

Guida alla scelta dei modelli matematici per la valutazione della dispersione di inquinanti in atmosfera

Ing. Gianluca Antonacci

presentazione disponibile
in formato HTML all'indirizzo <http://www.ing.unitn.it/~antonacc/modelli/>
in formato PDF all'indirizzo <http://www.cisma.bz.it/downloads/docs/>

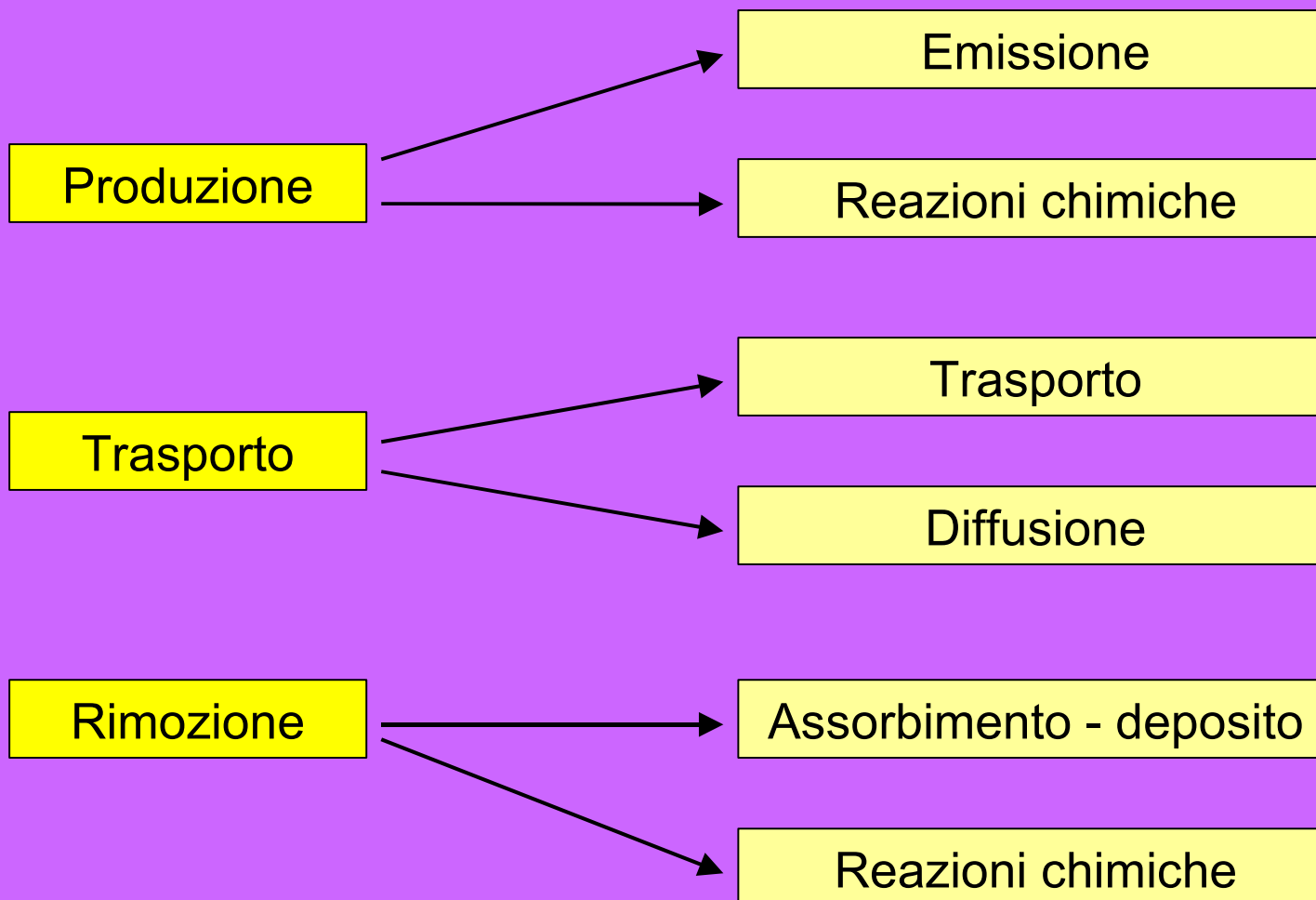
Riferimenti normativi

- **Norma UNI 10745**: Studi di impatto ambientale - Terminologia
- **Norma UNI 10796**: Valutazione della dispersione in atmosfera di reflui aeriformi - Guida ai criteri di selezione dei modelli matematici
- **Norma UNI 10964**: Guida alla selezione dei modelli matematici per la previsione di impatto sulla qualità dell'aria
- **Norma UNI 10742**: Impatto ambientale - Finalità e requisiti di uno studio di impatto ambientale
- **DM 20/05/1991**: Criteri per la raccolta dei dati inerenti la qualità dell'aria

Introduzione

- È opportuno che il lavoro di tipo **modellistico** possa appoggiarsi su informazioni derivanti da **conoscenze pregresse** sul problema specifico, nonché sui risultati di eventuali **misure sperimentali**, al fine di aumentare la certezza del risultato
- Nel caso di studi a carattere spiccatamente **applicativo** è opportuno utilizzare **modelli già consolidati** e possibilmente già applicati in contesti analoghi; se si tratta al contrario di attività di ricerca è assolutamente necessaria la fase di validazione del modello tramite il confronto con misure di concentrazione in campo

Ruolo dei processi chimico-fisici



Equazione della diffusione - convezione formulazione dal punto di vista matematico

The diagram illustrates the convection-diffusion equation with mathematical annotations. A red dashed oval encircles the convection terms $u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z}$, with a red arrow labeled "Convezione" pointing to the right. A blue dashed oval encircles the diffusion terms $\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right)$, with a blue arrow labeled "Diffusione" pointing downwards. A green dashed circle encircles the source term S , with a green arrow labeled "Sorgente" pointing upwards.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S$$

Modelli matematici: input/output

Dati di ingresso

Territorio:

- DTM
- uso del suolo

Meteorologia:

- vento
- temperatura
- pressione
- umidità
- radiazione solare

Emissioni

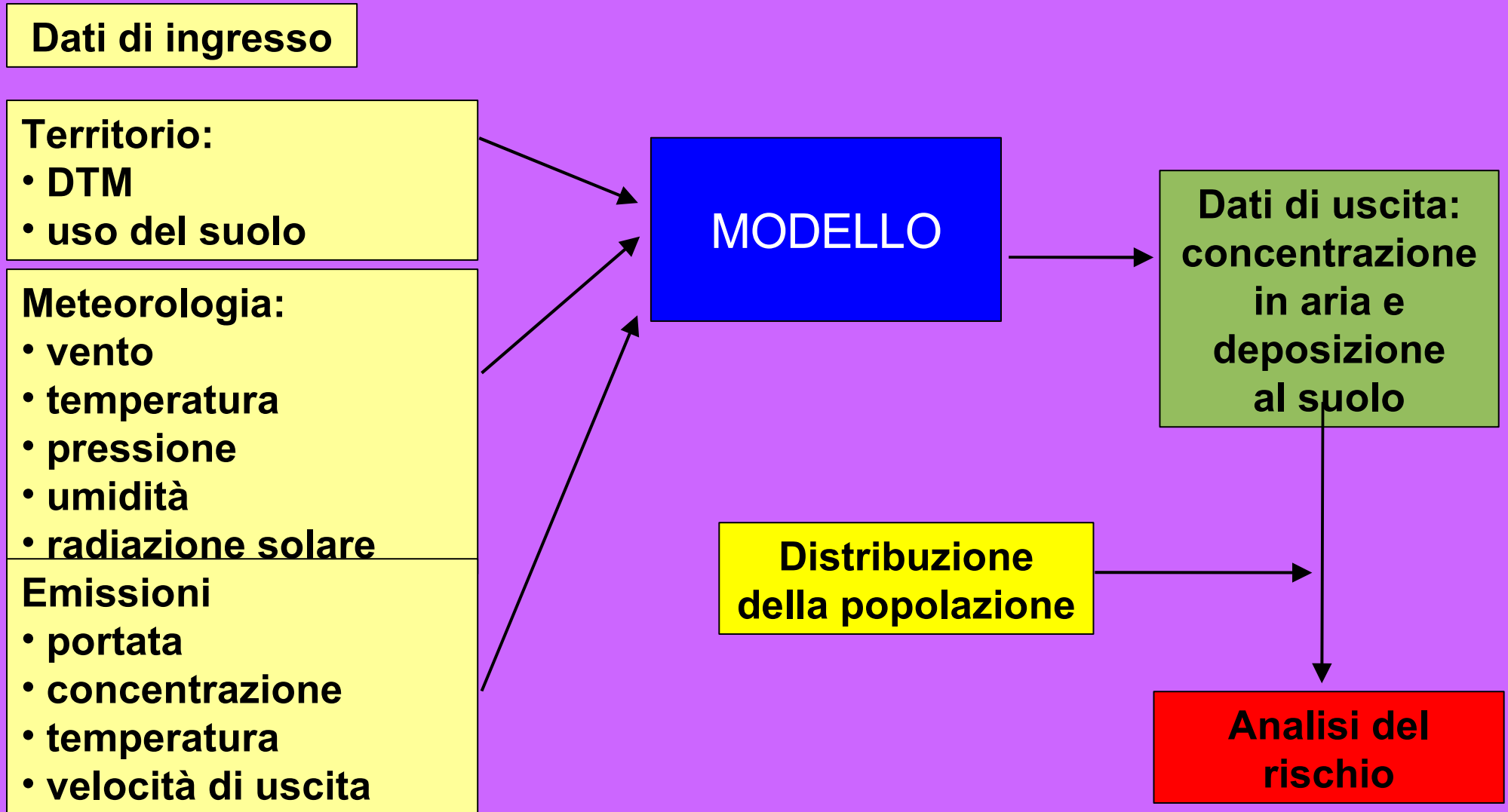
- portata
- concentrazione
- temperatura
- velocità di uscita

MODELLO

Dati di uscita:
concentrazione
in aria e
deposizione
al suolo

Distribuzione
della popolazione

Analisi del
rischio



Dati di ingresso relativi al territorio

- **Orografia**: matrice delle quote altimetriche necessaria in modelli che tengono conto della tridimensionalità del campo di moto; la risoluzione spaziale varia molto a seconda della scala a cui il modello lavora: da 50 m per la microscala (locale) a 50 km per la grande scala
- **Mapa di uso del suolo**: utilizzata nei modelli che tengono conto della diffusione e della deposizione/adsorbimento dell'inquinante in corrispondenza del terreno
- **Cartografia**: base su cui si riportano i dati al fine di evidenziarne la distribuzione spaziale; questo procedimento può essere automatizzato tramite l'utilizzo di sistemi GIS

Dati di ingresso relativi alla meteorologia

- **Velocità e direzione del vento** al suolo ed in quota nel caso di modelli che ricostruiscono il campo di vento tridimensionale tramite preprocessori meteorologici
- **Temperatura, umidità, pressione, radiazione solare al suolo**, servono per determinare il parametro di stabilità atmosferica in maniera indiretta quando non esistano misure più sofisticate di turbolenza atmosferica
- **Gradiente termico verticale** per la determinazione della quota di inversione termica
- **Carte meteorologiche** a scala sinottica: servono nei modelli a grande scala come condizioni al contorno

Dati di ingresso relativi alle emissioni

- **Localizzazione** della/e sorgente/i
- **Caratteristiche geometriche**: altezza e diametro in caso di sorgenti puntuali, lunghezza in caso di sorgenti lineari, area e forma in caso di sorgenti areali estese;
- **Temperatura e velocità di rilascio** del/degli inquinante/i
- **Portata e natura chimica** dell'inquinante immesso in atmosfera: peso molecolare e stato chimico al momento del rilascio (gas, solido o vapore)
- **Velocità di decadimento** o produzione per gli inquinanti secondari
- **Distribuzione granulometrica** del particolato solido

Inquinanti primari e secondari

Nella normativa vigente è riportato il **concetto di qualità** dell'aria e di rischio per la salute delle persone.

In quest'ottica va considerata anche la distinzione tra **inquinanti primari** e **inquinanti secondari**: i primi sono quelli emessi dalle sorgenti, quelli secondari sono generati in un momento successivo dalle reazioni chimiche tra inquinanti primari, e possono dare problemi altrettanto rilevanti

Poiché *il grado di pericolosità delle sostanze varia non solo in base alla concentrazione in aria* (al livello del suolo), ma anche in base alla quantità di inquinante depositata a terra, *è necessario in alcune applicazioni valutare anche l'accumulo in funzione del tempo*

Tipi di inquinanti considerati

Gli inquinanti considerati nei modelli di dispersione sono:

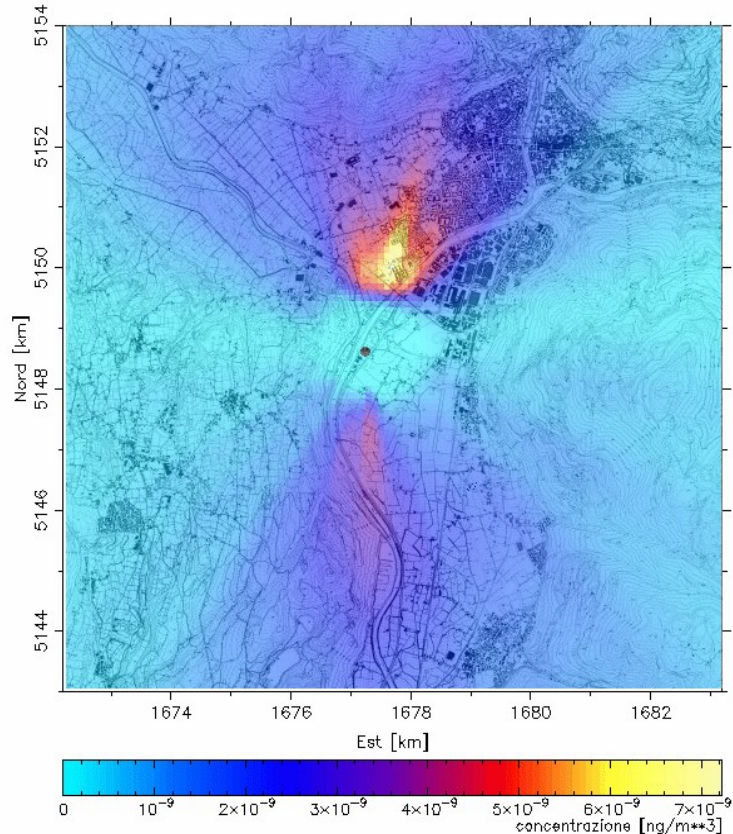
- Ossidi di carbonio (CO e CO₂)
- Ossidi di azoto (NO_x)
- Idrocarburi (HC)
- Ozono (O₃)
- Ossidi di zolfo (SO_x)
- Acido cloridrico (HCl)
- Acido fluoridrico (HF)
- Mercurio (Hg)
- Piombo (Pb)
- Cadmio (Cd)
- Metalli pesanti (totale)
- Particolato solido (PTS e PM10)
- Diossine e furani (PCDD/F)

(* utilizzati nel calcolo del rischio cancerogeno)

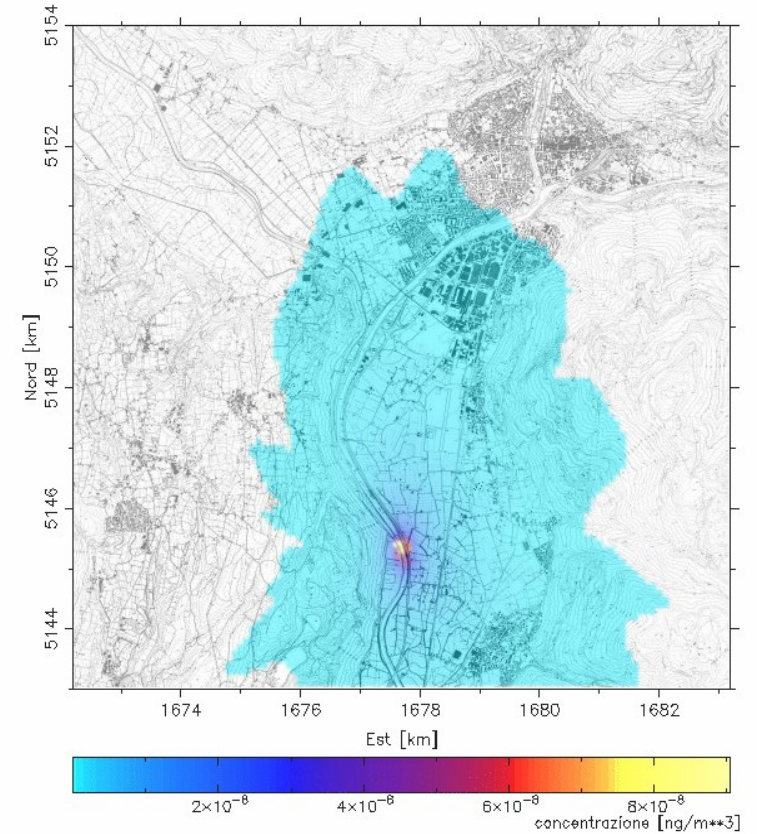
Dati di uscita dai modelli di dispersione (1/3)

- **Mappe di concentrazione** medie annue di inquinanti provenienti da sorgenti differenti

Mappa di
concentrazione
al suolo
Inquinante: PCDD
Cmin = 0.00E+00
Cmax = 0.72E-08

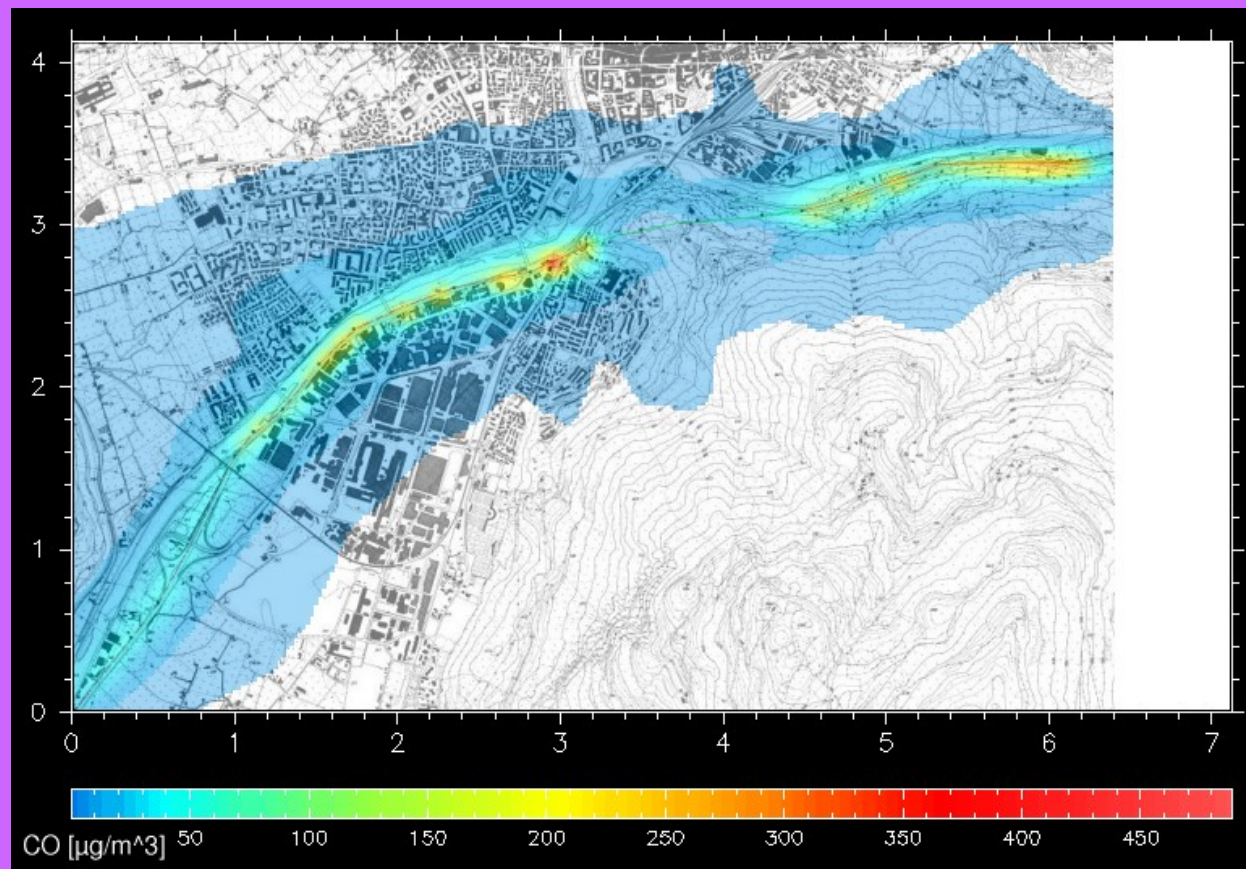


Mappa di
concentrazione
al suolo
Inquinante: PCDD/F
Cmin = 0.32E-10
Cmax = 0.91E-07



Dati di uscita dai modelli di dispersione (2/3)

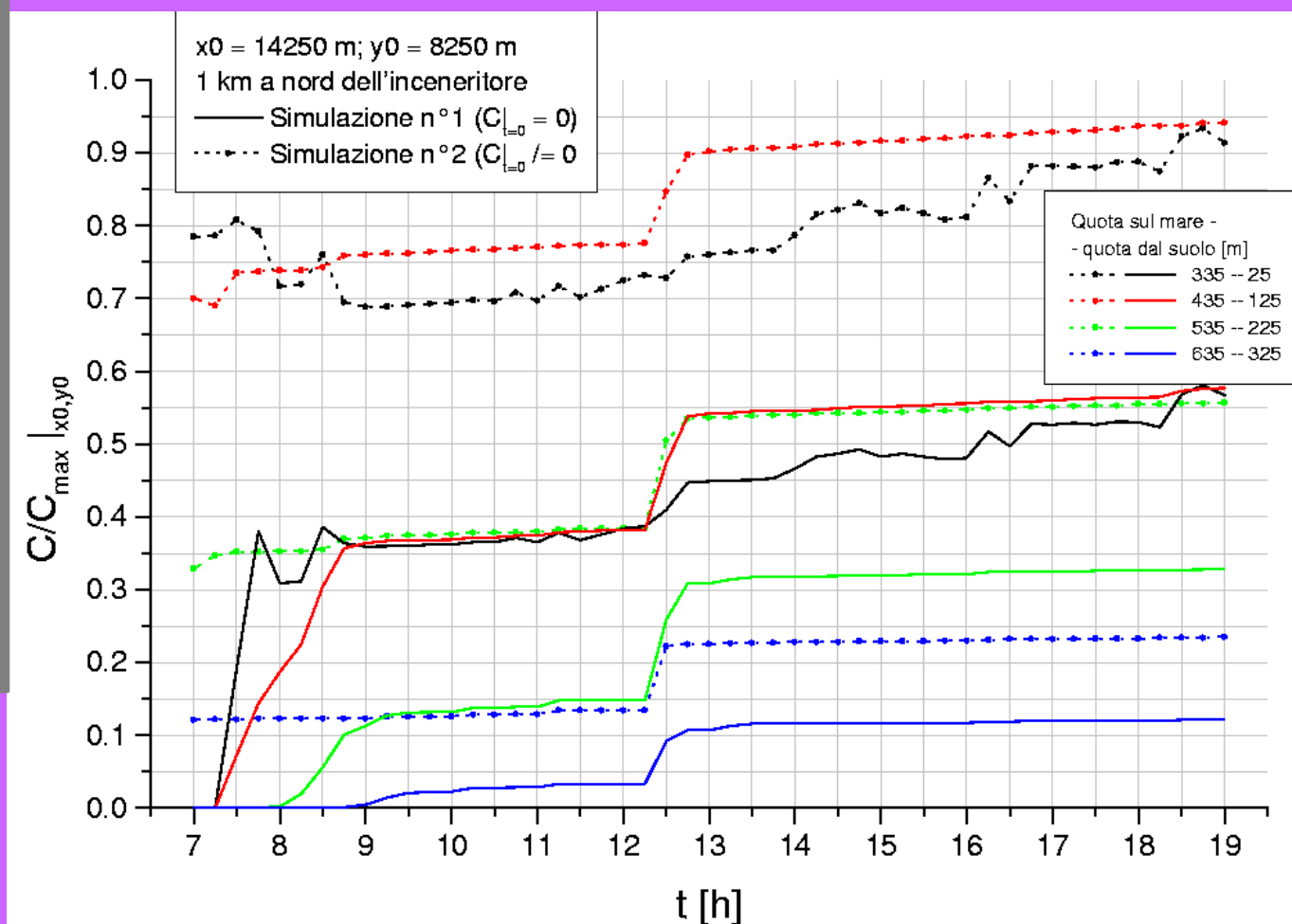
- Mappe di concentrazione al suolo e deposizione con media oraria, giornaliera, stagionale o annuale a seconda del tipo di modello e dello scopo:
 - medie su breve periodo per modelli previsionali
 - medie su lungo periodo per l'analisi del rischio per la salute



Dati di uscita dai modelli di dispersione (3/3)

- Grafici dell'**evoluzione temporale** della concentrazione nel caso di modelli a breve termine (più importante nelle zone di massima concentrazione)

- Grafici di **confronto con le soglie di concentrazione** della normativa vigente (dati relativi alla media temporale utilizzata nel modello)



Misure meteorologiche necessarie per i modelli

Misure base (secondo le raccomandazione WMO - World Meteorological Organization):

- temperatura dell'aria
- componente orizzontale del vento
- umidità relativa
- precipitazione
- radiazione solare
- pressione atmosferica

Misure avanzate:

- profilo di velocità del vento (3 componenti)
- flusso di calore al suolo
- turbolenza atmosferica

Preprocessamento dei dati meteorologici

I modelli di dispersione necessitano di parametri che non sempre è agevole misurare in quanto richiedono strumentazione sofisticata:

- innalzamento del pennacchio
- altezza dello strato di mescolamento
- lunghezza di Monin - Obukhov
- gradiente termico verticale
- radiazione incidente
- copertura nuvolosa
- energia cinetica turbolenta
- flusso di calore sensibile
- velocità di attrito

Nel caso in cui non siano disponibili le misure è necessario **ricavare** queste misure attraverso opportune **parametrizzazioni** (*non tutte sono necessarie in tutti i modelli*)

Criteri di selezione per la scelta del modello

La selezione del modello ottimale va fatto in base a:

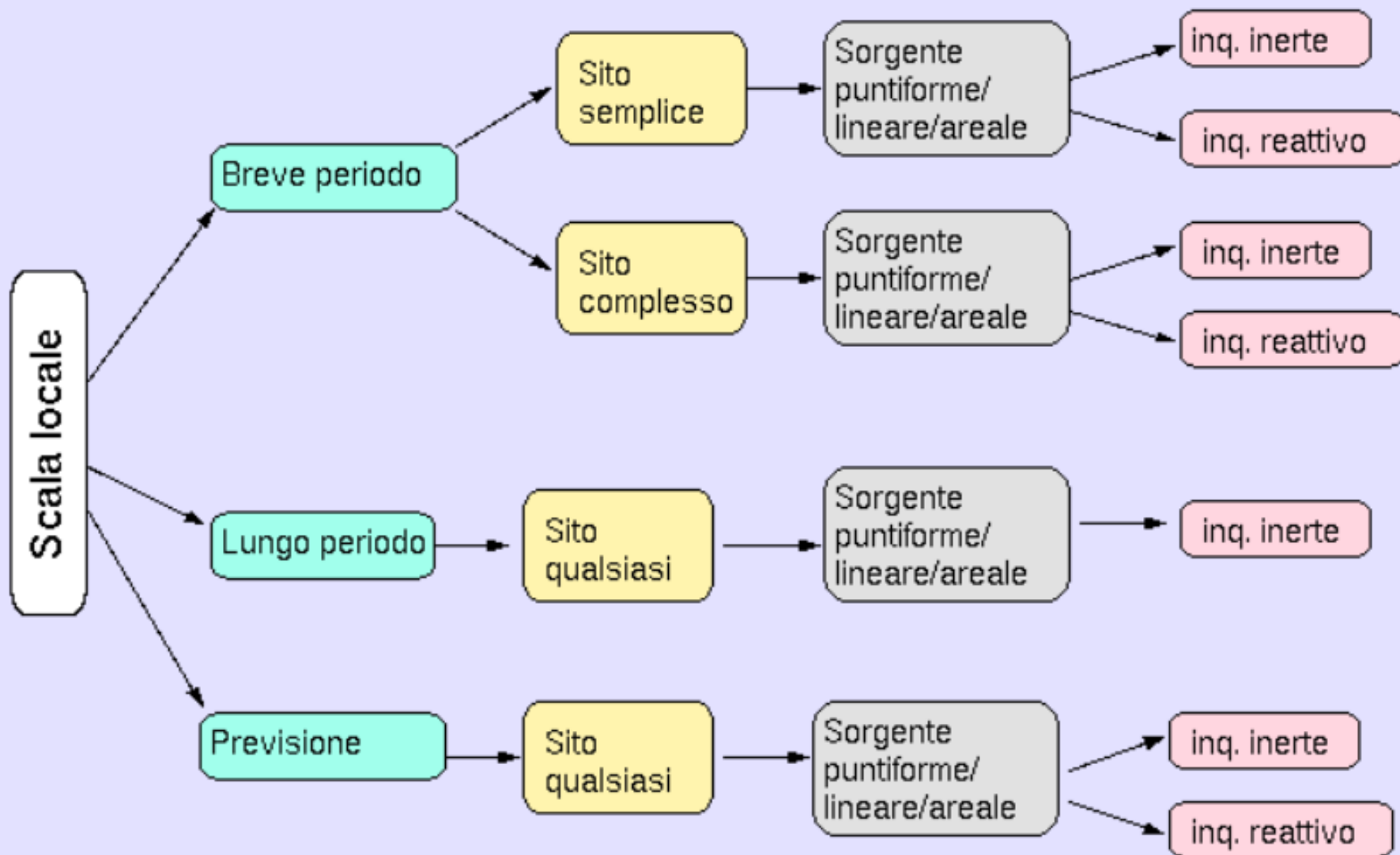
1) **scopo dello studio**

- a) **prognosi a breve termine** per situazioni di emergenza
- b) **studio a lungo termine** per la determinazione del rischio per la salute umana e la ricaduta sull'ambiente

2) **caratteristiche dello studio**

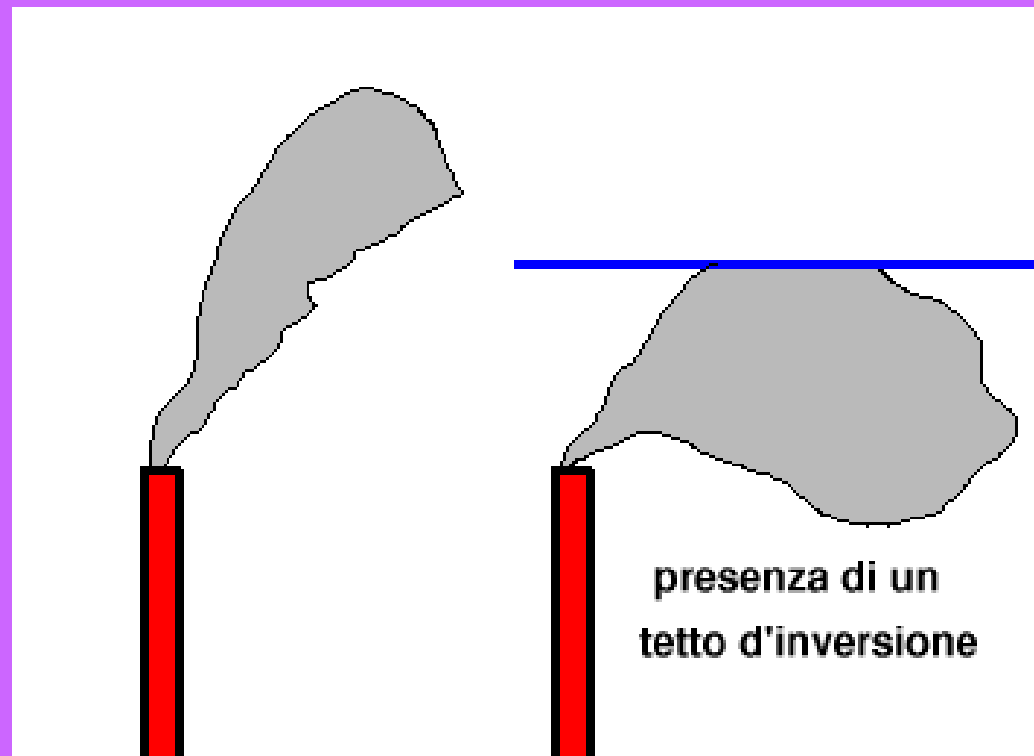
- a) **scala spaziale**: micro-scala, scala locale, scala regionale, grande scala
- b) **scala temporale**: breve periodo (ore > giorni), lungo periodo (mesi > anni), previsione
- c) **ambito territoriale**: terreno piano uniforme, terreno con orografia complessa
- d) **tipologia di sorgente**: puntuale, lineare, areale
- e) **tipologia di inquinante**: inerte, attivo (dà luogo ad inquinanti secondari)

Scelta del modello



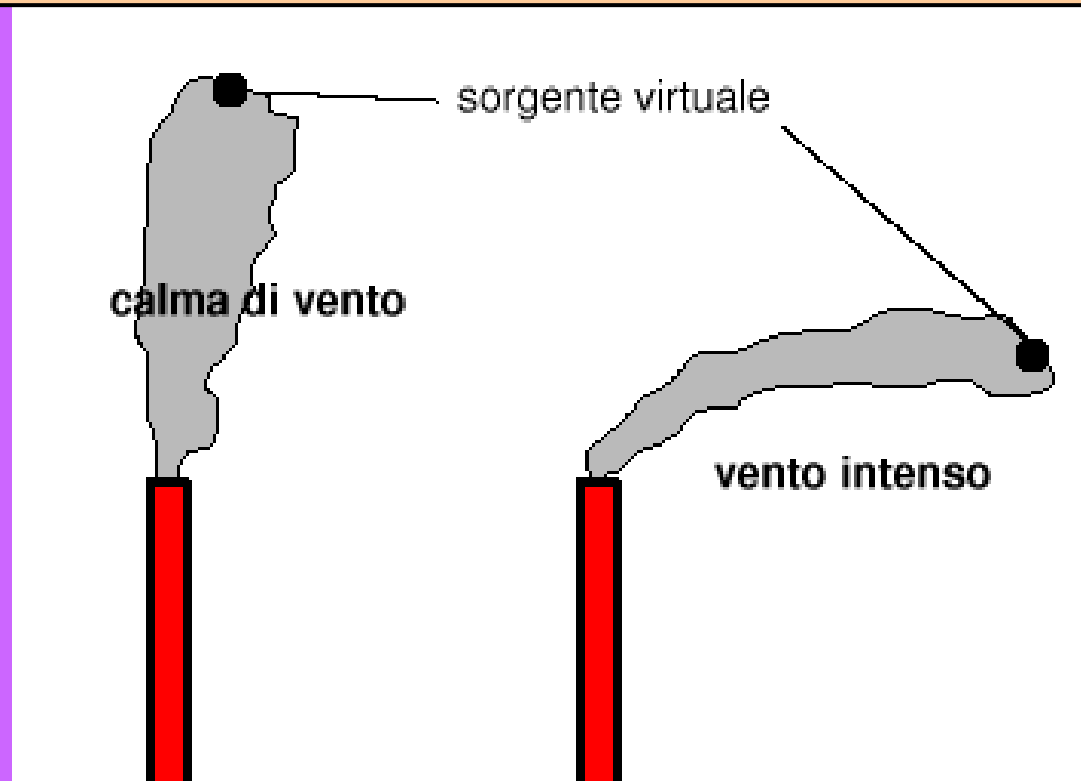
Parametrizzazioni delle grandezze atmosferiche (1/2)

- **Stabilità atmosferica:** indica il grado di turbolenza della massa d'aria
instabile \Rightarrow turbolenza sviluppata, atmosfera ben miscelata
stabile \Rightarrow massa d'aria stratificata, moti verticali molto limitati
- **Quota di inversione termica:** quota a cui si verifica un'inversione di segno del gradiente termico verticale



Parametrizzazioni delle grandezze atmosferiche (2/2)

- **Risalita del pennacchio**: si verifica nel caso di fumi caldi per effetto della spinta di galleggiamento dovuta alla differenza di densità fra effluente e ambiente; L'effettiva sorgente è a quota maggiore di quella di emissione (**sorgente virtuale**)
- **Scabrezza**: parametro che influenza il profilo di velocità del vento al di sopra del suolo

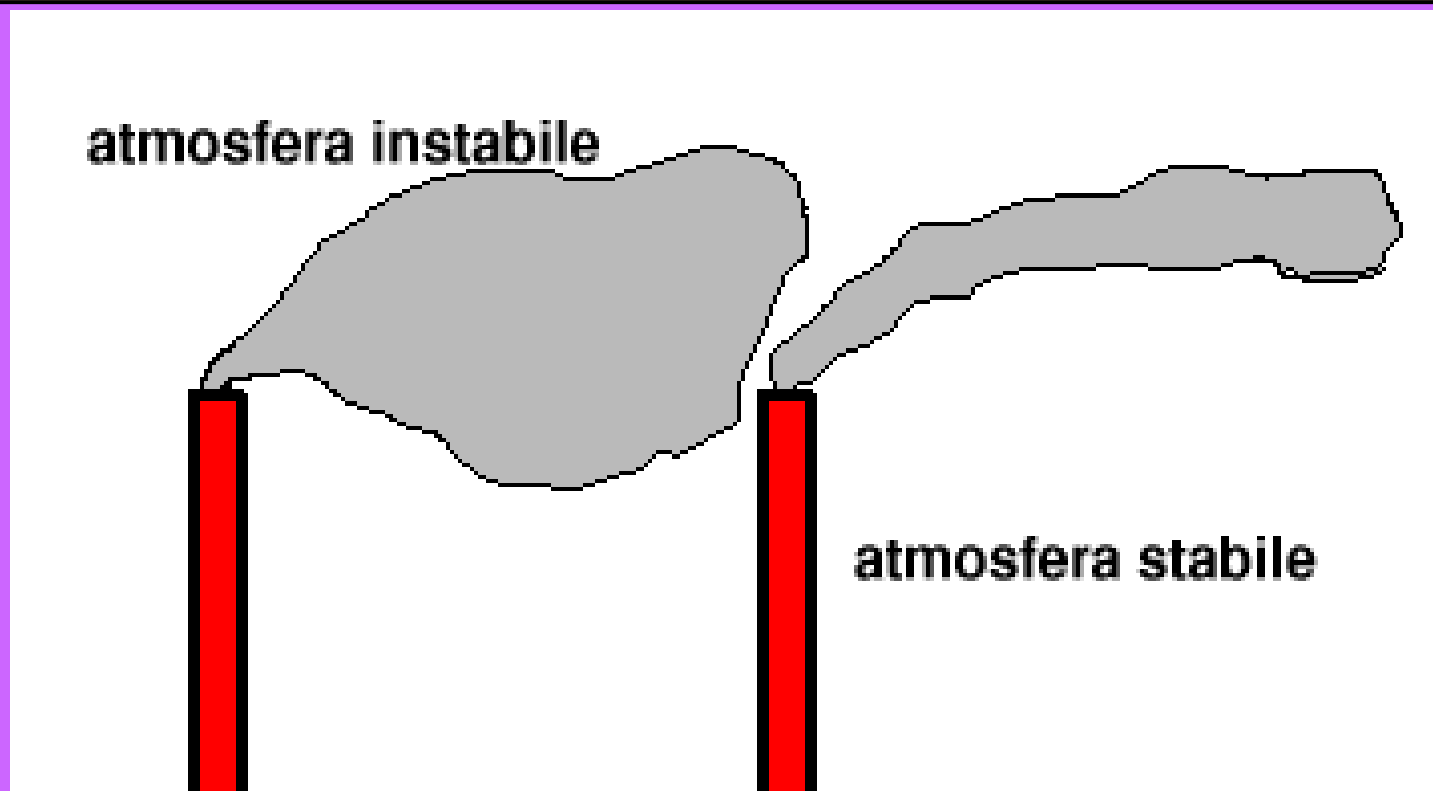


Dipendenza dei risultati dai parametri (1/5)

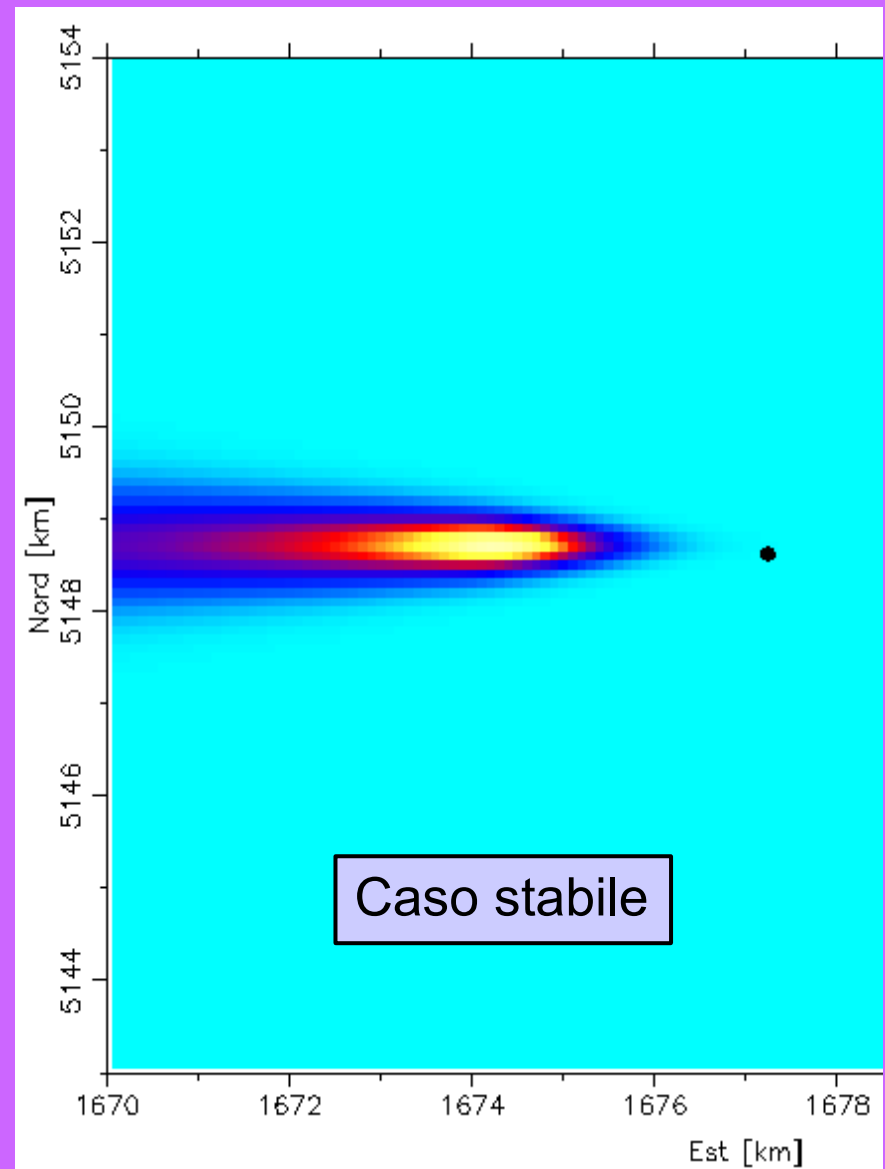
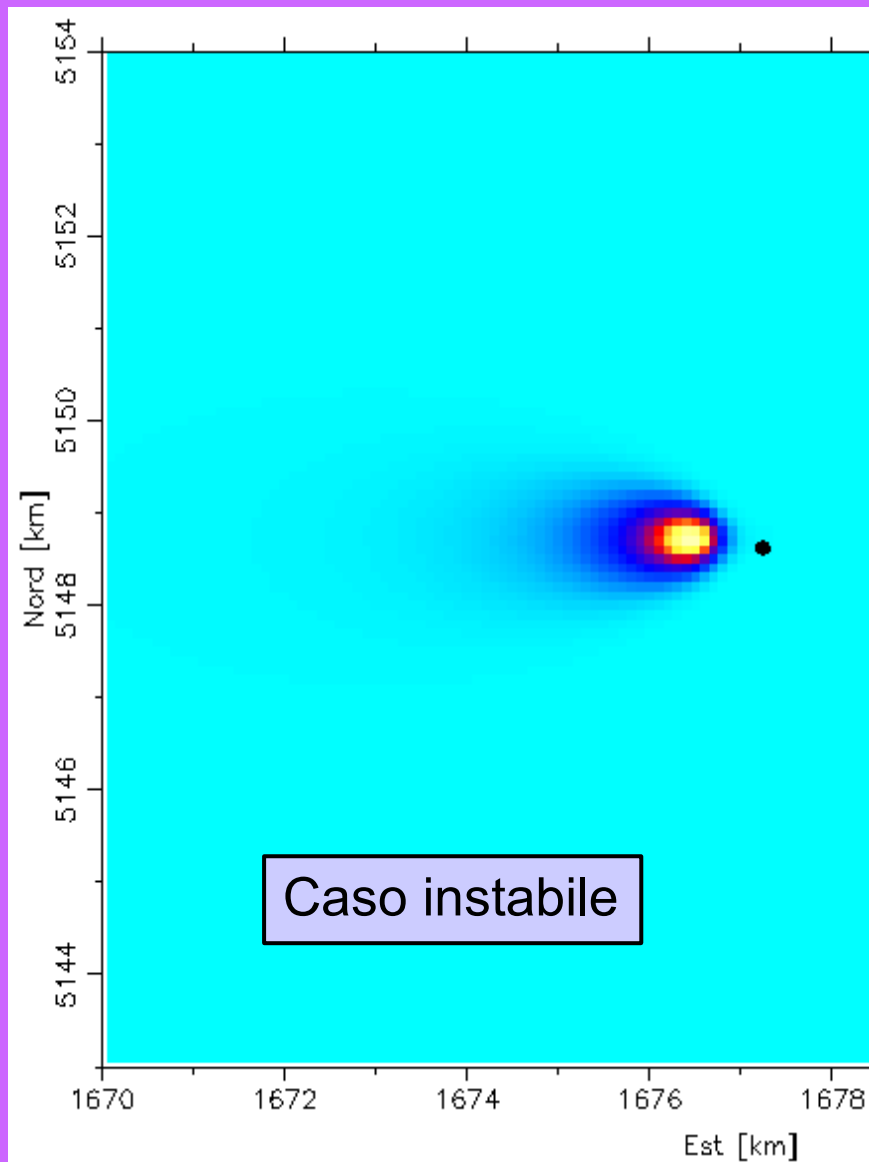
- L'**aumento della temperatura dei fumi** implica un incremento delle azioni di galleggiamento e quindi una maggiore risalita del pennacchio:
 - la sorgente virtuale risulta localizzata più in alto
 - i valori massimi di concentrazione al suolo diminuiscono
 - la zona di influenza risulta più estesa e più lontana dal punto sorgente
- **Elevata velocità del vento** implica
 - trasporto dell'inquinante a distanze maggiori \Rightarrow concentrazioni minori al suolo
 - abbassamento dell'asse del pennacchio \Rightarrow aumento della massima concentrazione al suolo

Dipendenza dei risultati dai parametri (2/5)

- Un **incremento dell'instabilità atmosferica** (elevata turbolenza) disperde il contaminante su un'area più vasta a parità di tempo; nel caso di sorgente in quota:
 - il massimo di concentrazione si localizza più vicino alla sorgente;
 - I valori di concentrazione al suolo sono più bassi

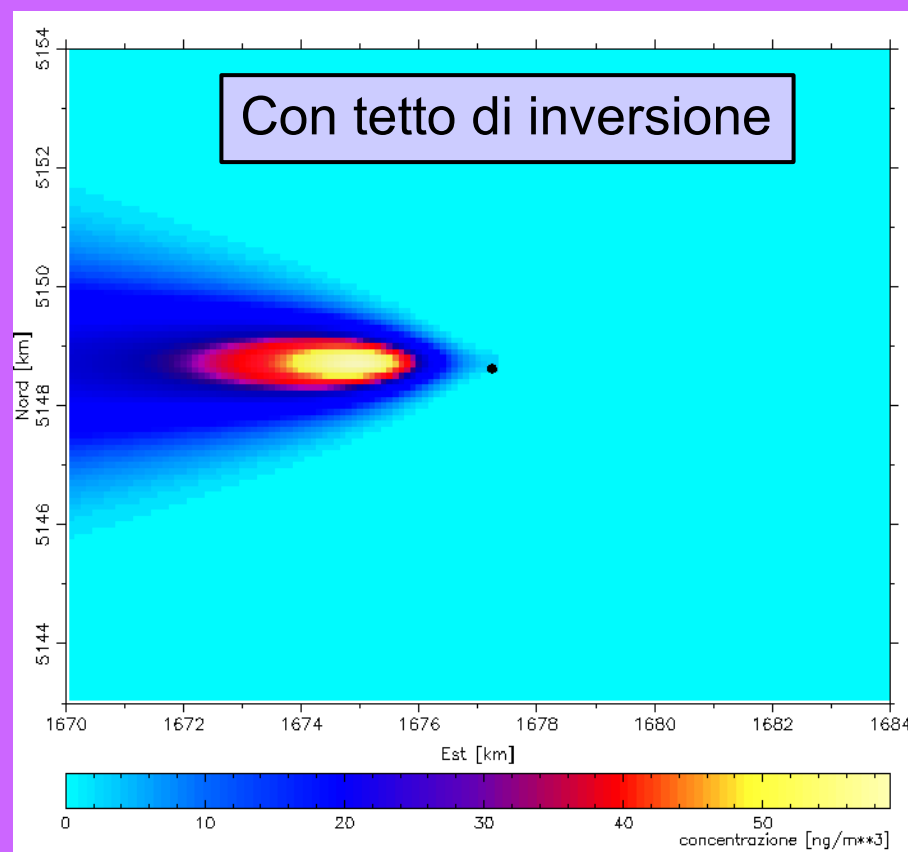
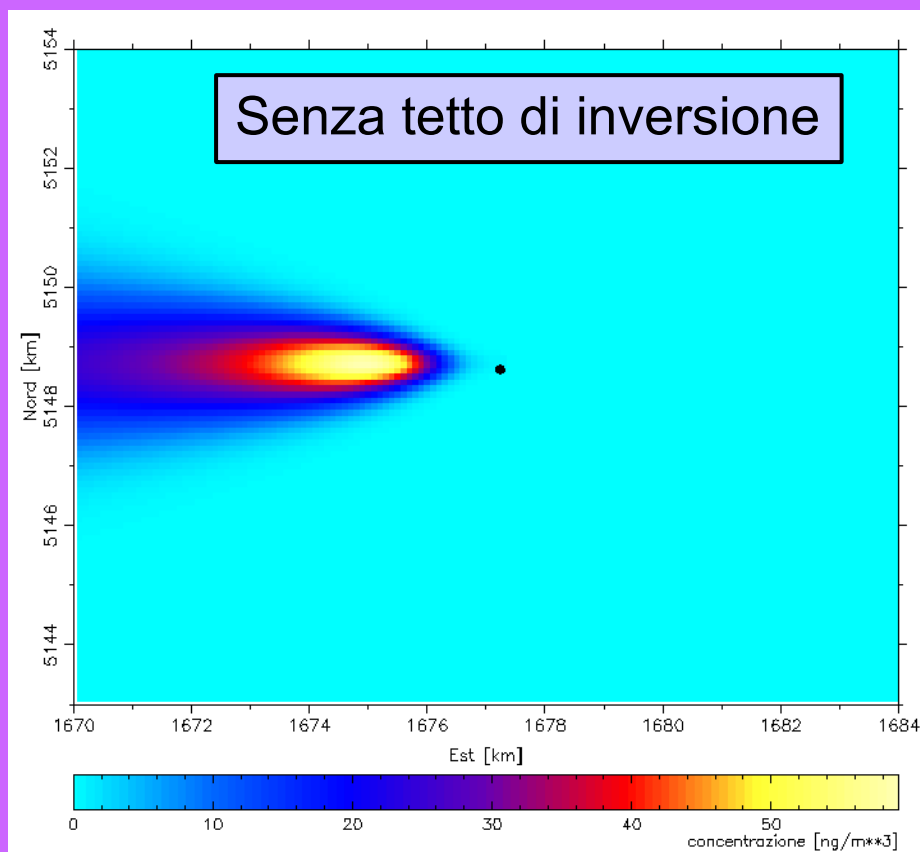


Dipendenza dei risultati dai parametri (3/5)



Dipendenza dei risultati dai parametri (4/5)

- La presenza di **inversione termica** fa da "tetto" al processo di dispersione verso l'alto; uno strato di inversione basso mantiene il contaminante confinato vicino al suolo. Questo parametro risulta importante nel caso di sorgenti in quota (fumi caldi da ciminiere), poco importante nel caso di sorgenti al suolo (assi stradali, discariche)

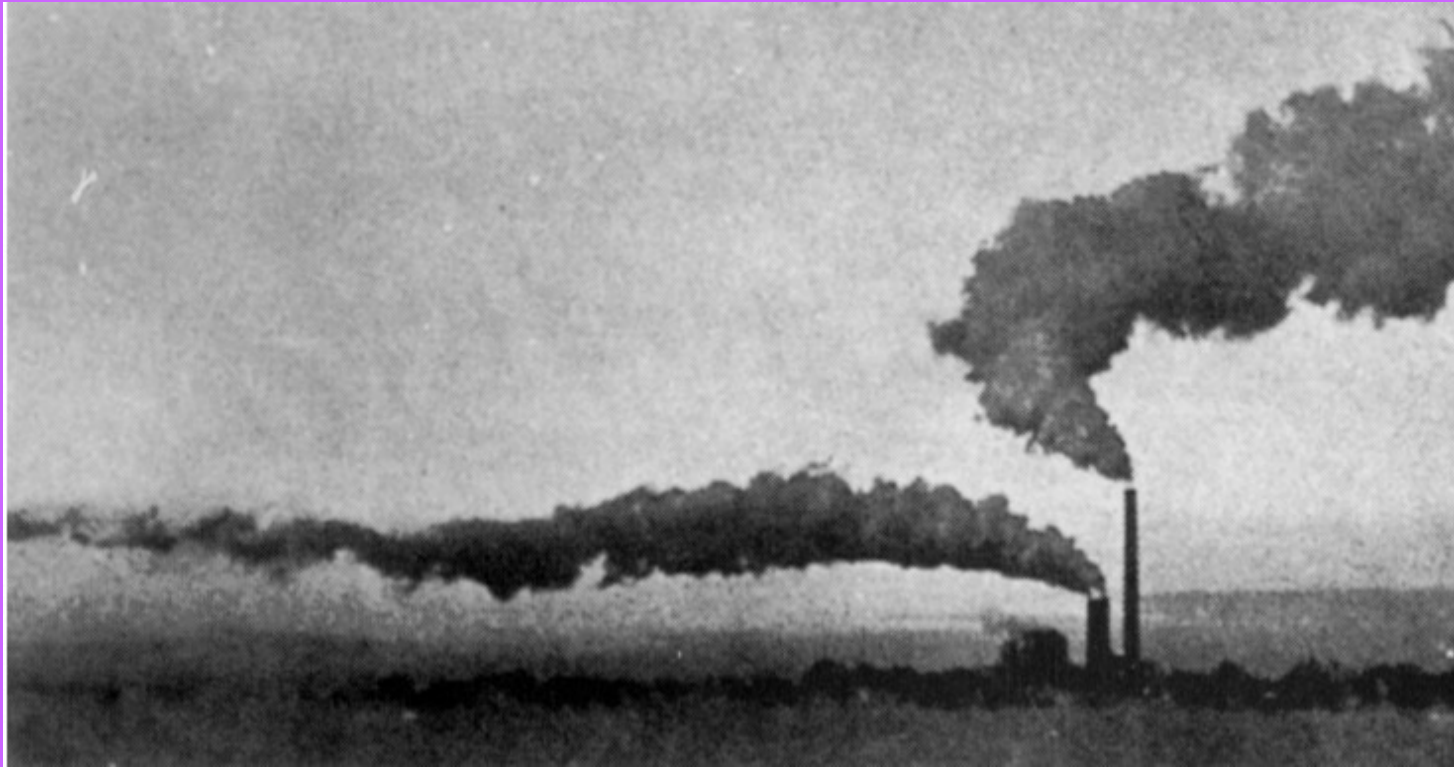


Dipendenza dei risultati dai parametri (5/5)

- La **tipologia della sorgente** influenza il risultato al suolo:
 - es. sorgenti lineari (assi stradali) hanno un'influenza limitata spazialmente, e sono meno influenzate dalle condizioni meteorologiche complessive rispetto alle sorgenti calde puntuali

Ai fini del risultato in termini di concentrazione è significativa la combinazione di tutti i parametri

Influenza delle condizioni locali



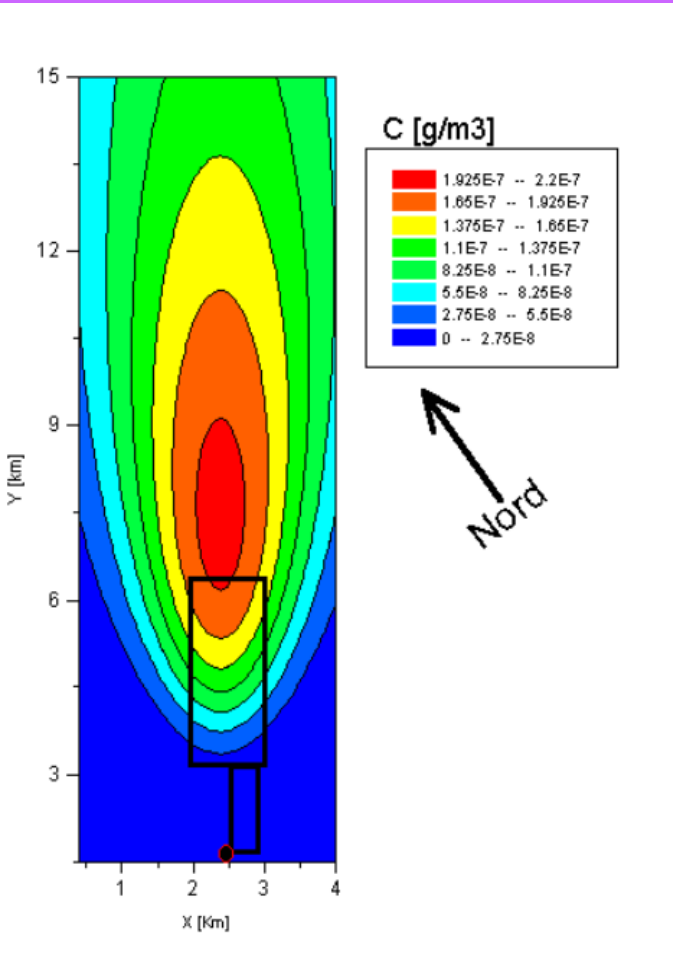
Importanza delle condizioni locali sui fenomeni di dispersione (foto tratta da Simpson, 1984)

Specialmente nelle simulazioni a **scala temporale e spaziale piccola**, le **condizioni locali** possono avere un'**influenza** sostanziale sul destino degli inquinanti (per es. variazione del campo di moto e/o del gradiente termico con la verticale, oppure presenza di un'inversione al suolo)

Modelli gaussiani

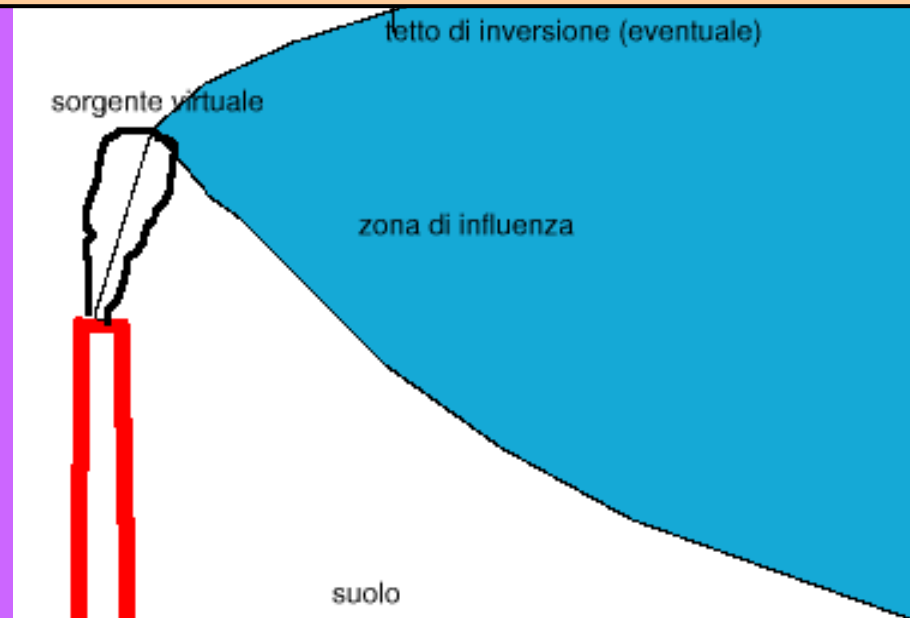
- I modelli gaussiani, a coefficienti variabili o costanti, sono modelli stazionari analitici, di semplice applicazione
- L'approssimazione di un processo evolutivo nel tempo può essere fatta solo tramite una successione di stati stazionari
- Questo tipo di modello è adatto ad un sito pianeggiante; tuttavia può essere adattato con opportune modifiche ad orografia complessa, tenendo conto che l'approssimazione determina un minore grado di accuratezza
- L'allargamento della nuvola di contaminante è funzione della stabilità atmosferica e della distanza sottovento
- Esempio di modelli gaussiani: VIM, ADMS, ISC3, CALINE

Schema di modello gaussiano



Esempio di modello gaussiano: il **vento** è, per ogni simulazione, **costante** in direzione e modulo; è tuttavia possibile introdurre l'informazione sul profilo di vento la verticale.

Il modello risulta di semplice implementazione ed è utile nel caso di casi relativamente semplici, nonché nei casi in cui è richiesto un calcolo delle concentrazioni in termini statistici (tramite sovrapposizione di numerose mappe dello stesso tipo calcolate in differenti condizioni)



Modelli euleriani

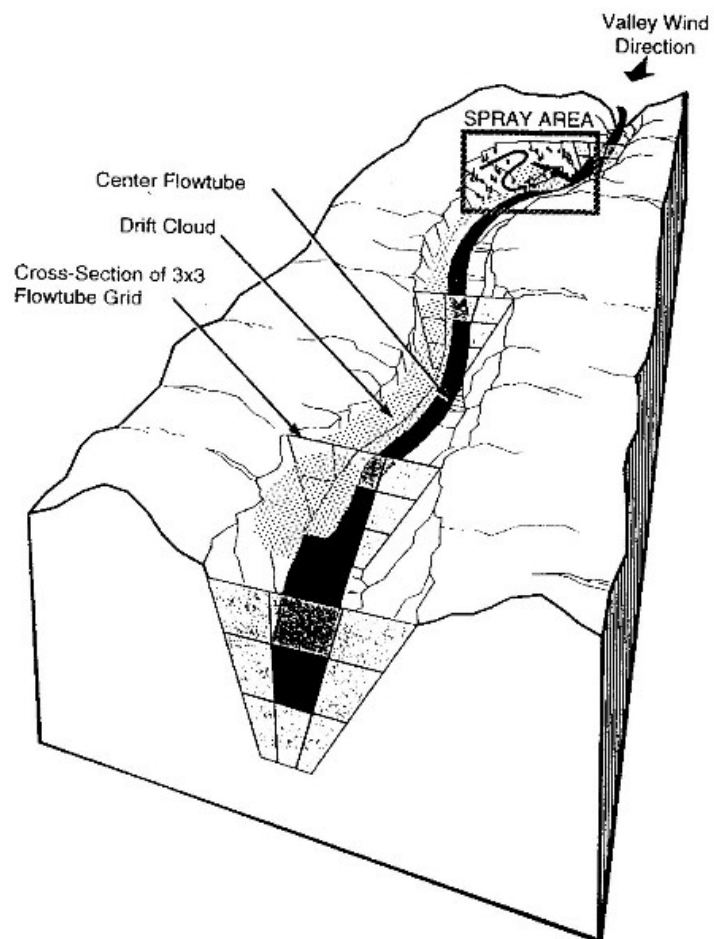
- Modelli tridimensionali non stazionari
- Richiedono generalmente elevate risorse di calcolo
- Richiedono un preprocessore meteorologico che calcola il campo di moto tridimensionale (e tutte le altre grandezze necessarie)
- Risolvono l'equazione della convezione e diffusione con schemi numerici alle differenze finite
- Il dominio deve essere schematizzato in celle la cui dimensione è funzione dell'estensione dell'area di studio e dell'accuratezza richiesta
- Permettono il trattamento di siti pianeggianti o complessi

Modelli eulero-lagrangiani

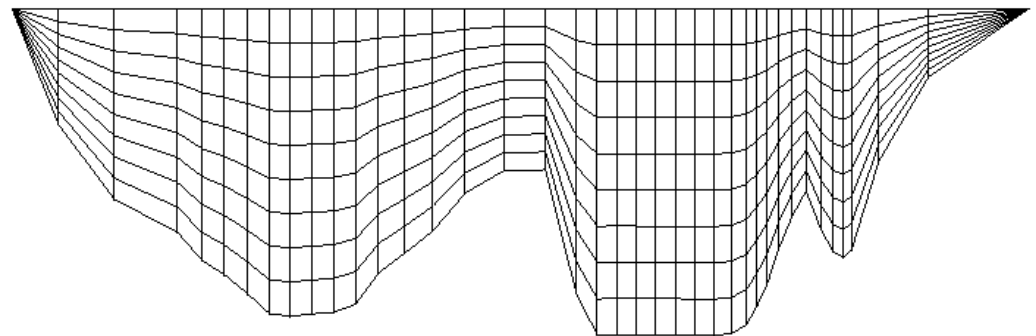
- Modelli tridimensionali non stazionari
- Determinano la traiettoria del baricentro del pennacchio lungo le linee di corrente
- L'estensione della nuvola attorno al baricentro viene calcolata attraverso formulazioni empiriche che sono funzione della stabilità atmosferica e della distanza percorsa dopo il rilascio dal punto di emissione
- Richiedono un preprocessore meteorologico che calcola il campo di moto tridimensionale (e tutte le altre grandezze necessarie)
- Il dominio deve essere schematizzato in celle la cui dimensione è funzione dell'estensione dell'area di studio e dell'accuratezza richiesta
- Permettono il trattamento di siti pianeggianti o complessi
- Esempi di modelli eulero-lagrangiani: CALPUFF

Schema di modello euleriano

Esempio di modello euleriano nel caso di venti di valle. Il dominio è suddiviso in celle la cui forma si adatta all'orografia complessa; questo modello è specifico per il caso di vento incanalato



Ogni situazione peculiare va studiata con il modello più adatto



Sezione n° 12 ($x = 5500$ m)
n° celle = $n_y \times n_z = 39 \times 9$
scala verticale = 4 x scala orizzontale

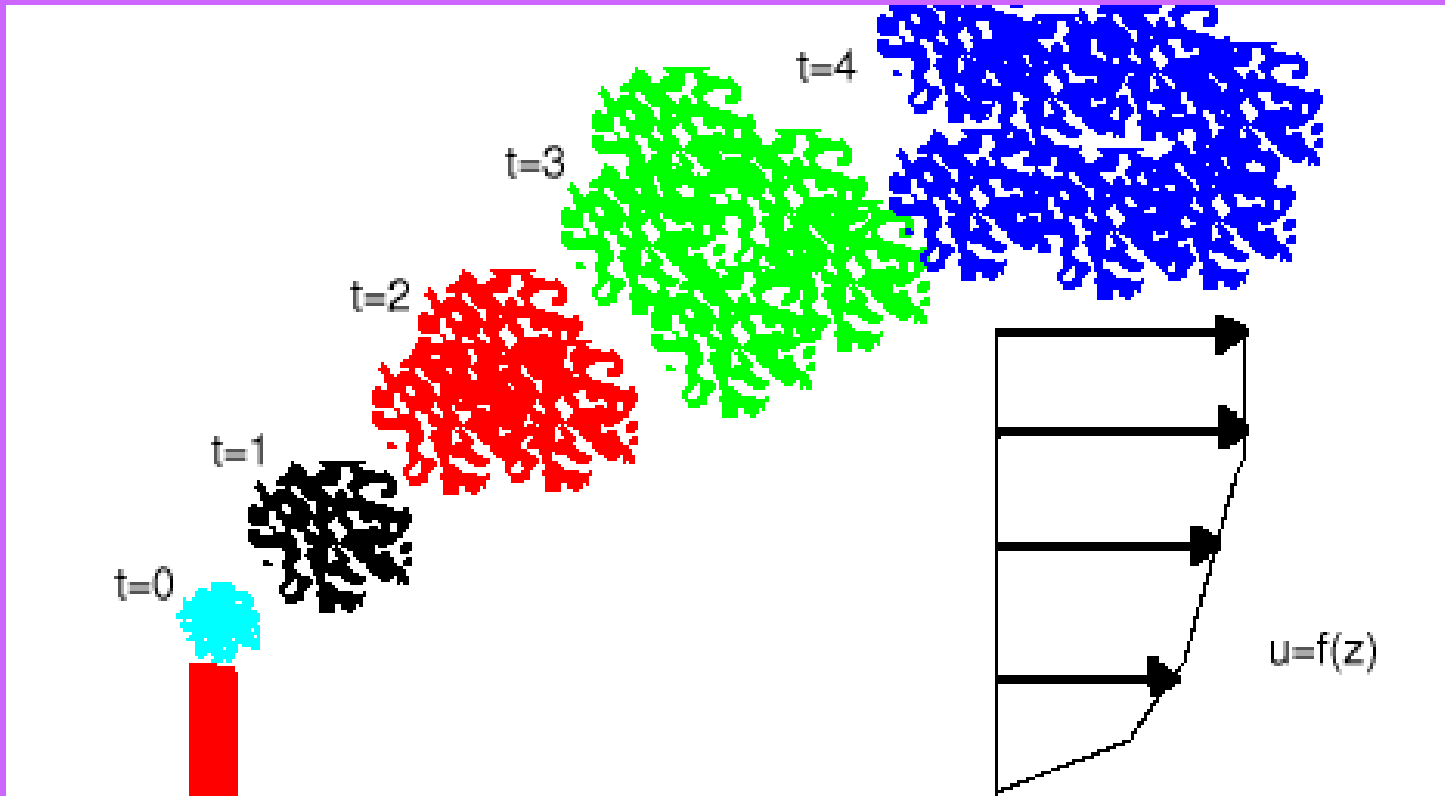
Modelli lagrangiani (1/2)

- Modelli tridimensionali non stazionari
- Richiedono elevate risorse di calcolo
- Richiedono un preprocessore meteorologico che calcola il campo di moto tridimensionale (e tutte le altre grandezze necessarie)
- La diffusione di inquinanti viene simulata tramite l'integrazione della traiettoria di un gran numero di particelle
- La concentrazione viene calcolata statisticamente attraverso il computo del numero delle stesse presenti all'interno di celle in cui il dominio di studio viene suddiviso

Modelli lagrangiani (2/2)

- I fenomeni di assorbimento o riflessione vengono simulati rispettivamente tramite l'arresto o la riflessione "geometrica" delle particelle in corrispondenza del suolo e delle pareti
- Le particelle possono essere assoggettate ad una velocità verticale verso il basso per simulare le polveri pesanti
- I coefficienti di diffusione sono simulati attraverso un algoritmo che genera funzioni statistiche legate alle classi di stabilità
- Permettono il trattamento di siti pianeggianti o complessi
- Esempi di modelli lagrangiani: SPRAY, FLEXTRA

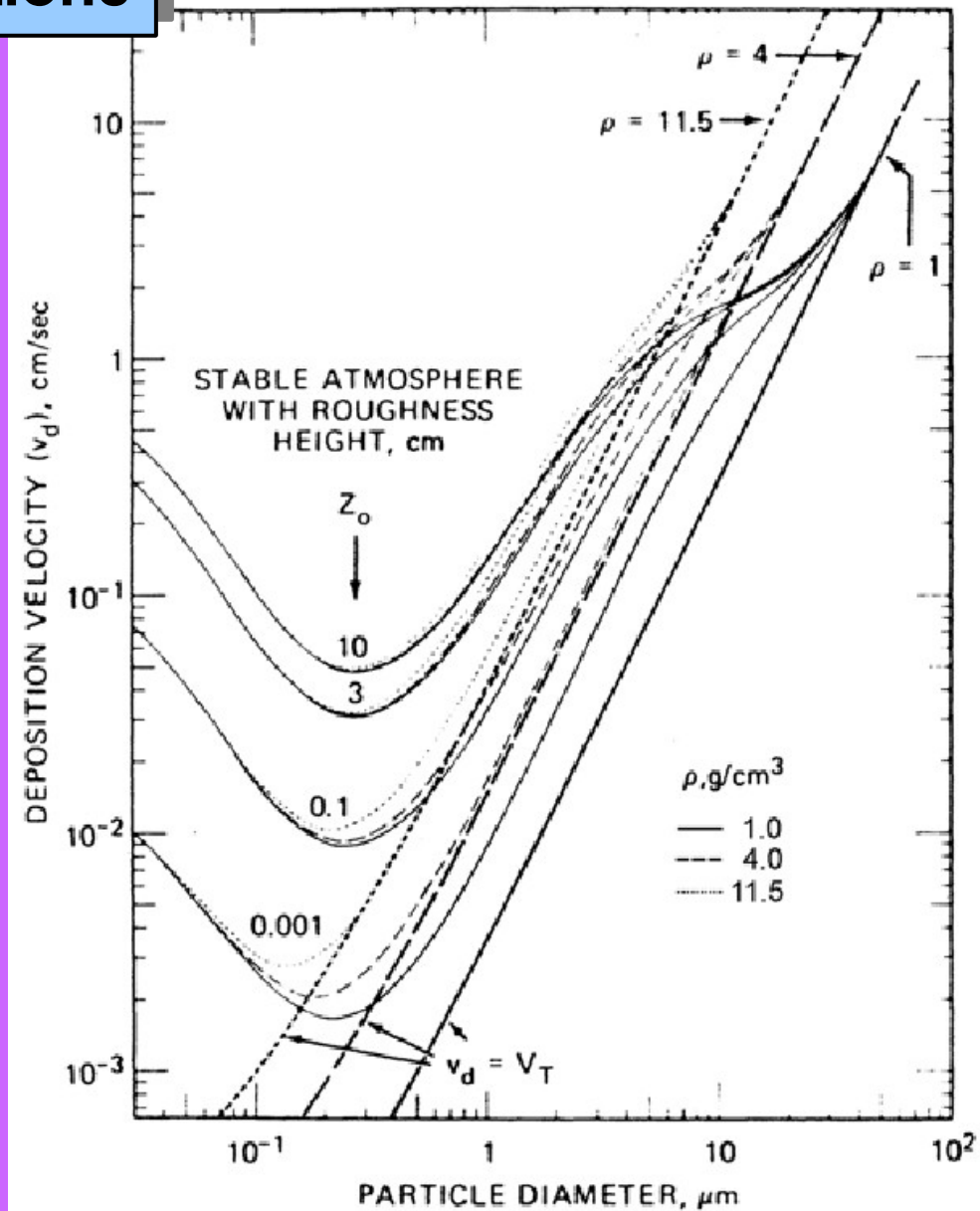
Schema di modello lagrangiano



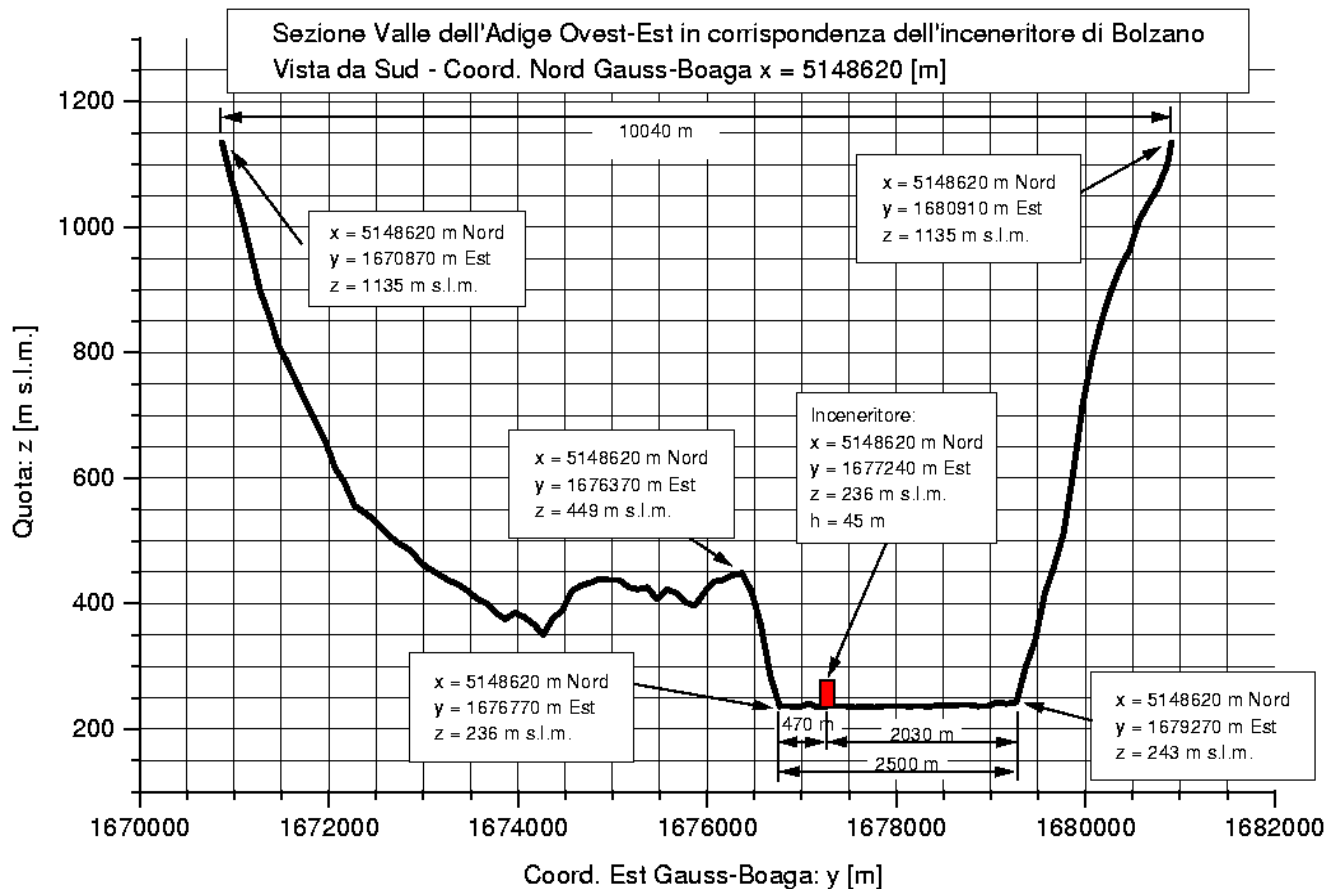
Schema concettuale di un modello lagrangiano: è consentita una simulazione di tipo evolutivo nel tempo, accurata sia per tempi brevi che per tempi lunghi. La nuvola di contaminante, schematizzata tramite un insieme di particelle rilasciate ad istanti discrete, si muove seguendo mediamente il campo di moto e contemporaneamente si espande

Deposizione

- **particolato solido**: si introduce un flusso di massa, presente in tutte le celle del dominio, con direzione dall'alto verso il basso, con velocità di deposizione calcolata secondo la legge di Stokes o con formulazione empirica a seconda della dimensione del particolato
- **fase gassosa**: si utilizza una velocità di deposizione equivalente, che simula il processo di adsorbimento da parte del contorno



Condizioni al contorno



- **flusso nullo** ai bordi o flusso imposto nel caso si usi la deposizione equivalente per i gas
- **flusso nullo** in corrispondenza del tetto del dominio (quota d'inversione) che determina un'interfaccia che ostacola almeno parzialmente la diffusione di contaminante (viene considerata la quota d'inversione termica perché implica una forte variazione dei coefficienti di dispersione turbolenta)

Esempi (1/13): Modello gaussiano, caso stabile

CASO 1A: Classe A, atmosfera in condizioni di elevata instabilità.

Altezza dello strato rimescolato: 600 metri.

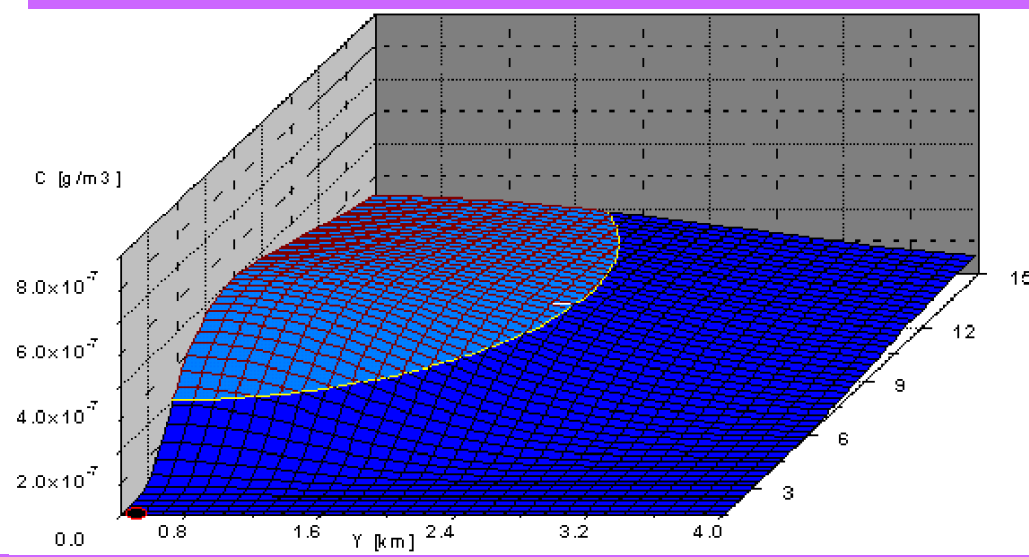
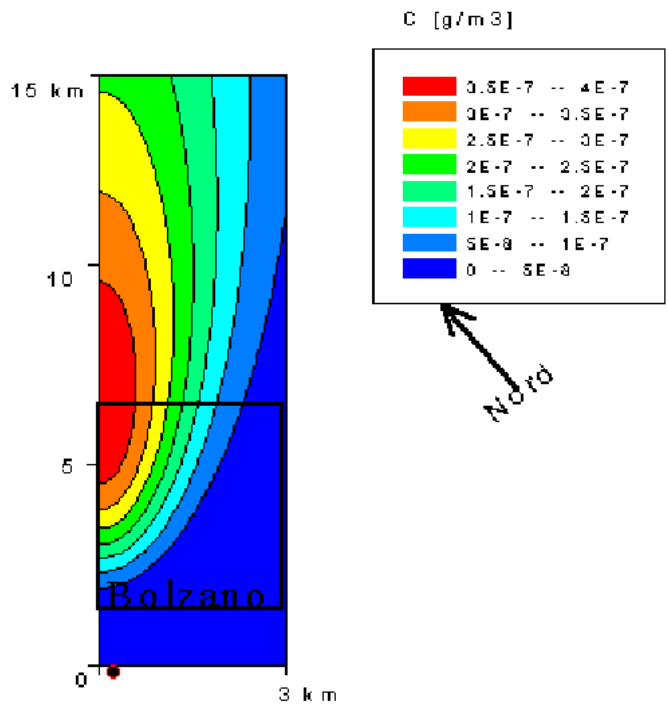
Lunghezza di Monin-Obukhov, $L = -17$ m.

Velocità di attrito, $u_* = 0.1$ m/s.

Coefficiente di dispersione verticale a 4 metri dal suolo, $K_1 = 0.05$ m²/s.

Modello gaussiano, sorgente puntuale, riflessione laterale, classe di stabilità F (turbolenza elevata)

Il massimo si posiziona relativamente vicino alla sorgente; al livello del suolo il pennacchio risulta allargato



Esempi (2/13): modello gaussiano, caso instabile

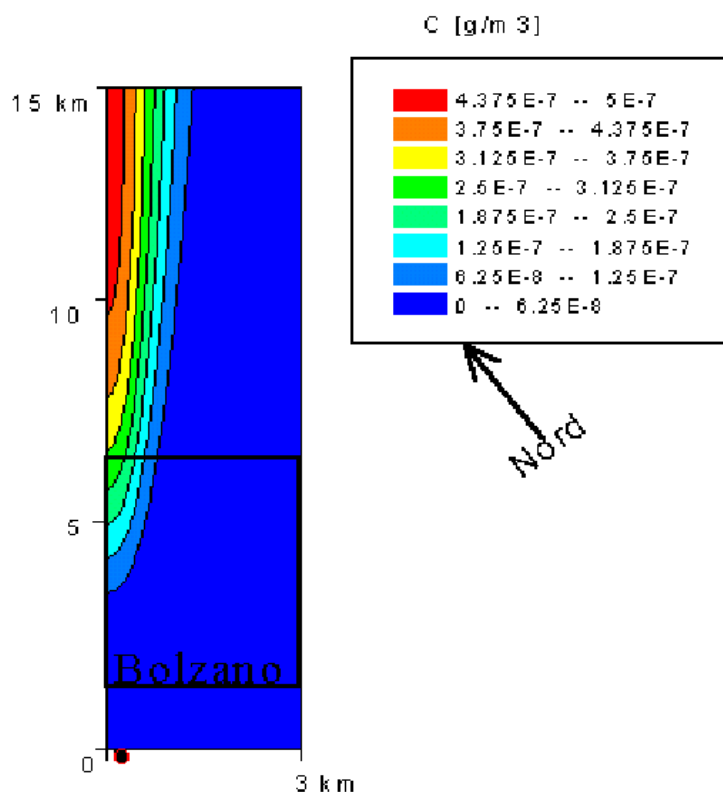
CASO 1F: Classe F, atmosfera in condizioni **stabili**.

Altezza dello strato rimescolato: indefinita.

Lunghezza di Monin-Obukhov, $L = 52$ m.

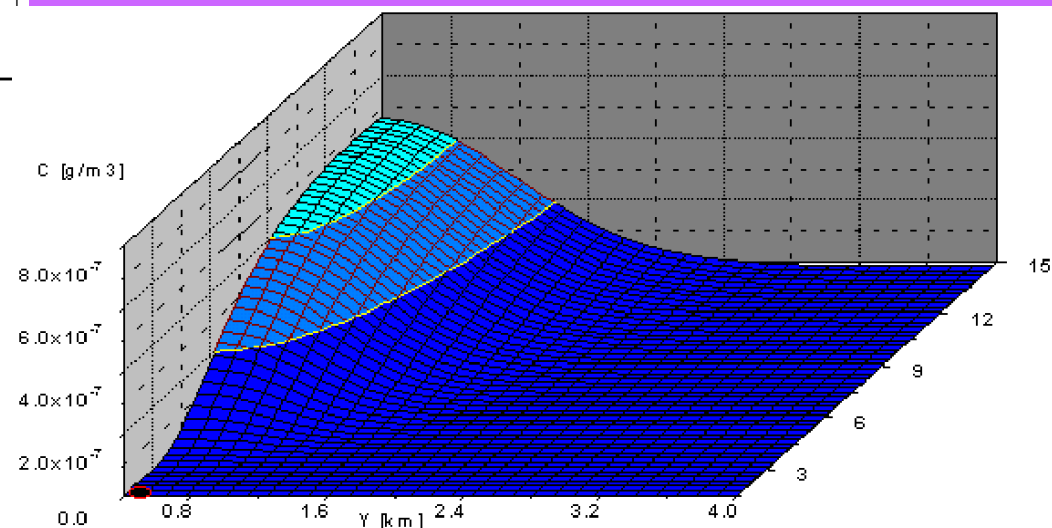
Velocità di attrito, $u_* = 0.1$ m/s.

Coefficiente di dispersione verticale a 4 metri dal suolo, $K_1 = 0.102$ m²/s.



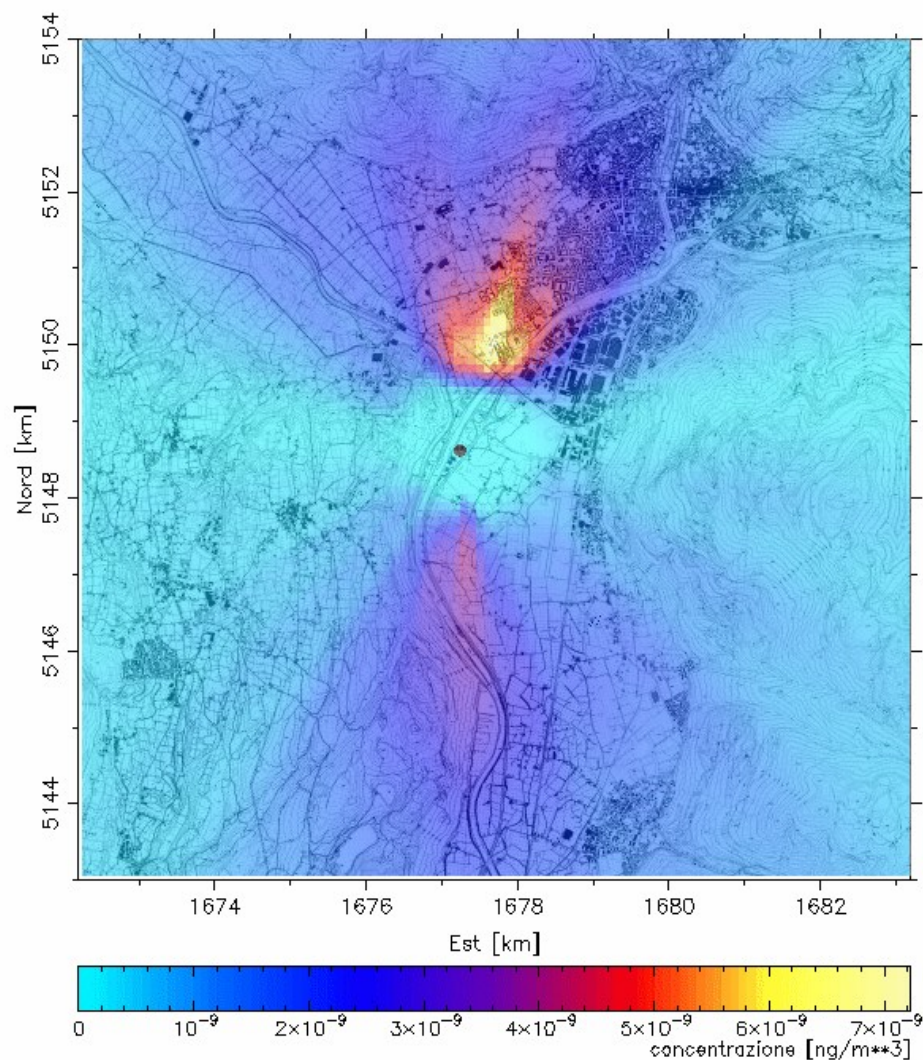
Modello gaussiano, sorgente puntuale, riflessione laterale, classe di stabilità A (turbolenza contenuta)

Il massimo si posiziona più lontano rispetto alla sorgente; al livello del suolo il pennacchio risulta significativamente compatto



Esempi (3/13): concentrazione media (sorgente elevata)

Mappa di
concentrazione
al suolo
Inquinante: PCDD
Cmin = 0.00E+00
Cmax = 0.72E-08

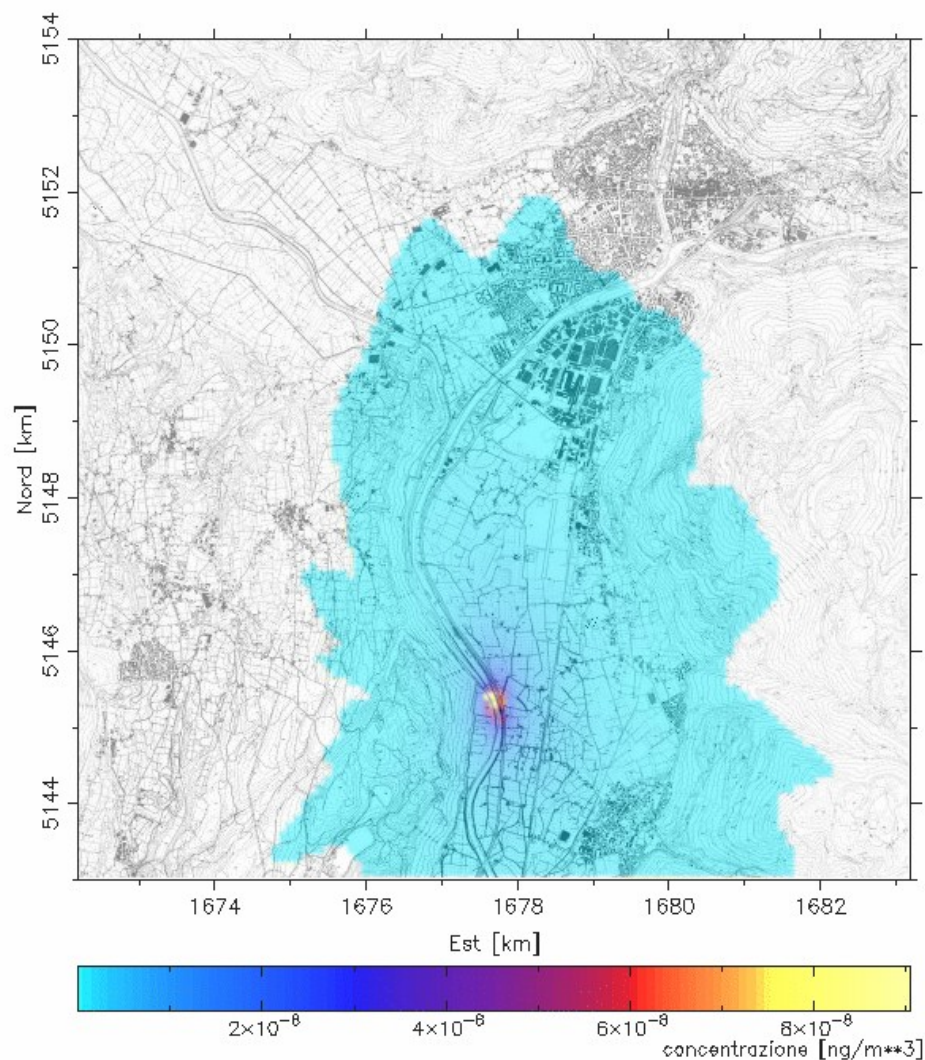


Modello gaussiano,
sorgente puntuale
(inceneritore), modello
modificato per orografia
complessa
media annuale (utilizzo per
il calcolo del rischio salute)

2 massimi a Nord e a Sud
della sorgente, a causa
delle condizioni climatiche
che variano su base
stagionale

Esempi (4/13): concentrazione media (sorgente al suolo)

Mappa di
concentrazione
al suolo
Inquinante: PCDD/F
Cmin = 0.32E-10
Cmax = 0.91E-07



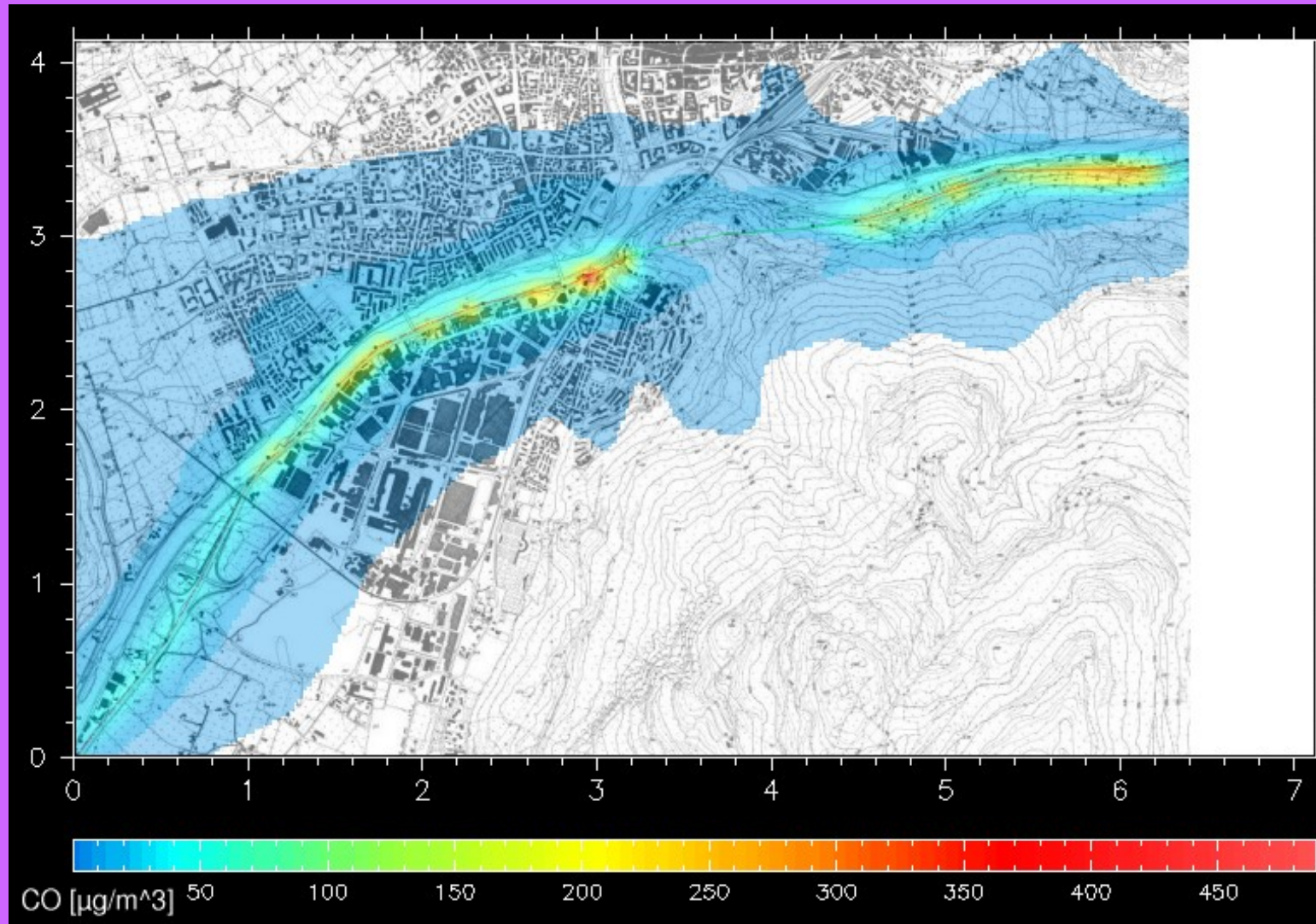
Modello gaussiano,
sorgente areale e puntuale
(discarica e torcia),
modello modificato per
orografia complessa
media annuale (utilizzo per
il calcolo del rischio salute)

si nota la ricaduta al suolo
molto prossimo al suolo, in
quanto la sorgente è bassa
e risente poco delle
condizioni meteo

Esempi (5/13): concentrazione media (sorgente lineare)

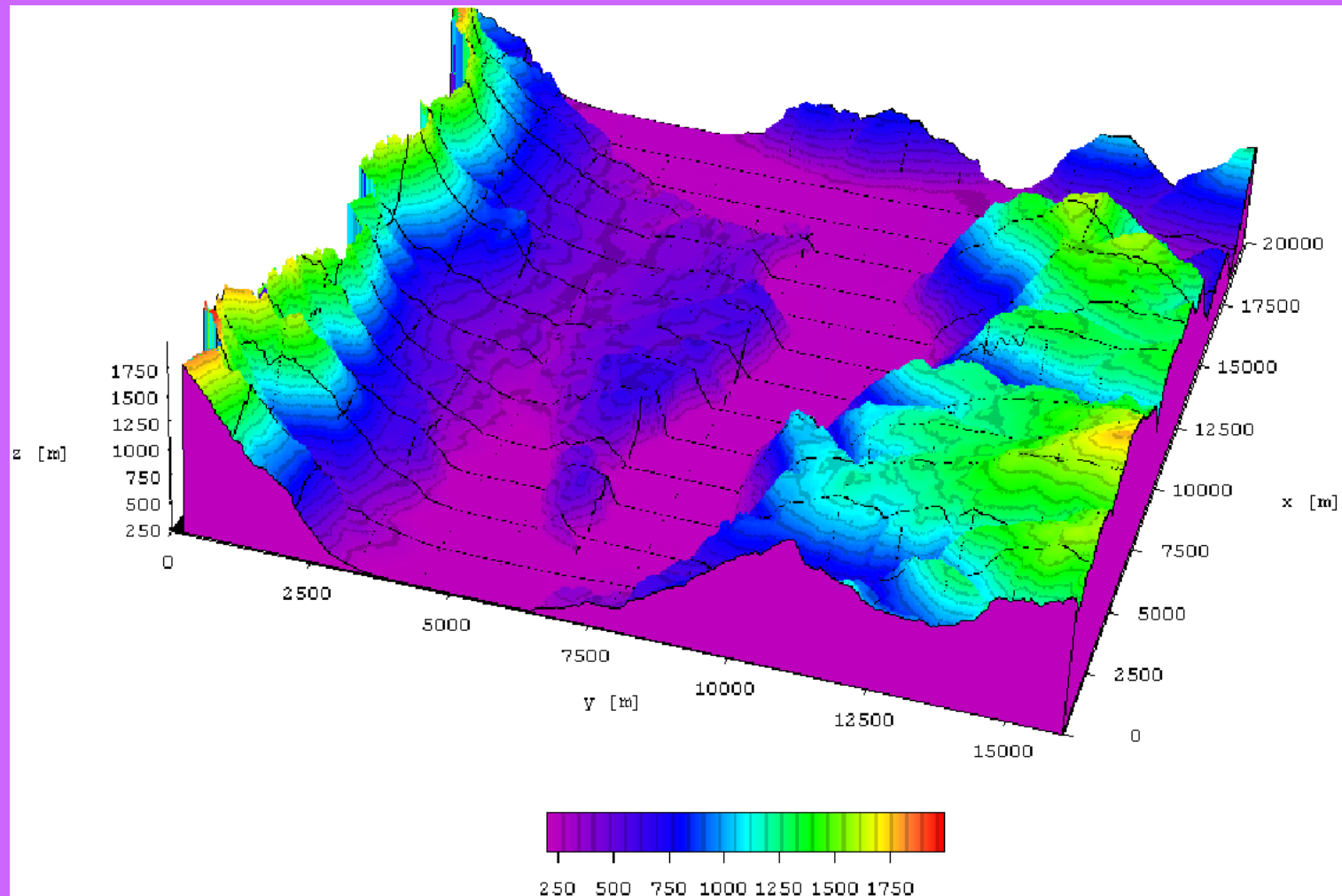
Modello gaussiano, sorgente lineare (autostrada A22 nel comune di Bolzano), media stagionale (utilizzo per il calcolo del rischio salute)

Ricaduta al suolo molto prossima alla sorgente per la quota modesta. Sorgente continua = flusso di automobili



Esempi (6/13): utilizzo di orografia complessa

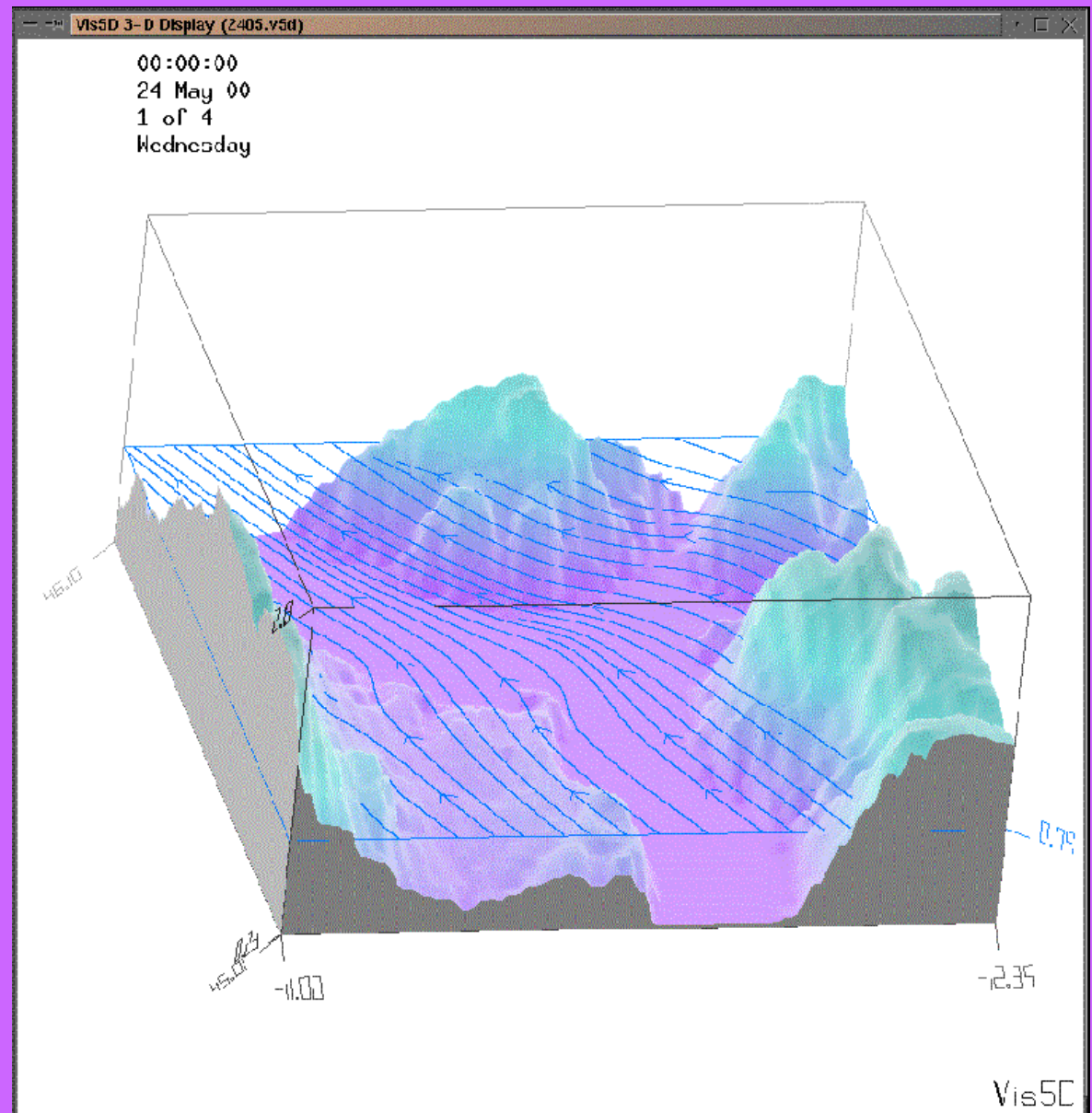
Lo stesso caso può essere studiato in maniera più accurata con l'utilizzo di una **orografia complessa** e di una dettagliata **mappa di uso del suolo**.



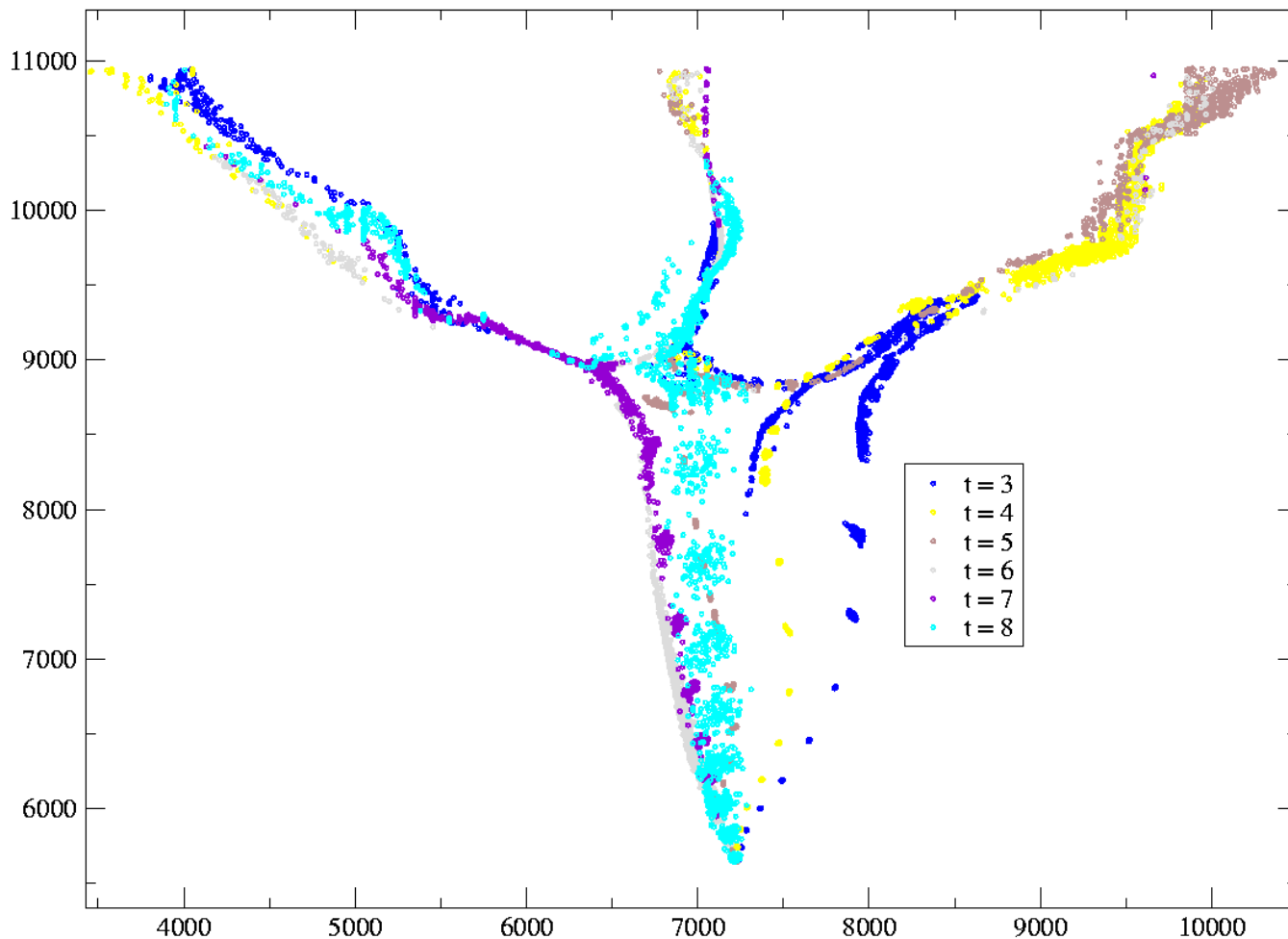
Esempi (7/13): utilizzo di un preprocessore meteo

Campo di moto tridimensionale ricostruito a partire da una serie di misure al suolo ed in quota (SODAR) mediante un programma di tipo mass-consistent o che risolve le equazioni del moto.

Esempio di utilizzo del codice **CALMET**. Su questi risultati viene innestato un codice eulero-lagrangiano (per es. **CALPUFF**) oppure un modello lagrangiano a particelle



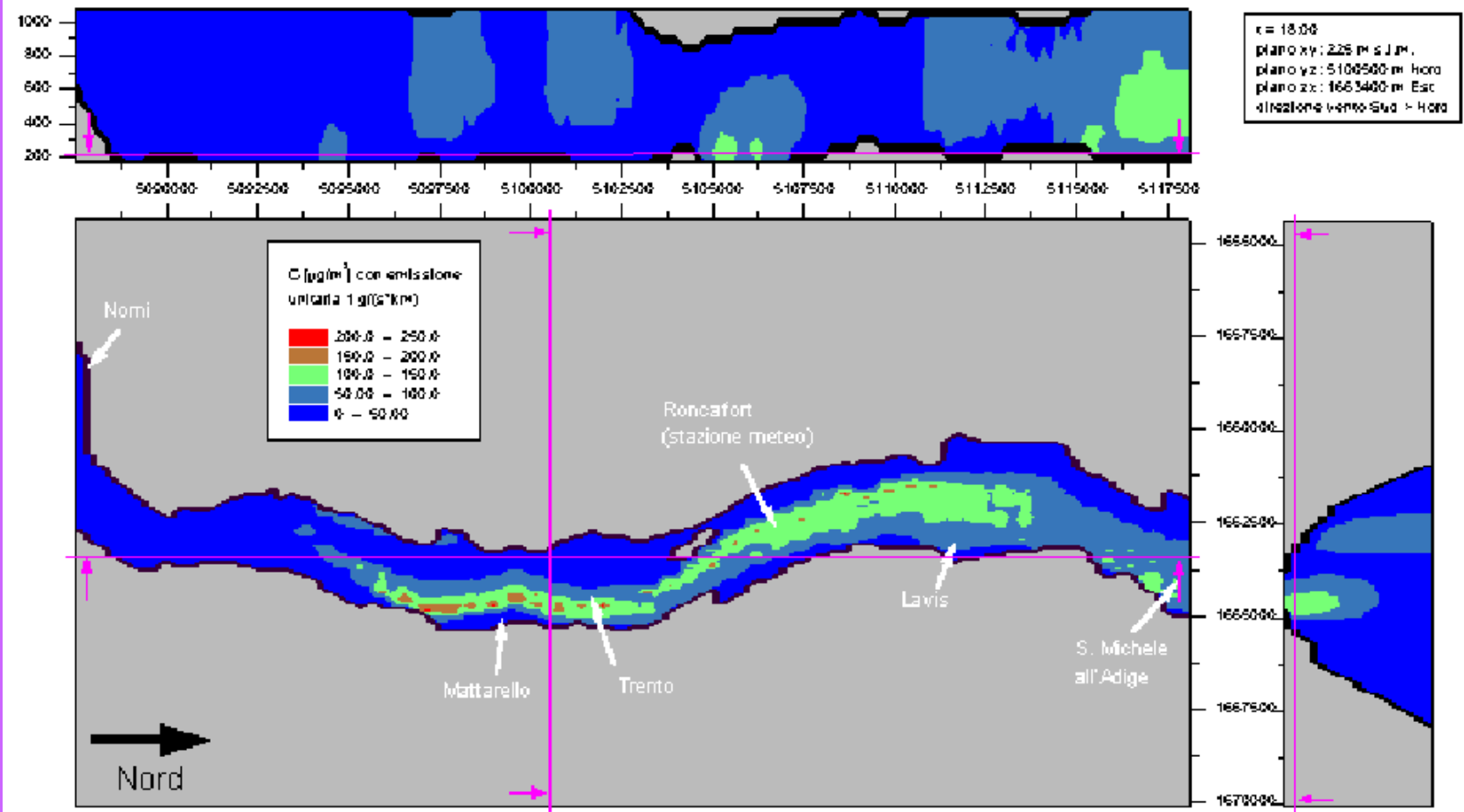
Esempi (8/13): modello lagrangiano



Rilascio continuo da sorgente puntuale (inceneritore BZ), simulazione a breve termine;

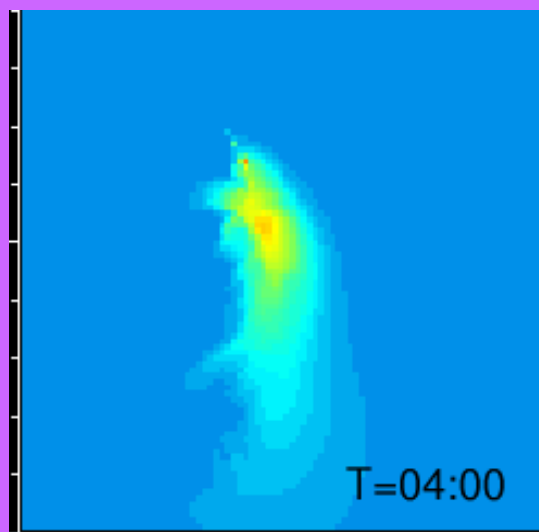
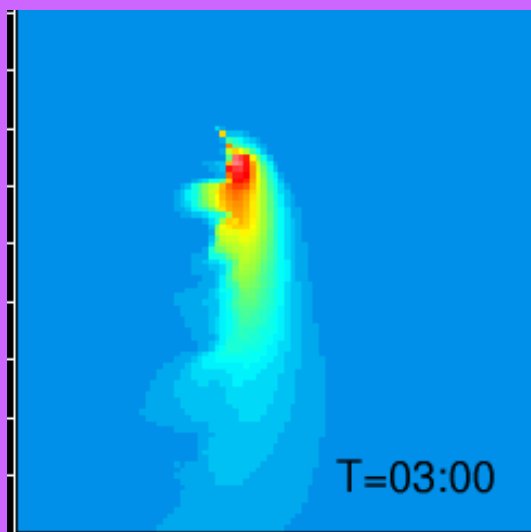
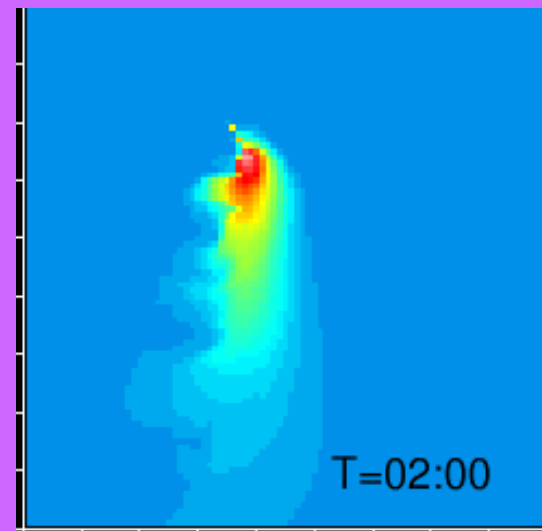
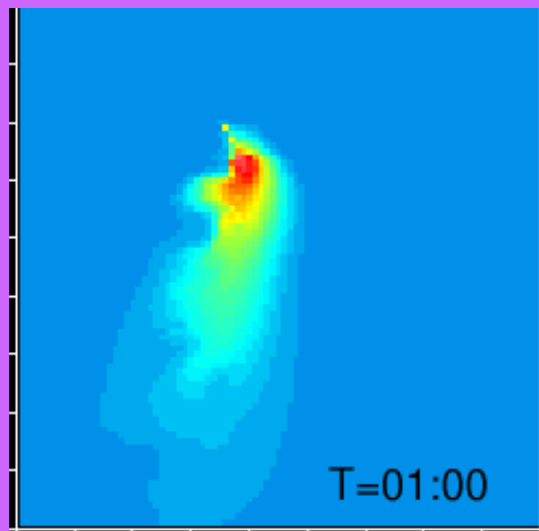
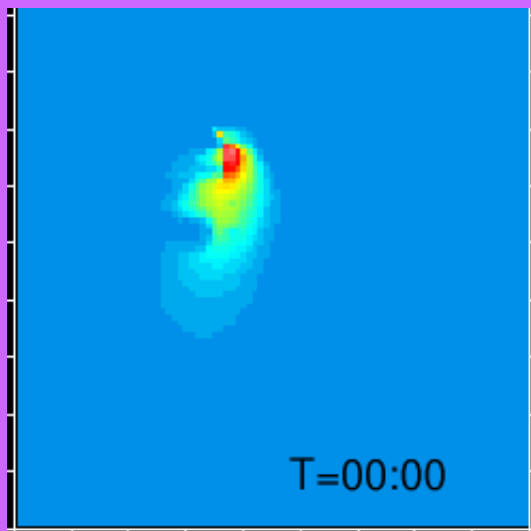
- il contaminante segue direzioni diverse in conformità al campo di moto che varia
- la nuvola di contaminante risulta più o meno allargata a seconda della stabilità atmosferica (variabile a seconda dell'ora del giorno)

Esempi (9/13): modello euleriano



Modello euleriano a **tubi di flusso** - rilascio continuo da sorgente lineare (autostrada), simulazione a breve termine

Esempi (10/13): modello eulero-lagrangiano a puff



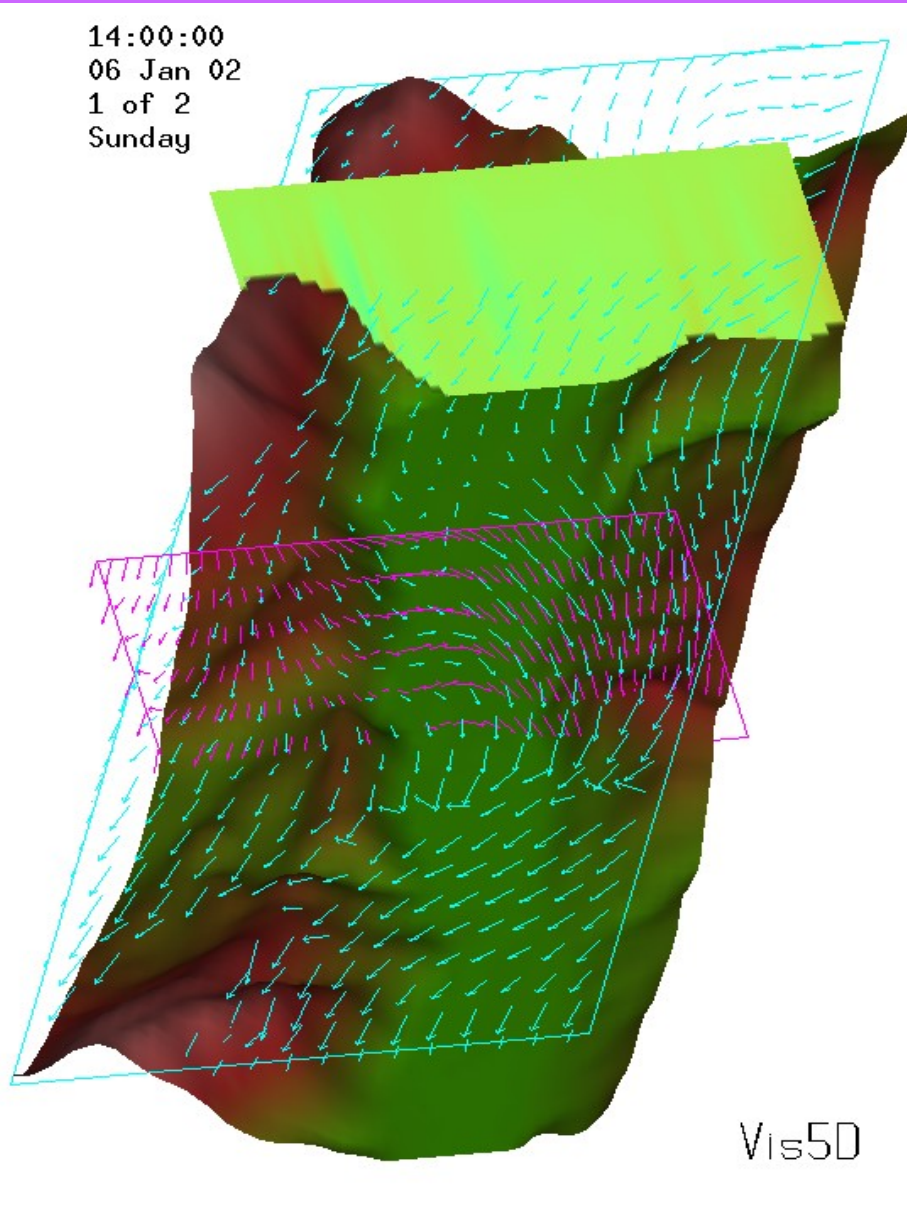
Rilascio continuo da sorgente puntuale (inceneritore TN), simulazione a breve termine su orografia complessa; intervallo temporale di simulazione = 1 ora

Esempi (11/13): S.I.A. impianto termodistruzione di TN

Stazioni meteo
utilizzate



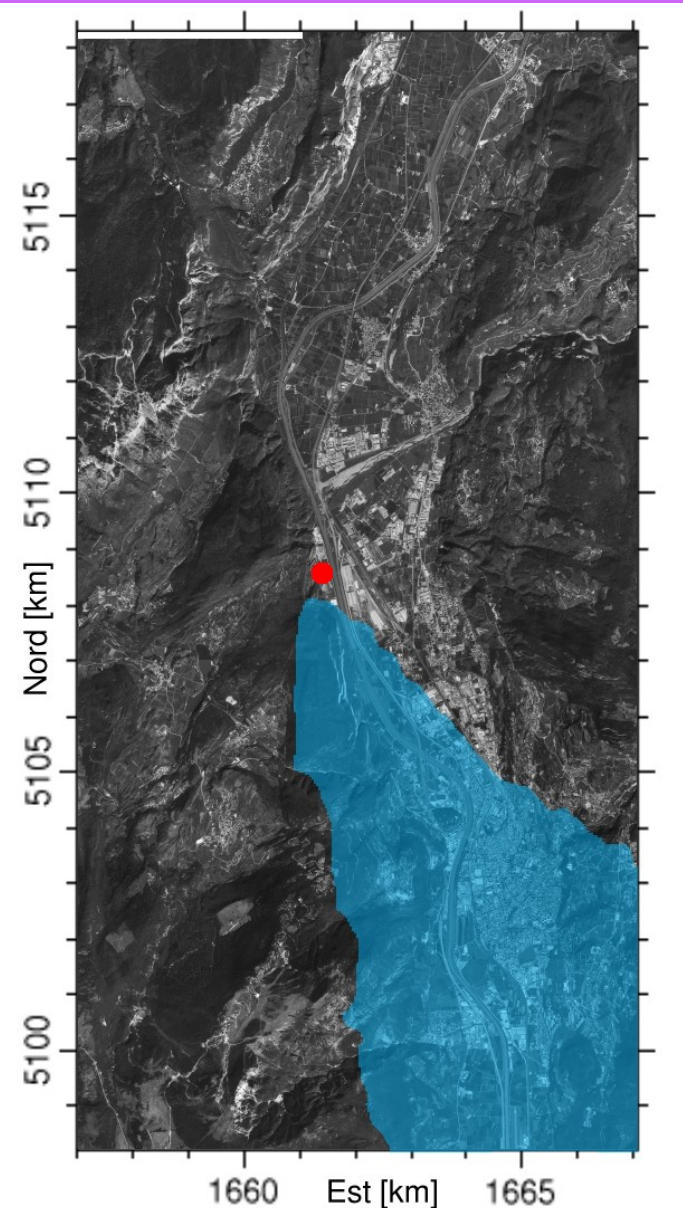
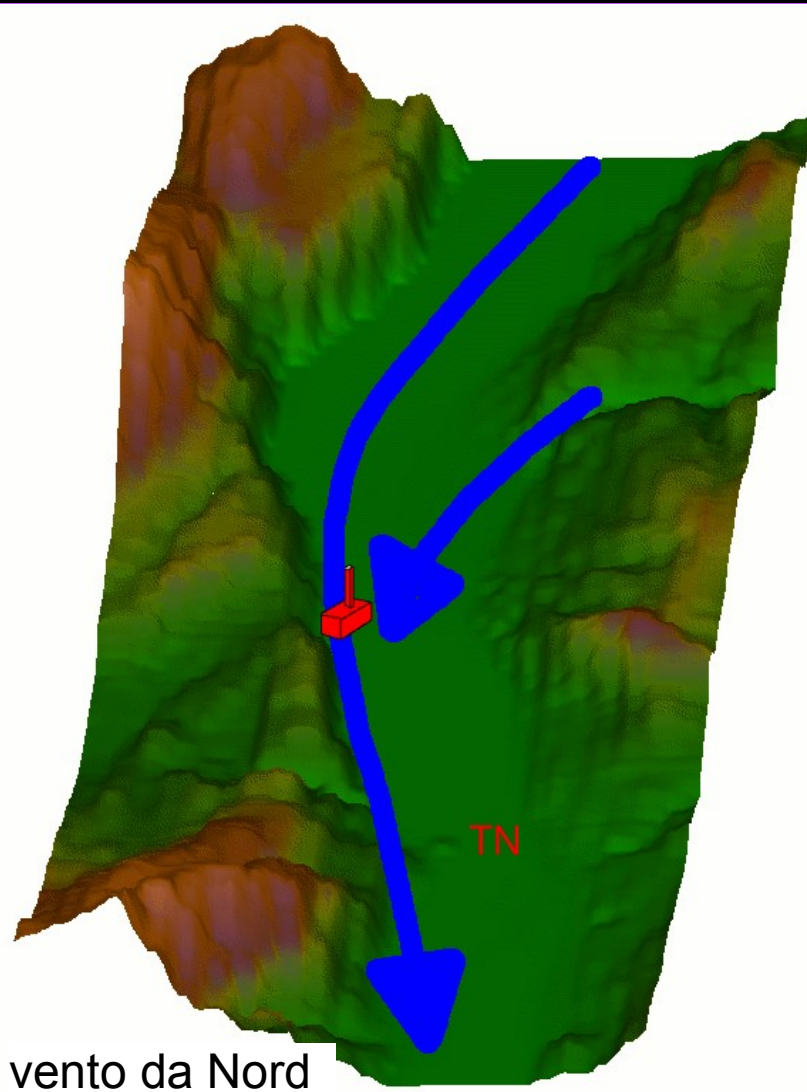
14:00:00
06 Jan 02
1 of 2
Sunday



Simulazione
dei campi di
vento eseguita
con CALMET;
simulazione
dei processi di
dispersione
eseguita con
CALPUFF

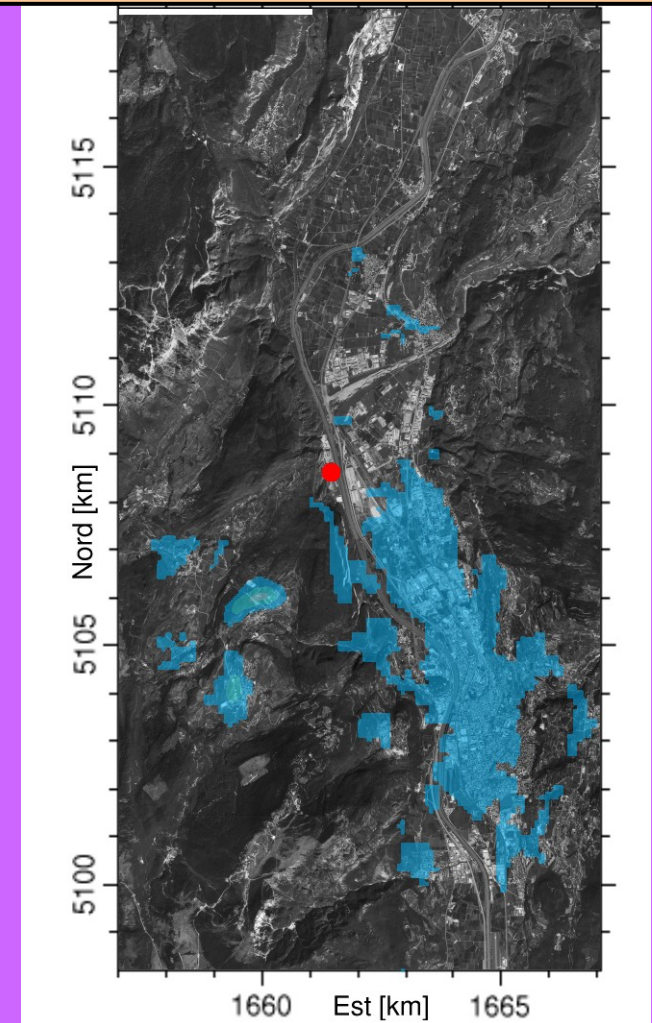
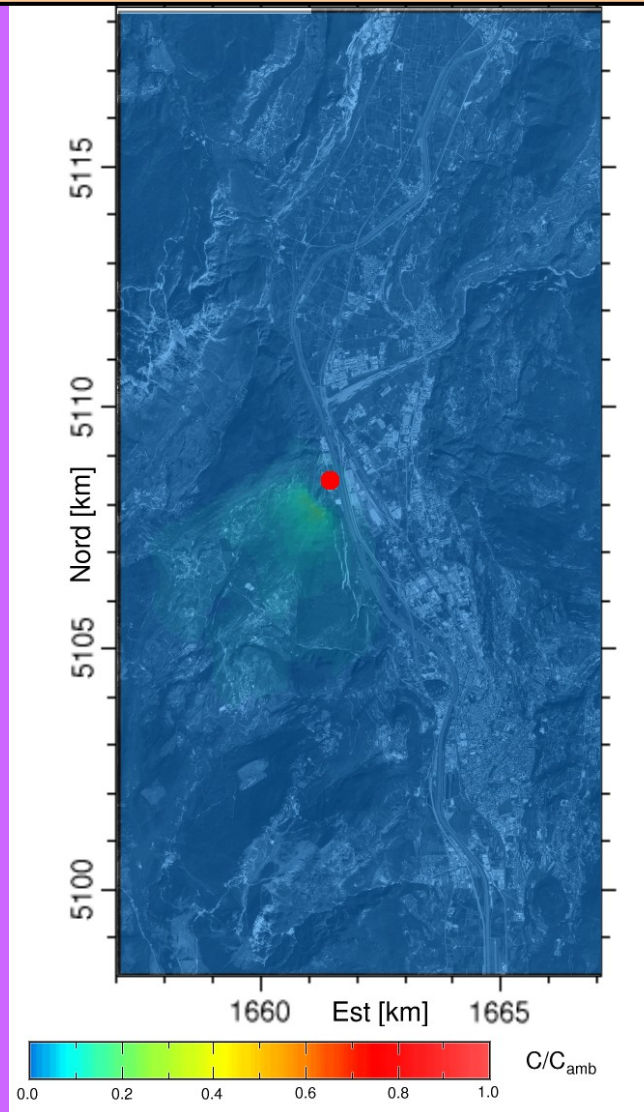
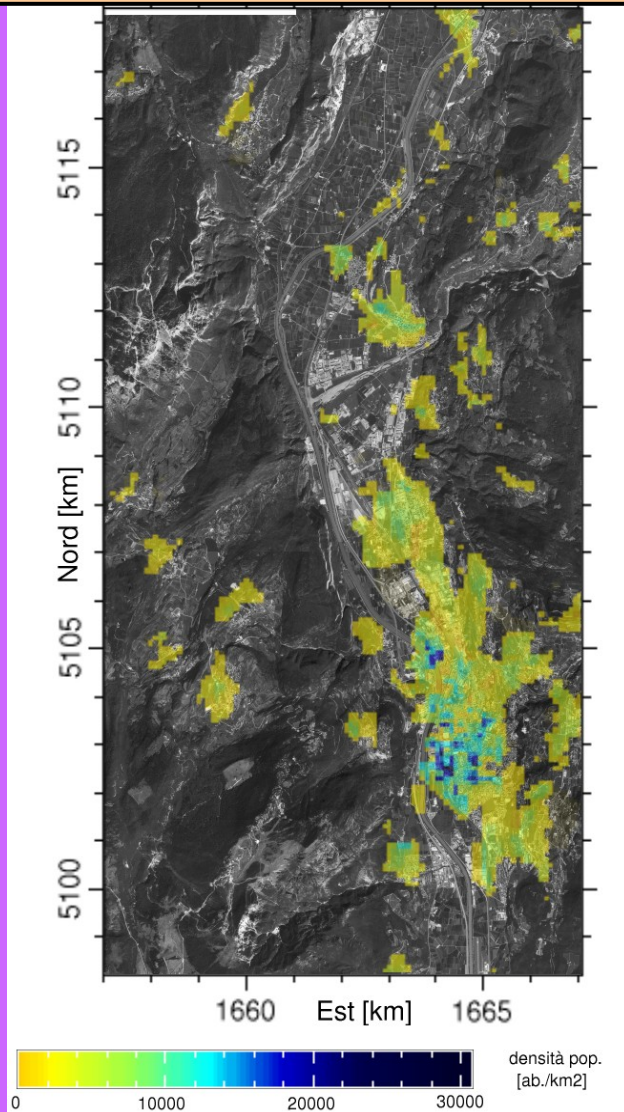
Esempi (12/13): S.I.A. impianto termodistruzione di TN

Simulazione di scenari di dispersione correlati con scenari meteo tipici dell'area



Esempi (13/13): S.I.A. impianto termodistruzione di TN

Mappa di concentrazione media annua + Mappa di densità di popolazione
→ Mappa di rischio pesata sulla popolazione



Schede modelli (1/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	Modelli gaussiani stazionari
Esempio	Dispersione di inquinanti da traffico urbano lungo un asse stradale
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Velocità e direzione del vento, temperatura, precipitazione• Portata di inquinante per unità di area o di lunghezza• Geometria della sorgente, scabrezza

Schede modelli (2/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntiforme
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	Modelli gaussiani stazionari (eventualmente adattati a zona urbana)
Esempio	Dispersione di inquinanti in zona urbana da ciminiera in prossimità del punto di emissione
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Velocità e direzione del vento, temperatura, precipitazione• Quota di rilascio, portata di inquinante• Posizione, geometria degli ostacoli circostanti, scabrezza

Schede modelli (3/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente attivo, gas pesante o infiammabile
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli tridimensionali fluidodinamici• Modelli a tabelle di utilizzo immediato (su base statistica)
Esempio	Fuga di gas da una cisterna
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Velocità e direzione del vento• Caratteristiche chimico-fisiche dell'inquinante• Geometria della sorgente, scabrezza

Schede modelli (4/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Sito "semplice"
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	Modelli lagrangiani
Esempio	Dispersione su sito pianeggiante da fumi di camino, discarica o asse viario
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Velocità e direzione del vento, temperatura, precipitazione• Portata di inquinante per unità di area o di lunghezza• Geometria della sorgente, scabrezza

Schede modelli (5/12)

Scala spaziale	Scala intermedia
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Sito complesso
Tipo di sorgente	Lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli euleriani 3D• Modelli lagrangiani 3D
Esempio	Dispersione di fumi emessi da un sito industriale su scala di 10 - 100 km
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Profili verticali vento (u, v, w), profilo verticale di temperatura• Portata di inquinante, velocità di deposizione/dilavamento• Scabrezza, modello digitale del terreno

Schede modelli (6/12)

Scala spaziale	Grande scala
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli lagrangiani 3D• Modelli eulero-lagrangiani a puff
Esempio	Dispersione di sostanze rilasciate da una centrale nucleare, distanza ~ 1000 km
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Vento, pressione e temperatura da modelli a grande scala• Portata di inquinante, velocità deposizione/dilavamento• Modello digitale del terreno, distinzione terra/mare

Schede modelli (7/12)

Scala spaziale	Scala locale
Scala temporale	Breve periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli euleriani 3D• Modelli a box
Esempio	Dispersione di ozono in area urbana
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Vento, temperatura, radiazione solare, umidità• Inventario di emissioni su tutta l'area• Nessuno

Schede modelli (8/12)

Scala spaziale	Grande scala
Scala temporale	Breve periodo (o previsione)
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente reattivo
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli euleriani 3D• Modelli eulerio-lagrangiani a puff
Esempio	Trasporto e trasformazione di specie chimiche secondarie
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Vento, pressione e temperatura da modelli a grande scala• Portata di inquinante, fondo, velocità di produzione/rimozione• Modelli digitale del terreno, uso del suolo

Schede modelli (9/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Lungo periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli climatologici analitici• Modelli climatologici statistici
Esempio	Stima delle concentrazioni medie annue di inquinanti in area urbana
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Classi di vento (vel + dir), stabilità atmosferica e precipitazione• Intensità media di rilascio• Orografia (per siti complessi), scabrezza

Schede modelli (10/12)

Scala spaziale	Scala intermedia o grande scala
Scala temporale	Lungo periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte
Tipologie di modello applicabile	<ul style="list-style-type: none">• Modelli lagrangiani 3D• Modelli euleriani 3D
Esempio	Concentrazione medie annue da siti industriali di inquinanti al lento decadimento
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Velocità del vento (u,v,w) con passo temporale 6-12 h• Intensità media di rilascio• Modello digitale del terreno, uso del suolo

Schede modelli (11/12)

Scala spaziale	Microscala
Scala temporale	Previsione
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente inerte o reattivo
Tipologie di modello applicabile	Modelli stocastici
Esempio	Previsione delle concentrazioni medie giornaliere di inquinanti da traffico in area urbana
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Serie temporali di vento (vel + dir) e stabilità atmosferica• Serie temporali di misure di inquinamento atmosferico• Nessuno

Schede modelli (12/12)

Scala spaziale	Grande scala
Scala temporale	Lungo periodo
Tipo di sito	Qualunque
Tipo di sorgente	Puntuale, lineare o areale
Tipo di inquinante	Chimicamente reattivo
Tipologie di modello applicabile	Modelli lagrangiani 3D
Esempio	Deposizione media annua su scala regionale o continentale
Dati di ingresso: <ul style="list-style-type: none">• meteo• emissione• territorio	<ul style="list-style-type: none">• Vento, pressione, temperatura da modelli a grande scala• Inventario inquinanti primari, concentrazione di fondo• Modello digitale del terreno, uso del suolo

Riferimenti e software sulla rete internet

<http://www.epa.gov/scram001/>

software dell'EPA (Environmental Protection Agency)

<http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/harmoni.htm>

elenco di strumenti modellistici utilizzati in Europa

<http://www.etcaq.rivm.nl/databases/mds.html>

vasto database dell'EEA (European Environmental Agency)
contenente documentazione, modelli e dati di qualità dell'aria

<http://www.sinanet.anpa.it/aree/Default.asp>

rassegna di studi sull'uso dei modelli