio definitivo.



Fig.3.24 - CEDM Lucca

Si riporta di seguito una scheda riassuntiva del servizio CEDM.

LIFE-CEDM - LUCCA	
Soggetto Attuatore	Comune
Modello	UDC (piattaforma periurbana, in corso di costruzione) Veicoli elettrici Piattaforma ICT per la gestione dei percorsi e la tracciabilità delle merci Istituzione della ZTL e di una progressiva restrizione degli accessi ai veicoli merci non eco-compatibili
Veicoli	1 Piaggio Porter elettrificato (1.6 t) 1 Isuzu elettrificato (3.5 t)
Periodo	Dal 2007
Consegne effettuate	Media 110 al giorno (2008)
Normativa premiante	In prospettiva istituzione di un regime di accesso, carico/scarico nella ZTL riservato a: -veicoli elettrici - veicoli con tasso di riempimento > 60%
Operatori coinvolti	Oltre 30 clienti (corrieri e altri operatori logistici)

(Fonte: City Logistics EXPO 2008).

d) Regione Liguria (Genova)

L'obiettivo del Progetto M.E.R.Ci. (Mobilità Ecologica Risorsa per la Città), avviato dal Comune di Genova nel 2004 e finanziato dal Ministero dell'Ambiente, è stato quello di verificare la possibilità di razionalizzare la distribuzione delle merci nel centro storico, riducendo la congestione e dimostrando la possibilità tecnico-economica di utilizzare mezzi a basso impatto ambientale.

La sperimentazione è tecnicamente riuscita:

- è stata dimostrata la possibilità di utilizzare mezzi a basso o nullo impatto per la distribuzione delle merci in aree sensibili;
- è stata dimostrata l'opportunità di utilizzare un "hub" centralizzato senza penalizzare gli operatori;
- è stato messo a punto un modello di analisi ed una metodologia di approccio al problema che può essere estesa ad altri casi.

Il progetto ha visto l'attivazione di un centro di raccolta delle merci "hub", presso il quale i trasportatori consegnano i propri carichi, e la sperimentazione di un sistema di distribuzione a ridotto impatto ambientale, presso i singoli esercizi dislocati nel centro storico, basato su mezzi di piccole dimensioni eco-compatibili.

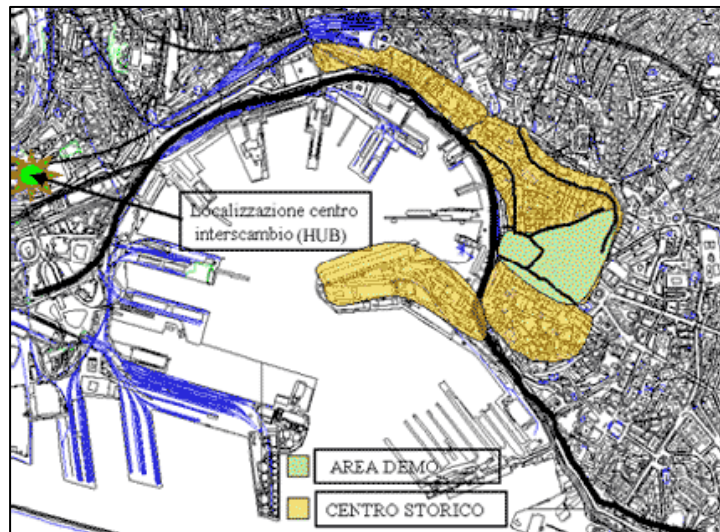


Fig.3.25 – Centro storico di Genova

Inizialmente, l'area di applicazione del progetto era limitata all'area demo (Fig.3.25) che comprendeva 50 strade urbane (17% dell'intero centro città) e 328 esercizi

commerciali (per la maggior parte appartenenti al settore dell'abbigliamento). In seguito, intorno alla fine del 2004, l'iniziativa è stata estesa all'intero centro storico. Il centro di interscambio merci (hub) distante 2,3 km dal casello autostradale e 5 km dalla città, costituisce la struttura base del progetto, una piattaforma dove le merci destinate al centro storico vengono raccolte e distribuite tramite veicoli a basso impatto ambientale.

La gestione della raccolta e della distribuzione merci, delle richieste e degli ordini di consegna da parte dei negozianti, avviene tramite l'uso di tecnologie telematiche avanzate e di un software di ottimizzazione del carico e dei percorsi. Un sito WEB dedicato, con diversi livelli di informazione, fruibile dai negozianti e dai corrieri, è interfacciato con un database gestionale, in cui sono inseriti in tempo reale i dati di magazzino dei colli. Il sistema consente, quindi, un aggiornamento tramite WEB dei tempi relativi alla consegna, reso possibile dalle interfacce dei palmari, che in tempo reale tramite SMS, forniscono i dati relativi alla tracciatura dei colli. Grazie all'utilizzo del GPS, si possono tracciare e ottimizzare i percorsi in funzione delle consegne e, grazie ai palmari in dotazione agli autisti, interagire in real-time. Dopo un anno dall'inizio della sperimentazione, il bilancio è stato più che soddisfacente: il numero dei corrieri e dei punti vendita che hanno aderito al progetto è cresciuto progressivamente; il 40-45% dei colli consegnati nel centro storico sono passati dalla piattaforma; il tasso di carico dei mezzi di distribuzione ha raggiunto quasi il 100%.

3.8. Le esperienze di logistica urbana in alcune città europee

Nell'ambito del Piano d'azione sulla mobilità urbana dell'Unione Europea, è stato realizzato un sito web (<http://www.lowemissionzones.eu/>), che raccoglie informazioni su tutte le città europee in cui sono presenti limitazioni al traffico.

Le Low Emission Zones (LEZ - Zone a basse emissioni) sono aree delle città in cui esistono restrizioni all'ingresso per i veicoli più inquinanti, permanenti o temporanee. Tali restrizioni possono essere divieti di circolazione oppure l'istituzione di diversificate forme di pedaggio che autorizzano la circolazione nelle LEZ.

A livello europeo è quindi stata costituita la rete LEEZEN (Low Emission and Environment Zones in Europe Network), che ha l'obiettivo di riunire le amministrazioni interessate per risolvere problematiche comuni e diffondere le informazioni sulle restrizioni esistenti.

Con riferimento alla logistica urbana, nella realtà europea, alcune città tra cui Londra, Parigi e Copenaghen, hanno scelto di intervenire con politiche normative e gestionali, altre, tra cui molte città tedesche ed olandesi, hanno invece optato per l'istituzione di piattaforme di distribuzione. Si riportano di seguito alcune delle esperienze ritenute rilevanti.

Il modello tedesco

Il modello tedesco è caratterizzato dall'esistenza di una cooperativa volontaria di trasportatori che gestisce i Centri di Distribuzione Urbana (CDU). Le aziende che non fanno parte della cooperativa possono usufruire del CDU e, tutte le merci depositate sono distribuite al cliente finale da un unico operatore, riconoscibile mediante il logo del CDU. Le autorità municipali contribuiscono mediante semplici sovvenzioni o partecipazioni al capitale della piattaforma distributiva. Tale modello è stato adottato nelle città di Brema e Friburgo.

Brema

Per quanto riguarda Brema il primo progetto relativo alla creazione di un centro per la consegna urbana delle merci (City Logistik) nasce nel 1991. Le politiche previste nell'ambito del progetto riguardavano l'utilizzo di veicoli eco-compatibili e lo sviluppo di applicazioni telematiche per l'ottimizzazione dei flussi logistici.

I risultati ottenuti riguardano un aumento del 28% del tasso medio di carico dei veicoli ed una riduzione di circa il 13% dei viaggi giornalieri (dati relativi al 2007, fonte: EFLLC).

Inoltre, la città di Brema ha sperimentato l'utilizzo un Environmental Loading Point (ELP), zone di carico e scarico localizzate nei pressi di un'area pedonalizzata localizzata nel centro cittadino. Tali zone sono riservate alla sosta dei veicoli a basse emissioni inquinanti, a partire dalle quali gli operatori autorizzati trasportano a piedi i colli agli esercizi commerciali.

Friburgo

Per quanto riguarda Friburgo, il progetto di una piattaforma di distribuzione urbana (Freiburger City Logistik) nasce nel 1993 ad opera di una cooperativa privata di 12 trasportatori (oggi 14) divisi in 4 gruppi in base alla zona geografica trattata. Ogni gruppo si gestisce autonomamente e le attività di distribuzione possono essere svolte a turno da un'azienda del gruppo oppure da un operatore esterno. I risultati ottenuti riguardano un aumento del tasso medio di riempimento del 30%, una diminuzione mensile del 33% dei viaggi e una riduzione dei chilometri per viaggio del 50%.

Dresda

A Dresda il tram viene utilizzato, a partire dal 2001, per trasportare componenti automobilistiche da un centro logistico ad un impianto di produzione di automobili. L'iniziativa CarGo Tram è stata promossa dalla Volkswagen e dall'azienda di autotrasporti di Dresda per consentire i collegamenti tra una nuova fabbrica localizzata nelle vicinanze del centro urbano e un centro di distribuzione; il centro di distribuzione è stato integrato con il centro di trasporto merci di Dresda che dista circa 4 km dall'impianto di produzione. La soluzione attuata non comporta interferenze con il trasporto dei passeggeri. Gli orari dei tram, inoltre, sono coordinati con quelli del trasporto passeggeri; in particolare, il tram passa ogni 40 minuti e impiega circa 25 minuti per collegare il centro logistico e la fabbrica su una linea di 4.5 km. I due tram utilizzati hanno lunghezza 60 metri e possono trasportare fino a 60 tonnellate di merci. Inoltre, ogni viaggio del CarGoTram evita il passaggio di tre autocarri attraverso il centro e il conseguente inquinamento atmosferico ed acustico. Il progetto CarGoTram fa parte del "piano e azione per mantenere l'aria pulita" per Dresda che promuove l'utilizzo dei tram per il trasporto delle merci per il perseguimento di obiettivi di qualità ambientale e sviluppo sostenibile.



Fig.3.25 – CarGoTram Dresda

Berlino

Nell'ambito del progetto europeo CityLog, la città di Berlino ha introdotto il sistema BentoBOX, un innovativo centro logistico progettato per ridurre il numero di viaggi, i costi, i tempi, le emissioni inquinanti e il rumore causati dalle consegne urbane delle merci. Il sistema promuove l'utilizzo di unità di carico innovative gestite da più operatori; in particolare, BentoBox è formato da una stazione modulare di imballaggio con carrelli rimuovibili che funziona come un centro urbano, organizzando una distribuzione più efficiente a scala ridotta. Si tratta di un centro di trasferimento e consolidamento dei carichi: le consegne che arrivano, come pure le consegne che partono dai vari quartieri della città, vengono raccolte dal Bentobox e riconfezionate prima della consegna che potrà essere effettuata con veicoli di dimensioni ridotte e a basso impatto ambientale, come ad esempio biciclette o tricicli. A Berlino è, infatti, attivo il servizio Cargo Cruiser che prevede l'utilizzo di tricicli elettrici per il trasporto delle merci nel centro città.



Fig.3.26 – Il sistema BentoBox a Berlino

Il modello olandese

In modello olandese prevede che le municipalità non si limitino ad incentivare la creazione di piattaforme urbane, ma intervengano anche con provvedimenti normativi in materia di consegna delle merci. Tra queste, il rilascio ai trasportatori, dotati di particolari requisiti, di una licenza di distribuzione urbana che permetta loro di disporre di più ampie fasce orarie di circolazione. Il modello in questione è stato applicato nella città di Utrecht; le licenze vengono rilasciate alle aziende che garantiscono un minimo di 100 spedizioni al giorno e 25 punti di consegna serviti ad ogni uscita. I veicoli utilizzati devono essere dotati di opportune tecnologie ICT.

Utrecht

Nel 2003 è stato presentato il “Piano di distribuzione per il centro storico” della città, vista la presenza di numerose strutture sensibili (grandi canali e ponti antichi) da salvaguardare. Nel piano sono state sviluppate le seguenti soluzioni: itinerari del traffico di distribuzione nel e dal centro storico; nuove localizzazioni di carico e scarico per i veicoli di trasporto merci; nuove regole per i centri di distribuzione urbana; campagna di sensibilizzazione per consegne intelligenti, rivolta principalmente alle attività commerciali del centro.

Nel 2008, gli effetti delle misure implementate sono state quantificate; in particolare, la soddisfazione complessiva dell’accessibilità al centro ai fini della distribuzione è aumentata significativamente: nel 2003 il 45% degli autisti dei mezzi di distribuzione valutava l’accessibilità come “buona”, nel 2008 questo valore è salito al 90%.

Nel 2011, al fine di migliorare ulteriormente i processi di distribuzione, anche attraverso il coinvolgimento delle aziende e la cooperazione tra le stesse, è stato adottato il Piano di azione sul trasporto merci. La città ha inoltre ricevuto il premio CIVITAS 2011; le principali iniziative premiate riguardano l’introduzione di barche elettriche per la distribuzione e l’introduzione del Cargohopper, un trenino su gomma dedicato al trasporto delle merci. A Utrecht, inoltre, esistono hotel e ristoranti, localizzati proprio lungo il sistema di canali della città che vengono riforniti dal cosiddetto “beer boat”, un sistema di distribuzione basato su un barcone in grado di consegnare bevande e prodotti per il catering (a temperatura ambiente, refrigerati e congelati) da un centro di distribuzione al centro città.

Amsterdam

Il progetto prevede una Zona a Traffico Limitato nella parte centrale della città in cui è interdetto l’ingresso ai mezzi pesanti con portata totale a terra superiore a 7,5 tonnellate e lunghezza maggiore di 9 metri; tali veicoli per circolare nella città devono

essere carichi almeno all'80%. In una prima fase di attuazione del provvedimento, la rottura di carico delle merci dirette nel centro della città veniva effettuata in centri di logistici localizzati in periferia, garantendo poi la tratta finale con veicoli Euro 2 e 3. Questa soluzione è stata denominata "filter system". E' stato inoltre previsto di far transitare i mezzi pesanti in piattaforme di carico/scarico, per poi utilizzare mezzi a basso impatto ambientale, quali veicoli di dimensioni ridotte, biciclette appositamente equipaggiate per la consegna di piccoli colli e unità marittime di trasporto posizionate sui canali. In questo modo sono stati progressivamente esclusi i mezzi pesanti dalla circolazione nella parte centrale della città e allo stesso tempo sono state razionalizzate le capacità di carico dei veicoli, attraverso la compattazione delle consegne divisa per aree di destinazione. L'intervento riguarda tutti gli esercizi commerciali ubicati all'interno della Zona a Traffico Limitato.



Fig.3.27 - Low Emission Zone città di Amsterdam

Groningen

La città di Groningen, a partire dal 1998, per porre rimedio al problema del trasporto delle merci nelle aree urbane ha implementato prevalentemente misure riguardanti la restrizione degli accessi al centro cittadino secondo fasce orarie prestabilite. Inoltre, tra le misure aggiuntive vi è quella di consentire ai veicoli con capacità inferiore alle 3.5 tonnellate di utilizzare le corsie preferenziali dedicate agli autobus durante orari prefissati. L'accesso dei veicoli pesanti dedicati alla distribuzione delle merci è consentito dalle ore 5 – 11 del mattino e le 6 – 8 di sera.

Londra

A Londra, il London Lorry Control Scheme si applica a tutta la rete stradale della città; tale schema prevede che tutti i veicoli merci sopra le 12 tonnellate debbano utilizzare solo alcune specifiche strade tra le ore 21.00 e le 7.00 dal lunedì al venerdì e dalle 13.00 del sabato alle 7.00 del lunedì successivo. Gli autisti possono richiedere, in caso di necessità, un permesso all'amministrazione competente per strade alternative; tale concessione spesso comporta l'obbligo di utilizzare percorsi meno diretti per evitare il passaggio nelle vicinanze delle abitazioni, con il conseguente aumento delle percorrenze chilometriche e delle relative emissioni.

A Londra, inoltre, è stato implementato, nel 2005, un centro di raccolta merci per l'edilizia, il Construction Consolidation Centre che mira alla riduzione del numero di viaggi; dopo due anni di sperimentazione, realizzata da una partnership pubblico-privata, il centro è attualmente gestito con successo privatamente senza alcun finanziamento da parte del settore pubblico, mostrando risultati positivi. In particolare, è stata ottenuta una riduzione dei viaggi del 68% e una riduzione delle emissioni di CO₂ del 75%.

Inoltre, nel centro della città è stato sviluppato un innovativo sistema logistico basato su centri di micro-accumulo nel centro storico, utilizzati come punto di partenza per biciclette e furgoni elettrici dedicati al trasporto dell'ultimo miglio. Tale sistema non è applicabile al trasporto dei pallet ma funziona bene per i pacchi, anche se chiaramente comporta delle limitazioni legate alle dimensioni e al peso di tali colli.

Copenaghen

Il Comune di Copenaghen nel 1996 ha promosso un progetto con l'obiettivo di incrementare l'uso della capacità di carico dei veicoli che transitano nel centro storico, che occupa una superficie di circa 1 km². I dati rilevati (sempre al 1996) mettevano in evidenza come circa 6.000 viaggi/giorno, per un totale di circa 3.500 veicoli tra camion e autocarri, avessero come origine o destinazione l'area centrale di Copenaghen; di questi, il 55% circa sfruttava meno del 20% della capacità di carico (solo il 15% superava il 60% della capacità di carico).

Nella fase sperimentale dell'iniziativa, durata un anno e mezzo (1998-2000), è stata formata una joint-venture tra due società la Vej&Park che si occupava della pianificazione e la Parkering København che si occupava della gestione.

Alle società di trasporto che intendevano partecipare al progetto è stato chiesto di firmare un accordo volontario che prevedeva i seguenti impegni:

- utilizzare mediamente il 60% della capacità di carico dei singoli mezzi;

- registrare tutti i veicoli di portata compresa tra 2 e 18 tonnellate con origine o destinazione interna al centro della città;
- usare veicoli con motori non più vecchi di 8 anni;
- inviare trimestralmente, al comune, un rapporto sull'uso della capacità dei propri mezzi.

Al fine di incentivare l'adesione al progetto delle società di trasporto, sono state promosse alcune misure parallele:

- individuazione, nel centro storico, di 10 aree di carico e scarico di merci riservate ai partecipanti dell'iniziativa (con attribuzione di una multa a tutti quelli che non possiedono l'adesivo dell'iniziativa sul parabrezza);
- possibilità di rendere visibile la propria adesione all'iniziativa;
- segnalazione sul sito web di tutte le aziende partecipanti all'iniziativa;
- possibilità di partecipare alla successiva definizione di uno schema obbligatorio (non più volontario).

I risultati della fase di sperimentazione (1998/2000) hanno fatto registrare l'adesione di 80 società per un totale di 300 veicoli assegnati all'iniziativa, il 64% dei quali con portate superiori a 3,5 tonnellate (di cui il 78% circa con portate comprese tra 12 e 18 ton), il 34% con portate comprese tra 2 e 3,5 tonnellate e il restante 2% con portate inferiori a 2 tonnellate. Inoltre, durante la fase sperimentale, la maggior parte dei veicoli ha utilizzato più del 60% della capacità di carico.

Il Comune ha inoltre avviato una sperimentazione nella quale è stato previsto che, dal febbraio 2002 a gennaio 2004, tutti i veicoli con portata superiore a 2.5 tonnellate dovessero acquistare un certificato per entrare nell'area medioevale della città.

Per studiare lo stato di avanzamento del progetto il Comune si è basato su approfonditi censimenti del traffico, sulle informazioni delle ditte di trasporto (domande di certificati), e sulle interviste ai residenti e ai cittadini che entrano nell'area. Tra i principali risultati del progetto si è riscontrato che il numero di veicoli con portata compresa tra 2.5 e 3.5 tonnellate è cresciuto nel periodo di esecuzione del progetto, mentre il numero dei veicoli con portata superiore a 3.5 tonnellate si è ridotto (Fig. 3.28).

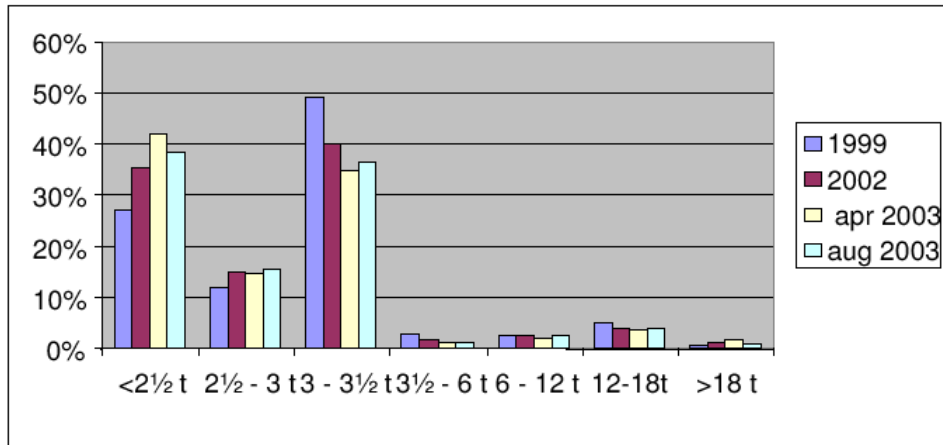


Fig.3.28 - Distribuzione delle portate dei veicoli registrati nel centro storico

Parigi

Nel mese di Luglio del 2011 è stato presentato, dall’azienda Geodis, un programma di logistica verde per la distribuzione urbana delle merci, denominato Distripolis con durata quadriennale. L’obiettivo dell’azienda è di implementare il progetto nelle principali città francesi e in alcune capitali europee al fine di creare un network europeo multimodale per rendere il trasporto delle merci dell’ultimo miglio più efficiente ed ecocompatibile. Il sistema distributivo, finalizzato alla riduzione dell’inquinamento atmosferico ed acustico, è basato su nodi hub e su piattaforme logistiche distribuite in varie zone della città, denominate “Basi Blu”, dalle quali partono veicoli a basso impatto ambientale per effettuare le consegne ai clienti finali localizzati in ciascuna specifica area di Parigi. Il sistema Distripolis è utilizzato per piccoli colli e pallet fino ad un peso massimo di 200 chilogrammi e le prime due aree servite sono quella di Bercy e quella della stazione di Montparnasse. Il progetto è attualmente in fase di ampliamento. Il sistema si basa su veicoli a basso impatto ambientale, ossia diesel Euro 5 ed Euro 6 e ibridi diesel-elettrici, ma anche automezzi elettrici di piccole dimensioni. Nel 2015, la flotta urbana comprenderà almeno 75 automezzi elettrici; sempre entro il 2015, la società conta di ridurre l'85% delle attuali emissioni di CO2, ossia 1.747 milioni di tonnellate.



Fig.3.29 – Veicoli del servizio Distripolis a Parigi

Inoltre, l'esperienza della catena Monoprix a Parigi è molto significativa nell'ambito degli interventi di logistica urbana che prevedono l'utilizzo della ferrovia. In particolare, i carri ferroviari vengono caricati la sera e sono trasferiti da un treno shuttle al terminal Bercy vicino la Gare de Lyon. Il mattino successivo i carichi sono consegnati ai punti vendita mediante veicoli a gas naturale; la merce è aggregata in pallet e il servizio riguarda prevalentemente il settore dell'abbigliamento, dei prodotti di bellezza e delle bevande. E' stato dimostrato che tale schema, introdotto nel 2007 e attualmente attivo, produce effetti positivi riguardo la riduzione dell'inquinamento ambientale.

Infine, a Parigi, sono attualmente utilizzati dei tricicli elettrici a pedalata assistita "Cargocycles" della società "La Petite Reine" attiva anche Lione, Ginevra, Rouen, Dijon.

Göteborg

A Göteborg, in Svezia, è stata introdotta nel 1997 una zona a basse emissioni (Low Emissions Zones, LEZ) per migliorare la qualità dell'aria. Nel 2007, la LEZ è stata estesa ed è stato imposto che tutti i veicoli merci pesanti (oltre le 3.5 tonnellate di peso totale a terra) per poter entrare fossero almeno Euro 4. Con questo provvedimento l'amministrazione ha stimato di ridurre il PM₁₀ di 1 tonnellata e gli NO_x di 40 tonnellate ogni anno tra il 2007 e il 2013.

Zurigo

A Zurigo, a partire dal 2003, è attivo un servizio di smaltimento per rifiuti ingombranti denominato Cargotram. Nel 2006, è stato introdotto l'E-Tram per lo smaltimento di rifiuti elettrici ed elettronici. Gli utenti possono trasportare la merce da smaltire sul tram, recandosi ad una delle otto fermate del Cargotram dove depositarla senza costi aggiuntivi. In 7 mesi, a partire dall'attivazione del servizio, sono state raccolte 170 tonnellate di rifiuti normali e 45 tonnellate di acciaio.



Fig.3.29 – CargoTram Zurigo

Barcellona e Madrid

Nel 2003, il comune di Barcellona ha avviato una sperimentazione con la catena nazionale di supermercati Mercadona per testare la fattibilità di consegne notturne silenziose nel centro città. In particolare, l'obiettivo principale era dimostrare la fattibilità di tali consegne sia in termini di impatto sociale (cioè evitare di disturbare i residenti e ridurre il numero di consegne durante il giorno) che dal punto di vista dell'operatore (ritorno sugli investimenti per adattare il veicolo e per i turni notturni dei dipendenti).

La sperimentazione, attiva tra le ore 23.00 e mezzanotte e tra le 5.00 e le 6.00 del mattino, prevede l'utilizzo di autocarri riadattati e speciali procedure di scarico al fine di ottenere livelli di rumore ridotti. E' stato dimostrato, misurando i livelli di rumore, che le consegne notturne sono possibili e che si possono sostituire fino a 7 consegne giornaliere. Il programma di "scarico silenzioso notturno" è stato diffuso a scala nazionale; alla fine del 2010 era implementato in 407 negozi (31% del totale) situati in 35 province differenti. Il programma ha visto minori consumi di carburante per

tonnellata trasportata, con una riduzione complessiva di 70.000 tonnellate di CO₂ nel 2010.

Ad Aprile del 2013 Tnt Express Espana ha introdotto l'utilizzo di due tricicli elettrici a pedalata assistita per la distribuzione della merce nelle zone centrali di Madrid. Tnt utilizza questa tipologia di veicoli anche a Barcellona e in diverse città europee, quali: Ginevra, Londra, Parigi, Bruxelles. Tnt è attualmente impegnata, attraverso una serie di progetti e sperimentazioni, nel campo della mobilità sostenibile nei centri urbani e della "logistica dell'ultimo miglio". In Italia, l'introduzione di tricicli a pedalata assistita riguarda le città di Torino e Milano.



Fig.3.30 – CargoTram Zurigo

Capitolo 4 – Modelli di Ottimizzazione su Rete per la logistica urbana

Il capitolo 4 è incentrato sui problemi decisionali di ottimizzazione delle catene logistiche con riferimento ai modelli e metodi di Ricerca Operativa, appartenenti al settore dell'Ottimizzazione su Rete.

Nell'ambito della ricerca sono stati oggetto di studio alcuni modelli di ottimizzazione per l'implementazione di una strategia di Logistica Urbana basata sulla localizzazione di piattaforme logistiche per la distribuzione delle merci. In questo ambito, il problema di localizzazione consiste nell'individuazione della posizione ottima di nodi logistici, luoghi in cui avviene la rottura del carico, con passaggio della merce da veicoli a capacità maggiore a veicoli a minore capacità per la distribuzione della merce ai clienti finali. Al problema di localizzazione si aggiunge, inoltre, quello di individuare il percorso ottimo dei veicoli sulla rete stradale dalle piattaforme logistiche ai punti di domanda localizzati nelle città (problema di Routing).

Nel presente lavoro, oltre ai problemi di localizzazione e di routing classici, sono stati oggetto di studio dei modelli integrati che ottimizzano simultaneamente i due problemi della localizzazione dell'infrastruttura logistica e della determinazione del percorso ottimo dei veicoli che distribuiscono la merce. Inoltre, sono stati presentati dei modelli di location-routing innovativi, attualmente in fase di sperimentazione presso il gruppo di Ricerca Operativa del DIETI, dove l'approccio utilizzato per le decisioni di localizzazione è basato sull'intercettazione dei flussi nelle facility (Flow Intercepting Facility Location- Routing).

E' stato, infine, affrontato un caso di studio relativo al sistema distributivo nell'area urbana Napoli. In particolare, è stata descritta un'ipotesi di localizzazione di "transit point" e di instradamento dei veicoli per servire i clienti della rete di distribuzione al dettaglio. Il modello di Location-Routing è stato implementato mediante l'ausilio del software di ottimizzazione X-press-MP della FICO.

Nei seguenti paragrafi sono descritti alcuni modelli matematici:

- modelli di localizzazione (Location);
- modelli di ottimizzazione del percorso (Routing);
- modelli integrati di Location - Routing;
- modelli integrati Flow Intercepting Facility Location-Routing.

4.1. I problemi di ottimizzazione su rete

La Ricerca Operativa (Operations Research) è definita in letteratura come la disciplina costituita dall'insieme dei modelli e dei metodi quantitativi utilizzabili per lo sviluppo ed il supporto dei processi decisionali nella gestione di risorse limitate su impieghi alternativi.

Il processo di soluzione di un problema decisionale prende il nome di "processo decisionale"; tale processo parte dalla definizione e dall'analisi di un problema all'interno del sistema oggetto di studio e si compone di una sequenza articolata di fasi. La prima fase del processo è costituita dall'analisi del sistema, cioè dalla definizione delle sue componenti, dei parametri che lo caratterizzano e dalle relazioni tra essi. Nella fase successiva, si definisce il problema decisionale all'interno del sistema, cioè il problema (progetto, pianificazione, gestione) da risolvere. La terza fase del processo decisionale è incentrata sulla formulazione di un modello matematico per la simulazione del sistema, definendo le variabili decisionali del problema, cioè l'insieme dei parametri che esprimono l'oggetto della decisione. Inoltre, è necessario definire l'insieme dei dati del problema, cioè l'insieme di valori dei parametri noti che non costituiscono l'oggetto della decisione.

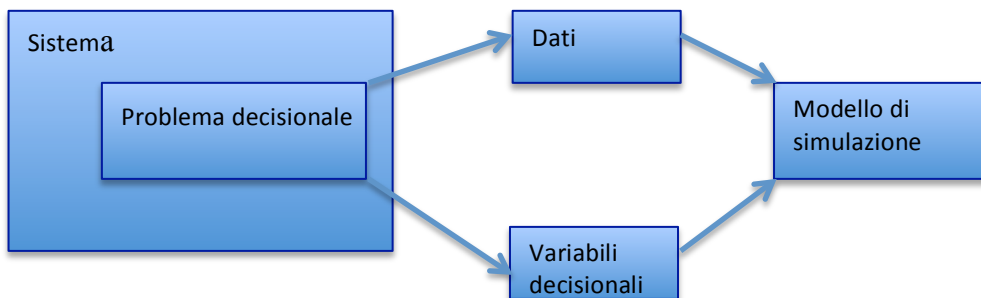


Fig. 4.1 - Costruzione di un modello di simulazione

A partire dall'insieme delle variabili e dei dati si definisce il criterio di prestazione del sistema da ottimizzare. La risoluzione del modello matematico consente la determinazione dei valori delle variabili decisionali in modo da rendere ottimo il valore della funzione obiettivo nel rispetto dei vincoli del modello. La soluzione del modello viene calcolata mediante un algoritmo, successione di operazioni finalizzate alla determinazione delle variabili decisionali del modello; gli algoritmi possono essere di tipo esatto o approssimato. Le dimensioni dei problemi reali, espresse dal

numero di vincoli e di variabili del modello, richiedono l'utilizzo di procedure di calcolo automatico per l'applicazione degli algoritmi.

In questo contesto, l'attenzione è incentrata sul settore dell'Ottimizzazione su Rete (discreta), che si applica a tutti quei sistemi che possono essere rappresentati mediante una rete e si basa sugli strumenti della Teoria dei Grafi.

In particolare, lo sviluppo delle comunicazioni (persone, materiali, merci, informazioni) ha reso molto importante lo studio dei sistemi su rete, cioè dei sistemi caratterizzati da punti nei quali si svolgono funzioni di tipo produttivo e da elementi di collegamento tra questi punti. Si è reso quindi necessario sviluppare strumenti di rappresentazione e di analisi dei sistemi complessi basati su struttura reticolare. La teoria che ha raccolto e sistematizzato tali strumenti è definita appunto Teoria dei Grafi.

Un grafo è una coppia di insiemi $G = (V, A)$, in cui V è un insieme di elementi v definiti vertici o nodi e A è un insieme di elementi a , definiti archi o spigoli; ciascun arco corrisponde ad una coppia di vertici (v_i, v_j) . Una rete è un grafo per il quale sono definite funzioni di tipo numerico, sui vertici e sugli archi. In particolare, una rete si può definire come una n-pla di insiemi, dei quali i primi due sono l'insieme dei vertici e l'insieme degli archi che caratterizzano un grafo e gli altri sono gli insiemi di funzioni definite sui vertici e sugli archi, in relazione alle specifiche esigenze del problema in esame. Una rete potrebbe essere ad esempio una terna di insiemi: $N = (V, A, C)$, dove C è l'insieme dei costi di spostamento sugli archi.

4.2. Modelli di Localizzazione

I problemi di localizzazione hanno numerosi campi di applicazione e coinvolgono, in diversa misura, tutti quei settori le cui attività sono basate sull'utilizzo di infrastrutture di rete, come ad esempio il settore dei trasporti e delle comunicazioni.

Le decisioni di localizzazione rientrano generalmente nell'ambito della programmazione di lungo periodo delle attività logistiche di imprese ed enti e mirano a stabilire la tipologia, l'ubicazione e le dimensioni di nuovi nodi logistici, nonché la dismissione, lo spostamento e/o il ridimensionamento di eventuali nodi preesistenti.

Un problema di localizzazione consiste nell'individuazione della posizione da assegnare ad un insieme di strutture (facility) in funzione della distribuzione di una domanda, reale o potenziale, relativa alla loro utilizzazione, valutando, quindi, l'attrattività dei servizi rispetto alla domanda.

Il lavoro di ReVelle, Eiselt, Daskin (2006) fornisce un quadro della bibliografia dei problemi di localizzazione.

I problemi di localizzazione oggetto di studio, possono essere classificati in due categorie in funzione della tipologia degli impianti da localizzare:

- a. problemi di localizzazione di facility che generano o attraggono flusso su rete ("flow generating and/or attracting service facility location");
- b. problemi di localizzazione di facility che intercettano flussi su rete ("flow intercepting facility location").

a. Problemi di localizzazione di facility che generano e/o attraggono flusso

In questa tipologia di problemi, indicati anche come problemi di “plant location”, l’obiettivo è quello di localizzare una o più facility al fine di soddisfare (allocare) la domanda di un servizio/bene proveniente dagli utenti/clienti localizzati nei nodi o sugli archi di una rete di qualsiasi topologia. La localizzazione delle facility deve essere effettuata in modo tale da ottimizzare un criterio di prestazione, generalmente espresso in funzione dei costi fissi di localizzazione e/o dei costi di afferenza (costi derivanti dalla necessità di accedere al servizio) e/o dei costi di trasporto. La scelta delle voci di costo e della struttura di funzione obiettivo deve essere effettuata tenendo conto del tipo di facility che si vuole localizzare sulla rete. In particolare, si distinguono due principali categorie di problemi di plant location:

- problemi con funzione obiettivo del tipo min-sum;
- problemi con funzione obiettivo del tipo min-max.

Nella **prima tipologia** di problemi, l’obiettivo è di determinare un insieme ottimale di facility che renda minima (min) la somma dei costi (sum) di localizzazione e/o dei costi di afferenza. Nella forma base di questi problemi si assume che non vi siano vincoli sulla capacità di generazione di flusso delle facility e quindi una possibile classificazione può essere effettuata in base alle seguenti due condizioni:

- a) presenza/assenza dei costi fissi di apertura di impianto;
- b) presenza/assenza di un vincolo sul numero degli impianti aperti.

I problemi maggiormente trattati in letteratura sono i seguenti:

- **Uncapacitated or Simple Plant Location Problem:** consiste nella determinazione del numero e della posizione di un insieme di facility, che minimizzi la somma dei costi di localizzazione e dei costi di afferenza, senza alcun vincolo sul numero di facility;
- **p-Median Problem:** consiste nel determinare il numero e la posizione di un numero prefissato di facility, che minimizzi i costi di afferenza.

Esempi di questa tipologia di problemi di localizzazione sono molto frequenti nel campo della logistica industriale, basti pensare al problema decisionale della scelta

dell'ubicazione di stabilimenti, depositi, magazzini, impianti industriali e centri di smistamento.

Nella **seconda tipologia** di problemi (min-max), invece, l'obiettivo è di localizzare un numero predefinito di facility in modo da minimizzare (min) la massima distanza (max) tra ogni nodo generatore di domanda e la facility più vicina. Questo problema è noto in letteratura come il problema del p-centro. Esempi di questa tipologia di problemi si presentano spesso nella localizzazione di servizi di pubblica utilità come scuole, ospedali, uffici, ambulanze, caserme dei vigili del fuoco, parcheggi, etc..

Si riportano di seguito le formulazioni dei seguenti modelli di localizzazione di tipo min-sum [Bruno, 2005]:

a.1. Simple Plant Location

a.2. Capacited Simple Plant Location

a.3. p-mediana.

I modelli di seguito descritti sono caratterizzati da un'unica funzione obiettivo orientata alla minimizzazione dei costi, la cui natura può essere diversa: per costo fisso o costo di localizzazione, si intendono i costi da sostenere per insediare la facility in una determinata posizione. Per costi variabili, si fa generalmente riferimento ai costi di afferenza e si intendono quei costi che il generico nodo j sostiene per servire un certo cliente i (oppure, in maniera del tutto simmetrica, quei costi che il cliente i sostiene per attingere al servizio erogato in j).

Per descrivere tali modelli, si introduce un grafo pesato, generalmente non orientato, $G = (V, A)$, cioè una coppia di insiemi: $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ è quello dei vertici e rappresenta cioè le potenziali localizzazioni per le facility, e quelle, generalmente note, dei punti di domanda; $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V\}$ è invece quello degli archi e rappresenta l'insieme delle singole afferenze dei clienti a ciascun punto di erogazione.

I pesi sui nodi che rappresentano le localizzazioni potenziali indicano i costi di localizzazione, mentre quelli sugli archi indicano i costi di afferenza che sono generalmente proporzionali alla distanza tra i due nodi (oppure, in casi più specifici, ad altri fattori, come ad esempio il tempo di percorrenza etc.).

Si definiscono i seguenti elementi:

$I \subseteq V$: insieme dei nodi generatori o destinazioni di domanda;

$J \subseteq V$: insieme delle possibili localizzazioni puntuali;

$d_i \geq 0$: domanda generata dal nodo $i \in I$

$C_{ij} \geq 0$: costo di afferenza in j della domanda generata dal nodo i ;

$x_{ij} \geq 0$: frazione di domanda generata in i soddisfatta dal servizio in j ;

y_j : variabile binaria definita per ogni $j \in J$ pari ad uno se in j è localizzato il servizio, a zero altrimenti;

r_j :costo di localizzazione del servizio j in J

K_j capacità massima associata ad una localizzazione $j \in J$.

a.1. Simple Plant Location

Il modello del Simple Plant Location, è orientato alla localizzazione di servizi puntuali che minimizzino il costo totale ottenuto sommando i costi di afferenza e quelli di localizzazione.

Facendo riferimento allo schema grafico precedentemente descritto, ed in coerenza con la notazione introdotta, la formulazione del problema è la seguente:

$$z = \sum_{i \in I, j \in J} C_{ij} * x_{ij} + \sum_{j \in J} r_j * y_j \quad \text{Min!} \quad (1.1)$$

sottoposta ai vincoli:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (1.2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1.4)$$

$$y_j = 0 / 1 \quad \forall j \in J \quad (1.5)$$

La funzione obiettivo (1.1) racchiude nel primo termine la somma di tutti i costi di afferenza, mentre nel secondo compaiono i costi di localizzazione. I vincoli (1.2) garantiscono che la domanda totale generata da ciascun cliente i sia soddisfatta, mentre le relazioni (1.3) assicurano che ciascuna domanda o viene servita da un servizio aperto, oppure è nulla. Infine i vincoli (1.4) assicurano che la variabile x_{ij} sia continua e non negativa, il che vuol dire che non essendo binaria, il cliente può essere servito da una o più facility j e deve essere servito per forza per la presenza dei vincoli (1.2). Le variabili di localizzazione y_j invece sono di natura binaria: il servizio quindi o è localizzato in j , e quindi y_j vale uno, altrimenti vale zero. Una volta individuato il valore delle y_j e, quindi la posizione dei servizi da localizzare, ad ogni servizio afferiranno le domande associate ai nodi con costi di afferenza minori.

a.2. Capacited Simple Plant Location

Il modello Capacited Simple Plant Location è orientato alla localizzazione dei servizi puntuali con obiettivo di minimizzare il costo totale, rispettando i vincoli di capacità delle infrastrutture dei nodi logistici.

Nel caso in cui ciascun servizio j presenti una capacità massima K_j , i vincoli (1.3), con riferimento alle notazioni introdotte in precedenza e alla formulazione del modello di Simple Plant, diventano:

$$\sum_{i \in I} d_i * x_{ij} \leq K_j * y_j \quad (1.6)$$

dove:

d_i è la domanda associata ad ogni $i \in I$.

Tale problema è di tipo NP-hard (cfr par. 4.7), pertanto la sua risoluzione necessita di algoritmi euristici di tipo migliorativo. Un'euristica migliorativa per la sua risoluzione si fonda sull'osservazione che, data una soluzione ammissibile che presenta certi servizi attivi, l'apertura di un nuovo servizio può migliorare la funzione obiettivo se la riduzione dei costi di afferenza è superiore al costo di localizzazione del nuovo servizio. Una volta identificata la posizione dei servizi da localizzare, ad ogni servizio afferiscono le domande associate ai nodi con costi di afferenza minori.

a.3. Modello p-mediana

Nel caso in cui i costi di localizzazione siano uguali per ogni potenziale servizio ed il numero di localizzazioni da effettuare risulti fissato a priori, i costi totali di localizzazione risultano costanti (cioè pari al costo fisso in comune per il numero p di localizzazioni che, come già precisato, è fissato) e possono quindi essere trascurati ai fini dell’ottimizzazione. Il problema consiste nel trovare quei p nodi in cui insediare le facility, tra tutti quelli dell’insieme delle potenziali localizzazioni, in modo da minimizzare la somma dei costi di afferenza, unica voce di costo rimasta.

La problematica posta in questi termini, prende il nome di “p-mediana”. Prima di esporre il modello che la descrive, si definisce il concetto di “mediana”. Nel caso in cui p sia pari ad uno: l’obiettivo quindi è trovare quel vertice erogatore del servizio tale che la somma delle distanze minime degli altri vertici rispetto ad esso sia minima; questo vertice si definisce appunto mediana (Fig.4.2). In riferimento ad una struttura matriciale il “nodo mediana” è quello associato alla riga della matrice delle distanze minime tale che la somma dei suoi elementi risulti minima (Fig.4.4). Il concetto in questione viene generalizzato se p è un numero maggiore di uno. In tal caso, infatti, l’obiettivo è la ricerca sul grafo di quell’insieme di p vertici tali che sia minima la somma delle distanze minime da essi a tutti gli altri vertici del grafo; tale insieme è denominato p-mediana.

Il modello non si differenzia molto da quello del Simple Plant Location, se non per la presenza di un ulteriore insieme di vincoli. La formulazione del problema è la seguente:

$$z = \sum_{i \in I, j \in J} C_{ij} * x_{ij} \text{ Min!} \tag{2.1}$$

sottoposta ai vincoli:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{2.2}$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad \forall j \in J \tag{2.3}$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{2.4}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$y_j = 0/1 \quad \forall j \in J \quad (2.6)$$

I vincoli (2.3), aggiunti ai vincoli del modello di Simple Plant Location, impongono che il numero di totale di localizzazioni sia pari a p .

In questo caso il numero di soluzioni ammissibili sarà dato dal numero di combinazioni di v oggetti (dove v è il numero delle potenziali localizzazioni) presi p alla volta, quindi pari al coefficiente binomiale $v! / (v-p)! * p!$.

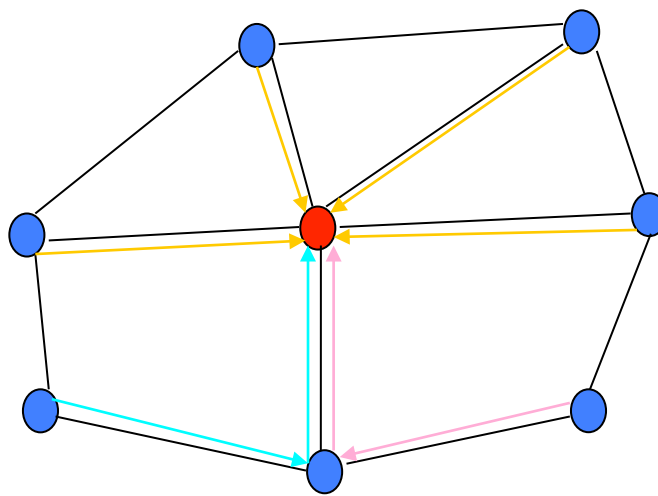


Fig. 4.2 - Esempio di 1-mediana

Il problema della p -mediana è di tipo NP-hard (cfr par.4.7), pertanto, per risolverlo con tempi di calcolo contenuti si ricorre ad algoritmi euristici. Un algoritmo migliorativo, basato sulla sostituzione di vertici, è l'algoritmo di Teitz e Bart; l'algoritmo parte da una soluzione S di p nodi scelti a caso; al generico passo si verifica la possibilità di introdurre, al posto di un nodo i appartenente ad S , un vertice j non appartenente ad S , calcolando l'eventuale diminuzione del valore della funzione obiettivo.

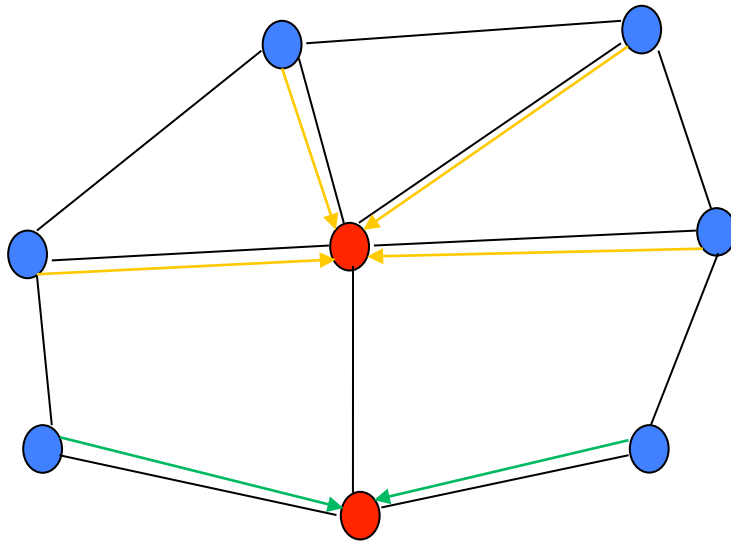


Fig.4.3 - Esempio di 2-mediana

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	5	7	4	7	6	7	12	48
2	5	0	3	1	5	3	4	1	22
3	7	3	0	4	8	6	7	4	39
4	4	1	4	0	4	2	3	2	20
5	7	5	8	4	0	5	7	6	42
6	6	3	6	2	5	0	3	4	29
7	7	4	7	3	7	3	0	5	36
8	12	1	4	2	6	4	5	0	34

Fig. 4.4 - Matrice delle distanze minime

b. Problemi di localizzazione di facility che intercettano flussi

Per quanto riguarda i problemi di localizzazione che intercettano flussi, le facility forniscono un servizio/bene che gli utenti, in movimento su un percorso predefinito tra un nodo origine e un nodo destinazione, possono utilizzare in maniera volontaria oppure imposta. In altre parole le unità di flusso in movimento sulla rete su percorsi predefiniti, non hanno l'obiettivo di ottenere il servizio/bene fornito, ma se incontrano una facility lungo il loro tragitto, possono decidere volontariamente, o può essere loro imposto, di usufruire del bene/servizio stesso. Le unità di flusso quindi interrompono il loro "viaggio", per poi riprenderlo dopo aver "utilizzato" il servizio. In questo caso quindi, l'obiettivo non è la localizzazione di un insieme di facility per il soddisfacimento della domanda al costo minimo, ma è localizzare le facility in modo che sia ottimizzato un certo criterio di performance, funzione dei flussi transitanti sulla rete.

Esempi di questa tipologia di problemi sono riscontrabili facilmente sia nelle reti di comunicazione, che in quelle di trasporto. Nel primo caso si pensi alla localizzare dei sensori (in generale, monitoring devices) per il controllo dei flussi transitanti sulla rete. Nel secondo caso si pensi invece alla localizzazione di Automatic Teller Machines, stazioni di rifornimento, punti di servizio per le macchine, info-point sul traffico, sensori di conteggio, pannelli a messaggio variabile (VMS) e stazioni di ispezione.

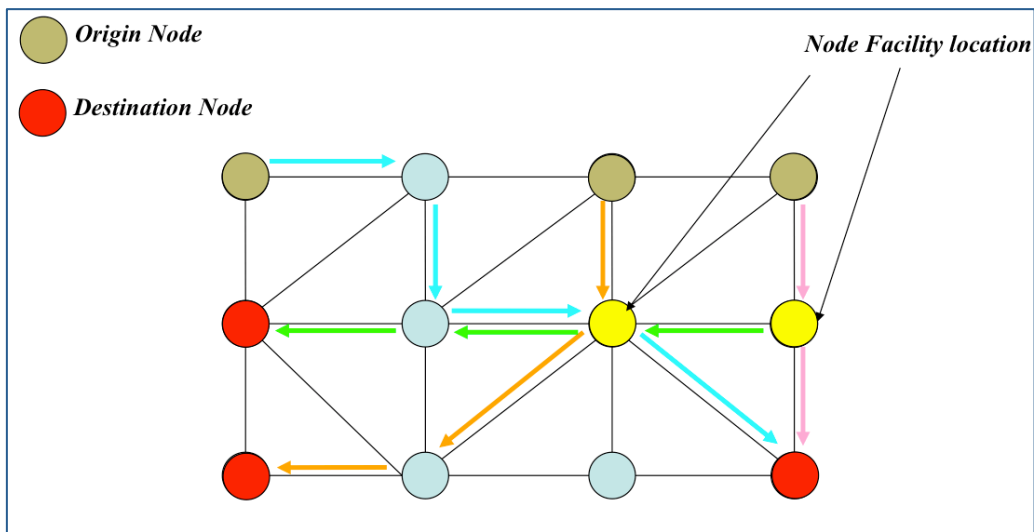


Fig.4.5 - Localizzazione di facility che intercettano i flussi

La letteratura su questa classe di problemi non è ampia come quella presente per la tipologia precedente, in quanto il primo lavoro che affronta in maniera implicita i problemi di Flow Interception risale agli inizi degli anni '80, (Hodgson, 1981). Tuttavia le sue svariate possibilità di utilizzo hanno portato alla stesura di diversi lavori negli ultimi quindici anni.

Si riportano due formulazioni per questa categoria di problemi; in particolare, con riferimento al criterio da ottimizzare si distingue:

b.1. Modello per la massimizzazione del flusso intercettato (Berman et al., 1990);

b.2. Modello per la minimizzazione del numero di impianti (Berman et al., 1990).

Le ipotesi alla base dei tali modelli sono le seguenti:

- i percorsi origine/destinazione e i relativi flussi sono noti (in particolare ciascun flusso origine-destinazione utilizza il minimo percorso sulla rete);
- non sono ammesse deviazioni dei flussi dai percorsi predefiniti;
- ciascun flusso è intercettato interamente da un'unica facility;
- le facility sono localizzate nei nodi.

Si definisce pertanto:

$G = (N, A)$ dove $N = \{1, \dots, n\}$ è l'insieme dei nodi e $A = \{(i,j), i,j \in N\}$ è l'insieme degli archi

$P = \{1, \dots, p\}$ è l'insieme dei percorsi O/D utilizzati sulla rete; ciascun percorso è identificato dal proprio nodo di destinazione, quindi l'insieme dei nodi destinazione coincide con l'insieme dei percorsi

$N_p = \{1, \dots, n_p\}$ è l'insieme dei nodi che appartengono al percorso

$J = \{1, \dots, j\}$ è l'insieme dei nodi potenziali per la localizzazione delle facility; la facility può essere localizzata su ciascun nodo di un percorso ad esclusione del nodo destinazione $J = N - P$

b.1. Modello per la massimizzazione del flusso intercettato

Le variabili decisionali del problema sono:

- $X_i = \{0,1\}$: 1, se una facility che intercetta i flussi è localizzata nel nodo i , $i \in N$; 0 altrimenti;
- $Y_p = \{0,1\}$: 1, se la facility è localizzata lungo il percorso p , $p \in P$; 0, altrimenti.

La formulazione del problema è la seguente:

$$z = \sum_{p \in P} f_p Y_p \quad \text{Max!} \quad (3.1.b)$$

sottoposto a:

$$\sum_{i \in N} X_i = m \quad (3.2.b)$$

$$\sum_{i \in p} X_i \geq Y_p \quad \forall p \in P \quad (3.3.b)$$

$$X_i = \{0,1\} \quad \forall i \in N$$

$$Y_p = \{0,1\}: \quad \forall p \in P \quad (3.4.b)$$

La funzione obiettivo (3.1.b) è orientata alla massimizzazione del flusso intercettato. I vincoli (3.2.b) fissano il numero massimo m di facility da localizzare; i vincoli (3.3.b) assicurano che un percorso viene intercettato solo se c'è almeno una facility in un suo nodo. I vincoli (3.4.b) impongono la binarietà delle variabili.

b.2. Modello per la minimizzazione del numero di impianti

Le variabili decisionali del problema sono:

- $X_i = \{0,1\}$: 1, se una facility che intercetta i flussi è localizzata nel nodo i , $i \in N$; 0 altrimenti;
- $Y_p = \{0,1\}$: 1, se la facility è localizzata lungo il percorso p , $p \in P$; 0, altrimenti.

La formulazione del problema è la seguente:

$$z = \sum_{i \in P} X_i \quad \text{Min!} \quad (3.1.c)$$

sottoposto a:

$$\sum_{p \in P} f_p Y_p \geq C_a^* \quad \forall p \in P \quad (3.2.c)$$

$$\sum_{i \in p} X_i \geq Y_p \quad \forall p \in P \quad (3.3.c)$$

$$X_i = \{0,1\} \quad \forall i \in N$$

$$Y_p = \{0,1\}: \quad \forall p \in P \quad (3.4.c)$$

La funzione obiettivo (3.1.c) è orientata alla minimizzazione del numero di impianti. I vincoli (3.2.c) esprimono la percentuale di flusso rispetto al totale da intercettare; i vincoli (3.3.c) assicurano che un percorso viene intercettato solo se c'è almeno una facility in un suo nodo. I vincoli (3.4.c) impongono la binarietà delle variabili.

4.3. Modelli di Routing

Nella logistica dei sistemi di produzione di beni e servizi, uno degli aspetti organizzativi e gestionali da affrontare, oltre alla scelta di localizzazione dei punti di erogazione, riguarda la movimentazione, la distribuzione e il trasporto di persone e merci. Tali problemi sono detti di logistica distributiva, o di routing, e possono presentare caratteristiche diverse in funzione degli oggetti da movimentare (semilavorati, merci, prodotti finiti pallet, rifiuti posta, etc.), dei mezzi con i quali si effettua la movimentazione (vettori di trasporto), dei tempi e degli spazi (scala urbana, regionale, nazionale, etc) necessari per l'effettuazione del servizio.

Un problema di routing può essere schematizzato attraverso la presenza di un insieme di clienti localizzati in un certo contesto territoriale a ciascuno dei quali è associato un servizio da effettuare. I servizi possono essere di prelievo, di consegna e di prelievo-consegna (se un certo bene deve essere contestualmente prelevato da una località di origine e consegnato presso una località di destinazione).

In generale i problemi di routing hanno come output la definizione di percorsi che un insieme di veicoli deve effettuare allo scopo di soddisfare determinate richieste.

Ulteriori elementi che caratterizzano e differenziano tra loro le diverse categorie di problemi di routing sono ad esempio:

- vincoli temporali: se sono assenti si tratta di definire un problema di "routing puro", che mira alla determinazione della successione delle localizzazioni che ogni mezzo coinvolto nel servizio deve visitare, altrimenti si parla di risolvere un problema di "routing e scheduling", se ad esempio esiste una finestra temporale (time windows) entro cui il servizio deve essere svolto. In questo caso avrà grande importanza, oltre alla successione, anche la tempificazione delle operazioni da svolgere;
- vincoli relativi a particolari condizioni operative: ad esempio i veicoli possono fare riferimento ad uno o più depositi per la partenza e/o il ritorno di ogni tragitto; ciascun tragitto può avere una lunghezza oppure una durata massima; può essere necessario considerare aliquote temporali aggiuntive rispetto al trasporto, dovute per esempio alle operazioni di carico/scarico; può essere necessario impostare una certa precedenza nelle consegne ecc.;

- natura delle informazioni: si parla di routing statico nel caso in cui le informazioni necessarie per decidere come soddisfare le richieste sono disponibili prima di assumere tale decisione; se invece esse pervengono in maniera continua con il mutare delle richieste dei servizi, si parla di routing dinamico (gli utenti rivolgendosi ad un'apposita centrale effettuano le domande in tempo reale, si parla di servizi a chiamata o dial-a-ride). E ancora si parla di routing deterministico o stocastico, a seconda che le informazioni siano certe oppure dati statistici.

Per descrivere questa categoria di problemi si userà come supporto e strumento di rappresentazione, in maniera analoga a quanto fatto per i problemi di location, un grafo pesato; in tal modo, una qualsiasi località è identificata da un nodo, mentre gli archi rappresentano i possibili collegamenti tra le diverse località. Il peso associato a ciascun arco può rappresentare la lunghezza del collegamento, il tempo o il costo necessario a coprirlo.

I problemi di routing si dicono a copertura di nodi, o node covering, se i servizi sono localizzati nei nodi; pertanto l'obiettivo è determinare un insieme di percorsi che visitano i nodi rappresentativi dei servizi; a ciascun nodo è possibile associare un peso che rappresenta la domanda del servizio da realizzare (esempio: la quantità di merce da prelevare o da consegnare).

Se, invece, i servizi sono localizzati lungo gli archi, si parla di problema a copertura di archi, o arc covering, per i quali l'obiettivo è di individuare un insieme di itinerari che comprendono gli archi presso i quali sono presenti i servizi (ad esempio: la raccolta dei rifiuti e la consegna della posta).

A ciascun vertice del grafo che rappresenta un potenziale cliente è associato:

- la quantità di merce (domanda), di uno o più tipi, che deve essere recapitata o raccolta;
- il periodo del giorno (time window) durante il quale può o deve avvenire il servizio, ad esempio orari legati all'apertura o chiusura di un esercizio. Questa rappresenta comunque un'informazione addizionale caratteristica solo di alcuni problemi;
- l'eventuale tempo necessario per consegnare o raccogliere la merce;

- un'eventuale priorità nel caso non sia possibile servire tutti i clienti, e l'eventuale penalità associata alla parziale o totale mancata erogazione del servizio.

I veicoli che effettuano la movimentazione possono essere caratterizzati come segue:

- da un deposito di partenza al quale sono obbligati a fare ritorno alla fine della route;
- dalla loro capacità espressa in volume, peso, o numero di colli trasportabili;
- dal tipo di merci che trasportano, se sulla rete se ne trasportano diverse categorie;
- dal costo associato al loro utilizzo, espresso per unità di tempo e/o di distanza.

Infine, anche i costi possono essere di diverso genere, distinguendoli in: costi fissi, legati per esempio agli investimenti (acquisto mezzi, apertura depositi, etc.); costi variabili legati invece all'effettuazione del servizio, si parla in particolare di costi di routing considerati direttamente proporzionali alla lunghezza dei tragitti, oppure di costi di utilizzazione dei veicoli associati alle spese ad esempio di carburante o di personale addetto alla guida dei veicoli stessi. Una diversa combinazione di queste voci di costo, rende disponibile diverse funzioni obiettivo; quella che verrà utilizzata nei modelli di seguito descritti è relativa alla minimizzazione della sola voce di costo variabile facente riferimento al routing. Prima di passare a descrivere i principali problemi di tipo "node covering", ed i relativi modelli, è opportuno dare le seguenti due definizioni; data una rete:

- a) si definisce circuito hamiltoniano quel circuito che tocca tutti i vertici del grafo, attraversando ciascuno di essi una sola volta;
- b) si definisce circuito euleriano quel circuito che passa per tutti gli archi della rete attraversando ciascuno una sola volta.

Di seguito sono riportate le formulazioni dei seguenti modelli [Bruno, 2005]:

- a. Travelling Salesman Problem (TSP)
- b. Vehicle Routing Problem e Capacited Vehicle Routing Problem (VRP e CVRP).

a. Travelling Salesman Problem (TSP)

Il cosiddetto “problema del commesso viaggiatore”, ha come obiettivo la ricerca della determinazione di un circuito a costo minimo che passi almeno una volta per ciascun nodo. Se il grafo è completo, la soluzione sarà un circuito hamiltoniano. Si parla di TSP simmetrico e asimmetrico: nel primo caso si ipotizza che i costi per spostarsi da i a j siano uguali a quelli per spostarsi da j ad i; nel secondo caso questa ipotesi viene negata.

Nelle condizioni di grafo completo e di problema simmetrico, la soluzione del problema sarà la ricerca del circuito hamiltoniano a costo minimo; un possibile modello matematico che descrive tale problema è il seguente:

$$z = \sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} C_{ij} * x_{ij} \quad \text{Min!} \quad (4.1)$$

sottoposto a:

$$\sum_{i=1,n} x_{ij} = 1 \quad j=1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1,n} x_{ij} = 1 \quad i=1, \dots, n \quad (4.3)$$

$$x_{ij} = 0 / 1 \quad i,j=1, \dots, n \quad (4.4)$$

$$X \in S \quad (4.5)$$

$$S = (x_{ij} : \sum_{i \in Q} \sum_{j \notin Q} x_{ij} \geq 1) \quad \forall Q \subset V \quad (4.6)$$

In riferimento alla seguente notazione:

n : rappresenta il numero di nodi presenti sul grafo di riferimento;

$x_{i,j}$: variabile binaria associata al generico arco (i,j) ; se l'arco appartiene al circuito è uguale a 1

$c_{i,j}$: costo associato all' arco generico (i,j) .

La funzione obiettivo impone di ricercare quel circuito per cui risulti minima la somma dei costi associati a ciascun arco che è presente in esso. I vincoli (4.2) impongono che in ciascun vertice j del grafo può entrare al massimo un arco, mentre i vincoli (4.3) che da ciascun vertice i del grafo può uscire al massimo un arco. Il gruppo di vincoli (4.5), ha una grande importanza, in quanto impedisce al modello di fornire come soluzione ammissibile una soluzione in cui compaiano sotto-giri, cioè dove vengano a chiudersi due o più circuiti come è mostrato in Fig.4.6. In particolare, i vincoli (4.6) assicurano che, comunque preso un sottoinsieme di nodi Q , deve esistere almeno un arco che colleghi un nodo di Q con un nodo non appartenente a Q .

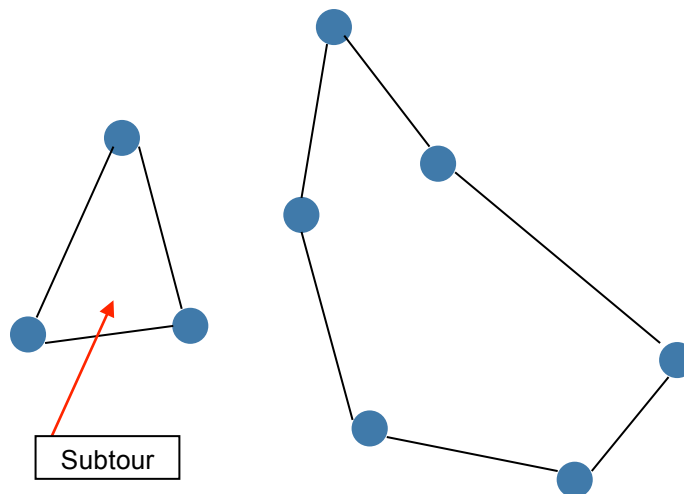


Fig.4.6 - Esempio di soluzione non ammissibile

Una soluzione tipica del TSP può essere schematizzata come in Fig. 4.7.

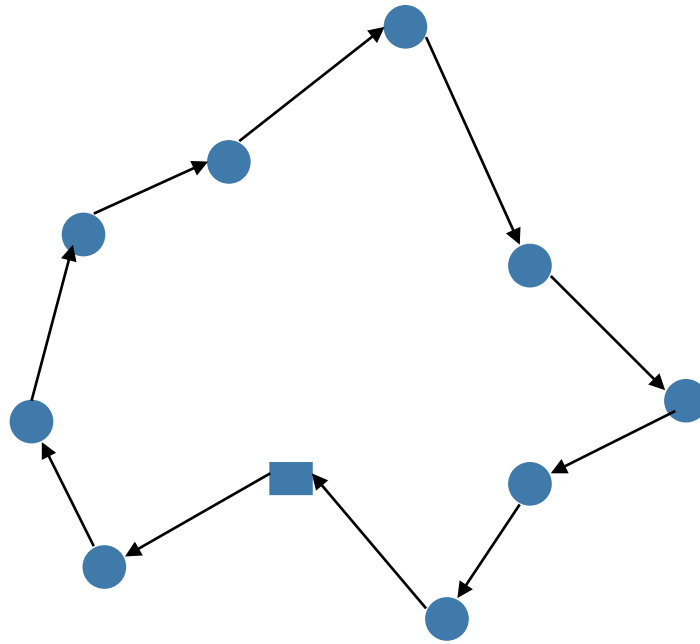


Fig.4.7 - Tipica soluzione di un TSP

b. Vehicle Routing Problem e il Capacitated Vehicle Routing

In letteratura, il lavoro di Laporte G. e Osman I.H. (1995) fornisce una dettagliata bibliografia dei problemi di routing.

Si supponga di avere a disposizione una flotta di veicoli (m) localizzati presso un nodo di riferimento d (deposito); il valore di m può essere definito a priori o rappresentare una variabile decisionale del problema. Il problema del VRP consiste nel determinare un insieme di percorsi di costo totale minimo in modo che ciascun nodo diverso dal deposito sia visitato una sola volta e che ciascun percorso abbia inizio e fine nel deposito. Ipotizzando che ad ogni nodo della rete sia associata una domanda $d_j > 0$, se si introduce il vincolo che la somma delle domande dei nodi inclusi in ciascun percorso non deve superare la capacità Q del veicolo, si parla di VRP con vincoli di capacità (Capacited Vehicle Routing Problem).

Esistono diverse formulazioni per il VRP e il CVRP, quella di seguito riportata è a due indici e per essa si introducono le variabili binarie x_{ij} con lo stesso significato del TSP (la variabile è uguale a 1 se l'arco i,j appartiene alla soluzione) e si suppone fissato il numero m di veicoli. Indicando con l'indice "0" il deposito e con $(1, \dots, n)$ l'insieme dei nodi, il modello matematico è il seguente:

$$z = \sum_{i=0,n} \sum_{j=0,n} c_{ij} * x_{ij} \quad \text{Min!} \tag{5.1}$$

sottoposto a:

$$\sum_{i=1,n} x_{ij} = 1 \quad j=1, \dots, n \tag{5.2}$$

$$\sum_{j=1,n} x_{ij} = 1 \quad i=1, \dots, n \tag{5.3}$$

$$\sum_{i=1,n} x_{i0} = m \tag{5.4}$$

$$\sum_{j=1,n} x_{0j} = m \tag{5.5}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ij} \geq v(S) \quad \forall S \subset V - \{d\} \quad (5.6)$$

$$x_{ij} = 0/1 \quad i, j = 1, \dots, n \quad (5.7)$$

I vincoli (5.4) e (5.5) assicurano che dal nodo deposito partono e rientrano m percorsi; $v(S)$ è il numero di veicoli necessario per soddisfare la domanda relativa ai nodi di S e i vincoli (5.6) indicano che comunque preso un insieme di nodi S , deve esistere un numero di archi di collegamento con nodi non appartenenti ad esso almeno pari a

$$v(S). \text{ Nel caso in cui i veicoli hanno tutti la stessa capacità : } v(S) = \sum_{i \in S} \frac{d_i}{Q}$$

In assenza dei vincoli di capacità i vincoli (5.6) diventano i vincoli (4.6) del TSP; il modello equivale a quello del commesso viaggiatore multiplo (Multiple Traveling Salesman Problem), in cui da un deposito partono m circuiti, tali che ogni nodo è visitato una sola volta da un solo circuito.

Nelle Fig. 4.8 e 4.9 sono riportati esempi di soluzioni ammissibili rispettivamente per un MTSP con due veicoli, e per un CVRP i cui veicoli, a causa del vincolo di capacità non possono visitare più di tre nodi.

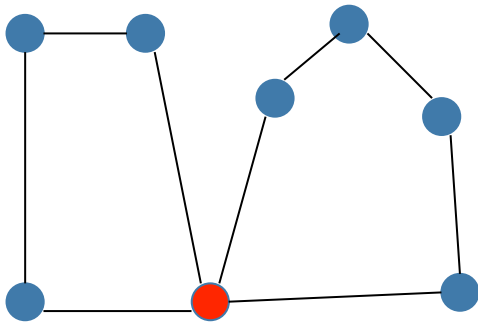


Fig.4.8- Soluzione MTSP

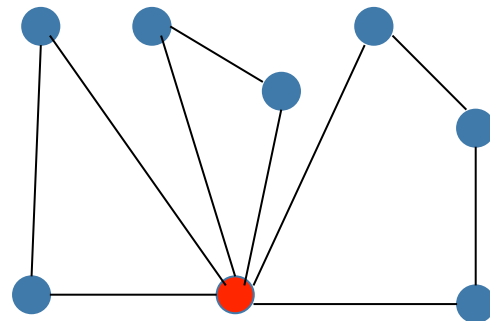


Fig.4.9 - Soluzione CVRP

Il Capacitated Vehicle Routing ricerca i percorsi da assegnare a ciascuno dei veicoli disponibili presso un deposito che visitino una sola volta tutti i nodi del grafo (diversi dal deposito) e ritornino al deposito minimizzando la distanza totale percorsa. Si suppone che la somma delle domande dei nodi inclusi in ciascun percorso non superi la capacità del veicolo. Il numero dei veicoli disponibili può essere una variabile decisionale del problema oppure un dato, e a questi ultimi può essere assegnata capacità infinita.

In Fig. 4.10 è rappresentato un caso di soluzione non ammissibile:

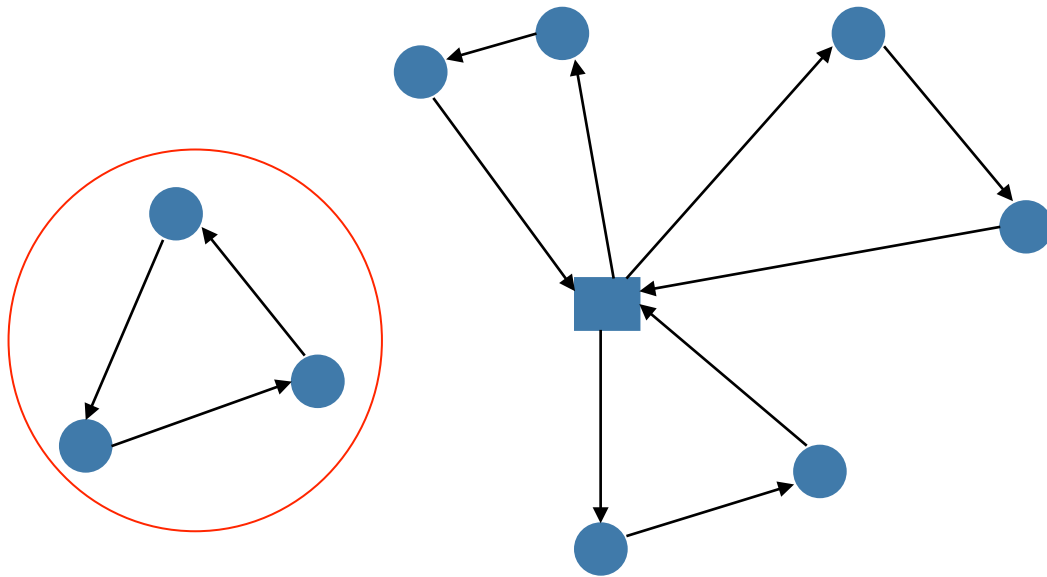


Fig.4.10-Esempio di soluzione non ammissibile

4.4. Modelli integrati di location-routing

I problemi di location-routing sono problemi caratterizzati da un'elevata complessità, derivante dalla combinazione di due sottoproblemi NP-hard (caratterizzati da complessità non polinomiale), il "facility location" e il "vehicle routing". I modelli integrati di location-routing ottimizzano simultaneamente il problema della localizzazione dell'infrastruttura e il problema della determinazione del percorso ottimo dei veicoli per la fase di distribuzione della merce ai punti di domanda localizzati in città, minimizzando i costi totali.

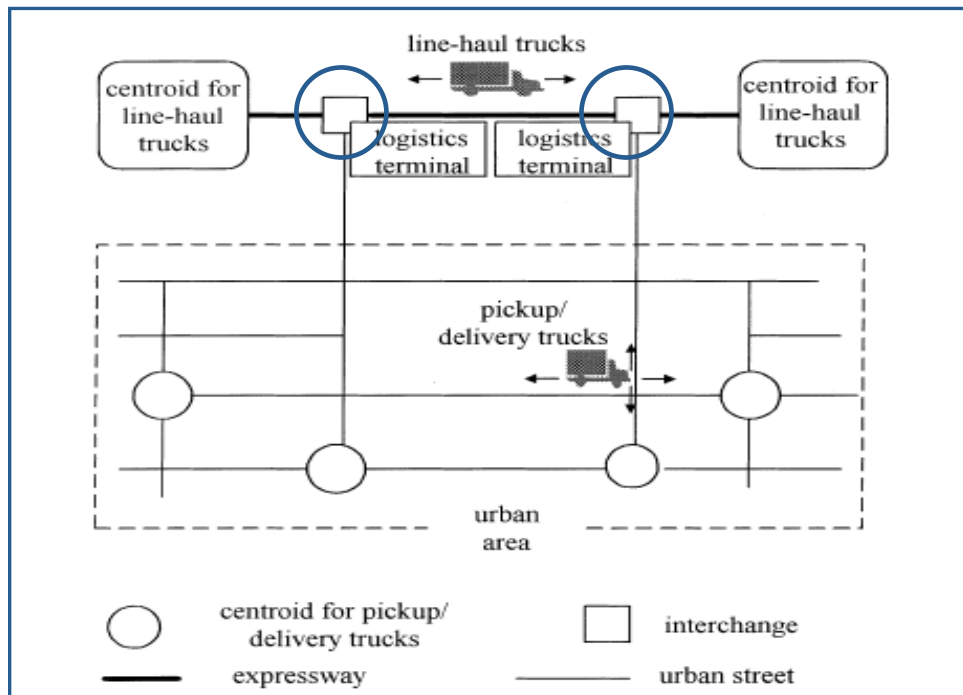


Fig.4.11 - Schema di un problema di location-routing

Tra i modelli di location-routing riportati in letteratura verrà presentata la formulazione proposta da Tai-Hsi Wu, Chinyao Low, Jiunn-Wei Bai del Dipartimento di Ingegneria Industriale, Da-Yeh University, Changhua, Taiwan.

Si ipotizzi che per un sistema logistico siano noti il numero, la localizzazione e la domanda dei clienti e il numero e la localizzazione di tutti i potenziali nodi deposito, oltre che il tipo di veicoli e la loro capacità. Inoltre, la determinazione dei percorsi dei veicoli deve essere tale che: la domanda di ciascun cliente sia soddisfatta; ciascun cliente sia servito da un unico veicolo; la domanda totale su ciascun percorso sia

minore o uguale alla capacità del veicolo assegnato al percorso; ciascun percorso abbia come nodo origine e destinazione lo stesso nodo deposito.

Il problema determina simultaneamente il numero e la localizzazione dei nodi deposito, l'assegnazione dei clienti ai nodi deposito, la tipologia di veicoli ai percorsi e i corrispondenti percorsi di consegna della merce, minimizzando i costi totali (costo di localizzazione dei depositi, costo di trasporto, costo di spedizione per i veicoli).

Si definiscono di seguito gli insiemi, i parametri e le variabili del modello matematico.

Insiemi:

I insieme dei potenziali nodi DC (Distribution Centre)

J insieme dei clienti

K insieme dei veicoli

Parametri:

N numero di clienti

C_{ij} distanza tra i nodi i e j, $j \in I \cup J$

G_i costo fisso di localizzazione del deposito i

F_k costo fisso di utilizzo del veicolo k

V_i massima capacità del deposito i

d_j domanda del cliente j

Q_k capacità del veicolo k

Variabili decisionali:

$x_{ijk} = 1$, se il nodo i precede immediatamente il nodo j lungo il percorso k ($i, j \in I \cup J$); 0 altrimenti

$y_i = 1$, se il deposito i viene localizzato; 0 altrimenti

$z_{ij} = 1$, se il cliente j è assegnato al deposito i; 0 altrimenti.

Modello matematico:

$$z = \sum_{i \in I} G_i y_i + \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} C_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} F_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk}$$

Min! (7.1)

sottoposto ai vincoli:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, \quad j \in J \quad (7.2)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k \quad k \in K \quad (7.3)$$

$$U_{lk} - U_{jk} + N x_{ljk} \leq N - 1, \quad l, j \in J, \quad k \in K \quad (7.4)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, \quad k \in K, i \in I \cup J \quad (7.5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad k \in K \quad (7.6)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} - V_i y_i \leq 0, \quad i \in I \quad (7.7)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (7.8)$$

$$x_{ijk} = 0, 1, \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (7.9)$$

$$y_i = 0, 1, \quad i \in I \quad (7.10)$$

$$z_{ij} = 0, 1, \quad i \in I, j \in J \quad (7.11)$$

$$U_{lk} \geq 0, \quad l \in J, k \in K \quad (7.12)$$

La funzione obiettivo (7.1) minimizza rispettivamente la somma dei costi fissi di localizzazione, dei costi di consegna e dei costi di spedizione dei veicoli assegnati. I vincoli (7.2) garantiscono che ciascun cliente sia assegnato ad un unico percorso; i vincoli (7.3) sono vincoli di capacità per i veicoli; i vincoli (7.4) garantiscono l'eliminazione di soluzioni che presentino sotto-giri. I vincoli (7.5) esprimono la conservazione dei flussi; mentre i vincoli (7.6) garantiscono che ciascun percorso deve essere servito al massimo una volta. I vincoli (7.7) sono vincoli di capacità per i nodi DC (Distribution Centres); i vincoli (7.8) garantiscono che un cliente può essere assegnato ad un centro di distribuzione solo se esiste un percorso che parte da quel centro di distribuzione e ha come destinazione quel cliente. L'insieme dei vincoli (7.9), (7.10) e (7.11) impongono che le variabili decisionali del problema sono binarie, mentre i vincoli (7.12) impongono la positività delle variabili ausiliarie.

Oltre ai problemi di location-routing monolivello sono stati sviluppati anche problemi multi-livello, noti con il nome di "Hierarchical facility location problems". Si tratta di problemi di Network Design particolarmente diffusi in letteratura. La ragione fondamentale del grande interesse per questa tipologia di problemi risiede nelle loro

molteplici applicazioni nel settore della logistica urbana. La distribuzione delle merci, infatti, per alcune realtà territoriali complesse, necessita del supporto non solo di piattaforme logistiche di primo livello, localizzate in aree limitrofe al centro urbano (a circa 30-40 km), ma anche di aree localizzate nei pressi del centro città funzionali al carico-scarico delle merci, i cosiddetti Transit Point.

In Fig. 4.12 è riportato lo schema di un problema di location-routing multilivello.

Un modello di location-routing multilivello è stato presentato nel lavoro di Boccia et al. (2011).

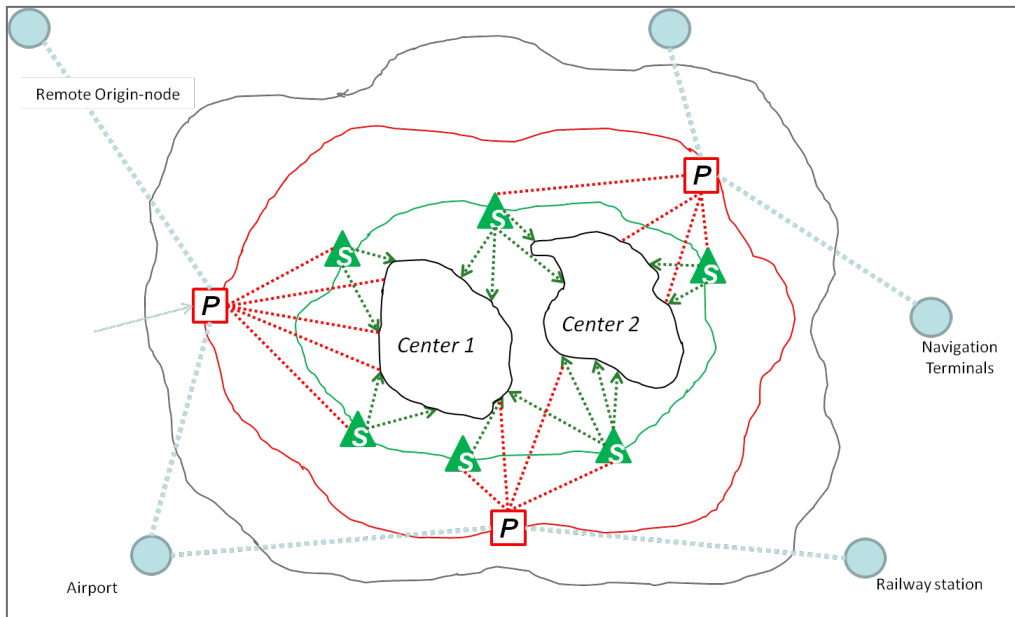


Fig.4.12 - Un problema di Location-Routing Multilivello

4.5. Modello di Flow Intercepting Facility Location-Routing

I problemi di Location-Routing possono essere affrontati anche mediante l'utilizzo dei modelli di localizzazione di facility che intercettano flusso (cfr. paragrafo 4.2).

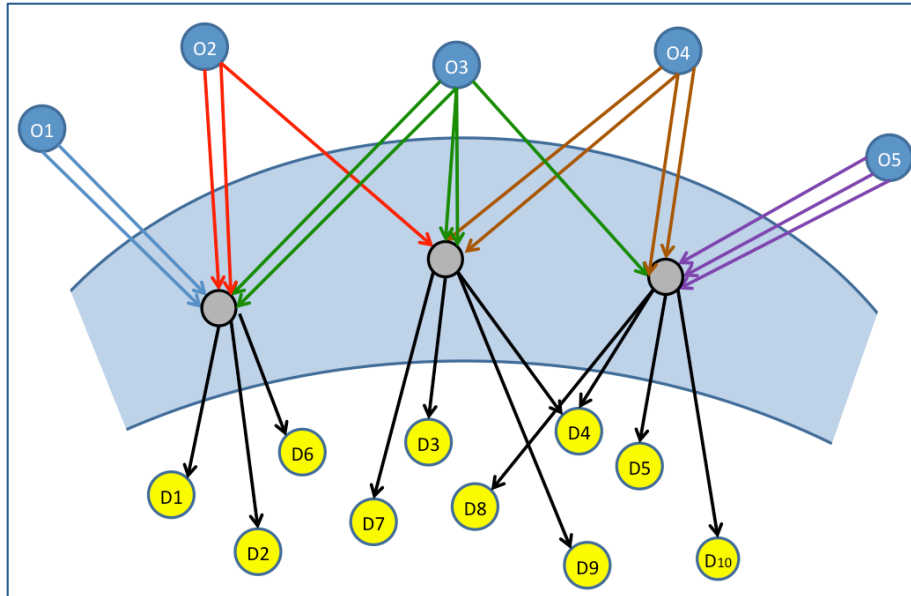


Fig.4.13 - Schema del modello FLIFLOR

Si introduce, pertanto, la formulazione di un nuovo modello di location-routing in fase di sperimentazione presso il Gruppo di Ricerca Operativa del DIETI dell'Università "Federico II" di Napoli. Esso integra un modello di localizzazione di facility che intercettano i flussi (FLIFLO) e un modello di Vehicle Routing (VRP). Nel seguito sarà indicato pertanto come Flow Intercepting Facility Location-Routing (FLIFLOR).

Definizione del problema:

Il modello FLIFLOR proposto è basato su tre livelli decisionali:

1. Decisioni di localizzazione (location): determinare il numero e la posizione delle facility (park-and-ride/transit point);
2. Decisioni di assegnamento (allocation): assegnare ciascuna destinazione ad una facility aperta;

3. Decisioni di scelta del percorso (routing): determinare il percorso ottimo dei veicoli dalle facility alle destinazioni finali; questo consente anche di determinare le dimensioni della flotta di veicoli.

L'obiettivo del problema di FLIFLOR è la minimizzazione della somma di tre componenti di costo:

- costo di localizzazione delle facility;
- costo di trasporto dai nodi origine alle facility localizzate;
- costo di routing dalle facility localizzate alle destinazioni finali.

Si introduce inoltre un grafo $G=(N,A)$ dove $N = \{1, \dots, n\}$ è l'insieme dei nodi e $A = \{(i, j), i, j \in N\}$ è l'insieme degli archi.

Su tale rete si definiscono i seguenti insiemi:

$P = \{1, \dots, p\}$ insieme dei percorsi origine-destinazione utilizzati sulla rete. Ciascun percorso è identificato dal proprio nodo di destinazione \Rightarrow L'insieme dei nodi di destinazione \Rightarrow Insieme dei percorsi $\Rightarrow p$ verrà utilizzato indifferentemente per un percorso e per la sua destinazione.

$N_p = \{1, \dots, n_p\}$ insieme dei nodi appartenenti al percorso $p \in P$

$J = \{1, \dots, j\}$ è l'insieme dei nodi potenziali per la localizzazione delle facility; se la facility può essere localizzata su ciascun nodo di un percorso ad esclusione del nodo destinazione $J=N-P$

$V = \{1, \dots, v\}$ insieme dei veicoli disponibili nei nodi facility; la dimensione della flotta dei veicoli non è limitata.

Al fine di definire il problema sono stati considerati i seguenti parametri:

- f_p flusso sul percorso $p \in P$
- K_j, h_j capacità e costo di localizzazione di una facility nel nodo $j, j \in J$
- $d_{oj,p}$ costo unitario di trasporto di un singolo veicolo sul percorso p , dal nodo origine o al nodo j dove viene intercettato

- c_{ij} costo di trasporto di un veicolo che percorre il routing finale dalla facility ai nodi di destinazione, i.e. from node i to node k , $i, k \in N$

Variabili decisionali:

- $y_j = \{0,1\}$ 1, se una facility che intercetta I flussi è localizzata nel nodo j , $j \in J$
0, altrimenti
- $x_{pj} = \{0,1\}$ 1, se un percorso p viene intercettato nel nodo j , $j \in N_p$
0, altrimenti
- $r_{ik}^v = \{0,1\}$ 1, se il nodo i precede il nodo k su un percorso dove viene utilizzato un veicolo v ,
 $i, k \in N$, $v \in V$
0, altrimenti
- $u_v = \{0,1\}$ 1, se un veicolo v viene utilizzato, $v \in V$
0, altrimenti

Modello matematico:

$$\text{Min } z = \sum_{i \in I} h_i y_i + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} f_p d_{oj,p} x_{pj} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} c_{ij} r_{ij}^v \quad (9.1)$$

sottoposto a:

$$x_{pj} \leq y_j \quad \forall p \in P, \forall j \in N_p \quad (9.2)$$

$$\sum_{j \in N_p} x_{pj} = 1 \quad \forall p \in P \quad (9.3)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in J \cup P} r_{ip}^v = 1 \quad \forall p \in P \quad (9.4)$$

$$\sum_{i \in J \cup P} r_{ih}^v - \sum_{k \in J \cup P} r_{hk}^v = 0 \quad \forall h \in J \cup P \quad (9.5)$$

$$\sum_{i \in J \cup P} \sum_{j \in J} r_{ij}^v \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (9.6)$$

$$L_i - L_k + N \cdot \sum_{v \in V} r_{ik}^v \leq N - 1 \quad \forall i, k \in J \cup P, i \neq k, \forall v \in V \quad (9.7)$$

$$\sum_{i \in N} r_{pi}^v + \sum_{k \in N} r_{jk}^v - x_{pj} \leq 1 \quad \forall p \in P, j \in J, \forall v \in V \quad (9.8)$$

$$\sum_{p \in P} f_p x_{pj} \leq K_j y_j \quad \forall j \in J \quad (9.9)$$

$$\sum_{p \in P} f_p \sum_{i \in J \cup P} r_{pi}^v \leq K_v u_v \quad \forall v \in V \quad (9.10)$$

$$y_j = \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad x_{pj} = \{0,1\}, \quad \forall p \in P, \forall j \in V_p \quad (9.11)$$

$$r_{ik}^v = \{0,1\}, \quad \forall i, k \in J \cup P, \forall v \in V,$$

$$u_v = \{0,1\}, \quad \forall v \in V, \quad L_i \{0,1\} \geq 0, \quad \forall i \in N$$

La funzione obiettivo (9.1) esprime la minimizzazione di tre componenti di costo: costo di localizzazione delle facility che intercettano i flussi, costo di trasporto dai nodi origine alle facility aperte e costo di routing dalle facility ai nodi destinazione.

I vincoli (9.2) sono vincoli di consistenza per l'intercettazione dei flussi; in particolare, se nessun nodo appartenente al percorso p contiene una facility (quindi tutte le y_j sono nulle), le variabili x_{pj} , $\forall j \in V_p$ devono necessariamente essere uguali a zero, in quanto non viene intercettato nessun flusso.

I vincoli (9.3) impongono che ciascun flusso lungo un percorso deve essere intercettato da una singola facility localizzata in un nodo appartenente al percorso; nel caso in cui un flusso sia intercettato da più facility verrà considerato una sola volta nella funzione obiettivo.

I vincoli (9.4) impongono che ciascuna destinazione p , $p \in P$ sia servita esattamente da un unico veicolo v , $v \in V$.

I vincoli (9.5) impongono che per ciascun veicolo v , $v \in V$ il numero di archi entranti nel nodo h , $h \in N$ sia uguale al numero di archi uscenti.

I vincoli (9.6) impongono che ciascun veicolo v , $v \in V$ deve essere assegnato ad un'unica facility j , $j \in N$.

I vincoli (9.7) sono vincoli per l'eliminazione dei sottogiri, dove L_i e L_j sono variabili continue non negative che impongono l'inclusione di almeno una facility in ciascun percorso effettuato da un veicolo.

I vincoli (9.8) sono vincoli di consistenza tra i flussi intercettati e le variabili di routing. Tali vincoli impongono che se una facility j^* e una destinazione p^* sono servite dallo

stesso veicolo p^* , allora i flussi con destinazione p^* vengono intercettati dalla facility j^* (quindi la destinazione p^* viene assegnata alla facility j^*)

I vincoli (9.9) e (9.10) sono vincoli di capacità rispettivamente per le facility e per i veicoli. Infine, i vincoli (9.11) impongono la non negatività e binarietà delle variabili del problema.

La soluzione del modello può essere rappresentata schematicamente come in Fig. 4.14; in particolare, il modello fornisce la localizzazione e il numero di facility sulla rete, in modo tale che siano intercettati tutti i flussi sulla rete e minimizzati i costi di trasporto dalle facility ai nodi destinazione.

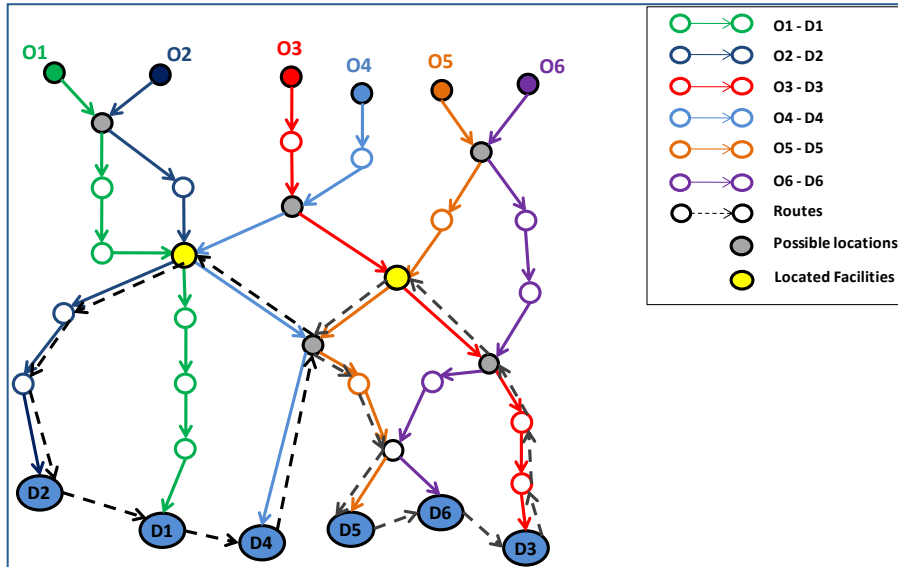


Fig.4.14 - Soluzione del problema FLIFLOR

4.6. Gli approcci risolutivi

La quasi totalità dei problemi di ottimizzazione combinatoriale è di tipo NP-hard. Anche se non è dimostrato in maniera formale, in letteratura si ritiene di poter catalogare problemi di questo tipo come intrattabili, cioè problemi che per l'individuazione della soluzione ottima, richiedono tempi di calcolo esponenziali al variare della dimensione del problema.

Sebbene siano stati fatti sensibili progressi nello sviluppo di tecniche esatte, la loro applicazione a problemi NP-hard comporta tempi di calcolo molto elevati e, in molti casi, non compatibili con i tempi di risposta richiesti. Per questi motivi si ricorre a metodi euristici di risoluzione. Mentre le tecniche esatte garantiscono il raggiungimento di una soluzione ottima, i metodi euristici o approssimati ricercano una buona soluzione del problema che non necessariamente sia tale, garantendo in compenso tempi di calcolo più contenuti. Gli algoritmi euristici si distinguono in algoritmi costruttivi e algoritmi migliorativi, o di ricerca locale; i primi costruiscono gradualmente la soluzione attraverso il passaggio per soluzioni parziali, i secondi partono da una soluzione del problema cercando di modificarla con l'obiettivo di ottenerne una migliore. Gli algoritmi di ricerca locale convergono in corrispondenza del primo minimo locale individuato; per superare tale limite sono state sviluppate tecniche definite metaeuristiche, tra queste verrà di seguito descritta la Tabu Search.

Algoritmi approssimati

Una classificazione dei metodi euristici riportata in letteratura (Gabor Nagy, Said Salhi, "Location-routing: issues, models and methods", 2006) è riferita al modo in cui gli algoritmi di risoluzione del modello mettono in relazione i due sub-problemi di localizzazione e di routing. In particolare:

- il metodo sequenziale (sequential method): tale approccio risolve prima il problema di localizzazione minimizzando la somma delle distanze tra le facility e i clienti e successivamente risolve il problema di routing basato sulla localizzazione delle facility aperte dal sub-problema precedente. Tale metodo non prevede feedback tra le due fasi di routing e di localizzazione;
- il metodo per cluster (clustering-based method): tale approccio viene inizializzato partizionando i clienti in due cluster: uno per i potenziali nodi deposito (o facility) e l'altro per i percorsi dei veicoli. Il metodo può poi procedere in due modi differenti: localizzare un deposito per ciascun cluster

per poi risolvere il problema di routing; risolvere il problema di routing per ciascun cluster per poi risolvere il problema di localizzazione;

- il metodo iterativo (iterative method): tale metodo risolve i due problemi, scomposti in due sotto-problemi, in maniera iterativa, scambiando informazioni a ciascuna iterazione, fino a che non sia soddisfatto un determinato criterio di arresto;
- il metodo gerarchico (hierarchical method): in tale metodo le due componenti non vengono considerate sullo stesso piano; in particolare viene riconosciuta una struttura gerarchica del problema generale, considerato praticamente come un problema di localizzazione, mettendo da parte gli aspetti relativi al routing. L'algoritmo di location procede fino alla fine per poi iniziare nuovamente, considerando la componente di routing. La differenza con l'approccio sequenziale consiste nel fatto che in questo caso il problema di routing viene risolto per ciascuna delle possibili soluzioni di location.

Per un problema di location-routing multilivello, le possibili combinazioni delle componenti aumentano, trattandosi di due problemi di location e due sottoproblemi di routing. L'approccio precedentemente descritto, va quindi adattato come segue:

- Approccio sequenziale: viene risolto il problema di location su due livelli con metodi euristici o esatti; successivamente vengono risolti in sequenza i due problemi di multi-depot vehicle routing iniziando dal livello più basso;
- Approccio per cluster: in questo caso ci sono due possibilità. La prima: si effettua una prima operazione di clustering sul primo livello per ricondurre il problema al caso in cui si risolve il location-routing su un singolo livello. Sono poi effettuate operazioni di clustering per assegnare i clienti ad una combinazione di piattaforme e satelliti ("big node"). Per ciascun "big node", relativamente ai clusters di clienti che gli sono stati assegnati, viene infine risolto il problema di routing. Il secondo metodo invece effettua le stesse operazioni di clustering in ordine inverso.
- Approccio iterativo: le quattro componenti del problema sono considerate sullo stesso livello. Quindi i due problemi di location ed i due problemi di

routing sono risolti in maniera iterativa scambiando informazioni ad ogni iterazione, fino a che non viene soddisfatto un certo criterio di arresto. In questo caso è fondamentale la definizione del meccanismo di scambio di informazioni;

- Approccio gerarchico: viene risolto più volte il problema di location su due livelli ottenendo diverse soluzioni. In seguito, vengono risolti in sequenza i due sottoproblemi di routing per ciascuna soluzione di location trovata su ciascun livello.

Nel paragrafo successivo è presentata la Tabu Search che opera scomponendo il problema in due problemi di location e due problemi di multi-depot vehicle routing. Questa euristica è basata su un approccio iterativo a due fasi, proposto da Tuzun e Burke, e su un approccio nidificato, proposto da Nagy e Sahly.

La Tabu Search

Il metodo di ricerca conosciuto come Tabu Search, fu formalizzato nel 1986 da F.Glover. Contrariamente ad altre euristiche, la Tabu Search è un metodo capace di indirizzare gli step successivi basandosi sull'utilizzo di strutture di memoria.

La Tabu Search opera su una configurazione alla volta che viene aggiornata durante le successive iterazioni. Ad ogni iterazione il meccanismo di passaggio da una configurazione S ad una configurazione S' , è basato su due step:

- Costruire un set di vicini di S , ossia un set di configurazioni ottenibili con una sola mossa elementare a partire da S . Indichiamo con $N(S)$ il set o i set dei vicini.
- Valutare la funzione obiettivo z del problema relativa a ciascun $N(S)$. La configurazione S' , che succede ad S nella serie delle soluzioni, è la configurazione di $N(S)$ in cui z assume il valore minimo (se il problema è a minimizzare).

Si osservi che comunque la soluzione S' è esplorata anche se è peggiore di S , cioè se $z(S') > z(S)$: grazie a questa particolarità il metodo ha un minor numero di probabilità di trovare un minimo locale. Questa procedura può rivelarsi controproducente, perchè si incorre nel rischio di ritornare ad una configurazione già raggiunta nelle precedenti iterazioni, generando così circoli viziosi. Per evitare quest'inconveniente, è necessario tenere memoria delle soluzioni visitate nelle ultime iterazioni per evitare

di prenderle nuovamente in considerazione. A questo scopo, ad ogni iterazione, viene aggiornata la lista dei movimenti proibiti detta Tabu List: essa contiene m mosse ($S' \rightarrow S$), che sono esattamente l'opposto delle ultime m mosse effettuate ($S \rightarrow S'$). Così facendo, la struttura del set dei vicini di una soluzione dipende dall'iterazione corrente; per esempio ad ogni iterazione k il set dei vicini sarà $N(S,k)$ incluso in $N(S)$, perchè saranno state rimosse delle soluzioni da $N(S)$, in quanto ritenute Tabu. Le mosse Tabu verranno accettate solo nel caso in cui esse migliorino il valore della funzione obiettivo (criterio di aspirazione).

Una scelta più immediata, può essere la memorizzazione di tutte le soluzioni visitate durante il processo di ricerca, ma una procedura di questo tipo, richiederebbe l'utilizzo di troppa memoria, rendendo le operazioni di controllo più lente.

Per questo motivo, nell'operazione di memorizzazione delle mosse tabu, si richiedono delle informazioni, che prendono il nome di *attributi*: essi compariranno nella Tabu List indicando quali sono le mosse da non ripetere. La lista in questione, rappresenta la memoria a breve termine dell'algoritmo, in quanto fa riferimento alle ultime iterazioni dell'algoritmo.

Esistono inoltre due meccanismi addizionali, detti intensificazione e diversificazione, che spesso vengono implementati per conferire all'algoritmo più "memoria".

L'intensificazione consiste in una ricerca più fitta in alcune regioni dello spazio delle soluzioni, identificate come particolarmente promettenti. La diversificazione consiste al contrario, in un periodico reindirizzamento del processo di ricerca verso soluzioni raramente visitate. Questi processi, non sfruttano la prossimità temporale delle soluzioni, ma la loro frequenza su un lungo arco di tempo.

Quindi la Tabu Search è una procedure metaeuristica che migliora l'efficienza di una classica euristica di ricerca locale, memorizzando informazioni circa il processo di ricerca allo scopo di evitare la formazioni di loop attorno ad un ottimo locale. D'altra parte essa però non garantisce nessun tipo di convergenza richiedendo quindi un criterio di arresto.

Per concludere, sintetizziamo di seguito i principali step della Tabu Search:

- Inizializzazione: vengono determinate una soluzione iniziale S cui è associato il relativo valore della funzione obiettivo, o una sua stima.
- Definizione di un set di vicini e selezione: alla generica iterazione k , si definisce un intorno della soluzione $N(S,k)$ della corrente soluzione S , e si sostituisce ad essa la soluzione S' contenuta in $N(S,k)$ associata al miglior valore di funzione obiettivo.

- Criterio di arresto: se un certo criterio viene soddisfatto l'algoritmo termina, altrimenti si pone $k=k+1$ e si ritorna allo step 2. La soluzione finale è la migliore soluzione trovata durante tutto il processo di ricerca.

Il Software X-press

Il software X-press-MP consente di risolvere problemi di ottimizzazione attraverso la costruzione e la successiva risoluzione di modelli, a seconda dei campi di applicazione. Si tratta di un software le cui caratteristiche generali possono essere sintetizzate come di seguito:

- presenza di un'interfaccia *user-friendly*;
- ricorso ad un linguaggio di programmazione semplice che consente l'implementazione di modelli matematici e semplici algoritmi euristici;
- possibilità di chiamata da C/C++.

Il linguaggio di X-press-MP permette all'utente di definire i suoi modelli in una forma molto simile alla normale notazione algebrica e di risolvere il modello restando nello stesso ambiente applicativo; inoltre l'ambiente di sviluppo integrato X-Press-IVE consente anche la rappresentazione grafica delle soluzioni trovate.

Di seguito sono illustrate le soluzioni di alcuni tra i principali problemi di ottimizzazione di logistica distributiva, così come vengono sviluppate mediante il software X-Press.

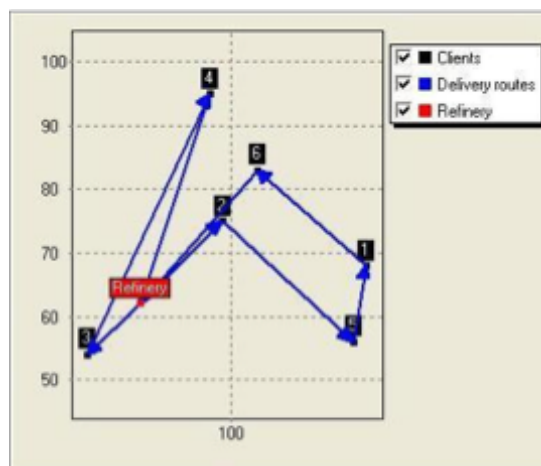


Fig. 4.16 . Esempio di soluzione grafica per un problema di Vehicle Routing

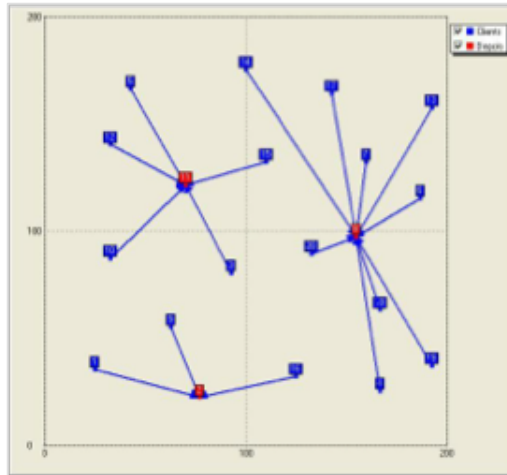


Fig. 4.17 - Esempio di soluzione grafica per un problema di p-mediana ($p=3$)

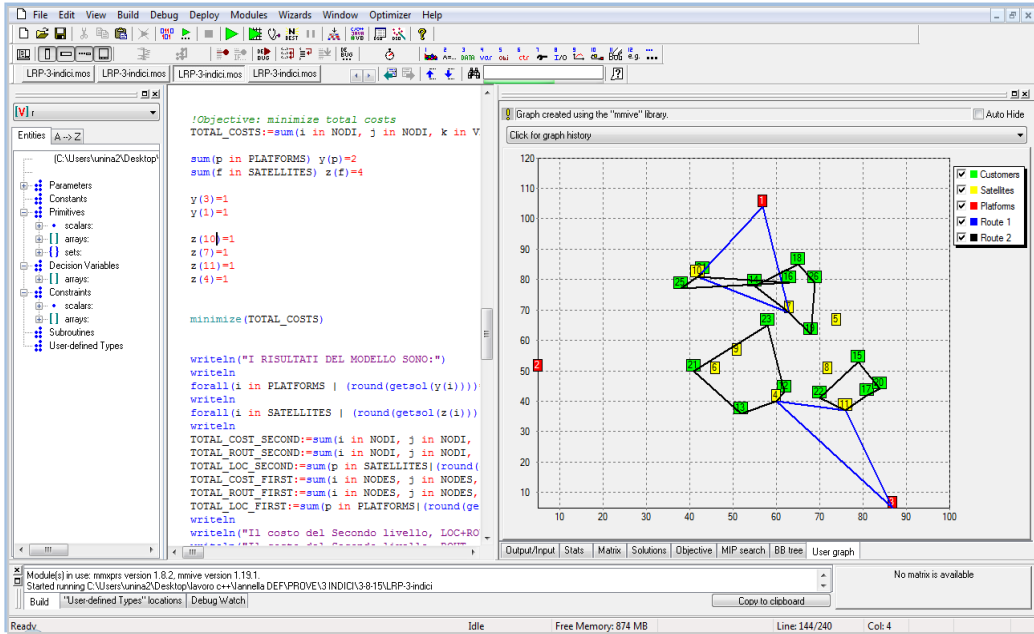


Fig. 4.18 . Esempio di soluzione grafica per un problema di location-routing

Capitolo 5 – Un caso di studio

5.1 Applicazione di un modello di location-routing per la localizzazione di Transit Point nell'area urbana di Napoli

Il caso di studio riguarda un'ipotesi di localizzazione di "transit point" a supporto del sistema distributivo nella città di Napoli e l'individuazione dei percorsi dei veicoli per servire i clienti finali. Il problema è stato affrontato mediante un modello di location-routing su un livello ed è stato risolto mediante l'ausilio del software di ottimizzazione X-press-MP della FICO.

L'area di studio è rappresentata dai confini amministrativi del Comune di Napoli che è suddiviso in 10 Municipalità per un totale di 30 quartieri (Fig.5.1). In Fig. 5.2, sono riportati, per ciascuna Municipalità e per ogni quartiere, i dati di popolazione, superficie e densità abitativa. Tali dati sono stati utilizzati sia per l'identificazione dei "nodi clienti" appartenenti alla rete commerciale costruita, che per la stima della domanda di merce da parte degli stessi.

La costruzione della rete di base, necessaria per testare il modello, è stata effettuata a partire da informazioni sull'assetto territoriale dell'area (caratteristiche della rete stradale, disponibilità di aree per le potenziali localizzazioni dei transit point) e dai dati relativi alla domanda dell'intero comune, resi disponibili dall'analisi condotta da Uniontrasporti nel 2008, nell'ambito dello studio: "City Logistics. Strategie di intervento per il rifornimento della rete commerciale al dettaglio, proposta di transit point urbani per la Provincia di Napoli".

E' quindi da specificare che, nel caso di studio, si è cercato di ricostruire un possibile scenario di ottimizzazione del sistema distributivo per il commercio al dettaglio che sia quanto più aderente possibile alla realtà. Si tratta, quindi, di un primo studio che avrà bisogno di opportuni approfondimenti e di verifiche, soprattutto per quanto riguarda i siti individuati per le potenziali localizzazioni dei transit point, che dovranno poi tener conto di vincoli di carattere urbanistico, territoriale, infrastrutturale, ambientale etc..

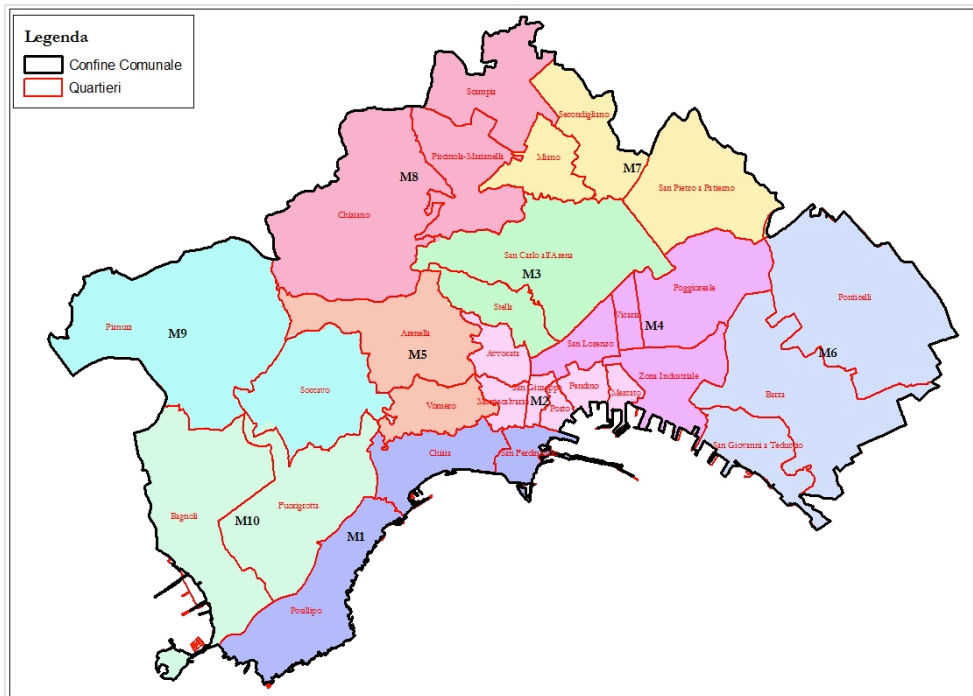
La rete è stata strutturata attraverso l'identificazione:

- dei nodi clienti;
- delle possibili localizzazioni dei nodi transit point;
- degli archi (possibili collegamenti tra i nodi clienti e i transit point).

I principali dati necessari per l'implementazione del modello sono:

- la domanda giornaliera (espressa in numero di colli/giorno) da parte dei nodi clienti;

- la capacità dei nodi transit point;
- la matrice delle distanze tra tutti i nodi della rete;
- la capacità dei veicoli.



Municipalità 1	Municipalità 2	Municipalità 3	Municipalità 4	Municipalità 5
San Ferdinando Chiaia Posillipo	San Giuseppe Montecalvario Avvocata Mercato Pendino Porto	Stella S. Carlo all'Arena	Vicaria San Lorenzo Poggioreale Zona Industriale	Vomero Arenella
Municipalità 6	Municipalità 7	Municipalità 8	Municipalità 9	Municipalità 10
Ponticelli Barra S.Giovanni a Teduccio	Miano Secondigliano S.Pietro a Paterno	Chiaiano Piscinola-Marianella Scampia	Soccavo Pianura	Bagnoli Fuorigrotta

Fig. 5.1 – Area di studio: il Comune di Napoli (Municipalità e quartieri)

		TOTALI PER QUARTIERE		
Municipalità	QUARTIERE	Popolazione (ab)	Superficie (kmq)	Densità (a b/kmq)
1	Chiaia	41.423	2,71	15.285
	Posillipo	21.311	5,17	4.122
	San Ferdinando	17.939	0,92	19.499
	Tot. Municipalità	80.673	8,8	9.167
2	Avvocata	34.002	1,22	27.870
	Montecalvario	25.167	0,75	33.556
	San Giuseppe	5.587	0,43	12.993
	Porto	4.507	1,14	3.954
	Mercato	11.062	0,39	28.364
	Pendino	14.078	0,63	22.346
	Tot. Municipalità	94.403	4,56	20.702
3	Stella	29.899	1,87	15.989
	S. Carlo all'Arena	71.464	7,64	9.354
	Tot. Municipalità	101.363	9,51	10.659
4	San Lorenzo	51.968	1,42	36.597
	Vicaria	15.373	0,72	21.351
	Poggioreale	24.806	4,45	5.574
	Zona Industriale	6.066	2,68	2.263
	Tot. Municipalità	98.213	9,27	10.595
5	Arenella	71.745	5,25	13.666
	Vomero	43.847	2,17	20.206
	Tot. Municipalità	115.592	7,42	15.578
6	Barra	38.382	7,82	4.908
	Ponticelli	53.402	9,11	5.862
	S. Giovanni a Teduccio	25.447	2,35	10.829
	Tot. Municipalità	117.231	19,28	6.080
7	Miano	26.118	1,87	13.967
	S. Pietro a Patierno	18.091	5,45	3.319
	Secondigliano	46.393	2,94	15.780
	Tot. Municipalità	90.602	10,26	8.831
8	Chiaiano	22.923	9,67	2.371
	Piscinola-Marianella	28.296	3,55	7.971
	Scampia	40.860	4,23	9.660
	Tot. Municipalità	92.079	17,45	5.277
9	Pianura	58.176	11,45	5.081
	Soccavo	47.823	5,11	9.359
	Tot. Municipalità	105.999	16,56	6.401
10	Bagnoli	25.579	7,96	3.213
	Fuorigrotta	73.437	6,2	11.845
	Tot. Municipalità	99.016	14,16	6.993
	Totali	995.171	117,27	397.153

Fig. 5.2 – Dati di popolazione, superficie e densità abitativa per il Comune di Napoli

L'identificazione dei punti di domanda (nodi clienti) è stata effettuata selezionando i quartieri della città che presentano una maggiore densità commerciale, nell'ipotesi che quest'ultima sia proporzionale alla densità abitativa. In particolare, i quartieri scelti (15) per la localizzazione dei nodi domanda sono i seguenti:

- Chiaia, San Ferdinando (Municipalità 1);
- Avvocata, Montecalvario, Pendino, Porto, San Giuseppe (Municipalità 2);
- Stella, San Carlo all'Arena (Municipalità 3);

- San Lorenzo, Vicaria (Municipalità 4);
- Vomero, Arenella (Municipalità 5);
- Soccavo (Municipalità 9);
- Fuorigrotta (Municipalità 10).

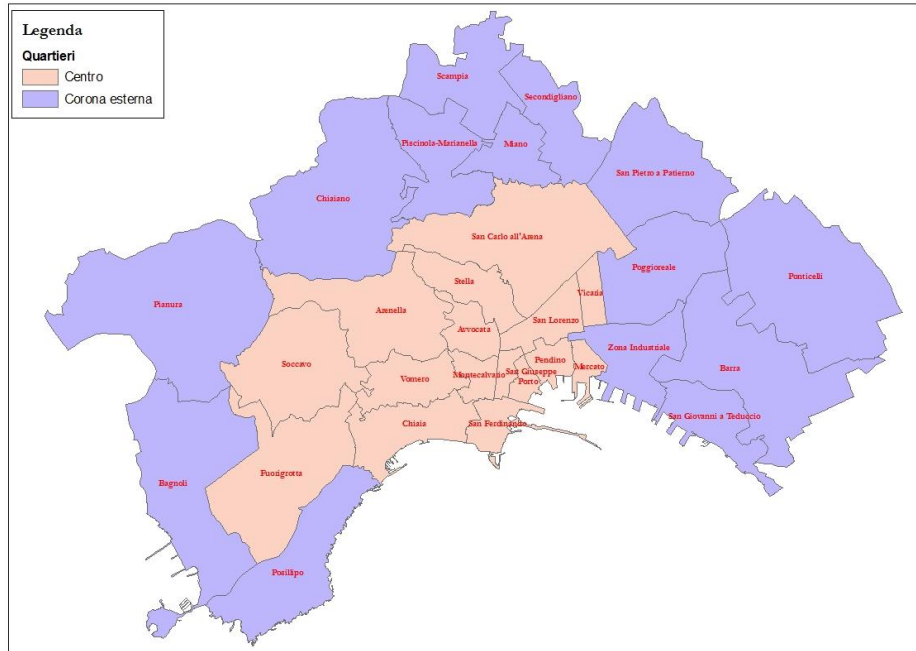


Fig. 5.3 – Quartieri identificati per la localizzazione dei punti di domanda (zona centro) e corona esterna

In Fig.5.3 è riportata una rappresentazione dell’area di studio, sulla quale è messa in evidenza l’area in cui è stata collocata la distribuzione dei punti di domanda. Si può notare che la zona centrale risulta nettamente distinta dalla cintura territoriale esterna della città.

Successivamente, a partire dalla suddivisione dei quartieri in particelle censuarie e, considerando sempre il dato relativo alla densità abitativa (dati ISTAT, 2001), sono stati identificati 101 punti di domanda. E’ stato ipotizzato, pertanto, il posizionamento di un solo nodo di domanda per ciascuna particella censuaria considerata. Le particelle prese in esame sono quelle a maggiore densità abitativa, nell’ipotesi generale che vi sia una relazione di proporzionalità diretta tra la densità abitativa e quella commerciale.

In Fig. 5.4 è riportato il numero di nodi di domanda identificati per ciascun quartiere appartenente all’area centrale della città. Si può notare che la maggiore

concentrazione di punti di domanda interessa i quartieri Vomero, Chiaia, Fuorigrotta e Soccavo.

Municipalità	Quartiere	Numero nodi di domanda
1	Chiaia	16
	San Ferdinando	7
2	Avvocata	2
	Montecalvario	7
	Pendino	4
	Porto	2
	San Giuseppe	5
3	Stella	2
	San Carlo all'Arena	2
4	San Lorenzo	6
	Vicaria	2
5	Vomero	14
	Arenella	4
9	Soccavo	12
10	Fuorigrotta	16
Totale nodi di domanda individuati		101

Fig. 5.4 – Numero di nodi di domanda per ciascun quartiere selezionato

Per quanto riguarda l'individuazione delle possibili localizzazioni per i transit point, la fascia territoriale esterna dell'area di studio risulta la più indicata (corona esterna cfr. Fig.5.3).

I criteri utilizzati per la scelta dei siti sono i seguenti:

- disponibilità di superficie effettiva per accogliere e movimentare la merce destinata ai clienti finali;
- accessibilità, in termini di posizionamento strategico rispetto ai principali assi stradali e autostradali (tenendo conto, in tal modo, anche della posizione rispetto ai nodi intermodali del Sistema Logistico Campano - Fig. 5.5).

L'individuazione delle potenziali localizzazioni dei transit point è stata effettuata mediante l'ausilio del software GIS TransCad.

I quartieri risultati idonei per le possibili localizzazioni dei transit point sono:

- Poggioreale (Municipalità 4)
- Ponticelli, Barra, San Giovanni a Teduccio (Municipalità 6)
- Miano, Secondigliano (Municipalità 7)
- Chiaiano, Scampia, Piscinola-Marianella (Municipalità 8)
- Pianura (Municipalità 9)

- Bagnoli (Municipalità 10).

In Fig. 5.6 si riporta la distribuzione territoriale dei punti di domanda (101 nodi) nella zona centrale della città e dei nodi potenziali per la localizzazione dei transit point (21 nodi) nei bacini urbani esterni all'area centrale.

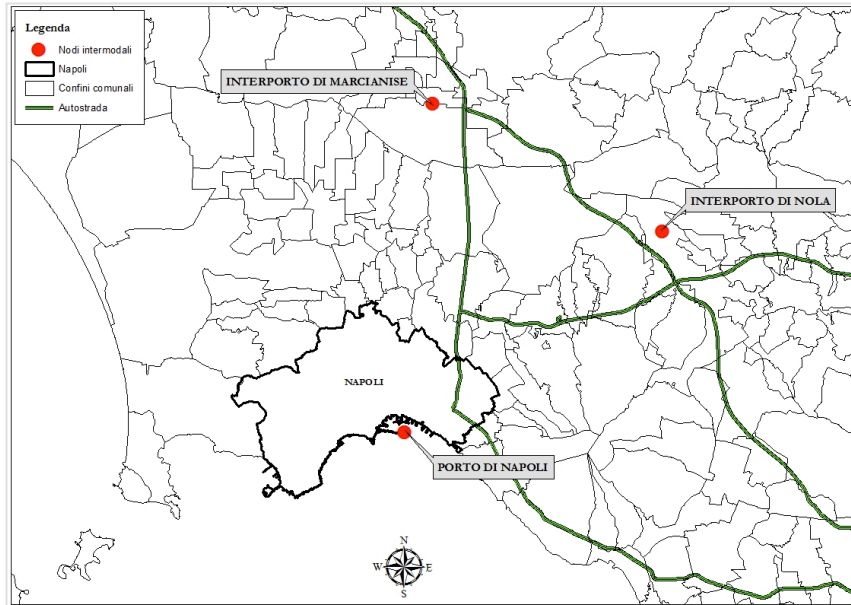


Fig. 5.5 – Localizzazione dei principali nodi intermodali del Sistema Logistico Campano rispetto all'area di studio

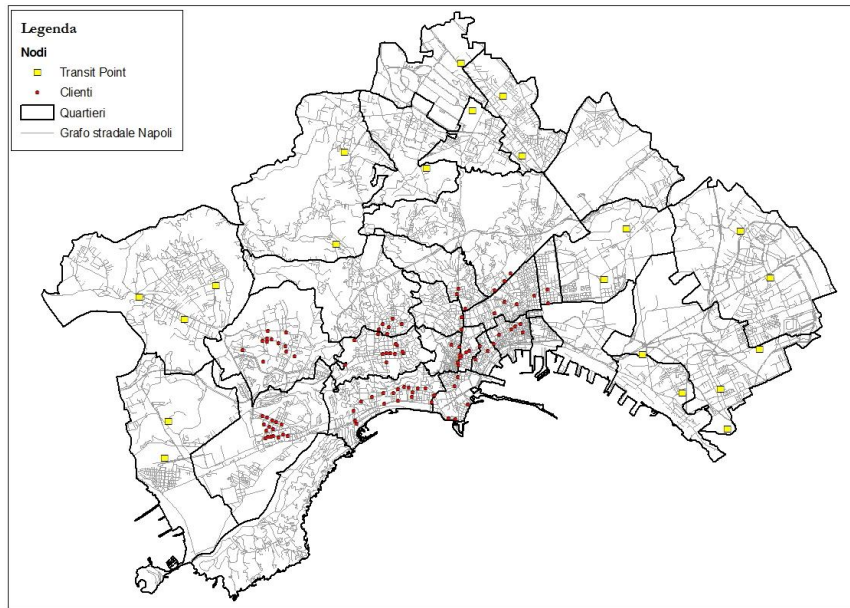


Fig. 5.6 – Localizzazione dei nodi di domanda e dei possibili nodi transit point

La capacità dei nodi transit point è stata calcolata utilizzando un parametro di dimensionamento fornito dallo studio di Uniontrasporti. In particolare, il numero massimo di colli per mq che ciascun sito può ospitare è all'incirca pari a 3 colli/mq. In Fig. 5.7, si riporta la stima delle capacità per ciascuno dei 21 nodi transit point.

Codice Transit Point	Quartiere	Superficie (mq)	Capacità (num. colli)
1	Bagnoli	2024	6073
2	Pianura	2020	6060
3	Pianura	1603	4810
4	Chiaiano	563	1690
5	Scampia	3499	10496
6	Secondigliano	3600	10800
7	Poggioreale	3077	9232
8	Ponticelli	2343	7030
9	Barra	1514	4543
10	Ponticelli	775	2326
11	Poggioreale	1104	3313
12	Miano	3908	11725
13	Piscinola-Marinella	898	2694
14	Bagnoli	3360	10080
15	Pianura	1161	3482
16	Secondigliano	2586	7757
17	S. Giovanni a Teduccio	2264	6791
18	Barra	2374	7121
19	Barra	982	2947
20	Barra	2067	6200
21	Chiaiano	1104	3311

Fig. 5.7 – Stima della superficie e della capacità dei potenziali nodi transit point

Per quanto riguarda la stima della domanda, si riportano, di seguito, alcuni dati ritenuti significativi forniti dallo studio di Uniontrasporti, relativi all'intera Provincia di Napoli. In particolare, il numero totale di Unità Locali prese in considerazione nello studio, perché non già dotate di un'organizzazione specifica per il rifornimento, è pari a 30.696; il 40% di questi esercizi è localizzato sul territorio comunale della città di Napoli (12.278 UL).

A seguito di indagini campionarie, le diverse tipologie merceologiche analizzate nello studio sono state raggruppate come segue:

- abbigliamento e tessuti (30% del totale)
- alimentari (20%)
- prodotti per casa e ufficio (11%)
- mobili ed oggetti di antiquariato (5%)
- elettrodomestici ed elettronica (4%).

Inoltre, il numero di colli consegnati in un giorno nel Comune di Napoli è pari a 40.430 colli/giorno, dove per colli si intende il tipo di imballaggio prevalentemente utilizzato per contenere la merce da consegnare (pallet, roll/carrello, cassa di legno, scatola/pacco di cartone, sacco/fusto etc.). Per le merci rifornite con periodicità giornaliera vengono utilizzati sacchi/fusti per il 29%, scatole per il 29% e mix/sfusi sempre per circa il 29%.

La domanda per ciascun nodo cliente appartenente alla rete è stata quindi quantificata in numero di colli consegnati in un giorno, per le merci rifornite con periodicità giornaliera.

La stima del numero di colli/giorno che potenzialmente ciascun quartiere potrebbe richiedere, nell'ipotesi che il comportamento dei clienti sia costante nel tempo e che quindi il numero di colli ricavato dall'indagine di Uniontrasporti possa essere rappresentativo della domanda futura, è stata effettuata ipotizzando la proporzionalità diretta tra la domanda stessa e la densità abitativa. In Fig. 5.8 è riportata la stima della domanda distribuita per ciascun quartiere della città. In particolare, il numero di colli/giorno consegnati nella città di Napoli è stato moltiplicato, per ciascun quartiere, per una frazione avente al numeratore la densità abitativa di quel singolo quartiere e al denominatore la somma delle densità di tutti i quartieri del Comune.

Municipalità	Quartiere	Numero di colli richiesto rispetto alla densità abitativa
1	Chiaia	1556
	Posillipo	420
	San Ferdinando	1985
2	Avvocata	2837
	Montecalvario	3416
	San Giuseppe	1323
	Porto	403
	Mercato	2887
	Pendino	2275
3	Stella	1628
	S. Carlo all'Arena	952
4	S. Lorenzo	3726
	Vicaria	2174
	Poggioreale	567
	Zona Industriale	230
5	Arenella	1391
	Vomero	2057
6	Barra	500
	Ponticelli	597
	S. Giovanni a Teduccio	1102
7	Miano	1422
	S. Pietro a Patierno	338
	Secondigliano	1606
8	Chiaiano	241
	Piscinola-Marianella	811
	Scampia	983
9	Pianura	517
	Soccavo	953
10	Bagnoli	327
	Fuorigrotta	1206
Numero totale di colli		40430

Fig. 5.8 – Stima della domanda: numero di colli/giorno richiesti per quartiere

La domanda di ciascun nodo cliente identificato (101 nodi) è stata calcolata ipotizzando che tutta la domanda del quartiere sia concentrata esclusivamente nei nodi clienti in esso individuati. Inoltre, la ripartizione della domanda tra i vari nodi clienti appartenenti al singolo quartiere è stata stimata come segue:

- la densità abitativa del singolo nodo (corrispondente, secondo l'ipotesi precedentemente effettuata, alla densità della rispettiva particella censuaria) è stata divisa per la somma delle densità associate a tutti i nodi appartenenti allo stesso quartiere; tale valore rappresenta la frazione di domanda di ciascun nodo rispetto alla domanda totale del quartiere;
- la frazione di domanda di ciascun nodo è stata moltiplicata per il numero di colli totali del quartiere considerato (già pesato rispetto alla densità abitativa del quartiere).

In Fig.5.9 è riportata la stima della domanda espressa in numero di colli al giorno richiesti da ciascun nodo cliente individuato sulla rete.

La domanda totale espressa dai nodi clienti individuati, localizzati nella zona “centro” della città, è quindi pari a 27.882 colli/giorno.

COD	Quartieri	Domanda (colli/giorno)	COD	Quartieri	Domanda (colli/giorno)
0	Pendino	150	51	Chiaia	113
1	San Giuseppe	353	52	Chiaia	48
2	San Giuseppe	301	53	San Ferdinando	302
3	Montecalvario	229	54	San Ferdinando	85
4	Montecalvario	302	55	San Ferdinando	239
5	Pendino	507	56	San Ferdinando	426
6	San Giuseppe	342	57	San Ferdinando	184
7	San Giuseppe	81	58	San Ferdinando	573
8	Montecalvario	2128	59	Montecalvario	232
9	Arenella	187	60	Montecalvario	61
10	Arenella	587	61	Porto	108
11	Vomero	191	62	Porto	295
12	Arenella	393	63	Montecalvario	368
13	Vomero	95	64	Montecalvario	96
14	Vomero	346	65	San Giuseppe	246
15	Vomero	289	66	Arenella	224
16	Vomero	235	67	Vomero	107
17	Vomero	59	68	Vomero	85
18	Soccavo	129	69	Vomero	125
19	Soccavo	44	70	Vomero	119
20	Soccavo	60	71	Vomero	157
21	Soccavo	54	72	Vomero	37
22	Soccavo	12	73	Vomero	103
23	Soccavo	35	74	Vomero	110
24	Soccavo	31	75	Chiaia	342
25	Soccavo	105	76	Chiaia	88
26	Soccavo	129	77	Chiaia	132
27	Soccavo	275	78	Chiaia	61
28	Soccavo	60	79	San Lorenzo	535
29	Soccavo	19	80	San Lorenzo	240
30	Fuorigrotta	67	81	San Lorenzo	873
31	Fuorigrotta	63	82	Stella	917
32	Fuorigrotta	57	83	Avvocata	1752
33	Fuorigrotta	63	84	Avvocata	1085
34	Fuorigrotta	75	85	Stella	711
35	Fuorigrotta	72	86	San Lorenzo	804
36	Fuorigrotta	54	87	San Carlo all'Arena	70
37	Fuorigrotta	62	88	San Carlo all'Arena	882
38	Fuorigrotta	45	89	Vicaria	1178
39	Fuorigrotta	99	90	Vicaria	996
40	Fuorigrotta	162	91	San Lorenzo	969
41	Fuorigrotta	203	92	Chiaia	42
42	Fuorigrotta	54	93	Chiaia	64
43	Fuorigrotta	30	94	Chiaia	63
44	Fuorigrotta	58	95	Chiaia	79
45	Fuorigrotta	42	96	Chiaia	139
46	San Ferdinando	176	97	Chiaia	95
47	Chiaia	122	98	Pendino	1311
48	Chiaia	51	99	San Lorenzo	305
49	Chiaia	44	100	Pendino	308
50	Chiaia	74			

Fig. 5.9 – Stima della domanda: numero di colli/giorno richiesti da ciascun nodo cliente

Il problema di location-routing è stato risolto ipotizzando due settori merceologici: gli alimentari secchi e altri prodotti per la casa e ufficio. È stata quindi ricalcolata la domanda di ciascun nodo cliente ipotizzando che in ciascuno di essi sia presente almeno un esercizio commerciale relativo alle tipologie merceologiche in questione. L'aliquota di esercizi commerciali per il genere alimentari "secchi" e altri prodotti per la casa, secondo quanto stimato nello studio di Uniontrasporti, è pari a circa il 30% del totale degli esercizi commerciali. Pertanto, la domanda per ciascun nodo cliente è stata ricalcolata considerando solo tale aliquota. La selezione delle due tipologie merceologiche tiene conto anche del fatto che, su ciascun veicolo, la merce trasportata deve avere dimensioni e tipologia dei packaging compatibili. Per definire la capacità dei veicoli è stato considerato un furgone di medie dimensioni, compatibile con le consegne destinate al centro cittadino, che possa trasportare circa 200 colli/consegna. In particolare, le dimensioni del furgone sono pari a: $4.2 \times 2.2 \times 2.23$ m (circa 21 m^3), mentre quelle del singolo collo sono pari a $0.6 \times 0.4 \times 0.3$ m (0.072 m^3); ipotizzando una percentuale di carico pari al 75%, il numero di colli trasportati da ciascun veicolo è pari a circa 200.

Un altro dato di input necessario per l'implementazione del modello di location-routing è rappresentato dalle matrici dei costi associati agli archi della rete, espressi in termini di distanze. Precisamente, sono state costruite due matrici di costo, la prima che rappresenta le distanze tra i potenziali nodi transit point e i clienti (matrice 21×101), la seconda che rappresenta le distanze tra tutti i nodi clienti della rete (101×101). Le matrici dei costi sono state calcolate tramite elaborazioni con sistema GIS sulla base del grafo stradale del Comune di Napoli (matrice dei minimi percorsi).

La soluzione del problema di location-routing è stata ottenuta con l'utilizzo del software X-press-MP. Per i vincoli di assenza di sottogiri è stata utilizzata una procedura di cut generation sviluppata dal gruppo di Ricerca Operativa del DIETI. Ipotizzando una certa disponibilità di risorse finanziarie per la costruzione degli impianti, è stata ipotizzata una disponibilità finanziaria che consentisse l'apertura di sei impianti. Quindi, nel modello di location-routing è stato aggiunto un ulteriore vincolo per imporre l'apertura di sei transit point. Pertanto, nella funzione obiettivo del modello compaiono solo i costi di routing.

Il modello determina i nodi nei quali localizzare i transit point e assegna a ciascuno di essi i propri clienti.

In Fig.5.10 è riportata sulla mappa urbana la soluzione ottenuta per la localizzazione dei sei transit point nei bacini periferici, indicando i clienti serviti con lo stesso colore

dell’impianto aperto. In Fig.5.11 è riportata la restituzione grafica della soluzione operata dal software X-Press.

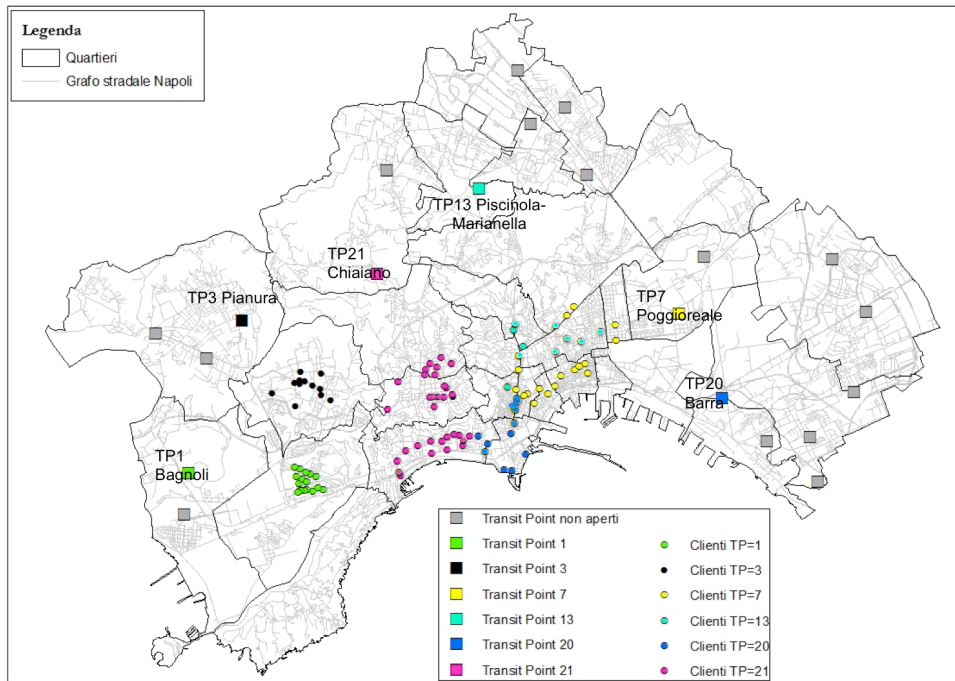


Fig. 5.10 – Localizzazione dei transit point e assegnamento dei clienti

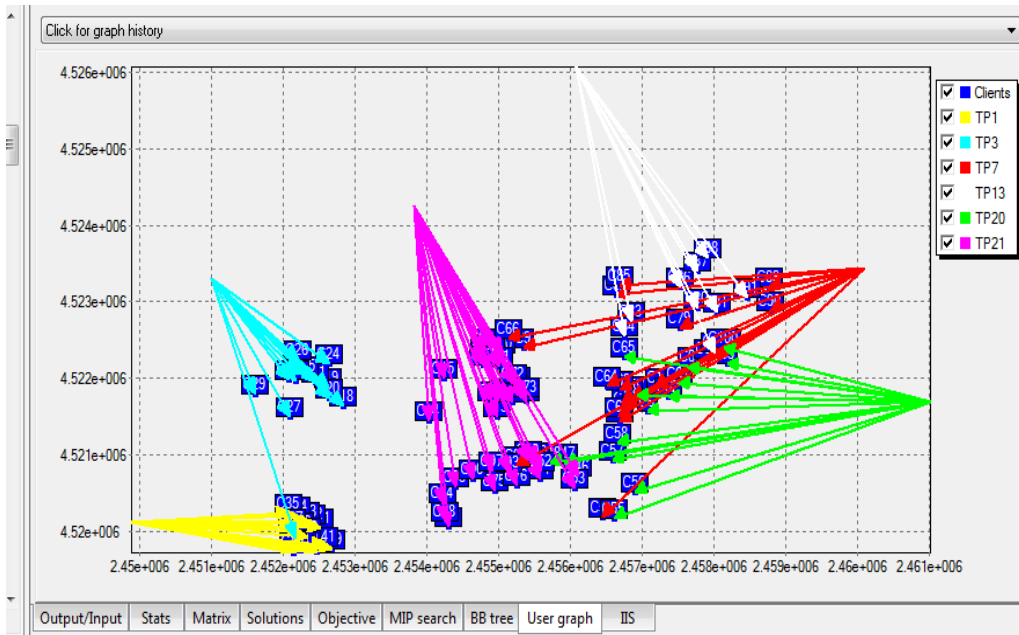


Fig. 5.11 – Software X-press-MP: localizzazione dei 6 nodi transit point e afferenza dei nodi clienti

E' stata effettuata anche la sperimentazione relativa all'apertura di 5, 4 e 3 impianti. I risultati sono riportati nelle Fig.5.12-5.14 relative alla restituzione grafica del software X-Press che mostra le afferenze degli impianti ai clienti.

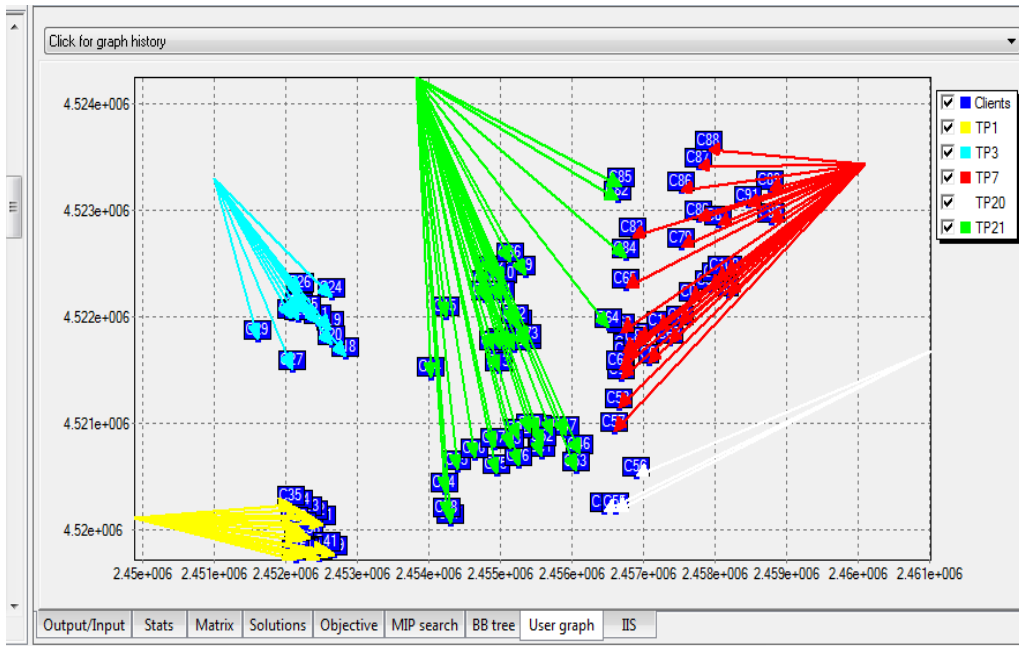


Fig. 5.12 – Software X-press-MP: localizzazione dei 5 nodi transit point e afferenza dei nodi clienti

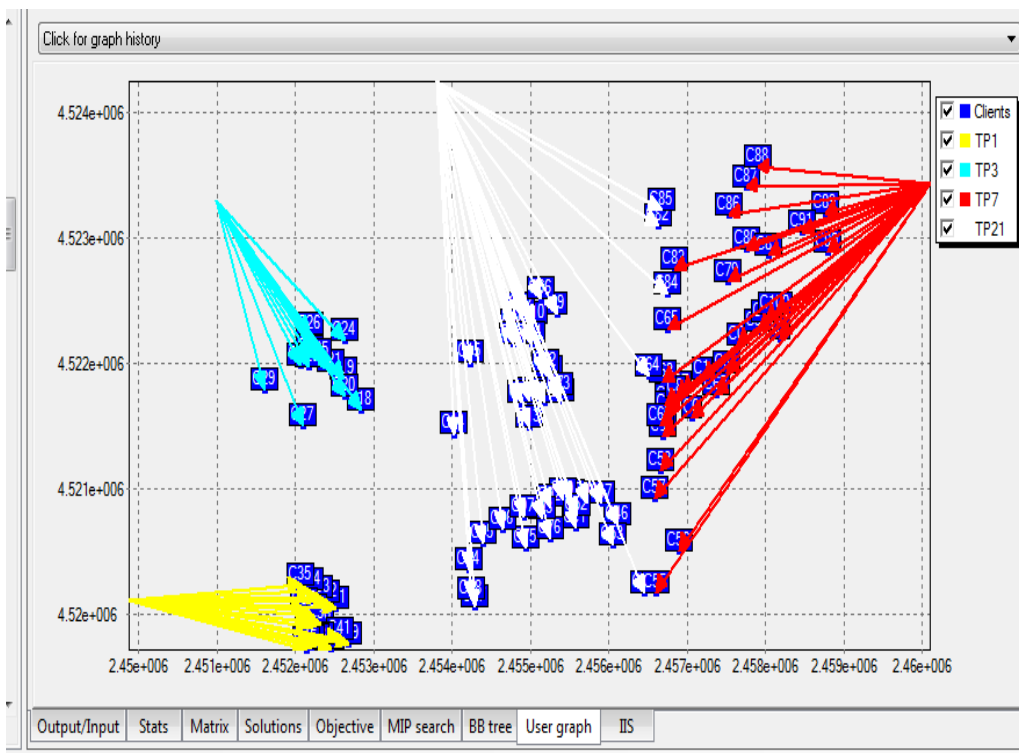


Fig. 5.13 – Software X-press-MP: localizzazione dei 4 nodi transit point e afferenza dei nodi clienti

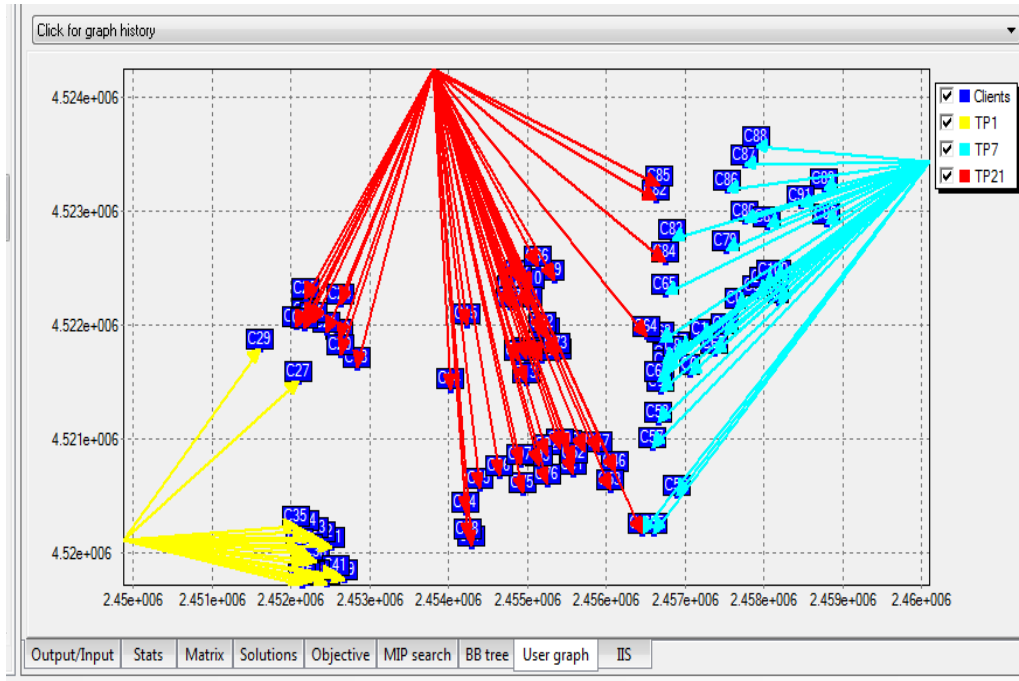


Fig. 5.14 – Software X-press-MP: localizzazione dei 3 nodi transit point e afferenza dei nodi clienti

Per la soluzione con 6 impianti nelle Fig.5.15-5.20 si riportano i circuiti di routing separatamente per i sei impianti.

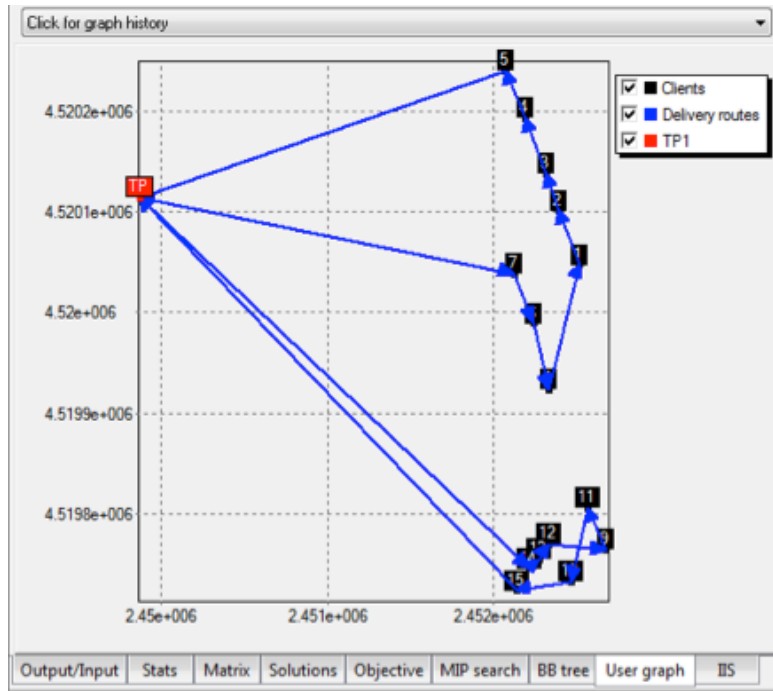


Fig. 5.15 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 1

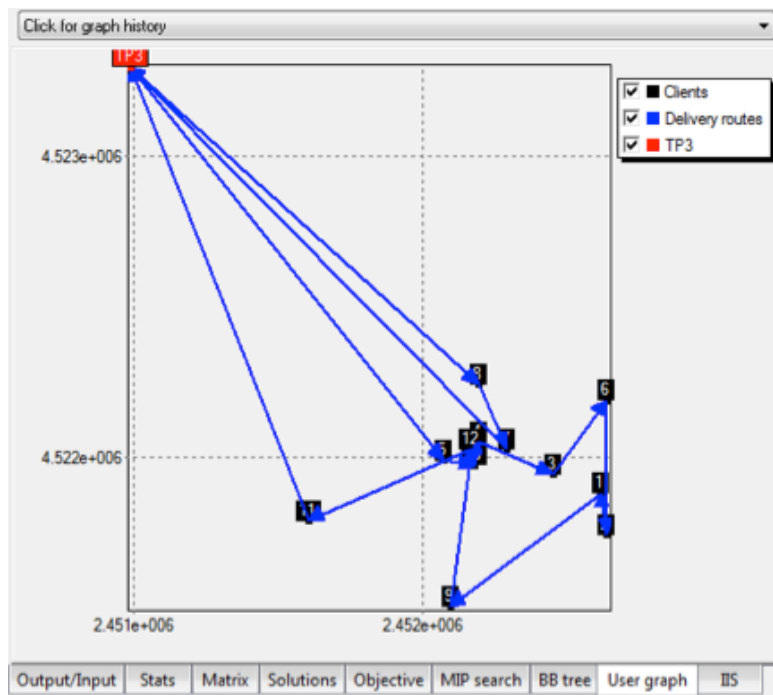


Fig. 5.16 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 3

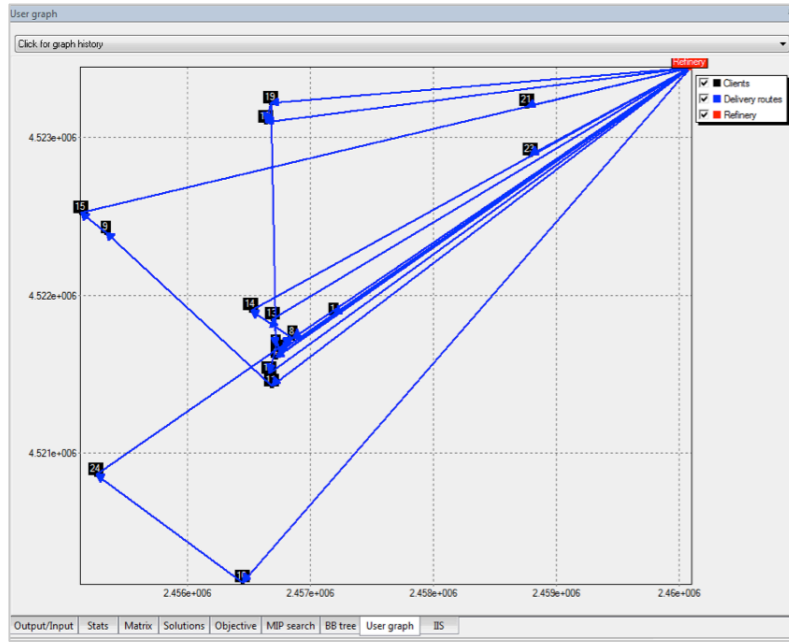


Fig. 5.17 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 7

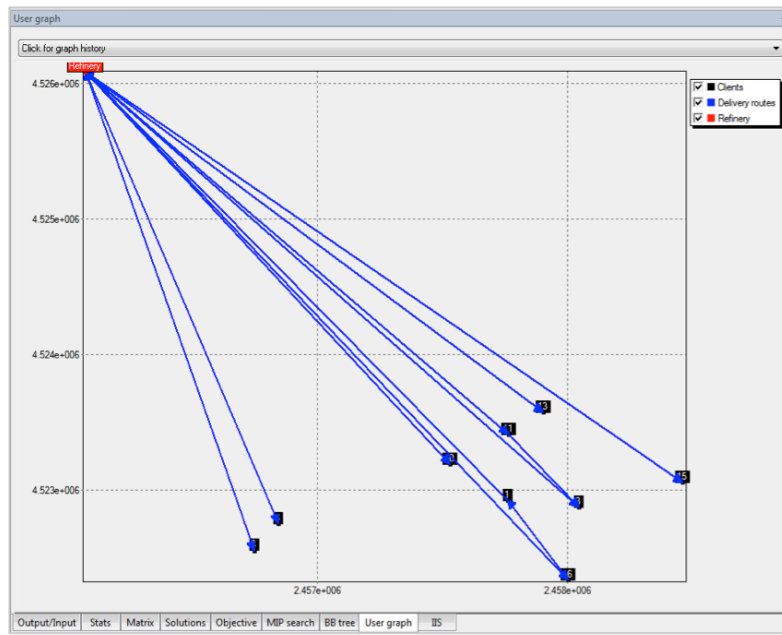


Fig. 5.18 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 13

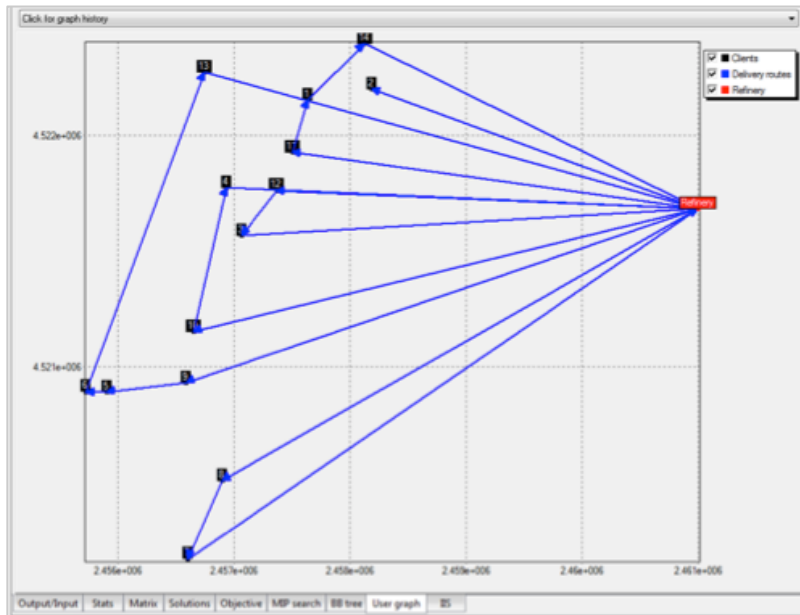


Fig. 5.19 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 20

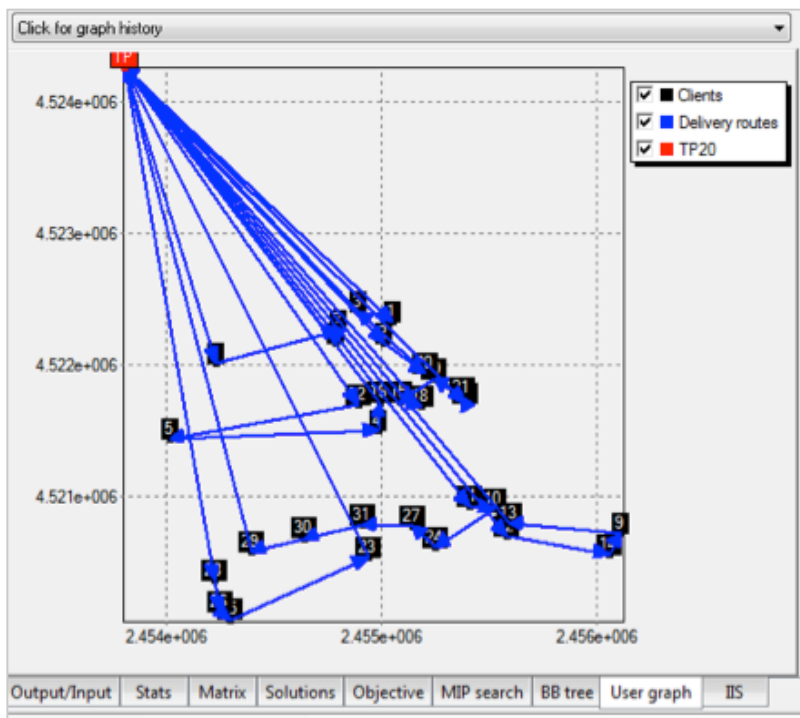


Fig. 5.20 – Routing dei veicoli afferenti al transit point 21

Infine, in Fig.5.21 si riporta un quadro riepilogativo della soluzione ottenuta. In particolare, per ciascun nodo transit point localizzato sono indicati il numero di nodi afferenti, la domanda servita, la capacità dei nodi stessi, il numero di veicoli e di route.

Codice TP	Quartiere	n° nodi afferenti	Domanda servita (colli/giorno)	Capacità (n° colli)	N° Route	N° veicoli
1	Bagnoli	16	424	6.073	2	2
3	Pianura	13	349	4.810	2	2
7	Poggioreale	17	2.687	3.313	13	13
13	Piscinola-Marianella	9	2094	2.694	7	11
20	Barra	14	1.208	6.200	6	6
21	Chiaiano	32	1.603	3.311	8	8
	Totale	101	8.365			

Fig. 5.21 – Dati di sintesi transit point localizzati

Conclusioni

La ricerca ha trattato da un lato la problematica dell'inquinamento atmosferico connesso al traffico veicolare, misurato attraverso i livelli di concentrazione dei principali inquinanti (NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO, etc.), e dall'altro la problematica della City Logistics, con particolare riferimento alla localizzazione e alla gestione di impianti volti al drenaggio dei flussi di traffico diretti verso i centri urbani.

Il lavoro di tesi ha seguito un approccio metodologico di tipo modellistico, volto da un lato a calcolare in maniera compiuta i parametri di misura dell'inquinamento atmosferico, e dall'altro a progettare interventi coerenti con i risultati dell'analisi ambientale svolta.

In particolare, nella prima parte della tesi, sono stati oggetto di studio e di approfondimento modelli matematici per la stima delle emissioni di inquinanti e per la loro dispersione in atmosfera. Inoltre, sono stati raccolti ed analizzati dati alla scala territoriale europea, nazionale e locale. Per il Comune di Napoli sono stati elaborati i dati di concentrazione, relativi principalmente al PM_{10} (anni 2012-2013), e dati di piovosità. Il contributo originale della prima parte è rappresentato dall'analisi critica dei dati di inquinamento della città di Napoli.

In particolare, l'analisi di tali dati ha consentito lo sviluppo di considerazioni su scala territoriale locale che hanno indotto lo sviluppo di proposte di intervento di carattere strutturale e metodologico. Tali proposte riguardano: il potenziamento della rete di rilevamento, la calibrazione dei modelli di simulazione dei fenomeni e la definizione di procedure di carattere normativo.

Uno dei problemi di fondo scaturisce dal fatto che, in alcuni casi, sono state riscontrate differenze ridotte tra i valori di concentrazione di PM_{10} misurati da una stazione di background urbano e quelli misurati da una stazione di traffico. In altri casi, è stato addirittura rilevato che le concentrazioni per una stazione di background presentano valori superiori rispetto a quelli contemporaneamente misurati da una stazione di traffico. Tale fenomeno può indurre ad attribuire l'inquinamento atmosferico, non solo al traffico veicolare, ma anche ad altri fattori di origine naturale (parametri meteorologici, orografia dei luoghi etc.) ed antropica (attività industriali, cantieri etc.). Si ritiene, quindi, che uno sviluppo dell'attività di ricerca potrebbe riguardare un ulteriore approfondimento analitico e modellistico delle relazioni tra le concentrazioni di inquinanti e i parametri meteorologici (pioggia, velocità del vento, direzione del vento, umidità etc.).

Nella tesi ci si è posti, inoltre, il problema di cogliere il nesso tra i superamenti del valore di soglia imposto dalla normativa, rilevati dalle singole centraline, e le decisioni di regolamentazione che riguardano un intero contesto urbano (targhe alterne, blocchi del traffico, etc.).

Come possibili risposte alle incertezze sollevate da tali osservazioni, emerge, in primo luogo, la necessità di potenziare ed ampliare la rete delle centraline di monitoraggio (sia per gli inquinanti che per i flussi di traffico), anche attraverso sistemi mobili di misura, in modo da incrementare la disponibilità puntuale di dati. Si potrebbe pertanto pensare di localizzare le centraline di ciascuna tipologia (urbana, traffico e background), tenendo conto dei bacini di traffico individuati dal Piano Urbano del Traffico della città di Napoli, con lo scopo di consentire alle amministrazioni di adottare provvedimenti riguardanti i singoli bacini di traffico e non l'intero territorio comunale. A tal riguardo, si propone di strutturare e predisporre un'adeguata campagna di monitoraggio dei flussi di traffico e delle concentrazioni di inquinanti, al fine di calibrare i modelli di simulazione del traffico e i modelli di inquinamento. In tal modo, si potrà costruire una rete di centraline virtuali che consentirà, da un lato di incrementare i livelli di conoscenza dei fenomeni oggetto di studio, e dall'altro di indirizzare, sulla base di tali informazioni, le politiche di gestione della mobilità e della qualità dell'aria. Infine, sulla base di una maggiore disponibilità di dati, si potrebbe valutare l'opportunità di rivedere i valori limite imposti dalla normativa (in termini di concentrazioni e di superamenti), tenendo conto delle diverse tipologie di stazioni (urbane, traffico, background), delle condizioni meteo-climatiche del bacino europeo e del Mediterraneo, all'interno del quale l'Italia è inserita, dei micro-climi locali e dell'orografia dei luoghi.

Nella seconda parte della tesi si è trattata la problematica della City Logistics che rappresenta un tema di grande attualità, sia per affrontare il problema del trasporto delle merci in senso stretto, che per garantire standard più elevati di qualità della vita nelle aree urbane in termini di inquinamento atmosferico.

Nel lavoro di ricerca si è approfondito ed ampliato il concetto di Logistica Urbana, non legato al solo fenomeno del trasporto delle merci e alla scala territoriale urbana. Partendo da quanto proposto nella letteratura esistente in materia, si è sviluppato un approccio integrato che considera le diverse componenti e gli aspetti ritenuti rilevanti ai fini della mobilità urbana e metropolitana: spostamenti di persone, merci, mezzi di soccorso, utenze particolari, turisti, inquinamento atmosferico ed acustico, etc.. In questo contesto più ampio è da sottolineare il ruolo strategico delle attività di monitoraggio, sia dei flussi di traffico che degli inquinanti, nonché l'importanza dei

sistemi di infomobilità e dei sistemi telematici di videosorveglianza. Queste considerazioni hanno portato ad auspicare la realizzazione di una Centrale della Logistica Urbana, vista come naturale sviluppo delle attuali centrali del traffico.

Tra le possibili strategie di intervento per il miglioramento della mobilità in ambito urbano, l'attenzione è stata focalizzata sull'ottimizzazione dei processi distributivi attraverso la localizzazione di infrastrutture nodali, definite piattaforme logistiche o transit point, nelle quali avviene la rottura del carico, con passaggio della merce da veicoli a capacità maggiore a veicoli di dimensioni ridotte ed eco-compatibili, per la distribuzione della merce ai clienti finali.

E' stata rivolta, quindi, grande attenzione ai modelli matematici di Ottimizzazione su Rete, orientati alla localizzazione di piattaforme logistiche (modelli di Location) e all'instradamento dei veicoli (modelli di Routing). Sono stati inoltre considerati modelli integrati di Location-Routing classici, ampiamente trattati in letteratura, e modelli innovativi di Location-Routing, già in fase di sperimentazione, basati sulla localizzazione di impianti che intercettano i flussi (Flow Intercepting Facility Location) e risolvibili con tecniche avanzate di ottimizzazione matematica. Quest'ultima tipologia di modelli può essere utilizzata per affrontare anche il tema della localizzazione di centraline di monitoraggio degli inquinanti e del traffico. Infatti, si propone di localizzare le centraline di monitoraggio degli inquinanti in corrispondenza delle arterie stradali e dei punti nodali caratterizzati da elevati flussi di traffico. E' stato, infine, affrontato un caso di studio relativo al sistema distributivo nell'area urbana di Napoli nel quale è stato descritto uno scenario basato sulla localizzazione di "transit point" e sull'instradamento dei veicoli commerciali. A tal riguardo, è in corso di definizione un Protocollo d'Intesa tra il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell'Informazione e l'Istituto Nazionale di Statistica, volto ad arricchire la base di dati necessaria all'implementazione dei modelli di Flow Intercepting Facility Location-Routing su dati reali, che rappresenta una significativa prospettiva dell'attività di ricerca.

Bibliografia

1. ALDRIN M., HAFF I.H., "Generalised additive modelling of air pollution, traffic volume and meteorology", *Atmospheric Environment* 39,p.2145-2155, 2005
2. AMBROSINO D., SCUTELLA' M.G., "Distribution network design: New Problems and related models", *European Journal of Operational Research* 165, p.610-624, 2005.
3. ARPAC, "Relazione sullo stato dell'ambiente in Campania", 2009
4. AVELLA P., SASSANO A.,VASIL'EV I.. "Computational study of large-scale p-Median problems". Technical Report, Università di Roma "La Sapienza", 2003.
5. BERKOWICZ R., WINTHER M, KETZEL M., "Traffic pollution modelling and emission data", *Environmental Modelling and Software* 21, p.454-460, 2006.
6. BESTUFS (Best Urban Freight Solutions) Project. Buone Pratiche di Trasporto Merci in ambito urbano, 2007
7. BERKOWICZ R., WINTHER M., KETZEL M., "Traffic pollution modelling and emission data", *Environmental Modelling and Software* 21, p.454-460, 2006.
8. BERMAN O., HODGSON M.J., KRASS D.. "Flow Interception Problem. In: Facility Location. A survey of application and methods". Ed. Drezner Z., Springer-Verlag, 1995, p. 389-426.
9. BERMAN O., KRASS D., XU C.W.. "Locating Flow-Intercepting Facilities: New Approaches and Results". *Annals of Operations Research* 60, p. 121-143, 1995.
10. BERMAN O., KRASS D.. "Flow intercepting spatial interaction model: a new approach to optimal location of competitive facilities". *Location Science* 6, p. 41-65, 1998.
11. BERMAN O., LARSON R.C., FOUSKA N.. "Optimal Locating of Discretionary Facilities". *Transportation Sciences* 26, p. 201-211, 1992.
12. BERRONE S., DE SANTI F., PIERACCINI S., MARRO M., « Coupling traffic models on networks and urban dispersion models for simulating sustainable mobility strategies », *Computer and Mathematics with Applications* 64, p.1975-1991, 2012.
13. BOCCIA M., SFORZA A., STERLE C., « Flow Intercepting Facility Location : Problems, Models and Heuristics, 2009.

14. BOOGAARD H. et al., « Impact of low emission zones and local traffic policies on ambient air pollution concentrations », *Science of the Total Environment* 435-436, p.132-140, 2012.
15. BORGE R., de MIGUEL I., de la PAZ D., LUMBRERAS J., PEREZ J., RODRIGUEZ E., « Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain), *Atmospheric Environment* 62, p.461-471, 2012.
16. BRUNO G. "Operations Management. Modelli e metodi per la logistica" , ESI, 2005.
17. CARMINUCCI C., TREPIDI L., ANCARANI V., "Regioni e città italiane alla prova dell'inquinamento da traffico. I Piani di Qualità dell'Aria dieci anni dopo: bilanci di un'esperienza e prospettive di sviluppo, ISFORT, 2011.
18. CASCETTA E. "Teoria e Metodi dell'Ingegneria dei Sistemi di Trasporto", UTET, 1998.
19. CASCETTA E. "Transportation System Analysis: Models and Applications, Springer, 2009.
20. CESELLI A.. "Two exact algorithms for the capacitated p-median problem". *4OR* 1, p. 319–340, 2003.
21. CENTRO STUDI ACAM - Agenzia Campana per la Mobilità Sostenibile "Infrastrutture industria e servizi di trasporto e logistica in Campania – Aggiornamento 2009", 2010.
22. COSTABILE F., ALLEGRINI I., "A new approach to link transport emissions and air quality: an intelligent transport system based on the control of traffic air pollution", *Environmental modelling and Software* 23, p.258-267, 2008.
23. CRAINIC T.G., "City Logistics", CIRRELT,2008,25.
24. CRAINIC T.G., SFORZA A., STERLE C., "Location-Routing models for Two-Echelon Freight Distribution System Design, CIRRELT-2011-40.
25. DABLANC L., "Freight transport, a key for urban economies. Guidelines for practitioners. Proceedings of the Transportation Research Board 89th Annual Meeting, Washington DC, 2010.
26. D'ANTONIO G., MENNA A., NUNZIATA F. et al, "Qualità dell'aria. Il monitoraggio in Campania 2005-2007.
27. DANIELIS R., ROTARIS L., MARCUCCI E., "Urban freight policies and distribution channels: a discussion based on evidence from Italian cities", *European Transport* 46, 114-146, 2010.

28. D'ELIA S., FESTA D.C., MAZZULLA G., "La distribuzione delle merci nell'area urbana di Cosenza", Centro Editoriale e Libraio dell'Università della Calabria, 2004.
29. DELLE SITE P., FILIPPI F., NUZZOLO A. - "Linee Guida dei Piani di Logistica Urbana Sostenibile", 2013.
30. DI LONARDO S., NUVOLONE D., FORASTIERE F., CADUM E., BARCHIELLI A., "Policies for the promotion of sustainable mobility and the reduction of traffic related air pollution in the cities participating in the EpiAir2 project", 2013.
31. EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, "Air Quality in Europe 2013", 2013.
32. EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, "Air Pollution fact sheet 2013, Italy", 2013.
33. FILIPPI F., NUZZOLO A., COMI A., DELLE SITE P., "Ex-ante assessment of urban freight transport policies", *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2, p.6332-6342, 2010.
34. GUALTIERI G., TARTAGLIA M., "Predicting urban traffic air pollution: a GIS framework", *Transpn Res.-D*, Vol.3, N.5, p. 329-336, 1998.
35. HOROWITZ H.L., "Air quality analysis for urban transportation planning", MIT Press, Cambridge Massachusset.
36. HULSMANN F., GERIKE R., KETZEL M., "Modelling traffic and air pollution in an integrated approach – the case of Munich", *Urban Climate*, 2014.
37. ISPRA, "Qualità dell'Ambiente Urbano", IX Rapporto, 2013.
38. ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE (ISPRA), Qualità dell'ambiente urbano, VIII Rapporto ISPRA, Edizione 2012, 2012.
39. KARIV O., HAKIMI L.. "An algorithmic approach to network location problems. II: the p-medians". *Operations Research* 37(3), 1979, p. 539–560.
40. LAPORTE G., 1992. "The Vehicle Routing Problem: an overview of exact and approximate algorithms." *European Journal of Operational Research* 59, 345-358.
41. LAPORTE G., OSMAN I.H., "Routing problems: a bibliography", *Annals of Operations Research* 61, 227-262, 1995.
42. MAGGI E., "City Logistics: un approccio innovativo per la gestione del trasporto urbano delle merci", Milano, Politecnico di Milano – Dipartimento di Architettura e Pianificazione, 2001.
43. MAGGI E., "La logistica urbana delle merci: aspetti economici e normativi". Polipress (Eds.) 2007.

44. MAZZARELLA A., DI CRISTO R., VIOLA R., "L'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino- Napoli Centro: i dati dell'anno 2012", Rend. Acc. Sc. fis. mat. Napoli, Vol. LXXIX, 2012, p. 69-112
45. MAZZARELLA A., DI CRISTO R., VIOLA R., "L'Osservatorio Meteorologico di San Marcellino- Napoli Centro: i dati dell'anno 2012", Rend. Acc. Sc. fis. mat. Napoli, Vol. LXXX, 2013.
46. MISRA A., ROORDA M.J., MACLEAN H.L., "An integrated modelling approach to estimate urban traffic emissions", Atmospheric Environment 73, p.81-91, 2013.
47. MUNUZURI J., van DUIN J.H.R., ESCUDERO A., "How efficient is City Logistics? Estimating ecological footprints for urban freight deliveries", Procedia Social and Behavioral Sciences 2, p.6165-6176, 2010.
48. NAGY G., SALHI S., "Location-routing: issues, models, methods", European Journal of Operational Research 177, p.649-672, 2007.
49. NUZZOLO A., CRISALLI U., COMI A., "Modelli di previsione della domanda merci in area urbana", TeMa, 2010.
50. PERL P., DASKIN M. S., 1984. "A unified warehouse location-routing methodology". Journal of Business Logistics, vol.5, Number 1, 92-109.
51. Progetto City Ports. "Rapporto intermedio, Quaderni del servizio pianificazione dei trasporti e logistica, Regione Emilia Romagna, Assessorato Mobilità e Trasporti".
52. PRONELLO C., ANDRE'M., "Pollutant emissions estimation in road transport models", Report INRETS-LTE N°2007, 2000.
53. QUAK H.J. "Urban freight transport: the challenge of sustainability", in Macharis C., Melo S. (eds), City distribution and urban freight transport: multiple perspectives, Edward Elgar, Cheltenham, 2011.
54. QUEROL X. et al., "Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain". Aerosol Science 35, 2004, p.1151-1172.
55. RAND G. K., 1976. "Methodological Choices in Depot Location Studies". Operational Research Quarterly, vol. 27, 241-249.
56. REGIONE CAMPANIA. "Piano Regionale di Risanamento e Mantenimento della Qualità dell'Aria", 2005
57. ReVELLE C.S., EISELT H.A.. " Location analysis: A synthesis and survey". European Journal of Operational Research 165, p. 1-19, 2005

58. REVELLE C.S., EISELT H.A., DASKIN M.S., "A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science", *European Journal of Operational Research* 184, p.817-848, 2008.
59. RUSSO F., COMI A., "A classification of City Logistics measures and connected impacts", *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2, p.6355-6365, 2010.
60. SFORZA A. "Modelli e metodi della Ricerca Operativa", ESI, 2005.
61. TANIGUCHI E., NORITAKE M., YAMADA T. IZUMITANI T., "Optimal size and location planning of public logistics terminals", *Transportation Research Part E* 35, p.207-222, 1999.
62. TANIGUCHI E. , SHIMAMOTO H., "Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times, *Transportation Research Part C*, 2004, p. 235-250.
63. TARTAGLIA M., "L'inquinamento dell'aria da traffico stradale", BIOS, 1999.
64. UNIONTRASPORTI, "City logistics: strategie d'intervento per il rifornimento delle reti commerciali al dettaglio. Proposta di transit point urbani per la provincia di Napoli", 2008.
65. VENEGAS L.E., MAZZEO N.A., DEZZUTTI M.C., "A simple model for calculating air pollution within street canyons" *Atmospheric Environment* 87, p.77-86, 2014.
66. WEBER S., KORDOWSKI K., KUTTLER W., "Variability of particle number concentration and particle size dynamics in an urban street canyon under different meteorological conditions", *Science of the Total Environment* 449, p.102-114, 2013
67. WU T.H., LOW C., BAI J.W., "Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems", *Computers and Operations Research* 29, p. 1393-1415, 2002
68. ZUCCOTTI S., KONSTANINOPOULOU L. "CityLog, verso nuove soluzioni per la distribuzione urbana delle merci" – TeMa – 2010.

Appendice 1 – Le Agenzie Regionali per la Protezione dell’Ambiente

Le Agenzie Regionali per la Protezione dell’Ambiente (ARPA) sono state istituite a seguito del referendum del 18 aprile 1993 che ha abrogato alcune parti di articoli della legge n.833 del 23 dicembre 1978, relativi alle competenze del Servizio Sanitario Nazionale e delle Unità Sanitarie Locali nel campo del controllo e della prevenzione ambientale. Il Parlamento, con la Legge n.61 del 21 gennaio 1994 affida tali compiti ad apposite "Agenzie Regionali" che diventano i centri deputati alla vigilanza e al controllo ambientale in sede locale. In concomitanza a tali agenzie fu istituita l'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), divenuta poi APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) e nel 2008 confluita nell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), ente di indirizzo e di coordinamento delle Agenzie delle Regioni e delle Province autonome. In particolare, l'ISPRA è vigilato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, coopera con l’Agenzia Europea per l’Ambiente (EEA) e con le istituzioni ed organizzazioni nazionali ed internazionali operanti in materia di salvaguardia ambientale.

Le principali funzioni attribuite alle ARPA possono essere così descritte:

- controllo di fonti e di fattori di inquinamento dell'aria, dell'acqua, del suolo, acustico ed elettromagnetico;
- monitoraggio delle diverse componenti ambientali: clima, qualità dell'aria, qualità delle acque, caratterizzazione del suolo, livello sonoro dell'ambiente;
- controllo e vigilanza del rispetto della normativa vigente e delle prescrizioni contenute nei provvedimenti emanati dalle Autorità competenti in materie ambientali;
- supporto tecnico-scientifico, strumentale ed analitico agli Enti titolari con funzioni di programmazione e amministrazione attiva in campo ambientale (Regioni, Province e Comuni);
- sviluppo di un sistema informativo ambientale che sia di supporto agli Enti istituzionali e a disposizione delle organizzazioni sociali interessate.

Le ARPA e i Dipartimenti di Prevenzione delle ASL esercitano in maniera coordinata ed integrata le funzioni di controllo ambientale e di prevenzione collettiva che rivestono valenza ambientale e sanitaria.

Allo scopo di fornire una sintesi relativa alle modalità di presentazione dei dati di inquinamento, si riportano le principali caratteristiche dei sistemi di monitoraggio

della qualità dell'aria implementati dalle ARPA delle seguenti regioni: Toscana, Emilia Romagna, Veneto, Lombardia e Campania.

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT), istituita con Legge regionale n. 66/1995, è attiva dal 1996 ed è stata recentemente riformata con Legge regionale n. 30/2009. Attraverso una rete di Dipartimenti provinciali e Servizi sub-provinciali presenti sul territorio regionale, l'Agenzia garantisce l'attuazione degli indirizzi regionali nel campo della prevenzione e tutela ambientale secondo quanto previsto nella Carta dei servizi e delle attività di ARPAT.

A partire dal 1° Gennaio 2011, è stata istituita la nuova rete di monitoraggio della qualità dell'aria a scala regionale costituita da 32 stazioni (Fig.1a). Il sistema di rilevamento, gestito dall'ARPAT, fa riferimento alle seguenti normative: a scala comunitaria, Direttiva 2008/50/CE, a scala nazionale, D. Lgs 155/2010, a scala regionale, L.R. 9/2010 e DGRT 1025/2010.

La normativa vigente ha introdotto un aspetto importante riguardante la valutazione della qualità dell'aria a scala regionale. La valutazione, infatti, non viene effettuata a partire dai dati discretizzati per province, ma a partire dalle rilevazioni effettuate nell'ambito di zone omogenee dal punto di vista delle fonti di inquinamento e della loro incidenza sul territorio. A tal scopo, con delibera DGRT 1025/2010, la Regione ha individuato 5 zone (zona costiera, zona Valdarno Pisano e Piana Lucchese, zona Prato Pistoia, zona Valdarno aretino e Valdichiana) ed un agglomerato (Firenze e comuni dell'area omogenea) in cui attivare postazioni di monitoraggio per tutti gli inquinanti previsti dalla normativa (PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , SO_2 , CO , Benzene, IPA, O_3 e metalli) che tengano conto del numero minimo previsto sulla base della popolazione, dei livelli di inquinamento pregressi registrati e della rappresentazione di tutte le criticità di ciascuna zona.

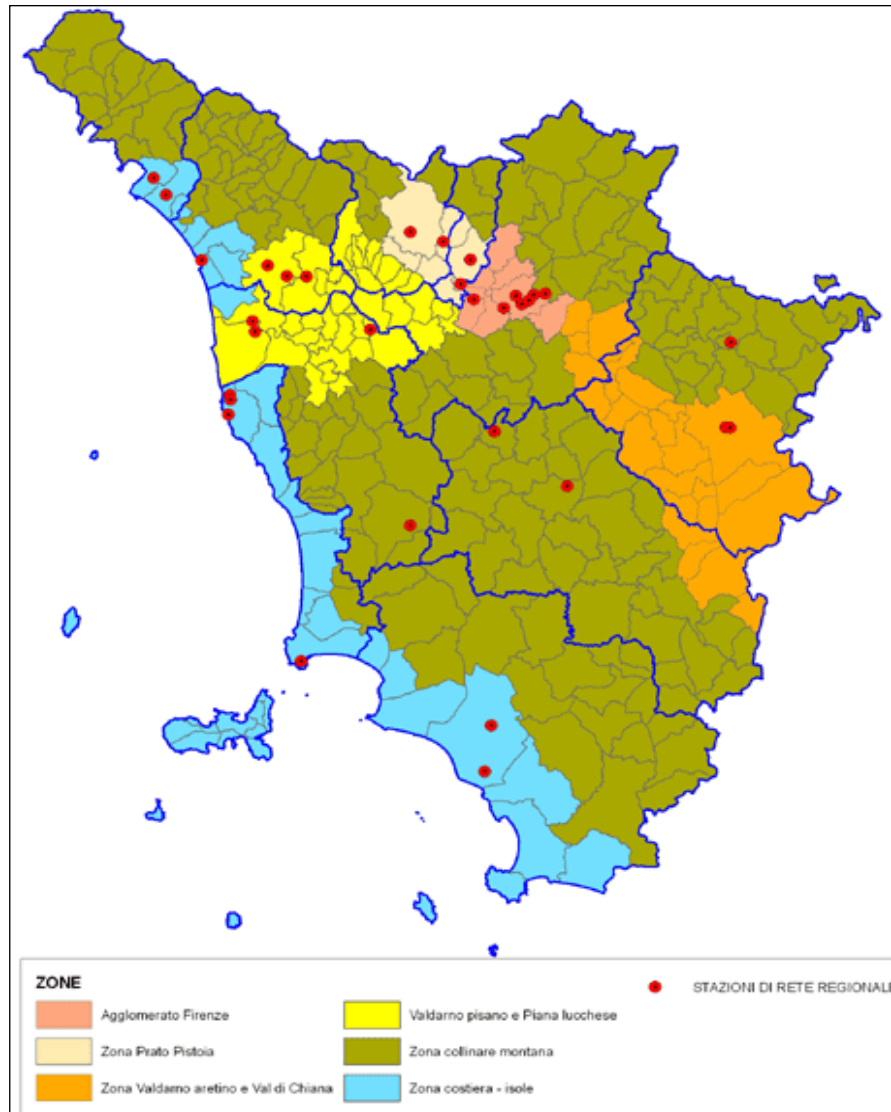


Fig.1a – Rete di monitoraggio dell'inquinamento della Regione Toscana

Il sistema SIRA (Sistema Informativo Regionale Ambientale) è il portale della regione che mette a disposizione delle istituzioni, delle associazioni e dei cittadini, i risultati dell'attività di controllo e monitoraggio effettuati dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Toscana e da altri enti che operano nel settore ambientale. Tali dati vanno a costituire il "Sistema Informativo Regionale Ambientale" della regione, i cui obiettivi riguardano la raccolta, l'elaborazione, la verifica e la diffusione delle informazioni di interesse ambientale.

L'accesso ai contenuti del portale è possibile attraverso tre percorsi di navigazione:

- per tema: Acqua, Aria, Terra, Agenti Fisici;
- per servizio: banche dati di base, rapporti sintetici e statistiche, mappe tematiche
- per macro-obiettivi ambientali: cambiamenti climatici, natura e biodiversità, ambiente e salute, uso sostenibile delle risorse naturali e gestione dei rifiuti.

Si riportano, di seguito, a titolo di esempio, alcuni dati forniti dall'Agenzia relativamente: ai superamenti di PM₁₀ su base annua per tutte le stazioni localizzate nei 6 agglomerati (Fig.2a); alle medie annuali di PM_{2,5} dal 2008 al 2012 (Fig.3a); ai valori massimi delle medie giornaliere sulle 8 ore di CO dal 2007 al 2012 (Fig.4a).

PM ₁₀		n° superamenti valore giornaliero di 50 µg/m ³							
Zona	tipo	Comune	Stazione	tipo	2008	2009	2010	2011	2012
Agglomerato Firenze	Urbana	Firenze	FI-Boboli	Fondo	19	13	10	17	7
	Urbana	Firenze	FI-Bassi	Fondo	33	23	13	19	11
	Urbana	Scandicci	FI-Scandicci	Fondo	49	48	38	37	23
	Urbana	Firenze	FI-Gramsci	Traffico	98	88	65	55	46
	Urbana	Firenze	FI-Mosse	Traffico	88	**	66	59	69
Prato Pistoia	Urbana	Prato	PO-Roma	Fondo	29	27	30	43	43
	Urbana	Prato	PO-Ferrucci	Traffico	41	51	45	50	44
	Rurale	Montale	PT-Montale	Fondo	70	**	**	65	63
	Urbana	Pistoia	PT-Signorelli	Fondo			19	25	22
Valdarno aretino e Valdichiana	Urbana	Arezzo	AR- Repubblica	Traffico	17	15	20	34	29
Valdarno pisano e Piana lucchese	Urbana	Capannori	LU-Capannori	Fondo	40	35	38	57	36
	Periferica	S. Croce sull'Arno	PI-S. Croce Coop	Fondo	35	32	33	47	33
	Urbana	Pisa	PI-Passi	Fondo			13	28	17
	Urbana	Pisa	PI-Borghetto	Traffico	36	31	31	44	35
Costiera	Urbana	Grosseto	GR-URSS	Fondo	3	4	0	0	0
	Urbana	Livorno	LI-Carducci	Traffico	40	20	11	7	4
	Periferica	Piombino	LI-Cotone	Industriale	29	21	27	14	6
	Urbana	Carrara	MS-Colombarotto	Fondo	18	5	2	2	3
	Urbana	Viareggio	LU-Viareggio	Fondo	59	27	9	37	15
Collinare e montana	Rurale	Chitignano	AR-Casa Stabbi	Fondo	1	0	0	0	1
	Periferica	Pomarance	PI-Montecerboli	Fondo	1	0	0	0	1
	Urbana	Poggibonsi	SI-Poggibonsi	Fondo				20	0

(**) efficienza <90% *limite di legge: 35 superamenti della media giornaliera di 50 µg/m³* ≤17 >17≤35 >35≤52 >52

☐ = analizzatore non attivo

Fig.2a – Numero di superamenti del valore giornaliero di PM₁₀ (2008-2012)

PM _{2,5}		medie annuali µg/m ³							
Zona	tipo	Comune	Stazione	tipo	2008	2009	2010	2011	2012
Agglomerato Firenze	Urbana	Firenze	FI-Bassi	Fondo			**	16	16
	Urbana	Firenze	FI-Gramsci	Traffico			**	21	20
Costiera	Urbana	Grosseto	GR-URSS	Fondo			11	12	11
	Urbana	Livorno	LI-Carducci	Traffico	16	14	14	16	14
Valdarno pisano e Piana lucchese	Urbana	Pisa	PI-Passi	Fondo			16	18	16
Prato Pistoia	Urbana	Prato	PO-Roma	Fondo	20	18	22	22	22
Collinare e montana	Urbana	Poggibonsi	SI-Poggibonsi	Fondo					11

= analizzatore non attivo
 (**) efficienza <90%

limite di legge: media annuale 25 µg/m³
≤12
>12≤25
>25≤37
>37

Fig.3a – Medie annuali di PM_{2,5} (2008-2012)

Monossido di Carbonio (CO) - Massime medie giornaliere sulle 8 ore - 2007-2012									
Valore Limite = 10 mg/m ³									
Nome stazione di	Tipologia di stazione	unità di	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Fi-Gramsci	Urbana Traffico	mg/m ³	3,40	3,90	5,90	5,90	3,00	3,00	
AR-Repubblica	Urbana Traffico	mg/m ³	2,90	2,70	3,20	2,70	2,30	1,90	
Pi-Borghetto	Urbana Traffico	mg/m ³	3,40	2,60	2,30	2,30	2,80	2,40	
LI-Carducci	Urbana Traffico	mg/m ³	4,20	3,50	3,20	2,80	3,10	2,80	
LI-Cotone	Periferica industriale	mg/m ³	3,00	2,70	6,30	2,80	3,10	3,30	
PO-Ferrucci	Urbana Traffico	mg/m ³	3,40	3,40	(1)	3,30	(1)	(1)	

(1) efficienza minore del 90%

Fig.4a – Valori massimi delle medie giornaliere sulle 8 ore di CO (2007-2012)

L’Agenzia Regionale per la Prevenzione e per la Protezione Ambientale della Regione Veneto è stata istituita con la L.R. n°32 del 18 ottobre 1996. L’Agenzia persegue due obiettivi strettamente relazionati: la protezione, attraverso i controlli ambientali che tutelano la salute della popolazione e la sicurezza del territorio, e la prevenzione attraverso la ricerca, la formazione, l’informazione e l’educazione ambientale.

L’attività di studio e controllo sulla matrice “aria” riguarda prevalentemente:

- il monitoraggio della qualità dell’aria: verifica della qualità dell’aria e del rispetto dei valori limite di normativa, con riferimento alle concentrazioni dei principali inquinanti rilevate mediante le stazioni fisse e mobili della rete di monitoraggio. I risultati delle analisi vengono elaborati e studiati, mediante l’utilizzo di modelli matematici di diffusione degli inquinanti;
- il controllo delle emissioni: sono analizzati gli inquinanti aerodispersi alla loro origine, ad esempio quelli provenienti dalle ciminiere e dai camini industriali. I risultati delle analisi costituiscono parte integrante dell’inventario delle emissioni. Nel caso in cui le analisi non siano ancora state eseguite o dove ciò non sia possibile, ad esempio nel caso del traffico autoveicolare, sono utilizzati dei fattori di stima delle emissioni (fattori di emissione).

In Fig.5a è riportata la localizzazione delle stazioni di rilevamento della qualità dell’aria. Le centraline di monitoraggio sono distinte in base alla loro ubicazione in stazioni di traffico, se situate in zona urbana, e stazioni di fondo, se situate in zona extra-urbana, così come previsto dalla normativa vigente. Le stazioni di traffico monitorano i picchi di inquinanti atmosferici dovuti al traffico veicolare nelle immediate vicinanze di un’arteria viaria urbana. Le stazioni di fondo (background) rilevano i livelli di inquinanti rappresentativi di tutto il centro abitato.

L’Agenzia rileva costantemente i valori di PM_{10} e di $PM_{2.5}$ presenti nell’aria. Il livello di concentrazione del particolato atmosferico è rilevato attraverso centraline automatizzate e manuali, con frequenza giornaliera, secondo quanto previsto dal D.Lgs. 155/2010.

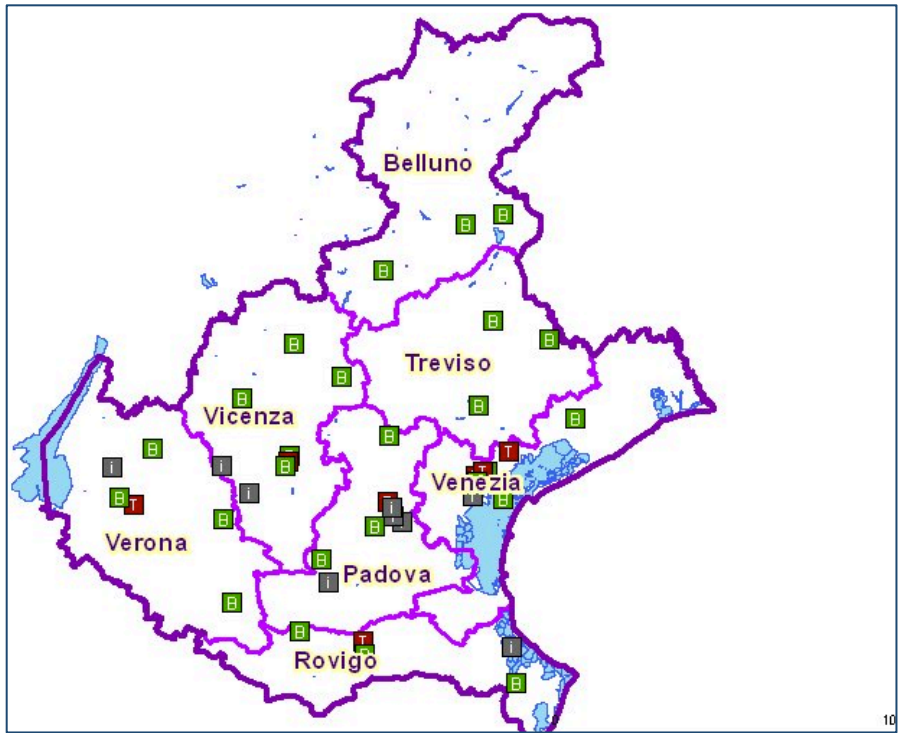


Fig. 5a: Rete regionale di monitoraggio

Si riportano di seguito, a titolo esemplificativo, alcuni grafici forniti dal portale dell’Agenzia relativamente alle concentrazioni di PM₁₀.

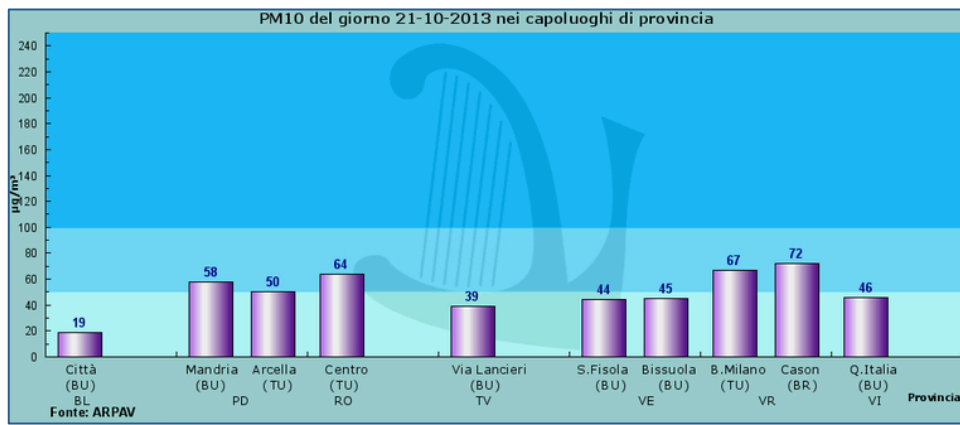


Fig.6a – Valori giornalieri di PM₁₀ nei capoluoghi di provincia

Il grafico regionale giornaliero (Fig.6a) mostra l'andamento del PM₁₀ nei 7 capoluoghi; gli andamenti delle concentrazioni di PM₁₀ sono disponibili per tutte le centraline che dispongono di strumentazione automatica, anche situate fuori dai capoluoghi di provincia.

I grafici provinciali (Fig.7a) mostrano, nel dettaglio, l'andamento negli ultimi 10 giorni per il PM₁₀ e si riferiscono ad una singola centralina.

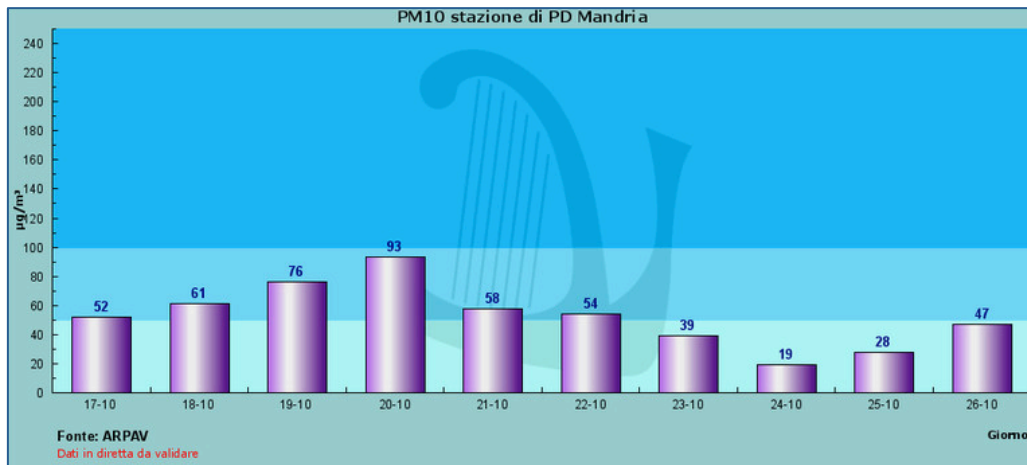


Fig. 7a - Concentrazioni di PM₁₀, stazione di Padova (Mandria)

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale - Regione Emilia Romagna

L'Agencia Regionale Prevenzione e Ambiente della Regione Emilia Romagna, istituita con L.R. n°44 del 1995, è operativa dal 1996 con i seguenti compiti istituzionali:

- monitoraggio delle diverse componenti ambientali;
- controllo e vigilanza del territorio e delle attività antropiche;
- attività di supporto nella valutazione dell'impatto ambientale di piani e progetti;
- realizzazione e gestione del Sistema informativo regionale sull'ambiente.

L'Arpa Emilia-Romagna è il punto di riferimento tecnico regionale per la gestione delle problematiche relative alla qualità dell'aria, al fine di garantire il flusso dei dati provenienti dalla rete di monitoraggio e la comunicazione dei dati ambientali.

L'attuale rete di monitoraggio è costantemente modificata dall'attività di predisposizione e aggiornamento delle stazioni di misura e dei sensori ed è composta da 193 analizzatori, distribuiti in 60 stazioni di misura (dati aggiornati maggio 2010 – Fig.8a).

Gli inquinanti monitorati sono i seguenti: Biossido di zolfo (SO₂), Biossido di azoto (NO₂), Ossido di carbonio (CO), Ozono (O₃), Particolato (PM₁₀ e PM_{2.5}), Benzene, Toluene e Xilene (BTX).

A maggio del 2010 il numero di centraline per ciascuna provincia è il seguente:

<i>RIEPILOGO CENTRALINE PER PROVINCIA</i>	
Provincia	N° centraline
Piacenza	5
Parma	5
Reggio Emilia	7
Modena	9
Bologna	8
Forlì - Cesena	6
Rimini	6
Ravenna	8
Ferrara	6

Totale 60

La qualità delle misure e la confrontabilità dei dati sono garantite da un sistema di gestione certificato secondo le norme internazionali ISO 9001:2008. Una sintesi dei

dati raccolti è pubblicata quotidianamente sul sito web. Mensilmente e annualmente l'Agencia predispone dei report riassuntivi.

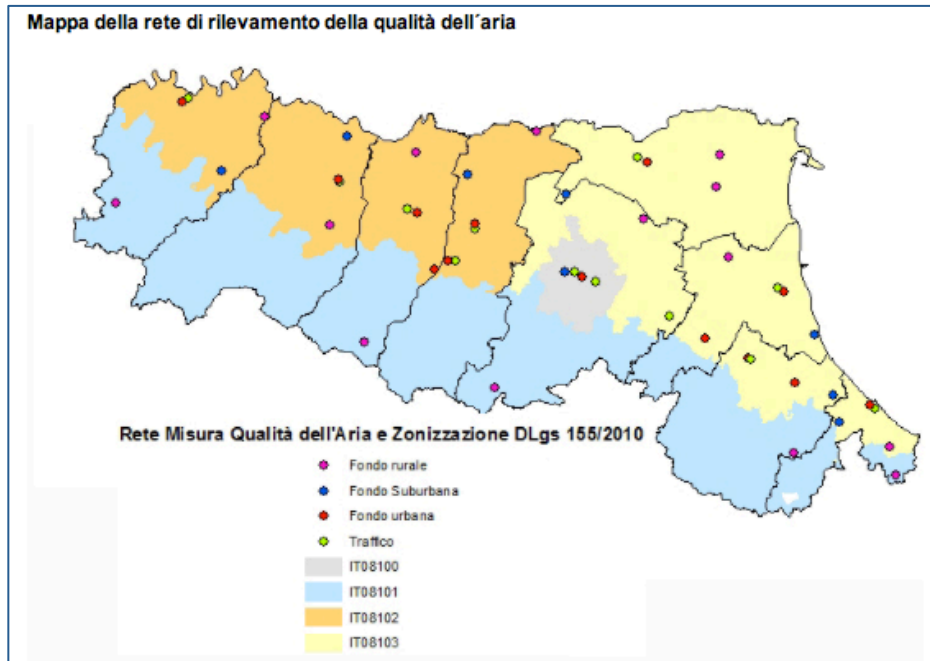


Fig. 8a – Rete monitoraggio degli inquinanti della Regione Emilia Romagna

L'ARPA, a partire da gennaio 2011, offre un servizio per la conoscenza in tempo reale della qualità dell'aria, per quanto riguarda le concentrazioni di PM_{10} , $PM_{2.5}$, Ozono, Biossido di Azoto e Indice di Qualità dell'aria, con una definizione di dettaglio territoriale di 1 kmq. La rappresentazione grafica su cartografia regionale, consente la visualizzazione delle concentrazioni di inquinanti a scala regionale; ulteriori informazioni sono disponibili a scala provinciale.

Le mappe di previsione e le analisi degli inquinanti sono prodotte da modelli matematico-statistici che si basano sulle emissioni inquinanti presenti sul territorio (traffico, riscaldamento, industrie, ecc.), sulla meteorologia e sulle misure delle centraline, riproducendo i principali fenomeni che riguardano gli inquinanti atmosferici: emissione, diffusione, trasporto, reazioni chimiche e deposizione. Il sistema modellistico tiene conto delle complesse dinamiche dell'inquinamento atmosferico e lavora su tre livelli: Europa, Nord Italia ed Emilia-Romagna.

Nelle seguenti figure si riportano, a titolo di esempio, le mappe regionali di concentrazione disponibili in rete (Fig.9a-11a) e i valori di concentrazione media giornaliera di PM_{10} una centralina di Bologna (Fig.12a).

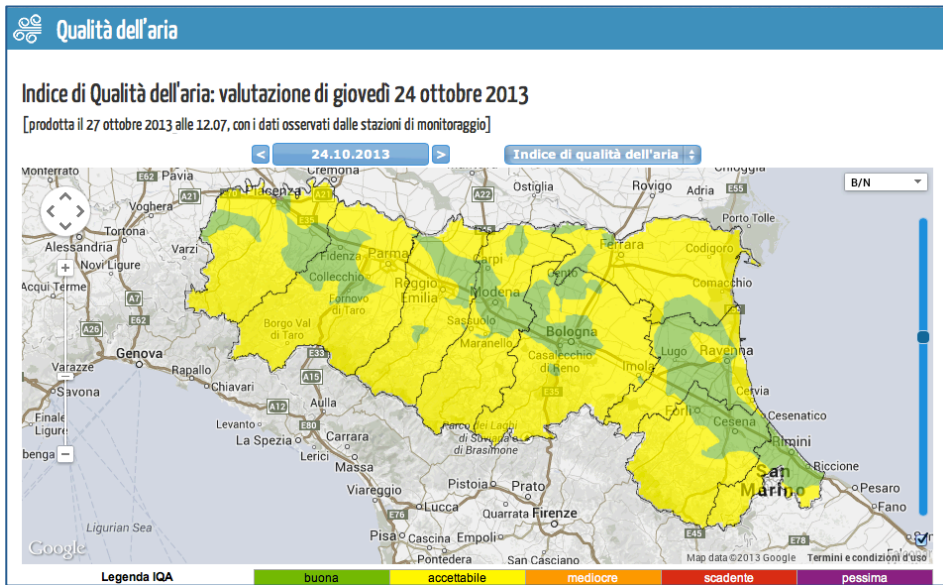


Fig. 9a – Indice di qualità dell'aria Regione Emilia Romagna

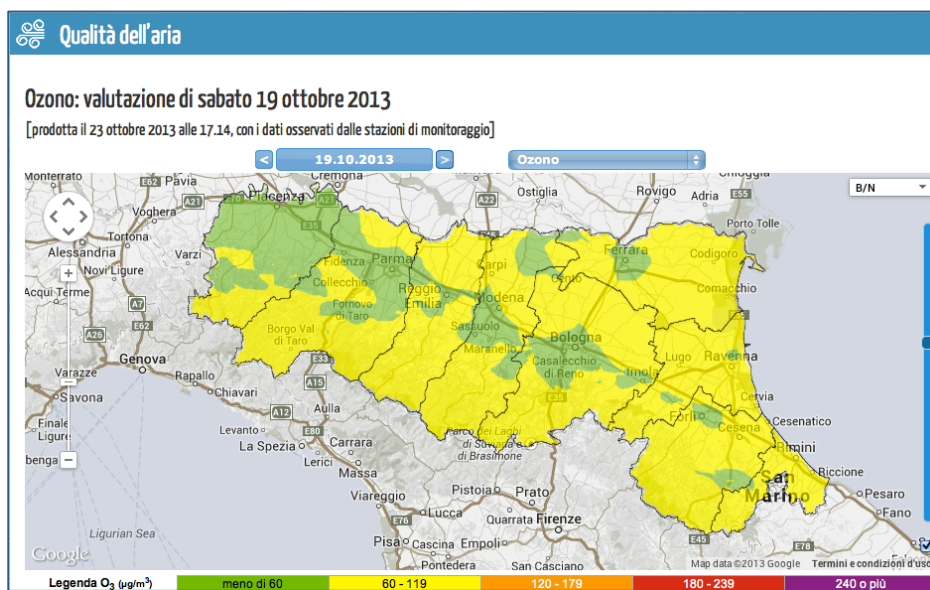


Fig. 10a – Concentrazione di Ozono - Regione Emilia Romagna

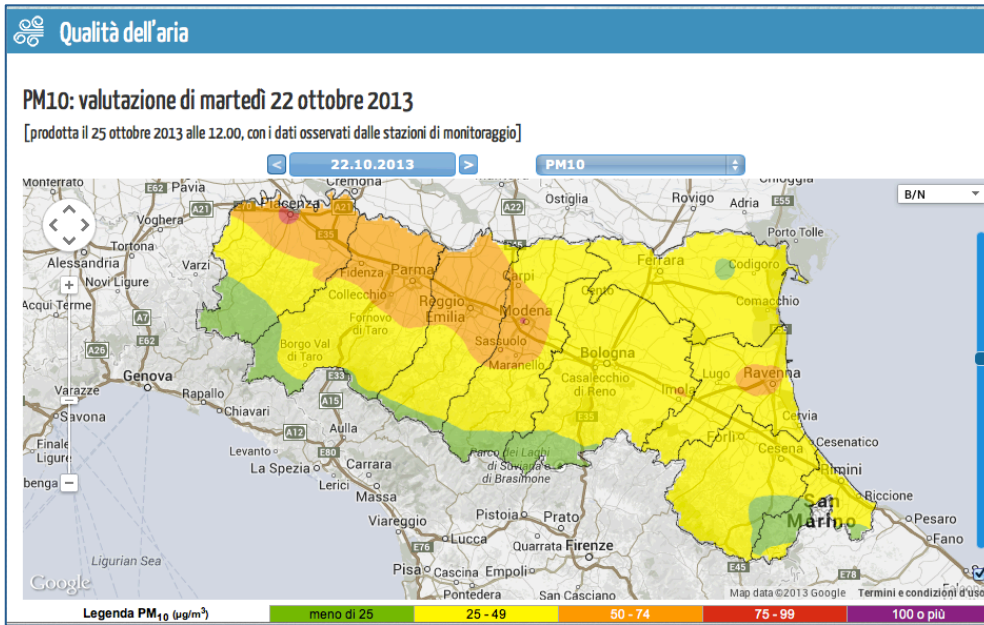


Fig. 11a – Concentrazione di PM₁₀ - Regione Emilia Romagna

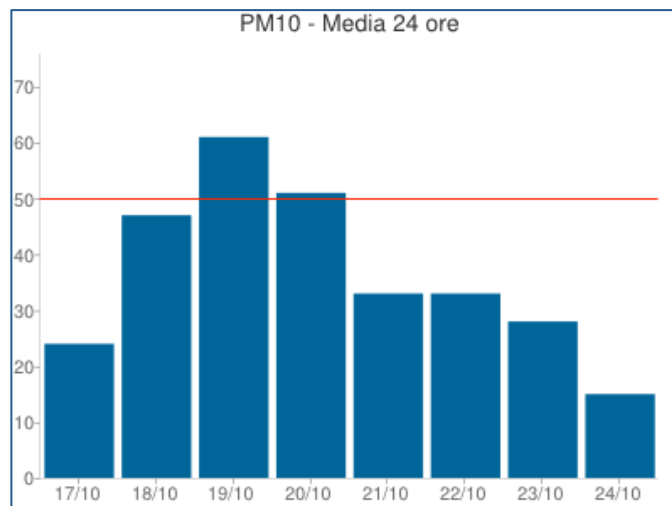


Fig. 12a – Concentrazione di PM₁₀ (valori medi giornalieri) per una stazione di Bologna (2013)

L’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Lombardia è attiva dal 1° dicembre 1999 e la sua l’attività si ispira all’approccio proposto dalle più recenti normative nazionali ed europee: raccogliere ed elaborare dati ambientali da fornire agli organi di governo, per supportarne le decisioni sul territorio, e alla popolazione.

La valutazione della qualità dell’aria in Lombardia è effettuata sulla base delle informazioni fornite dalla rete di rilevamento, integrate dalle informazioni che derivano dalle simulazioni mediante modelli matematici di dispersione e dai dati dell’inventario delle emissioni Inemar (Inventario Emissioni Aria). Il monitoraggio si avvale, oltre che della rete di rilevamento fissa, anche di mezzi mobili, di campionatori portatili di polvere e aria e di altra strumentazione avanzata.

La rete di rilevamento della qualità dell’aria della Lombardia è attualmente composta da 154 stazioni fisse di monitoraggio che, per mezzo di analizzatori automatici, forniscono dati in continuo ad intervalli temporali regolari. La rete comprende sia stazioni pubbliche che private, queste ultime afferenti a grandi impianti industriali. Il numero di postazioni e il tipo di inquinanti monitorati è aumentato molto nel corso degli anni, infatti, ad oggi la Lombardia è tra le regioni italiane con il maggior numero di stazioni di rilevamento. In particolare, dal 2000 ad oggi, la rete ha visto quadruplicare il numero di punti di monitoraggio del particolato (PM_{10} e $PM_{2.5}$). Al contrario, i siti di misura di alcuni degli inquinanti primari, in particolare SO_2 e CO , sono diminuiti in relazione alla diminuzione delle concentrazioni rilevate e della conseguente necessità di monitoraggio (Fig. 13a).

	Limite protezione salute / Agglomerato	Agglomerati urbani (A1)	Zona urbanizzata (A2)	Zona di pianura (B)	Zona prealpina e appenninica (C1)	zona alpina (C2)
PM ₁₀	Limite giornaliero					
	Limite annuale					
PM _{2,5}	Limite annuale					
NO ₂	Limite orario					
	Limite annuale					
O ₃	Soglia informazione					
	Soglia allarme					
	Obiettivo a lungo termine per protezione salute					
CO	Valore limite					
SO ₂	Limite orario					
	Limite giornaliero					
C ₆ H ₆	Valore limite					
B(a)P	Valore obiettivo					
Pb	Valore limite					
As, Cd,Ni	Valore obiettivo					

■ minore del valore limite
■ compreso tra valore limite e valore limite + margine di tolleranza
■ maggiore del valore limite + margine di tolleranza (o superiore al valore bersaglio per l'ozono)

Fig. 13a – Valutazione della qualità dell'aria riferita all'anno 2010

In dettaglio, come si può notare in Fig, 13a, non vengono registrati superamenti dei limiti e degli obiettivi di legge per SO₂, CO e C₆H₆. Per l'O₃, il superamento è diffuso su tutto il territorio regionale; anche per il PM₁₀ il valore limite giornaliero (numero di giorni in cui la media giornaliera supera i 50 µg/m³) è superato in modo diffuso, sebbene il numero di giorni di superamento sia complessivamente calato negli anni (da più di 140 nei primi anni del 2000 fino a, mediamente, meno di 100 nel 2010). Le postazioni sono distribuite su tutto il territorio regionale in funzione della popolazione, della densità abitativa e del livello di inquinamento riscontrato nella zona, considerando le caratteristiche orografiche e climatiche, in modo da poter avere una valutazione della qualità dell'aria rappresentativa per tutte le zone.

Ai sensi del D. Lgs 155/2010 la Regione, con il supporto tecnico dell'Arpa, ha redatto un progetto volto ad adeguare la propria rete di misura alle relative disposizioni di legge e in conformità alla zonizzazione effettuata (Fig.14a).

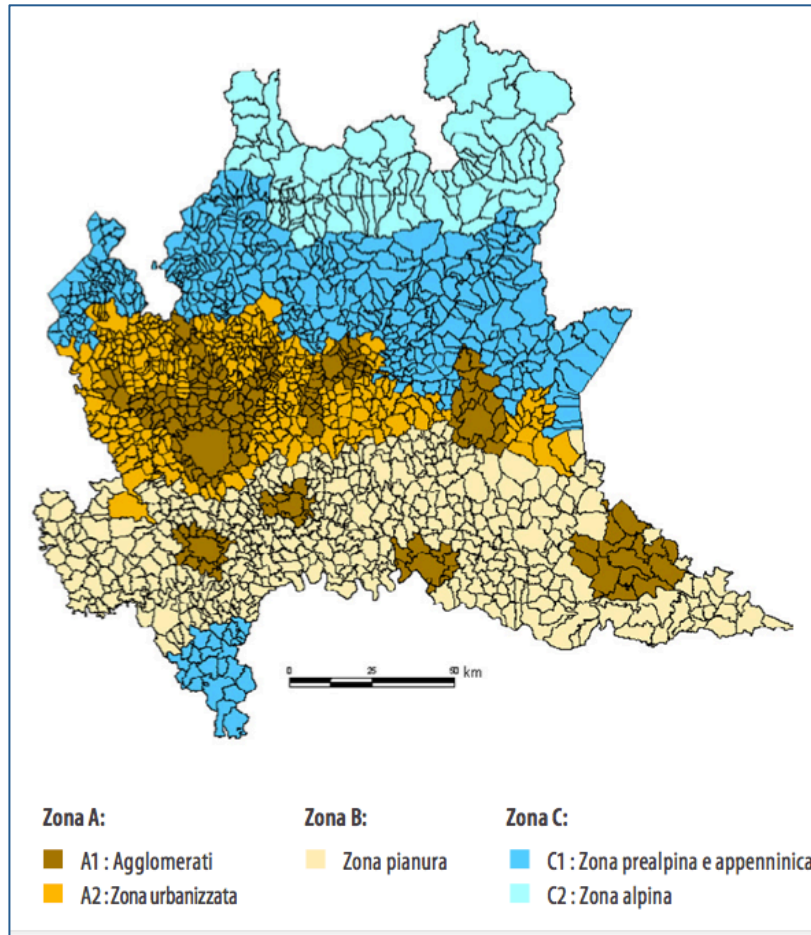


Fig.14a - Zonizzazione del territorio regionale

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale – Regione Campania

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Campania è l'ente strumentale della Regione Campania, istituito con legge Regionale n. 10 del 29 luglio 1998, che sviluppa attività di monitoraggio, prevenzione e controllo orientate a tutelare la qualità del territorio e favorire il superamento delle molteplici criticità ambientali della Campania. Le attività istituzionali svolte dall'ARPAC sono connesse alle funzioni di protezione e risanamento ambientale in sede locale: vigilanza e controllo del rispetto delle normative vigenti, supporto tecnico-scientifico agli Enti Locali, erogazione di prestazioni analitiche di rilievo sia ambientale che sanitario, realizzazione di un sistema informativo ambientale, attività di ricerca e informazione. La struttura dell'ARPAC è costituita da una unità centrale, che ha sede a Napoli e che comprende la Direzione Generale, la Direzione Tecnica e la Direzione Amministrativa, e da cinque Dipartimenti Provinciali e da Centri tematici specialistici.

La struttura centrale definisce le politiche di indirizzo e di sviluppo, coordina le attività tecnico-scientifiche e amministrative dell'ente e ne elabora le strategie di comunicazione. Nell'ambito della Direzione tecnica sono presenti diversi comparti tematici: tra questi, Siti contaminati e bonifiche, Tutela dell'ambiente marino-costiero e oceanografia, Rifiuti e uso del suolo. Ogni Dipartimento provinciale ha un suo Dipartimento tecnico, dotato di laboratori per svolgere le funzioni analitiche affidate all'Agenzia, e un Servizio territoriale con funzioni tecniche di monitoraggio, ispezione e controllo delle fonti di inquinamento. In ciascun Dipartimento tecnico sono state attivate unità tematiche specialistiche quali: alimenti, acque per uso umano, acque interne e marino costiere, inquinamento atmosferico, suolo e rifiuti.

Il Centro Meteorologico e Climatologico della Campania (CEMEC) è la struttura operativa dell'ARPAC dedicata a svolgere previsioni e valutazioni meteo-ambientali (Fig.15a).

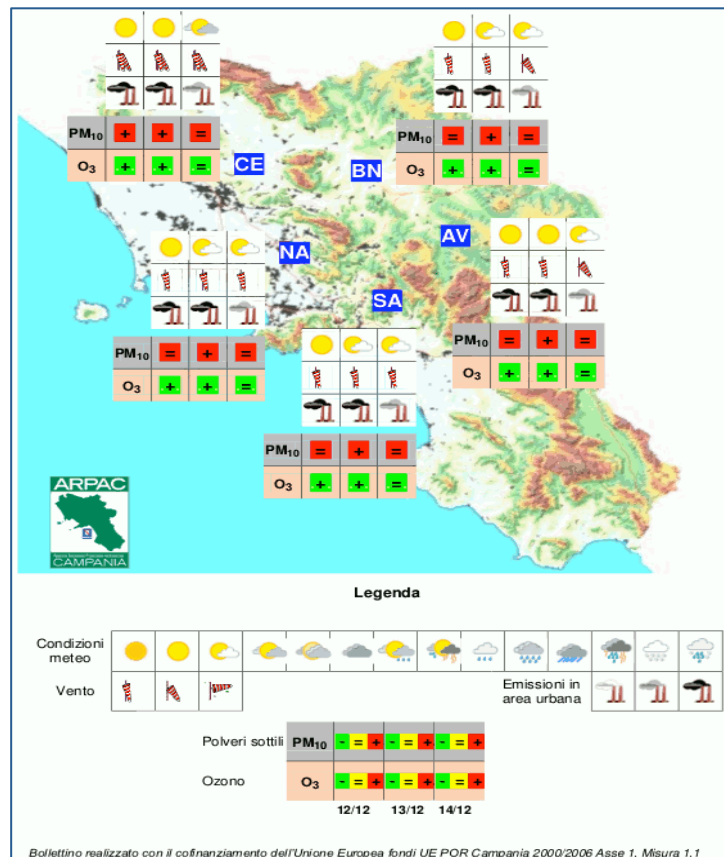


Fig. 15a - Bollettino meteoambientale qualità dell'aria in Campania

Lo strumento di pianificazione che fornisce l'analisi, gli obiettivi e le linee guida relativamente alla qualità dell'aria del territorio regionale è Il Piano Regionale di Risanamento e Mantenimento della Qualità dell'Aria in Campania, approvato dal Consiglio Regionale della Campania nella seduta del 27 giugno 2007. Il Piano è stato redatto in conformità al Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (n. 261 del 1 ottobre 2002) contenente il «Regolamento recante le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria ambiente, i criteri per l'elaborazione del piano e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del D.Lgs. n. 351 del 4 agosto 1999».

Il Piano, coerentemente con quanto previsto dalla legislazione vigente, suddivide il territorio regionale in zone omogenee (zonizzazione) sulla base dell'inventario delle emissioni e l'analisi dei dati del monitoraggio. In particolare, la valutazione della qualità dell'aria a scala locale su tutto il territorio regionale è effettuata integrando i risultati del monitoraggio della qualità dell'aria con una metodologia innovativa che,

sulla base di elaborazioni statistiche e modellistiche, fornisce una stima delle concentrazioni di inquinanti dell'aria su tutto il territorio della regione. Ai sensi degli articoli 4 e 5 del D.Lgs 351 del 4 agosto 1999 la valutazione è stata svolta relativamente ai seguenti inquinanti: ossidi di zolfo, ossidi di azoto, PM₁₀, monossido di carbonio e benzene.

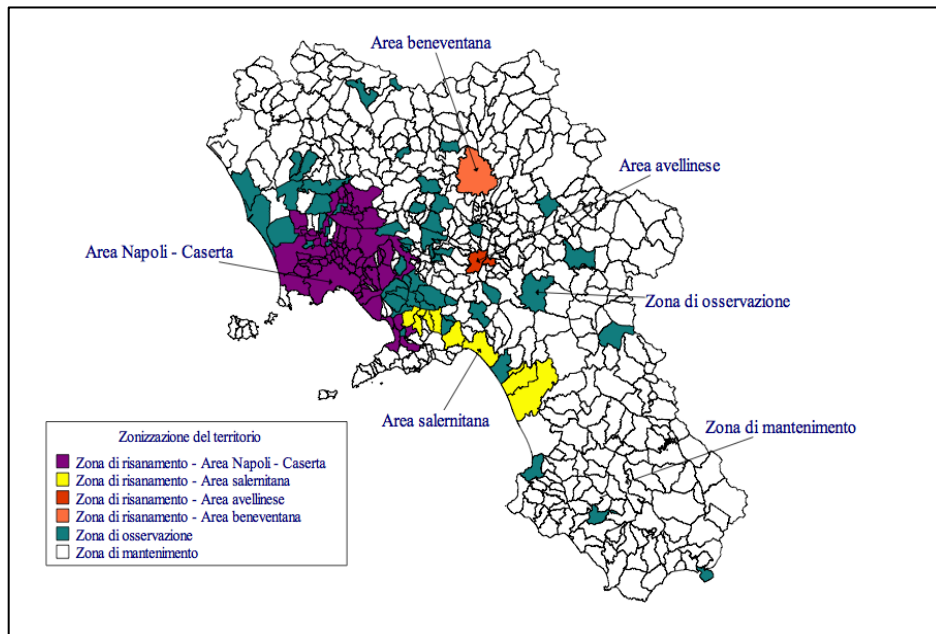


Fig.16a – Zonizzazione del territorio regionale

Il risultato dell'attività di classificazione del territorio regionale (Fig.16a), ai fini della gestione della qualità dell'aria ambiente, è rappresentato dall'identificazione di sei zone costituite dall'aggregazione di comuni con caratteristiche il più possibile omogenee:

- IT0601: Zona di risanamento – Area Napoli e Caserta
- IT0602: Zona di risanamento – Area salernitana
- IT0603: Zona di risanamento – Area avellinese
- IT0604: Zona di risanamento – Area beneventana
- IT0605: Zona di osservazione
- IT0606: Zona di mantenimento.

Le zone di risanamento sono definite come quelle zone in cui almeno un inquinante

supera il limite e il margine di tolleranza fissati dalla normativa; la zona di osservazione è definita dal superamento del limite ma non del margine di tolleranza.

Il Piano individua inoltre le misure e gli interventi finalizzati alla salvaguardia della qualità dell'aria per ciascuna sorgente emissiva; in particolare, con riferimento al settore dei trasporti, le misure di piano, articolate in misure a breve e lungo termine, sono le seguenti:

- limitazione della circolazione dei mezzi pesanti all'interno delle aree urbane delle zone di risanamento, ovunque sia possibile l'utilizzo alternativo dell'autostrada;
- introduzione di sistemi di abbattimento delle emissioni sui mezzi pubblici circolanti nelle aree urbane delle zone di risanamento;
- riduzione del trasporto passeggeri su strada mediante l'inserimento di interventi di "car pooling" e "car sharing" nelle aree urbane delle zone di risanamento, con opportune iniziative di supporto (informazione, sito web regionale in cui sia possibile organizzare gli spostamenti congiunti);
- disincentivazione dell'uso del mezzo privato nelle aree urbane delle zone di risanamento, tramite estensione delle zone di sosta a pagamento ed incremento del pedaggio;
- interventi di razionalizzazione delle consegne delle merci mediante la regolazione degli orari e l'incentivo al rinnovo del parco circolante;
- mantenimento e sviluppo di trasporto elettrico o ibrido (elettrico e metano) urbano, incrementando l'offerta di mobilità sui mezzi pubblici e vincolando l'acquisto esclusivamente di veicoli a basso o a nullo impatto ambientale;
- supporto allo sviluppo del trasporto passeggeri su ferro in ambito regionale e locale;
- supporto alle iniziative di gestione di mobilità (Mobility Manager) in ambito urbano.

Con riferimento all'anno 2002, il Piano di risanamento riporta la sintesi dei risultati delle analisi di monitoraggio per i seguenti inquinanti: ossidi di azoto, monossido di carbonio e particolato solido.

In dettaglio, le emissioni totali regionali di ossidi di azoto sono dovute per l'86% ai trasporti, in particolare stradali (54.600 tonnellate per oltre il 53%), la restante aliquota è distribuita tra altre sorgenti mobili e macchine e impianti di combustione; la suddivisione tra le diverse tipologie di strade è la seguente: ambito autostradale:

3.600 tonnellate, pari a circa il 6%, ambito extraurbano: 19.000 tonnellate, pari a circa il 35%, ambito urbano: 32000 tonnellate, pari a circa il 58%. Le emissioni totali di monossido di carbonio sono dovute quasi esclusivamente ai trasporti (94%) in particolare stradali per circa l'83% (242.400 tonnellate); le emissioni da trasporto stradale sono così distribuite: ambito autostradale: 8.000 tonnellate (3%), ambito extraurbano: 58.4000 tonnellate (24%), ambito urbano: 176.000 tonnellate (72%). Le emissioni totali di PM₁₀ sono dovute, nel 2002, per oltre il 63% ai trasporti in particolare stradali (40% e circa 4.500 tonnellate) ed alle altre sorgenti mobili e macchine (per circa il 23% e 2.600 tonnellate) e per circa il 25% (circa 2.800 tonnellate) agli impianti a combustione.

Il monitoraggio della qualità dell'aria in Campania è svolto dall'ARPAC mediante un sistema composto da una rete fissa, che consta di 20 centraline localizzate nei capoluoghi di Provincia, e da una rete mobile. In particolare, la distribuzione delle centraline fisse per capoluogo di Provincia è il seguente: 9 centraline a Napoli, 2 a Benevento, 2 ad Avellino, 4 a Caserta e 3 a Salerno (Fig.17a). Le centraline, in attività dal 1994, misurano ad intervalli di un'ora, la concentrazione in atmosfera degli inquinanti.

Nel paragrafo successivo sono analizzati dei dati di inquinamento per il Comune di Napoli, relativamente al biennio 2012-2013.

PROVINCIA	UBICAZIONE	CENTRALINE (n.)
Avellino	Scuola V Circolo	2
	Ospedale Moscati	
Benevento	Ospedali Civili Riuniti	2
	Via Flora	
Caserta	Istituto Manzoni	4
	Scuola De Amicis	
	Centurano	
	Scuola L. Settembrini	
Napoli	Osservatorio Astronomico	9
	Ospedale Santobono	
	Primo Policlinico	
	Scuola Andrea Doria	
	Scuola Vanvitelli	
	Museo Nazionale	
	Ferrovie dello Stato	
	Ospedale Nuovo Pellegrini	
	ITIS S. Giovanni	
Salerno	Scuola Pastena Monte	3
	Ospedale Via Vernieri	
	Scuola Osvaldo Conti	

Fig. 17a– Numero di stazioni di monitoraggio presenti sul territorio regionale

Appendice 2 – I modelli matematici per la gestione della mobilità

Un sistema di trasporto può essere definito come “quell’insieme di componenti e di loro interazioni che determinano la domanda di spostamenti tra punti diversi del territorio e l’offerta di servizi di trasporto per il soddisfacimento di tale domanda” (Cascetta, 2001).

Il funzionamento di un sistema di trasporto può essere simulato attraverso un insieme di modelli matematici: i modelli di offerta, i modelli di domanda e i modelli di assegnazione (Fig.1b). In questo contesto, si riporta una descrizione non esaustiva di tali modelli in quanto essi forniscono i dati di input per i modelli di emissione degli inquinanti atmosferici.

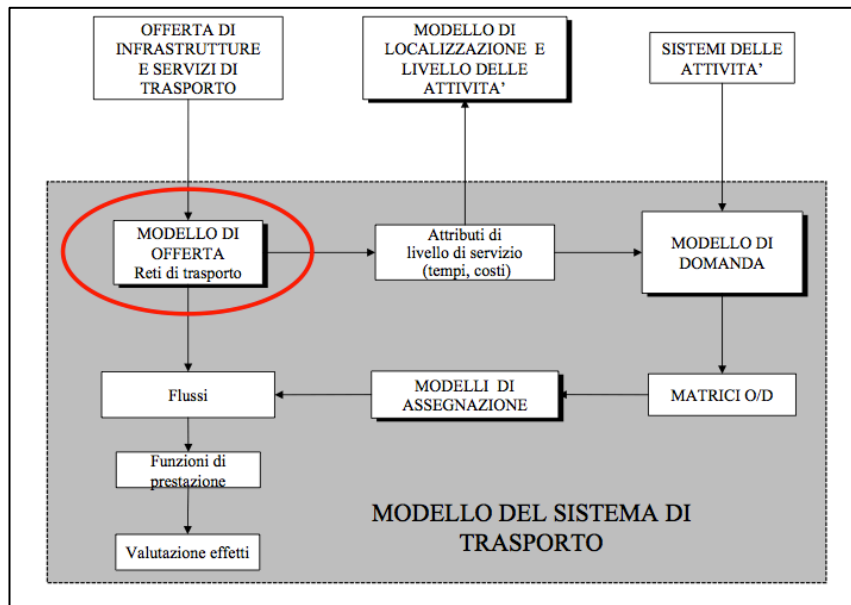


Fig.1b – Struttura del sistema di modelli per la simulazione di un sistema di trasporto

Le ipotesi alla base dei modelli di seguito descritti possono essere sintetizzate come segue:

- delimitazione fisica e funzionale del sistema: il sistema di trasporto si assume confinato all'interno di un ambito definito (area di studio) e l'ambiente esterno viene considerato attraverso le relazioni di domanda (domanda di scambio e attraversamento) e di offerta (infrastrutture e servizi di trasporto) con il sistema oggetto di studio (Fig.2b);

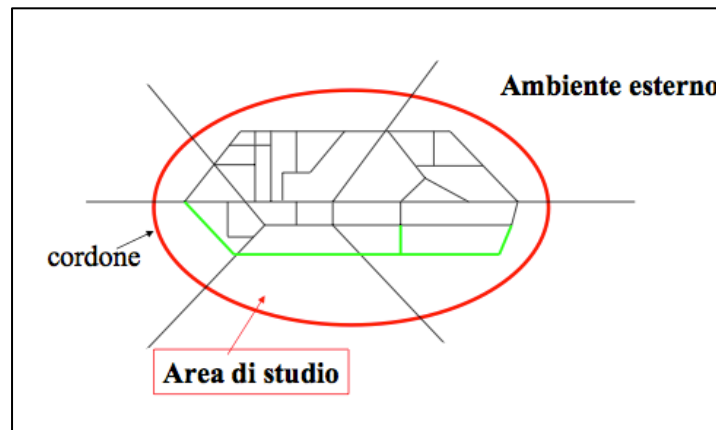


Fig. 2b – Delimitazione dell'area di studio

- discretizzazione dello spazio (zonizzazione): il territorio fisico sul quale si espletano la domanda e l'offerta di trasporto si assume suddiviso in unità discrete (zone di traffico). Si assume, inoltre, che i punti di partenza e di arrivo di tutti gli spostamenti che interessano una zona siano concentrati in un unico punto fittizio detto centroide di zona (Fig.3b);

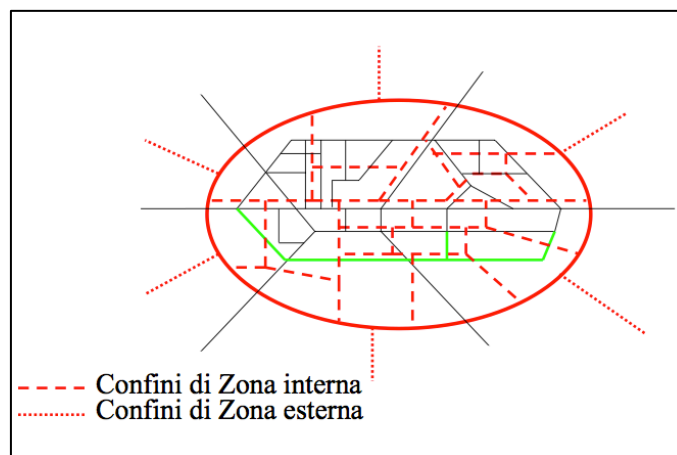


Fig. 3b – Zonizzazione dell'area di studio

Per l'individuazione delle zone di traffico è opportuno seguire i seguenti criteri:

- a) i separatori fisici del territorio (fiumi, ferrovie, ecc.) sono solitamente utilizzati come confini di zona, in quanto impediscono il collegamento diffuso tra le aree contigue e quindi implicano differenti condizioni di accesso alle infrastrutture e ai servizi di trasporto;

- b) le zone di traffico sono spesso ottenute come aggregazioni di unità territoriali amministrative, per poter associare a ciascuna zona i dati socio-economici necessari alla descrizione del sistema delle attività di solito disponibili per tali unità;
 - c) occorre aggregare porzioni di territorio “omogenee” sia rispetto alle attività insediate che all’accessibilità alle infrastrutture;
-
- stazionarietà intraperiodale: si assume che la domanda e l’offerta di trasporto abbiano un valore medio costante per un periodo di tempo sufficientemente ampio da consentire il raggiungimento di condizioni stazionarie;
 - stazionarietà interperiodale: si assume che il sistema raggiunga una configurazione stabile nel tempo (configurazione di equilibrio) nella quale domanda, flussi e costi siano mutuamente coerenti.

I modelli di offerta di trasporto

Scopo del modello di offerta è quello di simulare aspetti rilevanti del funzionamento di un sistema di offerta costituito dalle componenti fisiche e organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in una determinata area.

Per i modelli di offerta si individua una duplice funzionalità: la prima è consentire la simulazione delle prestazioni dei servizi di trasporto, la seconda è partecipare, all’interno dei modelli di assegnazione, alla simulazione dei flussi che nel periodo di riferimento impegnano i diversi elementi del sistema di offerta.

Per la rappresentazione della struttura topologica e funzionale del sistema, tali modelli sono basati sulla teoria dei grafi e delle reti. La costruzione di un grafo rappresentativo dei collegamenti offerti da un sistema di trasporto richiede la definizione degli elementi che lo costituiscono (nodi ed archi) in funzione delle caratteristiche del sistema fisico che si intende rappresentare, individuando poi gli elementi che si ritengono significativi ai fini dell’analisi del sistema reale e per i quali si vogliono conoscere i flussi e le prestazioni.

Ciascun arco del grafo utilizzato per rappresentare un sistema di trasporto corrisponde ad una fase dello spostamento, cioè la percorrenza di un elemento fisico (ad esempio un tronco stradale). L’attraversamento dell’arco è caratterizzato da un tempo di trasferimento e/o da altri oneri sopportati dall’utente (ad esempio: rischio di incidenti, consumo dei pneumatici, inquinamento acustico ed atmosferico). Questi ultimi sono costi, detti esterni, che non vengono considerati dall’utente nell’effettuare le scelte connesse agli spostamenti.

Il costo generalizzato medio di trasporto, o costo di trasporto di un arco, è una variabile che sintetizza il valore medio delle diverse voci di costo sopportate dagli utenti, così come da loro percepite nella effettuazione delle scelte di trasporto e nella scelta del percorso. In particolare, i percorsi sono definiti come sequenze di archi che rappresentano degli spostamenti dai nodi origine ai nodi destinazione; agli archi e ai percorsi possono essere associate due tipi di variabili: i costi e i flussi.

Il costo di trasporto di un arco rappresenta la disutilità degli utenti a percorrere un determinato arco. Gli elementi che compongono il costo di trasporto sono solitamente grandezze non omogenee quali: tempo di percorrenza, costo monetario etc.. Per ridurre il costo ad un'unica grandezza scalare è possibile omogeneizzare le diverse componenti attraverso coefficienti di omogeneizzazione β (il cui valore può essere stimato con un modello di scelta del percorso).

Il costo generalizzato di trasporto c_l relativo all'arco l -simo può essere formulato come segue:

$$c_l = \beta_1 t_l + \beta_2 cm_l$$

dove: t_l è il tempo di attraversamento e cm_l è il costo monetario (ad esempio il pedaggio) connesso all'attraversamento dell'arco.

I diversi utenti sperimentano e/o percepiscono costi di trasporto differenti per lo stesso arco, pertanto i costi percepiti di arco possono essere considerati come una variabile aleatoria distribuita tra gli utenti il cui valore medio è il costo di trasporto c_l .

Si definisce vettore dei costi di arco un vettore c , la cui generica componente è costituita dal costo di trasporto sull'arco $l=(i,j)$.

Il costo generalizzato medio di trasporto C_k di un generico percorso k è definito come una grandezza scalare che sintetizza le diverse voci di costo percepite dagli utenti nell'effettuazione delle scelte di spostamento, cioè di percorso.

Il costo di percorso si compone di due aliquote assunte omogenee tra loro: il costo additivo (tempo di viaggio, costo monetario) e il costo non additivo:

$$C_k = C_k^{ADD} + C_k^{NA}$$

La relazione tra il costo additivo di percorso e i costi di arco è la seguente:

$$C_k^{ADD} = \sum_l a_{lk} * c_l$$

dove: a_{ik} è una variabile binaria pari a 1 se l'arco i appartiene al percorso k .

Inoltre, a ciascun arco e percorso del grafo può essere associato un flusso di arco f_i che, nell'ipotesi di stazionarietà intraperiodale, rappresenta il numero medio di utenti che nell'unità di tempo utilizza l'arco o il percorso del grafo.

Il costo medio di un arco dipende dal flusso di utenti che utilizza l'elemento rappresentato dall'arco stesso e, in alcuni casi, anche dai flussi che impegnano altri elementi del sistema. Per effetto di tale fenomeno, detto congestione, il costo medio di trasporto relativo a ciascun arco del grafo è funzione sia del flusso che percorre l'arco in esame che di quelli che percorrono gli altri archi del grafo. In particolare, la funzione $c_i(f)$ prende il nome di funzione di costo e consente il calcolo del costo medio di trasporto di ciascun arco in corrispondenza di un vettore di flussi di arco.

In definitiva, la costruzione di un modello di rete prevede la definizione di una sequenza di operazioni, quali:

- la delimitazione dell'area di studio
- la zonizzazione
- la selezione degli elementi di offerta rilevanti (reti di base)
- la costruzione del grafo
- l'individuazione delle funzioni di costo
- l'individuazione delle funzioni di prestazione e di impatto.

I modelli di domanda

I modelli matematici utilizzati per simulare la domanda di trasporto sono orientati a riprodurre il comportamento di scelta degli utenti (modelli comportamentali). Si tratta di modelli di utilità aleatoria che rappresentano la base teorica più utilizzata per simulare le scelte di trasporto e, più in generale, le scelte tra alternative discrete. In particolare, il flusso di domanda di trasporto, in un determinato periodo di riferimento e in una data area, è rappresentato dall'aggregazione di spostamenti individuali; ogni spostamento è il risultato di numerose scelte compiute dagli utenti del servizio di trasporto.

I modelli di utilità aleatoria si basano sull'ipotesi che ciascun utente o categoria di utenti omogenei sia un decisore razionale, ovvero un massimizzatore dell'utilità relativa alle proprie scelte.

I modelli per la domanda di spostamenti simulano la quantità media di spostamenti, con le loro caratteristiche rilevanti, che vengono effettuati nell'area di studio in un determinato periodo di riferimento (flusso medio di spostamenti). Le caratteristiche rilevanti degli spostamenti sono in linee generali le seguenti:

- il motivo, o coppie di motivi (s) per i quali ci si sposta (ad esempio, casa-lavoro, casa-studio, per la mobilità dei passeggeri)
- la categoria socio-economica di utenti i
- il periodo, ovvero la fascia oraria (h) nella quale avvengono gli spostamenti
- le zone di origine e di destinazione dello spostamento (o e d)
- il modo con cui lo spostamento viene effettuato (m)
- il percorso utilizzato per lo spostamento (k), rappresentato da una sequenza di archi che collegano i centroidi o e d sul modello di rete rappresentativo dell'offerta di servizi di trasporto.

Formalmente il flusso di domanda da simulare può essere indicato con $d_{od}^i(s,h,m,k)$ e il modello di domanda come:

$$d_{od}^i(s,h,m,k)=d(SE,T)$$

dove: SE rappresenta le variabili relative al sistema delle attività socio-economiche (numero di famiglie residenti o posti di lavoro) e T rappresenta le variabili relative al livello di servizio offerto dal sistema di trasporto (tempi di viaggio, costi monetari, distanze da percorrere a piedi etc.), ottenute utilizzando i modelli di offerta descritti in precedenza.

Il sistema di modelli utilizzato per simulare il flusso di domanda di spostamenti è definito, in letteratura, modello ad aliquote parziali. Tale modello è costituito dalla seguente sequenza di sotto-modelli:

- il modello di emissione o frequenza degli spostamenti: fornisce la percentuale di individui di categoria i che trovandosi in o effettuano x spostamenti per il motivo s nella fascia oraria h ;
- il modello di distribuzione: fornisce la percentuale di individui di categoria i che spostandosi da o per il motivo s nel periodo h si recano alla zona di destinazione d ;
- il modello di scelta o di ripartizione modale: fornisce la percentuale di individui di categoria i che spostandosi tra o e d per il motivo s nel periodo h utilizzano il modo di trasporto m ;
- il modello di scelta del percorso: fornisce la percentuale di utenti i che spostandosi tra o e d per il motivo s nel periodo h con il modo m , utilizza il percorso k .

I modelli di assegnazione

I modelli di assegnazione simulano l'interazione tra la domanda e l'offerta e consentono di calcolare i flussi di utenti circolanti sulla rete e le prestazioni per ciascun arco come risultato dei flussi di domanda Origine-Destinazione, dei comportamenti di scelta del percorso e delle reciproche interazioni tra domanda e offerta. In particolare, le scelte degli utenti e i flussi di percorso dipendono dai costi dei differenti percorsi rilevanti; i flussi di domanda sono influenzati dai costi di percorso; esiste pertanto una relazione circolare tra la domanda, i flussi e i costi che viene riprodotta dai modelli di assegnazione. L'obiettivo è di simulare lo stato medio o configurazione del sistema. La configurazione del sistema, simulata dai modelli di assegnazione, dipende dalle ipotesi sul comportamento degli utenti (funzioni di domanda, scelta del percorso etc.) e dal tipo di approccio utilizzato per lo studio delle interazioni domanda-offerta stesso.

La descrizione dettagliata di tali modelli è rimandata ai testi riportati in Bibliografia.

Appendice 3 - L'utilizzo dei sistemi GIS nel settore della Logistica Urbana

I sistemi GIS

Lo strumento informatico che consente di trattare il dato geografico è il GIS (Geographic Information System), costituito da un insieme di strumenti, hardware e software per la digitalizzazione, la memorizzazione, la rappresentazione, l'elaborazione e lo scambio di informazioni. I sistemi GIS sono programmi che integrano dati cartografici e dati alfanumerici e che consentono di costruire complessi sistemi informativi su base territoriale e di svolgere interrogazioni e analisi.

Caratteristica fondamentale di un GIS è la capacità di georeferenziare i dati, ovvero attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali reali. Le coordinate di un oggetto sono memorizzate secondo le coordinate del sistema di riferimento in cui realmente l'oggetto è situato (come ad esempio latitudine e longitudine in un sistema di riferimento geografico).

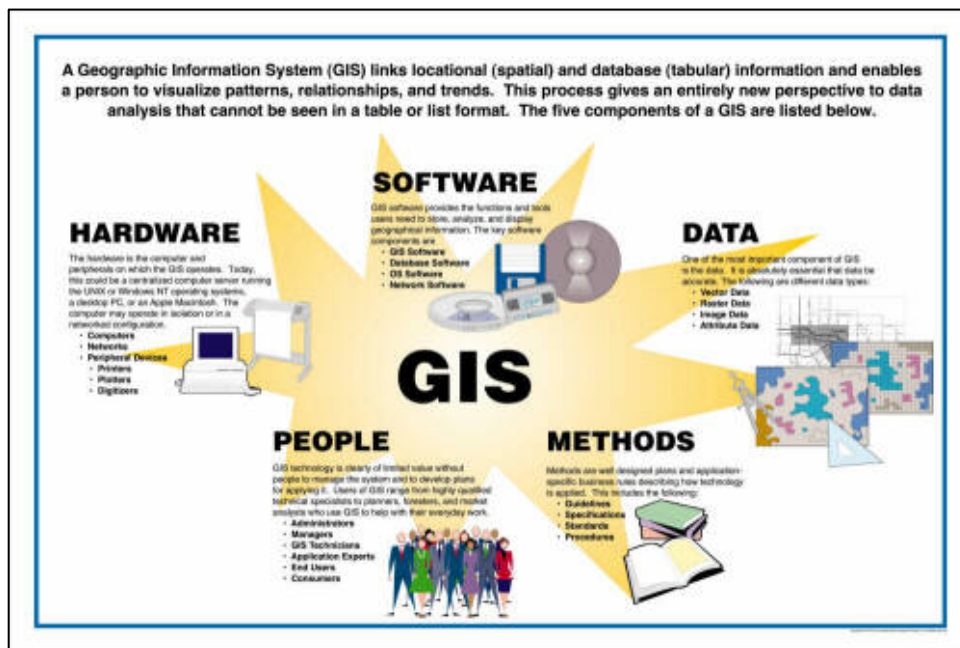


Fig. 1c – Struttura di un sistema GIS

L'obiettivo principale di un GIS è di effettuare analisi spaziali per diventare uno strumento di supporto alle decisioni. Tali sistemi sono utilizzati in tutti quei settori dove la cartografia è un elemento fondamentale per la gestione delle specifiche attività di controllo del territorio (urbanistica, pianificazione territoriale, trasporti, reti tecnologiche etc.).

La rilevanza della componente localizzativa e geografico/territoriale per le attività delle amministrazioni, delle istituzioni e delle imprese in quasi tutti i settori (governi centrale e locali, beni e servizi pubblici, utilities, agricoltura, manifattura, commercio e servizi, etc.) è messa in evidenza dalla crescente importanza che vanno assumendo i caratteri distintivi dei "sistemi locali" territorialmente identificati e definiti, da delimitazioni di ambito, di area o di territorio. Inoltre, la possibilità di disporre di conoscenze e informazioni a scala territoriale dettagliata fino al livello urbano, costituisce spesso un elemento indispensabile delle basi di conoscenza delle imprese, delle istituzioni, degli enti amministrativi locali, degli operatori pubblici e privati che erogano servizi in numerosi settori.

In diverse discipline ed ambiti applicativi, i GIS sono diventati strumento indispensabile e di largo utilizzo, non solo per l'archiviazione dei dati, ma soprattutto per la loro analisi ed elaborazione. Molti processi decisionali possono trarre benefici dalla disponibilità di semplici strumenti di rappresentazione e di analisi di dati GIS-based. Esempi comuni di utilizzo del dato geografico riguardano le scelte localizzative di strutture operative o di servizi, la rappresentazione ed il monitoraggio di risorse naturali (incluso il suolo ed i suoi utilizzi antropici), il posizionamento, dimensionamento e gestione operativa di infrastrutture di rete, la realizzazione di piani di emergenza e di protezione civile, il controllo dei territori vulnerabili a situazioni di rischio, il monitoraggio e le valutazioni di impatto ambientale, etc..

Le informazioni utilizzabili con un GIS sono di tipo locazionale (indirizzi, codici postali, zone censuarie, fogli catastali, edifici, strutture viarie, ecc), di tipo geografico (coordinate e descrizione geometrica di punti, linee o tracciati e zone o porzioni del territorio) e di tipo tabellare (attributi degli oggetti geografici collocati sul territorio).

I dati grafici usati nei GIS possono essere codificati in base a due modelli, vettoriale (punti, linee, poligoni) o raster (a griglia o immagini). Nel formato vettoriale, gli oggetti sono descritti attraverso un sistema di coordinate (x,y) che consente, attraverso opportuni sistemi di proiezione e di georeferenziazione, una rappresentazione spaziale (geometrica) praticamente in qualunque scala, compatibile con le dimensioni dei supporti di visualizzazione o di stampa.

I principali software di elaborazione e visualizzazione GIS attualmente sul mercato (Geographic della Bentley, GeoMedia della Intergraph, Arcview e ArcGis della ESRI,

MapInfo-Professional della Mapinfo, l'open source GRASS) sono realizzati come database relazionali le cui features (i records) possiedono una componente geografica (shape) e una serie di attributi (tabelle) che codificano le informazioni alfanumeriche e le associano (tramite relazioni) agli oggetti della cartografia vettoriale georeferenziata.

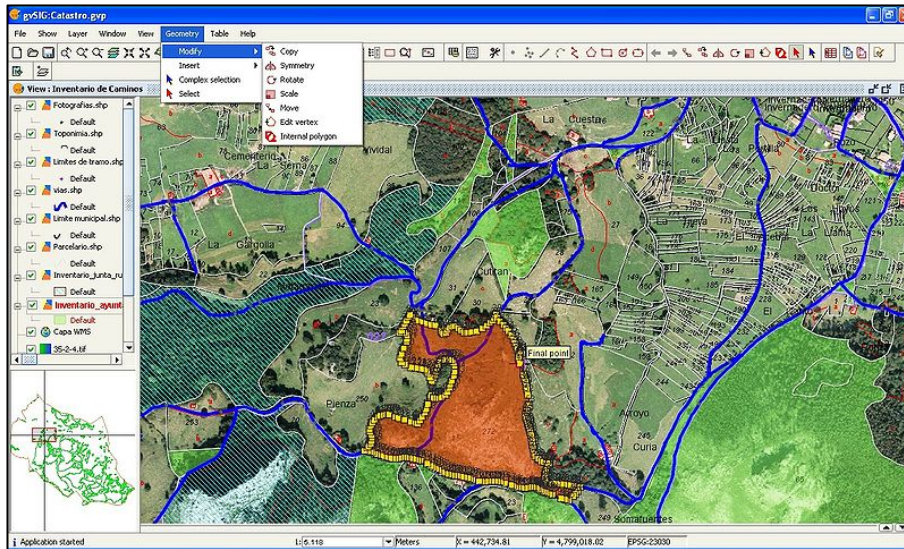


Fig.2c – Schermata di un modello GIS

L'introduzione dei GIS nelle applicazioni dei trasporti, viabilità e traffico, sia in aree extraurbane che urbane, rappresenta oggi una delle principali aree di utilizzo della tecnologia GIS. Negli ultimi anni, i database geografici sono stati integrati con funzioni e procedure per il trattamento di grafi stradali (che costituiscono la struttura portante dei modelli di viabilità), per la costruzione e la manipolazione di matrici (che contengono i dati sugli spostamenti o sulle distanze e tempi origine/destinazione), per la modellizzazione e la simulazione (ottimizzazione di percorsi e vehicle routing; modelli di localizzazione e assegnamento; modelli di traffico e di simulazione delle emissioni di inquinanti; modelli di clustering; di interazione spaziale e di attrazione/generazione; modelli di disegno delle linee di trasporto e di valutazione delle prestazioni di reti urbane o extraurbane).

Infine, iniziano a diffondersi nuove applicazioni: i sistemi di trasporto intelligenti basati sulle tecniche GIS/GPS (sistemi di navigazione e controllo satellitare, controllo e micro-regolazione del traffico, monitoraggio dell'incidentalità, ecc.); sistemi esperti per la valutazione ed il miglioramento delle infrastrutture; erogazione via WEB di

servizi di informazione sulla rete viaria e sulle condizioni di traffico (utilizzando mappe tematiche dinamiche aggiornate in tempo reale).

In particolare, il connubio tra GPS (Global Position System) e GIS ha dato vita ad una serie di esperienze applicative. Grazie alla possibilità di ottenere in un qualsiasi momento la posizione geografica di un mezzo in movimento, si sono moltiplicati i progetti di sistemi di controllo delle flotte di autoveicoli e di ogni altro mezzo di trasporto; si hanno esempi di applicazioni che vanno dai sistemi di controllo degli autobus pubblici urbani, all'ottimizzazione dei percorsi di consegna dei corrieri, al controllo del traffico nelle aree urbane. La maggior parte di tali sistemi si basa su ricevitori GPS installati a bordo dei veicoli, che trasmettono la loro posizione via radio ad una centrale che può così monitorare, in real time, la posizione del veicolo stesso su un sistema geografico. Le informazioni geografiche principalmente usate in tali applicazioni sono i grafi stradali, gli stessi adoperati nei navigatori satellitari. Tali grafi contengono tutte le informazioni sia di tipo topologico che sulla viabilità. In alcune applicazioni la posizione del mezzo monitorato può essere associata alla strada che sta percorrendo, alla distanza percorsa o da percorrere, alla distanza da un punto di interesse, in modo tale, ad esempio, da poter fornire agli utenti di un servizio (ad esempio il servizio bus nelle aree urbane) informazioni circa i tempi previsti di arrivo dei bus.

Le applicazioni nel settore della distribuzione delle merci fanno uso delle stesse tipologie di dati (grafi stradali) e funzioni di analisi spaziale per lo studio dei percorsi, che vengono calcolati in funzione delle distanze, del tipo e quantità di merce da distribuire, della capacità di carico dei mezzi, delle finestre orarie etc.. La peculiarità di tali sistemi è che la programmazione degli itinerari può essere variata in ogni momento in funzione di particolari condizioni della rete stradale; controllare la posizione del mezzo dà la possibilità di monitorare se la tempistica prevista in fase di programmazione del percorso viene rispettata, evitando così un eccessivo incremento dei costi.

Un problema di City Logistics può essere gestito con grande efficienza mediante l'utilizzo di software GIS. L'utilizzo di tali sistemi richiede necessariamente una scomposizione delle componenti del processo da studiare. In particolare, si riporta di seguito una possibile schematizzazione dei processi fondamentali della logistica delle merci:

- tracciamento del veicolo: conoscenza della posizione del veicolo in ogni istante di tempo, con le relative informazioni sullo stato di funzionamento;

- analisi del percorso: minimizzazione del costo dello spostamento per il trasporto della merce da un luogo all'altro in termini di costi monetari, tempo o una combinazione di questi;
- routing e scheduling: minimizzazione di tutti i tipi di costo (percorso, etc.) e massimizzazione delle prestazioni, compresa la soddisfazione del cliente.

Per ciascuno di questi campi di applicazione può essere costruito un modello di risoluzione dedicato, implementabile nel GIS; con il supporto di questa strumentazione, è inoltre possibile gestire contemporaneamente problemi di percorso dei veicoli, operazioni di magazzino, carico e scarico delle merci, assegnazione delle operazioni e schedulazione delle partenze.

Nell'ambito della ricerca sono stati censiti alcuni software commerciali che affrontano la problematica della City Logistics mediante la combinazione di strumenti GIS, modelli di ottimizzazione e algoritmi di risoluzione. Di seguito, sono sinteticamente descritti i software commerciali maggiormente utilizzati nel settore dei trasporti e della logistica delle merci.

Software TransCAD

TransCAD è tra i principali software commerciali utilizzati per la macro-simulazione delle reti di trasporto. Esso combina un sistema GIS con una serie di modelli matematici, modelli statistici e Ricerca Operativa. La particolarità di TransCAD è la semplicità con cui consente di collegare i dati tabellari agli elementi geografici, di effettuare le interrogazioni e di visualizzare i risultati. Tra i moduli presenti nel software vi è quello relativo al "Routing and Logistics". Il software consente anche la stima delle emissioni inquinanti con riferimento ad un particolare scenario di traffico assegnato ad una rete. Il modulo relativo alla stima dell'inquinamento atmosferico è basato sul Modello COPERT, descritto nel secondo capitolo. TransCAD contiene una vasta gamma di strumenti per le applicazioni nel campo dei trasporti quali:

- analisi di rete;
- modelli di domanda e di pianificazione dei trasporti;
- ottimizzazione di itinerari e logistica (Fig.3c);
- modelli di localizzazione di infrastrutture e di zonizzazione.

I modelli di analisi di rete sono utilizzati per risolvere varie tipologie di problemi di trasporto:

- la procedura di calcolo del percorso minimo genera l'itinerario più corto, più veloce o quello a minor costo tra più origini e destinazioni e con qualsiasi numero di punti intermedi;
- i modelli di partizione della rete creano una suddivisione della rete stradale in base all'accessibilità, effettuano analisi del tempo di spostamento o la stima delle possibili localizzazioni di infrastrutture;
- i modelli del commesso viaggiatore determinano itinerari efficienti che visitano un numero qualsiasi di punti sulla rete.

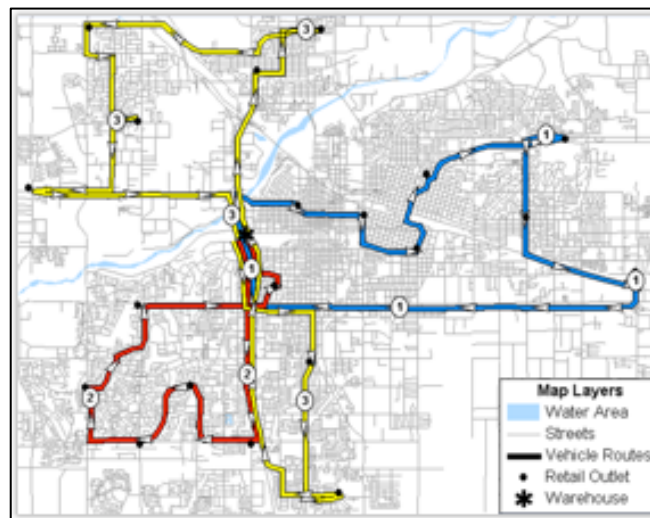


Fig.3c - Output del Software TransCAD: un problema di routing

I modelli di ottimizzazione di itinerari e di logistica riguardano varie applicazioni, ad esempio:

- operazioni di prelievo e consegna della merce;
- manutenzione delle infrastrutture stradali;
- rimozione della neve dalle strade;
- operazioni di consegna porta a porta;
- raccolta dei rifiuti solidi urbani.

I modelli di localizzazione e di zonizzazione hanno applicazione sia nel campo dei trasporti che in quello del marketing; tali modelli possono essere utilizzati per:

- l'implementazione della zonizzazione di un'area di studio;
- la gestione delle vendite;
- la pianificazione della localizzazione dei depositi;
- la pianificazione della localizzazione dei centri commerciali e dei punti vendita al dettaglio;
- la pianificazione della localizzazione delle infrastrutture per la sicurezza pubblica (vigili del fuoco, polizia, ospedali).

Software City Goods

City Goods è uno strumento di supporto alle decisioni (commercializzato da OptIT) per la valutazione quantitativa di politiche di gestione della logistica urbana delle merci (regolamentazione dell'accesso e della sosta dei veicoli merci; localizzazione dei centri logistici).

Tale strumento è stato sviluppato e calibrato per la Regione Emilia Romagna, nell'ambito di alcuni progetti europei (CityPorts, Merope). Il software, con riferimento alle attività economiche presenti sul territorio, quantifica gli spostamenti dei veicoli merci sulla rete stradale, suddividendoli per filiera e per matrici Origine/Destinazione. Il sistema simula l'interazione della distribuzione delle merci con il sistema di trasporto in termini di: interazione con le altre componenti della mobilità, livelli di congestione, impatti (inquinamento etc.), prestazioni (tempi e costi).

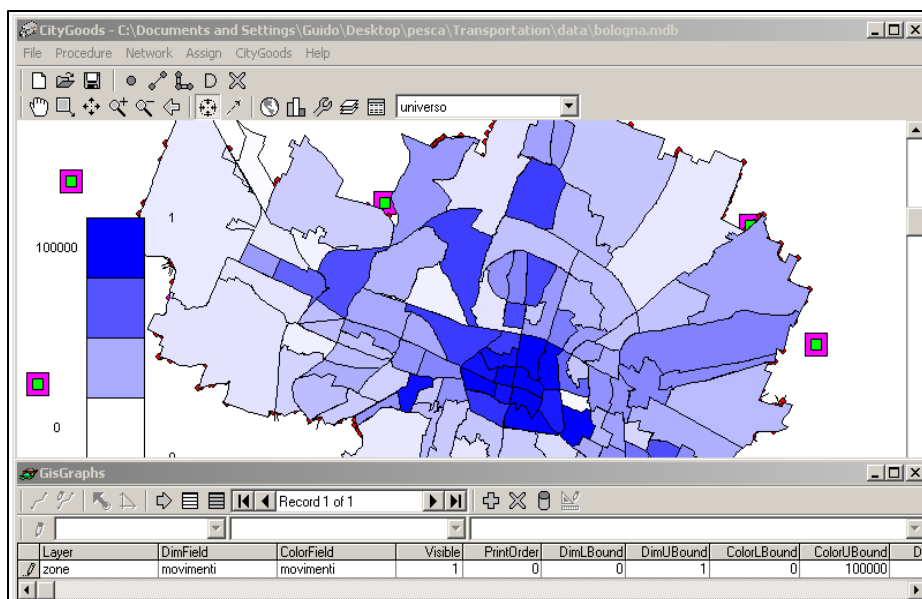


Fig.4c - Modulo di generazione degli spostamenti

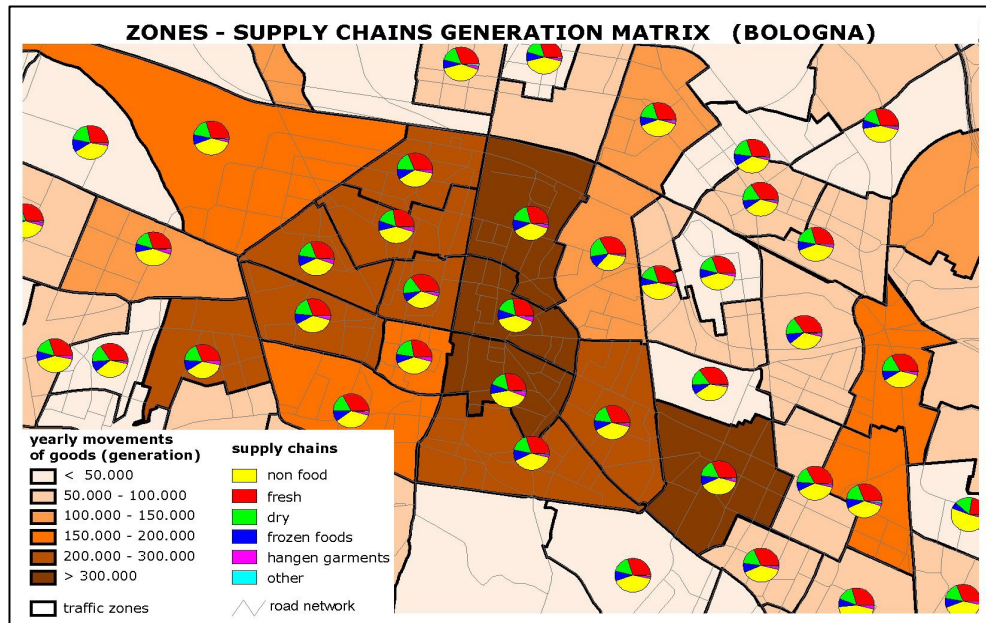


Fig.5c - Generazione dei flussi per tipologia merceologica

Software PathFinder

PathFinder (Tellus) è un'applicazione di ottimizzazione dei percorsi e di schedulazione delle consegne finalizzata alla riduzione dei costi della logistica urbana delle merci. Attraverso il software è possibile assegnare le attività alle flotte di mezzi, imporre vincoli di spostamento e pianificare le consegne ottimizzando i percorsi, grazie all'utilizzo di sofisticati algoritmi. Inoltre, grazie ad un modulo aggiuntivo (ADDRESSfinder) è possibile georeferenziare tutti gli indirizzi di consegna delle merci. Il software ottimizza il numero di mezzi utilizzati per effettuare le attività di consegna, tenendo conto dei parametri e dei vincoli inseriti dall'utente. Per rendere maggiormente fruibile l'inserimento dei dati è possibile monetizzare le informazioni specificando dei costi tipo: costo per chilometro del mezzo, costo orario dell'autista, costo dello straordinario, etc. Un'altra utile funzione a disposizione dell'utente è la generazione di "isocrone", ovvero, dato un punto sulla mappa ed un tempo di percorrenza, il software calcola e disegna l'area raggiungibile secondo le specifiche date; in tal modo sono semplificate le valutazioni relative alla localizzazione di eventuali nuovi depositi sui punti che sono fuori dalla portata dei mezzi, etc..

Software OptiPark

OptiPark è un sistema, sviluppato da AntOptima, utilizzato per l'ottimizzazione della distribuzione delle merci che consente la prenotazione delle piazzole di carico/scarico collocate all'interno di una città.

OptiPark è costituito da sette moduli principali:

- Server di gestione con relativi software;
- Gestione utenti, con autenticazione degli accessi. In particolare, ciascun utente (trasportatore) si collega all'applicativo via internet tramite un browser con la possibilità di accedere ai moduli di prenotazione delle piazzole e ottimizzazione della distribuzione;
- Amministrazione utenti: attraverso questo modulo l'amministratore del sistema può creare/eliminare gli account degli utenti e gestire le specifiche degli accessi degli stessi;
- Gestione piazzole e fasce orarie: l'amministratore accede al modulo di gestione piazzole e inserisce/visualizza/modifica una nuova piazzola, specificando le informazioni relative alla localizzazione e alla disponibilità in termini di fasce orarie;
- Gestione prenotazione piazzole: tramite una griglia, l'utente può verificare lo stato di prenotazione delle piazzole. In particolare, l'utente visualizza lo stato di ciascuna piazzola (libera, prenotata dal proprio profilo, prenotata da altri trasportatori) per ciascuna fascia oraria. L'utente ha la possibilità di modificare le caratteristiche della propria prenotazione o di annullarla (Fig.6c);

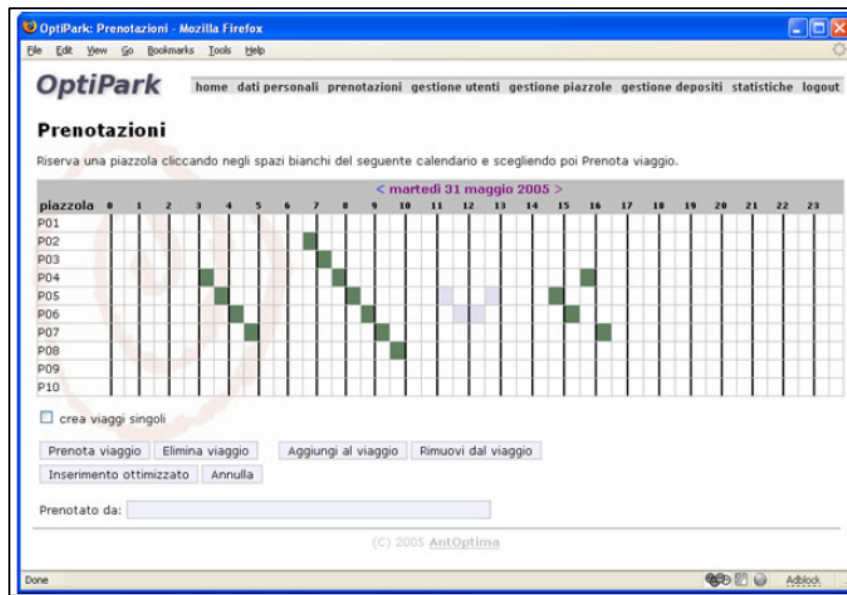


Fig.6c – Schermata di prenotazione manuale delle piazzole del software OptiPark

- Ottimizzazione della distribuzione: oltre alla prenotazione manuale delle piazzole il sistema consente la generazione automatica delle prenotazioni per un singolo viaggio. In particolare, per ciascun viaggio l'utente indica di quali piazzole intende usufruire, eventualmente la fascia oraria desiderata o l'orario di partenza da un certo deposito. OptiPark, mediante l'implementazione di algoritmi di ottimizzazione, calcola e propone all'utente un piano con la prenotazione delle piazzole indicate, in modo tale da minimizzare la durata complessiva del viaggio. L'utente può decidere se accettare o meno il piano proposto dal sistema;
- Statistiche di sistema; tale modulo consente il calcolo e la visualizzazione di indici e di informazioni relative all'uso delle piazzole di carico/scarico, in base agli utenti, alle fasce orarie e ai giorni della settimana.

OptiPark è stato installato su un server dedicato presso il Comune di Parma, nell'ambito del progetto europeo CityPort.