



*Monitoraggio della qualità dell'aria.  
I modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera e le misure in  
atmosfera  
2011*

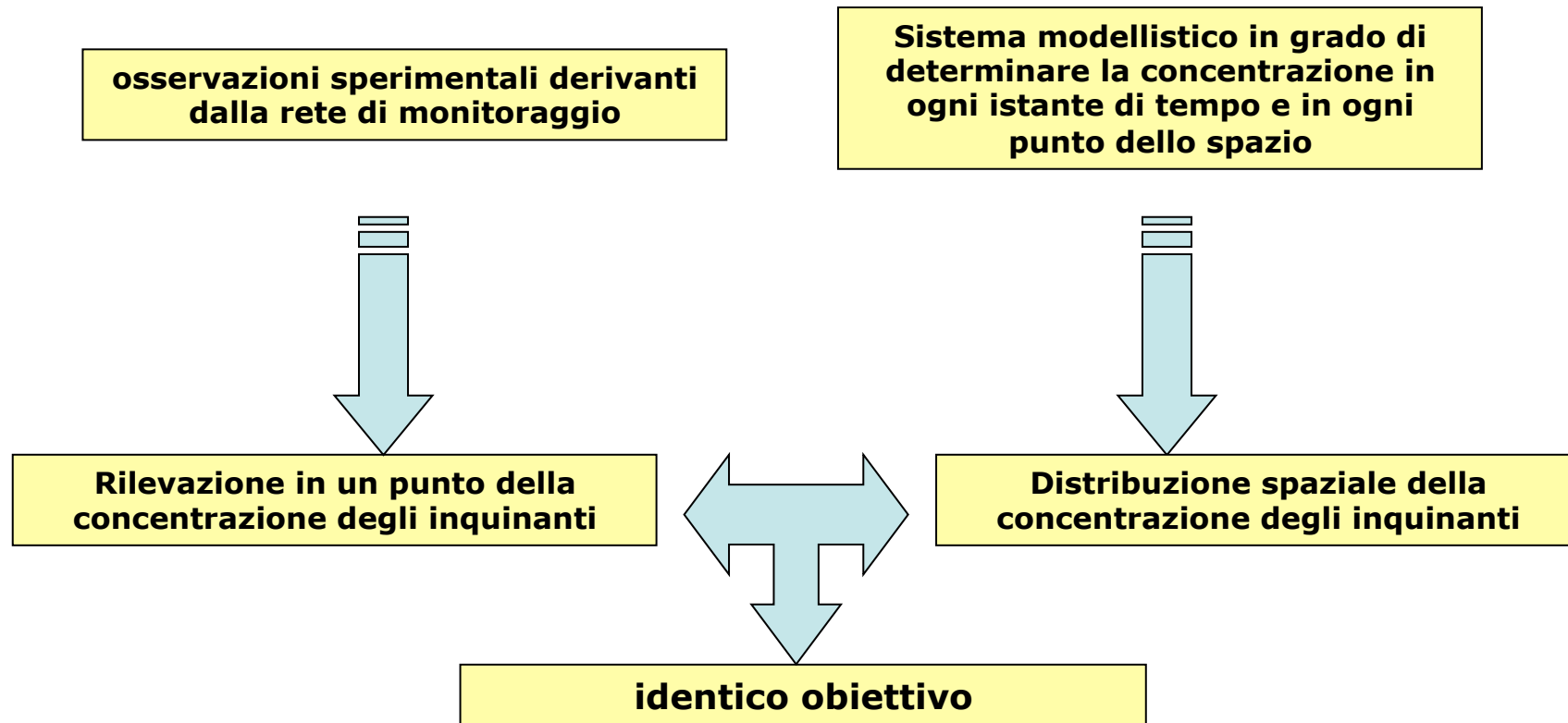
**Inizializzazione dei modelli ed assimilazione  
delle misure**

*dott. Roberto Sozzi  
dott. Andrea Bolignano*

## **Obiettivo**

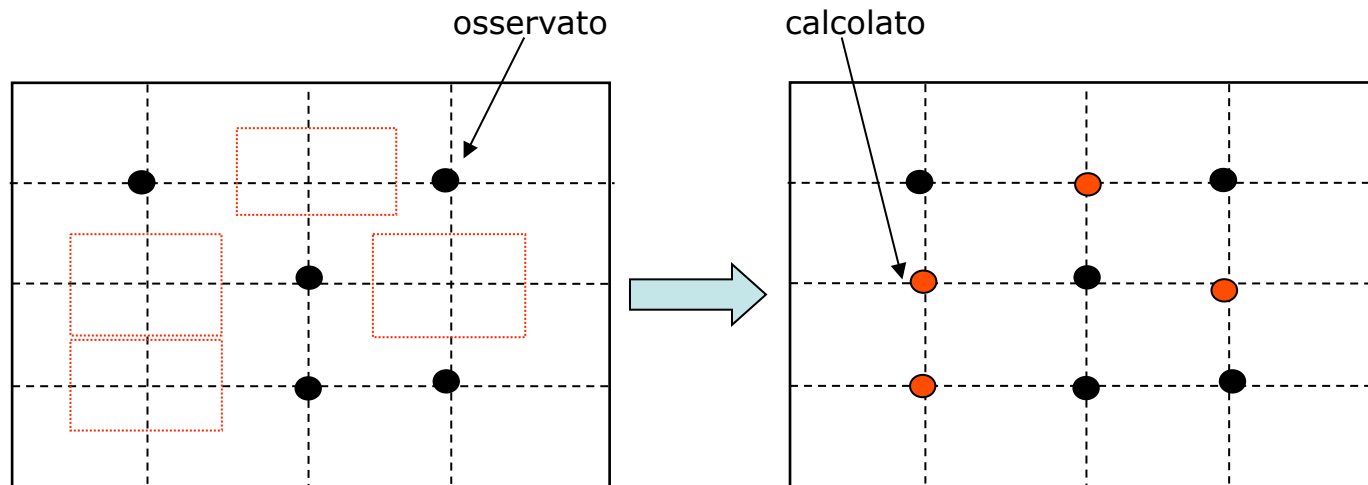
***Riprodurre lo stato dell'atmosfera (sia dal punto di vista chimico che meteorologico) il più vicino possibile alla realtà, consistente dinamicamente, in modo da prendere in considerazione tutte le informazioni disponibili: osservazioni, risultati modellistici, processi fisico/chimici.***

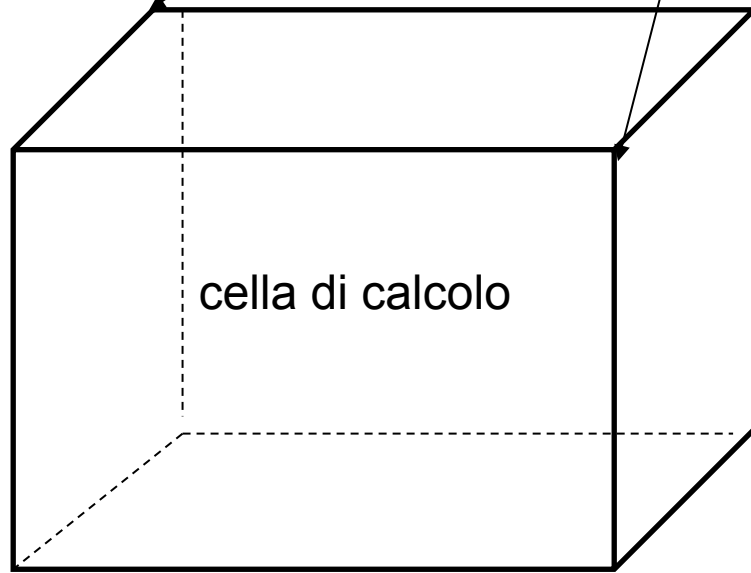
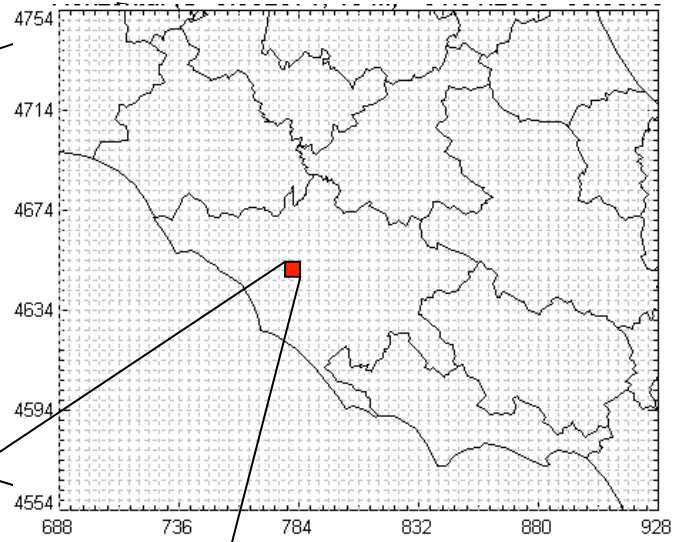
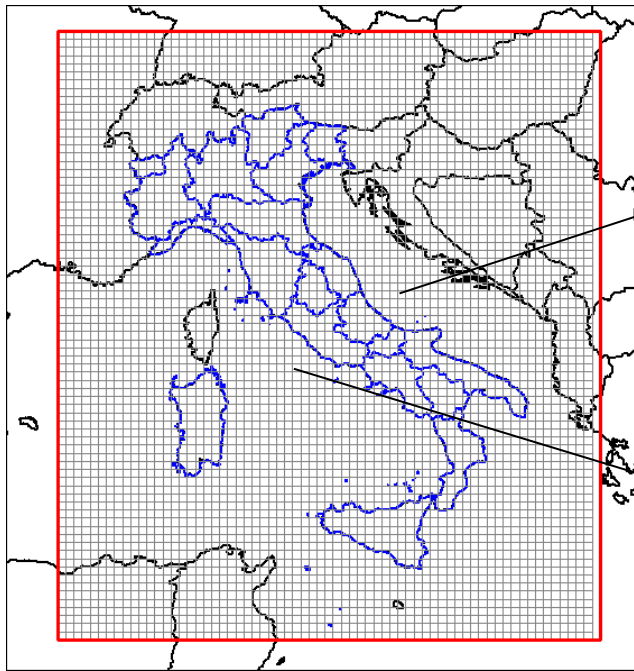
misure e modelli



**Perché e come è possibile rendere congruenti entrambi gli strumenti ?**

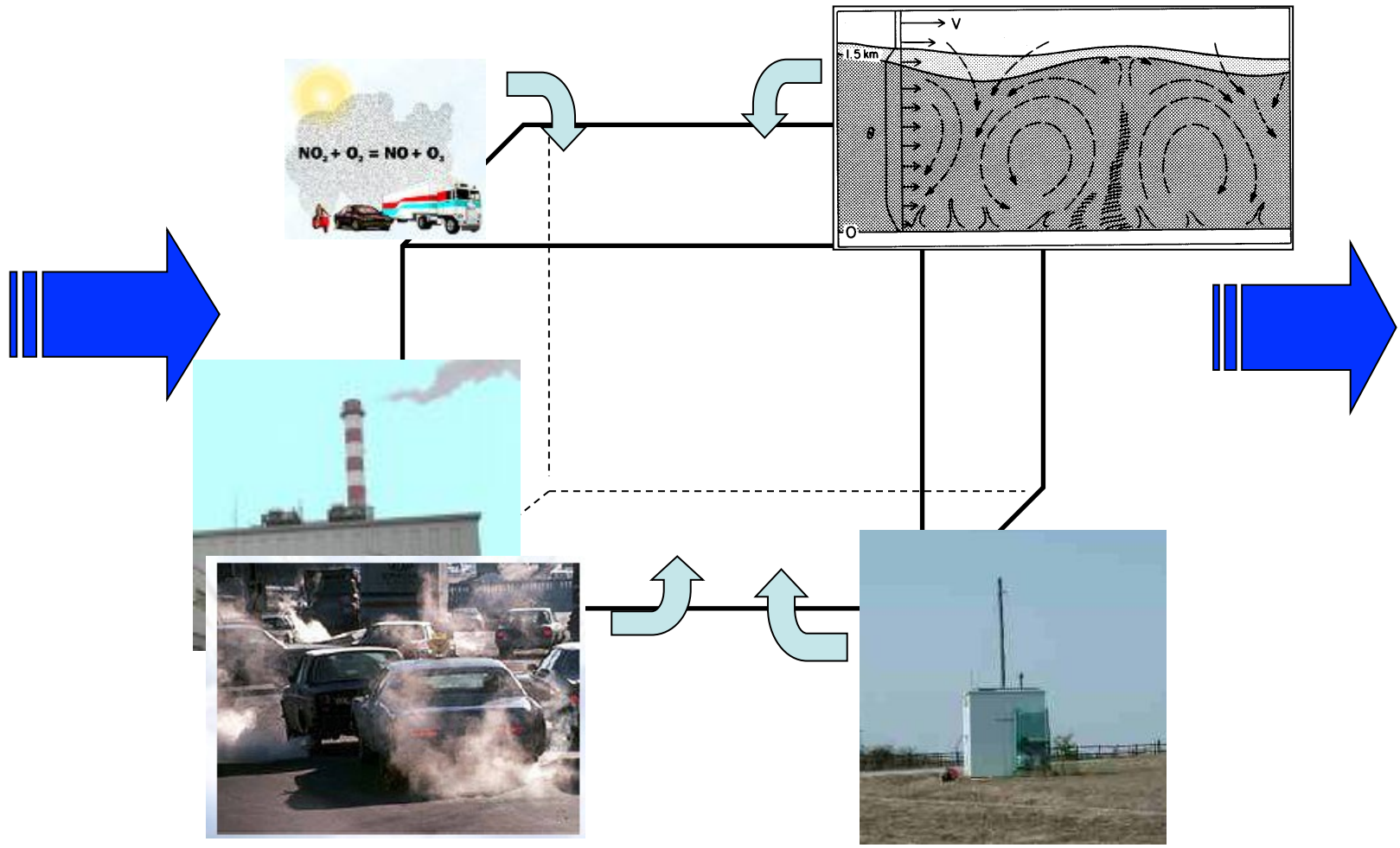
- ✓ Una misura sperimentale rileva esattamente (a parte l'errore strumentale) la concentrazione al suolo di una sostanza, in ogni istante di tempo e in punto preciso dello spazio, senza preoccuparsi delle cause che hanno portato a tale concentrazione ma considerando esclusivamente le caratteristiche chimico/fisiche che possiede tale sostanza nel momento che questa si è già formata in atmosfera in un preciso istante di tempo e *nel punto in cui viene effettuata la misura*.
- ✓ Il punto di partenza di una simulazione modellistica è la *descrizione* matematica delle cause, che presuppone la conoscenza dei numerosi processi fisici e chimici, finalizzata alla *ricostruzione* (a parte l'errore intrinseco di un modello) della concentrazione delle sostanze inquinanti in ogni istante di tempo e *in ogni punto dello spazio*.





objective analysis

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u \frac{\partial c_i}{\partial x} - v \frac{\partial c_i}{\partial y} - w \frac{\partial c_i}{\partial z} + K_{xx} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + S_i + R_i - Dep + f(\text{observations})$$



## Struttura Generale del Metodo Risolutivo

- ⇒ si consideri un generico tempo  $t_n$  per cui sia nota la concentrazione  $C^n_{ijk}$  in ogni cella di griglia
- ⇒ al tempo  $t_{n+1}=t_n+ \Delta t$  la concentrazione nella cella  $(i,j,k)$  viene calcolata col metodo del frazionamento del tempo (Time Splitting):



### Operano in successione i fenomeni seguenti:

- 1) si emette l'inquinante dalle sorgenti attive,
- 2) lo si trasporta lungo la direzione  $x$ ,
- 3) lo si trasporta lungo la direzione  $y$ ,
- 4) lo si trasporta lungo la direzione  $z$ ,
- 4) se ne consente la diffusione lungo la direzione  $x$ ,
- 5) se ne consente la diffusione lungo la direzione  $y$
- 6) Se ne consente la diffusione lungo la direzione  $z$
- 7) reazioni chimiche, deposizioni
- 8) tecniche di assimilazione

## OPERATOR SPLITTING

L'integrazione numerica del sistema di equazione del PDEs è affrontato scorporando il problema multi-dimensionale in "n" problemi unidimensionali dipendenti dal tempo, che sono risolti sequenzialmente con un time step  $\Delta t$  (operator splitting). L'evoluzione temporale delle specie chimiche i-th è :

$$c_i(\mathbf{x}, t + \Delta t) = L_x(\Delta t)L_y(\Delta t)L_z(\Delta t)L_c(\Delta t)c_i(\mathbf{x}, t)$$

dove  $L_x, L_y$  rappresentano gli operatori di avvezione/dispersione lungo gli assi orizzontali  $x, y$ ,  $L_z$  è l'operatore verticale che tiene conto dei processi di trasporto, diffusione, sorgenti e deposizione secca e  $L_c$  rappresenta l'operatore contenente le trasformazioni chimiche.

$$L_x c_i = \frac{\partial(uc_i)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_H \frac{\partial c_i}{\partial x} \right]$$
$$L_y c_i = \frac{\partial(vc_i)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_H \frac{\partial c_i}{\partial y} \right]$$
$$L_z c_i = \frac{\partial(wc_i)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_V \frac{\partial c_i}{\partial z} \right] + S_i + Dep_i$$
$$L_c c_i = C_i = P_i + D_i c_i$$

dove  $P_i$  e  $D_i$  rappresentano gli operatori di produzione /distruzione dovute alle trasformazioni chimiche.



## assimilazione

L'evoluzione temporale della specie i-th nel time step  $\Delta t$  è:

$$c_i(\mathbf{x}, t + \Delta t) = L_N(\Delta t) L_x(\Delta t) L_y(\Delta t) L_z(\Delta t) L_c(\Delta t) c_i(\mathbf{x}, t)$$

dove  $L_N$  rappresenta l'operatore di *assimilazione*.

L'operatore di **nudging** ha la forma seguente:

$$L_N c_i = c_i + \frac{1}{\tau_A} G_A(c_i, c_i^j, \mathbf{x}, t) \cdot \Delta t$$

**Optimal Interpolation** (o **Successive Correction Method / Bratseth scheme**),  $L_N$  ha la forma seguente:

$$L_N c_i = c_i + \frac{w_t}{\tau_A} (c_i^A - c_i) \cdot \Delta t$$

dove  $c_i^A$  è il campo di concentrazione.

## Obs. Nudging/Newtonian Relaxation technique

Nudging è appropriato quando sono disponibili osservazioni ad alta frequenza.

$$\frac{\partial c_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = F(\mathbf{c}, \mathbf{x}, t) + \frac{1}{\tau_A} G_A(\mathbf{c}, c^j, \mathbf{x}, t)$$

$$F(\mathbf{c}, \mathbf{x}, t) = -u \frac{\partial c_i}{\partial x} - v \frac{\partial c_i}{\partial y} - w \frac{\partial c_i}{\partial z} + K_{xx} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + S_i + C_i + R_i$$

dove  $\tau_A$  è il *nudging factor* [s] e  $G_A$  è il *general nudging term*.

$$G_A(c_i, c_i^j, \mathbf{x}, t) = \frac{\sum_j^N W_j^2(\mathbf{x}, t) [c_i^j - c_i(\mathbf{x}, t)]}{\sum_j^N W_j(\mathbf{x}, t)}$$

## Obs. Nudging/Newtonian Relaxation technique

$$W_j(\mathbf{x}, t) = w_{x,y} w_z \cdot w_t$$

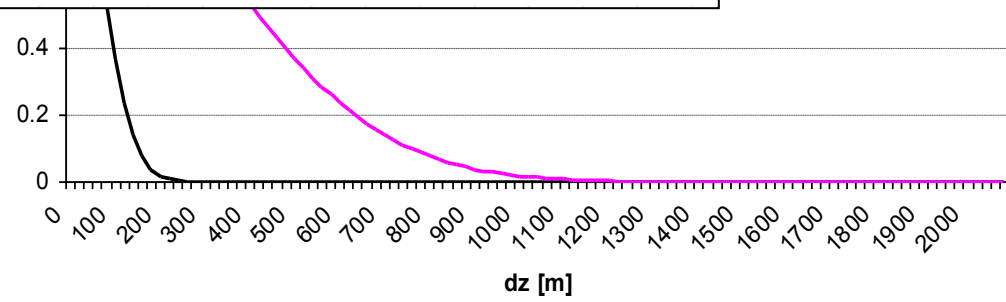
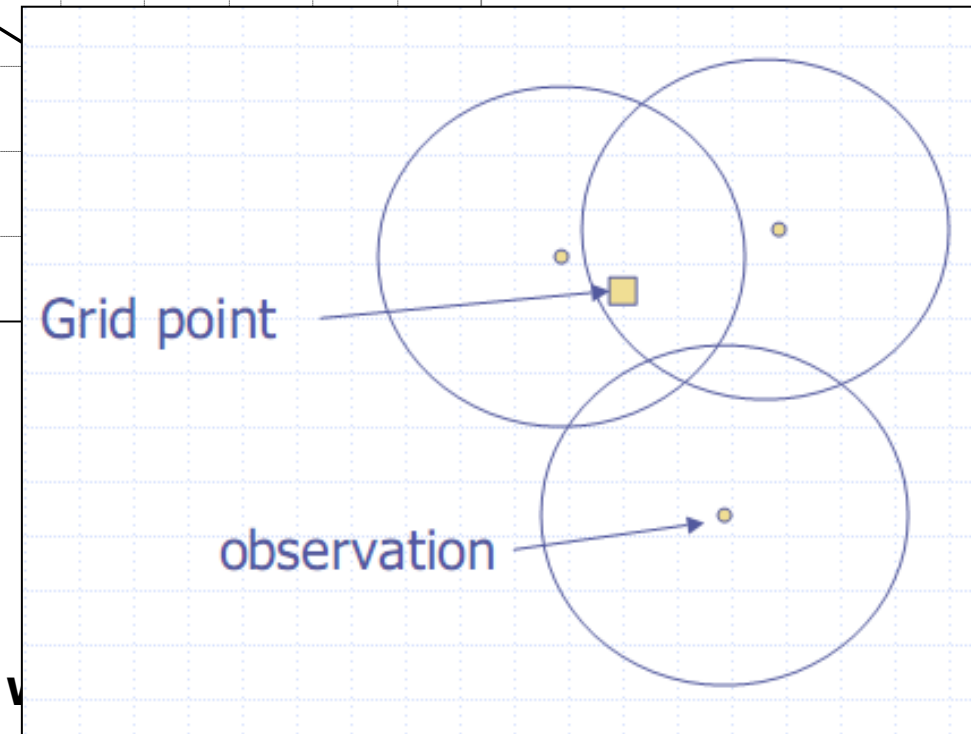
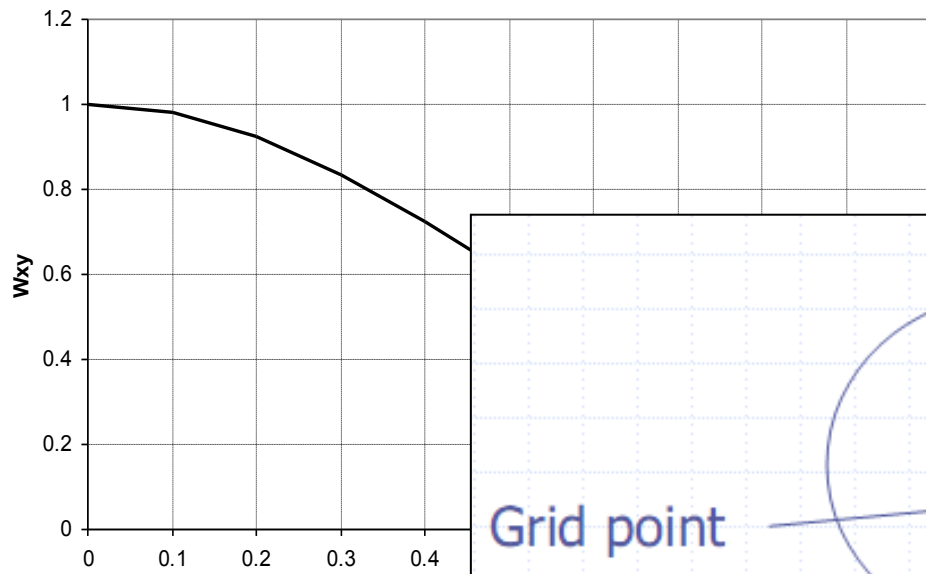
$W_j$  è dato da:

$$w_{x,y} = \begin{cases} \frac{R^2 - D^2}{R^2 + D^2}; 0 \leq D \leq R \\ 0; D > R \end{cases}$$

$$w_z = e^{-\frac{z^2}{2R_z^2}}$$

$$w_t = \begin{cases} 2 \frac{\tau - |t - t_0|}{\tau}; \frac{\tau}{2} \leq |t - t_0| \leq \tau \\ 1; \frac{\tau}{2} < |t - t_0| \end{cases}$$

- $R$  è il raggio d'influenza delle osservazioni
- $D$  è la distanza tra obs e nodi
- $\tau$  è il *time window* per le obs

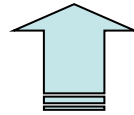


—  $Rz = 100$  [m] —  $Rz = 500$  [m]

## Optimal Interpolation

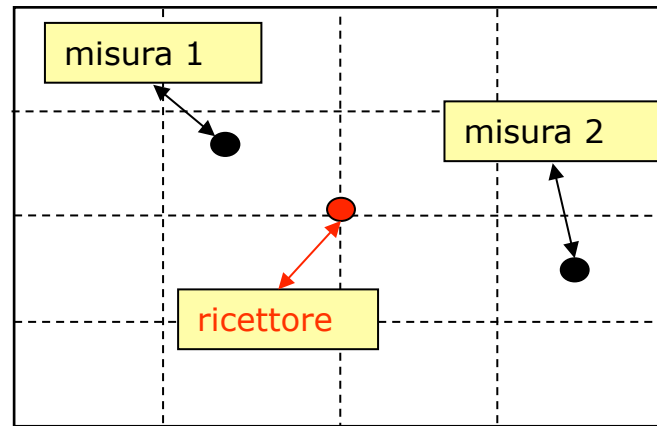
L'Optimal Interpolation permette di interpolare osservazioni localizzate arbitrariamente su una griglia regolare utilizzando un campo di fondo come prima approssimazione. Le osservazioni ed il campo di fondo possono contenere errori. L'OI costruisce il campo di analisi minimizzando le varianze degli errori delle osservazioni e del campo di fondo. Il campo ottenuto è ottimale, nel senso che ha la varianza minima.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{obs} + \mathcal{E}_{repr}$$



$$\mathcal{E}_{repr} = \mathcal{E}_{obs} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta x}{L_{repr}}}$$

## Optimal Interpolation



$$\begin{cases} C_a = C_b + a_1(C_1 - C_b) + a_2(C_2 - C_b) \\ D_a = D_b + b_1(D_1 - D_b) + b_2(D_2 - D_b) \end{cases}$$



$$\begin{pmatrix} C_a \\ D_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_b \\ D_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 - C_b & D_1 - D_b \\ C_2 - C_b & D_2 - D_b \end{pmatrix}$$



$$X^a = X^b + Wd$$

## Optimal Interpolation

L'analisi  $\mathbf{X}^A$  è determinata minimizzando il funzionale :

$$J(\mathbf{x}) \equiv (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) \\ + (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))$$



$$(1) \quad X^A = X^b + \underbrace{BH^T (HBH^T + R)^{-1}}_K (Y - HX^b)$$

dove:

**X<sup>b</sup>**: stato di fondo

**Y**: osservazione

**H**: operatore delle osservazioni (dallo spazio del modello alla misura)

**B**: matrice della covarianza dell'errore di fondo

**R**: matrice della covarianza dell'errore delle osservazioni

**K**: gain matrix

Il generico termine  $G_A$  che compare nell'espressione dipende dalla tecnica utilizzata per assimilare i dati sperimentali con il modello numerico come ad esempio:

- **Observational Data Assimilation (ODA)** : assimilazione di misure sperimentali distribuite *arbitrariamente*
- **Objective Analysis** : assimilazione da campi di analisi mediante interpolazione delle osservazioni su una griglia regolare considerando il modello come campo di background;
  - ✓ Optimal Interpolation (OI)
  - ✓ Successive Correction Method (SCM)

$$G_A(c_i, c_i^*) = f(r, c_i, c_i^*, \dots)$$



algoritmi più complessi necessitano sempre di maggiore tempo di calcolo



eventuale criticità dei sistemi automatici

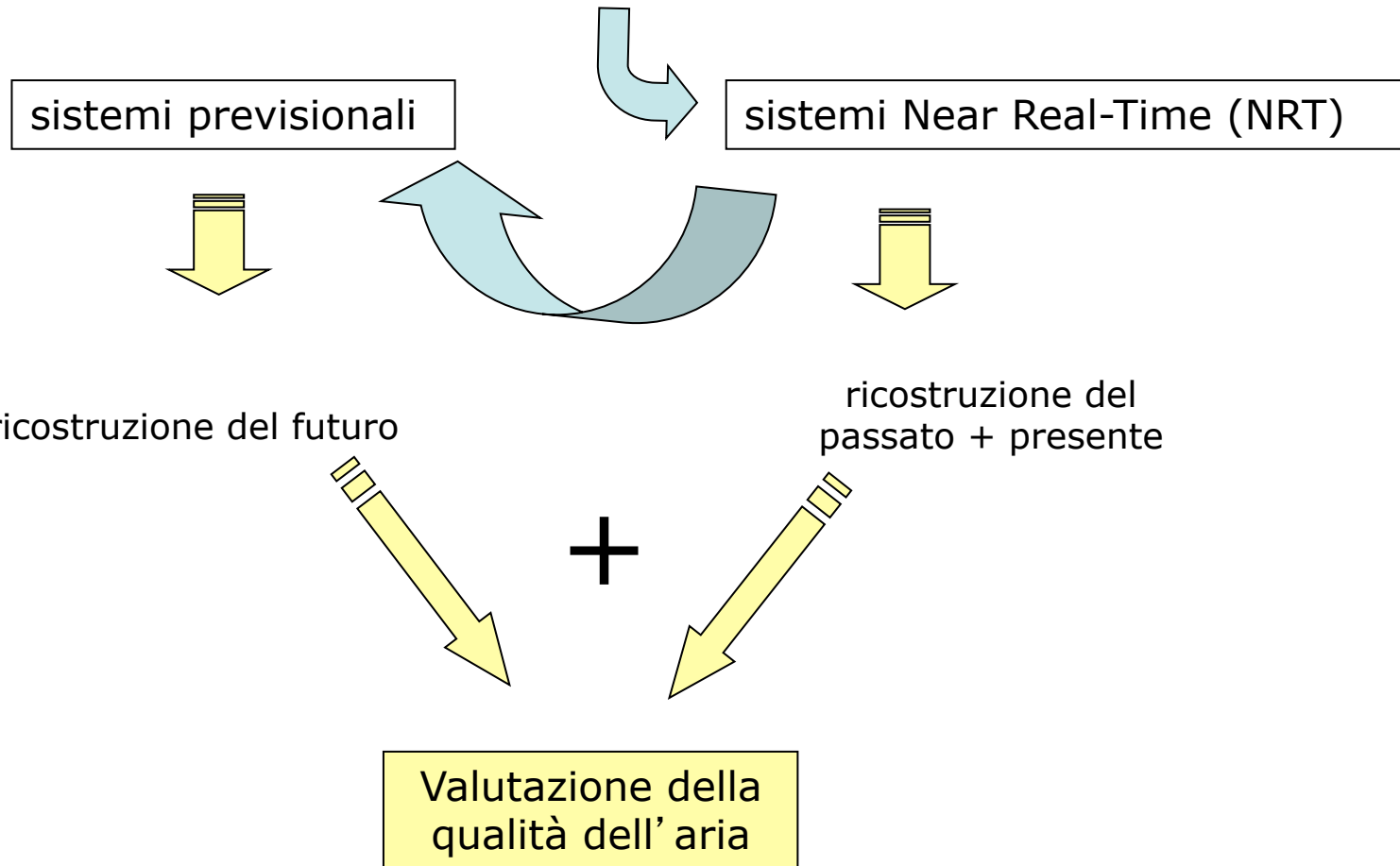


## APPLICAZIONI

- *Data assimilation (stato iniziale per un sistema previsionale);*
- ***Nowcasting ("Sistemi Near-Real Time");***

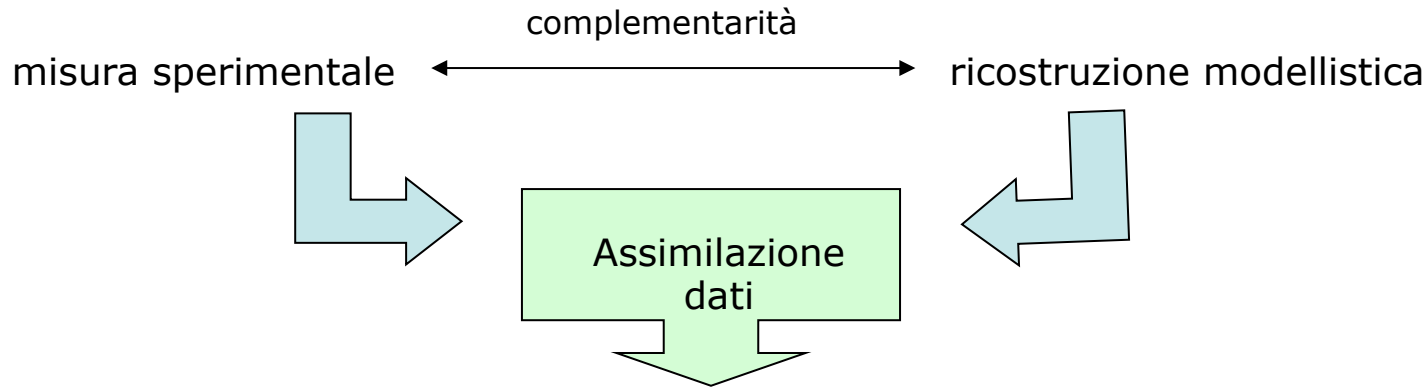
misure e modelli

misure sperimentali



## Sistemi automatici Near Real-Time (NRT)

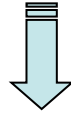
assimilazione



il processo attraverso il quale tutte le informazioni disponibili vengono usate al fine di ottenere la migliore stima possibile dello stato dell'atmosfera. Le informazioni disponibili consistono essenzialmente nelle osservazioni e nelle leggi fisiche che governano l'evoluzione del sistema. Queste ultime sono di fatto disponibili attraverso i modelli numerici

**Valutazione della  
qualità dell'aria  
sul territorio**

**Carenza degli inventari delle emissioni**



**Ricostruzione poco dettagliata**



**Esigenza di accoppiare costruttivamente le informazioni che provengono da una rete di monitoraggio e da un modello numerico**

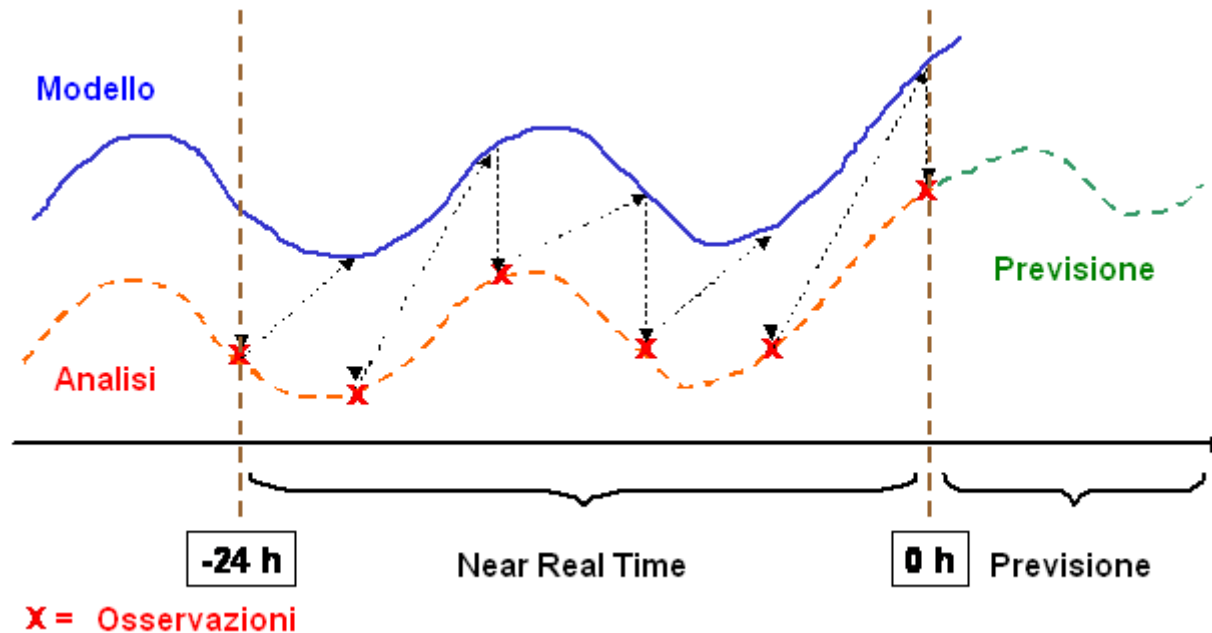
**Sistemi in grado di determinare sull'intero territorio la concentrazione degli inquinanti e in grado di fornire tali informazioni in tempo *quasi* reale**



**Sistemi automatici Near Real-Time (NRT)**

I sistemi Near Real-Time sono sistemi che hanno l'obiettivo di seguire e ricostruire il fenomeno in tempo *quasi* reale ricostruendo la distribuzione spaziale della concentrazione degli inquinanti tenendo conto delle osservazioni sperimentali in ogni istante di tempo.

Pertanto l'integrazione delle misure con i modelli numerici utilizzata per i sistemi Near Real-Time (NRT) segue un approccio profondamente differente da quello utilizzato per i sistemi previsionali



Quando il sistema modellistico funziona come sistema previsionale non è più possibile avere il conforto delle osservazioni durante la simulazione, pertanto il modello assorbe le informazioni che descrivono lo stato iniziale del sistema assimilato (al tempo  $t=0$ ) e prosegue con la simulazione fino a stimare la concentrazione più probabile nell'immediato futuro (generalmente fino a 72 ore).

Quanto è il ritardo temporale minimo con cui è possibile fornire le informazioni prodotte dal sistema NRT?

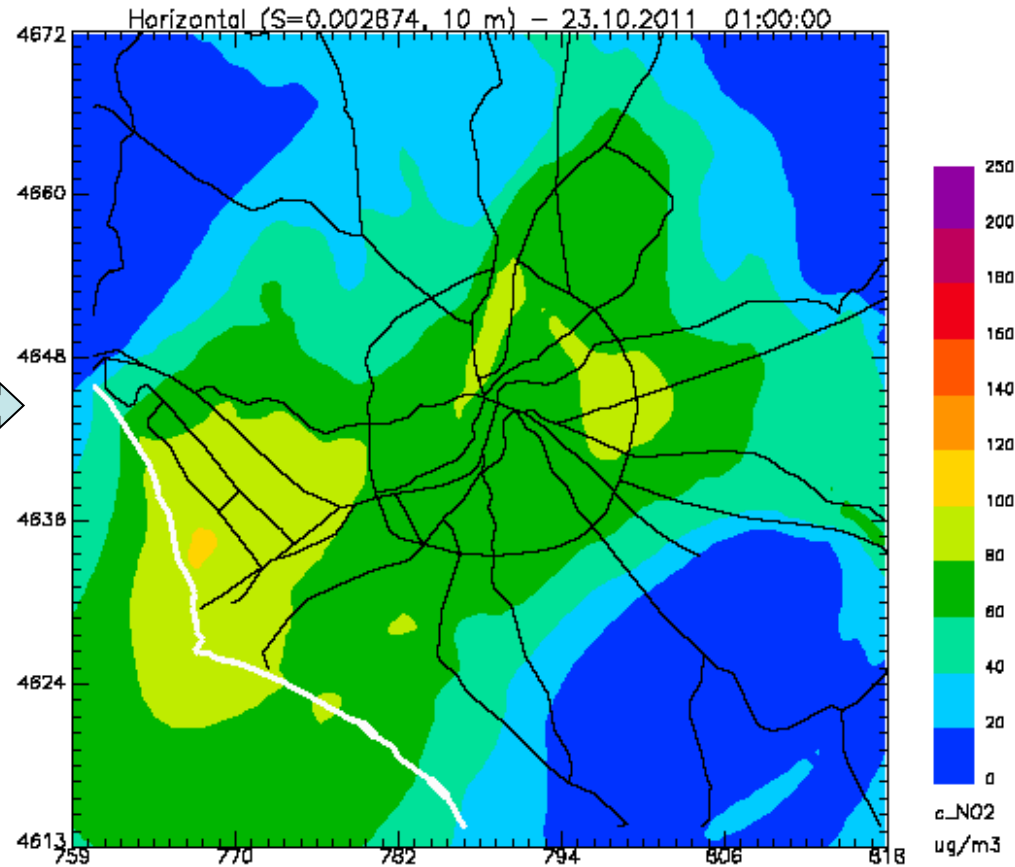
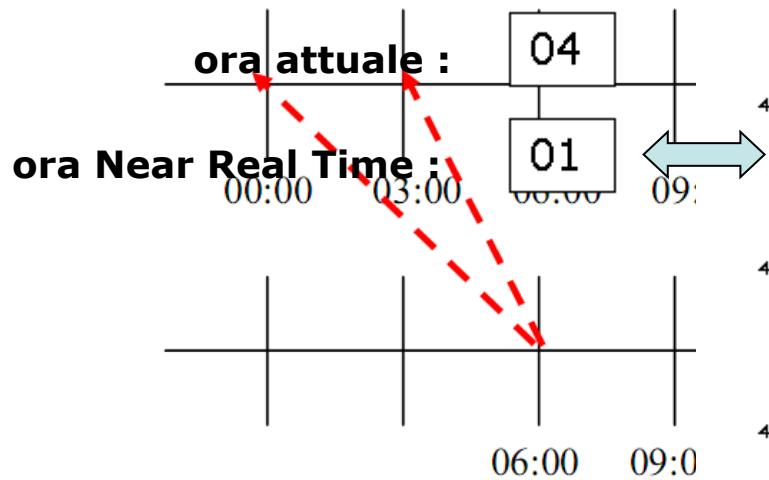
**Delay Time**

### Sistema Near-Real Time

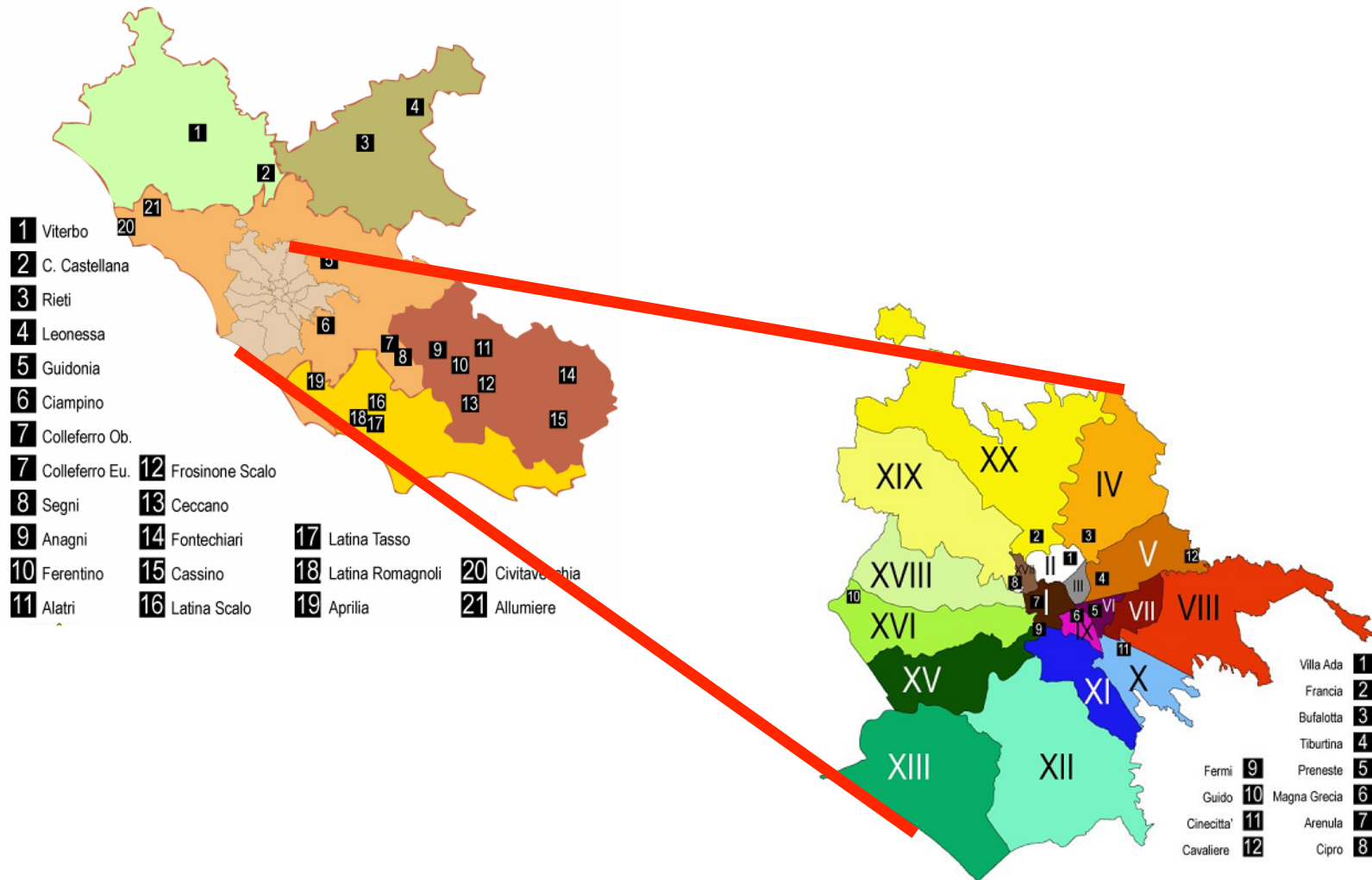
**NO<sub>2</sub> - 23/10/2011 (valori orari)**

tempo di acquisizione dei dati sperimentali dal centro regionale

temporizzazione di tutte le

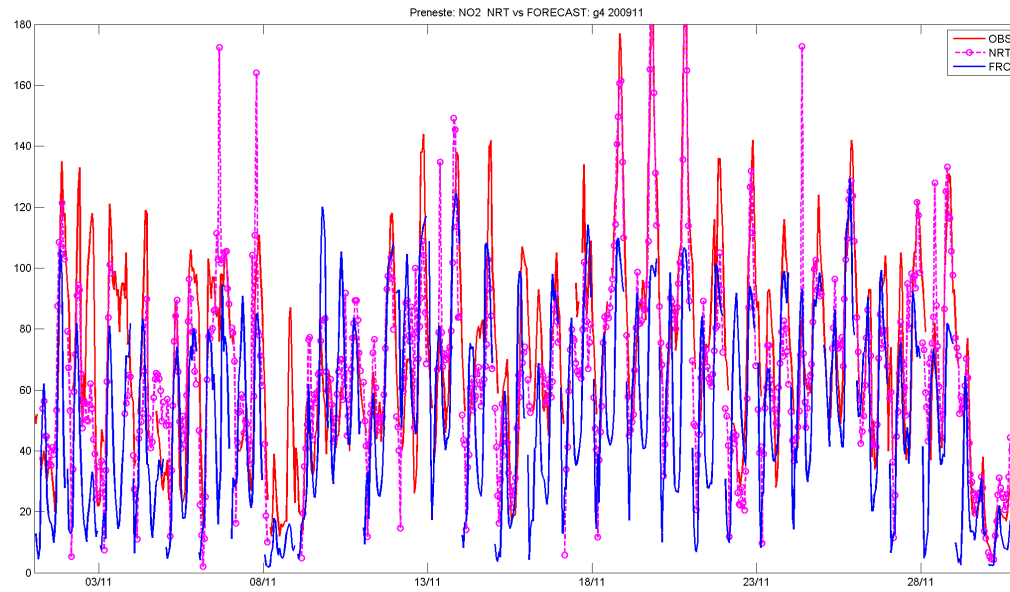


# rete di monitoraggio di Arpalazio CHIMICA



# Confronti

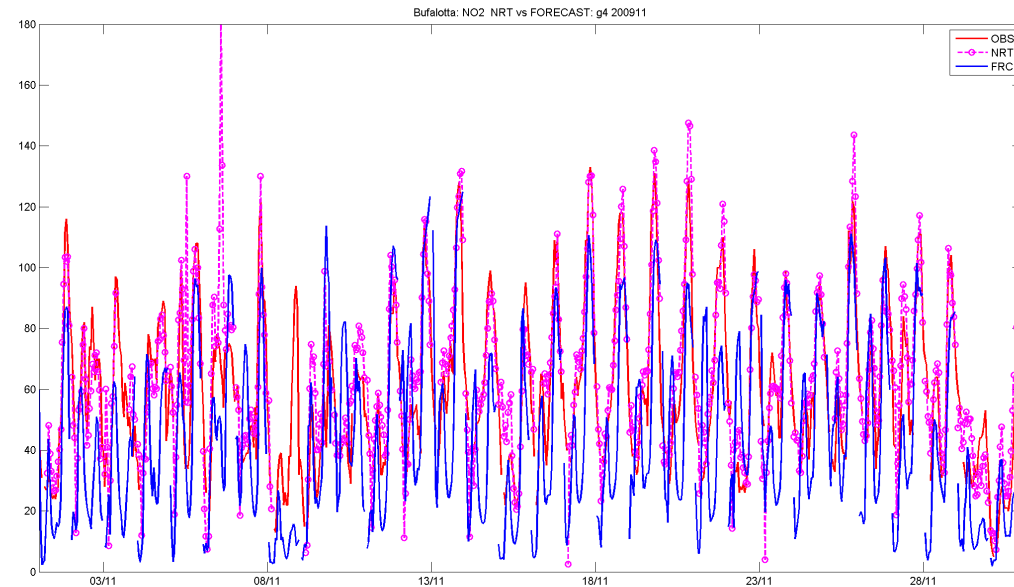
# applicazioni



NO<sub>2</sub> – Preneste  
(novembre 2009)

curva rossa → osservazioni;  
curva magenta → NRT;  
curva blu → previsioni

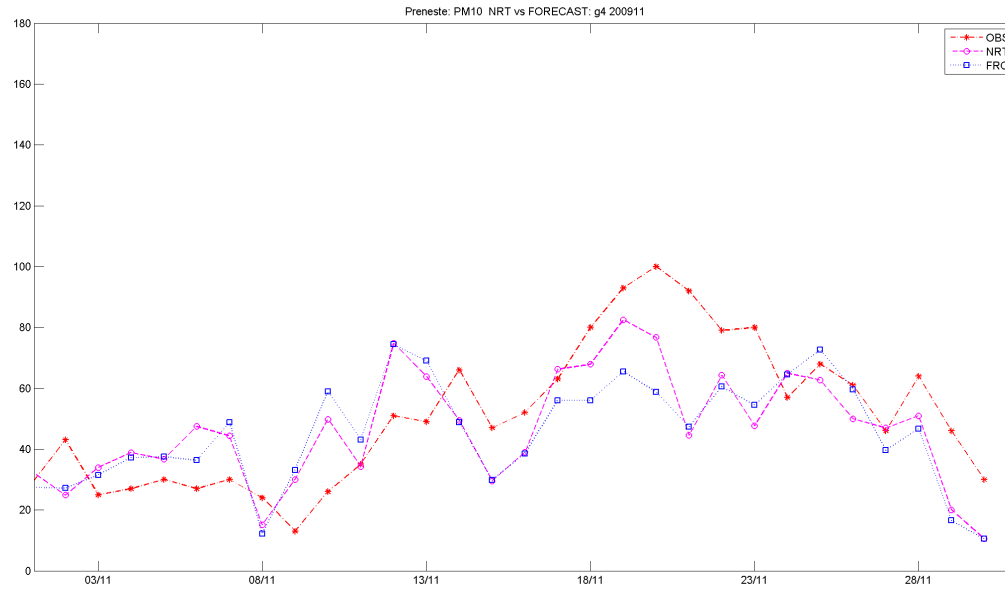
NO<sub>2</sub> – Bufalotta  
(novembre 2009)





# Confronti

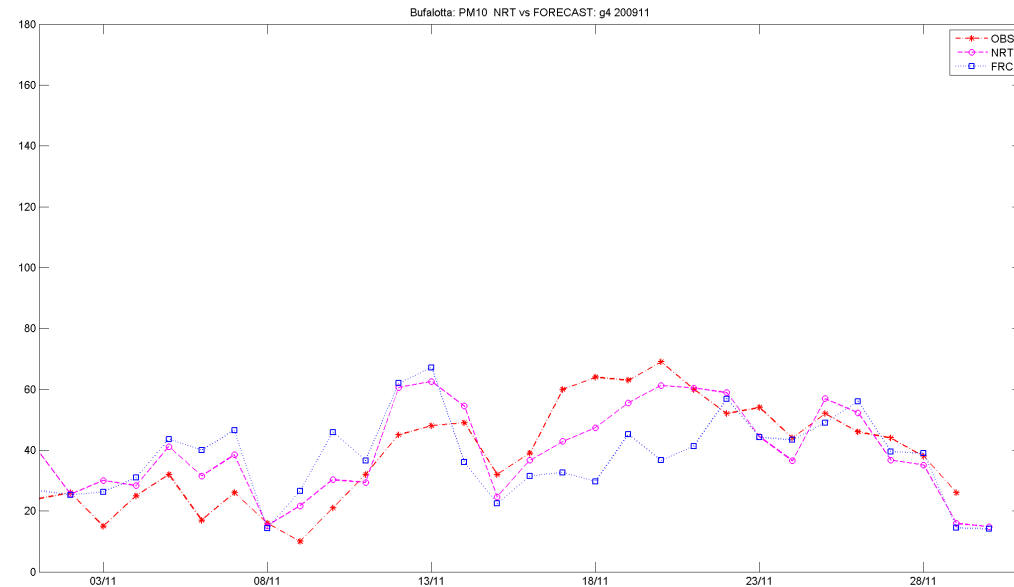
applicazioni



## PM10 – Preneste (novembre 2009)

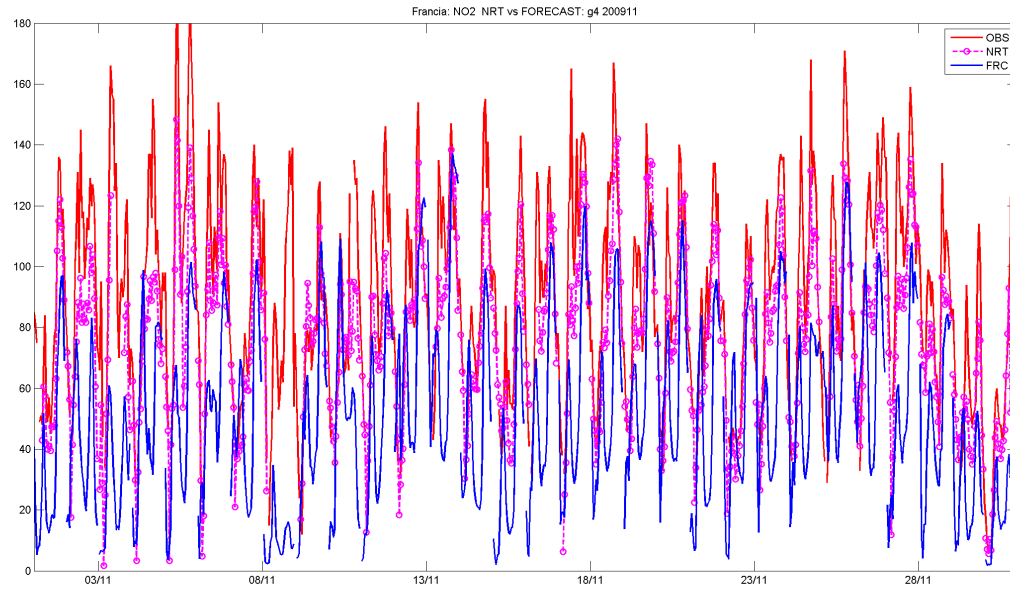
curva rossa → osservazioni;  
curva rosa → NRT;  
curva blu → previsioni

## PM10 – Bufalotta (novembre 2009)



# Confronti

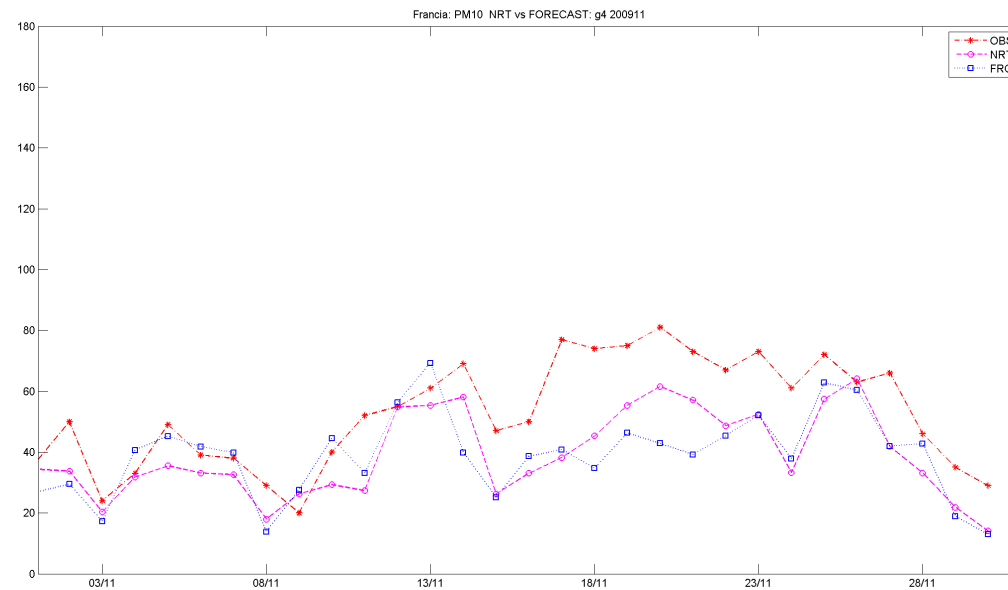
applicazioni



## NO<sub>2</sub> – Francia (novembre 2009)

curva rossa → osservazioni;  
curva rosa → NRT;  
curva blu → previsioni

## PM10 – Francia (novembre 2009)



raggio di influenza/**errore associato alla misura**

stabilisce un volume di spazio, intorno al punto di misura sia in orizzontale che lungo la verticale, all'interno del quale *si* deve descrivere **come** la misura debba influenzare il calcolo della concentrazione ricostruita dal modello

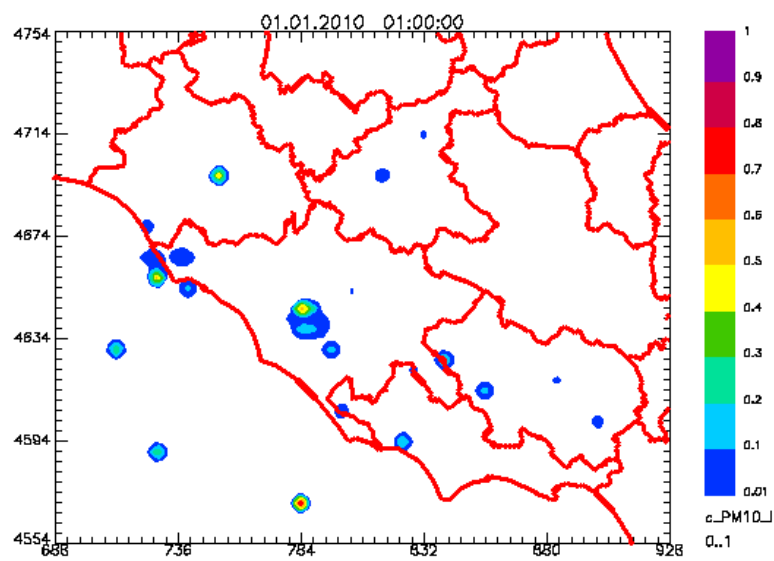
**rappresentatività**



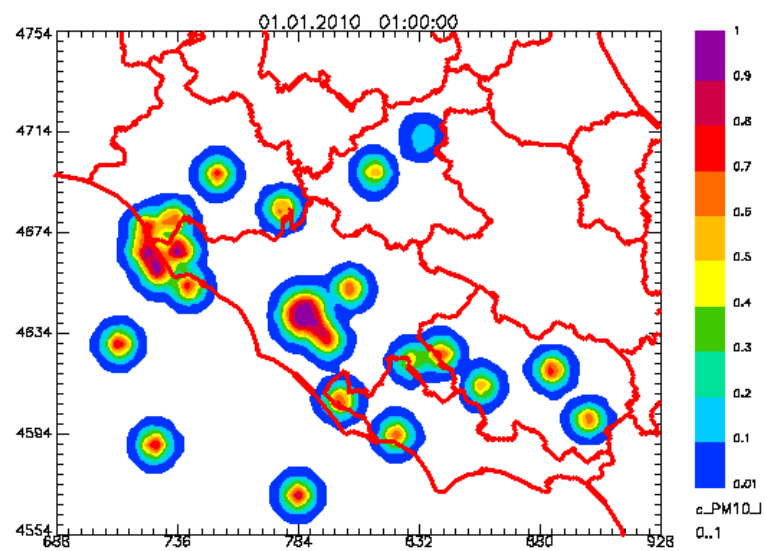
- la tipologia del punto di misura (ad esempio traffico, industriale o di fondo);
- la caratteristica della zona (ad esempio urbana, rurale, suburbana).

Non esiste un criterio standard di assegnazione del raggio di influenza ad ogni punto di misura ma la scelta va fatta per ogni caso specifico in funzione quindi della cosiddetta rappresentatività del punto di misura stesso.

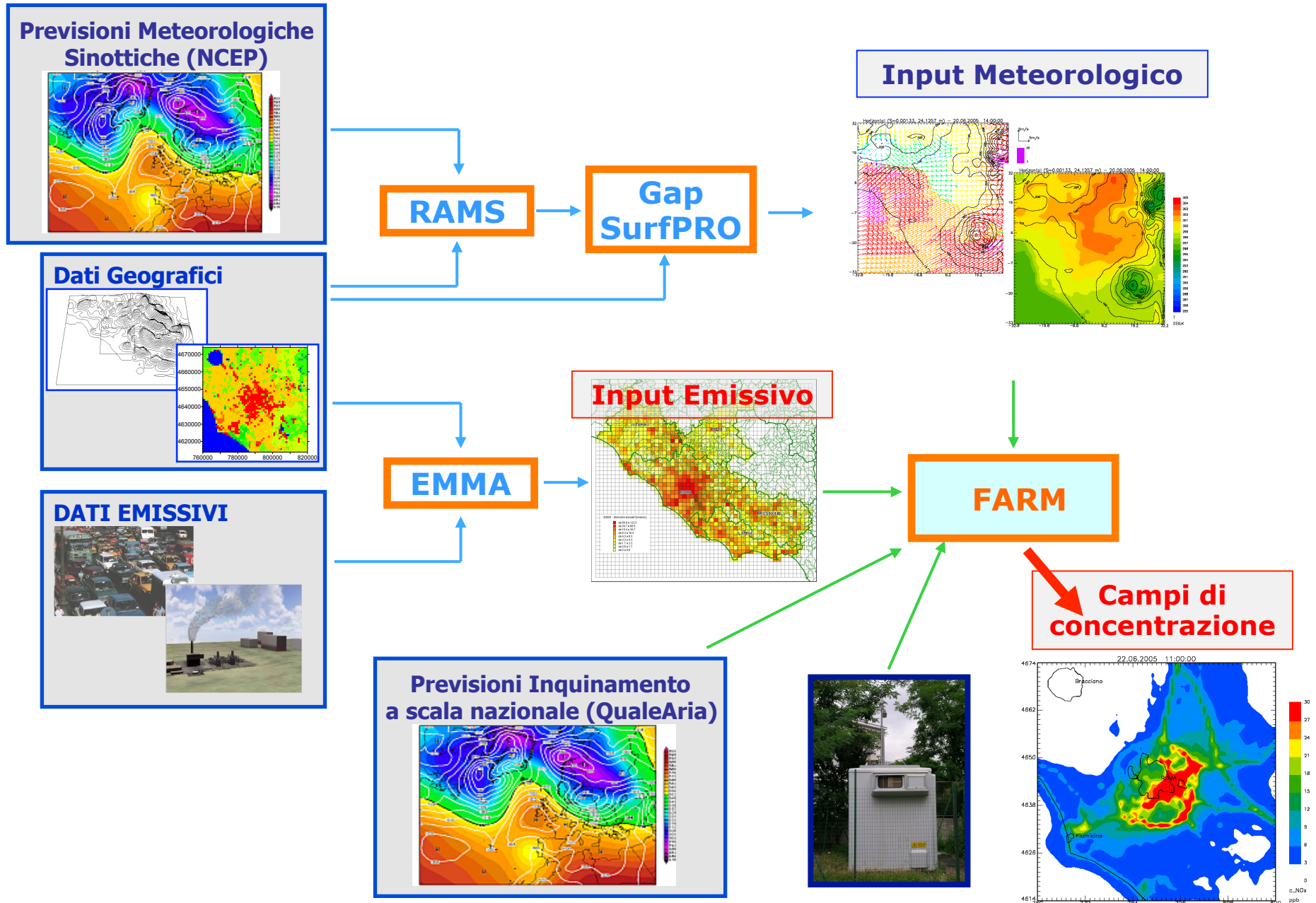
R piccolo



R grande

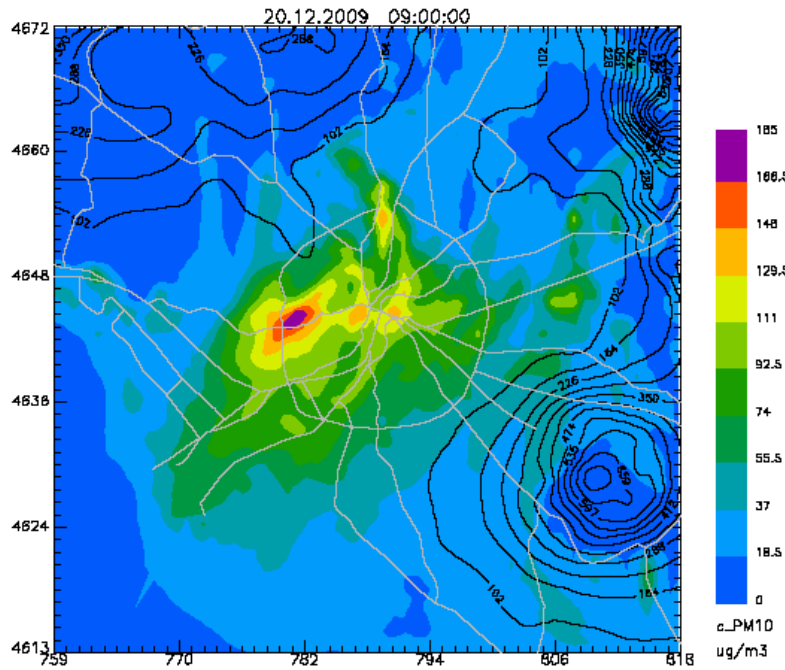


# Modello Euleriano

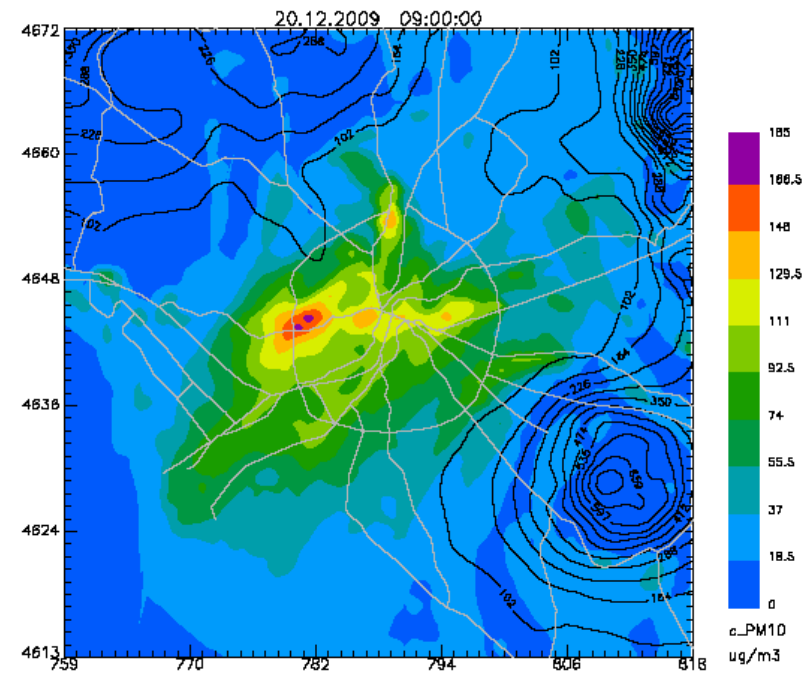


Confronti

applicazioni



← PM10 - previsionale  
(senza assimilazione)

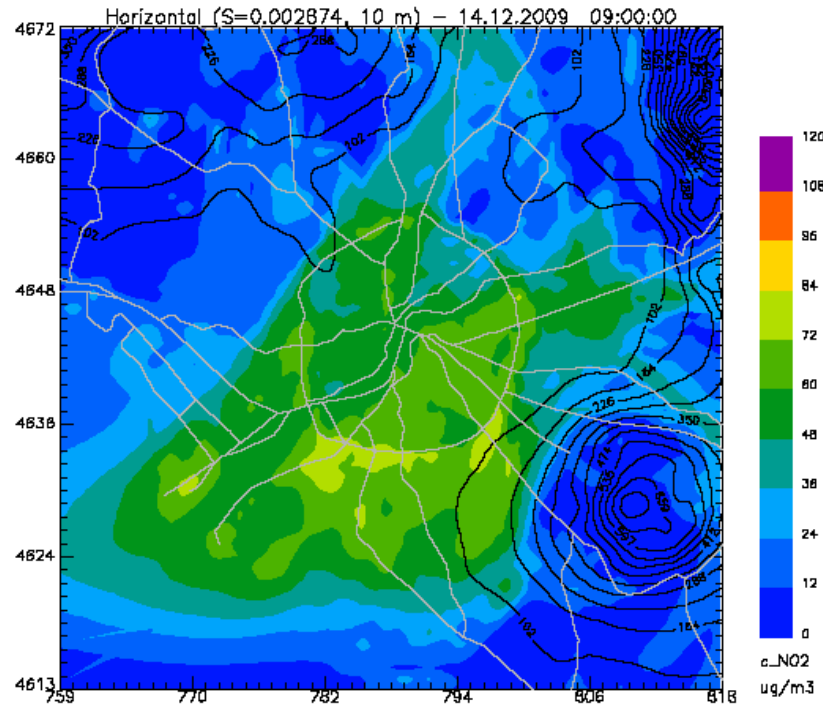


PM10 - Near Real Time  
(con assimilazione)



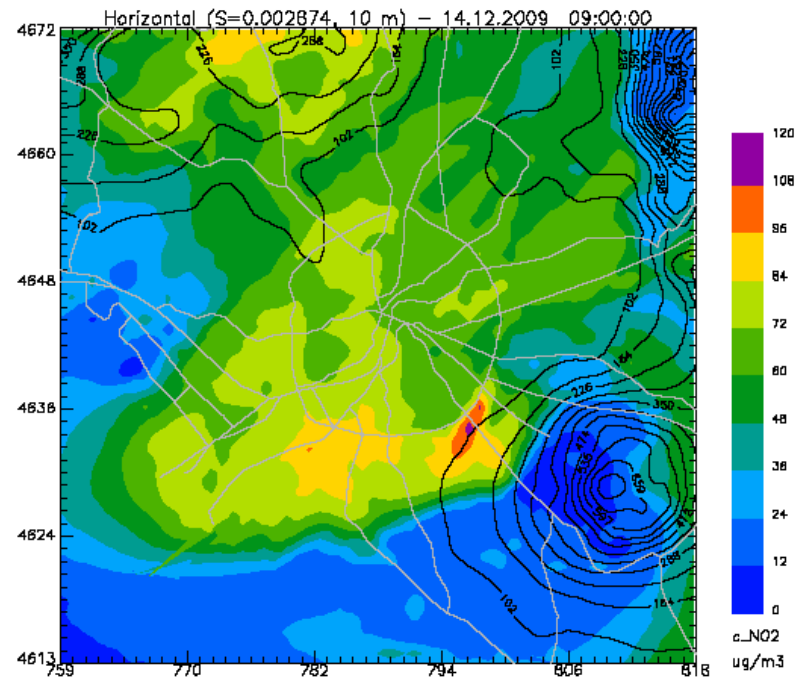
Confronti

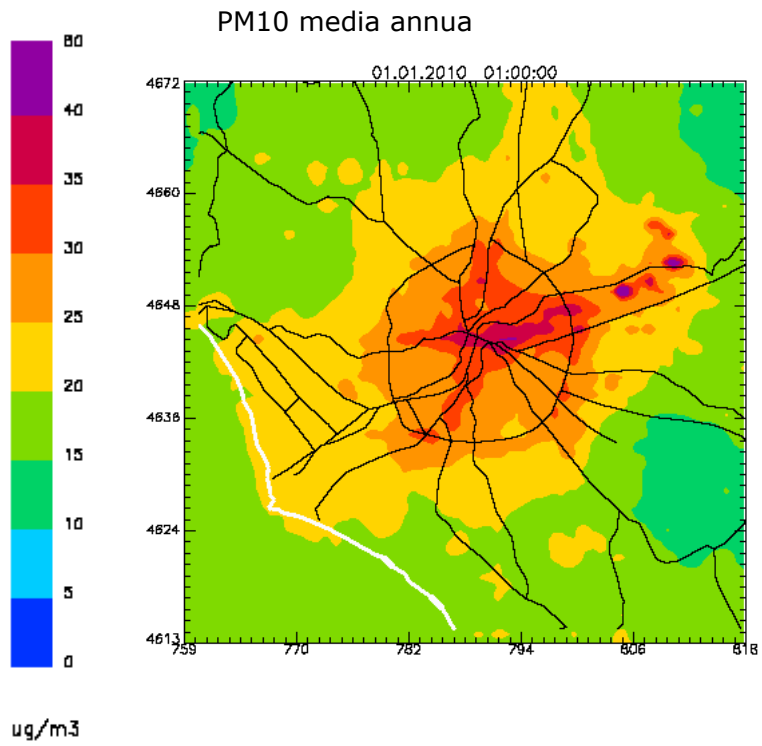
applicazioni



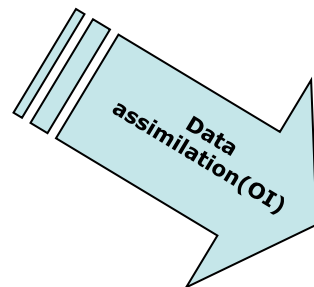
NO<sub>2</sub> - Near Real Time  
(con assimilazione)

← NO<sub>2</sub> - previsionale  
(senza assimilazione)

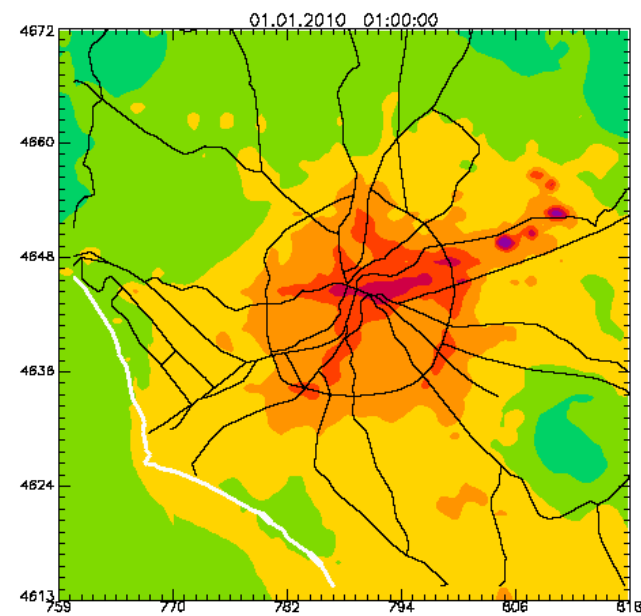




2010

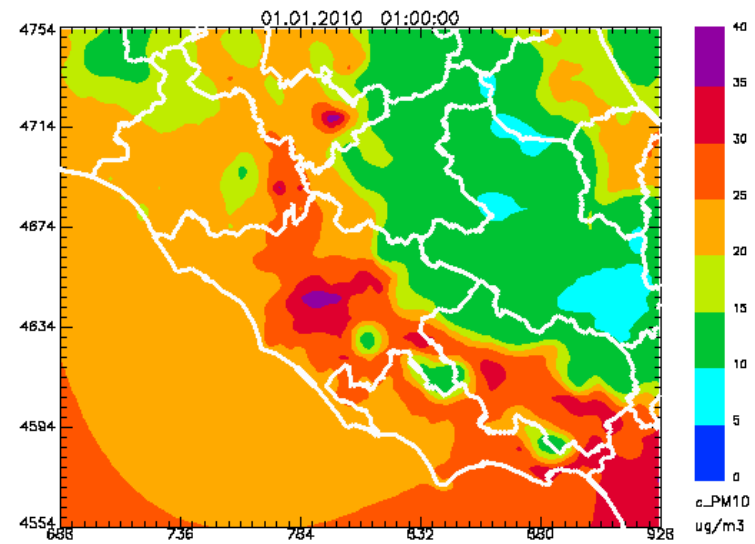
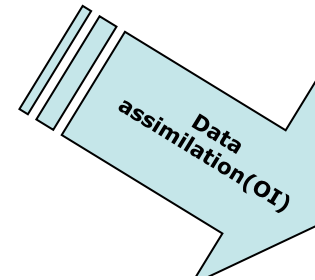
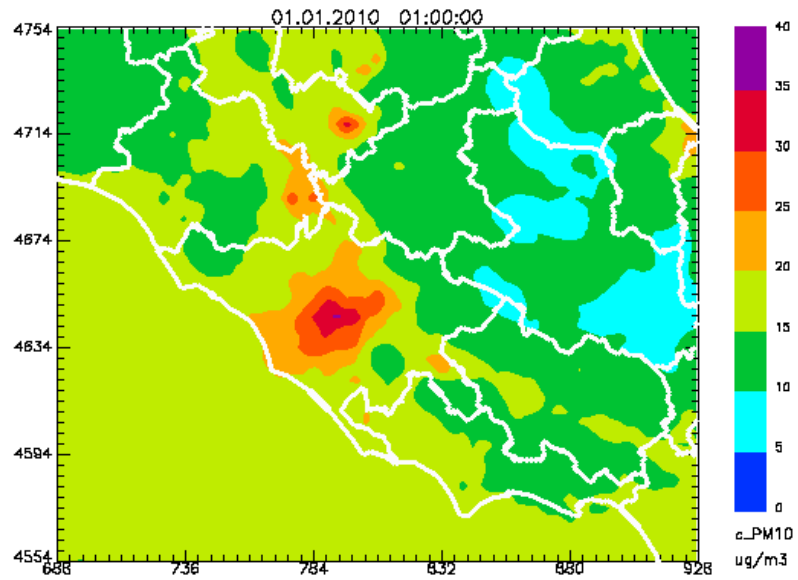


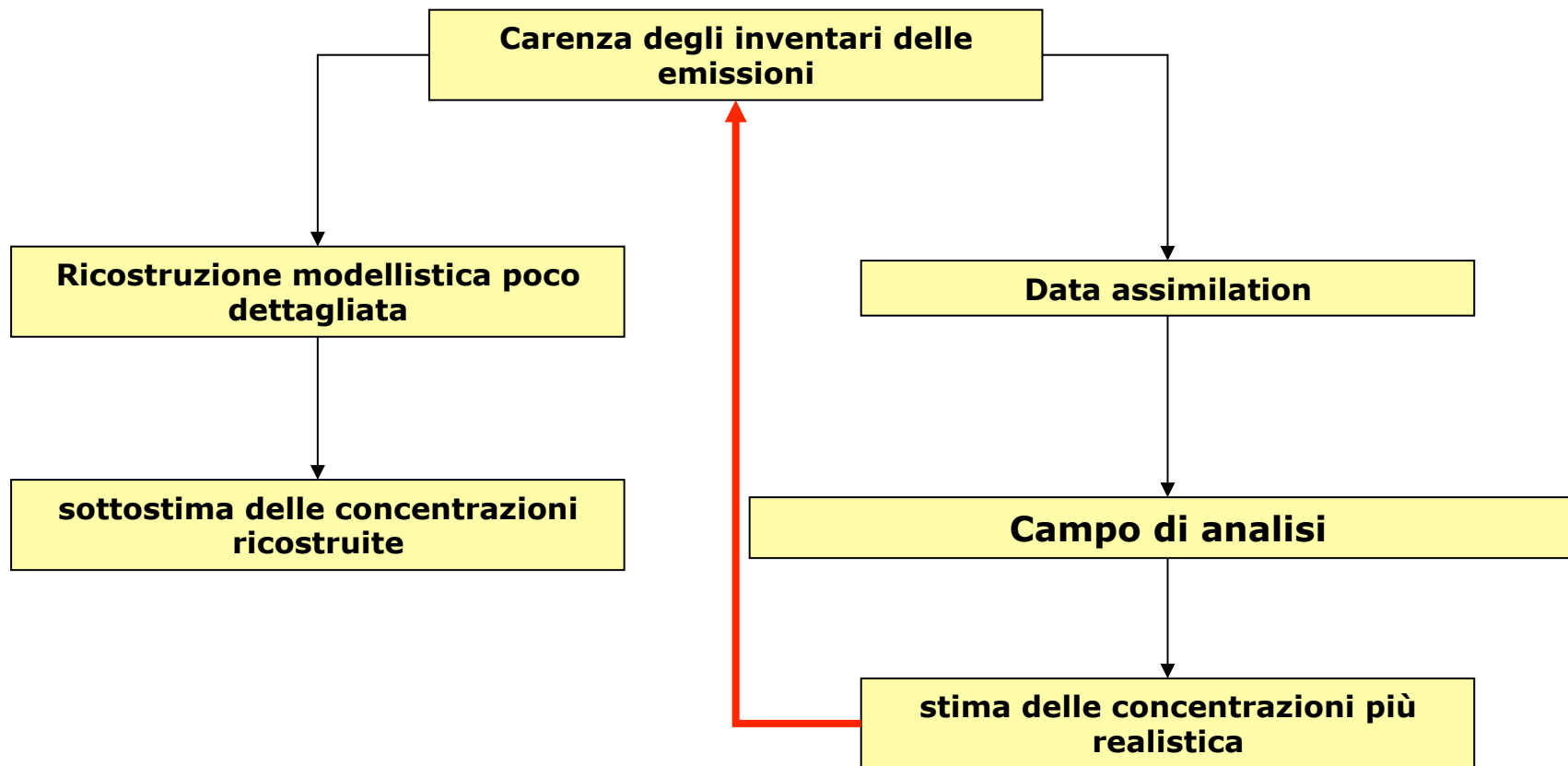
PM10 media annua con assimilazione





2010





Grazie per  
l'attenzione