

Studio tecnico associato

CASADIOECO

Via V.Veneto 1/bis – 47122 FORLÌ

Tel: 0543 23923 – Email: studiocasadioeco@gmail.com

PEC: casadioeco@pec.it



**Geologia
Acustica
Ambiente**

04/12/2024

Ing. Ilaria Venturini

STUDIO MODELLISTICO DISPERSIONE POLVERI PM10 IN ATMOSFERA

Committente: SA.PI.FO S.r.l

**VALUTAZIONE DELLE POLVERI PM10 EMESSE
DALLE ATTIVITA' DEL POLO ESTRATTIVO DI
"VECCHIAZZANO"- POST OPERAM,
SITO TRA VIA VECLEZIO E VIA MANGELLA,
IN COMUNE DI FORLÌ**

VALUTAZIONE SULLA QUALITA' DELL'ARIA
VALUTAZIONE DELLE POLVERI PM10 EMESSE DALLE ATTIVITA'
DEL POLO ESTRATTIVO DI "VECCHIAZZANO" – POST OPERAM,
SITO TRA VIA VECLEZIO E VIA MANGELLA,
IN COMUNE DI FORLI'

PREMESSA

La presente relazione è stata redatta dallo scrivente su incarico della ditta SA.PI.FO, al fine di effettuare la *Valutazione della Qualità dell'Aria*, con specifico riferimento alla dispersione di particolato atmosferico PM10. L'analisi prende in esame l'insieme delle sorgenti emissive presenti all'interno del polo estrattivo di Vecchiazzano, includendo sia le attività attualmente operative sia quelle di futura realizzazione, nello specifico:

- attività estrattive della Ditta SA.PI.FO
- attività estrattive della Ditta Garavini
- attività estrattive della Ditta Sansoni

In via cautelativa, si ipotizza il funzionamento simultaneo di tutte le sorgenti in attività, presenti all'interno del polo estrattivo di Vecchiazzano.

I valori di concentrazione di fondo utilizzati sono quelli rilevati dalla centralina più prossima all'area, denominata Stazione "Parco della Resistenza", collocata in area urbana vicina ad infrastrutture viarie trafficate.



DESCRIZIONE AREA D'INTERVENTO

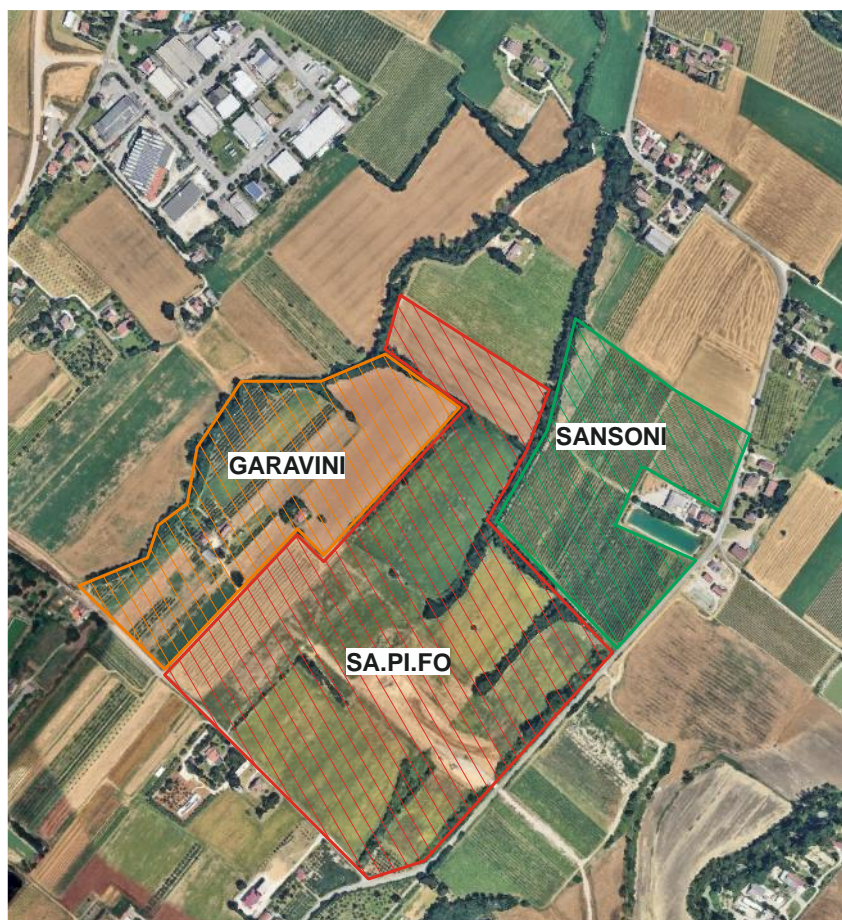
Come anticipato l'area oggetto dell'attività estrattiva è suddivisa in tre proprietà denominate: Ditta Garavini, Ditta Sapifo e ditta Sansoni che opereranno in sintonia ma indipendentemente.

Le prime due ditte inizieranno subito l'attività nelle loro aree, suddivise in X settori annui.

La ditta Sansoni inizierà invece dopo 5 anni dalle altre, suddividendo la propria area in XV settori.

L'attività di estrazione dovrà essere preceduta dallo scotico del terreno vegetale e del cappello che saranno temporaneamente accatastati nei settori successivi, per poi essere ricollocate sul fondo dello scavo a fine estrazione. La profondità degli scavi è di circa 9-10 metri ed in ogni caso non sottofalda. Il materiale ghiaioso-sabbioso estratto da Garavini sarà caricato su autocarri e trasportato agli impianti di lavorazione posti in località San Varano, mentre per la ditta SA.PI.FO, la lavorazione avverrà all'interno del proprio polo estrattivo. Infine per la ditta Sansoni si ipotizza la sola attività estrattiva.

Si riporta sotto un'aerofoto con indicazione dell'area di studio.



RIFERIMENTI NORMATIVI PER LA TUTELA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

La normativa di riferimento per la tutela della qualità dell'aria affronta la tematica secondo due aspetti fondamentali:

- 1) agisce mediante il controllo delle emissioni dalle fonti inquinanti, attraverso limiti di emissione;
- 2) individua gli obiettivi di qualità dell'aria e valuta questa, predisponendone il monitoraggio e fissando standard di qualità, con metodi e criteri comuni, con lo scopo di proteggere la salute umana e l'ambiente nel suo complesso.

Per quel che riguarda il punto 1) le emissioni in atmosfera sono regolamentate dalle seguenti norme:

- **D.Lgs. n° 171 del 21/05/2004**, provvedimento che attua quanto previsto dalla Direttiva 2001/81/Ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23/10/2001 (Direttiva NEC), che prevede la limitazione delle emissioni di sostanze inquinanti ad effetto acidificante ed eutrofizzante e dei precursori dell'ozono, stabilendo un sistema di limiti massimi nazionali (tetti) in merito alle emissioni di biossido di zolfo (SO₂), ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (COV) ed ammoniaca (NH₃) da raggiungere entro il 2010;
- **D.Lgs n° 152 del 3/4/2006 e ss. mm. ii. (D.Lgs. 128/2010)** che nella Parte Quinta - Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera - affronta la prevenzione e limitazione delle emissioni in atmosfera, attraverso prescrizioni e valori limite relativi ad emissioni generate da determinate attività, impianti e combustibili, riformulando il precedente regime autorizzatorio (dall'ambito di applicazione rimangono esclusi gli impianti di incenerimento e coincenerimento dei rifiuti e quelli sottoposti ad autorizzazione integrata ambientale - AIA, disciplinati da specifica normativa);
- **Direttiva 2010/75/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 24/11/2010** relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione dell'inquinamento) che riunisce in un solo provvedimento varie direttive in materia, al fine di ridurre le emissioni delle suddette attività nelle diverse matrici ambientali, tra cui l'aria, allargando il sistema Ippc a nuove tipologie di impianti, dando disposizioni di controllo maggiormente stringenti e maggiore importanza alle BAT (Best Available Techniques);
- **D.Lgs. n° 30 del 13/3/2013** che attua quanto previsto dalla **Direttiva 2009/29/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio 23/4/2009**, modificante la precedente Direttiva 2003/87/Ce per il perfezionamento ed estensione del sistema comunitario

per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra (Emission Trading) nell'ambito dell'applicazione del Protocollo di Kyoto per la riduzione dei gas ad effetto serra.

Sono poi presenti numerosi provvedimenti e norme di settore riguardanti la regolamentazione di emissioni di taluni inquinanti per specifiche fonti emissive. A livello locale la Regione Emilia Romagna ha emanato diversi provvedimenti legati alle autorizzazioni alle emissioni in atmosfera ai sensi del D.Lgs. 152/2006:

- D.G.R. n° 2236 del 28/12/2009 e successive modifiche ed integrazioni (D.G.R. n° 1769 del 22/11/2010, D.G.R. n° 335 del 14/3/2011, D.G.R. n° 1496 del 24/10/2011, D.G.R. n° 1681 del 21/11/2011);
- D.G.R. n° 1497 e n° 1498 del 24/10/2011.

Per quanto riguarda il punto 2) la definizione di obiettivi e standard di qualità dell'aria, ai fini della protezione della salute umana e dell'ambiente nel suo complesso, nonché la valutazione per il monitoraggio del rispetto degli standard ed il raggiungimento degli obiettivi preposti sono indicati nelle seguenti norme:

- **D.Lgs. n° 155 del 13/8/2010 e ss. mm. ii. (D.Lgs. n° 250/2012)** in cui trovano attuazione la Direttiva 2008/50/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 21/5/2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, e le nuove disposizioni di attuazione nazionale della Direttiva 2004/107/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 15/12/2004, concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nickel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente. Nello specifico regola la gestione della qualità dell'aria, per il biossido di zolfo, biossido di azoto, ossidi di azoto, PM10, PM2.5, piombo, benzene, monossido di carbonio, ozono, oltre che i suddetti inquinanti della Direttiva 2004/107/Ce, andando per questi a definire i valori limite, valori obiettivo, obiettivi a lungo termine, soglie di informazione e di allarme, livelli critici, obbligo di concentrazione e obiettivo di riduzione delle esposizioni - vai alla tabella dei parametri normativi; indica, quali strumenti attraverso cui deve essere effettuata la valutazione della qualità dell'aria, la zonizzazione e la classificazione del territorio in zone e agglomerati, la rilevazione ed il monitoraggio dei livelli di inquinamento atmosferico, effettuati mediante reti di monitoraggio e l'impiego di tecniche modellistiche, l'inventario delle emissioni e gli scenari emissivi; indica, in caso di superamento dei valori limite, dei livelli critici, dei valori obiettivo, delle soglie di informazione e allarme, le competenze (Regioni, Province autonome, Stato) e le modalità affinché siano intraprese misure, che non

comportino costi sproporzionati, necessarie per agire sulle principali sorgenti di emissione per raggiungere gli standard e gli obiettivi (Piani) nonché provvedimenti per informare il pubblico in modo adeguato e tempestivo; disciplina l'attività di comunicazione di informazioni relative alla qualità dell'aria.

- **D.M. Ambiente 29 novembre 2012** individua sul territorio nazionale stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria (di fondo e non) per inquinanti quali PM2.5, PM10, idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti, ozono e suoi precursori, previste dal D.Lgs. 155/2010.

La normativa di riferimento per il caso esaminato sarà prevalentemente il D.Lgs. n° 155 del 13/8/2010 e ss. mm. ii. (D.Lgs. n° 250/2012) ed il D.Lgs n° 152 del 3/4/2006 e ss. mm. ii. (D.Lgs. 128/2010) alla Parte Quinta Titolo I (art.267-281).

L'inquinante che andremo ad analizzare è quello a maggior impatto sulla salute antropica e vegetale, ossia il PM10:

- Particolato PM10: è l'inquinante atmosferico che provoca i maggiori danni alla salute umana in Europa. È costituito da particelle così leggere che possono fluttuare nell'aria. Si tratta di particelle solide e liquide aventi diametro aerodinamico variabile fra 0,1 e circa 100 µm. Il termine PM10 identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10 µm (1 µm = 1 millesimo di millimetro). Le particelle PM10 penetrano in profondità nei nostri polmoni. Queste particelle possono essere costituite da diversi componenti chimici, di cui i principali sono solfati, nitrati, ammonio, e da una frazione carboniosa (nerofumo) dovuta principalmente alla combustione. Anche alcuni metalli pesanti come l'arsenico, il cadmio, il mercurio e il nickel possono essere presenti nel particolato. Il loro effetto sulla nostra salute e sull'ambiente dipende dalla loro composizione. A seconda della loro composizione chimica, le particelle possono anche avere effetti sul clima globale, sia riscaldando che raffreddando il pianeta. Alcune particelle vengono emesse direttamente nell'atmosfera, altre si formano come risultato di reazioni chimiche che coinvolgono i gas precursori, vale a dire l'anidride solforosa, gli ossidi di azoto, l'ammoniaca e i composti organici volatili. Gran parte delle particelle emesse direttamente derivano dalle attività umane, principalmente dalla combustione di combustibili fossili e biomasse. Un importante contributo alle emissioni di particelle è rappresentato dai gas di scarico dei veicoli con motori a combustione interna, ma anche dall'usura degli pneumatici, dei freni e dell'asfalto. Sono dovuti alle attività umane anche gran parte dei gas precursori. Il PM10 può

avere anche origine naturale (ad esempio erosione dei suoli, eruzioni vulcaniche, incendi di boschi e praterie, aerosol marino). L'origine dell'inquinamento da PM10 varia sensibilmente da zona a zona e nel corso del tempo. Si stima che, in media, in Emilia-Romagna la parte preponderante dell'inquinamento da PM10 sia dovuto alle attività umane, con una frazione variabile tra il 75% in Appennino e l'85% in pianura. La frazione di PM10 dovuta alle attività umane sarebbe per il 40-50% emessa direttamente nell'atmosfera, mentre il restante 50-60% risulta dalle reazioni chimiche.

VALORI LIMITE DELLA QUALITA' DELL'ARIA

Come precedentemente ribadito la normativa di riferimento è costituita prevalentemente dal D.Lgs, n.155 del 13 Agosto 2010 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa". Nello specifico tale decreto definisce, all'Allegato XI, i valori limite per il Biossido di Zolfo, gli Ossidi di Azoto, il particolato PM10 e PM 2.5, il Piombo e il Monossido di Carbonio.

Nella tabella seguente è indicato il periodo di mediazione (periodo di tempo durante il quale i dati raccolti sono utilizzati per calcolare il valore riportato) ed il valore limite per il PM10.

Inquinante	Livello di protezione	Periodo di mediazione	Valore limite
PM10	Valore limite orario per la protezione della salute umana	24 ore	50 µg/m³ da non superare più di 35 volte per l'anno civile
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 µg/m³

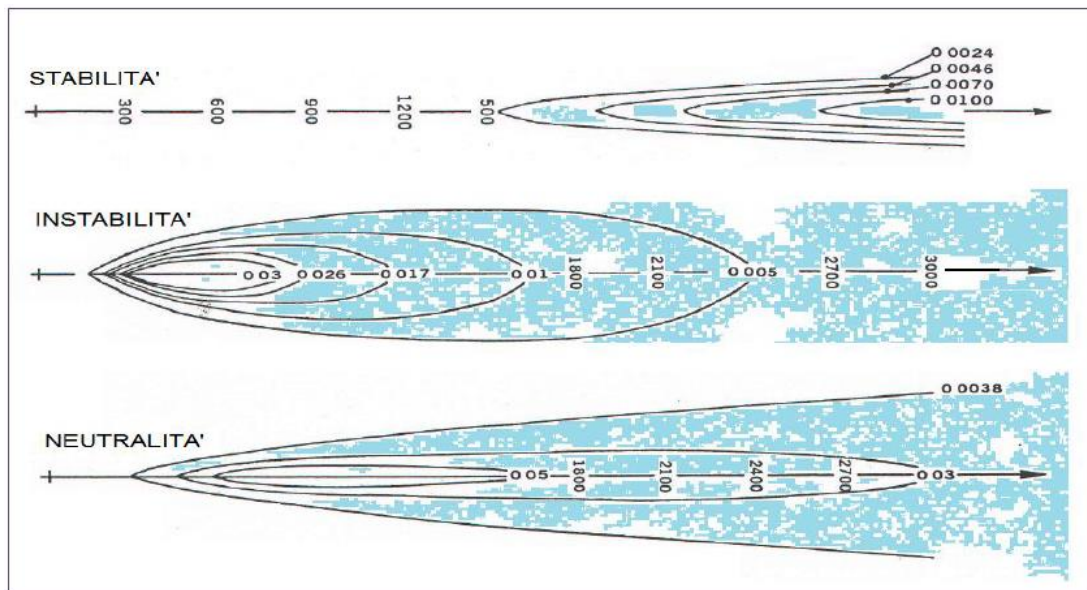
CENNI DI TEORIA DELLA DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI

La concentrazione di una sostanza inquinante in atmosfera, rilasciata a livello del suolo diminuisce durante il tragitto (dispersione) mentre la nube di concentrazione (plume) che essa forma, si ingrandisce, allargandosi, durante lo stesso tratto. La dispersione degli inquinanti, avviene ad opera della turbolenza dell'atmosfera che provoca il rimescolamento tra le masse d'aria mediante l'azione dei vortici. La diluzione della concentrazione è elevata quando la dimensione dei vortici è dello stesso ordine di grandezza del volume dell'emissione. Spesso perciò, si suole definire la dispersione dell'inquinante, della sorgente emissiva, come diffusione turbolenta che, a sua volta, può avere origine termica (turbolenza da correnti convettive ascendenti d'aria calda) o meccanica (se provocata dalla rugosità del suolo nei confronti delle correnti d'aria. Questi fenomeni vengono poi aumentati o diminuiti dallo stato di equilibrio meteorologico dell'atmosfera (stabilità atmosferica).

Il rimescolamento e la diluzione degli inquinanti si verificano, prevalentemente, al di sotto della quota di inversione, all'interno di uno strato denominato di miscelamento. L'altezza di rimescolamento è calcolata in base alla classe di stabilità atmosferica secondo la seguente tabella (M. C. Cirillo et Al., 1993)

Classe di Stabilità atmosferica	Quota di rimescolamento [m]
A	1.500
B	1.500
C	1.000
D	500
E	10.000
F	10.000

I concetti di stabilità, neutralità ed instabilità atmosferica, sono legati a delle condizioni fisiche di equilibrio dinamico della massa d'aria. L'instabilità atmosferica è una condizione meteorologica che favorisce i moti verticali delle particelle d'aria (turbolenza sviluppata ed atmosfera ben miscelata) e, quindi, il mescolamento, la dispersione e la diluizione delle sostanze inquinanti. Inversamente, una condizione di stabilità atmosferica, ostacola tali moti verticali (stratificazione della massa d'aria con moti verticali molto limitati), impedisce il mescolamento e la dispersione e favorisce l'accumulo degli inquinanti. Una condizione intermedia alle precedenti rappresenta, quindi, una condizione di neutralità (vedi Fig. 1).



Convenzionalmente, la stabilità può essere classificata facendo riferimento alle prime 6 (sei) lettere dell'alfabeto, con il seguente significato: A) fortemente instabile; B) instabile; C) leggermente instabile; D) neutra; E) leggermente stabile ed F) stabile. Le classi di stabilità, secondo Frak Pasquill (1961), sono calcolate sulla base della velocità del vento, della radiazione solare diurna e della nuvolosità notturna (notte, intesa come periodo che va da un'ora prima del tramonto ad un'ora dopo il sorgere del sole).

Velocità del vento a 10 m di quota u_{10} [m/s]	Giorno Radiazione solare globale [W/m²]						Notte Frazione di copertura nuvolosa		
	Forte	Moderata				Debole	$\leq 3/8$	$\geq 4/8$	$> 7/8$
	> 700	700÷540	540÷400	400÷270	270÷140	< 140			
< 2	A	A	B	B	C	D	F	F	D
$2 \div 3$	A	B	B	B	C	D	F	E	D
$3 \div 4$	B	B	B	C	C	D	E	D	D
$4 \div 5$	B	B	C	C	D	D	D	D	D
$5 \div 6$	C	C	C	C	D	D	D	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D	D	D	D

Per quanto riguarda invece le sorgenti emissive, esse possono essere classificate in base alla loro geometria che può essere schematizzata, così come di seguito:

- Puntiforme continua (del tipo *a pennacchio* di ciminiera);
- Lineare continua (del tipo *autostradale*);
- Areale continua (del tipo *urbano*);
- Volumico confinata (del tipo *aa puff*).

DESCRIZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE MMS WinDIMULA 4

Il presente studio è stato condotto mediante l'utilizzo del software MMS WinDimula 4.x, nuova versione del noto modello gaussiano multisorgente WinDimula, inserito nell'elenco dei modelli consigliati da APAT (Agenzia Italiana per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici) per la valutazione e gestione della qualità dell'aria.

MMS WinDimula implementa l'uso di tre moduli di calcolo:

- il modulo per calcoli della concentrazione e della deposizione al suolo degli inquinanti emessi da sorgenti puntiformi (camini) e areali (discariche);
- Il modulo per il calcolo delle altezze efficaci delle sorgenti puntiformi;
- il modulo per il calcolo della velocità di deposizione secca.

Il programma presenta una interfaccia utente semplice e funzionale che permette di gestire un progetto completo con l'inserimento guidato dai dati del dominio di calcolo, delle sorgenti inquinanti e dei dati meteorologici. I calcoli sono contenuti nel progetto e il programma dispone di funzioni per la visualizzazione sia grafica che tabellare dei calcoli effettuati.

Sistema di coordinate

Il sistema di coordinate utilizzate è un sistema cartesiano con l'asse x orientato da Ovest a Est e l'asse y orientato da Sud a Nord.

Le unità di misura sono espresse in metri e la posizione dei vari punti del reticolo cartesiano è espressa dall'equazione seguente:

$$x = x_0 + (i - 1) \cdot \Delta x \quad \text{Eq. 1-1}$$

dove x_0 rappresenta la posizione dell'origine del reticolo ed i indica la i -esima cella. (analogamente per y).

Calcolo delle distanze

Durante il calcolo il sistema di coordinate viene ruotato per portare l'asse x a coincidere con la direzione del vento.

Le equazioni utilizzate sono le seguenti:

- modifica della direzione del vento:

$$dd = \frac{(270 - \text{dirprov}) \cdot \pi}{180} \quad \text{Eq. 1-2}$$

dove *dirprov* è la direzione di provenienza del vento in gradi (secondo le convenzioni meteorologiche internazionali) inserita come dato di input;

- modifica della posizione della sorgente e del recettore:

$$\begin{aligned}x' &= x \cdot \cos(dd) + y \cdot \sin(dd) \\ y' &= y \cdot \cos(dd) - x \cdot \sin(dd)\end{aligned}\quad \text{Eq. 1-3}$$

- calcolo della distanza sottovento e della distanza perpendicolare alla direzione del vento di un recettore rispetto alla sorgente:

$$\begin{aligned}DX &= x'_R - x'_S \\ DY &= \text{abs}(y'_R - y'_S)\end{aligned}\quad \text{Eq. 1-4}$$

Calcolo del vento alla quota *H*

Teoricamente il vento che appare nella formulazione gaussiana dovrebbe essere inteso come valore medio sull'estensione del pennacchio.

Poiché i dati meteorologici di partenza sono generalmente disponibili al suolo si utilizza una legge esponenziale per trasportare l'intensità della velocità del vento alla quota desiderata, mantenendone comunque costante la direzione. Nel calcolo dell'altezza efficace si utilizza la velocità del vento riportata all'altezza fisica del camino; nel calcolo dell'equazione si utilizza il valore medio tra la velocità del vento riportata all'altezza fisica del camino e la velocità del vento riportata all'altezza efficace, cioè all'altezza effettiva del rilascio. L'equazione utilizzata è la seguente:

$$u_{He} = u_{ref} \cdot \left(\frac{H_e - z_0}{z_{ref}} \right)^p$$

Eq. 2-1

dove:

u_{He} : velocità del vento alla quota desiderata;

u_{ref} : velocità del vento misurata alla quota z_{ref} ;

H_e : quota di calcolo;

z_0 : rugosità superficiale;

p : esponente che dipende dalla classe di stabilità :

Classe di stabilità	Coeff. P
A	0.1
B	0.1
C	0.16
D	0.16
E	0.3
F	0.3

Modello Short Term per sorgenti puntiformi in presenza di vento: formula generale dell'equazione gaussiana

L'equazione gaussiana che esprime la concentrazione per sorgenti puntiformi elevate con emissioni continue assume la seguente forma:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}\right] \cdot V \cdot D$$

Eq. 3-1

dove :

Q : emissione di inquinante espresso come massa per unità di tempo;

V : termine verticale;

D : termine di decadimento;

$\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$: coefficienti di dispersione laterale e verticale (m) ;

u : velocità del vento alla quota del rilascio (m/s) ;

x : distanza sottovento tra la sorgente e il recettore rispetto alla direzione del vento;

y : distanza perpendicolare alla direzione del vento tra l'asse del pennacchio e il recettore;

z : quota del recettore rispetto al suolo.

Tale equazione viene ricavata in base alle seguenti ipotesi:

- processo stazionario;
- condizioni meteorologiche costanti;
- trasporto turbolento lungo l'asse x trascurabile rispetto al trasporto per avvezione;
- coefficienti di dispersione costanti in y e z ;
- emissione costante;
- suolo riflettente.

L'equazione Gaussiana non è applicabile in condizioni di calma di vento; per questo motivo si assume generalmente un valore minimo di 1 m/s per la velocità del vento.

Termine verticale

La forma generale del termine verticale V è la seguente:

$$V = \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + V_{inv}$$

Eq. 3-2

dove il secondo termine rappresenta l'effetto della riflessione del terreno e il termine V_{inv} rappresenta l'effetto delle riflessioni del plume causate dalla presenza di un'inversione in quota.

Il termine h assume inizialmente la seguente forma:

$$h = H_{cam} + \Delta H$$

Eq. 3-3

dove H_{cam} rappresenta l'altezza fisica del camino (eventualmente corretta per la presenza dell'effetto scia o della formula utilizzata per descrivere il downwash degli edifici) e ΔH rappresenta il sovrizzo dei fumi.

Termine verticale in presenza di inversione in quota

Le classi A,B,C, e D sono caratterizzate da un'inversione in quota che limita la diffusione verticale. La quota di questa inversione in quota viene spesso indicata con il termine di altezza di rimescolamento.

La presenza di questa inversione in quota modifica l'equazione gaussiana con l'introduzione del termine V_{inv} :

$$V_{inv} = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-h_2)^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{(z+h_2)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}$$

$$h_1 = 2iH_{inv} - h$$

$$h_2 = 2iH_{inv} + h$$

Eq. 3-4

dove H_{inv} rappresenta la base dell'inversione in quota.

L'inversione in quota si comporta come un tappo riflettendo verso il suolo la diffusione del pennacchio. Il modello gaussiano non considera la possibilità che il pennacchio riesca a superare l'inversione: nel caso ciò si realizzi la diffusione verso il basso viene fortemente inibita e i valori di concentrazione risultano molto bassi. Per questo motivo l'inserimento di una inversione in quota più bassa dei valori standard dello strato rimescolato va effettuata con molta cautela perché può portare a valori molto elevati e non realistici di concentrazione al suolo.

La serie riportata nella formula converge abbastanza rapidamente e in generale sono sufficienti poche iterazioni: il parametro impostato di default esegue 4 riflessioni.

Il modello contiene dei valori di default per l'altezza dello strato rimescolato: è comunque possibile inserire un valore direttamente come dato di input.

Nel nostro caso sono stati inseriti i valori di quota di rimescolamento indicati dalla tabella di Cirillo (1993) sopra riportata.

Termine verticale per diffusione di particolato

In caso di diffusione di particolato o di gas pesanti il modello gaussiano viene modificato per tener conto degli effetti legati alla velocità di sedimentazione gravitazionale. Il primo effetto sull'equazione è quello di introdurre un abbassamento dell'asse del pennacchio modificando il termine h descritto nell'equazione Eq. 3-3:

$$h = H_{cam} + \Delta H - \frac{v_g \cdot x}{u}$$

Eq. 3-5

dove :

v_g : rappresenta la velocità di sedimentazione gravitazionale;

u : velocità del vento alla quota del pennacchio.

La modifica del termine h serve a tener conto dell'effetto della gravità sulla diffusione dell'inquinante e viene generalmente indicato come Tilted Plume Model.

Effetti della deposizione secca sull'equazione

In generale la deposizione degli inquinanti gassosi e del particolato leggero (particelle fino a 1 micron) ha effetti trascurabili sulla concentrazione dovuta alla diffusione. In caso contrario è necessario tener conto del fatto che parte del materiale si deposita al suolo facendo cadere l'ipotesi di suolo riflettente alla base dell'equazione Eq. 3-1. In generale la deposizione di un inquinante si può calcolare tramite la relazione:

$$F(x,y) = v_d \cdot C(x,y,0)$$

Eq. 3-6

dove:

F : flusso di deposizione al suolo

$C(x,y,0)$: concentrazione al suolo

v_d : velocità di deposizione.

Si tenga presente che, in caso di particolato, la velocità di deposizione NON è la velocità di sedimentazione gravitazionale. In generale i fenomeni che determinano la deposizione, cioè la cattura da parte del suolo dell'inquinante sono molto complessi ed esulano dalla

trattazione di un modello semplice come è il modello gaussiano, anche perché richiedono generalmente l'introduzione di informazioni iniziali spesso non disponibili o di difficile reperibilità che dipendono dal tipo di inquinante, dal tipo di terreno dal tipo di vegetazione e dalle condizioni meteorologiche.

Il modello quindi adotta un approccio conservativo trascurando il calcolo della deposizione secca. Tale approccio è sicuramente adatto ad applicazioni di tipo regolatorio.

Effetti della deposizione umida sull'equazione (opzione avanzata)

Analogamente a quanto descritto per la deposizione secca la presenza della deposizione umida modifica l'equazione gaussiana per tener conto del materiale rimosso dalla pioggia diminuendo il termine di emissione.

Contrariamente alla deposizione secca però la formulazione generalmente adottata per la modifica dell'equazione gaussiana è più semplice ed ha la forma seguente:

$$Q = Q_0 \exp\left(-\lambda \cdot R \frac{x}{u}\right)$$

Eq. 3-7

dove:

λ = Scavenging coefficiente (hr/(s*mm))

R = rate di precipitazione (mm/hr)

Il modello include il calcolo dell'effetto della deposizione umida: si tenga presente che l'inclusione di questo calcolo serve SOLO per valutare l'effetto della deposizione umida sulle concentrazioni e NON per calcolare il flusso di deposizione.

Calcolo del Plume Rise

Le equazioni utilizzate per il calcolo del plume rise si basano sulle note formulazioni di Briggs.

Le variabili da definire sono:

h_s : altezza fisica del camino (m);

h'_s : altezza del camino modificata per effetto della scia del camino (m) ;

d : diametro interno del camino (m);

r_s : raggio interno del camino;

v_s : velocità di efflusso dei fumi (m/s);

T_s : temperatura dei fumi (K) ;

dH : sovrizzo dei fumi;

x_f : distanza alla quale si verifica il sovrizzo finale dei fumi;

u_s : velocità del vento alla bocca del camino (m/s);

T_a : temperatura dell'aria;

$\frac{\partial \theta}{\partial z}$: gradiente verticale della temperatura potenziale: per la classe di stabilità E vale 0,015
per la classe di stabilità F vale 0,037;

Bh : altezza degli edifici in direzione del vento;

Bw : larghezza dell'edificio vicino alla sorgente perpendicolare alla direzione del vento;

g : accelerazione di gravità (9,80616 m/s²).

Calcolo del sovrizzo dei fumi per atmosfera stabile

Si calcola la "crossover temperature" che serve per determinare se il sovrizzo è prevalentemente guidato dal sovrizzo termico o dal flusso di momento

$$(\Delta T)_c = 0,019582 \cdot T_s v_s \sqrt{S}$$

Eq. 3-16

Sovrizzo dominato dal flusso di galleggiamento: $(T_s - T_a) \geq (\Delta T)_c$

$$\begin{cases} dH = 2,6 \cdot \left(\frac{F_B}{uS} \right)^{1/3} \\ x_f = 2,0715 \frac{u}{\sqrt{S}} \end{cases}$$

Eq. 3-17

Sovrizzo dominato dal flusso di momento: $(T_s - T_a) < (\Delta T)_c$ o $T_s \leq T_a$

$$\begin{aligned} dH &= 1,5 \left(\frac{F_M}{u\sqrt{S}} \right)^{1/3} \\ x_f &= 0,5\pi \frac{u}{\sqrt{S}} \end{aligned}$$

Eq. 3-18

Se il sovrizzo è dominato dal flusso di momento oltre al valore riportato nell'Eq. 3-18 viene calcolato anche il valore riportato nell'Eq. 3-15 in quanto il sovrizzo dominato dal momento in caso di atmosfera stabile non può comunque superare quello calcolato in atmosfera instabile o neutra.

Calma di vento:
$$dH = 5,3 F_B^{1/4} S^{-3/8} - 3d_s$$

Eq. 3-19

A causa del termine negativo $-3d$ si impone che comunque il sovrizzo non sia negativo.

Limiti:

Se l'altezza efficace supera l'altezza dello strato rimescolato si pone altezza efficace uguale altezza dello strato rimescolato.

Coefficienti di Dispersione

Il calcolo dei coefficienti di dispersione procede attraverso i seguenti passi:

- calcolo delle sigma di Briggs;
- correzione dei valori calcolati introducendo il calcolo della BID (Buoyancy Induced Dispersion).

Formule di Briggs

Le formule di dispersione più utilizzate nei modelli per il calcolo di σ_y e σ_z in mancanza di misurazioni o calcoli diretti della turbolenza sono quelle di Briggs (1973) ottenute combinando una larga serie di dati sperimentali:

$$\sigma_y = \alpha x^e (b + cx^f)^d$$

Eq. 3-25

Classe di stabilità	Briggs in campo aperto		Briggs in aree urbane	
	a	c	a	c
A	0.22	0.0001	0.32	0.0004
B	0.16	0.0001	0.32	0.0004
C	0.11	0.0001	0.22	0.0004
D	0.08	0.0001	0.16	0.0004
E	0.06	0.0001	0.11	0.0004
F	0.04	0.0001	0.11	0.0004

dove:

$b=1$

$d=-0.5$

$e=1$

$f=1$

$$\sigma_z = \alpha x^e (b + cx^f)^d$$

Eq. 3-26

Classe di stabilità	Briggs in campo aperto			Briggs in aree urbane		
	a	c	d	a	c	d
A	0.2	0	1	0.24	0.001	0.5
B	0.12	0	1	0.24	0.001	0.5
C	0.08	0.0002	-0.5	0.2	0	1
D	0.06	0.0015	-0.5	0.14	0.0003	-0.5
E	0.03	0.0003	-1	0.08	0.0015	-0.5
F	0.016	0.0003	-1	0.08	0.0015	-0.5

dove:

b=1

e=1

f=1

Anche se Cirillo e Poli (1992) suggeriscono che in condizioni di vento debole / calma di vento le stime di tali coefficienti basate sulle formule sopra riportate possono essere significativamente diverse dai valori misurati, l'utilizzo delle formule di Briggs è la soluzione più adottata nelle condizioni nelle quali mancano misure dirette della turbolenza.

B.I.D - Buoyancy induced dispersion

Una volta effettuato il calcolo dei coefficienti di dispersione questi vengono corretti per tener conto della dispersione iniziale dei fumi causata dalla turbolenza dei fumi e dalla turbolenza dell'aria. Il metodo adottato si basa sulla formula di Pasquill e fa parte delle opzioni

$$\sigma' = \left(\sigma^2 + \left(\frac{dH}{3.5} \right)^2 \right)^{1/2}$$

Eq. 3-28

regolatorie suggerite dalle linee guida EPA:

dove :

dH : sovrizzo dei fumi

Nel calcolo di dH si tenga conto che se è stata applicata la correzione per tener conto dell'effetto scia del camino il sovrizzo va calcolato non in relazione all'altezza fisica del camino ma all'altezza ridotta modificata dall'effetto scia.

Termine di decadimento

Il termine di decadimento inserito nell'equazione di concentrazione è un modo semplice per considerare l'effetto sulla concentrazione della rimozione del materiale inquinante. Tale rimozione può essere dovuta a deposizione secca o umida, a effetti chimici o altro.

Il termine di decadimento è della forma:

$$D = \exp\left(-\psi \frac{x}{u_s}\right)$$

Eq. 3-34

dove ψ rappresenta il coefficiente di decadimento espresso in secondi alla meno 1.

Assegnare a ψ il valore 0 significa trascurare il decadimento (opzione di default).

Una relazione utile per calcolare ψ se è noto il tempo di dimezzamento della sostanza in esame è la seguente:

$$\psi = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

Eq. 3-35

Termine di decadimento e deposizione umida

Il termine di decadimento potrebbe essere utilizzato per descrivere la perdita di materiale

$$\psi = \lambda R$$

Eq. 3-36

dovuta alla deposizione umida utilizzando la seguente relazione:

dove λ rappresenta lo "scavenging coefficient" (smm/hr) ⁻¹ e R rappresenta il rate di precipitazione (mm/hr); si è preferito però tenere separati i due effetti per consentire l'utilizzo continuativo del modello con sequenze di dati meteo.

Modello Climatologico: Equazione di base per sorgenti puntiformi

Il calcolo climatologico utilizza la formulazione gaussiana valutata sui settori di provenienza del vento. Oltre alle assunzioni di base già descritte in precedenza vengono fatte le seguenti assunzioni:

- la rosa dei venti viene divisa in 16 settori di ampiezza 22,5°;
- all'interno di ogni settore la concentrazione dipende solo dalla distanza radiale tra la sorgente e il recettore (quindi non si ha dipendenza dalla distanza perpendicolare alla direzione del vento y).

In queste ipotesi l'equazione usata per il calcolo climatologico è la seguente:

$$C(R, \Delta \vartheta, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot u \cdot R \cdot \sigma(R)_z \cdot \Delta \vartheta} \cdot V \cdot D \cdot S$$

Eq. 4-1

Q : emissione di inquinante espresso come massa per unità di tempo;

V : termine verticale;

D : termine di decadimento;

R : distanza radiale recettore sorgente nel settore di calcolo;

$\Delta\theta$: ampiezza del singolo settore;

$\sigma_z(x)$: coefficienti di dispersione laterale e verticale (m);

u : velocità del vento alla quota del rilascio (m/s);

z : quota del recettore rispetto al suolo;

S : funzione di smoothing.

Tale equazione rappresenta il contributo alla concentrazione in un punto R di una singola sorgente puntiforme. Il valore di concentrazione totale prodotto da una singola sorgente sarà

$$C_{tot} = \sum_{istab, idir, ivel} C(R, z) \cdot \frac{f(istab) \cdot f(istab, idir, ivel)}{10^6}$$

Eq. 4-2

dato da:

dove:

$istab$: somma sulle classi di stabilità (A,B,C,D,E,F+G,Nebbie);

$idir$: somma sui settori di provenienza del vento;

$ivel$: somma sulle classi di velocità;

$f(istab)$: frequenza normalizzata a 1000 di accadimento della $istab$ -esima classe di stabilità;

$f(istab, idir, ivel)$: frequenza normalizzata a 1000 di accadimento della $idir$ -esima direzione e della $ivel$ -esima classe di velocità della $istab$ -esima classe di stabilità.

Attribuzione dei recettori ai settori

L'attribuzione dei recettori ai settori di provenienza del vento rappresenta uno dei punti critici del modello DIMULA DOS: con il metodo originariamente utilizzato infatti poteva verificarsi che:

- punti di confine tra settori non siano assegnati (e quindi siano esclusi dal calcolo);
- punti di confine tra settori siano assegnati a più settori (e quindi siano calcolati più volte);
- simulazioni eseguite su reticoli innestati non producono gli stessi risultati negli stesso recettori.

Il nuovo modello contiene due metodi di attribuzione dei recettori ai settori.

Corretta assegnazione dei punti ai settori

Si assegna un punto recettore ad un determinato settore se si verifica la condizione:

$$DY \leq DX \cdot \tan(\vartheta_{sethalf} + \varepsilon)$$

Eq. 4-3

dove:

- DX è la distanza sorgente recettore lungo l'asse x dopo la rotazione degli assi effettuata in base alla direzione di provenienza del vento (DX è positivo in quanto se $DX < 0$ significa che il recettore si trova sopravento alla sorgente e quindi il calcolo non viene effettuato);
- Dy è il valore assoluto della distanza sorgente recettore lungo l'asse y dopo la rotazione degli assi effettuata in base alla direzione di provenienza del vento;
- $\theta_{sethalf}$ è la semiampiezza del settore angolare (11,25°)
- ε un valore piccolo (0,25 °) che ampliando i limiti dei settori evita l'esclusione di punti

Inoltre viene svolto un controllo in modo da accertarsi che ogni recettore sia attribuito a un solo settore in modo da evitare doppie assegnazioni.

Modello per le calme di vento

Ai fini delle misure strumentali le calme di vento sono tutte quelle situazioni meteorologiche nelle quali gli strumenti di misura non riescono a definire una direzione e una intensità del vento.

A questa situazione strumentale (assenza del dato) corrispondono in realtà moltissime e diverse situazioni meteorologiche.

La gestione modellistica delle calme di vento presenta sostanzialmente due problemi:

- mancanza di dati per inizializzare i modelli;
- varietà delle situazioni meteorologiche che ricadono nella definizione di calme di vento.

Queste difficoltà hanno portato l'EPA a definire una metodologia per trattare le calme di vento che consiste in un preprocessamento dei dati meteorologici finalizzato all'eliminazione delle condizioni di calma.

I modelli gaussiani, in particolare, non sono in grado di gestire le calme di vento:

- per ragioni fisiche in quanto contrastano con le ipotesi di derivazione della formulazione gaussiana;
- per ragioni matematiche in quanto la velocità del vento è presente a denominatore.

La soluzione presente nella versione precedente di DIMULA si basa sul modello Cagnetti Ferrara; questo modello, basato sull'integrazione temporale dell'equazione gaussiana a puff, presenta però il difetto di divergere nell'origine calcolando valori irrealistici e sovrastimati nei recettori vicini alla sorgente.

Per questo motivo è la trattazione delle calme e delle condizioni di vento debole è stata modificata adottando il modello Cirillo Poli.

Il modello Cirillo Poli

Il modello Cirillo Poli è anch'esso basato sull'integrazione temporale dell'equazione gaussiana a puff ma con una formulazione differente rispetto al modello Cagnetti Ferrara. L'equazione per il calcolo della concentrazione è la seguente:

$$C(x, y, z) = \sum_{i=1,2} \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \alpha \beta \gamma \cdot T_i^2} \exp\left(\frac{-u^2}{2\alpha^2}\right) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{ux}{\alpha^2 T_i} \exp\left(\frac{u^2 x^2}{2\alpha^4 T_i^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{-ux}{\sqrt{2}\alpha^2 T_i}\right) \right\}$$

$$T_1^2 = \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z+H)^2}{\gamma^2}$$

$$T_2^2 = \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z-H)^2}{\gamma^2}$$

Eq. 5-1

dove α , β e γ sono legati ai coefficienti di diffusione turbolenta dalla relazione:

$$\alpha = \sigma_u$$

$$\beta = \sigma_v$$

$$\gamma = \frac{1}{t} \sigma_z(t)$$

Eq. 5-2

Tale modello si applica solo alle sorgenti puntiformi e, come si può vedere esaminando le equazioni, pur presentando una soluzione che ricorda la gaussiana, presenta valori diversi da zero anche sopravento alla sorgente.

Valutazione dei coefficienti di dispersione

I coefficienti di diffusione turbolenta sono stimati nel modo seguente:

$$\gamma = I_z \cdot u$$

$$\sigma_u = u \sqrt{\cosh(\sigma_\theta^2) - 1}$$

$$\sigma_v = u \sqrt{\sinh(\sigma_\theta^2)}$$

Eq. 5-3

dove σ_θ rappresenta la deviazione standard della direzione del vento e I_z i coefficienti turbolenti verticali definiti da Briggs e riportati nella tabella seguente:

Stabilità	A	B	C	D	E	F+G
I_z	0,2	0,12	0,08	0,06	0,03	0,016

Il modello è particolarmente indicato nelle situazioni nelle quali il valore di σ_θ è maggiore di 40°, anche se i test e le verifiche riportate in letteratura utilizzano comunque valori inferiori con buoni risultati.

Non sono attualmente disponibili in Italia studi che legano i valori di σ_θ alle classi di stabilità. Indicativamente si possono considerare le correlazioni stabilite da Pasquill – Gifford e ritenute valide da EPA per la definizione strumentale delle classi di stabilità:

Classe di stabilità	σ_θ (gradi)	σ_θ assegnato di default dal modello
A	$22,5 \leq \sigma_\theta$	40
B	$17,5 \leq \sigma_\theta < 22,5$	20
C	$12,5 \leq \sigma_\theta < 17,5$	15
D	$7,5 \leq \sigma_\theta < 12,5$	15
E	$3,8 \leq \sigma_\theta < 7,5$	15
F + G	$\sigma_\theta < 3,8$	15

.Tabella 5-1

Seguendo anche le indicazioni riportate in altri modelli EPA si assume un valore limite inferiore per la dispersione orizzontale calcolata perpendicolare all'asse del pennacchio; tale valore, modificabile dall'utente, si riflette in un valore limite inferiore per σ_θ e per σ_u . I valori suggeriti sono:

$\sigma_v = 0.5$ per le classi A, B, C, D

$\sigma_v = 0.2$ per le classi E, F+G

Riflessioni in quota

In analogia con quanto applicato al modello gaussiano in caso di riflessioni in quota (fumigazione), quindi limitatamente alle classi A, B, C, D l'equazione Eq. 5-1 viene modificata aggiungendo alla serie ulteriori termini dove i parametri T assumono la seguente forma:

$$\begin{aligned} T_1^2 &= \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z - (2iH_{inv} - H))^2}{\gamma^2} \\ T_2^2 &= \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z + (2iH_{inv} - H))^2}{\gamma^2} \\ T_3^2 &= \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z - (2iH_{inv} + H))^2}{\gamma^2} \\ T_4^2 &= \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} + \frac{(z + (2iH_{inv} + H))^2}{\gamma^2} \end{aligned}$$

Eq. 5-4

con $i=1$, Nrfl numero massimo di riflessioni impostato come parametro di default, e H_{inv} la base dell'inversione in quota.

L'inversione in quota si comporta come un tappo riflettendo verso il suolo la diffusione del pennacchio. Il modello gaussiano non considera la possibilità che il pennacchio riesca a superare l'inversione: nel caso ciò si realizzi la diffusione verso il basso viene fortemente inibita e i valori di concentrazione risultano molto bassi. Per questo motivo l'inserimento di una inversione in quota più bassa dei valori standard dello strato rimescolato va effettuata con molta cautela perché può portare a valori molto elevati e non realistici di concentrazione al suolo.

La serie riportata nella formula converge abbastanza rapidamente e in generale sono sufficienti poche iterazioni: il parametro impostato di default esegue 4 riflessioni.

Il modello contiene dei valori di default per l'altezza dello strato rimescolato: è comunque possibile inserire un valore direttamente come dato di input.

Equazione a settori nel modulo climatologico

Il modello gaussiano climatologico è ottenuto integrando l'equazione su singoli settori di provenienza del vento. In genere si utilizzano 16 settori di ampiezza di 22,5°. Il procedimento matematico consiste nel risolvere il seguente integrale:

$$C(z, R, settore) = \frac{\oint C(x, y, z) d\vartheta}{R(sect)}$$

Eq. 5-5

dove $R(\text{sett})$ rappresenta la larghezza del settore.

Nel caso dell'equazione Eq. 5-1 l'applicazione diretta di tale metodo risulta notevolmente complessa. Per evitare di dover integrare l'equazione del modello si è scelto di adottare una tecnica simile a quella utilizzata dal modello ISC per integrare sui settori la concentrazione prodotta dalle sorgenti areali.

Dato il recettore $X(x,y)$ che appartiene al settore S , sia R la distanza radiale tra la sorgente e il recettore e $R(S)$ l'arco del settore S posto a distanza R dalla sorgente; assumendo fissa la direzione di provenienza del vento (bisettrice del settore) il modello calcola il valore di concentrazione prodotto in n punti posti sull'arco del recettore S situato alla distanza R dalla sorgente ed effettua la media di tali valori.

$$C(z, R, \text{Settore}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} C(x, y, z) \Big|_{(x,y) \in R(S)}$$

Eq. 5-6

Il valore così calcolato viene assegnato al punto $X(x,y)$ e a tutti i punti situati sull'arco $R(S)$.

Il modello di calcolo della deposizione: calcolo della deposizione secca

Il flusso di deposizione F_d è calcolato mediante il prodotto della concentrazione C per la velocità di deposizione v_d calcolata alla quota di riferimento:

$$F_d = C \cdot v_d$$

dove C è la concentrazione determinata mediante la formulazione gaussiana a plume. Si trascura, in via cautelativa, l'impoverimento del pennacchio legato alla deposizione.

La velocità di deposizione è calcolata, secondo Slinn e Pleinn, sommando la velocità di sedimentazione gravitazionale v_g all'inverso della somma delle resistenze all'attraversamento dei vari strati:

- per il particolato

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_d + r_a r_d v_g} + v_g$$

- per inquinanti gassosi

$$v_d = \frac{1}{r_a + r_d + r_c}$$

r_a = resistenza aerodinamica [s/cm];

r_d = resistenza dello strato di deposizione [s/cm];

r_c = resistenza dello strato di vegetazione [s/cm];

v_g = velocità di sedimentazione gravitazionale [cm/s].

La resistenza dello strato di vegetazione è un fattore dipendente da molte variabili, come la radiazione solare, l'umidità, la temperatura ed ha una variabilità legata ai cicli stagionali dei vegetali. Per gli scopi del modello si può utilizzare l'approccio conservativo di trascurarla.

La resistenza aerodinamica, determinata dalla parametrizzazione di Byun e Dennis, dipende dalle condizioni di stabilità dell'atmosfera:

- per atmosfera stabile ($L > 0$):

$$r_a = \frac{1}{k u_*} \left[\ln \left(\frac{z_d}{z_0} \right) + 4.7 \frac{z}{L} \right]$$

- per atmosfera instabile ($L < 0$):

$$r_a = \frac{1}{k u_*} \left[\ln \frac{(\sqrt{1 + 16 (z/|L|)} - 1) (\sqrt{1 + 16 (z_0/|L|)} + 1)}{(\sqrt{1 + 16 (z/|L|)} + 1) (\sqrt{1 + 16 (z_0/|L|)} - 1)} \right]$$

con.

L = lunghezza di Monin-Obukhov;

z_d = altezza di riferimento del surface layer, che si può assumere pari a 1/10 dell'altezza dello strato di mescolamento;

z = quota di calcolo [m],

z_0 = rugosità [m],

u_* = velocità di attrito;

k = costante di Von Karman ($k=0.4$).

I parametri micrometeorologici (u_* e L) e l'altezza di mescolamento potranno essere inseriti come input o, in assenza di tali informazioni, stimati dalla seguente tabella indicativa:

Categoria di stabilità	u_*	L_{MO}	H
	[m/s]	[m]	[m]
A	0.15	-2	1500
B	0.2	-10	1000
C	0.4	-100	900
D	0.5	Infinito	800
E	0.2	100	400
F+G	0.1	10	100

La resistenza dello strato di deposizione è calcolabile tramite la relazione:

- per il particolato
$$r_d = \frac{1}{(Sc^{-2/3} + 10^{-3}/St) u_*}$$

- per inquinanti gassosi
$$r_d = \frac{d_1}{k u_*} Sc^{\frac{2}{3}}$$

con

$Sc = u/DB$ numero di Schmidt;

$u = 0.15$ cm²/s viscosità cinematica dell'aria;

DB = diffusività browniana [cm²/s] dell'inquinante in aria;

$g=981$ cm/s accelerazione di gravità;

$St = (vg/g)(u^2/ u)$ numero di Stokes;

$d_1= 2$ (Calpuff, Slinn et al.);

$k = 0.4$.

La velocità di settling gravitazionale è calcolata tramite la legge di Stokes:

$$v_g = \frac{(\rho - \rho_{AIR}) g d_p^2 c_2}{18\mu} S_{CF}$$

con

ρ = densità della particella [g/cm³]

$\rho_{AIR} = 1.2 \cdot 10^{-3}$ densità dell'aria

d_p = diametro aerodinamico della particella [μm]

$\mu = 1.81 \cdot 10^{-4}$ g/cm/s viscosità dinamica dell'aria

$c_2=1 \cdot 10^{-8}$ conversione da μm² a m²

S_{CF} = fattore di correzione

$$S_{CF} = 1 + \frac{2x_2 (a_1 + a_2 e^{-\{a_3 d_p / x_2\}})}{10^{-4} d_p}$$

con

$x_2=6.5 \cdot 10^{-6}$

$a_1=1.257$

$a_2=0.4$

$a_3=0.55 \cdot 10^{-4}$

La diffusività Browniana è calcolata tramite:

$$D_B = 8.09 \times 10^{-10} \left[\frac{T_a S_{CF}}{d_p} \right]$$

in [cm/s]

con T_a = temperatura dell'aria in [K].

Il calcolo della deposizione umida

Il meccanismo di dilavamento del pennacchio è supposto di tipo "scavenging ratio", con relativo impoverimento del termine sorgente.

Indicando con $C(x,y,z)$ la concentrazione calcolata in un punto (x,y,z) mediante la formulazione gaussiana a plume, si assume che la quantità $\phi(x,y,z)$ di materiale dilavato per unità di volume e di tempo sia proporzionale alla concentrazione secondo la relazione:

$$\phi(x, y, z) = -\Lambda C(x, y, z)$$

$$F(x, y) = -\int_0^\infty \phi(x, y, z) dz = \int_0^\infty \Lambda C(x, y, z) dz$$

dove con F si è indicato il flusso di deposizione (massa per unità di tempo e di area).

Dalla legge di conservazione della massa ed assumendo stazionarietà del termine sorgente e della meteorologia, si ottiene (assumendo flusso lungo x):

$$v \frac{dQ(x)}{dx} = -\Lambda Q(x) \quad \text{con} \quad Q(x) = \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} \int_{z=0}^{z=\infty} C(x, y, z) dy dz$$

$$Q(x) = Q \exp\left(-\Lambda \frac{x}{v}\right)$$

in cui si vede che, di fatto, il problema può essere schematizzato come impoverimento del termine sorgente (pari a Q in assenza di pioggia).

Il flusso di deposizione F (massa per unità di tempo e di area) può allora essere valutato come:

$$F(x, y) = -\int_0^\infty \phi(x, y, z) dz = \int_0^\infty \Lambda C(x, y, z) dz = \Lambda \frac{Q e^{-\frac{\Lambda x}{v}}}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x, y)} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$$

dove la concentrazione può essere valutata tenendo conto dell'impoverimento del termine sorgente Q , oppure assumendo conservativamente che non si abbia impoverimento del pennacchio.

Il coefficiente di dilavamento Λ dipende in maniera lineare dalla intensità della precipitazione R secondo:

$$\Lambda = \lambda R$$

dove λ è espresso in $[s \cdot mm/h]^{-1}$ e R in $[mm/h]$.

Per il particolato λ è funzione del diametro aerodinamico e può essere stimata dal grafico seguente.



Table 2-10
Default Values of the Scavenging Coefficient, $\lambda(s \cdot mm/hr)^{-1}$

Pollutant	Liquid Precipitation	Frozen Precipitation
SO ₂	3×10^{-5}	0.0
SO ₄ ⁻	1×10^{-4}	3×10^{-5}
NO _x	0.0	0.0
HNO ₃	6×10^{-5}	0.0
NO ₃ ⁻	1×10^{-4}	3×10^{-5}

Per inquinanti gassosi può invece essere usata la tabella seguente, riportata nel manuale di Calpuff:

DESCRIZIONE DEL POST-PROCESSORE MMS RUN ANALYZER

Per il post-processamento dei dati forniti da MMS WinDimula è necessario utilizzare il software MMS Run Analyzer. Tale programma permette di:

- leggere i file di output generati dai principali modelli di calcolo della diffusione di inquinanti;
- estrarre la serie temporale dei risultati calcolati per uno o più recettori;
- effettuare vari tipi di elaborazioni, come il calcolo della media, dei percentili, dei superamenti di soglia aggregando i dati su varie basi temporali anche su singole fasce orarie;
- effettuare la verifica del rispetto dei principali limiti di legge;
- gestire la presenza dei dati della concentrazione di fondo;
- gestire la presenza di dati mancanti o non calcolati;
- visualizzare graficamente i risultati tramite isolinee personalizzabili;
- esportare le isolinee su Google Earth;
- esportare i dati su file di vario formato (TXT, GRD, XYZ...);
- indicare la percentuale di validità dei dati elaborati.

METODOLOGIA PER LA STIMA DEGLI IMPATTI SULL'ATMOSFERA

La valutazione quantitativa degli impatti sull'atmosfera in termini di qualità dell'aria, dovuto all'insediamento del polo estrattivo di Vecchiazzano, sito in comune di Forlì, comprendente tre diverse aree estrattive che opereranno in sintonia, sommati all'inquinamento di fondo rilevato dalla centralina precedentemente descritta, avviene attraverso lo studio modellistico previsionale dei valori delle concentrazioni in atmosfera delle polveri di PM10.

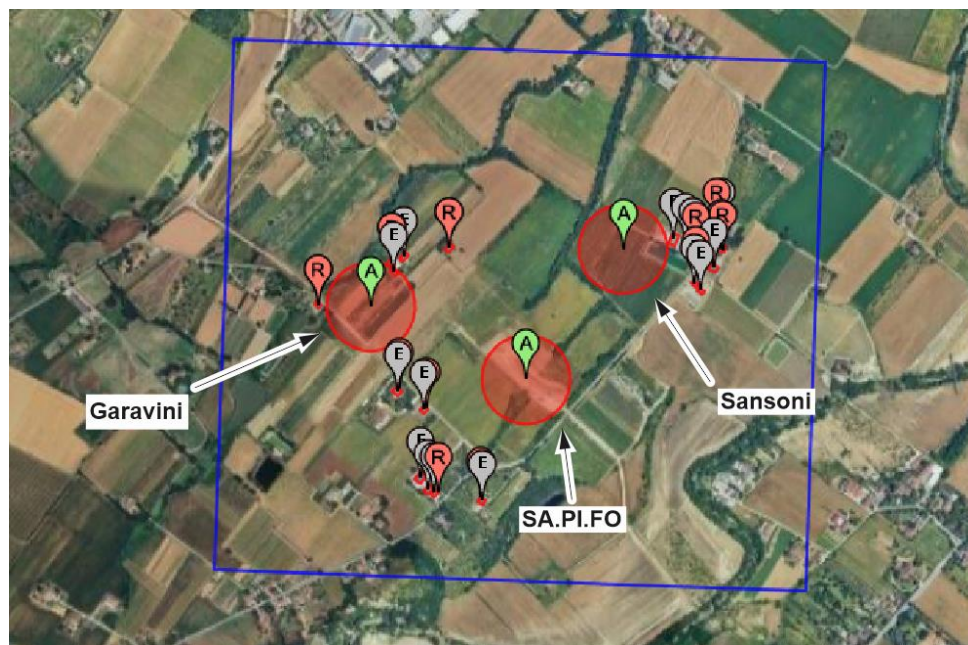
Lo studio del modello previsionale è stato sviluppato secondo le seguenti fasi:

- definizione di un reticolo cartesiano di riferimento;
- caratterizzazione delle sorgenti areali presenti nell'area di studio: sono state individuate e modellate tre distinte sorgenti areali, ciascuna corrispondente a una delle attività estrattive operanti all'interno del polo estrattivo;
- caratterizzazione dei ricettori discreti;
- caratterizzazione delle condizioni meteo dell'area oggetto di studio;
- caratterizzazione e quantificazione delle emissioni atmosferiche degli inquinanti rilasciati dalle attività estrattive, quantificate e incluse nell'elaborato "*Bilancio Emissivo*" allegato insieme al presente documento. A scopo cautelativo, si considerano le attività in funzione per 8 ore al giorno e simultaneamente;
- post processamento dei dati con RunAnalyzer: analisi dei risultati delle concentrazioni degli inquinanti attese nell'area di studio comprensivi dei dati delle concentrazioni di fondo, e confronti con i limiti normativi vigenti.

Nel modello non si considera la caratterizzazione e quantificazione delle emissioni da traffico indotto, in quanto essendo in una zona rurale, sono da considerarsi minimo rispetto alle attività estrattive. In più i dati di concentrazione di fondo inseriti, ricavati da una stazione urbana, sono sicuramente più alti di quelli effettivamente presenti sull'area.

RETICOLO CARTESIANO DI RIFERIMENTO

Il reticolo cartesiano di riferimento al modello di MMSDimula corrisponde ad un rettangolo di circa 1,35 km x 1,20 km come indicato nella mappa.



Tale rettangolo comprende un'area caratterizzata da un'orografia completamente pianeggiante. Ai fini della simulazione si considera quindi un terreno piatto in cui i punti della griglia sono posizionati ad una quota di 0 m s.l.m.

Col tag verde e la lettera A, sono indicate le sorgenti areali.

Col tag grigio e la lettera E, sono indicati gli edifici.

Col tag rosso e la lettera R, sono indicati i ricettori sensibili, corrispondenti alle abitazioni (anche disabitate).

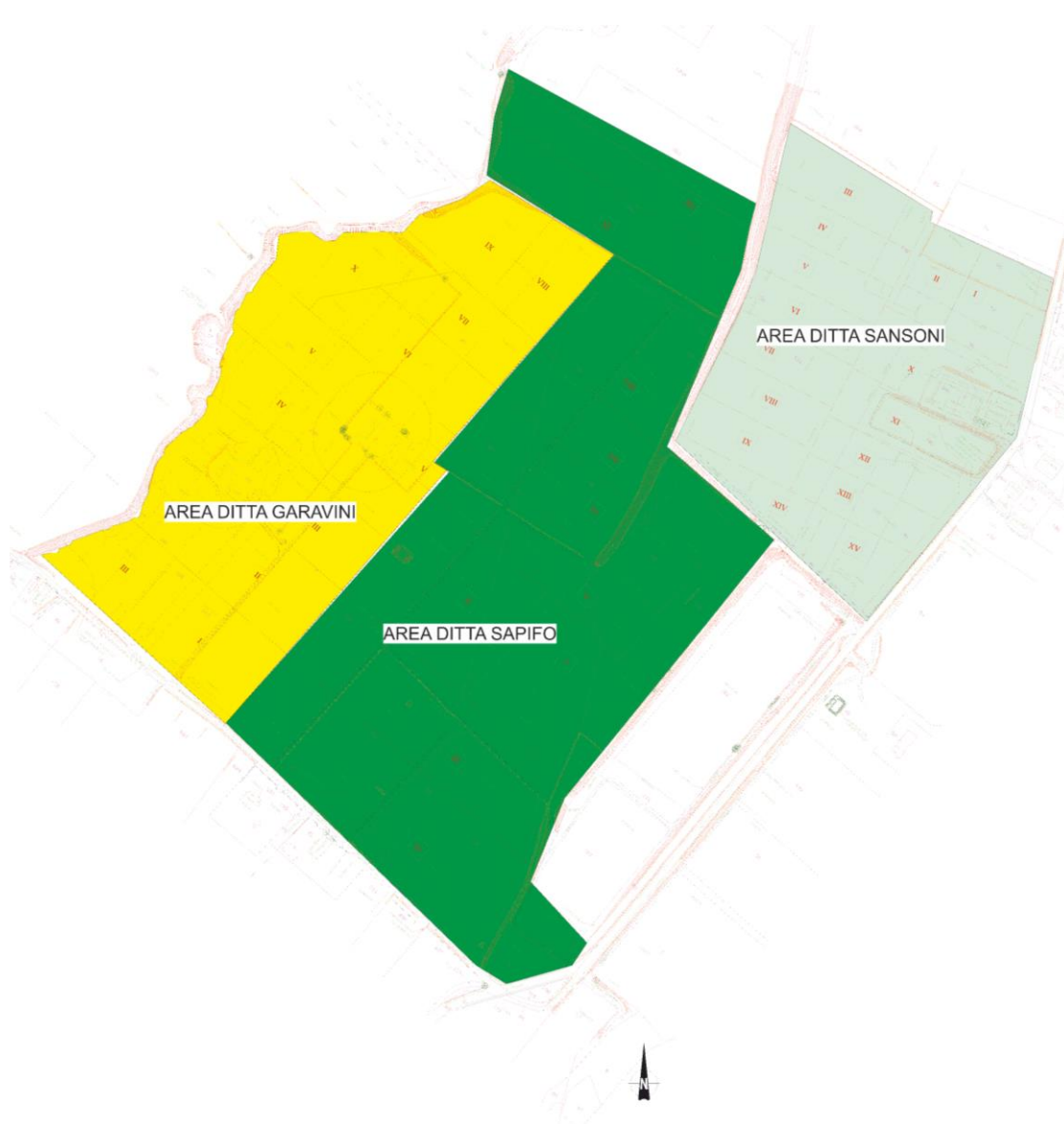
CARATTERIZZAZIONE DELLE SORGENTI EMISSIVE

L'area oggetto di studio comprende tre distinte sorgenti areali, ciascuna corrispondente a una delle proprietà descritte in precedenza. La posizione e le caratteristiche di queste sorgenti sono riportate in tabella e in mappa.

	X(m)	Y(m)	Altezza del rilascio sul suolo (m)	Raggio di emissione (m)	Durata attività (ore)	Emissione PM10 (g/s)
SA.PI.FO	741149	4896383	1.00	100	8	0.175
GARAVINI	740789	4896535	1.00	100	8	0.060
SANSONI	741359	4896686	1.00	100	8	0.060

Considerando che per tutte e tre le ditte l'attività avverrà un solo settore per volta si è ipotizzato:

- per la Sapifo un'emissione comprendente l'attività estrattiva sul I° settore, i due impianti di lavorazione inerti (frantumatore e vaglio), il trasporto interno, la formazione di cumuli, il carico-scarico dei mezzi pesanti ed i gas di scarico
- per Garavini un'emissione comprendente l'attività estrattiva sul III° settore, il trasporto interno, la formazione di cumuli, il carico-scarico dei mezzi pesanti ed i gas di scarico
- per la Sansoni un'emissione comprendente l'attività estrattiva sul XI° settore, il trasporto interno, la formazione di cumuli, il carico-scarico dei mezzi pesanti ed i gas di scarico.



CARATTERISTICHE DEI RICETTORI DISCRETI

Come ricettori discreti, indicati con la sigla R e seguiti da un numero, si considerano i ricettori posti nei punti ritenuti più significativi (vedi planimetria).

Nello specifico sono stati considerati 11 ricettori.



CARATTERIZZAZIONE METEO CLIMATICA

I dati meteorologici sono stati acquisiti tramite il portale MMS WindDimula, che, previo pagamento, ha fornito un file contenente tutte le informazioni meteo necessarie.

I dati estrapolati comprendono un intervallo temporale di un anno, dal 1 gennaio 2023 al 31 Dicembre 2023, per tutte le 24 ore.

Nello specifico i dati forniti in input al modello di MMS WindDimula sono:

- classe di stabilità (dalla A alla F);
- altezza di rimescolamento (m);
- temperatura dell'aria (°K);
- velocità del vento (m/s);
- direzione del vento (gradi);
- percentuale di precipitazione (mm/h);
- forza dell'inversione;

- deviazione standard sulla direzione del vento;
- velocità d'attrito e lunghezza di Monin-Obukov.

Di seguito sono riportate le statistiche delle principali variabili meteorologiche considerate nel modello.

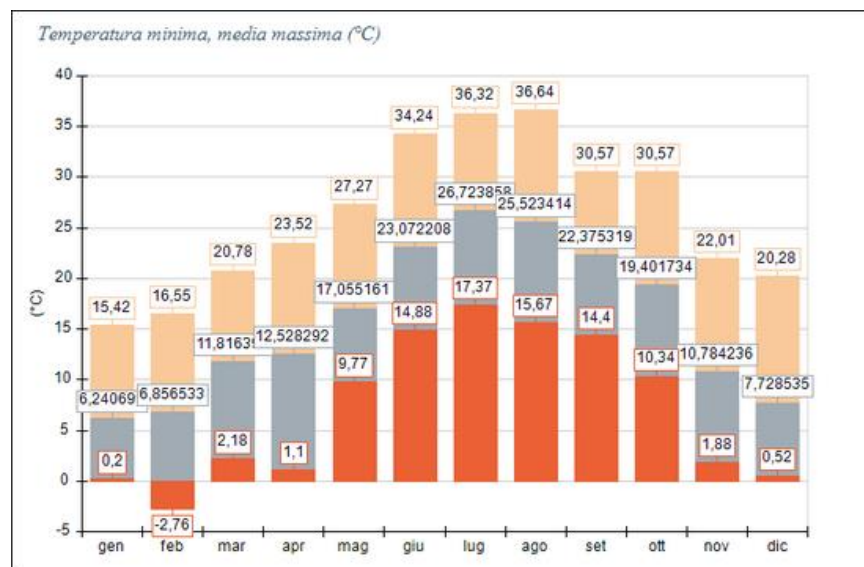
Temperatura

L'analisi dei dati ricavati da Dext3er ha permesso di arrivare ai seguenti risultati riferiti all'intervallo temporale 1 gennaio 2023 – 31 dicembre 2023:

- il valore minimo registrato è stato di -2.79 °C registrato a febbraio;
- il valore massimo registrato è stato di 36.64 °C registrato a agosto;
- il valore medio annuale è pari a 15.90 °C.

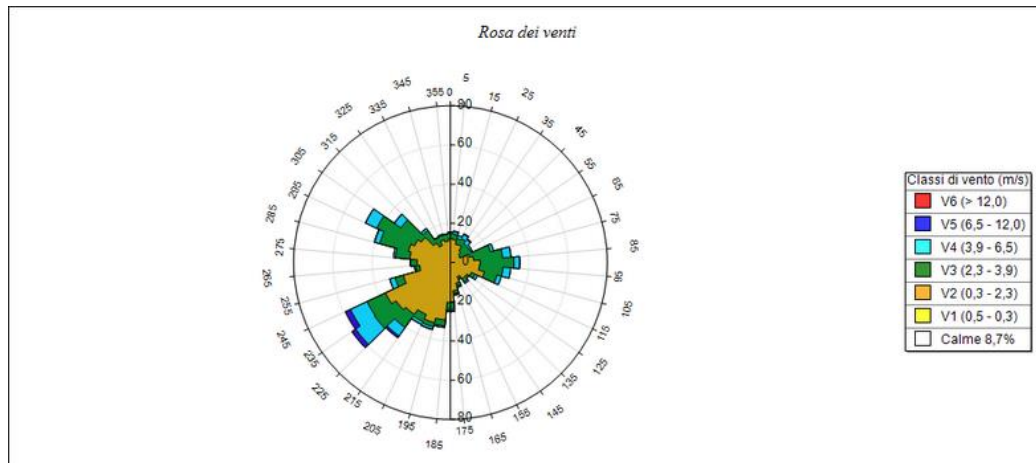
Periodo	Minima	Media	Massima
Anno	-2,76	15,90	36,64
Primavera	1,10	13,81	27,27
Estate	14,88	25,13	36,64
Autunno	1,88	17,54	30,57
Inverno	-2,76	6,94	20,28
gen	0,20	6,24	15,42
feb	-2,76	6,86	16,55
mar	2,18	11,82	20,78
apr	1,10	12,53	23,52
mag	9,77	17,06	27,27
giu	14,88	23,07	34,24
lug	17,37	26,72	36,32
ago	15,67	25,52	36,64
set	14,40	22,38	30,57
ott	10,34	19,40	30,57
nov	1,88	10,78	22,01
dic	0,52	7,73	20,28

Tali risultati si traducono graficamente nell'istogramma sotto, nel quale vengono indicate in arancione le temperature minime, in grigio quelle medie ed in giallo le quelle massime.



Vento

Partendo da dati di velocità del vento (in *m/s*) e direzione del vento (in *gradi*) è stato possibile ricostruire la rosa dei venti, un diagramma che rappresenta schematicamente la provenienza dei venti che insistono su una determinata area ed in un determinato periodo. Tale rosa dei venti è costituita da 36 settori di ampiezza 10° ciascuno.



Nel dettaglio i valori corrispondenti sono indicati nella tabella seguente:

SECTORS	V1 (0,5 - 0,3)	V2 (0,3 - 2,3)	V3 (2,3 - 3,9)	V4 (3,9 - 6,5)	V5 (6,5 - 12,0)	V6 (> 12,0)	Totale	Vmed (m/s)
355,0 - 5,0	0,00	12,21	2,74	0,57	0,00	0,00	15,53	1,60
5,0 - 15,0	0,00	11,76	2,74	1,26	0,34	0,00	16,10	2,01
15,0 - 25,0	0,00	9,70	2,97	1,60	0,00	0,00	14,27	2,17
25,0 - 35,0	0,00	9,93	3,54	2,28	0,46	0,00	16,21	2,41
35,0 - 45,0	0,00	7,42	4,34	2,51	0,57	0,00	14,84	2,71
45,0 - 55,0	0,00	5,94	5,71	1,03	0,00	0,00	12,67	2,40
55,0 - 65,0	0,00	5,37	6,39	0,68	0,11	0,00	12,56	2,47
65,0 - 75,0	0,00	10,05	11,07	1,60	0,00	0,00	22,72	2,42
75,0 - 85,0	0,00	11,87	14,84	4,22	0,11	0,00	31,05	2,62
85,0 - 95,0	0,00	15,18	17,24	2,85	0,11	0,00	35,39	2,48
95,0 - 105,0	0,00	14,84	12,10	3,88	0,00	0,00	30,82	2,48
105,0 - 115,0	0,00	17,92	6,62	2,28	0,00	0,00	26,83	2,06
115,0 - 125,0	0,00	11,76	2,17	1,37	0,00	0,00	15,30	1,88
125,0 - 135,0	0,00	10,16	1,26	0,11	0,00	0,00	11,53	1,43
135,0 - 145,0	0,00	10,16	2,05	0,80	0,00	0,00	13,01	1,68
145,0 - 155,0	0,00	7,99	1,26	0,34	0,00	0,00	9,59	1,49
155,0 - 165,0	0,00	10,84	1,48	0,68	0,11	0,00	13,13	1,62
165,0 - 175,0	0,00	14,38	1,48	0,57	0,23	0,00	16,67	1,60
175,0 - 185,0	0,00	20,32	3,31	0,91	0,57	0,00	25,11	1,73
185,0 - 195,0	0,00	29,34	3,08	0,68	0,11	0,00	33,22	1,62
195,0 - 205,0	0,00	31,74	2,17	1,26	0,23	0,00	35,39	1,57
205,0 - 215,0	0,00	29,22	4,00	1,48	0,11	0,11	34,93	1,66
215,0 - 225,0	0,00	32,19	8,22	5,25	1,14	0,00	46,80	2,22
225,0 - 235,0	0,00	33,90	13,47	11,64	2,28	0,11	61,42	2,65
235,0 - 245,0	0,00	36,53	10,39	9,36	2,85	0,00	59,13	2,54
245,0 - 255,0	0,00	24,89	4,34	2,74	0,11	0,00	32,08	1,86
255,0 - 265,0	0,00	15,75	2,05	0,57	0,00	0,00	18,38	1,55
265,0 - 275,0	0,00	17,01	3,31	0,11	0,00	0,00	20,43	1,60
275,0 - 285,0	0,00	20,78	7,31	1,03	0,00	0,00	29,11	1,87
285,0 - 295,0	0,00	22,15	15,18	2,63	0,23	0,00	40,18	2,30
295,0 - 305,0	0,00	20,21	21,23	6,28	0,11	0,00	47,83	2,61
305,0 - 315,0	0,00	18,15	12,67	4,00	0,23	0,00	35,05	2,47
315,0 - 325,0	0,00	12,21	7,76	1,26	0,11	0,00	21,35	2,20
325,0 - 335,0	0,00	9,70	4,34	0,34	0,00	0,00	14,38	1,92
335,0 - 345,0	0,00	11,99	2,40	0,57	0,00	0,00	14,95	1,79
345,0 - 355,0	0,00	10,96	3,54	0,11	0,00	0,00	14,61	1,80
Variabili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calme < 0,5	87,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,44	0,00
Totale	87,44	594,52	228,77	78,88	10,16	0,23	1000,00	0,00

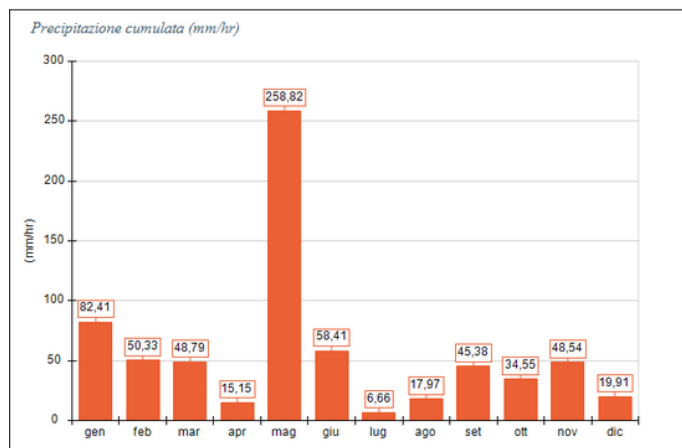
dove si nota che una buona parte dei venti considerati proviene principalmente da Sud-Ovest ma parte provenienti anche da Nord-Ovest in autunno-inverno.

Precipitazioni

L'analisi dei dati sulle precipitazioni ha dato i seguenti risultati:

- il valore massimo raggiunto è 20.27 mm/h registrato a settembre;
- il valore cumulato massimo viene raggiunto in maggio (alluvione);
- il mese a più scarsa piovosità risulta essere luglio.

Periodo	Media	Massima	Cumulata
Anno	0,08	20,27	686,92
Primavera	0,15	12,80	322,76
Estate	0,04	18,44	83,04
Autunno	0,06	20,27	128,47
Inverno	0,07	4,49	152,65
gen	0,11	3,83	82,41
feb	0,07	4,49	50,33
mar	0,07	3,99	48,79
apr	0,02	3,49	15,15
mag	0,35	12,80	258,82
giu	0,08	18,44	58,41
lug	0,01	3,65	6,66
ago	0,02	2,49	17,97
set	0,06	20,27	45,38
ott	0,05	6,98	34,55
nov	0,07	8,32	48,54
dic	0,03	1,99	19,91



CARATTERIZZAZIONE E QUANTIFICAZIONE DEGLI INQUINANTI EMESSI

Il passo successivo è quello di esaminare il singolo inquinante ed i relativi valori di concentrazione (massima e media) e deposizione calcolati dal modello di MMSDimula, riferiti all'anno 2023:

VALORI MEDI PM10			
Descrizione	X (m)	Y (m)	Valore (g/m3)
R1	740833	4896635	1.7367E-06
R2	740963	4896674	1.2523E-06
R3	741524	4896683	1.6113E-06
R4	741570	4896741	1.0071E-06
R5	741585	4896690	1.0228E-06
R6	741526	4896630	1.867E-06
R7	740923	4896311	1.8505E-06
R8	740860	4896353	1.9428E-06
R9	740667	4896534	2.0744E-06
R10	741054	4896112	1.0575E-06
R11	740959	4896120	7.217E-07

VALORI MASSIMI <i>PM10</i>			
Descrizione	X (m)	Y (m)	Valore (g/m ³)
R1	740833	4896635	0.00016119
R2	740963	4896674	0.00018661
R3	741524	4896683	0.00013668
R4	741570	4896741	0.00012224
R5	741585	4896690	0.00011983
R6	741526	4896630	0.00013484
R7	740923	4896311	0.00018076
R8	740860	4896353	0.00021333
R9	740667	4896534	0.00017589
R10	741054	4896112	0.00022902
R11	740959	4896120	0.00017973

DEPOSIZIONE MEDIA <i>PM10</i>			
Descrizione	X (m)	Y (m)	Valore (g/m ² h)
R1	740833	4896635	5.2563E-05
R2	740963	4896674	4.3145E-05
R3	741524	4896683	4.8542E-05
R4	741570	4896741	3.4586E-05
R5	741585	4896690	3.3062E-05
R6	741526	4896630	5.989E-05
R7	740923	4896311	6.3224E-05
R8	740860	4896353	6.2976E-05
R9	740667	4896534	7.4563E-05
R10	741054	4896112	0.00002963
R11	740959	4896120	2.5048E-05

POSTPROCESSAMENTO DEI DATI CON RUNANALYZER

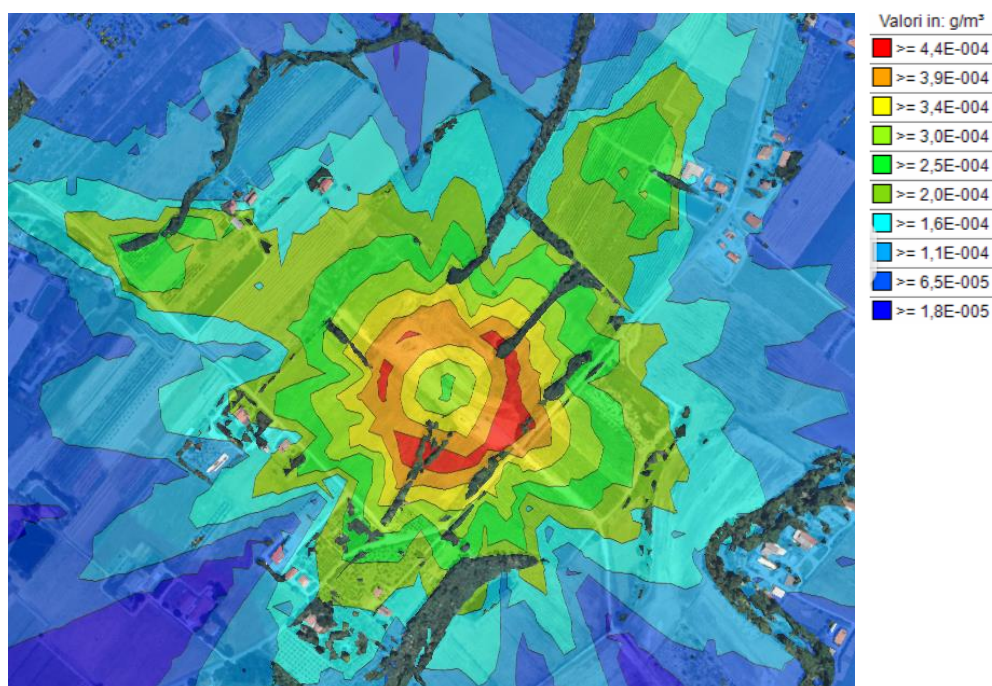
I dati ottenuti con MMSDimula sono stati acquisiti dal software RunAnalyzer e sommati ai valori di concentrazioni di fondo ricavata dalla centralina sopra descritta.

Nel nostro caso, per il PM10 si è valutato il superamento dei limiti della media annuale, pari a 40 µg/m³, ed il limite giornaliero, ovvero numero di giorni con concentrazioni superiori a 50 µg/m³, pari a 35.

Analisi dei Risultati ottenuti – PM10

Descrizione	X (m)	Y (m)	Un anno soglia (40 ug/m ³)	Un giorno soglia (50 ug/m ³ max. 35 superamenti)	Un giorno soglia (50 ug/m ³ max. 35 superamenti) - Percentuale dati validi
R1	740833	4896635	0	11	98.90%
R2	740963	4896674	0	13	98.90%
R3	741524	4896683	0	12	98.90%
R4	741570	4896741	0	11	98.90%
R5	741585	4896690	0	12	98.90%
R6	741526	4896630	0	14	98.90%
R7	740923	4896311	0	12	98.90%
R8	740860	4896353	0	13	98.90%
R9	740667	4896534	0	12	98.90%
R10	741054	4896112	0	11	98.90%
R11	740959	4896120	0	8	98.90%

I risultati dimostrano che il limite medio annuale di PM10 non è mai superato in nessun ricettore, così come il limite di 50 (µg/m³) calcolato sulla media di 24 ore



-Valori massimi di concentrazione di PM10-

CONCLUSIONI

Le analisi di questo elaborato, realizzate su base modellistica, considerando tutte le sorgenti inquinanti e le concentrazioni di fondo ricavate dalla centralina più vicina, hanno mostrato ai ricettori il non superamento dei limiti di legge.

La metodologia utilizzata per svolgere l'analisi è da ritenersi sicuramente molto cautelativa, in quanto si è valutato un funzionamento continuo dalle 7:00 alle 17:00 di tutte le attività estrattive, sia esistenti che di futura realizzazione, presenti all'interno del polo estrattivo di Vecchiazzano e valori di concentrazioni di fondo più alti di quelli reali dell'area.

Ilaria Venturini