



**ALLEGATO 5L IL “SISTEMA DI MODELLI CALPUFF” ED APPLICAZIONE
ALL’AREA OGGETTO DI STUDIO**

Il sistema di modelli CALPUFF, inserito dall'U.S.EPA in Appendix A di “Guideline on Air Quality Models”, è stato sviluppato da Sigma Research Corporation, ora parte di Eart Tech Inc, con il contributo di California Air Resources Board (CARB).

Il sistema di modelli è composto da tre componenti:

- Il preprocessore meteorologico CALMET: utile per la ricostruzione del campo tridimensionale di vento e temperatura all'interno del dominio di calcolo;
- Il processore CALPUFF: modello di dispersione, che ‘inserisce’ le emissioni all'interno del campo di vento generato da Calmet e ne studia il trasporto e la dispersione;
- Il postprocessore CALPOST: ha lo scopo di manipolare i dati di output di Calpuff, in modo da renderli disponibili nel formato più adatto alle esigenze dell'utente.

CALMET è un preprocessore meteorologico di tipo diagnostico, in grado di riprodurre campi tridimensionali di vento e temperatura e campi bidimensionali di parametri descrittivi della turbolenza. È adatto a simulare il campo di vento su domini caratterizzati da orografia complessa. Il campo di vento viene ricostruito attraverso stadi successivi, in particolare un campo di vento iniziale (spesso vento geostrofico), viene aggiustato per tenere conto degli effetti orografici, tramite interpolazione dei dati misurati alle centraline di monitoraggio e tramite l'applicazione di specifici algoritmi in grado di simulare l'interazione tra il suolo e le linee di flusso. Calmet è dotato infine di un modello micrometeorologico, per la determinazione della struttura termica e meccanica (turbolenza) degli strati inferiori dell'atmosfera.

CALPUFF è un modello di dispersione ‘a puff’ multi-strato non stazionario. È in grado di simulare il trasporto, la dispersione, la trasformazione e la deposizione degli inquinanti, in condizioni meteorologiche variabili spazialmente e temporalmente. Calpuff è in grado di utilizzare campi meteorologici prodotti da Calmet, oppure, in caso di simulazioni semplificate, di assumere un campo di vento assegnato dall'esterno, omogeneo all'interno del dominio di calcolo. Calpuff contiene diversi algoritmi, che gli consentono, opzionalmente, di tenere conto di diversi fattori, quali: l'effetto scia dovuto agli edifici circostanti (building downwash) o allo stesso camino di emissione (stack-tip downwash), shear verticale del vento, deposizione secca ed umida, trasporto su superfici d'acqua e presenza di zone costiere, presenza di

orografia complessa, ecc. Calpuff è infine in grado di trattare diverse tipologie di sorgente emissiva, in base essenzialmente alle caratteristiche geometriche: sorgente puntiforme, lineare, areale, volumetrica.

CALPOST consente di manipolare i dati di output forniti da Calpuff, in modo da ottenere i risultati in un formato adatto alle esigenze dell'utente. Tramite Calpost si possono ottenere dei file di output direttamente interfacciabili con software grafici per l'ottenimento di mappe di concentrazione.

Per quanto detto, il sistema di modelli CALPUFF risulta uno strumento molto versatile, facilmente adattabile alle varie possibili realtà oggetto di studio. Inoltre, grazie ai numerosi algoritmi che possono essere opzionalmente adoperati, consente di eseguire un certo studio con diverso livello di dettaglio, a seconda delle esigenze dell'utente.

Il Sistema di Modelli Calpuff risulta uno strumento particolarmente indicato nel caso di aree di studio caratterizzate da orografia piuttosto complessa. L'orografia è infatti un fattore determinante nello studio della dispersione degli inquinanti. Il 'Sistema di Modelli Calpuff' tiene conto degli effetti orografici a più livelli:

- Calmet elabora il campo tridimensionale di vento tenendo conto della presenza dell'orografia, utilizzando degli algoritmi di tipo empirico-semiempirico. Il modello meteorologico tiene dunque conto della modificazione del campo di vento dovuto alla presenza degli ostacoli su scala più ampia.
- Calpuff tiene conto degli effetti dell'orografia su scala più piccola, e cioè in termini di interazione tra nube e rilievo. Nel caso cioè di nube che tende ad impattare un rilievo, viene valutata la tendenza delle linee di flusso ad aggirare l'ostacolo piuttosto che a scavalcarlo, in funzione della geometria caratteristica e delle condizioni meteorologiche.

5L1.1

IL MODELLO CALPUFF APPLICATO A SALANDRA

La scelta di utilizzare un modello relativamente complesso quale il Sistema di Modelli Calpuff è stata dettata dal fatto che la morfologia del territorio compreso nell'area vasta risulta piuttosto complessa, rendendo estremamente variabile da punto a punto del dominio di calcolo il regime dei venti.

L'utilizzo di modelli stazionari, quali ad esempio ISC3 o Dimula, comporta l'assunzione di un campo di vento omogeneo ed uniforme su tutto il dominio di calcolo, condizione troppo approssimativa per questo studio.

Tramite l'utilizzo del preprocessore meteorologico CALMET, si è dunque proceduto allo studio del campo di vento nella zona. La base di partenza è costituita dai dati meteorologici relativi alla stazione meteo SMAM-ENAV di Ferrandina. I dati meteorologici disponibili dalla pubblicazione ENEL, però, riportano solamente delle elaborazioni statistiche dei parametri meteorologici, mentre Calmet, essendo un modello non stazionario, necessita di dati in successione temporale.

Per ovviare a tale inconveniente, si è allora proceduto definendo, in base ai dati statistici, un anno tipico. Per ogni particolare condizione meteorologica (definita attraverso la velocità del vento, direzione del vento, classe di stabilità atmosferica) sono state calcolate il numero medio di ore anno di presentazione. Con tale artificio è stato ricostruito quindi un intero anno 'tipico'. I dati statistici però non danno alcuna informazione sulla persistenza di particolari condizioni meteorologiche. Ad esempio, se una particolare condizione si presenta per 10 ore/anno, non si hanno informazioni sul fatto che tali ore possano essere consecutive piuttosto che sparse nell'arco dell'anno. Nel caso di modelli stazionari (quali ad esempio Dimula o ISC3) tale dato non ha importanza, mentre nel caso di modelli non stazionari (quali il Sistema di Modelli Calpuff) tale dato presenta una certa influenza. Non avendo elementi per distribuire gli eventi nel corso dell'anno, si è scelto di considerare le ore appartenenti ad una stessa condizione meteorologica come consecutive, al fine di eseguire un'analisi conservativa.

In questo modo ci si avvicina, per grado di conservatività, ai modelli stazionari, pur mantenendo il vantaggio di utilizzare un campo di vento variabile spazialmente. Essendo però il modello Calmet dotato di un sottomodello micrometeorologico, non è stato sempre possibile porre le stesse condizioni meteo come consecutive. Calmet infatti calcola internamente alcuni parametri fondamentali, quali la classe di stabilità atmosferica, l'altezza di miscelamento, l'eventuale presenza di inversioni termiche, il grado di turbolenza, ecc. in base a diversi fattori, tra i quali l'inclinazione dei raggi del sole e intensità del vento. Per tale motivo, nelle simulazioni non si possono includere condizioni tipiche del giorno nelle ore notturne, altrimenti a tali condizioni verrebbero associati internamente dal modello parametri meteorologici e micrometeorologici non adeguati.

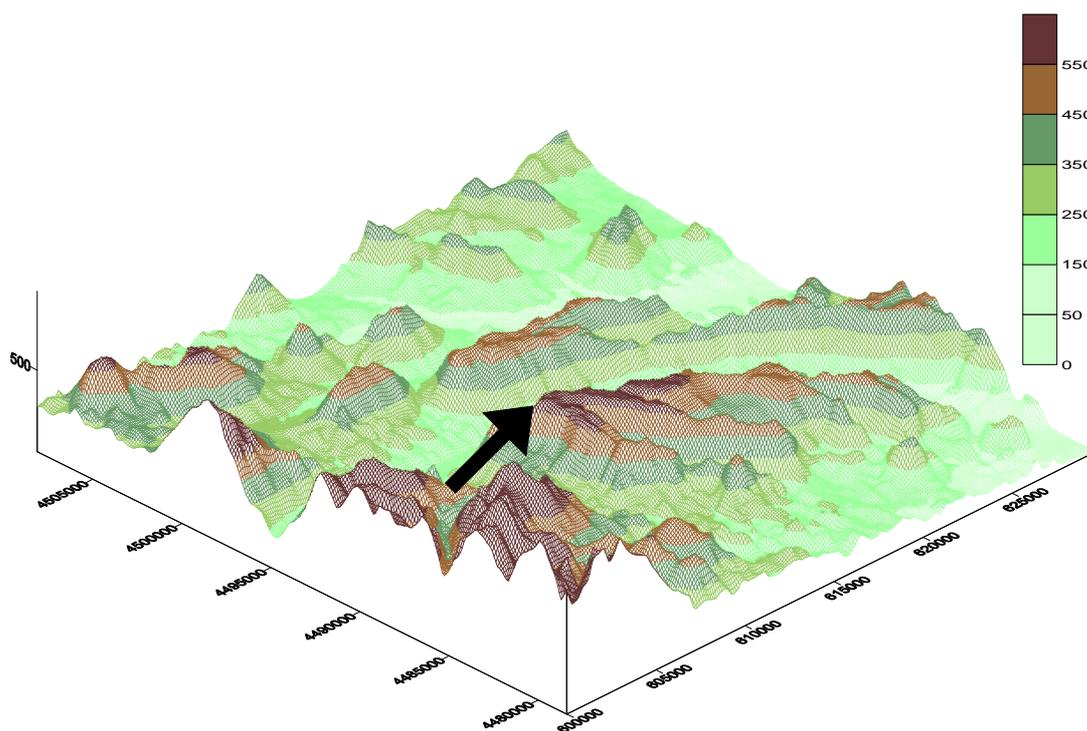
Talvolta è stato quindi necessario spezzare le 'catene' di condizioni meteorologiche simili perché l'orario non permetteva una buona caratterizzazione. Al fine di verificare la bontà delle scelte fatte è stata a posteriori verificata la consistenza della stabilità atmosferica calcolata internamente dal modello con le statistiche disponibili dai dati della pubblicazione ENEL.

Scelta del dominio di Calcolo

Nello studio del campo di vento è stata presa in considerazione, in modo dettagliato, l'orografia della zona, descritta attraverso un grigliato di 100x100 celle (10000 punti) di 300 metri di lato ciascuna. Il dominio di calcolo utilizzato è dunque di 30x30 km. Quando viene effettuata la ricostruzione del campo di vento in una zona, è sempre consigliabile utilizzare un dominio di calcolo più vasto rispetto a quello soggetto a ricadute significative. Questo perché l'effetto della fisionomia del terreno può risentirsi fino a qualche chilometro di distanza, per cui alle zone vicino ai 'bordi' del dominio di calcolo potrebbe essere associato un campo di vento solo parzialmente ricostruito.

L'area simulata, con l'altimetria, è riportata nella *Figura 5L1.1a*. Il sito è posto nel fondovalle, nella zona indicata dalla freccia; le coordinate sono indicate nel sistema di riferimento UTM.

Figura 5L1.1a Dominio di Calcolo e Caratteristiche Orografiche.



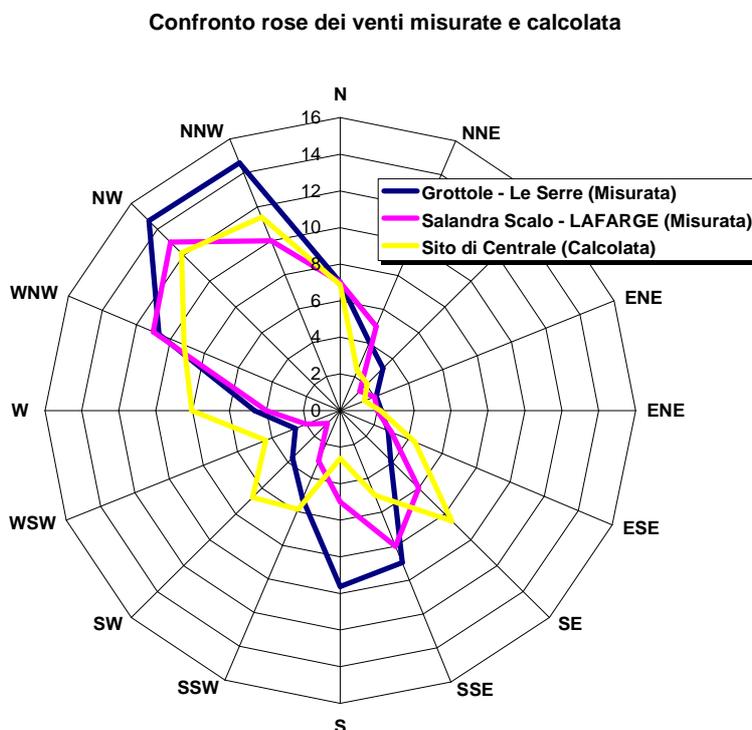
Validazione del modello

Per la validazione del modello, è stato calcolato il regime anemologico nei pressi del Sito di Centrale, e poi ricostruita la rosa dei venti relativa. Dopo è

stata confrontata tale rosa dei venti con quella misurata presso lo stabilimento LAFARGE BRASS e con quella derivante dai dati della centralina dell'ALSIA di Grottole – Da Serre.

La *Figura 5L1.1b* mostra il confronto tra la rosa dei venti costruita presso il sito attraverso l'utilizzo di Calmet, con la rosa dei venti costruita attraverso i dati della campagna di misura LAFARGE-BRASS e quella relativa alle misurazioni della centralina dell'ALSIA di Grottole –Da Serre.

Figura 5L1.1b Confronto tra la Rosa dei Venti ricostruita presso il Sito con Calmet, con le rose dei venti misurate alle stazioni meteo LAFARGE e ALSIA



Dall'esame delle rose dei venti calcolate e misurate, emerge che l'output del modello risulta in linea con le misurazioni svolte. Si tenga conto che le discrepanze, seppur lievi, possono essere dovute, oltre che agli inevitabili errori del modello, anche agli effetti orografici, che in un territorio dalla morfologia complessa possono creare discrepanze significative anche a brevi distanze.

La similitudine tra i risultati del modello e le rose dei venti misurate consente quindi di validare il modello Calmet per lo studio del campo di vento ed allo

stesso tempo consente di effettuare una ulteriore convalida dei dati relativi alla stazione SMAM-ENAV di Ferrandina, relativi al ventennio 1953-1972, utilizzati nel modello e presi come riferimento per la descrizione meteoroclimatica della zona.

Nelle *Figure 5L1.1c,d* si riportano degli esempi di ricostruzione del campo di vento nella zona, relativi ad alcune delle condizioni meteorologiche più frequenti. In figura è riportata l'altimetria e le coordinate UTM (in km); le frecce blu rappresentano la direzione del vento.

Figura 5L1.1c Ricostruzione del campo cinetico in caso di atmosfera neutrale e vento, alla stazione di Ferrandina, di 3m/s da Nord-Ovest

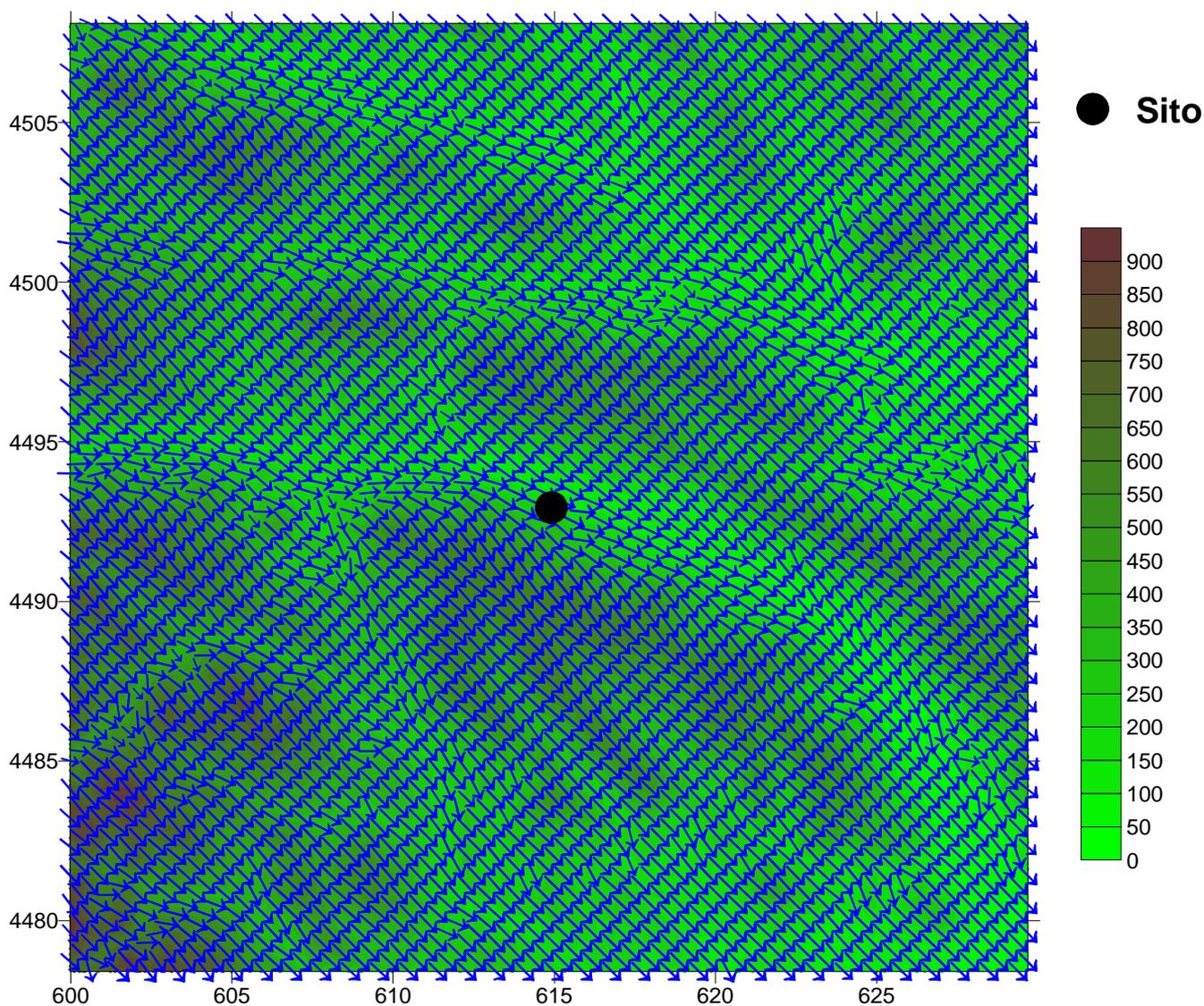
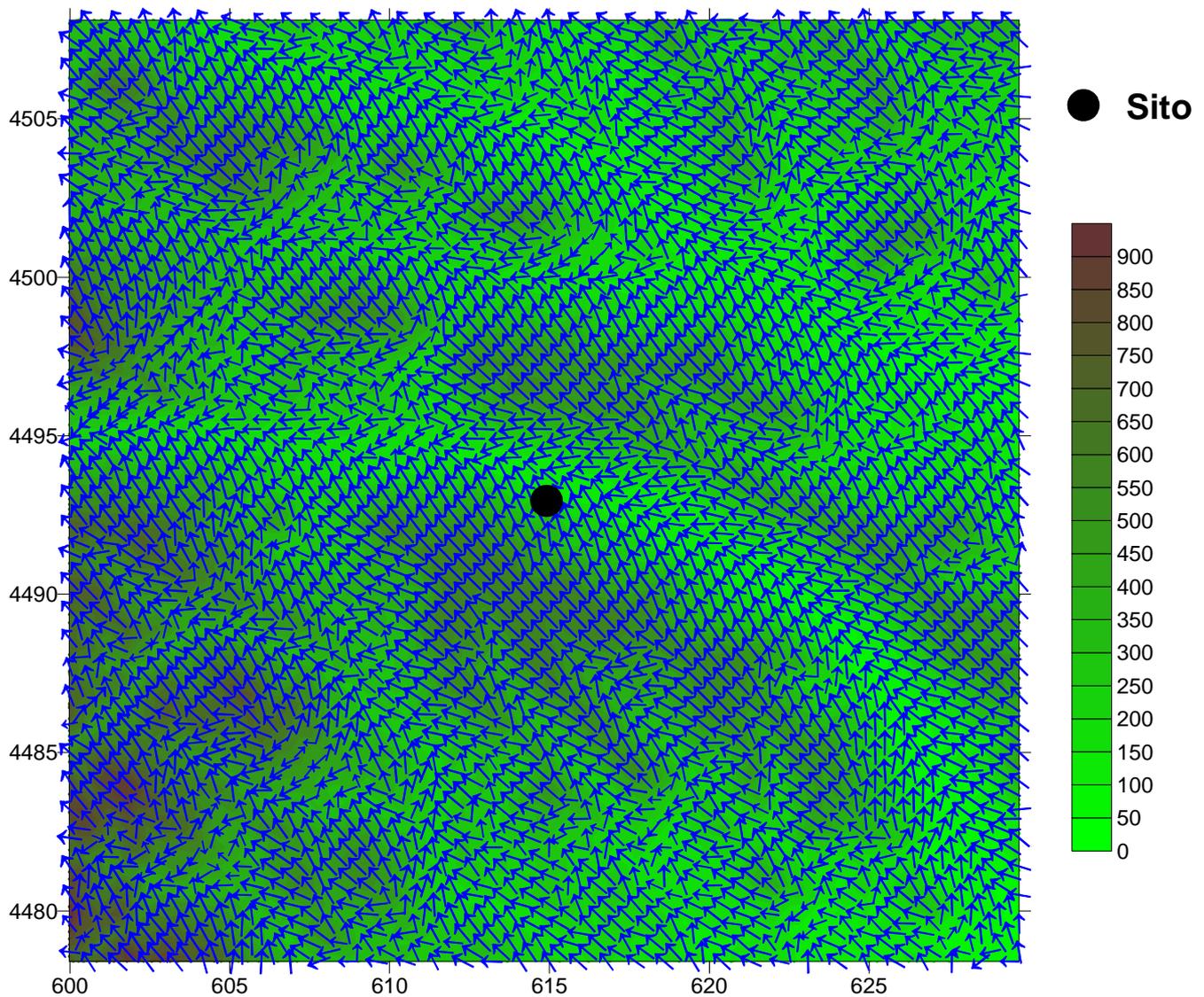


Figura 5L1.1d Ricostruzione del campo cinetico in caso di atmosfera stabile e vento, alla stazione di Ferrandina, di 1m/s da Sud-Est



Le calme di vento

Il 'Sistema di Modelli Calpuff', a differenza della maggior parte dei modelli gaussiani stazionari, è in grado di simulare episodi di calma di vento. Tali eventi sono stati simulati assumendo come nulla la velocità media del vento, ma tenendo conto della componente fluttuante in termini di un aumento dei coefficienti di dispersione atmosferica e quindi della diffusività turbolenta. In caso di calma di vento si ottiene dunque una dispersione degli inquinanti

uniforme in tutte le direzioni; le concentrazioni al suolo, tuttavia, non risultano altrettanto uniformi a causa dell'influenza dell'orografia.

L'incidenza delle calme di vento nei pressi del sito risulta tuttavia abbastanza trascurabile, attestandosi attorno al 10%.

Innalzamento del pennacchio, altezza di miscelamento e inversioni termiche

Oltre il vento, vi sono delle altre caratteristiche atmosferiche che giocano un ruolo di primo piano nella dispersione degli inquinanti:

- inversioni termiche;
- altezza di miscelamento;
- turbolenza atmosferica.

L'inversione termica è un'anomalia nel profilo verticale di temperatura, per la quale, con l'aumentare della quota, si ha un aumento anziché una diminuzione di temperatura. Le inversioni termiche non si protraggono per tutta l'atmosfera, ma hanno luogo solo in certi strati; sono cioè caratterizzate da un certo spessore, sopra e sotto il quale l'andamento della temperatura risulta decrescente con la quota. La base dell'inversione, cioè la quota alla quale la temperatura diventa crescente con l'aumentare dell'altezza, può essere anche al suolo: si parla in tal caso di inversione al suolo; negli altri casi di inversione in quota.

Le inversioni al suolo sono tipiche delle ore notturne con cielo sereno o poco nuvoloso e bassa velocità del vento: l'irraggiamento inverso del terreno verso lo spazio causa un rapido raffreddamento degli strati atmosferici più bassi, mentre a quote superiori la temperatura tende a scendere più lentamente.

Nelle aree urbane però, la diminuzione di temperatura per irraggiamento inverso viene contrastata dal cosiddetto fenomeno 'isola di calore', cioè dal flusso di calore antropogenico: in questi casi l'inversione termica non si stabilisce al suolo, ma piuttosto subito al di sopra dei tetti delle abitazioni. In particolare, dal punto di vista della dispersione degli inquinanti, le inversioni termiche acquisiscono grande importanza quando si verificano negli strati più bassi dell'atmosfera. La presenza di un'inversione termica può essere vista come una 'barriera invisibile' posta nell'atmosfera, per cui non vi può essere scambio di materia, e quindi di inquinanti, tra la zona sottostante e la zona sovrastante. Questo fattore limita la dispersione e la diluizione degli inquinanti, per cui tutto ciò che viene emesso in atmosfera al di sotto della zona di inversione tende a rimanere intrappolato tra il suolo e la quota di inversione stessa. In definitiva la presenza di inversioni termiche inibisce il miscelamento verticale degli inquinanti.

Da quanto detto appare chiaro quanto siano negativi i fenomeni di inversione termica presso le grosse aree urbane, per cui tutti gli inquinanti emessi dal traffico e dalle caldaie per il riscaldamento rimangono intrappolati tra il suolo e la base di inversione posizionata proprio sopra i tetti.

Le inversioni termiche possono però portare beneficio nel caso di emissioni che avvengono a quote più alte e con una certa quantità di moto o buoyancy (spinta di galleggiamento dovuta alla sovratemperatura rispetto all'ambiente circostante) iniziale. In questo caso infatti può avvenire lo 'sfondamento' dell'inversione, per cui gli inquinanti penetrano oltre lo strato di inversione e si disperdono al di sopra di questo, senza praticamente ricadere al suolo.

L'altezza di miscelamento è anch'essa un fattore fondamentale di cui tener conto nello studio della dispersione degli inquinanti in atmosfera. Rappresenta la quota fino alla quale i moti convettivi dell'aria, e quindi la turbolenza atmosferica, acquisiscono un certo rilievo. Nella fascia compresa tra il suolo e l'altezza di miscelamento, infatti, si ha un buon miscelamento verticale dovuto alla turbolenza, mentre al di sopra di tale altezza il miscelamento verticale viene inibito, e la dispersione in senso verticale è affidata essenzialmente alla sola diffusione. L'altezza di miscelamento, al pari dell'inversione termica, può dunque essere vista come una 'barriera invisibile e può anche essere 'sfondata' dall'emissione, con conseguente dispersione al di sopra.

Con buona approssimazione si può dunque affermare che gli inquinanti emessi in atmosfera rimangono intrappolati tra il suolo e l'altezza di miscelamento, a meno che non si abbia lo 'sfondamento' dell'altezza di miscelamento.

Indicativamente, alle medie latitudini, l'altezza di miscelamento raggiunge i 2000 metri in una giornata soleggiata d'estate, mentre può essere di pochi metri nelle notti invernali. Nel caso di inversioni termiche a bassa quota, l'altezza di miscelamento può essere intesa come la base dell'inversione.

Non sono disponibili dati meteorologici riguardo l'altezza di miscelamento. Nell'ambito di questo studio, l'altezza di miscelamento viene calcolata tramite il modello micrometeorologico contenuto nel codice Calmet. Tale modello esegue internamente la stima dell'altezza di miscelamento, tenendo in considerazione:

- flussi energetici: calore irraggiato verso il suolo, calore trattenuto dal suolo, flusso di calore antropogenico, irraggiamento inverso,...;
- parametri micrometeorologici (che descrivono la struttura termica e meccanica degli strati più bassi dell'atmosfera);
- parametri meteorologici (velocità del vento, profilo verticale di temperatura).

Calmet calcola dunque, con una risoluzione pari a quella del dominio di calcolo (grigliato di 100x100 maglie nell'ambito di questo studio) il valore puntuale dell'altezza di miscelamento. La stima di questa risulta dunque tanto più accurata quanto più dettagliatamente è descritto il dominio di calcolo, in termini di morfologia del territorio, uso del suolo, condizioni meteorologiche.

Per quanto detto in precedenza, risulta fondamentale, ai fini dello studio della dispersione degli inquinanti, il confronto dell'altezza di miscelamento con la quota altimetrica raggiunta dagli inquinanti (altezza efficace di rilascio). Ciò, principalmente, per verificare la possibilità di 'sfondamento' dell'altezza di miscelamento.

L'altezza efficace di rilascio è data dall'innalzamento del pennacchio più l'altezza del camino; l'innalzamento del pennacchio al di sopra della sorgente è dovuto all'energia cinetica posseduta dai fumi alla bocca del camino e dalla sovratemperatura rispetto all'ambiente circostante. L'innalzamento del pennacchio viene solitamente calcolato con la correlazione di Briggs.

Nel caso specifico, in caso di atmosfera instabile l'altezza efficace di rilascio è di circa 1400 metri con vento debole (1m/s), di circa 500 metri in caso di vento di media intensità (3m/s).

In caso di atmosfera neutrale l'altezza efficace di rilascio è di circa 1100 metri con vento debole (1m/s), di circa 400 metri in caso di vento di media intensità (3m/s), di circa 200 metri in caso di vento teso (8m/s).

In caso di atmosfera stabile l'altezza efficace di rilascio è sempre inferiore ai 400 metri.

Tali valori dell'altezza efficace di rilascio, sono dunque dello stesso ordine di grandezza del range di variazione dell'altezza di miscelamento. È dunque ragionevole affermare che numerosi possono essere gli episodi di sfondamento dell'altezza di miscelamento, con conseguente ricaduta quasi nulla degli inquinanti al suolo.

La turbolenza atmosferica incide in modo significativo sulla dispersione degli inquinanti. In particolare, più vi è turbolenza e più il pennacchio tende a disperdersi, e le concentrazioni sull'asse del pennacchio stesso a diminuire. Al contrario, per bassa turbolenza, il pennacchio tende a rimanere più concentrato attorno al proprio asse. In generale, per rilasci che avvengono a quote relativamente alte dal suolo, in caso di alta turbolenza gli inquinanti tendono a raggiungere il suolo a breve distanza dalla sorgente, ma si diluiscono in fretta; in caso di bassa turbolenza gli inquinanti tendono a raggiungere il suolo, relativamente concentrati, a grande distanza dalla sorgente.

La turbolenza atmosferica è una caratteristica molto difficile da misurare. Generalmente viene definita attraverso le classi di stabilità atmosferica di

Pasquill-Gifford, determinate solitamente in funzione delle condizioni meteorologiche (insolazione e velocità del vento). In particolare le sei classi di stabilità vengono contraddistinte con 6 lettere (A,B,C,D,E,F), dove alla classe A è associata atmosfera instabile (alta turbolenza), alla classe D atmosfera neutrale (turbolenza media, gradiente termico verticale adiabatico), alla classe F atmosfera stabile (bassa turbolenza). Le altre classi assumono proprietà intermedie. In particolare, l'atmosfera instabile è tipica delle ore centrali del giorno in giornate prevalentemente soleggiate e con vento di intensità medio-bassa; l'atmosfera neutrale è tipica delle giornate nuvolose o accompagnate da vento di intensità media-forte; l'atmosfera stabile è tipica delle ore notturne prevalentemente con cielo sereno o poco nuvoloso.