



# Mobilità veicolare, emissioni inquinanti e impatti sulla salute pubblica<sup>1</sup>

## Urban Mobility and Polluting Emissions: Impacts on Public Welfare

Romano Fistola\*, Mariano Gallo\*, Rosa Anna La Rocca\*\*

\* Dipartimento di ingegneria, piazza Roma, 21 Benevento  
Università degli Studi del Sannio  
e-mail: rfistola@unisannio.it; web: www.romanofistola.it  
e-mail: gallo@unisannio.it; web: www.marianogallo.it

\*\* Laboratorio Territorio Mobilità Ambiente - TeMALab  
Dipartimento di Pianificazione e Scienza del Territorio  
Università degli Studi di Napoli Federico II  
e-mail: larocca@unina.it; web: www.dipist.unina.it

### Emissioni veicolari inquinanti e danno antropico

L'inquinamento atmosferico, comunque prodotto, è causa di diversi effetti negativi sull'ambiente e, più in generale, sulla qualità della vita.

Gli effetti più gravi dell'inquinamento atmosferico sono relativi alla salute umana; diversi studi svolti in diverse parti del mondo hanno dimostrato una stretta relazione tra i livelli di concentrazione nell'aria di alcuni agenti inquinanti ed alcune malattie dell'uomo, in particolare le malattie polmonari ed a carico dell'apparato respiratorio. Un recente studio dell'APAT (2007) ha stimato che oltre 8000 morti l'anno sono attribuibili al PM10 in tredici città italiane con oltre 100.000 abitanti.

Il traffico stradale è una delle principali fonti di inquinamento ed assume un maggiore rilievo in ambito urbano, laddove l'elevata congestione produce emissioni più elevate e l'esposizione della popolazione agli inquinanti è maggiore, data l'elevata densità di popolazione.

Questo articolo introduce il problema della valutazione in ambito urbano degli effetti dell'inquinamento atmosferico prodotto dal traffico stradale e dell'individuazione delle infrastrutture stradali "critiche" da questo punto di vista.

La ricerca, finanziata dalla Regione Campania ai sensi della LR n. 5 del 2002, è nella fase iniziale ed ha per scopo valutare gli effetti delle emissioni inquinanti, in particolare del PM10, sulla salute umana nell'ambito della Regione Campania, della Provincia di Benevento e del Comune di Benevento.

In questa sede ci si riferisce segnatamente all'ambito urbano, proponendo una metodologia di individuazione delle infrastrutture critiche dal punto di vista ambientale, sulle quali è necessario limitare il traffico veicolare.

Obiettivo dello studio, è l'individuazione degli ambiti territoriali maggiormente esposti ad elevati livelli di pericolosità per la salute pubblica derivanti dalla mobilità veicolare. Presupposto fondamentale dello studio è stata la considerazione che gli

The air pollution due to road traffic represents a real environmental emergency, in particular in urban and metropolitan contexts with high population density.

The admitted maximum values of air pollutants are frequently exceeded and it forces local administrations to intervene with limitations of vehicular circulation.

Several epidemiologic studies have highlighted as the atmospheric pollution produces serious damages to the human health. In particular, the thin powders, or particular matter, (PM10) are considered one of more dangerous pollutants for the human health.

This article deals with a more extended research that proposes to specify a model tool to estimate the effects on human health produced by pollutant emissions due to road traffic, in regional and urban areas.

Generally, the estimation of the effects on human health should be obtained by the estimation of pollutant emissions, of pollutant concentrations, of the exposure level to such pollutants (percentage of population exposed, duration of the exposure, etc.), and by the definition of the consequences of the exposure on the human health.

The limit of this procedure consists on the application to little territorial areas (for example the effects of a single infrastructure) in limited time (peak-hours, time bands, etc.); furthermore the estimation models of concentrations are, generally, not much reliable, since the continuous variations of atmospheric conditions (winds, temperatures, precipitations, etc.) and of the urban pattern (urban canyons, etc).

In this research we propose to examine, for different territorial ambits (regional, provincial and/or communal) the correlation between the annual total emissions (for surface unit or according to other territorial and/or environmental factors) of pollutants and the mortality and morbidity rates related to the polluting emissions.

The first ones can be estimated using international consolidated procedures (COPERT) and the second ones using official epidemiologic statistic data. The examination of correlation between these two factors for different territorial areas (for example for different Italian regions and provinces, classified by homogenous anthropic and territorial characteristics) can lead to specify mathematical models that can be able to estimating the relation between mortality and morbidity rates and specific emissions.

The application of these models allows to estimate the effects on the health due to pollutant emissions and, therefore, to evaluate the effects of reducing or increasing emissions produced by urban mobility management.

effetti inquinanti abbiano una correlazione con la morfologia del tessuto dei centri urbani ed in particolare con la struttura fisica della rete viaria. In altri termini, assunto dello studio è che sia possibile individuare all'interno del sistema urbano alcuni canali critici che per la loro struttura fisica non possono supportare alcun tipo di traffico veicolare se non compromettendo notevolmente i livelli di sicurezza della salute umana.

### L'inquinamento atmosferico da traffico stradale

L'inquinamento atmosferico è quel fenomeno per il quale particelle estranee alla composizione naturale dell'atmosfera e nocive per il benessere o la salute umana sono presenti nell'atmosfera con diversi livelli di concentrazione.

L'inquinamento atmosferico può essere sia di origine "naturale", per i fenomeni collegati ad attività vulcaniche, incendi boschivi, attività geotermiche, ecc., che "artificiale", attribuibile ad attività antropiche; questa seconda forma di inquinamento, tranne che in casi eccezionali, è prevalente ed è maggiormente presente laddove maggiore è la concentrazione di residenze ed attività umane.

Le attività antropiche principali responsabili dell'inquinamento dell'aria sono le industrie, i trasporti, le attività domestiche e gli impianti per la produzione di energia (centrali termoelettriche).

La misura dell'inquinamento atmosferico avviene generalmente in funzione della concentrazione nell'atmosfera di sostanze inquinanti (ad esempio in ppm o g/mc); i livelli di concentrazione dipendono dal quantitativo di emissione di agenti inquinanti dalle varie sorgenti e dai successivi processi di dispersione in atmosfera delle sostanze inquinanti, funzione delle condizioni meteorologiche (frequenza delle piogge, venti, temperature, ecc.). Il vento, in particolare, influenza sia la dispersione degli inquinanti in atmosfera che il fenomeno della risospensione delle polveri.

Importante è, poi, il fenomeno della "inversione termica", che si manifesta quando uno strato di aria calda sovrasta uno strato di aria fredda; tale fenomeno favorisce il ristagno dell'aria ed incrementa i livelli di concentrazione di agenti inquinanti, soprattutto nelle aree urbane.

In base alla loro origine, le sostanze inquinanti possono essere distinte in:

- *inquinanti primari*, se sono emesse direttamente in atmosfera;
- *inquinanti secondari*, se si formano nell'atmosfera a partire dagli inquinanti primari, in conseguenza di reazioni chimiche.

In base al livello di nocività ed alla durata del fenomeno inquinante, si distinguono due tipologie di inquinamento:

- *acuto*, se la concentrazione di sostanze inquinanti è elevata per un breve periodo di tempo;

- *cronico*, se la concentrazione di sostanze inquinanti è più modesta, ma persiste per lunghi periodi di tempo. Le due tipologie hanno effetti diversi e provocano danni diversi alla salute umana.

Uno degli agenti inquinanti responsabile dei maggiori danni alla salute umana è il particolato o polveri sottili, che viene monitorato con apposite centraline in quasi tutte le principali città italiane.

### Il particolato

Il particolato è una complessa combinazione di particelle costituite da sostanze organiche e miscelate allo stato condensato (solido o liquido); queste particelle hanno diversa dimensione, composizione ed origine.

Le componenti principali del particolato sono solfati, nitrati, ammoniaca, cloruro di sodio, carbone, polvere minerale, acqua, metalli e idrocarburi policiclici aromatici.

Le particelle possono essere classificate come primarie o secondarie a seconda del meccanismo da cui sono formate. Le particelle primarie sono emesse direttamente in atmosfera attraverso processi antropogenici e naturali, mentre le secondarie si formano nell'aria a seguito di reazioni chimiche di inquinanti gassosi.

Il particolato è classificato in funzione della dimensione della particella nelle seguenti tipologie:

- *PM10*, se le particelle hanno una dimensione (diametro aerodinamico) inferiore ai 10 micron; tali particelle sono in grado di raggiungere per via aerea la parte superiore dell'apparato respiratorio ed i polmoni;
- *PM2,5*, se le particelle hanno una dimensione inferiore ai 2,5 micron; queste particelle sono particolarmente pericolose per la salute umana in quanto possono penetrare più profondamente nei polmoni e raggiungere gli alveoli.

Le frazioni con particelle di dimensione compresa tra i 10 ed i 2,5 micron è anche detta grossolana.

La dimensione delle particelle influenza il tempo di sospensione delle stesse in atmosfera che è inversamente proporzionale alla dimensione: il PM10 sedimenta entro alcune ore dalla sua emissione e le precipitazioni lo eliminano più rapidamente, il PM2,5 può rimanere in atmosfera per giorni o settimane ed essere trasportato per lunghe distanze.

Nonostante la differente pericolosità, in Italia solo il PM10 è quasi ovunque costantemente monitorato con apposite centraline fisse.

### Flussi veicolari ed emissioni inquinanti

Le emissioni di agenti inquinanti prodotte dal traffico veicolare sono correlate alle caratteristiche del flusso di

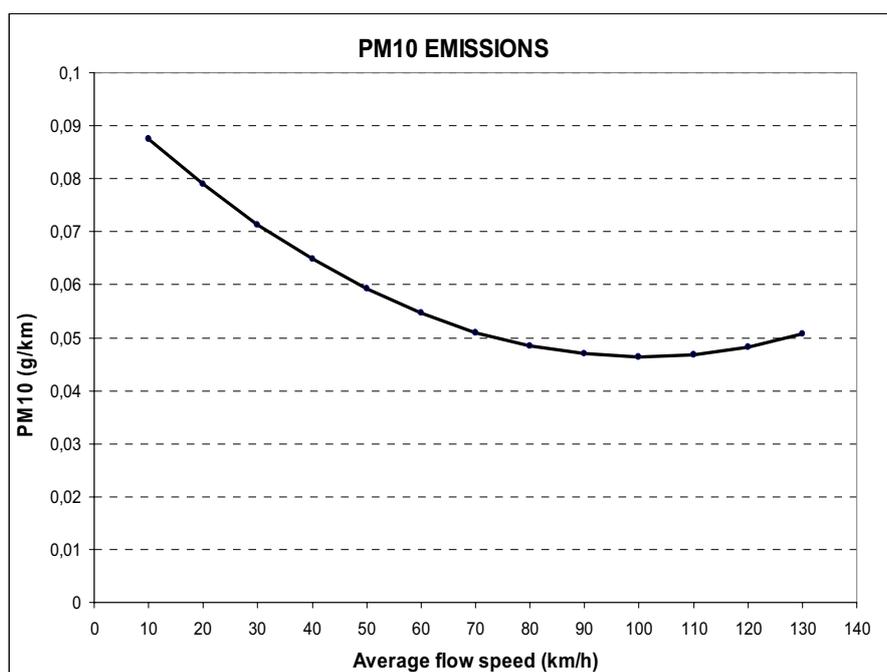
traffico che impegna una determinata infrastruttura stradale; le caratteristiche fondamentali sono:

- la *composizione del parco veicolare*, in quanto le diverse tipologie di veicoli producono diverse emissioni specifiche al variare della cilindrata, del tipo di veicolo e delle normative europee sulle emissioni che rispettano (Euro 0, ..., Euro 5);
- l'*entità del flusso* di traffico;
- le *condizioni del deflusso*, in particolare rappresentate dalla velocità media del flusso di traffico su un determinato arco stradale.

I modelli di stima delle emissioni di agenti inquinanti dal traffico veicolare maggiormente utilizzati a livello internazionale sono i modelli Corinair (2007), che stimano le emissioni per veic-km di diverse tipologie di agenti inquinanti e di gas serra per numerose categorie di veicoli suddivisi per tipologia, cilindrata, tipologia di alimentazione (benzina, gasolio, GPL) e per tipologia di norma anti inquinamento.

Prendendo in esame l'andamento delle funzioni di emissione per veic-km al variare della velocità media del flusso di traffico riferito al parco veicolare della Provincia di Benevento, si può notare che le emissioni maggiori si registrano a velocità basse, laddove prevale l'effetto della congestione, e a velocità elevate, laddove prevale il maggior consumo di carburante. Si noti pure come in ambito urbano, dove le velocità medie non superano generalmente i 50 km/h, la funzione di emissione sia decrescente con la velocità, per cui la fluidificazione del traffico, con conseguente aumento della velocità media è l'obiettivo da raggiungere per poter ridurre le emissioni, insieme con la riduzione dell'uso dell'autovettura.

Emissioni medie per autovettura riferite al parco veicolare della Provincia di Benevento.



### Inquinamento da traffico veicolare e morfologia urbana

L'interazione entropica uomo/ambiente trova nell'ecosistema urbano le sue espressioni più significative relativamente all'impatto inquinante che le attività umane producono sull'habitat antropico per eccellenza: la città.

La tecnologia rappresenta, nel contesto urbano, uno dei principali fattori per lo sviluppo ed il progresso della collettività; al contempo, rappresenta anche il principale dispositivo di trasformazione dell'energia, da attiva ad inattiva: in estrema sintesi la tecnologia è un generatore di entropia urbana (Rifkin 2000).

Nella storia dell'evoluzione urbana, la tecnologia, sempre più aggiornata e raffinata, ha determinato le principali transizioni e trasformazioni della città ricoprendo un ruolo fondamentale nella rivoluzione industriale, in quella post-industriale ed in quella digitale, attualmente in atto (Lyotard 1979). Non vi è dubbio che accanto all'enorme sviluppo socio-urbano si siano generati anche molti squilibri evidenziati da numerosi studiosi ed osservatori dei fenomeni di trasformazione in atto (Noble 1993).

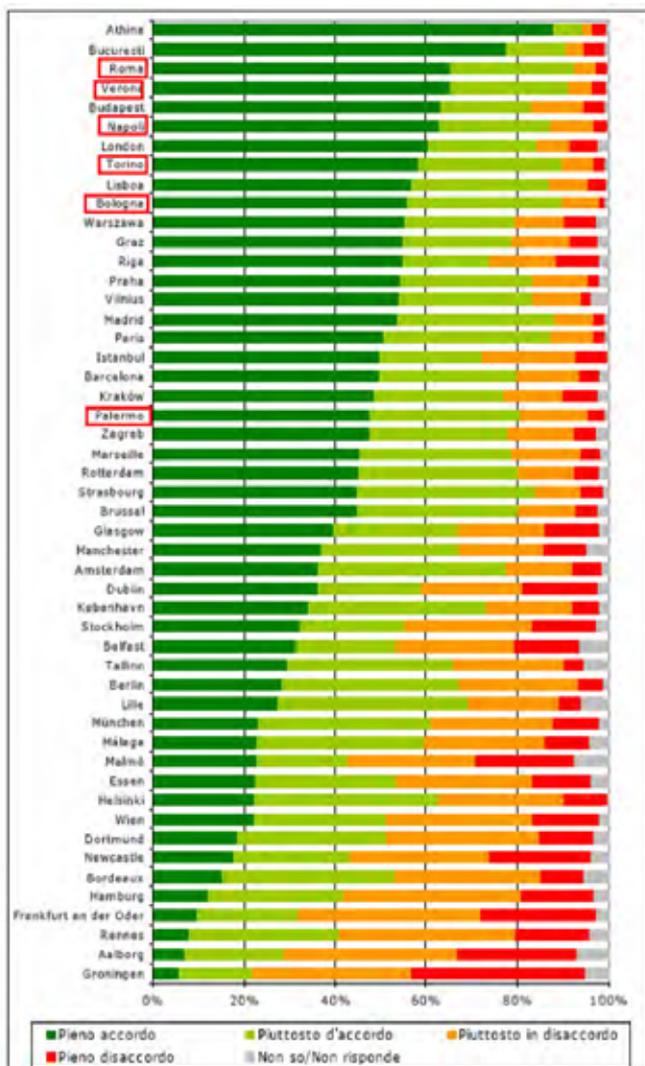
Nel sistema territorio/ambiente la città è il luogo di più alta accumulazione di tecnologia e senza di essa sarebbe difficile assicurare ai cittadini la sopravvivenza.

La tecnologia consente lo sviluppo di nuove attività antropiche, ma determina nuove emissioni entropiche e comportamenti a rischio (Mitchell e Townsend 2005).

In tale contesto di sfondo la funzione "mobilità" è probabilmente quella che, all'interno del più vasto sistema funzionale urbano –composto da tutte le attività che si svolgono nella città– è maggiormente connotata dalla tecnologia e dalle innovazioni tecnologiche ed è quella che ha maggiormente inciso sui processi di transizione/trasformazione dell'insediamento umano.

Basti pensare che la scintilla della rivoluzione industriale fu innescata dalla necessità, nell'Inghilterra di fine Settecento, di trasportare le merci ed il carbone fra le diverse città del Regno Unito e nel contemporaneo bisogno di affidarsi ad un sistema di trazione che potesse superare i limiti del traino equestre.

Nello specifico interesse di questo studio si pone l'indagine sugli effetti dell'inquinamento che la principale attività umana, la mobilità, produce in ambito urbano. In campo europeo, il problema è fortemente avvertito



Risposte della popolazione di alcune città europee (nei riquadri in rosso quelle italiane) alla domanda: "in città l'inquinamento dell'aria è un grande problema?".

dalle popolazioni urbane delle grandi concentrazioni metropolitane che lo individuano come una delle principali ragioni di invivibilità.

Il sistema fisico, lo spazio adattato, il contesto costruito, contribuisce, per ragioni sostanzialmente riconducibili alla morfologia del tessuto della città, a trattenere gli inquinanti all'interno dei "canali" urbani ed a favorirne il contatto e l'assorbimento da parte della componente antropica.

In altri termini è immediato cogliere il rapporto fra "pattern" urbano e rischi per la popolazione insediata. Va sottolineato che, in generale, tale rischio non è unicamente riconducibile all'inquinamento atmosferico. Pare utile a questo punto introdurre delle considerazioni di fondo connesse con i concetti di rischio, vulnerabilità ed esposizione dei sistemi urbani.

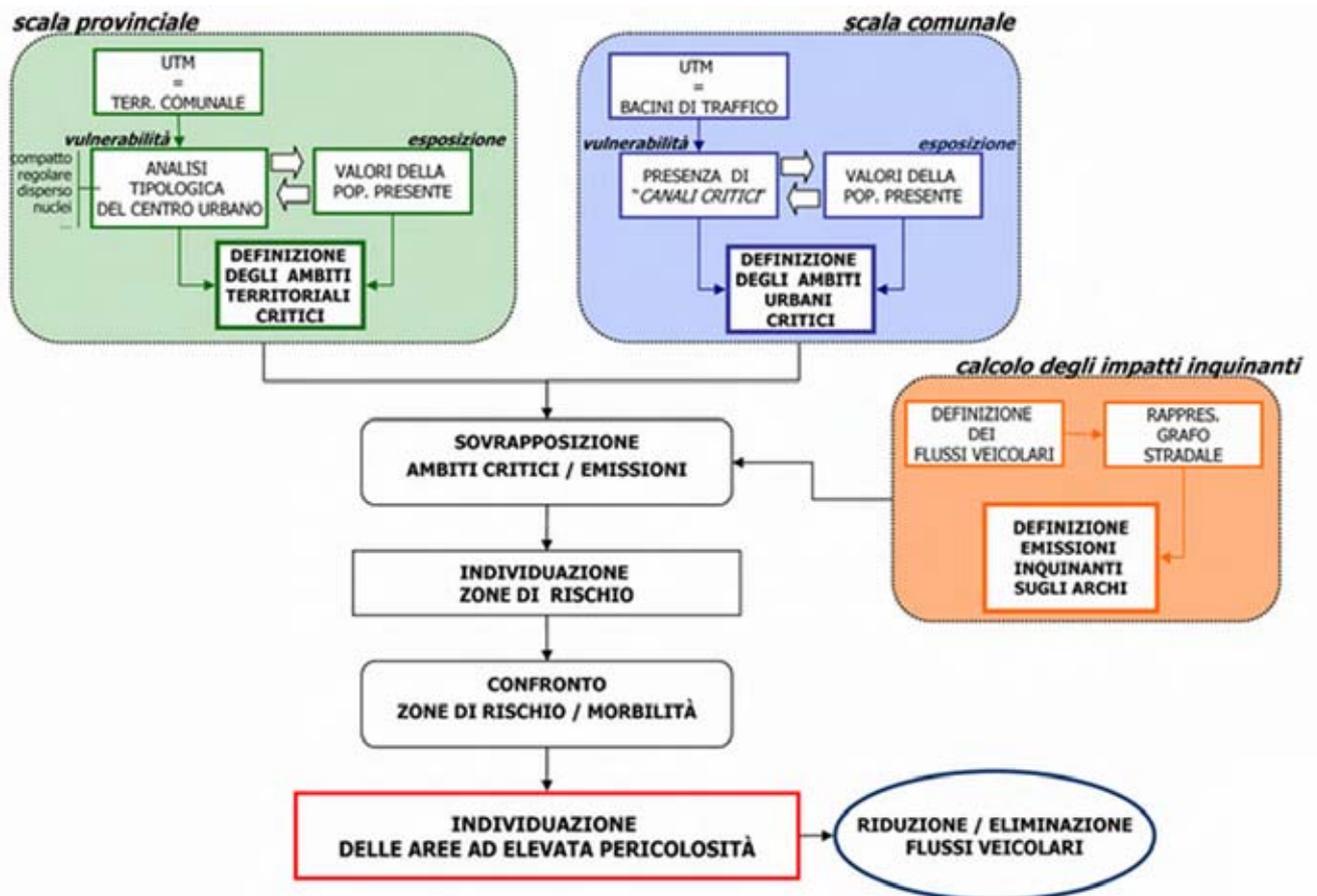
La vastissima letteratura internazionale esistente sul tema del rischio urbano, di natura antropica, naturale o globale (Fistola e La Rocca 2009) consente di rinvenire utili definizioni

relative alla caratterizzazione delle diverse "dimensioni" del rischio nelle città.

Non potendo in questa sede richiamare gli innumerevoli approfondimenti esistenti sul tema, pare tuttavia utile specificare le accezioni che ai termini rischio, vulnerabilità ed esposizione si intende attribuire.

In questo studio si vogliono definire le condizioni di rischio per il sistema urbano che vengono a prodursi per effetto degli impatti inquinanti generati dalla mobilità veicolare urbana. In tal senso, i concetti di esposizione e vulnerabilità del sistema urbano, che canonicamente compaiono nella definizione del rischio, vengono ridefiniti e riferiti l'uno alla componente antropica (la popolazione) e l'altro alla conformazione della componente fisica della città (il tessuto





Lo schema evidenzia i principali step della procedura messa a punto riferiti sia alla scala di area vasta, sia alla scala comunale. Il risultato finale della procedura consiste nella individuazione delle "aree ad elevata pericolosità". Le possibili azioni da mettere in campo per ottimizzare i livelli di sicurezza in tali aree fanno riferimento alla necessità di ridurre od eliminare i flussi veicolari.

urbano). Le emissioni inquinanti, riconducibili alla quantità e intensità dei flussi veicolari, verranno considerate quale fattore incidente sul sistema (Zimmermann 2005).

Sintetizzando i diversi passaggi e considerando le diverse scale territoriali è possibile individuare una prima fase della procedura tesa alla definizione della vulnerabilità e dell'esposizione e, allo stesso tempo, del fattore incidente rappresentato dall'individuazione delle emissioni inquinanti sui singoli canali di mobilità. Il secondo macro-step è riconducibile alla sovrapposizione delle informazioni ed alla conseguente definizione delle "Zone di Rischio".

Nell'area vasta, tali zone coincidono con interi contesti comunali, mentre alla scala urbana sono costituite da aree sub-urbane.

Al termine della procedura di definizione del rischio si avvierà un protocollo di verifica che interfaccerà i dati relativi all'ubicazione dei danni ai residenti (in termini di patologie connesse all'inquinamento da idrocarburi) con le aree di maggiore pericolosità. In tale definizione, le specifiche della vulnerabilità, riconducibili alla morfologia del tessuto urbano, appaiono fondamentali.

### I determinanti del rischio nei "canali critici" del sistema fisico della città

Come molti studi hanno messo in evidenza<sup>2</sup>, le condizioni di rischio, o meglio di vulnerabilità urbana, possono essere amplificate da particolari assetti del patrimonio costruito e della forma fisica della città, dove la struttura della maglia stradale assume un ruolo di rilievo.

Generalmente tali condizioni sono riconducibili a specifiche caratteristiche che possono essere riconducibili a:

- compattezza del tessuto urbano;
- prevalenza dei pieni sui vuoti;
- tortuosità della maglia dei canali stradali;
- sezione ridotta dei canali stradali;
- lunghezza dei tratti;
- altezza delle fronti di cortina;
- pendenza dei canali;
- esigua presenza di spazi aperti;
- sconnessione del fondo stradale;
- restringimenti della sezione e presenza di ostacoli;
- vetustà del costruito.



Considerando quanto appena esposto, si possono formulare due riflessioni di fondo:

- le caratteristiche del tessuto descritto generano una condizione “diffusa” di vulnerabilità urbana riconducibile a diverse categorie di rischio: inquinamento atmosferico, sismico, idrogeologico, meteo-climatico (isole di calore), ecc.;
- le caratteristiche del tessuto descritto possono essere rappresentative della morfologia della maggior parte dei centri abitati del nostro paese ed in particolare dei nuclei più antichi.

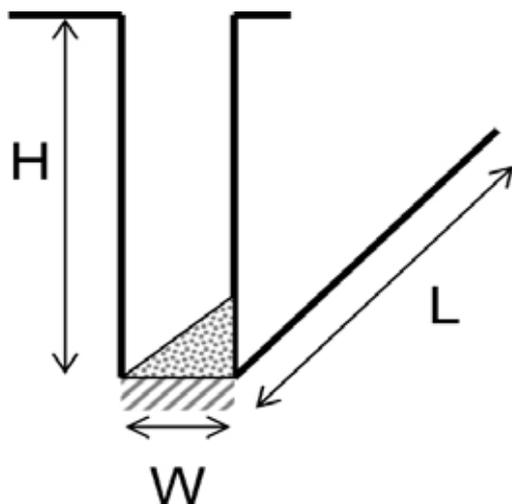
Appare, quindi, di rilevante interesse studiare le interazioni fra morfologia urbana e fattori di rischio. Nello specifico di questo lavoro, come detto, si farà riferimento al rischio da inquinamento atmosferico riconducibile alle emissioni dovute alla mobilità veicolare. In particolare, si tenterà di codificare le condizioni di rischio elevato che si generano per la particolare morfologia e geometria dei canali stardali urbani che, proprio per le loro caratteristiche, possono conseguentemente trasformarsi in “canali critici” urbani.

All’interno di molti centri urbani italiani, ed europei in genere, è frequente individuare interi brani di tessuto urbano che

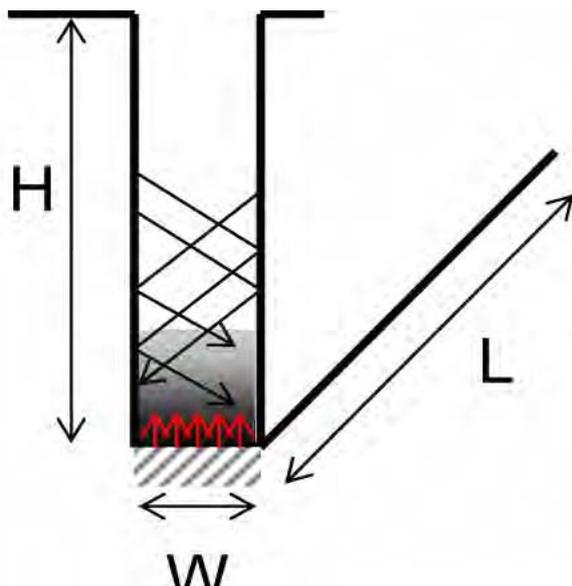
generalmente coincidono con la parte urbana di più antica formazione.

Queste parti della città hanno connotazioni morfologiche corrispondenti con le undici caratteristiche elencate in precedenza.

Elemento strutturante di tali "pattern" urbani, composti di edifici, strade, incroci, passaggi, spazi aperti, ecc., sono i "canali" rappresentati dalla continuità degli archi stradali.



Le caratteristiche geometriche che definiscono un canyon urbano fanno riferimento al verificarsi contemporaneo di tre condizioni che mettono in relazione la dimensione della sede stradale (W), la lunghezza della strada (L) l'altezza delle fronti stradali (H) prevalentemente composta da cortina edilizia continua.



Il fenomeno della trappola termica si ingenera all'interno dei canyon urbani quando la radiazione solare determina un surriscaldamento e una stagnazione dell'aria favorendo la permanenza degli inquinanti.

La particolare morfologia del tessuto urbano contribuisce a definire microclimi urbani caratterizzati da elevate temperature riconducibili a sensibili variazioni delle caratteristiche radiative, aerodinamiche e termodinamiche delle superfici. In molti casi le caratteristiche fisiche dei canali presentano una vulnerabilità endogena, principalmente riconducibile alla loro geometria, che li configura come veri e propri "canyon urbani".

Un'immediata definizione del canyon urbano (street canyon) è desumibile considerando le caratteristiche geometriche ed i rapporti che legano la dimensione della sezione stradale con la lunghezza del canale e l'altezza delle fronti edilizie prospicienti. Considerando le caratteristiche dei tessuti urbani dei centri italiani è possibile affermare che si viene a generare un canyon urbano quando si verificano le seguenti condizioni contemporanee:

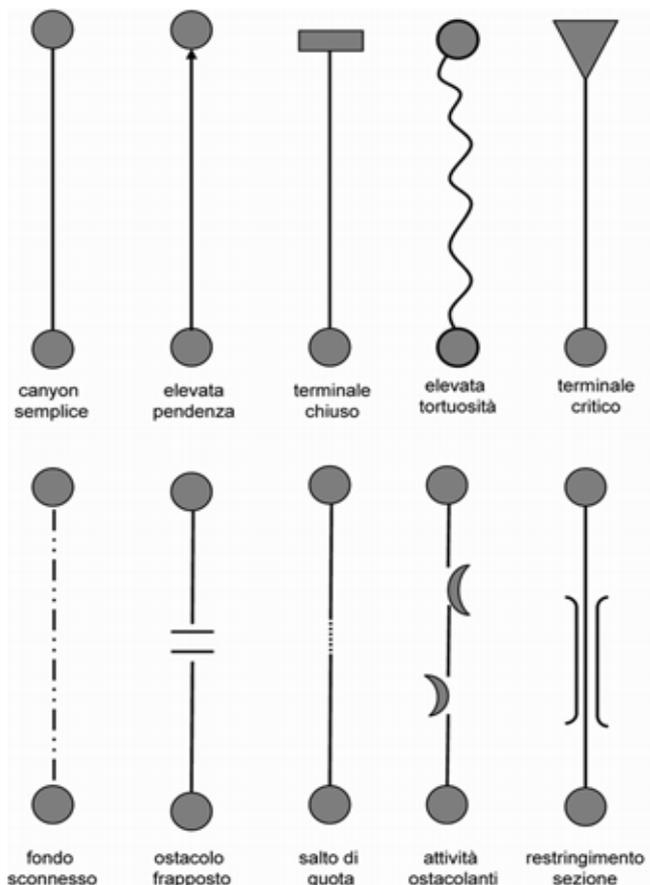
$$W \leq 5 \text{ mt.}, H/W \geq 3, L/H \geq 15.$$

Come già esposto le condizioni di rischio all'interno di specifici ambiti del tessuto urbano aumentano per effetto degli inquinanti e delle elevate temperature che si generano all'interno dei canyon.

Inoltre, ove l'azione eolica non riesce a raggiungere valori superiori ai 25 Km/h ed a disperdere la coltre di inquinamento, questo produce un'alterazione del bilancio radiativo schermato la radiazione nelle ore diurne e restituendola nelle ore notturne (Latini e Passerini 2006). Il fenomeno che rappresenta un fattore sinergico ed amplificante del ristagno degli inquinanti all'interno del canyon urbano è rappresentato dalla cosiddetta "trappola termica". La trappola termica si genera quando la radiazione solare, rimbalzando sulle superfici riflettenti delle pareti degli edifici e del fondo stradale, determina un surriscaldamento e stagnazione della massa d'aria interposta che contribuisce sensibilmente ad una persistenza degli inquinanti nel canyon. Da quanto detto deriva la necessità di individuare, all'interno di un contesto urbano, i canyon urbani che possono contribuire ad elevare i livelli di inquinamento ed incrementare i valori di rischio per la salute dei residenti rappresentando dei canali critici.

### I canali critici: una tassonomia

Volendo fornire una prima classificazione dei canali critici che possono caratterizzare i contesti urbani è possibile individuare dieci tipi di base che rappresentano le condizioni di rischio che spesso si sommano alla pericolosità già intrinseca, per la particolare conformazione geometrica, nel canyon urbano. È evidente che tali condizioni di rischio possono sommarsi nelle tipologie o moltiplicarsi lungo il medesimo canale. Riferendosi a quanto riportato nell'abaco rappresentato in



Nell'abaco dei "canali critici" sono state evidenziate dieci tipologie di base che fanno riferimento a condizioni di rischio aggiuntive.

figura, oltre al canyon semplice, è possibile avere condizioni di rischio aggiuntive in riferimento a due classi:

- variazione di caratteristiche fisiche della sede stradale;
- presenza di funzioni ostacolanti.

In particolare, alla prima classe è possibile ascrivere tutte le condizioni di rischio che comunemente si riferiscono ai canali della rete cinematica: l'elevata pendenza, la tortuosità, la sconnessione del fondo, i salti di quota, la variazione nella geometria della sezione.

Alla seconda possono essere riferite tutte quelle condizioni aggiunte dovute, in generale, alla presenza di attività umane: l'invasione della sede stradale (attraverso l'insediamento di piani di vendita, di materiali utilizzati per le lavorazioni artigianali, esposizioni estemporanee, tavolini e sedie di bar e ritrovi, etc.), la sosta selvaggia, l'espansione illegale delle pertinenze delle abitazioni.

Esistono casi estremi in cui alcuni tratti vengono arbitrariamente chiusi al traffico (pedonale e/o veicolare) e destinati alla sosta stanziale dei residenti.

Esistono, inoltre, casi in cui uno dei terminali (nodi) del canale (arco) è chiuso per conformazione del tessuto o rappresenta una condizione di criticità in quanto è presente una curva



stretta o ad angolo retto oppure è caratterizzato da scale, cordone, ecc.

In ciascuna delle tipologie descritte, coesistono più condizioni di rischio che contribuiscono ad elevarne la vulnerabilità infrastrutturale.

Si pone, quindi, la necessità di definire procedure in grado di individuare e rappresentare le aree di maggiore pericolosità che vengono ad indentificarsi all'interno del sistema urbano, anche utilizzando ambienti innovativi per lo sviluppo di nuova conoscenza territoriale ed urbana quali i GIS (Fistola 2009).

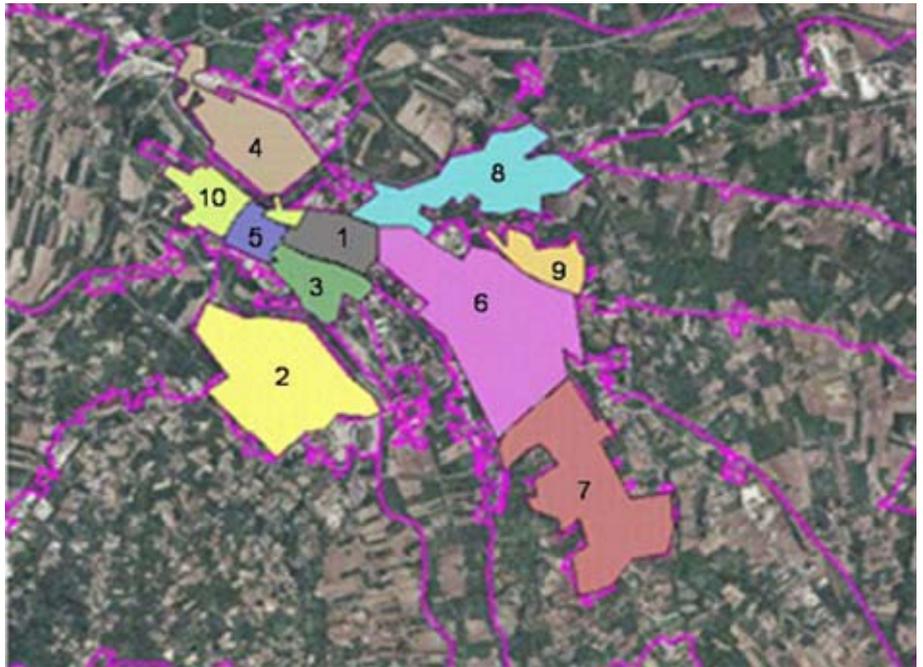
### Una procedura GIS per la città di Benevento

L'applicazione GIS sul sistema urbano di Benevento risponde all'obiettivo di verificare le ipotesi metodologiche finalizzate alla ottimizzazione dei livelli di sicurezza urbana attraverso la riduzione dei rischi, per la salute umana, indotti dalla mobilità veicolare su uno specifico contesto urbano. Assunto dello studio è la connessione tra forma fisica della città, e in particolare della rete stradale urbana, consistenza dei flussi veicolari intesi come carichi inquinanti e livelli di sicurezza riferiti alle condizioni di salute della popolazione residente. In altri termini, in presenza di condizioni di incompatibilità tra configurazione della rete stradale e traffico veicolare si riscontra un livello critico di sicurezza urbana riferito alla salute pubblica.

L'architettura del GIS si basa su diversi livelli informativi, che interagiscono, riferiti alla diverse componenti del rischio. In particolare, un primo livello fa riferimento alle informazioni necessarie alla definizione della vulnerabilità del sistema urbano che si sta analizzando, esaminandone le caratteristiche fisiche riferite in particolare alla rete dei canali veicolari presenti. Un secondo livello, invece, considera la possibilità di esprimere l'esposizione al rischio facendo riferimento ai valori della popolazione residente, ubicata all'interno dei canali critici. Il livello informativo di base è costituito dalla suddivisione territoriale in unità minime di riferimento per le analisi da effettuare. Nel caso applicativo, le unità territoriali minime di riferimento sono costituite da aree urbane coincidenti con i 66 bacini di traffico, definiti all'interno del Piano Urbano del Traffico del comune di Benevento, individuati all'interno del territorio comunale.

Tale scelta deriva prevalentemente dalla necessità di riferire le analisi ad ambiti urbani caratterizzati dalla presenza di flussi veicolari particolarmente significativi che costituiscono, nel caso in esame, il principale fattore di rischio al quale il sistema è sottoposto. Allo stadio attuale, il sistema informativo (GIS) non agisce sull'intero territorio comunale ma considera una prima aggregazione di bacini di traffico in aree significative di analisi definite come unità di tessuto urbano omogeneo (UTUO). Gli elementi in base ai quali il sistema effettua l'aggregazione fa riferimento a specifiche caratteristiche; in particolare, la selezione delle aree di analisi viene effettuata (UTUO) in base a:

- epoca di formazione;



Le unità di tessuto urbano omogeneo (UTUO) individuano sul territorio ambiti omogenei rispetto a particolari caratteristiche storico-tipologiche.

- caratteristiche del patrimonio edilizio esistente;
- morfologia del tessuto urbano;
- caratteristiche dei canali veicolari.

Le UTUO corrispondono anche alle aree maggiormente rappresentative dell'evoluzione urbanistica di Benevento, individuando sul territorio gli ambiti territoriali nei quali si concentrano le principali attività urbane. In particolare, le UTUO individuate sono dieci:

1. Centro storico;
2. Libertà;
3. Mulini;
4. Ferrovia;
5. Triggio -Teatro romano;
6. Mellusi - Atlantici;
7. Pace Vecchia;
8. Ponticelli;
9. Cretarossa;
10. Lungofiume - Appia.

Procedendo dall'area centrale (UTUO "centro Storico") verso le aree più esterne si distinguono in maniera graduale tre tipologie di tessuto urbano prevalenti:

- compatto ( 1, 3, 5);
- regolare (2, 4);
- disperso (6, 7, 8, 9, 10).

L'irregolare evoluzione urbana della città si riscontra anche nella netta prevalenza di tessuto urbano "disperso" rispetto alla maglia regolare e compatta che caratterizza in maniera evidente il nucleo storico.

L'analisi tipologica sul tessuto urbano ha costituito la base conoscitiva necessaria allo sviluppo delle successive analisi.

### La struttura del GIS

Il sistema informativo geografico messo a punto svolge un duplice ruolo:

- permette l'individuazione delle aree urbane ad elevata pericolosità attraverso l'overlay dei livelli informativi;
- consente la definizione delle zone urbane a rischio attraverso una procedura automatica che restituisce come output la selezione di "canali critici" ovvero degli assi veicolari dove si verificano condizioni sfavorevoli alla salute della popolazione residente.

Alla scala territoriale (regione/provincia), non approfondita in questa sede, il GIS consente di individuare i territori comunali maggiormente interessati da consistenti flussi di traffico per la presenza di canali di traffico ad intensa mobilità e, conseguentemente, caratterizzati da alti valori di emissioni inquinanti.

Approfondendo la scala urbana per la verifica delle ipotesi teorico-metodologiche elaborate nelle fasi precedenti, il GIS è stato progettato per contenere tutte le informazioni relative sia alla vulnerabilità (in riferimento alla forma urbana) che all'esposizione (espressa attraverso il dato della popolazione residente) e per consentirne la sovrapposizione, in maniera georeferenziata.

Il sistema messo a punto, dunque, considera contestualmente sia le caratteristiche fisiche della rete

stradale presente nelle aree di rilevamento (UTUO) sia i valori della popolazione e restituisce una selezione di "ambiti urbani critici" presenti sul territorio comunale.

Tali ambiti sono caratterizzati dalla presenza di "canali critici", ovvero da elementi lineari in corrispondenza dei quali il sistema rileva una condizione di rischio per la salute pubblica. L'individuazione dei "canali critici" avviene attraverso l'automatizzazione degli step logico sequenziali maturati nella fase teorico metodologica.

Il data set costruito per l'elaborazione GIS oltre ai dati sociodemografici, contiene tutte le informazioni relative sia alle caratteristiche fisiche della rete viaria urbana, sia alle tipologie edilizie lungo le cortine stradali.

In particolare, i campi del data set fanno riferimento ad informazioni relative a:

- larghezza della sezione stradale;
- lunghezza arco (canale);
- tipologia del fondo stradale;
- pendenza;
- tortuosità;
- altezza media delle cortine stradali.

L'associazione di tali dati al livello topografico articolato in unità di tessuto omogeneo (UTUO) consente al sistema di operare una prima selezione di informazioni che forniscono come prodotto intermedio l'individuazione di "canyon urbani", di cui si sono descritte le caratteristiche geometriche.

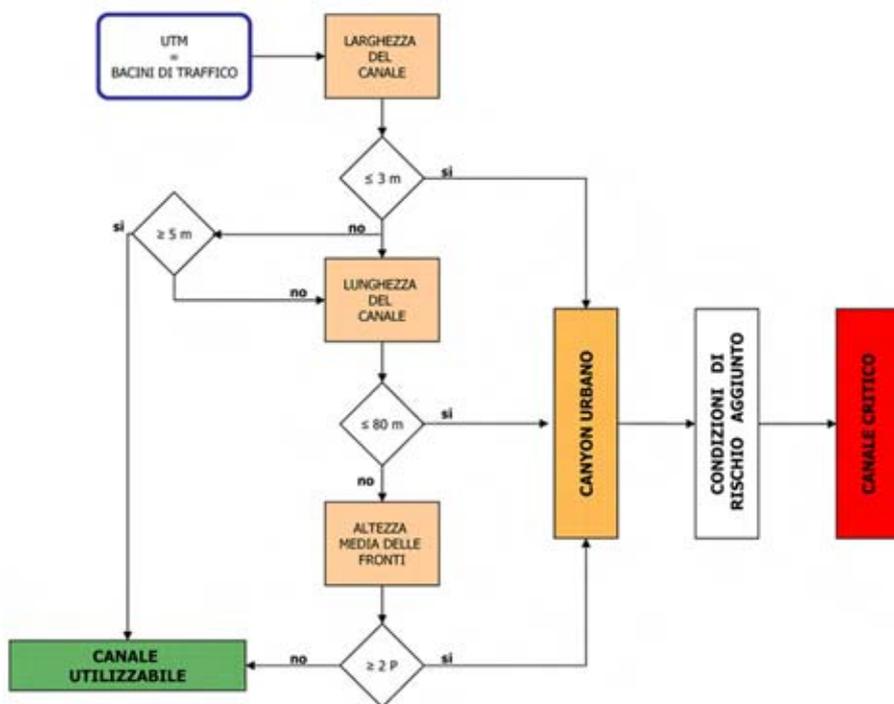
L'algoritmo per effettuare la selezione, infatti, è stato progettato in maniera da consentire la combinazione dei parametri rappresentativi dei "canyon urbani".

In particolare, il sistema effettua una selezione dei canali carrabili, presenti all'interno delle UTUO di analisi, in ragione di tre parametri:

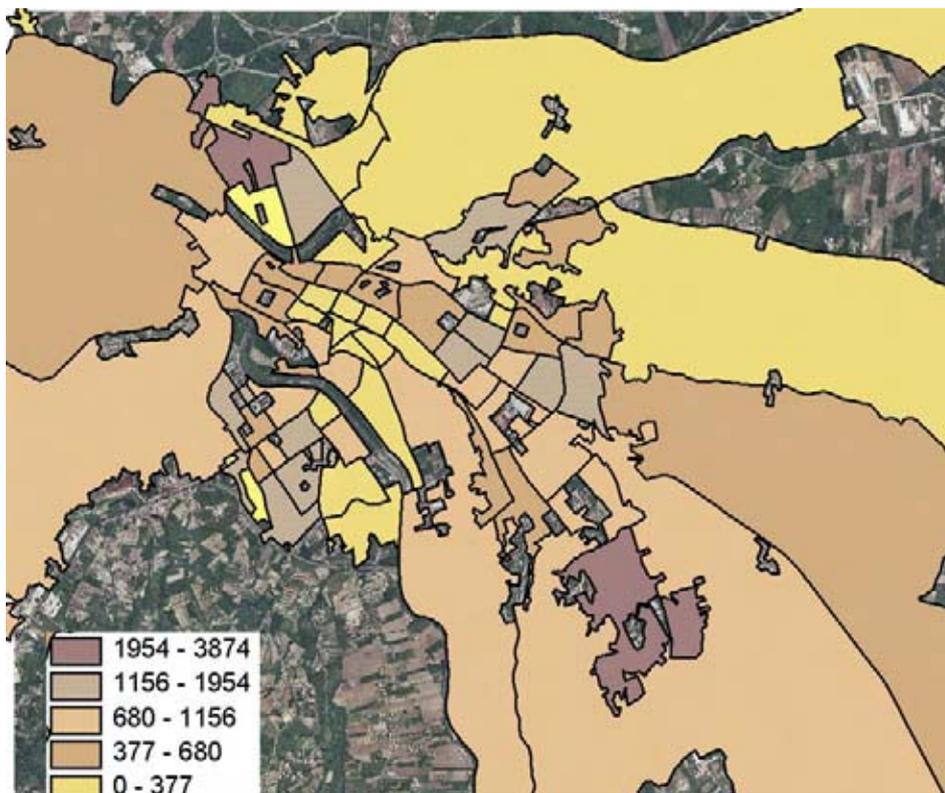
- larghezza della sezione trasversale del canale (< 3 m);
- lunghezza del canale in continuità di cortina (> 80 m);
- altezza media della cortina stradale continua (> 2 piani).

Sebbene la presenza di "canyon urbani" sia di per sé rappresentativa di una condizione di rischio, il sistema effettua una seconda selezione mirata che considera la presenza/assenza delle condizioni di rischio aggiuntive lungo i canyon.

In questa fase del lavoro, tra le possibili condizioni di rischio aggiuntivo (evidenziate in precedenza nell'abaco dei canyon urbani) sono state considerate:



Nel diagramma di flusso è stata schematizzata la procedura per l'individuazione dei "canali critici". Nella fase di elaborazione del GIS la procedura è stata tradotta in un algoritmo che consente al sistema di individuare in automatico i canali con requisiti di criticità.



Distribuzione della popolazione nelle aree di traffico della parte centrale di Benevento.

- elevata pendenza;
- terminale chiuso;
- terminale critico;
- elevata tortuosità;
- salto di quota.

Verificata la presenza di condizioni di rischio aggiuntive lungo i "canyon urbani" il sistema consente di individuare sul territorio i "canali critici".

Allo stato attuale delle analisi, il sistema non effettua una gerarchizzazione dei livelli di criticità dei canali che presupporrebbe la definizione di appositi approfondimenti auspicabili in una successiva fase della ricerca. Tuttavia, l'identificazione di "canali critici" costituisce un valido risultato per il conseguimento degli obiettivi dello studio.

Dal confronto con i valori della popolazione presente, infatti, il sistema consente la definizione degli "ambiti urbani critici" all'interno dei quali si rende necessaria la verifica dei valori inquinanti.

L'overlay tra gli ambiti urbani critici, il livello informativo che contiene i dati relativi all'entità dei flussi sulla rete e le emissioni inquinanti connesse al grafo stradale, fornisce come risultato l'individuazione delle zone a rischio da inquinamento veicolare.

Tali zone corrispondono alle aree urbane dove si riscontra la maggiore concentrazione di elementi di criticità (canyon urbani, condizioni di rischio aggiunto, densità abitativa, valori elevati di emissioni inquinanti).

La verifica finale delle condizioni di rischio rilevate necessita, ai fini della definizione dello studio, del supporto di informazioni relative all'incidenza delle patologie imputabili all'inquinamento generato dal traffico veicolare sulla popolazione (tasso di morbilità). Sebbene, per motivi strettamente connessi alla tutela della privacy, il dato sia disponibile in maniera aggregata (livello comunale), se ne è valutata l'incidenza, con una approssimazione accettabile, in maniera proporzionale rispetto al dato della popolazione residente nelle aree di rischio. Il risultato delle elaborazioni (matching dei dati) effettuate è costituito dalla individuazione delle "aree ad elevata pericolosità" presenti sul territorio comunale dove si verificano le maggiori condizioni di rischio generato dall'inquinamento veicolare. Tali aree,

individuando sul degli ambiti dove la sicurezza urbana è potenzialmente compromessa, necessitano di azioni prioritarie nella definizione delle politiche di gestione della mobilità urbana.

## Conclusioni

Il concetto di sicurezza urbana riferito alla mobilità richiede un approccio più ampio di quello connesso esclusivamente alle problematiche sollevate dalla necessità di riduzione degli incidenti stradali. Le condizioni di vivibilità urbana sono sempre più strettamente connesse alla qualità dell'ambiente urbano in maniera ancora troppo inversamente proporzionale alla insostenibilità degli stili di vita attuali. L'esigenza di trovare soluzioni finalizzate al miglioramento delle condizioni di sicurezza forzosamente conduce verso scelte, ispirate alla riduzione e/o eliminazione dei flussi veicolari di attraversamento (sia a scala territoriale che a scala urbana/sub-urbana), soprattutto se finalizzate alla tutela della salute umana.

È pur vero che, superata una prima fase di difficile accettazione delle regole, la percezione della limitazione evolve favorevolmente. Lo studio presentato in questo articolo, ponendo come condizione indispensabile alla sicurezza urbana il miglioramento delle condizioni dell'ambiente della città, si pone l'obiettivo di indagare sulla possibilità di ridurre i rischi generati dall'effetto inquinante della mobilità veicolare sulla salute umana. In particolare, il

lavoro, tuttora in corso di elaborazione, considera la stretta corrispondenza tra morfologia urbana e condizioni di rischio connesse alle emissioni inquinanti nel tentativo di formalizzare possibili linee di intervento finalizzate all'abbattimento delle condizioni di rischio. Il traffico veicolare urbano, inteso come principale fattore di inquinamento atmosferico, viene considerato come generatore di insicurezza urbana soprattutto in particolari aree ad elevata densità abitativa caratterizzate dalla prevalenza di un tessuto urbano compatto. Le strategie di sicurezza urbana dovranno indifferibilmente considerare la necessità di miglioramento delle condizioni ambientali al fine di ridurre la presenza sul territorio di luoghi di rischio ed "insicurezza urbana". Un obiettivo di secondo livello che questo studio persegue è quello di segnalare ambiti della città all'interno dei quali la morfologia del tessuto urbano e la sovrapposizione di attività rappresentano, in maniera endogena, delle condizioni di vulnerabilità fisico/funzionale della città. L'apporto di questo studio può essere ricondotto al tentativo di mettere a punto una metodologia per sostenere le scelte relative al governo della mobilità evidenziandone le ricadute sul miglioramento della vivibilità urbana.

## Note

- <sup>1</sup> Sebbene il lavoro sia frutto di una riflessione congiunta maturata dagli autori sulla base di comuni esperienze di ricerca, M. Gallo ha curato la stesura dei paragrafi "L'inquinamento atmosferico da traffico stradale", "Il particolato", "Flussi veicolari ed emissioni inquinanti"; R. Fistola ha curato la stesura dei paragrafi "Inquinamento da traffico veicolare e morfologia urbana", "I determinanti del rischio nei canali critici del sistema fisico della città", "I canali critici: una tassonomia"; R. A. La Rocca ha curato la stesura dei paragrafi "Una procedura GIS per la città di Benevento", "La struttura del GIS". Le conclusioni sono state elaborate collegialmente.
- <sup>2</sup> Quale indicazione di primo riferimento sull'argomento è possibile consultare i seguenti contributi: Lagomarsino S., Ugolini P., (2004), *Rischio sismico, territorio e centri storici*. Caldaretti S., (1990), *Analisi dell'esposizione all'evento sismico dei sistemi territoriali nella Toscana*. Fera G., (1991), *La città antisismica. Storia, strumenti e prospettive per la riduzione del rischio sismico*. Galderisi A. (2004), *Città e Terremoti. Metodi e tecniche per la mitigazione del rischio sismico*. Moore M., Gould P., Keary B., (2003), "Global urbanization and impact on health". Mitchell, J.K., (1998), "Hazards in changing cities", *Applied Geography*. Wisner B. et al., (2004), *At Risk. Natural hazards, people vulnerability and disaster*.

## Riferimenti bibliografici

- APAT (2007) Impatto sanitario di PM10 e ozono in 13 città italiane. APAT, Roma.
- Caldaretti S. (1990) *Analisi dell'esposizione all'evento sismico dei sistemi territoriali nella Toscana*, DEI, Roma.
- Corinair (2007) Emission Inventory Guidebook; Road Transport. Technical Report.
- Fera G. (1991) *La città antisismica. Storia, strumenti e prospettive per la riduzione del rischio sismico*, Gangemi, Roma.
- Fistola R. (2009) *GIS. Teoria e applicazioni per la pianificazione, la gestione e la protezione della città*, Gangemi, Roma.
- Fistola R., La Rocca R. A., (2009), "Metodi expert knowledge based per la definizione del rischio globale urbano (GURU)", in Atti della XXX Conferenza Italiana di Scienze Regionali, Firenze 9-11 settembre 2009.
- Galderisi A. (2004) *Città e Terremoti. Metodi e tecniche per la mitigazione del rischio sismico*, Gangemi, Roma.
- Lagomarsino S., Ugolini P. (2004) *Rischio sismico, territorio e centri storici*, Collana Università: economia, F. Angeli, Milano.
- Latini G., Passerini G. (2006) Il clima locale. Climatologia e Biometereologia delle aree urbane, in : *Bioarchitettura*, n. 51/52, Agosto 2006.
- Lytard J.F. (1979) *La condition postmoderne*, les Editions de Minuti, Paris.
- Mitchell W. J., Townsend A. M. (2005) "Cyborg agonistes. Disaster and reconstruction in the digital electronic era", in Campanella T.J. and Lawrence V. J., *Resilient city*, Oxford University Press, New York.
- Mitchell J.K. (1998) "Hazards in changing cities", *Applied Geography*, Vol: 18, Issue: 1, January, 1998.
- Moore M., Gould P., Keary B. (2003) "Global urbanization and impact on health", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol: 206, Issue: 4-5.
- Noble D.F. (1993) *La questione tecnologica*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Rifkin J. (2000) *Entropia*, Baldini e Castoldi, Milano.
- Wisner B. et al. (2004) *At Risk. Natural hazards, people vulnerability and disaster* (sec. ed.), Routledge, London and New York.
- Zimmerman R. (2005) "Mass Transit Infrastructure and Urban Health", in *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, Vol. 82, No. 1, February 2005, Oxford University Press, New York.

## Referenze immagini

Il grafico a pag. 50 è tratto da Istituto Superiore di Formazione e Ricerca per i Trasporti (ISFORT), Così è se vi pare, 5° Rapporto sulla mobilità urbana in Italia, Genova 7 maggio 2008 (<http://www.isfort.it/>). Le altre immagini riportate nell'articolo sono degli autori.