



ARPAT

Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

Regione Toscana



L'impiego di modelli matematici per la dispersione degli inquinanti in atmosfera da sorgenti puntuali negli studi epidemiologici ambientali

Antongiulio Barbaro e Franco Giovannini
ARPAT – Settore Modellistica previsionale

crmqa@arpat.toscana.it

<http://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/modellistica-per-la-qualita-dellaria>

Seminario di Epidemiologia dell'Ambiente e del Lavoro

“Gli studi effettuati in Toscana in popolazioni residenti attorno a sorgenti puntuali di inquinamento di potenziali cancerogeni”

Firenze - 14 novembre 2016



Modello

Modello: un insieme di algoritmi matematici capaci di descrivere il comportamento di un sistema o di un fenomeno naturale.

Gli algoritmi offrono comunque **una rappresentazione (parziale) della realtà** che si intende descrivere.

Il grado di aderenza alla realtà dipende dalle assunzioni adottate per schematizzare i processi naturali e dal grado di precisione dei dati sperimentali su cui si basa il modello.

Nello scrivere gli algoritmi si fanno delle assunzioni o si trascurano alcuni fattori: **ciascun modello vale perciò in determinate situazioni e con certe approssimazioni.**

Ogni modello richiede dati di ingresso quali “condizioni iniziali” relative alle variabili “causa”, ovvero richiesti per calibrare alcuni parametri numerici (taratura).

La precisione con cui sono noti i valori dei dati di ingresso influisce sulla precisione dei risultati del modello.

La precisione complessiva del modello è determinata dalle approssimazioni introdotte negli algoritmi e dalla precisione dei dati di input.



Quale modello?

I modelli per la simulazione delle concentrazioni degli inquinanti in atmosfera vengono suddivisi in due categorie generali:

> **modelli deterministici**, basati sulla descrizione matematica dei processi che avvengono in atmosfera (trasporto, diffusione turbolenta, trasformazioni chimiche, deposizione secca e umida, ecc.), con cui vengono messi in relazione gli effetti (concentrazioni in aria ambiente di una o più sostanze) con le cause (emissioni inquinanti da una o più sorgenti);

> **modelli statistici**, basati sulle relazioni statistiche di carattere empirico che intercorrono tra alcuni dati disponibili (anche in forma di metaindicatori) e le concentrazioni in aria ambiente misurate *in situ*.

I modelli deterministici sono quelli più diffusi nelle applicazioni pratiche: se calibrati ed impiegati appropriatamente, sono in grado di fornire una **relazione non ambigua tra sorgente e recettore**, che costituisce l'obiettivo di qualunque studio che miri a migliorare la qualità dell'aria ambiente o a preservare quella esistente dagli apporti derivanti dai futuri sviluppi urbani o industriali.

Problema principale nel caso della dispersione in atmosfera: presenza della **diffusione turbolenta** determinata dai moti caotici dell'aria.



Modelli deterministici

**sorgenti
inquinanti**

**fattori di emissione basati sui consumi
dati rilevati *in situ* (SME)
autocontrolli al camino**

**trasporto e diffusione
in atmosfera**

**equazione di continuità
equazione di trasporto e diffusione
descrittori (meteo, orografia, uso del suolo)**

**indicatori
di qualità ambientale
(esposizione)**

**concentrazioni in aria ambiente
deposizioni cumulate al suolo**



Soluzione gaussiana

La soluzione dell'equazione di trasporto e diffusione è in genere di tipo numerico. Sotto alcune ipotesi può essere drasticamente semplificata per pervenire ad una soluzione analitica, di tipo gaussiano:

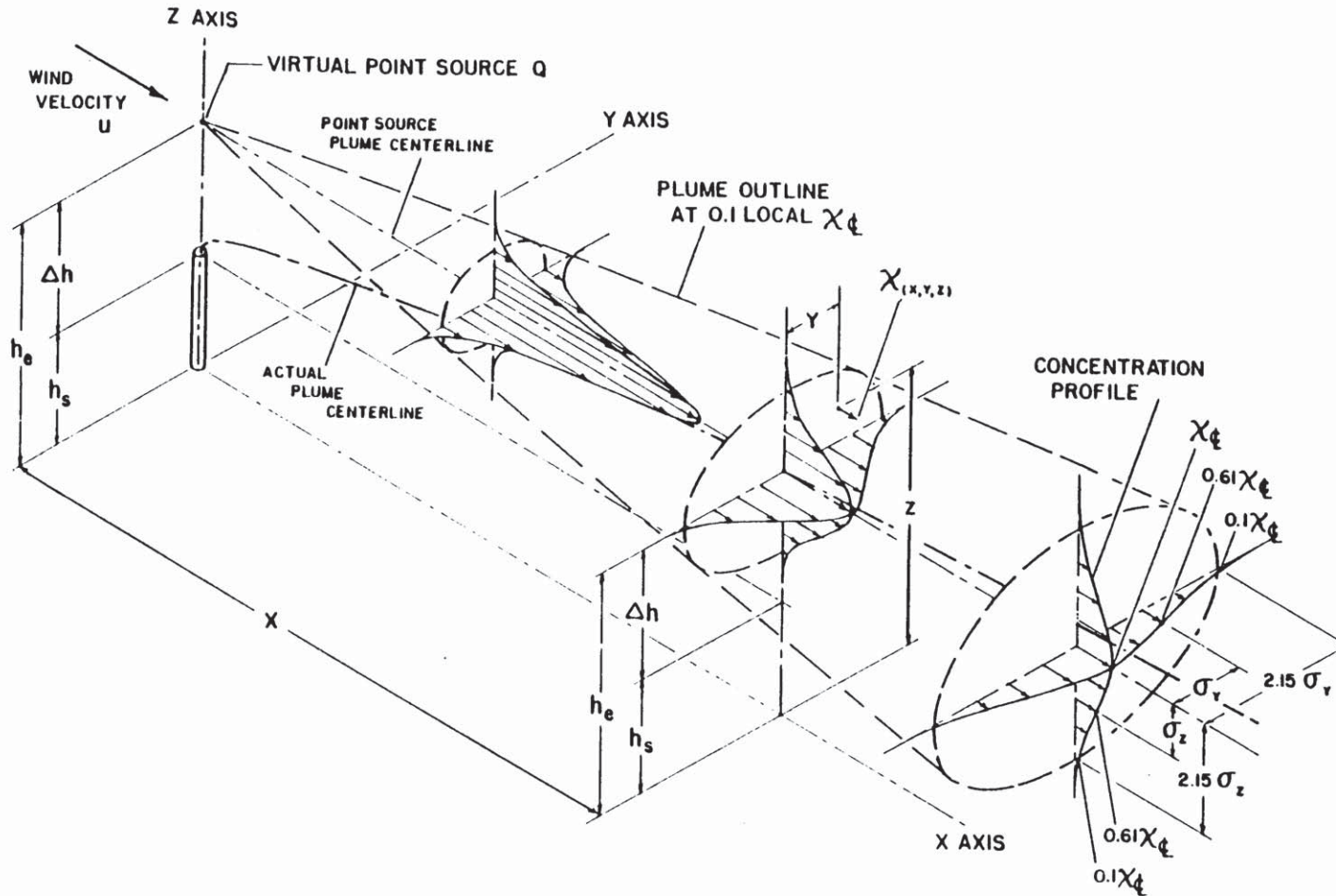
$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{(h_e - z)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}}$$

dove: c è la concentrazione in aria ambiente (*massa/volume*), v è la velocità del vento, Q è il rateo emissivo (*massa/tempo*), h_e è l'altezza efficace dell'emissione.

Condizioni di validità:

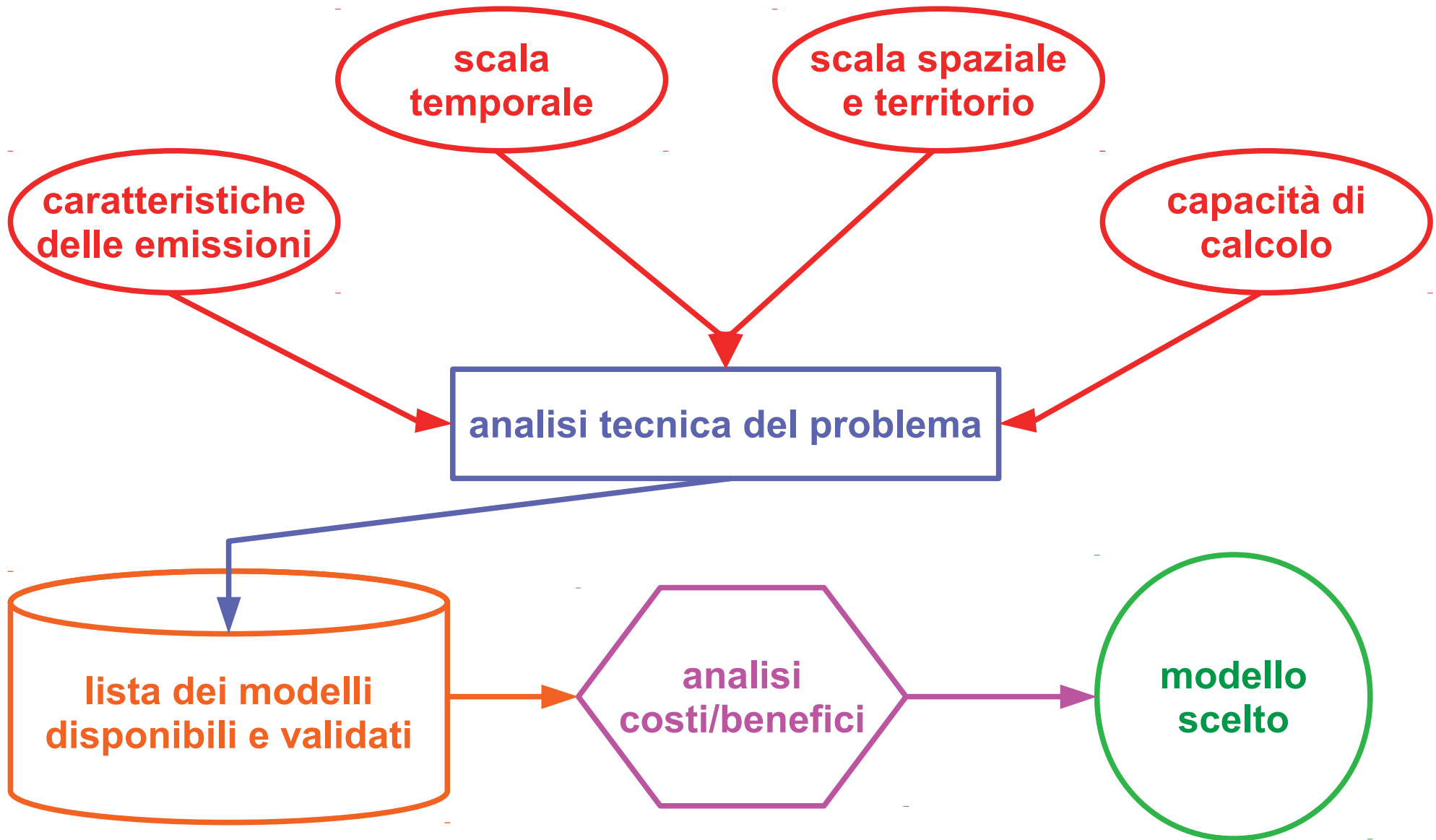
- inquinante non reattivo
- processo stazionario
- velocità del vento costante nel piano orizzontale (direzione lungo l'asse x) e nell'intervallo di tempo
- diffusione turbolenta nella direzione x trascurabile rispetto alla componente di trasporto ($v > 1$)
- sorgente puntiforme (nell'origine degli assi) e costante nell'intervallo di tempo

Soluzione gaussiana



Varianti alla soluzione classica: *building downwash*, *plume trapping*, fumigazione, deposizione al suolo, reazioni chimiche, presenza di orografia nel dominio di calcolo, sorgenti lineari, sorgenti areali, sorgenti volumetriche, vento debole ($\nu < 1$).

Scelta del modello





Linee guida tecniche italiane

Criteri di scelta e di impiego dei modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera:

- primi anni '90, Istituto Superiore di Sanità (www.iss.it)
 - “Modelli per la progettazione e valutazione di una rete di rilevamento per il controllo della qualità dell'aria”, ISTISAN 90/32
 - “Modelli ad integrazione delle reti per la gestione della qualità dell'aria”, ISTISAN 93/36
- dal 1995, ANPA, poi APAT, ora ISPRA-Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (<http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/aria>):
 - “I modelli per la valutazione della qualità dell'aria”, 2000
 - “Osservatorio dei modelli su smog fotochimico e ozono troposferico”, 2001
 - “Linee guida per la selezione e l'applicazione dei modelli di dispersione atmosferica per la valutazione della qualità dell'aria”, 2001
 - “La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria”, 2003
 - “I modelli per la valutazione e gestione della qualità dell'aria: normativa, strumenti, applicazioni”, 2004
 - “Dati e informazioni per la caratterizzazione della componente “atmosfera” e prassi corrente di utilizzo dei modelli di qualità dell'aria nell'ambito della procedura di V.I.A.”, 2007
 - “Guida ipertestuale alla scelta dei modelli di dispersione nella valutazione della qualità dell'aria” (www.smr.arpa.emr.it/ctn/)



Linee guida tecniche europee

Criteri di scelta e di impiego dei modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera formulati dall'EEA-Agenzia europea per l'ambiente (www.eea.europa.eu/themes/air):

- rapporti tecnici
 - “Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models”, 1996
 - “The application of models under the European Union’s air quality directive: a technical reference guide”, Technical report n. 10/2011, 2011
- sistema di documentazione dei codici di calcolo disponibili (MDS-Model Documentation System):
http://acm.eionet.europa.eu/databases/MDS/index_html
- *Forum for Air quality Modelling – FAIRMODE*: per favorire la collaborazione tra utilizzatori e sviluppatori dei codici al fine di promuovere l'impiego armonizzato dei modelli da parte dei Paesi membri dell'Unione, con particolare riguardo all'attuazione delle direttive europee (<http://fairmode.europa.eu/>)



Linee guida tecniche US-EPA

Negli Stati Uniti, fin dal 1977, l'Air Pollution Control Act ha affidato all'Environmental Protection Agency (US-EPA) il compito di effettuare una ricognizione degli strumenti modellistici disponibili e di redigere una guida per la loro accettabilità ed il loro impiego, nell'ambito delle finalità di tutela della qualità dell'aria definite a livello federale.

La documentazione messa a disposizione dall'US-EPA è reperibile presso lo SCRAM-Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling: codici di calcolo, manuali, software di supporto, linee guida, ecc. per l'impiego della modellistica prodotta dalla stessa US-EPA o da essa accreditata, nel rispetto delle linee guida federali (<https://www.epa.gov/scram>).

- linee guida

- US-EPA, "Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule", 40 CFR Part 51, 2005
- US-EPA, "Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications", EPA-454/R-99-005, 2000

- i modelli sono suddivisi in due liste distinte:

- lista A: modelli preferiti (https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#rec)
- lista B: modelli alternativi (https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm#altmod)



Epidemiologia e modelli

Nell'ambito degli studio epidemiologici è richiesta la valutazione/stima dell'**esposizione della popolazione** sotto indagine.

L'utilizzo di **informazioni geografiche** per la valutazione dell'esposizione sta diventando sempre più frequente, sia in fase di disegno dello studio che di analisi dei dati. La crescente disponibilità di informazioni digitali e lo sviluppo dei sistemi informativi geografici (GIS) permette di analizzare e gestire dati localizzati spazialmente.

L'utilizzo dei **dati e modelli ambientali come indicatore indiretto per la valutazione dell'esposizione** rappresenta sicuramente un miglioramento della stima rispetto a considerazioni meramente geografiche come la distanza da una fonte.

Il vantaggio principale consiste nel disporre di indicatori (concentrazioni in aria ambiente e deposizione al suolo) che tengano conto dei diversi parametri in gioco nel determinare l'esposizione: entità delle emissioni e loro variazione nel tempo, caratteristiche fisiche e chimiche delle sorgenti, modulazione dell'impatto delle emissioni al variare delle condizioni meteorologiche.

L'approccio geografico è adatto per integrare informazioni di tipo ambientale con dati socio-demografici per l'attribuzione di valori di esposizione alla popolazione.



Studi recenti condotti da ARPAT

Negli ultimi anni **ARPAT** è stata coinvolta in alcune indagini di carattere epidemiologico per le quali **ha effettuato studi con strumenti modellistici** per stimare le concentrazioni in aria ambiente e le deposizioni al suolo dovute alle emissioni di alcuni impianti e stabilimenti produttivi, da impiegare come indicatori dell'esposizione:

- “Stima della dispersione delle sostanze inquinanti emesse in atmosfera da parte dell’impianto di termodistruzione dei rifiuti solidi urbani in località Falascaia, Pietrasanta (LU)” (2010-2012)
- “Studio integrativo sulle ricadute di inquinanti atmosferici nell’area di San Zeno” (2011), che integra un precedente studio condotto dall’Università di Siena (“Studio modellistico di dispersione atmosferica di microinquinanti nel territorio circostante l’impianto CHIMET [Badia al Pino, Arezzo]”, 2009)
- “Note ed informazioni per l’individuazione delle *aree di ricaduta* delle emissioni atmosferiche dall’area industriale del Casone (Scarlino, GR)” (2015)

E' in corso una valutazione congiunta con ASL Centro e ISPO per l'affinamento di una recente indagine, che comporterà la redazione di un nuovo studio di dispersione nell'anno 2017, relativamente all'impatto delle emissioni dell'impianto di termotrattamento di rifiuti solidi urbani di Montale (PT)



Impianto TEV - Falascaia

- Con la **DGR n. 792/2009** la USL di Viareggio è stata incaricata di condurre una «Indagine epidemiologica sulla popolazione nell'area del termovalorizzatore di Falascaia e sulla contaminazione da PCDD, PCDF e sostanze diossina simili nel territorio versiliese, attraverso l'uso di indicatori biologici, con particolare riferimento all'area di pertinenza del termovalorizzatore di Falascaia a Pietrasanta».
- La **USL di Viareggio** nel 2010 ha chiesto il supporto di ARPAT per definire la popolazione su cui focalizzare l'indagine, individuando le aree maggiormente interessate dalle ricadute delle emissioni dell'impianto di Falascaia:
 - > vecchio, attivo dal 1974 al 1988 (dismesso);
 - > nuovo, attivo dal 2002 al 2010 (chiuso dopo un'indagine penale).
- **ARPAT** dal dicembre 2010 al maggio 2012 ha curato:
 - > ricerca, acquisizione e rielaborazione dei dati emissivi dei due impianti;
 - > acquisizione e rielaborazione dei dati meteorologici della zona;
 - > messa a punto delle simulazioni di dispersione degli inquinanti, post-elaborazione dei risultati (concentrazioni e deposizioni al suolo).
- ARPAT si è allineata quanto possibile alla **metodologia di stima** definita in “Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities”, US-EPA 2005.

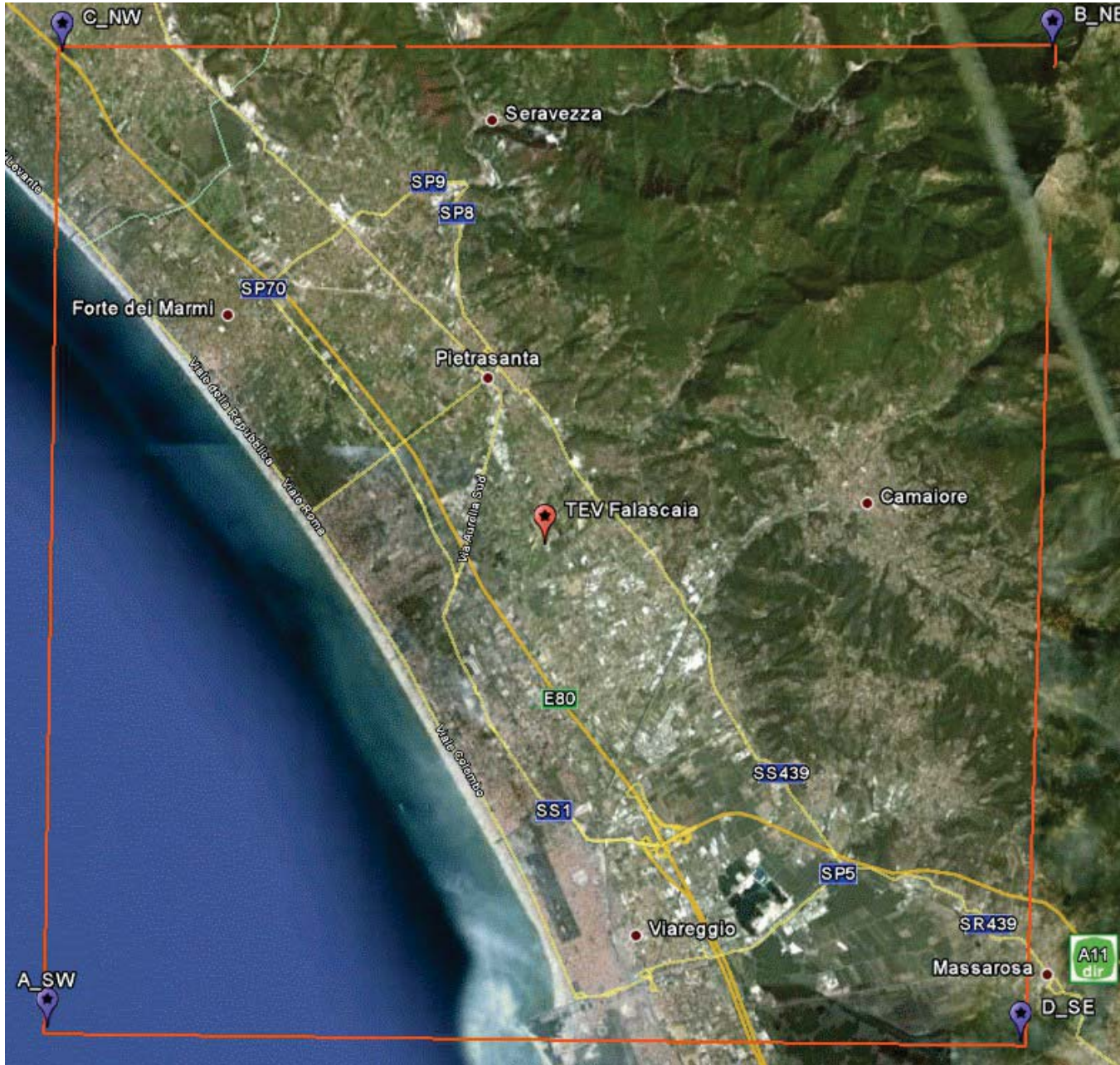


Caratteristiche dello studio

- **modello utilizzato:** ISC-Industrial Source Complex, versione 3, realizzato da US-EPA, basato sulla soluzione gaussiana
- **area di indagine:** centrata sull'impianto, ampia 16 km x 16 km, orografia descritta tramite DTM-Digital Terrain Model con risoluzione 100 m (25921 recettori)
- **meteorologia:** dati orari raccolti in un anno presso una stazione collocata a 600 m dall'impianto (vento, temperatura, radiazione, pioggia)
- **emissioni:**
 - > vecchio impianto: dati ricavati da un'attenta ricognizione della letteratura scientifica, in tre scenari: principale (0-24, 365 gg), ridotto (7-21, 315 gg), con extra emissioni di avvio
 - > nuovo impianto: emissioni pari ai limiti autorizzativi (scenario limite) e pari ai valori medi ottenuti nei controlli e autocontrolli al camino (scenario medio)
- **inquinanti e grandezze stimate:** concentrazioni in aria ambiente e deposizioni cumulate al suolo di diossine e furani (PCDD+PCDF), policlorobifenili diossina simili (PCB_{DL}), IPA (BaP), polveri (PTS, PM10, PM2.5), cadmio e tallio (Cd+Tl), mercurio (Hg), metalli pesanti (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V)



Area di indagine



Vecchio impianto (1974-1988)

Emissione	Altezza del camino (m)	Sezione di sbocco del camino (m ²)	Diametro all'uscita (m)	Velocità di uscita dei fumi (m/s)	Temperatura dei fumi all'uscita (K)	Portata normalizzata (Nm ³ /h)
01	24	2.84	1.9	3.75	350	24000

Scenario principale:

- PCDD+PCDF > 50 ng I-TE/Nm³
- PCB_{DL} > 5.3 ng W-TE/Nm³
- IPA > 0.05 mg/Nm³
- PTS > 2.5 g/Nm³
- PM10 > 0.95 g/Nm³
- PM2.5 > 0.65 g/Nm³
- Cd+TI > 5 mg/Nm³
- Hg > 1.75 mg/Nm³
- Sb+As+Pb+Cr+CO+Cu+Mn+V > 90 mg/Nm³



Valori ricostruiti da analisi della letteratura scientifica

Nuovo impianto (2002-2010)

Emissione	Altezza del camino (m)	Sezione di sbocco del camino (m ²)	Diametro all'uscita (m)	Velocità di uscita dei fumi (m/s)	Temperatura dei fumi all'uscita (K)	Portata normalizzata (Nm ³ /h)
E1	50	0.95	1.1	10.1	375	21350
E2	50	0.95	1.1	10.1	375	21350

Scenario limite (*medio*):

- PCDD/F > 0.1 ng I-TE/Nm³ (0.025)
- PCB_{DL} > 5.34 pg W-TE/Nm³ (3.98)
- IPA > 0.01 mg/Nm³ (0.0001)
- PTS > 1 mg/Nm³ (0.2)
- PM10 > 0.93 mg/Nm³ (0.19)
- PM2.5 > 0.87 mg/Nm³ (0.17)
- Cd+Tl > 0.05 mg/Nm³ (0.01)
- Hg > 0.05 mg/Nm³ (0.005)
- Sb+As+Pb+Cr+CO+Cu+Mn+V > 0.5 mg/Nm³ (0.2)



Valori da autorizzazione (*controlli e autocontrolli*)



Confronto risultati

Inquinante, indicatore e unità di misura	Vecchio impianto		Nuovo impianto		Limiti di legge o soglie di valutazione
	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	
PCDD+PCDF, concentrazione media annua in fg TE/m ³	420	64.4 (25% del totale)	1.26	0	40 (†)
PCDD+PCDF, deposizione media giornaliera in pg TE/m ² d	1923	87.0 (34% del totale)	1.63	0	14 (‡)
PCDD+PCDF+PCB _{DL} , deposizione media giornaliera in pg TE/m ² d	1934	131.0 (51% del totale)	1.65	0	8.2 (#)

(†) A. Di Domenico, "Orientamenti per la definizione di livelli d'azione ambientali per policlorodibenzodiossine (PCDD) e policlorodibenzofurani (PCDF)", ISTISAN 88/3, Roma, 1988

(‡) L. Van Lieshout, M. Desmedt et al., "Deposition of dioxins in Flanders (Belgium) and a proposition for guide values", Atmospheric Environment, 35 suppl. n° 1, 2001, pag. s83-s90

(#) C. Cornelis, K. De Fré et al., "Proposal for environmental guideline values for atmospheric deposition of dioxins and PCBs - Final Report", 2007/IMS/R/277 VITO, 2007



Confronto risultati

Inquinante, indicatore e unità di misura	Vecchio impianto		Nuovo impianto		Limiti di legge o soglie di valutazione
	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	
Metalli pesanti, concentrazione media annua in ng/m ³	649	non determinabile	5.25	0	per Pb 500 (*) per Ni 20 (*) per As 6 (*) per V 20000 (+) per Cr 1000 (+) per Mn 150 (+)
Cd+Tl, concentrazione media annua in ng/m ³	36	non determinabile	0.55	0	per Cd 5 (*)
Hg, concentrazione media annua in µg/m ³	0.014	0	0.0005	0	1 (+)

(*) Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155, "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale n. 216 del 15 settembre 2010 - Serie generale

(+) WHO Regional Office for Europe, "Air Quality Guidelines for Europe, second edition", WHO Regional Publications European series n°91, Copenhagen, 2000



Confronto risultati

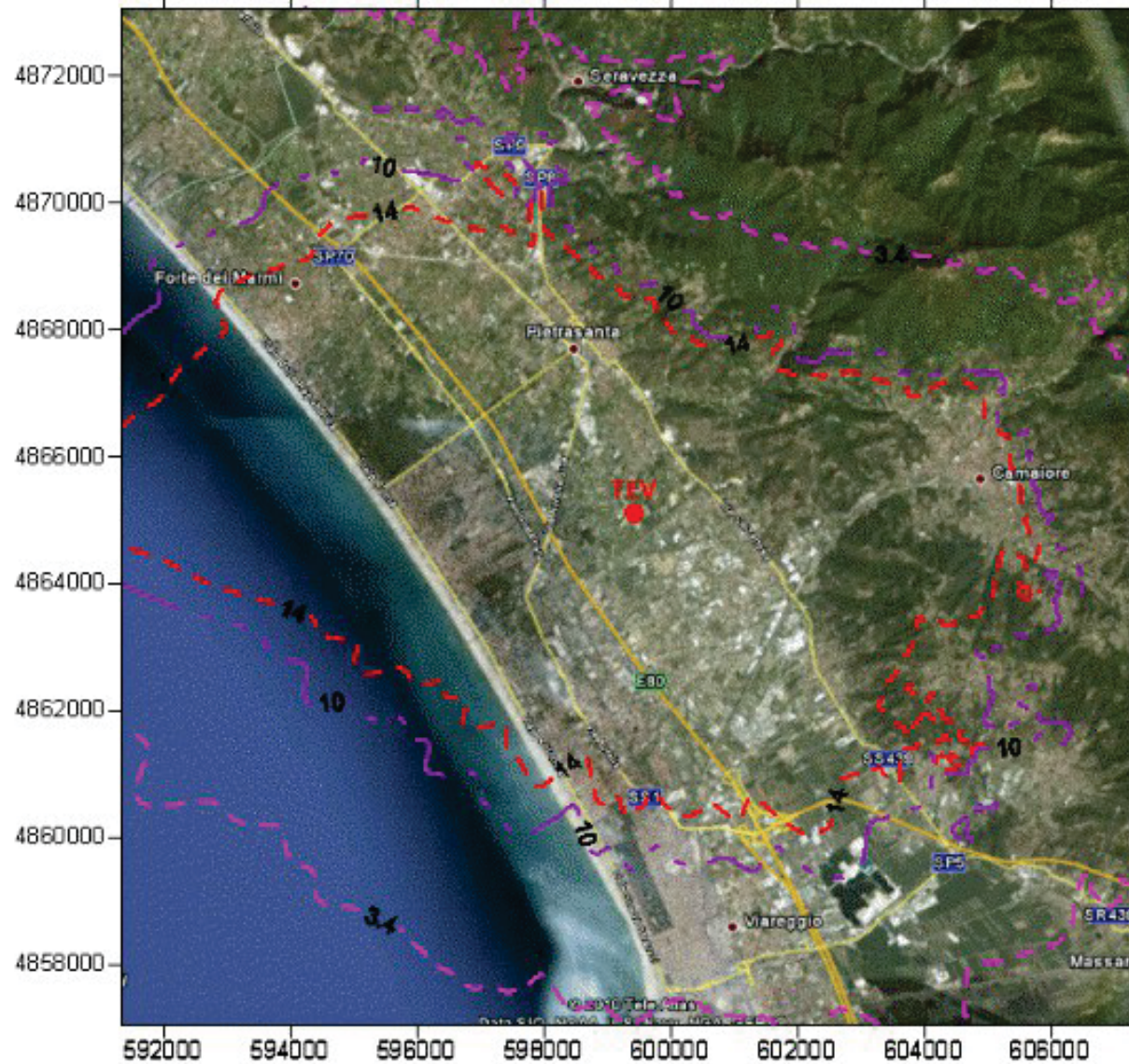
Inquinante, indicatore e unità di misura	Vecchio impianto		Nuovo impianto		Limiti di legge o soglie di valutazione
	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	Valore massimo	Area (Km ²) con valori ≥ alla soglia	
IPA, concentrazione media annua in ng/m ³	0.39	0	0.11	0	per benzo(a)pirene 1 (*)
PM2.5, concentrazione media annua in µg/m ³	5.9	0	0.0094	0	25 (*)
PM10, concentrazione media annua in µg/m ³	8.5	0	0.0100	0	40 (*)

(*) Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155, "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale n. 216 del 15 settembre 2010 - Serie generale



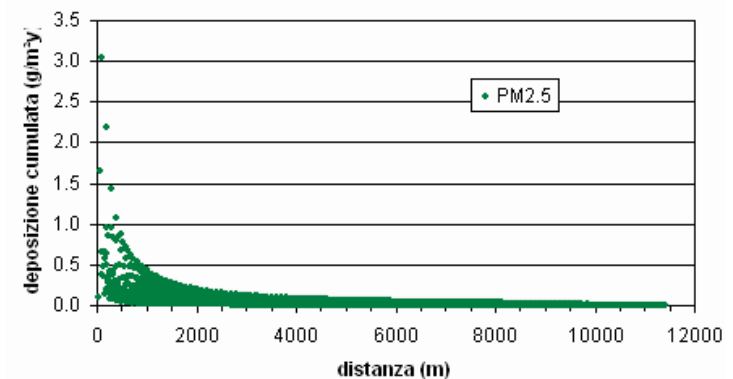
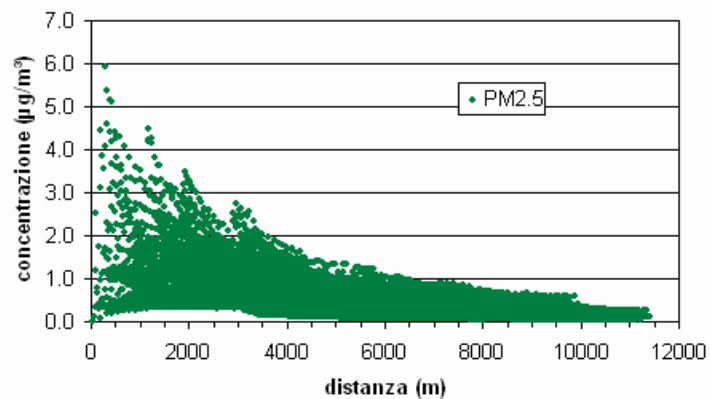
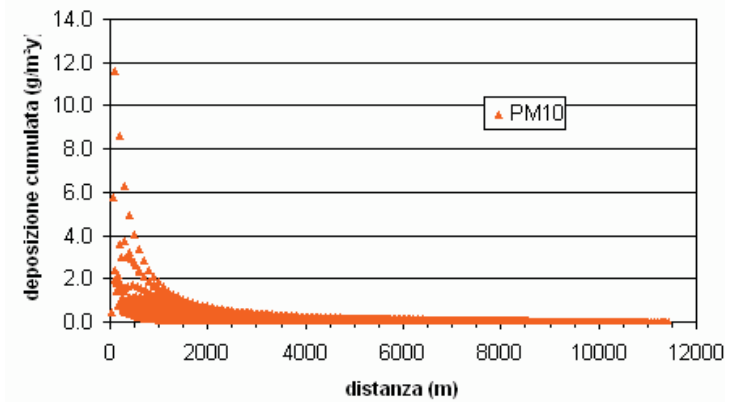
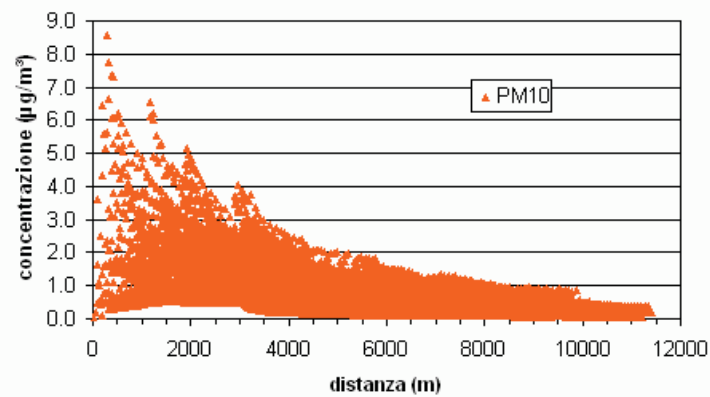
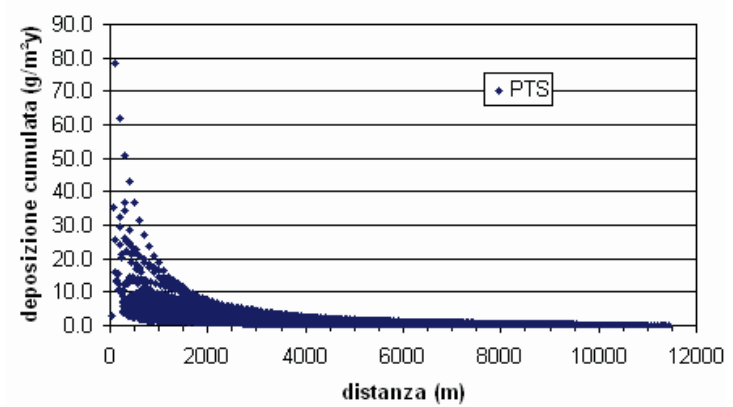
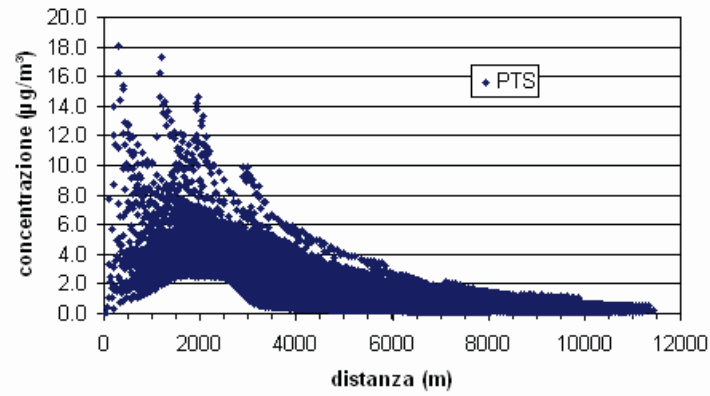
PCDD+PCDF: vecchio impianto

Deposizioni medie giornaliere (pg TE/m²d)





Gradienti (vecchio impianto)





Osservazioni

- **La distribuzione geografica degli inquinanti è analoga per i due impianti;** i valori massimi di concentrazione in aria ambiente e deposizione al suolo ricadono entro i primi 600 m di distanza dall'impianto; le aree soggette a maggiori impatti risultano sostanzialmente analoghe per il vecchio impianto e per quello nuovo.
- **I valori più elevati di deposizione (secca + umida) al suolo dei vari inquinanti si presentano nelle vicinanze dell'impianto;** con l'allontanarsi si riducono notevolmente.
- **Valori elevati di concentrazione in aria ambiente si estendono a distanze maggiori dall'impianto** (soprattutto a causa dell'impatto sulle colline).
- **I gradienti spaziali della concentrazione in aria ambiente sono significativamente diversi da quelli della deposizione al suolo.**
- **I valori ottenuti sono da considerarsi cautelativi** in quanto le scelte operate (modello impiegato, impostazioni, meteo ecc.) tendono a sovrastimare le ricadute.
- **Le aree di maggiore impatto previste nelle simulazioni coincidono sostanzialmente per i vari inquinanti:** di conseguenza su queste aree il carico prodotto dall'impianto nel corso della sua attività diviene complessivamente più rilevante.



Spunti per la discussione

- Lo studio di dispersione effettuato per il TEV di Falascaia costituisce per ARPAT un “**prototipo**” emblematico: per il tipo di impianti oggetto di esame, per la metodologia applicata per le simulazioni, per i risultati ottenuti in termini ambientali:
 - > anche in altri casi è stato realizzato un **impianto di recente concezione, dotato di avanzati sistemi di abbattimento delle emissioni**, nello stesso sito di un **preesistente impianto privo di sistemi di abbattimento**;
 - > la metodologia, pur con le incertezze intrinseche di cui sono affette le stime, è “**robusta**” e **sperimentata**, nonché utilizzabile anche per **analisi di rischio**;
 - > gli impatti ambientali attribuibili al vecchio impianto sono **nettamente superiori (da 2 a 3 ordini di grandezza)** a quelli attribuibili al nuovo.
- Si possono impiegare anche **modelli di dispersione più sofisticati**, che tuttavia richiedono un maggiore quantità di dati (specie meteorologici) senza con ciò ottenere necessariamente incertezze più contenute. **Le incertezze di cui sono affette le stime ambientali sono inferiori a quelle che possono affliggere le conseguenti valutazioni epidemiologiche** a causa di: mancanza di una storia residenziale adeguata degli esposti e sommaria disponibilità o assenza di informazioni sui molteplici “fattori confondenti” (fumo, abitudini alimentari, esposizioni indoor domestiche e professionali).