

Corso di
TRASPORTI E TERRITORIO

Prof. Ing. Agostino Nuzzolo

Inquinamento atmosferico da traffico

Costi Esterni

Inquinamento atmosferico da traffico

TIPO DI EFFETTO	PRINCIPALI DIMENSIONI DI IMPATTO	INDICATORE DELL'IMPATTO
Inquinamento atmosferico	Mortalità (acuta e cronica) e morbilità per patologie per malattie al sistema respiratorio, cardiocircolatorio, ecc. Danni ai raccolti agricoli Danni agli edifici per esposizione agli agenti inquinanti	Livello delle Emissioni [massa di sostanza introdotta nell'aria/tempo]
Gas serra	Danni allo stato generale dell'ambiente	Livello delle emissioni di CO2 [ed eventualmente altri gas serra quali metano (CH4) e protossido d'azoto (N2O)]
Inquinamento acustico	Disturbo (annoyance) Salute (malattie apparato uditivo, rischio d'infarto) Risorse ambientali	Livello sonoro medio notturno e diurno in db(A)
Incidentalità	Perdita di valore umano (sofferenza) Perdita di capitale umano Costi assistenza sanitaria pubblica ed amministrativo/giudiziari	N. incidenti e vittime (N. morti e N. feriti)
Congestione	Costi addizionali per perdite di tempo	Risparmio o aumento dei tempi di trasporto
Processi Upstream / Downstream	Produzione e smaltimento di veicoli	Inquinamento atmosferico, emissioni di gas serra, ecc. in fase di produzione e di smaltimento
	Costruzione e manutenzione dell'infrastruttura	Costi esterni, es. mezzi utilizzati per movimentazione dei materiali
	Produzione di energia	Inquinamento atmosferico ed emissioni di gas serra generati dalla produzione di energia elettrica per i trasporti
		Livello delle emissioni dei principali inquinanti atmosferici e di gas serra, ecc.
		mc materiali movimentati mq superficie occupata dal cantiere ecc.
		quantità energia (kWh) prodotta da fonti non rinnovabili

Componenti delle emissioni

Principali componenti delle emissioni dei veicoli con motore a combustione interna:

• Vapore acqueo	H ₂ O
• Azoto	N
• Anidride Carbonica	CO ₂
• Ossido di carbonio	CO
• Piombo	Pb
• Polveri e Particolato	PTS
• Anidride solforosa	SO ₂
• Ossidi di azoto	NO _x
• Idrocarburi incombusti (policiclici aromatici, benzene)	HC
• Ozono	O ₃

Componenti delle emissioni: inquinanti

Principali agenti inquinanti emessi:

• Vapore acqueo	H ₂ O
• Azoto	N
• Anidride Carbonica	CO ₂
• Monossido di carbonio	CO
• Piombo	Pb
• Polveri e Particolato	PTS
• Anidride solforosa	SO₂
• Ossidi di azoto	NO_x
• Idrocarburi incombusti (policiclici aromatici, benzene)	HC
• Ozono	O₃

Effetti degli inquinanti sulla salute umana

(1/3)

CO

L'ossido di carbonio è un gas altamente tossico; se inalato si combina con l'emoglobina formando carbossiemoglobina, inibendo così il trasporto dell'ossigeno. Anche piccole concentrazioni di CO producono grandi % di carbossiemoglobina.

SO_x, NO_x

- Infezioni occhi e all'apparato respiratorio.

Studi sperimentali hanno mostrato come concentrazioni di 4-5 ppm portino rapidamente a difficoltà respiratorie. Concentrazioni di 250 ppm hanno effetti gravissimi (edema polmonare) che si verificano con ritardo di qualche ora dall'esposizione.

Pb

- Danneggiano il sistema nervoso centrale, i reni, l'apparato riproduttivo.

Per lunghe esposizioni a concentrazioni anche basse sono stati ipotizzati anche diminuzione dell'intelligenza, iperattività, ipertensione, riduzione della velocità dei riflessi, deficienze uditive.

Effetti degli inquinanti sulla salute umana

(2/3)

HC

Tra i composti organici volatili (VOC) particolarmente tossici sono:

- il benzene: aggredisce il midollo spinale provocando gravi malattie dall'anemia aplastica alla leucemia;
- i policiclici aromatici (PAH): sono cancerogeni.

Particolato

È costituito da particelle carboniose su cui risultano assorbite altre sostanze inquinanti tra cui i PAH (policiclici aromatici).

Esercita un'azione irritante sull'apparato respiratorio.

A causa di reazioni chimiche che avvengono nell'aria alimentate da alcuni di questi inquinanti viene prodotto lo:

Smog fotochimico

I suoi componenti sono:

l'ozono, il biossido di azoto ed i perossiacetilnitrati (PAN)

Questi sono tutti ossidanti. In particolare l'ozono causa irritazione agli occhi, emicrania, malattie respiratorie, attacchi d'asma, riduzione della funzione polmonare.

Effetti degli inquinanti sulla salute umana

(3/3)

O₃

È un inquinante secondario che deriva da reazioni fotochimiche che coinvolgono ossidi di azoto e idrocarburi. I prodotti di queste reazioni sono indicate globalmente come smog fotochimico.

Per queste ragioni l'ozono non è un inquinante locale ma si rileva anche a distanze notevoli dalle fonti di emissione primaria.

Irrita i polmoni, produce problemi respiratori ed aumenta la vulnerabilità dell'organismo alle malattie dell'apparato respiratorio.

Effetti degli inquinanti sull'ambiente

SO_x e NO_x

Portano alla formazione di acidi che aggrediscono la superficie degli edifici; sono altresì responsabili del fenomeno delle piogge acide che stanno causando il rapido deterioramento delle foreste e la scomparsa di vita nei laghi

Particolato

Imbratta edifici e monumenti

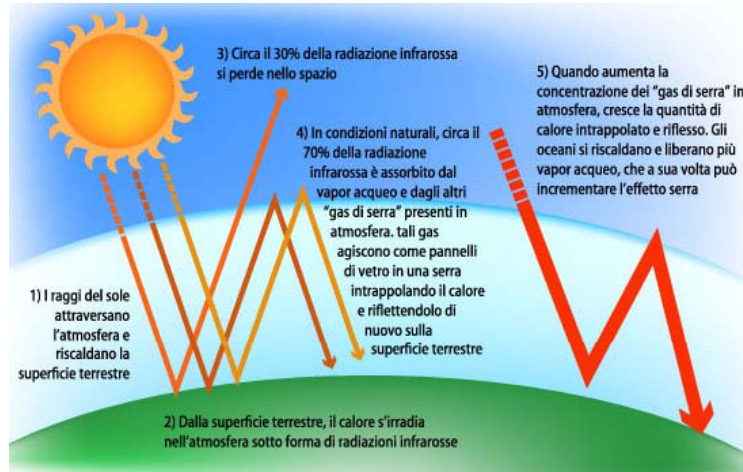
Smog fotochimico

Produce danni alla vegetazione

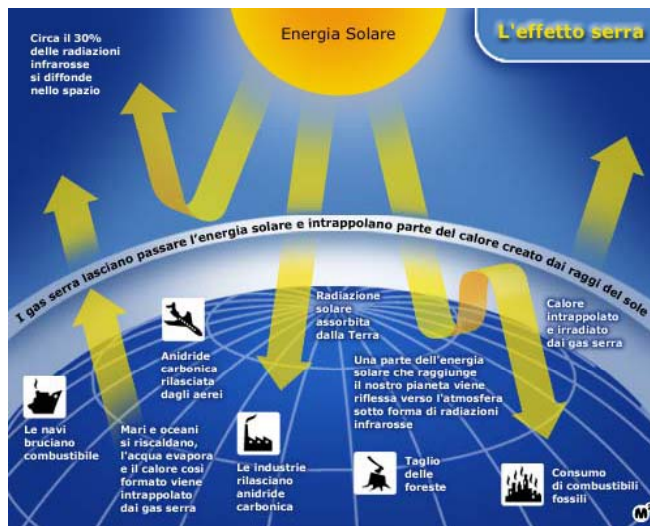
CO₂

Contribuisce all'effetto serra

Effetto serra



Effetto serra



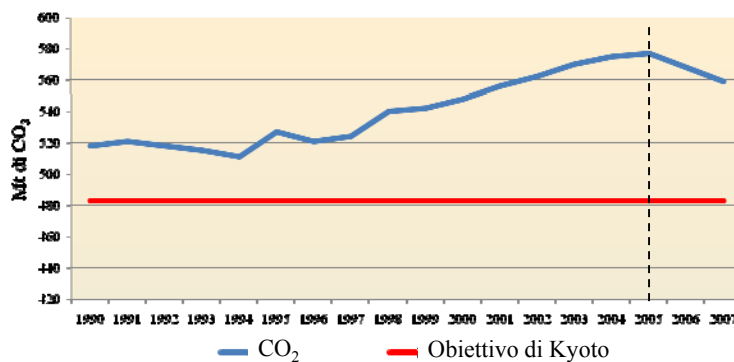
Effetto serra

In base al Protocollo di Kyoto firmato nel 1997, le nazioni industrializzate hanno preso l'impegno di ridurre le emissioni di anidride carbonica di almeno il 5% entro il 2008-2012 rispetto ai livelli del '90.

In particolare l'Italia, che si è impegnata a ridurre del **6,5%** entro il 2010 rispetto al '90 le emissioni di CO₂.

Effetto serra

Emissioni di CO₂ in Italia

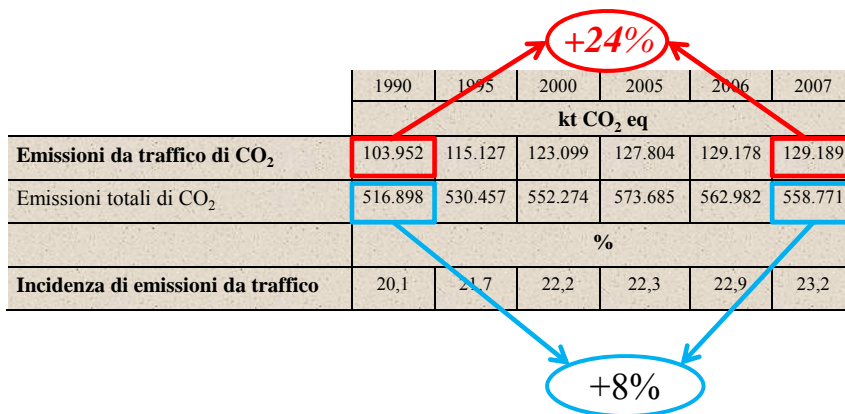


Fonte: APAT, Annuario dei dati ambientali 2009

- 1990 – 2005: incremento delle emissioni del 12%
- 2005 – 2007: riduzione delle emissioni del 3,2% (emissioni totali 558,7 Mt)

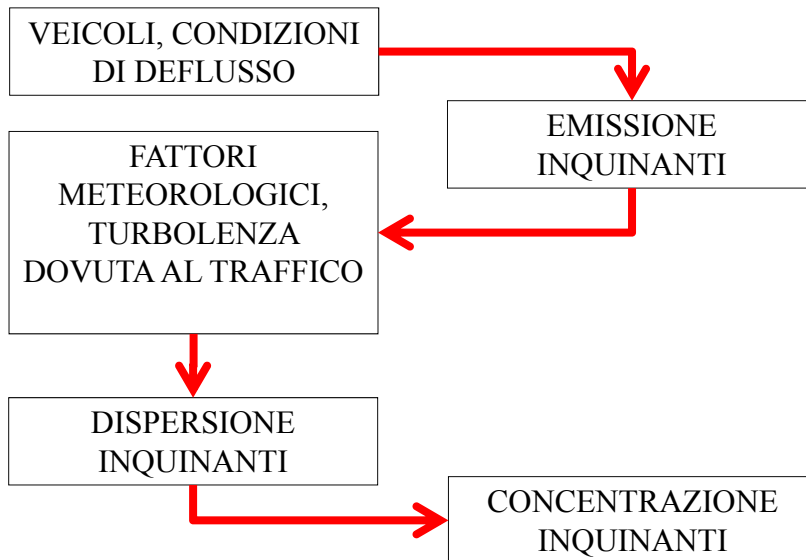
Effetto serra

Emissioni di CO₂ da traffico in Italia



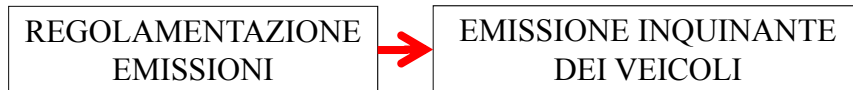
fonte: APAT, Annuario dei dati ambientali 2009

Inquinamento atmosferico da traffico

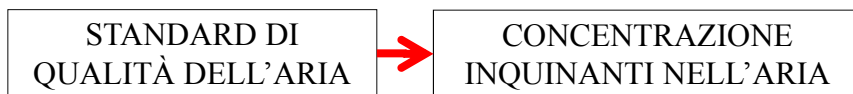


Attività di controllo su inquinamento atmosferico da traffico

1) a priori



2) a posteriori



Fattori che influenzano l'emissione

- 1) TIPI DI CARBURANTE
- 2) CARATTERISTICHE DEL VEICOLO:
 - a) tipo di veicolo (benzina, diesel, gpl)
 - b) fattori che influiscono sul consumo (cilindrata, peso, aerodinamica)
 - c) presenza di dispositivi per l'abbattimento degli inquinanti
 - d) rapporto superficie/volume dei cilindri
 - e) rapporto aria/carburante
 - f) tempi di accensione
 - g) rapporto di compressione
 - h) età e stato di manutenzione (influiscono sui punti e, f, g)
- 3) CONDIZIONI DEL MOTO:
 - a) temperatura del motore (a freddo è a sua volta influenzata dalla temperatura esterna)
 - b) velocità (influisce sia sul consumo che sull'emissione a parità di consumo)
 - c) accelerazione

Tecnologie per il contenimento delle emissioni

- 1) INTERVENTI DI TIPO MOTORISTICO:
 - a) motori a benzina:
 - controllo elettronico dell'iniezione di carburante
(in funzione del tenore di O₂ nei gas di scarico rilevato da apposita sonda)
 - marmitte catalitiche (benzina senza piombo)
 - b) motori diesel:
 - elevatissime pressioni nell'iniezione
 - marmitte catalitiche (carburanti a basso tenore di zolfo)
- 2) INTERVENTI SULLA QUALITA' DEI CARBURANTI.
- 3) CONTENIMENTO DEI CONSUMI:
 - contenimento dei pesi
 - ottimizzazione dell'aerodinamica

Le sostanze inquinanti

La normativa – Categorie per autoveicoli

La comunità europea ha emanato, a partire dal 1991, una serie di direttive sull'emissioni di inquinanti da parte dei veicoli.

In base a queste direttive sono state individuate cinque categorie di appartenenza per gli autoveicoli:

- ✓ *pre-Euro 1*
- ✓ *Euro 1*
- ✓ *Euro 2*
- ✓ *Euro 3*
- ✓ *Euro 4*
- ✓ *Euro 5*

Anno di fabbricazione	Riferimento normativo	Norma
1989 – 1996	91/441, 93/59	Euro 1
1995 – 2000	94/12, 96/69,	Euro 2
1999 – 2005	98/69, 2002/80	Euro 3
2005 - 2008	98/69, 2002/80	Euro 4
2009 - ...	715/2007; 692/2008	Euro 5

Le sostanze inquinanti

Standard emissivi per veicoli passeggeri [g/km]

Serie	Data	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Diesel						
Euro 1†	1992/07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)
Euro 2 Iniezione Indiretta (IDI)	1996/01	1	-	0,7	-	0,08
Euro 2 Iniezione Diretta (DI)	1996/01 ^a	1	-	0,9	-	0,1
Euro 3	2000/01	0,64	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	2005/01	0,5	-	0,3	0,25	0,025
Euro 5	2009/09 ^b	0,5	-	0,23	0,18	0,005 ^e
Euro 6	2014/09	0,5	-	0,17	0,08	0,005 ^e
Benzina						
Euro 1†	1992/07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-
Euro 2	1996/01	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	2000/01	2,3	0,2	-	0,15	-
Euro 4	2005/01	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5	2009/09 ^b	1	0,10 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}
Euro 6	2014/09	1	0,10 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}

† I valori tra parentesi si riferiscono ai limiti di produzione (COP)
 a - fino al 1999/09/30 (dopo i motori IDI devono rispettare i limiti IDI)
 b - 2011/01 per tutti i modelli
 c - e NMHC = 0,068 g/km
 d - applicabile solo a veicoli con motore ad iniezione diretta
 e - proposta di portarlo a 0,003 g/km

Le sostanze inquinanti

Standard Emissivi Norme EURO – Veicoli pesanti (gr/kWh)

Norme	In vigore dal:	Tipo test	CO	THC	NMHC	NOx	Particolato
EURO I	1.10.1993	13-mode	4.5	1.10	-	8	0.612 < 85 kW 0.360 > 85 kW
EURO II	1.10.1996	13-mode	4.0	1.10	-	7	0.15 (a)
EURO III	1.1.2000	ESC (c)	2.1	0.66	-	5	0.10 0.13 (b)
		ETC (d)	5.5	0.78	1.6	5	0.16 0.21 (b)
EURO IV	1.10.2005	ESC (c)	1.5	0.46	-	3.5	0.02
		ETC (d)	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03
EURO V	1.10.2008	ESC (c)	1.5	0.46	-	2	0.02
		ETC (d)	4.0	0.55	1.1	2	0.03

Note: (a) Fino al 30.11.1998 il limite del particolato per motori con cilindrata < 700 cc/cilindro e velocità di regime del motore maggiore di 3000 giri/min era di 0.25 gr/kWh
 (b) Per motori con cilindrata < 750 cc per cilindro e con una velocità di regime del motore superiore a 3000 giri/min.
 (c) Misurato secondo lo standard ESC (European Stationary Cycle)
 (d) Misurato secondo lo standard ETC (European Transient Cycle)

EURO I e II : Direttiva 91/542/EEC;
 EURO III, IV e V: Disposizioni del Consiglio Europeo del Dicembre 1998.

Normativa e monitoraggio

Il monitoraggio sull'inquinamento atmosferico è effettuato mediante

- misurazioni delle concentrazioni in aria delle specie inquinanti (stazioni delle reti di rilevamento della qualità dell'aria)
- ausilio della modellistica di dispersione e trasformazione degli inquinanti in atmosfera.

La Direttiva Quadro 96/62/CE sulla qualità dell'aria ambiente (recepita dall'Italia con il Decreto Legge del 4.8.1999 n.351), fornisce un quadro di riferimento per il monitoraggio delle sostanze inquinanti da parte degli Stati membri.

Normativa e monitoraggio

Le *direttive figlie* (direttive 99/30/CE, 2000/69/CE, 2002/3/CE; D.M. 60 del 2 aprile 2002) stabiliscono:

- gli standard di qualità dell'aria per le diverse sostanze inquinanti, in relazione alla protezione della salute, della vegetazione e degli ecosistemi,
- i criteri e le tecniche che gli Stati membri devono adottare per le misure delle concentrazioni di inquinanti, compresi l'ubicazione e il numero minimo di stazioni e le tecniche di campionamento e misura. Con il D.M. 60 del 2 aprile 2002 sono state recepite le direttive figlie 99/30/CE, 2000/69/CE.

Le sostanze inquinanti

La normativa (1/3)

In gran parte dei Paesi esistono norme sulla qualità dell'aria dirette a limitare i rischi derivanti dalla presenza in essa di sostanze inquinanti.

Tali norme stabiliscono, per ciascuna sostanza inquinante, uno o più **livelli di concentrazione ammissibili** (o **standard di qualità dell'aria**), intesi come quei livelli al di sotto dei quali può ritenersi, allo stato attuale delle conoscenze, che la sostanza inquinante non dia luogo ad effetti dannosi tali da giustificare l'adozione di misure correttive.

Le sostanze inquinanti

La normativa (2/3)

Le norme per la tutela della qualità dell'aria prevedono quattro diversi livelli ammissibili di concentrazione:

- ✓ **Valori limite di qualità dell'aria**
valori massimi delle concentrazioni a cui si ritiene possa essere esposto l'uomo, al di là di tali valori esiste un serio rischio per la sua salute;
- ✓ **Livelli di allarme**
valori di concentrazione che richiedono interventi urgenti atti a ridurre l'emissione di sostanze inquinanti allo scopo di evitare un serio rischio sanitario per la popolazione;
- ✓ **Livelli di attenzione**
valori di concentrazione tali da determinare condizioni di inquinamento che, se persistenti, determinano il rischio del raggiungimento dello stato di allarme;
- ✓ **Valori guida di qualità dell'aria**
livelli di concentrazione finalizzati alla salvaguardia a lungo termine della salute umana e dell'ambiente.

Le sostanze inquinanti

La normativa (3/3)

A titolo di esempio, le norme italiane per la tutela della qualità dell'aria prevedono nelle aree urbane i seguenti valori:

Inquinante	Periodo di riferimento	Valore limite [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Soglia di attenzione [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Soglia di allarme [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
CO	1h	$10 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
NO ₂	1h	40 (anno civile)	100	400
O ₃	1h	120 (8h)	180	240
SO ₂	24h	350 (1h)	125	500
Particelle	24h	50	150	300

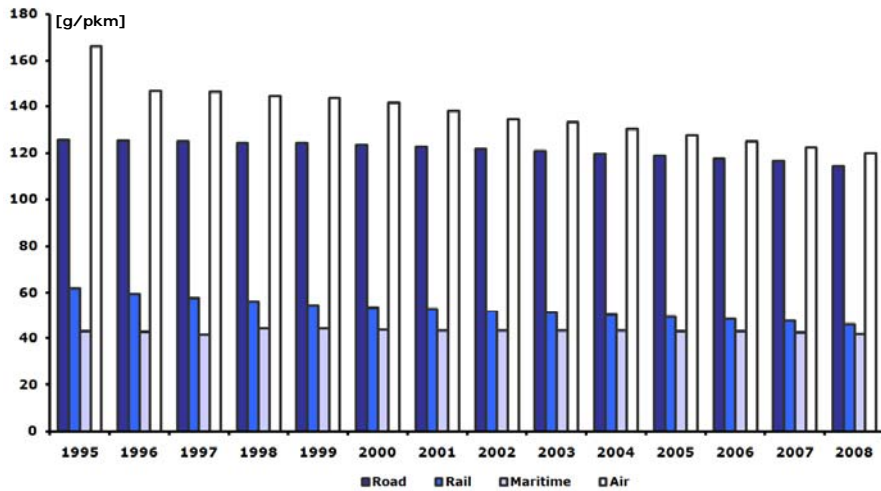
Fonte: D. Lgs. 21 maggio 2004, n. 183 - DM 60/2 aprile 2002 - www.arpa.umbria.it

Principali inquinanti dovuti ai trasporti

MODALITA'	INQUINANTE							
	Anidride Carbonica	Monossido di carbonio	Ossi di di Azoto	Ossidi di Zolfo		Particolato	Composti Organici Volatili	
	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	SO ₂	PM10	Non Metanici	Totali
STRADA	•	•	•	•		•	•	
FERROVIA		•	•		•	•		•
AEREO	•	•	•	•		•	•	
MARITTIMO	•		•	•		•		•

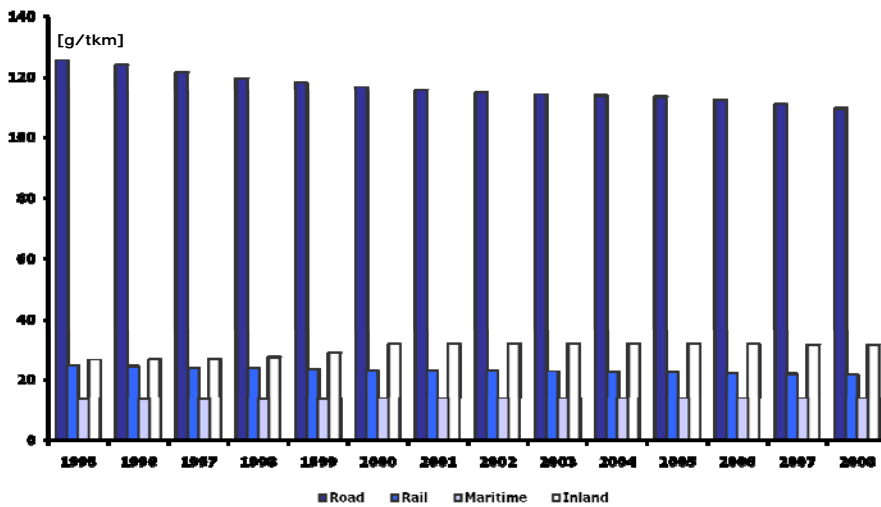
Emissioni di CO₂ in Europa

passengeri-km e modo di trasporto

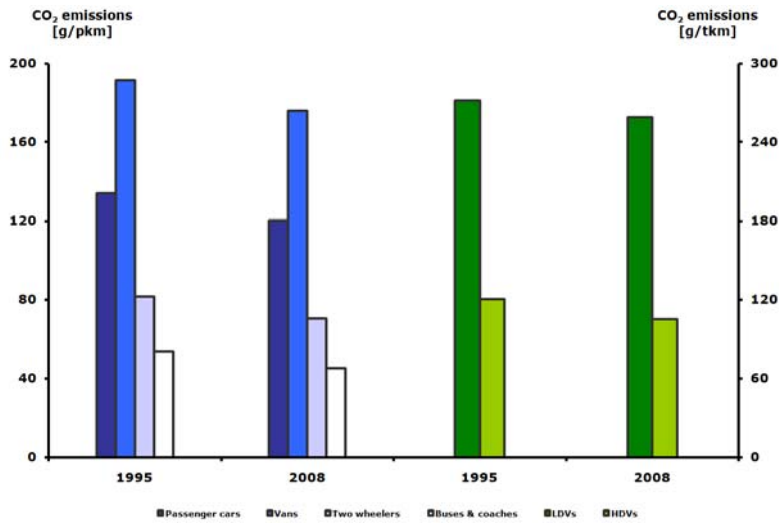


Emissioni di CO₂ in Europa

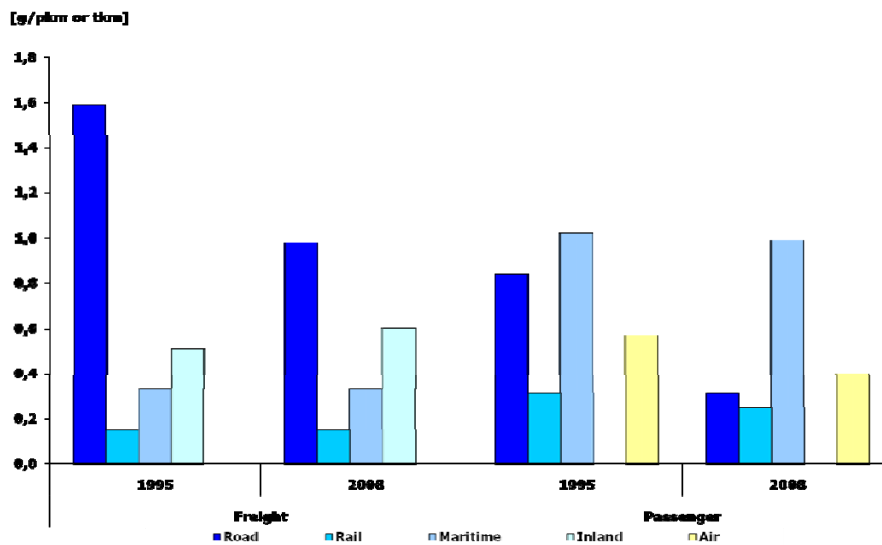
tonnellate-km e modo di trasporto



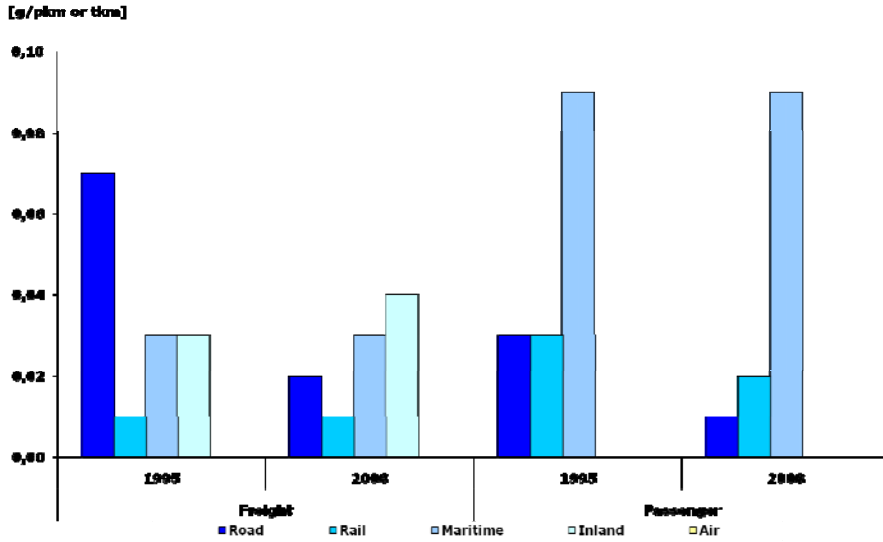
Emissioni di CO₂ in Europa



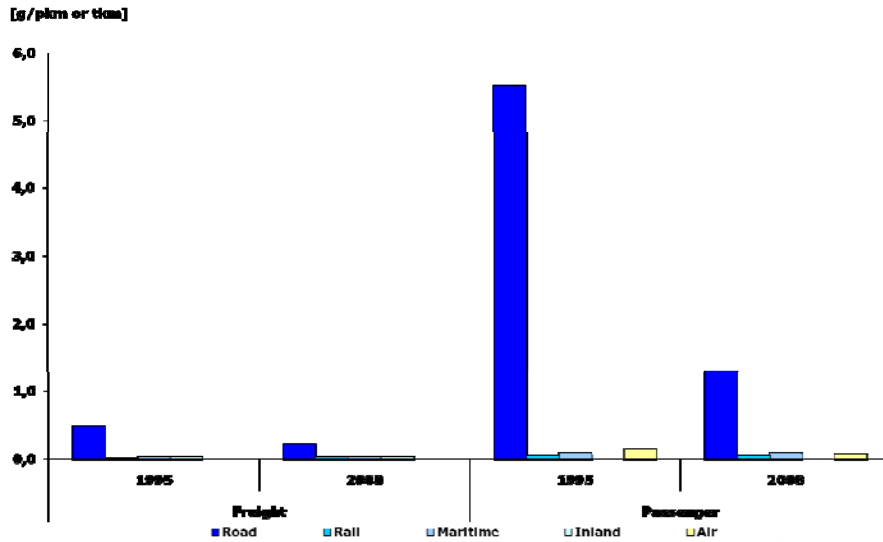
Emissioni di NO_x in Europa



Emissioni di PM in Europa



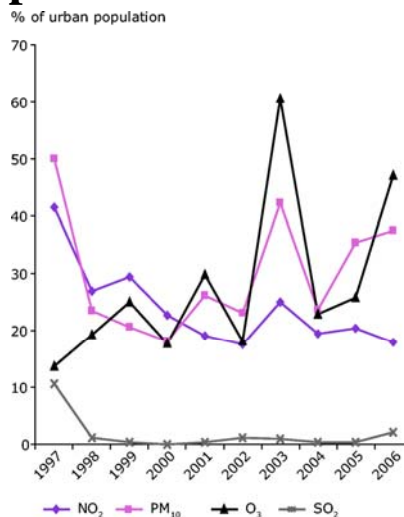
Emissioni di CO in Europa



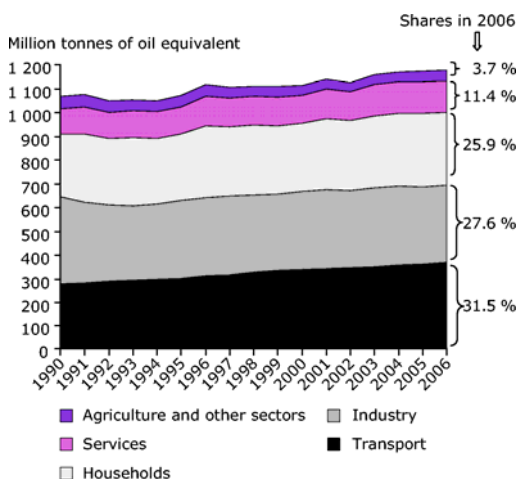
Percentuale di popolazione urbana esposta a valori di inquinanti sopra i limiti

Limiti:

- particolato (PM₁₀): 50 µg/m³ (media su 24 ore), non deve essere superato per più di 35 volte in un anno;
- biossido di azoto (NO₂): 40 µg/m³ (media annuale);
- biossido di zolfo: 125 µg/m³ (media giornaliera) da non superare per più di 3 volte in un anno;
- ozono (O₃): 120 µg/m³ (media massima giornaliera su 8 ore) da non superare per più di 25 giorni per anno come media su 3 anni.



Consumi energetici in area urbana



Valutazione inquinamento atmosferico

si può ottenere con:

1) Misurazione delle concentrazioni di inquinanti con strumenti

2) Calcolo delle concentrazioni di inquinanti con modelli (sistemi di modelli)

serve per:

1) Controllare che non vengano superati gli standard di qualità dell'aria nelle condizioni attuali

2) Controllare che non vengano superati gli standard di qualità dell'aria nelle condizioni di progetto

3) Confrontare più alternative di progetto in fase di valutazione dei piani di trasporto

Valutazione inquinamento atmosferico da traffico con sistema di modelli

Simulazione

Modelli di traffico

Modelli di emissione

Modelli di dispersione

Calcolo della concentrazione degli inquinanti nell'aria

Realtà

Veicoli, condizioni di deflusso

Emissione degli inquinanti

Dispersione degli inquinanti

Concentrazione degli inquinanti nell'aria

Emissione degli inquinanti

Modelli di emissione

I modelli di emissione dovrebbero fornire i tassi unitari di emissione nello spazio e_s e/o nel tempo e_t della sostanza inquinante k per un veicolo di una certa categoria i in funzione delle principali grandezze cinematiche velocità V e accelerazione a :

$$\begin{aligned} e_{si}^k &= e_{si}^k(V, a) && [g/m] \\ e_{ti}^k &= e_{ti}^k(V, a) && [g/s] \end{aligned}$$

per cui è necessaria la conoscenza di velocità ed accelerazione istantanea per ciascun veicolo che percorre un tratto stradale.

Nella pratica questa procedura è molto complessa e comunque va accoppiata ad un modello di traffico in grado di simulare le condizioni del moto di ciascun veicolo. Questi metodi di calcolo sono onerosi e si giustificano per analisi di dettaglio di aree limitate.

Per le applicazioni di progettazione a livello di intero sistema a cui fa riferimento questo volume è prassi corrente far ricorso a modelli che **mediano** le equazioni precedenti.

Emissione degli inquinanti

Modelli di emissione medi per categoria

Tali modelli forniscono i valori medi dei tassi di emissione di ciascuna sostanza k per ciascuna categoria i in funzione della velocità commerciale, o media, sul tronco stradale \bar{V} che a sua volta tiene conto in modo implicito delle diverse fasi del moto lungo il tronco stesso; ad esempio per velocità inferiori a 50 km/h:

$$e_{si}^k(\bar{V}) = a_i^k + \frac{b_i^k}{\bar{V}^{c_i^k}} \quad [g/km]$$

dove i coefficienti a_i^k , b_i^k e c_i^k dipendono dal tipo di inquinante, dal tipo di veicolo e dal rango di velocità considerata.

Modelli di emissione medi per categoria

CORINAIR

Insieme di modelli che forniscono le emissioni medie di alcuni inquinanti (k) per determinate categorie di veicoli (i).

NO _x (NO ed NO ₂)	espressi come equivalente in NO ₂
N ₂ O	
SO _x	espressi come equivalente in SO ₂
VOC	espressi come equivalente in CH1.85
CH ₄	
CO	
CO ₂	
NH ₃	
Pb	
Particolato	

Categorie di inquinanti trattati nei modelli Corinair

Modelli di emissione medi per categoria

CORINAIR

Si riportano a titolo di esempio i modelli relativi all'emissione di CO, per tutte le categorie di veicoli considerate.

Per le autovetture e i veicoli commerciali leggeri si può tenere conto delle maggiori emissioni a freddo tramite:

- coefficienti correttivi (decregono linearmente con la temperatura esterna)
- relazioni tra la percorrenza media a freddo e quella totale del particolare sistema preso in considerazione

Modelli di emissione medi per categoria

CORINAIR

Emissioni di CO
in ambito urbano
per veicoli di diverso tipo
(Modelli CORINAIR)

TIPO DI VEICOLO BENZINA	CILINDRATA	INTERVALLO DI VELOCITÀ	FATTORE DI EMISSIONE (URBANO) (g/km)	R ²
PRE ECE	Tutte le categorie	10-100 100-130	281*V ⁻¹ (-0.630) 0.112*V+4.32	0.924
ECE 15-00/01	Tutte le categorie	10-50 50-130	313*V ⁻¹ (-0.760) 27.22-0.406*V+0.0032*V ²	0.898 0.158
ECE 15-02	Tutte le categorie	10-60 60-130	300*V ⁻¹ (-0.797) 22.26-0.440*V+0.0026*V ²	0.747 0.102
ECE 15-03	Tutte le categorie	10-32 32-130	161.36-45.62*ln(V) 32.92-0.680*V+0.00377*V ²	0.790 0.247
ECE 15-04	Tutte le categorie	10-60 60-130	260.788*V ⁻¹ (-0.910) 14.653-0.220*V+0.00116*V ²	0.825 0.613
Convenzionale migliorata	CC < 1.41 1.41 < CC < 2.01	10-120 10-130	14.577-294*V+0.002478*V ² 8.273-0.151*V+0.000957*V ²	0.781 0.767
Marmitta catalitica a 2 vie	CC < 1.41 1.41 < CC < 2.01	10-130 10-130	17.882-377*V+0.002825*V ² 9.446-0.230*V+0.002029*V ²	0.656 0.719
Marmitta catalitica a 3 vie	Tutte le categorie	10-130	2.913-0.085*V+0.000873*V ²	0.7
ALTRI TIPI DI VEICOLI		INTERVALLO DI VELOCITÀ	FATTORE DI EMISSIONE (URBANO) (g/km)	R ²
Diesel < 2.5 ton.		10-130	5.413*V ⁻¹ (-0.574)	0.745
GPL < 2.5 ton.		10-130	12.523-0.418*V+0.0039*V ²	0.893
Benzina < 2.5 ton.			20.65	
Comm. benzina < 3.5 ton.			30.00	
Comm. diesel < 3.5 ton.			2.00	
Comm. benzina > 3.5 ton.			70.00	
Comm. diesel > 3.5 ton.			18.8	
motocicli				
- < 50 cc			10.00	
- > 50 cc 2 cilindri			22.00	
- > 50 cc 4 cilindri			20.00	

V: Velocità media espressa in km/h

R²: Coefficiente di correlazione delle relazioni sperimentali

Dispersione degli inquinanti

Fattori di dipendenza

Gli effetti nocivi degli inquinanti dipendono da:

- ✓ **tempo** di esposizione
- ✓ **concentrazione** media che si verifica in tale tempo:
 - ✗ quantità di inquinante emesso da ciascuna sorgente
 - ✗ dalla posizione reciproca dalle sorgenti rispetto al punto di rilevazione
 - ✗ meccanismo di dispersione degli inquinanti nell'atmosfera

Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (1/6)

I principali fattori che influenzano il meccanismo di dispersione degli inquinanti nell'atmosfera sono:

- ✓ fattori meteorologici
- ✓ turbolenza del flusso di veicoli in moto
- ✓ caratteristiche della strada

Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (2/6)

I **fattori meteorologici** rilevanti sono:

- ✓ il vento (velocità e direzione)

Il vento rende più alta la concentrazione sul lato della strada da esso investito e la riduce dall'altro; incrementi di velocità del vento producono una riduzione di concentrazione in quanto riducono il tempo di permanenza di un dato volume di inquinante in una data posizione
- ✓ il livello di turbolenza atmosferica

la velocità del vento cambia rapidamente nello spazio e nel tempo; una maggiore stabilità dell'aria (minore turbolenza) produce concentrazioni più elevate.

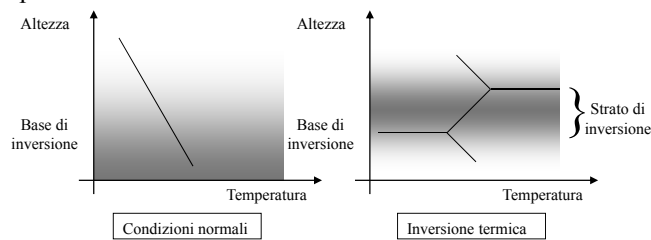
Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (3/6)

I fattori meteorologici rilevanti sono:

- ✓ il fenomeno dell'inversione termica (altezza)

Nell'atmosfera possono inoltre verificarsi fenomeni di *inversione termica*, ovvero la presenza di strati di aria più calda che invertono la naturale tendenza della temperatura a ridursi al crescere dell'altezza



La presenza di uno strato di inversione riduce l'altezza di mescolamento, ovvero riduce il volume di atmosfera nel quale si disperdono le sostanze inquinanti e quindi ne aumenta la concentrazione.

Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (4/6)

I fattori meteorologici rilevanti sono:

- ✓ la temperatura

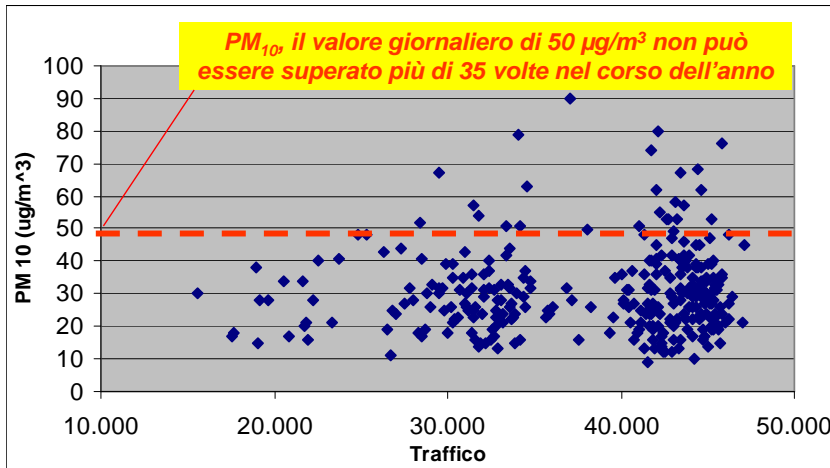
Il tasso di emissione della maggior parte degli inquinanti tende ad essere più alto quando la temperatura è bassa

La turbolenza del flusso di veicoli in moto:

Per bassi valori della velocità del vento i gas emessi tendono a salire a causa della loro temperatura più elevata di quella dell'aria e vengono dispersi dalla turbolenza provocata dai veicoli in moto.

Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (5/6)



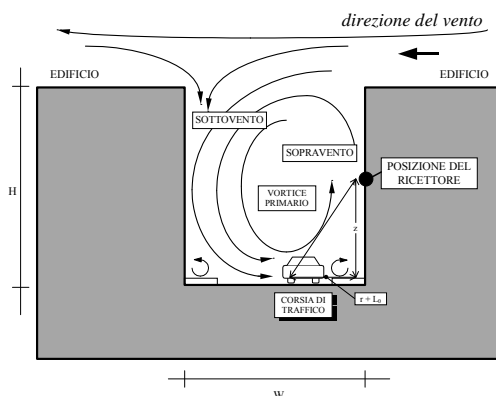
Dati rilevati (centralina Piazza Garibaldi): all'aumentare del traffico aumenta la probabilità di superamento della soglia limite di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Dispersione degli inquinanti

Meccanismi di dispersione nell'atmosfera (6/6)

Le caratteristiche della strada:

Per le strade a tessuto chiuso, ovvero strade fiancheggiate da edifici per le quali il rapporto fra l'altezza degli edifici H e la larghezza W è superiore a 0,2, quando la direzione del vento forma angoli maggiori di 30° con la direzione dell'asse stradale, si forma una circolazione elicoidale che produce una concentrazione due tre volte più alta sul lato sopravvento della strada.



Sempre per le strade a tessuto chiuso, per basse velocità del vento, diventano predominanti i fenomeni di turbolenza da flusso e da gas caldi.

Monetizzazione

Metodologie

- Stima in funzione delle tonnellate emesse

il valore economico dell'inquinamento atmosferico si può stima in base alla variazione assoluta (tonnellate) di emissioni inquinanti ed ai valori unitari di riferimento (€/ tonnellata emessa) ottenibili dalla letteratura in materia (es. Commissione Europea HEATCO)

Monetizzazione

Stima in funzione delle tonnellate emesse

Il **costo esterno** totale (CE) viene determinato moltiplicando la variazione dei quantitativi emessi (ΔE^k) dei diversi inquinanti per il relativo costo esterno unitario (CE^k).

$$CE = \sum_k \Delta E^k \cdot CE^k \quad [€]$$

Inquinante	Costo Esterno [€2005 / tonnellata]	
	Emissioni in zona extra-urbana	Emissioni in zona urbana
SO ₂	3.720	3.720
NO _x	3.401	3.401
VOC	1.700	1.700
PM _{2,5}	74.396	393.236
CO ₂	100	100

Corso di
TRASPORTI E TERRITORIO

Prof. Ing. Agostino Nuzzolo

Inquinamento atmosferico da traffico
APPENDICE

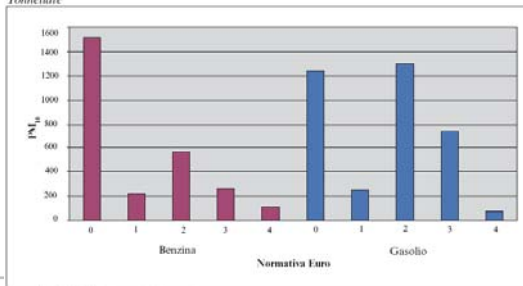
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
Tor Vergata Dipartimento di Ingegneria Civile



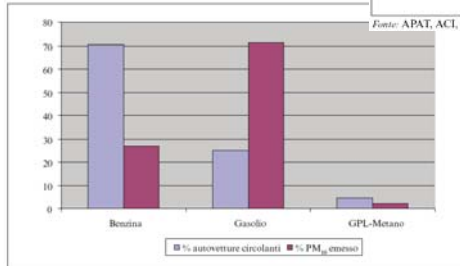
Inquinamento atmosferico da traffico

Emissioni di PM₁₀ in Italia

Tonnellate



Percennuali



Fonte: APAT, ACI, Ministero dei Trasporti.

Fonte: APAT, MCTC, ACI, Ministero dei Trasporti.

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
Tor Vergata Dipartimento di Ingegneria Civile

corso di Trasporti e Territorio

52

Dispersione degli inquinanti

Modelli di dispersione

Per calcolare la concentrazione media di inquinanti nell'aria si utilizzano i **modelli di dispersione** che mettono in relazione le concentrazioni in un punto a cui corrisponde un ricettore (ipotetico o reale) con i principali fattori descritti.

I principali modelli di dispersione possono essere classificati in:

- ✓ Modelli euleriani
(concentrazione media in un volume)
- ✓ Modelli lagrangiani
(concentrazione media in un volume)
- ✓ **Modelli gaussiani**
(concentrazione media in un punto)
- ✓ **Modelli empirici**

I modelli di dispersione vengono spesso utilizzati per valutare la sola concentrazione del monossido di carbonio, l'inquinante più dannoso.

Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (1/8)

I modelli gaussiani sono utilizzati per il calcolo della concentrazione media di inquinante in un punto (ricettore) e si basano sulla teoria della dispersione gaussiana.

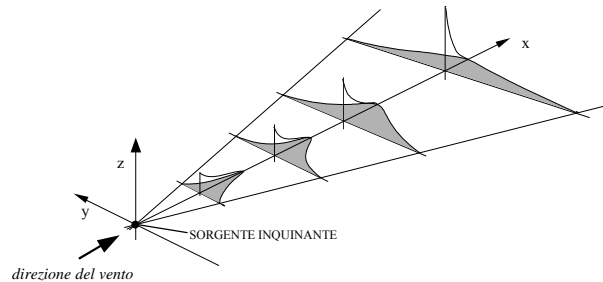
Ipotesi semplificative:

- ✓ componente verticale del vento nulla;
- ✓ superficie del terreno piana;
- ✓ atmosfera stazionaria ed omogenea
(distribuzione della velocità del vento indipendente dal tempo e dallo spazio);
- ✓ turbolenza lungo la direzione del vento trascurabile
(velocità media sufficientemente grande);
- ✓ assenza di reazioni chimiche e di deposizione al suolo.

Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (2/8)

Sotto queste ipotesi si assume che, data una sorgente puntiforme e una direzione media del vento la distribuzione della concentrazione di inquinante in un piano verticale perpendicolare alla direzione del vento possa essere espressa da una legge di tipo gaussiano i cui parametri sono funzione della distanza del piano verticale dalla sorgente.

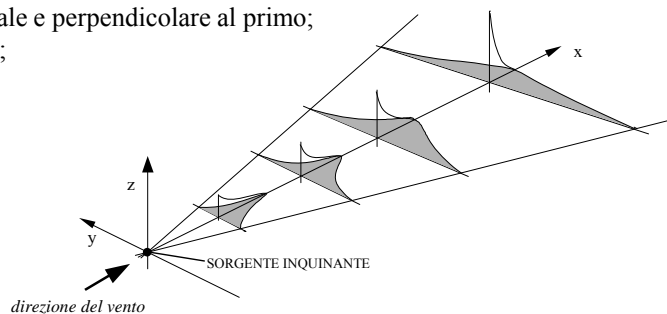


Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (3/8)

Per esprimere la concentrazione di un generico inquinante in un determinato punto è utile esprimere le coordinate di tale punto rispetto ad una terna di assi di riferimento così localizzata:

- ✓ o origine nella sorgente inquinante;
- ✓ asse x orizzontale e coincidente con la direzione del vento;
- ✓ asse y orizzontale e perpendicolare al primo;
- ✓ asse z verticale;



Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (4/8)

$$C(E, u, x, y, z) = \frac{E}{u} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)}$$



con:

o origine nella sorgente inquinante;

asse x orizzontale e coincidente con la direzione del vento;

asse y orizzontale e perpendicolare al primo;

asse z verticale;

C = concentrazione di inquinante nel punto di coordinate x, y, z [g/mc];

E = emissione della sorgente nell'unità di tempo [g/sec];

u = velocità media del vento [m/sec];

σ_y, σ_z = coefficienti di dispersione = $\sigma(x, st)$ [m];

x = distanza lungo la direzione del vento [m];

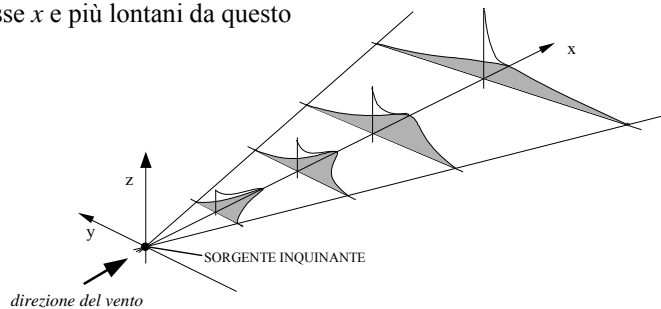
st = classe di stabilità atmosferica.

Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (5/8)

I coefficienti di dispersione σ_y e σ_z determinano l'ammontare della dispersione, essi sono in generale crescenti con la distanza del punto dalla sorgente inquinante (x), tanto più rapidamente quanto più instabile è l'atmosfera.

In termini geometrici la concentrazione nei punti lungo l'asse x ($y=z=0$) è tanto minore quanto più è lontano il punto stesso dalla sorgente; tuttavia all'aumentare di x , la concentrazione si mantiene più alta per punti localizzati sul piano perpendicolare all'asse x e più lontani da questo



Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (6/8)

I coefficienti di dispersione vanno ricavati per via sperimentale

classe di stabilità	$\sigma_y [m]$	$\sigma_z [m]$
A-B	$0.32x (1+0.0004x)^{0.5}$	$0.24x (1+0.0001x)^{0.5}$
C	$0.22x (1+0.0004x)^{0.5}$	0.20x
D	$0.16x (1+0.0004x)^{0.5}$	$0.14x (1+0.0003x)^{0.5}$
E-F	$0.11x (1+0.0004x)^{0.5}$	$0.08x (1+0.00015x)^{0.5}$

Espressioni empiriche valide per le aree urbane per il calcolo dei coefficienti di dispersione in funzione di x per diverse condizioni di stabilità atmosferica:

- ✓ A= atmosfera estremamente instabile
- ✓ B= atmosfera moderatamente instabile
- ✓ C= atmosfera debolmente instabile
- ✓ D= atmosfera neutra
- ✓ E= atmosfera debolmente stabile
- ✓ F= atmosfera moderatamente stabile

Dispersione degli inquinanti

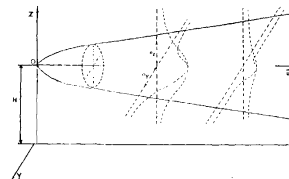
Modelli Gaussiani (7/8)

Se il suolo è perfettamente riflettente:

$$C(E, u, x, y, z) = \frac{2E}{u} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)}$$

Se la sorgente è ad una altezza H rispetto al piano stradale coincidente con il piano xy

$$C(E, u, x, y, z) = \frac{2E}{u} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)}$$



Dispersione degli inquinanti

Modelli Gaussiani (8/8)

Per applicare il modello gaussiano al caso di un tronco stradale:

- ✓ si schematizza il tronco con un insieme di sorgenti puntuali corrispondenti a tratti finiti;
- ✓ si calcolano la emissione totale nell'unità di tempo per ciascuna sorgente;
- ✓ si determinano le coordinate del ricettore rispetto alla sorgente
- ✓ si totalizzano i singoli contributi dei diversi tronchi considerati.

Dispersione degli inquinanti

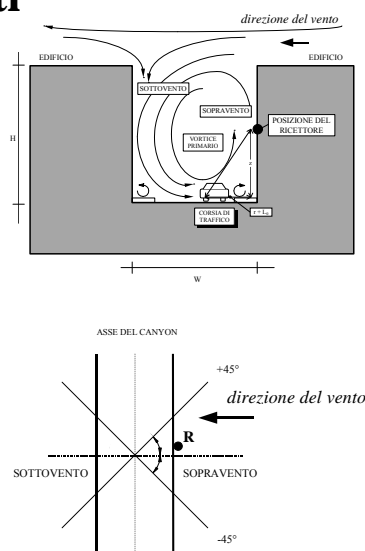
Modelli Empirici (1/5)

Utilizzati in ambito urbano per le strade a tessuto chiuso (strade canyon).

I modelli gaussiani, ipotizzando uno spazio di dispersione illimitato ed esente da ostacoli, sono inadeguati a descrivere situazioni topografiche di questo tipo.

All'interno del canyon le caratteristiche del moto dell'aria sono influenzate dalla direzione e velocità del vento e dalla altezza degli edifici.

In particolare a partire da una velocità del vento piuttosto bassa ($u \sim 1-2 \text{ m/sec}$) la presenza di una componente di vento esterno trasversale origina un vortice che rimane imprigionato nella cavità del canyon; il vento si dice trasversale se la sua direzione forma un angolo compreso fra -45° e $+45^\circ$ con la normale all'asse del canyon.

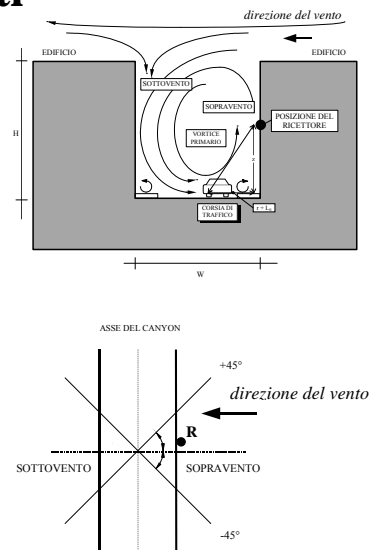


Dispersione degli inquinanti

Modelli Empirici (2/5)

In questo caso si verificano i seguenti fenomeni:

- ✓ gli inquinanti emessi dagli autoveicoli essendo influenzati dal vortice, si distribuiscono quantitativamente in modo maggiore sul lato sopravvento rispetto a quello sottovento;
- ✓ il vortice da un lato solleva gli inquinanti emessi dagli autoveicoli fino ai tetti (facilitandone la rimozione), dall'altro raccoglie gli inquinanti emessi dai camini e li convoglia nel canyon;
- ✓ la scarsa penetrazione degli inquinanti provenienti dall'alto denota un limitato ricambio d'aria tra la cavità e l'ambiente esterno.



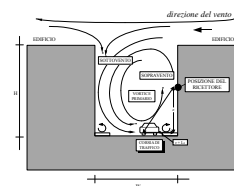
Dispersione degli inquinanti

Modelli Empirici (3/5)

La concentrazione di inquinante di un punto generico di una strada canyon è determinata come somma di:

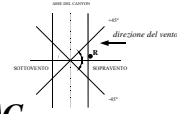
- ✓ **una componente di fondo, C_b**
(dovuta alle emissioni sugli altri archi che entrano al livello dei tetti)
- ✓ **una componente locale ΔC**
(legata alle emissioni degli autoveicoli nella strada)

La componente di fondo C_b , può essere trascurata poiché scarsamente influente (studi sperimentali hanno evidenziato che tali contributi sono 50 volte inferiori rispetto a quelli interni).



Dispersione degli inquinanti

Modelli Empirici (4/5)



Il modello di canyon stradale fornisce la componente ΔC .

✓ Se la direzione del vento è **trasversale** all'asse del canyon il contributo ΔC è espresso da due relazioni differenti secondo la posizione del ricettore:

✗ sopravvento (*leeward side*) → ΔC_L

✗ sottovento (*windward side*) → ΔC_W

✓ Se la direzione del vento è quasi **parallela** alla strada (cioè forma con l'asse stradale un angolo con il valore assoluto minore di 45°):

$$\Delta C = \frac{\Delta C_L + \Delta C_W}{2}$$

ΔC è calcolato come media tra i valori sopravvento e sottovento ed assume lo stesso valore su entrambi i lati della strada

Dispersione degli inquinanti

Modelli Empirici (5/5)

Le componenti di ΔC sopravvento ΔC_L e sottovento ΔC_W possono essere calcolate come:

$$\Delta C_L = \frac{K * E}{(u + 0.5)(r + L_o)} [g/m^3] \quad \Delta C_W = \frac{K * E(H - z)}{W * H(u + 0.5)} [g/m^3]$$

dove:

K è una costante adimensionale (sperimentalmente circa pari a 7);

L_o è la larghezza del veicolo (2 m);

E è la quantità di inquinante emesso dagli autoveicoli [g/ms];

r è la distanza del ricettore dalla corsia più vicina [m];

z è l'altezza del ricettore [m];

H è la minima altezza degli edifici [m];

W è la larghezza della strada [m];

u è la velocità del vento [m/s];

