

UNA METODOLOGIA PER VALUTARE LE CONCENTRAZIONI DEGLI AEROSOL MARINI PRIMARI NELLE AREE COSTIERE

P. BARSANTI, G. BRIGANTI, A. CAPPELLETTI, P. MARRI

ENEA - Dipartimento Ambiente, Cambiamenti Globali e Sviluppo Sostenibile
Sede di Pisa



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

UNA METODOLOGIA PER VALUTARE LE CONCENTRAZIONI DEGLI AEROSOL MARINI PRIMARI NELLE AREE COSTIERE

P. BARSANTI, G. BRIGANTI, A. CAPPELLETTI, P. MARRI

ENEA - Dipartimento Ambiente, Cambiamenti Globali e Sviluppo Sostenibile
Sede di Pisa

Dedica all'Ing. Paolo Barsanti

Questo lavoro è dedicato al collega Paolo Barsanti, il primo nella lista degli autori; Paolo ha iniziato questo lavoro con il solito entusiasmo, ma non ha potuto purtroppo terminarlo a causa di un grave malattia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

UNA METODOLOGIA PER VALUTARE LE CONCENTRAZIONI DEGLI AEROSOL MARINI PRIMARI NELLE AREE COSTIERE

PAOLO BARSANTI, GINO BRIGANTI, ANDREA CAPPELLETTI, PIETRO MARRI

Sommario

Per la normativa italiana ed europea sull'inquinamento atmosferico (DM 60/2002), le concentrazioni giornaliere di PM10 non devono superare la soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 35 volte in un anno; tali concentrazioni non distinguono, però, i contributi delle emissioni antropiche da quelli naturali (erosioni crostali, sali marini, sabbie sahariane, ceneri vulcaniche, ecc.). Questo studio ha appunto lo scopo di descrivere una metodologia per stimare il contributo degli aerosol marini, utilizzando algoritmi per la modellazione delle emissioni dal "mare aperto" e dalla "zona dei frangenti" ed un modello di dispersione atmosferica. Questa metodologia, applicata alla zona costiera compresa tra Massa Carrara e Viareggio, mostra che le emissioni dovute al mare aperto sono molto più basse rispetto a quelle della zona dei frangenti e possono diventare significative solo con venti intensi che, nell'area di studio, sono in genere poco frequenti e di breve durata; invece, le emissioni dalla zona dei frangenti sono elevate e persistenti e possono causare alte concentrazioni fino ad alcuni chilometri dalla costa nell'entroterra. Il confronto tra le concentrazioni di aerosol, simulate con la metodologia proposta, e quelle misurate a distanze di 2000 m e 4000 m dal mare, ha dimostrato che il contributo percentuale dei sali marini per quanto riguarda i livelli di PM10 può anche superare il 70%. La presenza di una zona dei frangenti, persistente anche dopo intense mareggiate, con venti bassi e perpendicolari alla costa, può determinare livelli di concentrazioni e gradienti spaziali elevati. Questo lavoro preliminare, svolto nell'ambito del Progetto MINNI (www.minni.org), offre una panoramica completa, estendibile ad altre aree costiere, sui processi di generazione e dispersione degli aerosol marini, in differenti situazioni sia meteorologiche che di moto ondoso; esso costituisce il punto di partenza per un'attività sperimentale di validazione e approfondimento, in collaborazione con soggetti istituzionali aventi compiti di controllo sulla qualità dell'aria.

Parole chiave: fisica dell'atmosfera, dispersione atmosferica, aerosol marini.

Abstract

European and Italian regulations (DM 60/2002) fix for atmospheric particulate matter PM10 the threshold of $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ as limit not to be exceeded more than 35 times per year (24 hour mean); unfortunately, such prescriptions do not distinguish anthropic contributions from natural ones (sea salt, saharian sand, crostal erosion, volcanic ashes, etc.). The aim of this study is to set up a methodology in order to estimate sea salt emissions, both from open sea and surf zone, and to model atmospheric dispersion of marine aerosols. The proposed methodology, applied to the coastal zone between Massa Carrara and Viareggio (Tuscany, Italy), shows specific open sea emissions are generally very low in comparison with the surf zone ones: they are not negligible only with strong winds, but such meteorological conditions are neither persistent nor very frequent in the selected area. On the contrary, sea surf contributions are much more strong (at least 1 order of magnitude), peak-shaped and persistent then the first ones, and can lead to high PM10 concentration fields up to few kilometres inland. The comparison between model outputs and observations, in two points placed at 2000 and 4000 m from the shoreline, has shown an amount of sea salt in total PM10 even greater then 70% in mass. The existence of a surf zone, which can persist many hours or days even after a storm, can produce both elevated PM concentrations and gradients, mainly for light winds perpendicular to the shoreline. This work, supported by MINNI Project (www.minni.org), is suitable for other coastal areas as well and it is aimed to furnish an overview of marine particulate production and atmospheric dispersion processes; it is the starting point of an experimental investigation program, supported by institutional air quality authorities.

Keywords: atmospheric physics, atmospheric dispersion, sea spray aerosol.

Indice

Premessa.....	7
1. Introduzione	7
2. Obiettivi del lavoro	8
3. Descrizione della metodologia.....	8
3.1 <i>Meteorologia e Stato del Mare</i>	8
3.2 <i>Calcolo del moto ondoso e dell'ampiezza della zona dei frangenti</i>	12
3.3 <i>Calcolo del termine sorgente in mare aperto</i>	13
3.4 <i>Calcolo del termine sorgente nella "surf zone"</i>	14
4. Analisi dei risultati delle simulazioni.....	21
5. Conclusioni	26
Ringraziamenti.....	27
Bibliografia	27

Premessa

Questo rapporto tecnico è stato svolto nell'ambito della convenzione con il Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare "Aggiornamento del sistema modellistico MINNI (www.minni.org) e predisposizione di scenari di emissione e di deposizione/concentrazione al suolo di alcuni inquinanti atmosferici".

1. Introduzione

Per lo studio dell'ambiente atmosferico è necessario acquisire elementi conoscitivi, affidabili e scientificamente rigorosi, sul quadro emissivo attuale e quello futuro (D'Elia et al., 2007). Uno degli inquinanti più complicati da studiare è il particolato atmosferico, la cui emissione è difficilmente quantificabile, sia perché è legata a molteplici e incontrollabili processi naturali (contributi crostali, marini, biogenici, ecc.) ed antropici (traffico veicolare, riscaldamento domestico, impianti termoelettrici e industriali), sia perché gli aerosol hanno anche una componente secondaria, che si forma a seguito di trasformazioni fotochimiche.

E' noto che gli aerosol marini fanno aumentare i livelli di particolato atmosferico nelle aree costiere e ciò è particolarmente importante in Italia, caratterizzata da coste estese (7550 km) e densamente abitate. Per discriminare tale contributo da quello antropogenico, che può creare potenziali danni alla popolazione, esso può essere stimato con l'ausilio di modelli matematici in grado di simulare i processi di dispersione atmosferica e quelli di emissione dalla superficie del mare (Barsanti et al., 2008).

Già dal 1950 erano note alla comunità scientifica le relazioni tra vento, modo ondoso e concentrazioni di aerosol marini (Woodcock, 1953; Blanchard and Woodcock, 1980). Più recenti osservazioni sperimentali hanno mostrato (Lovett, 1978; McDonald et al. 1982; Fitzgerald, 1991; Taylor and Wu, 1992; Gustafsson and Franzén, 1996) che le concentrazioni di aerosol marino sono elevate quando il vento supera un determinato valore di soglia e tendono ad aumentare con l'intensità del vento (Strekalov and Panchenko, 1994; Spiel and De Leeuw., 1996; Piazzola and Despiou, 1997; Feliu et al., 1999; Morcillo et al., 2000).

La produzione specifica degli aerosol (numero di particelle per unità di tempo e di area) avviene in modi diversi: al largo è determinata solo dall'azione del vento sulla superficie del mare (Andreas et al., 1995) mentre, vicino alla costa, dalle onde frangenti; in questo ultimo caso la produzione specifica è molto più elevata (anche di quasi due ordini di grandezza) rispetto a quella al largo (Fitzgerald, 1991; O'Dowd et al., 1997).

Gli aerosol marini sono costituiti da particelle con una granulometria tra 0.1 μm e 400 μm (Zezza and Macrì, 1995); mentre le particelle fini, inferiori a 10 μm , persistono nell'atmosfera per tempi lunghi e possono percorrere spazi fino a centinaia di chilometri, quelle più grossolane tendono a depositarsi velocemente nelle aree vicino al mare.

La deposizione secca di sale marino è la principale responsabile della corrosione dei materiali nelle aree costiere (Morcillo et al., 2000; Meria et al., 2006); tale parametro, misurato mediante campionatori passivi (Meira et al., 2006) o con altre tecniche di misura (ISO 9225, 1992; ISO 2810, 1982), a differenti distanze dalla costa, può essere usato come tracciante della distribuzione spaziale degli aerosol marini.

Diversi studi hanno dimostrato che la concentrazione di aerosol marino aumenta passando dal mare aperto a costa (Petelski T., 2000), a causa della intensa emissione di aerosol dalla zona dei frangenti, e poi decresce rapidamente con la distanza dal mare (Ambler and Bain, 1955); mentre la granulometria appare essere piuttosto grossolana sulla costa, diventa più fine verso l'entroterra, a causa della deposizione per gravità della frazione "coarse" (Petelski T., 2000).

2. Obiettivi del lavoro

L'obiettivo di questo lavoro è mettere a punto una metodologia in grado di calcolare il fattore di emissione orario di sali marini, utilizzando la minore quantità possibile di informazioni; è, infatti, la carenza di dati che limita, molto spesso, le applicazioni modellistiche. Nel dettaglio, lo scopo è quello di:

- valutare i livelli di aerosol emessi a largo e nella zona dei frangenti ("surf zone"); quest'ultima è una sorgente importante (Fitzgerald, 1991; O'Dowd et al., 1997), tipica di spiagge sabbiose e bassi fondali, ed è spesso trascurata nelle applicazioni modellistiche;
- sfruttare dati già disponibili per altre applicazioni, in modo da evitare di condurre costose campagne di monitoraggio (per esempio osservazioni meteorologiche e di stato del mare).

La metodologia proposta è applicata in un'area del litorale Apuano-Versiliese, tra Marina di Carrara e Viareggio, nella Provincia di Lucca, in cui la costa è rettilinea ed il fondale basso e sabbioso (figura 1); in queste condizioni è possibile stimare in modo semplice e realistico la dinamica delle onde e l'ampiezza della zona dei frangenti. La tipologia di litorale scelta è molto frequente lungo le coste italiane e ciò rende le valutazioni condotte fruibili per altre aree.

Per simulare la dispersione in atmosfera degli aerosol è stato utilizzato il modello ISCST3 (EPA, 1995; EPA 1996). E' stato volutamente usato un codice regolamentare, in quanto lo scopo è quello di calcolare l'ordine di grandezza delle concentrazioni su un'area costiera piatta per un ampio tratto (circa dieci chilometri).

3. Descrizione della metodologia

Sono di seguito presentati i dati di input usati e le diverse formulazioni analitiche adottate nella metodologia.

3.1 Meteorologia e Stato del Mare

Sono stati elaborati i seguenti parametri meteorologici, acquisiti presso il Centro Ricerche ENEA di La Spezia (44°05'01", 9°52'55", 45 m s.l.m.), ad intervalli di dieci minuti: velocità e direzione del vento, temperatura, umidità dell'aria, radiazione solare globale, pressione atmosferica, e pioggia ([http://192.107.66.195/Meteo_Station/\[ITA\]_System_Description.htm](http://192.107.66.195/Meteo_Station/[ITA]_System_Description.htm)). I valori sono stati processati per estrarre medie orarie di direzione e velocità del vento e di temperatura dell'aria, da usare come input alle simulazioni modellistiche.

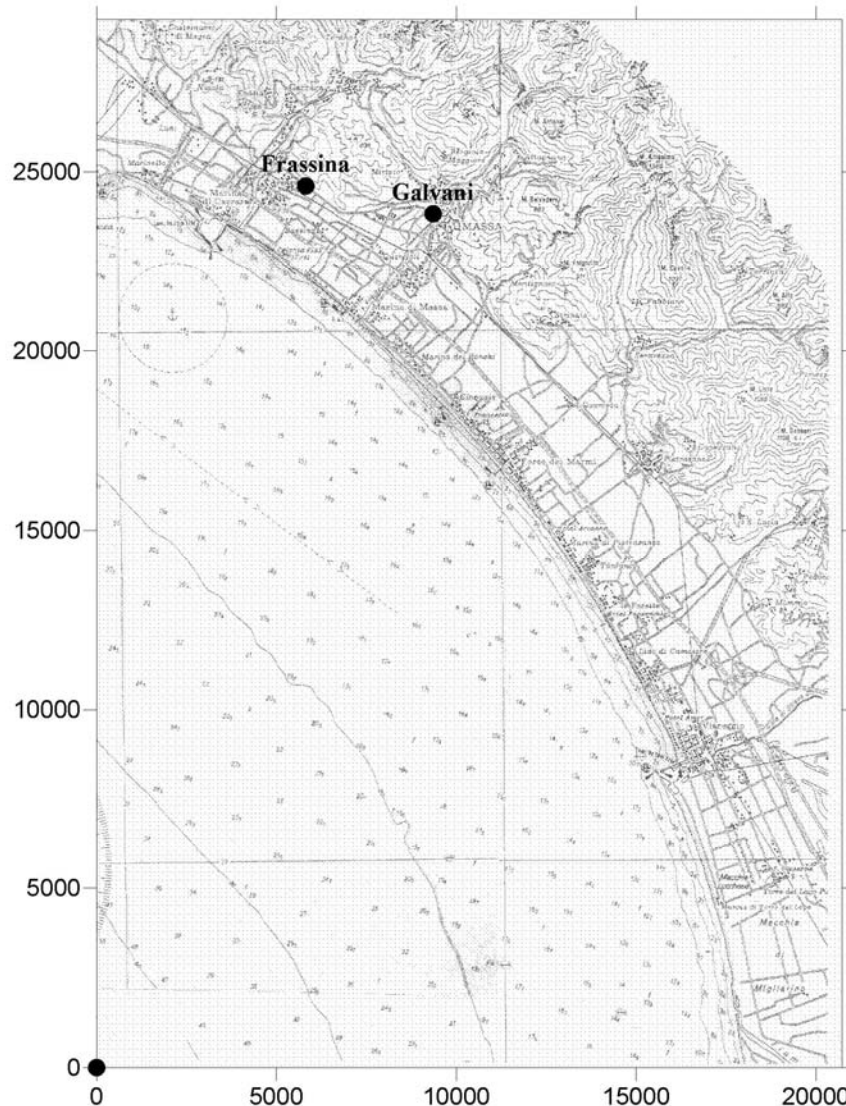


Figura 1. Descrizione dell'area di studio (circa 21 km x 29 km) con l'individuazione dei punti di misura del PM10 e del vento, stazioni di Via Frassina e Via Galvani (Massa). L'origine del sistema di riferimento è arbitraria, con l'asse delle ascisse orientato in direzione Ovest-Est.

Per limitare il numero di simulazioni, gli scenari sono stati scelti sulla base dei seguenti criteri, basati sull'analisi dei dati meteorologici:

- assenza di pioggia, in modo da non introdurre nei calcoli ulteriori potenziali incertezze relative alla entità del dilavamento della colonna d'aria;
- venti provenienti dal mare (settori compresi tra SO e NO);
- elevata persistenza giornaliera del vento ($P \geq 0.5$): una alta persistenza favorisce, infatti, sia la formazione che il mantenimento del moto ondoso (Shore Protection Manual, 1988).

Il parametro di persistenza giornaliera utilizzato (P) è quello proposto da Farrugia and Micaloff (2006), che si ottiene dividendo il modulo della media vettoriale giornaliera del vento (media vettoriale dei venti misurati ogni dieci minuti) per la media scalare (media dei valori scalari di intensità del vento misurati ogni dieci minuti):

$$P = |\bar{V}| / V.$$

La persistenza vale 1 in caso di venti direzionali ed si avvicina a 0 per direzioni molto variabili.

Nella tabella 1 sono indicati i 20 giorni selezionati per le simulazioni, insieme ai valori giornalieri della velocità (V), della direzione di provenienza (DI), della persistenza del vento (P), dello stato del mare e delle concentrazioni giornaliere di PM10 misurate nelle due stazioni di monitoraggio ARPAT di via Frassina (long. 10° 04' 46", lat. 44° 02' 55") e via Galvani (long. 10° 08' 11", lat. 44° 02' 17").

In questi giorni, lo stato del mare variava da “molto mosso” (tipo 4) a “molto agitato” (tipo 6), indicando la presenza di mareggiate. Lo stato del mare è stato ottenuto da osservazioni a vista effettuate dal personale della Capitaneria di Viareggio e raccolte nel Registro dello Stato del Tempo e del Mare, definito anche Registro dei Tempi di Pioggia. La scala Douglas, ideata dall'ammiraglio inglese H.P. Douglas nel 1917, viene tuttora utilizzata per classificare lo stato del mare e l'altezza delle onde (tabella 2).

La stazione di Frassina risente del traffico urbano e misura valori giornalieri anche superiori a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre quella di Galvani, che rileva solo il fondo urbano, mostra livelli medi giornalieri più bassi. Vale la pena osservare che, nelle condizioni meteo selezionate, i livelli di PM10 oltrepassano spesso la soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valore che può essere superato al massimo 35 volte all'anno (DM 60/2002); è presumibile che, in presenza di mareggiate, questi superamenti del limite di legge siano dovuti anche all'elevata emissione di particolato marino, che si sommano a quelli delle attività antropiche. La frequenza delle mareggiate è, infatti, piuttosto elevata nell'area di studio, come si evince dalla figura 2, nella quale sono riassunte le frequenze dello stato del mare osservato a Viareggio durante il 2007. Alla categoria di mare “Poco Mosso”, cui sono qui associate anche le classi mare “Calmo” e “Quasi Calmo”, corrispondono, chiaramente, basse emissioni di aerosol. Poiché la categoria “Poco Mosso” è osservata con frequenza di circa 1/3 del totale, nei 2/3 dei casi le emissioni di aerosol possono essere significative.

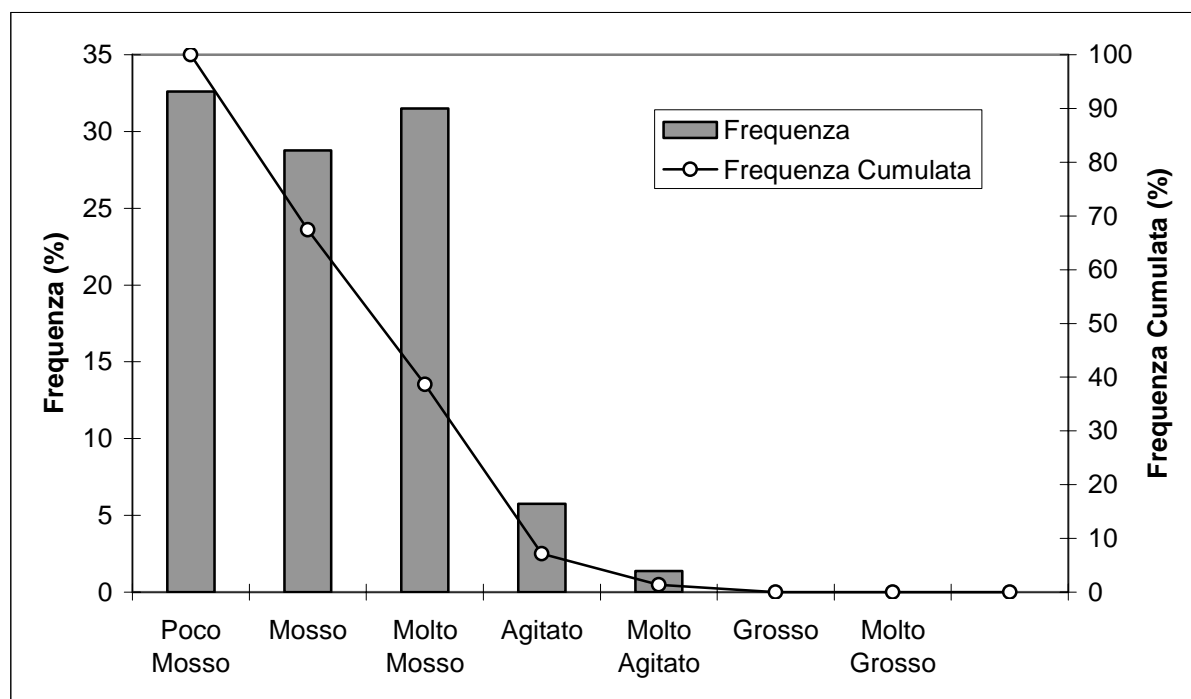


Figura 2. Frequenze dello stato del mare. Nella classe “Poco Mosso” sono comprese anche le classi “Calmo” e “Quasi Calmo”; si può notare che la frequenza cumulata delle categorie superiori a “Poco Mosso” è circa il 70% del totale.

Data	Giorno Giuliano	VV m/s	DV gradi	P	Frassina $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Galvani $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Stato Mare
02/01/2007	2	6.2	339.5	0.8	28.6	35.8	4
11/01/2007	11	1.6	154.6	0.5	207.1	56.1	4
21/01/2007	21	3.4	161.0	0.9	39.7	39.6	4
07/02/2007	38	6.1	240.6	1.0	62.4	46.5	4
01/03/2007	60	5.1	181.0	0.8	93.2	58.0	4
02/03/2007	61	4.2	169.9	0.8	111.1	65.6	4
03/03/2007	62	4.1	147.8	0.7	60.4	54.7	6
14/03/2007	73	2.4	121.0	0.5	118.8	67.0	4
15/05/2007	135	4.0	186.4	0.8	61.3	25.3	5
29/05/2007	149	4.1	334.2	0.7	64.2	18.7	6
16/06/2007	167	3.1	207.0	0.8	32.9	25.1	4
22/06/2007	173	3.7	177.6	0.9	82.7	30.2	4
23/06/2007	174	3.9	191.1	0.9	34.1	18.6	4
26/06/2007	177	4.6	211.2	0.9	59.5	21.9	4
27/06/2007	178	4.7	178.4	0.6	59.3	33.4	5
28/06/2007	179	2.4	194.0	0.7	50.8	29.0	4
04/07/2007	185	4.7	217.2	0.6	56.1	22.8	5
09/07/2007	190	4.0	182.2	0.8	60.3	19.1	4
09/08/2007	221	4.4	241.3	0.6	39.5	50.3	4
14/12/2007	348	3.1	114.8	0.5	131.4	44.9	4

Tabella 1. Scenari utilizzati per le simulazioni: valori giornalieri della velocità (VV), della direzione di provenienza (DV), della persistenza (P) del vento, delle concentrazioni giornaliere di PM10 misurate nelle stazioni ARPAT di monitoraggio di via Frassina e via Galvani a Massa e dello stato del mare.

Forza	Descrizione	Altezza Onde Minima (m)	Altezza Onde Massima (m)
0	Calmo	-	-
1	Quasi calmo	0	0.10
2	Poco Mosso	0.10	0.50
3	Mosso	0.50	1.25
4	Molto Mosso	1.25	2.50
5	Agitato	2.50	4.00
6	Molto Agitato	4.00	6.00
7	Grosso	6.00	9.00
8	Molto Grosso	9.00	14.00
9	Tempestoso	> 14.00	-

Tabella 2. Classificazione dello stato del mare secondo la Scala Douglas, con indicazione dell'altezza delle onde.

3.2 Calcolo del moto ondoso e dell'ampiezza della zona dei frangenti

L'ampiezza della zona dei frangenti determina l'entità dell'emissione e dipende essenzialmente da tre parametri: altezza (H_0) e lunghezza d'onda (L_0) al largo e batimetria d . L'onda che si avvicina a costa viene, infatti, modificata dalla batimetria, che ne altera la direzione (rifrazione) e l'altezza ("shoaling"), per l'interazione con il fondale.

Secondo la teoria lineare, un'onda monocromatica possiede una velocità (celerità o velocità di fase) al largo pari a $C_0 = [gL_0 / (2\pi)]^{0.5}$ ed una lunghezza d'onda $L_0 = gT^2 / (2\pi)$, dove T è il periodo dell'onda, $T = L_0 / C_0$ (USACE, 2002).

La lunghezza d'onda, L , è virtualmente indipendente dalla batimetria per $d/L > 1/2$. L'interazione con il fondale si ha invece nella "shoaling zone", definita dalla condizione $d/L < 1/2$, dove i valori di C_0 ed L_0 , relativi al mare aperto, vengono modificati e diventano funzioni della profondità d secondo le seguenti relazioni:

$$C = [gL / (2\pi) \cdot \tanh(2\pi d / L)]^{0.5}$$

$$L = gT^2 / (2\pi) \cdot \tanh(2\pi d / L)$$

L'altezza dell'onda in quest'ultima zona è data da:

$$H = H_0 K_r K_s,$$

dove i coefficienti di rifrazione (K_s) e di "shoaling" (K_r) sono calcolabili mediante le seguenti equazioni (Barsanti et al., 2008):

$$K_r = [(1 - \sin^2 \theta_0) / (1 - \sin^2 \theta_0 C^2 / C_0^2)]^{1/4}$$

$$K_s = (C_{g0} / C_g)^{0.5}$$

con C_{g0} e C_g , rispettivamente, le velocità di gruppo dell'onda in mare aperto e vicino a costa:

$$C_{g0} = C_0$$

$$C_g = 0.5 \cdot C \cdot \{1 + 4\pi d / [L \cdot \sinh(4\pi d / L)]\}$$

Con θ_0 è indicata la direzione dell'onda incidente al largo.

In acque profonde l'onda si rompe una volta raggiunta condizione di "steepness", $H/L < 1/7$ (Michell, 1893); durante l'avvicinamento a costa, nella "shoaling zone", il criterio di rottura di Michell non è più valido ed esistono diverse formulazioni, come per es. quella di Miche (1944) e quella di Goda (1975):

- Miche (1944) ha proposto di modificare la formula di Michell (1893) come segue:

$$H / L < 1 / 7 \cdot \tanh(2\pi d / L)^{0.5};$$

- Goda (1975) usa invece la pendenza della batimetria, $\tan\beta$, ed assume che:

$$H / L_0 < A \cdot \{1 - \exp[-1.5\pi d / L_0 (1 + B \cdot \tan^{4/3} \beta)]\};$$

per batimetrie con pendenza media $\tan\beta < 0.2$ ($\beta < 11^\circ$), valori ottimali per i coefficienti A e B sono, rispettivamente, 0.17 e 15; per inclinazioni più elevate, altri valori sono disponibili in letteratura (Tsai et al., 2002).

Entrambi i criteri di Miche (1944) e Goda (1975) forniscono risultati paragonabili, almeno per batimetrie a bassa pendenza media come quella dell'area in studio; pertanto, si è deciso di utilizzare Goda (1975) perché i valori sono più conservativi, dal momento che la zona dei frangenti calcolata risulta più estesa; quindi, una volta noti i parametri dell'onda in mare aperto, è possibile calcolare il punto di rottura dell'onda e delimitare la zona dei frangenti.

3.3 Calcolo del termine sorgente in mare aperto

Per la stima delle emissioni di particolato marino nell'intervallo granulometrico (diametro secco, D_d) $0.02 \leq D_d \leq 300 \mu\text{m}$, è usata la metodologia descritta in Barsanti et al. (2008), che usa i seguenti algoritmi¹:

- Mårtensson et al. (2003) per $0.02 \leq D_d \leq 1 \mu\text{m}$;
- Monahan et al. (1986) per $1 \leq D_d \leq 10 \mu\text{m}$;
- Smith and Harrison (1998) per $10 \leq D_d \leq 300 \mu\text{m}$.

Le forme delle funzioni generatrici (dF/dD_d), ovvero le distribuzioni del numero di particelle di una data dimensione emesse per unità di tempo e di superficie del mare ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), sono indicate di seguito.

Mårtensson et al. (2003)

$$\frac{dF}{dD_d} = \frac{3.84}{D_d} \cdot 10^{-6} U_{10}^{3.41} (A_k T_w + B_k)$$

$$A_k = c_4 D_d^4 + c_3 D_d^3 + c_2 D_d^2 + c_1 D_d + c_0$$

$$B_k = d_4 D_d^4 + d_3 D_d^3 + d_2 D_d^2 + d_1 D_d + d_0$$

T_w è la temperatura dell'acqua (in gradi K). I coefficienti $c_i(D_d)$ e $d_i(D_d)$ dipendono dalla granulometria del particolato (classi $k=1,3$): (1) 0.020-0.145, (2) 0.145-0.419, (3) 0.419-2.8 e sono tabulati (Tab. 3). Il calcolo dei coefficienti A_k e B_k richiede di esprimere i diametri in metri.

Monahan et al. (1986)

$$\frac{dF}{dD_d} = 1.373 \cdot U_{10}^{3.41} D_d^{-3} (1 + 0.057 \cdot D_d^{1.05}) \cdot 10^{1.19 \cdot \exp(-B^2)}$$

$$B = \frac{0.380 - \text{Log}(D_d)}{0.650}$$

Smith and Harrison (1998)

$$\frac{dF}{dD_d} = \sum_{i=1}^2 A_i \exp \left[-f_i \left(\ln \frac{D_d}{r_{0i}} \right)^2 \right]$$

$$r_{01} = 3 \mu\text{m} \quad r_{02} = 30 \mu\text{m}$$

$$f_1 = 1.5 \quad f_2 = 1$$

$$A_1 = 0.2 \cdot U_{10}^{3.5} \quad A_2 = 0.0068 \cdot U_{10}^3$$

Al fine di standardizzare le formulazioni usate, le generatrici di Monahan et al. (1986) e Smith and Harrison (1998) sono qui espresse in funzione del diametro secco D_d , anziché del raggio di equilibrio ($r_{80} \approx D_d$), riferito ad una umidità relativa standard dell'aria dell'80%, come originariamente riportate dagli autori.

Con la notazione U_{10} è indicata la velocità media del vento misurata a 10 m s.l.m.

¹ Per un errore di stampa, in Barsanti et al. (2008) è riportato un "range" che parte da 0.01 μm anziché da 0.02 μm , limite inferiore di validità del modello di Mårtensson et al. (2003).

Dimensioni aerosol	c ₄	c ₃	c ₂	c ₁	c ₀
μm					
0.020-0.145	-2.576·10 ³⁵	5.932·10 ²⁸	-2.867·10 ²¹	-3.003·10 ¹³	-2.881·10 ⁶
0.145-0.419	-2.452·10 ³³	2.404·10 ²⁷	-8.148·10 ²⁰	1.183·10 ¹⁴	-6.743·10 ⁶
0.419-2.8	1.085·10 ²⁹	-9.841·10 ²³	3.132·10 ¹⁸	-4.165·10 ¹²	2.181·10 ⁶

Dimensioni aerosol	d ₄	d ₃	d ₂	d ₁	d ₀
μm					
0.020-0.145	7.188·10 ³⁷	-1.616·10 ³¹	6.791·10 ²³	1.829·10 ¹⁶	7.609·10 ⁸
0.145-0.419	7.368·10 ³⁵	-7.310·10 ²⁹	2.528·10 ²³	-3.787·10 ¹⁶	2.279·10 ⁹
0.419-2.8	-2.859·10 ³¹	2.601·10 ²⁶	-8.297·10 ²⁰	1.105·10 ¹⁵	-5.800·10 ⁸

Tabella 3. Coefficienti della funzione generatrice di Mårtensson et al. (2003).

L'emissione, per unità di tempo ed area, di PM2.5 e PM10 secco di origine marina si calcola integrando le funzioni generatrici:

$$S_{PM2.5} = \frac{\pi}{6} \int_{0.02 \mu m}^{D_{2.5}^*} \rho_s D_d^3 \frac{dF}{dD_d} dD_d, \quad S_{PM10} = \frac{\pi}{6} \int_{0.02 \mu m}^{D_{10}^*} \rho_s D_d^3 \frac{dF}{dD_d} dD_d;$$

la densità media secca del sale di mare è circa $\rho_s=2200 \text{ kg/m}^3$ (Lewis and Schwartz, 2005).

Poiché gli impattori degli analizzatori selezionano aerosol di diametro inferiore a quello nominale e le dimensioni del particolato marino aumentano con l'umidità, è necessario definire bene gli estremi superiori di integrazione, $D_{2.5}^*$ e D_{10}^* . Ad esempio, per un'umidità del 80%, il diametro umido è circa il doppio del diametro secco (Barsanti et al., 2008; Zhang et al. 2005); quindi, con un tasso di umidità dell'80%, un impattore per misure di particolato da 10 μm seleziona solo le particelle con diametro secco di 5 μm. Per valutare le quantità complessive di aerosol con le funzioni generatrici, gli estremi superiori di integrazione diventano, pertanto:

$$S_{PM2.5} = \frac{\pi}{6} \int_{0.02 \mu m}^{1.25 \mu m} \rho_s D_d^3 \frac{dF}{dD_d} dD_d, \quad S_{PM10} = \frac{\pi}{6} \int_{0.02 \mu m}^{5 \mu m} \rho_s D_d^3 \frac{dF}{dD_d} dD_d.$$

Si noti che, al variare dell'umidità di riferimento, le emissioni di PM2.5 e PM10 cambiano; infatti, in linea teorica, la quantità complessiva aumenta con il diminuire dell'umidità ambientale, che abbassa le dimensioni degli aerosol e fa sì che gli impattori lascino transitare una quantità maggiore di particelle.

Poiché nell'area in esame sono attualmente disponibili solo misure di PM10, verrà trattato in seguito solo questo tipo d'inquinante.

3.4 Calcolo del termine sorgente nella "surf zone"

Come indicato da de Leew et al. (2000), per $D_d \geq 1 \mu m$, il calcolo dell'emissione nella "surf zone" si può ragionevolmente approssimare mediante le funzioni generatrici (Barsanti et al., 2008) valide per il mare aperto ed indicate nel §3.3, opportunamente modificate per tener conto dell'effettiva copertura schiumosa ("whitecap coverage"), che in mare aperto è inferiore di quella nella "surf zone".

Nella “surf zone” l’emissione è più elevata perché, oltre ai meccanismi di generazione degli aerosol attivi al largo, è presente quello indotto dal movimento dei frangenti verso costa, che produce particelle (“splash droplets”) con diametri superiori a 20 μm (Barsanti et al., 2008); in questa zona, l’emissione dipende dalla copertura schiumosa complessiva, che è proporzionale all’energia dissipata dall’onda (Pruszek et al., 2008).

In accordo con la teoria lineare delle onde, la densità di energia (energia per unità di superficie) è proporzionale al quadrato dell’altezza dell’onda. Si indichi con H_B (da non confondere con H_0 , l’altezza significativa al largo) il valore assunto dall’onda nel punto di rottura, al limite esterno della “surf zone”. In questa zona, l’onda incidente assume valori massimi di altezza significativa compatibili con la profondità, forniti dalla relazione: $H(d) = \gamma \cdot d$, con $\gamma \cong 0.42$ (Thornton, 1983; Shore Protection Manual, 1988); si noti che, nel punto di rottura, $H_B = \gamma \cdot d(x_B)$, dove x_B è la distanza dalla costa. Risulta allora semplice calcolare la frazione di energia dissipata all’interno della “surf zone”, che è data da:

$$p_E = 1 - \frac{H^2(d)}{H_B^2}.$$

Nell’ipotesi conservativa che tutta l’energia dissipata sia convertita nella produzione di schiuma, il valore di p_E coincide con la copertura schiumosa.

Indicando con $F(D_d)$ la funzione generatrice per il mare aperto, definita nel §3.3, ed usando l’espressione della frazione della copertura schiumosa secondo Monahan and O’Muircheartaigh (1980), $p = 3.84 \cdot 10^{-6} U_{10}^{3.41}$, la funzione generatrice nella zona dei frangenti, $F_s(D_d)$, è data da:

$$F_s(D_d) = \frac{p_E}{p} F(D_d).$$

Chiaramente, il valore di p_E dipende dalla batimetria $d(x)$, dalla distanza x dalla costa e dall’altezza d’onda in mare aperto.

Ai fini dell’applicazione di un modello di dispersione atmosferica, per la determinazione degli ordini di grandezza della sorgente di aerosol, si è deciso di usare una superficie emissiva di estensione spaziale pari a tutta la zona dei frangenti, a cui si attribuisce una emissione media data da:

$$\bar{p}_E = \frac{1}{x_B} \int_0^{x_B} p_E(x) dx.$$

Al fine di calcolare tale valore medio, si fanno due ipotesi sul profilo batimetrico:

1. profilo lineare: $d = x \cdot \tan(\beta)$;
2. profilo determinato dall’equazione valida per l’equilibrio di un fondale sabbioso: $d = A \cdot x^{2/3}$, con A dipendente dalla granulometria (Dean 1977; Dean 1991, Kriebel et al., 1991, Moore, 1982).

Nel primo caso, $p_E(x) = 1 - \frac{\gamma^2 \cdot \tan^2(\beta) \cdot x^2}{H_B^2}$; nel secondo, $p_E(x) = 1 - \frac{\gamma^2 \cdot A^2 \cdot x^{4/3}}{H_B^2}$.

Le medie calcolate risultano, rispettivamente, $\bar{p}_E = 2/3$ e $\bar{p}_E = 4/7$; il valore superiore nel caso lineare dipende dal fatto che la profondità aumenta meno velocemente che nel caso di profilo esponenziale.

Nella tabella 4 sono messe a confronto le quantità di aerosol, emesse per unità di area e di tempo, stimate dagli algoritmi proposti, per un’umidità del 80%, sia per quanto riguarda il mare aperto che la zona dei frangenti. In mare aperto, la quantità complessiva di aerosol emessa per unità di area

varia in funzione della velocità del vento; nella zona dei frangenti, invece, è approssimativamente costante e molto superiore, per le seguenti ragioni:

- le alte velocità del vento sono rare e di breve durata e quindi, al largo, si creano raramente le condizioni per una emissione paragonabile a quella vicino a costa;
- la presenza di una zona del “surf” è molto più persistente nel tempo, perché non dipende solo dal vento locale, ma anche dalle onde generate in aree marine lontane (“swell”).

Vale la pena osservare che, per una umidità di riferimento del 50%, le emissioni di PM_{2.5} e PM₁₀ sono superiori, rispettivamente, di circa il 35% e 25%, rispetto a quelle della tabella 4 (v. §3.3). Le emissioni di PM totale rimangono, invece, ovviamente costanti.

In figura 3 è riportata la distribuzione annuale delle classi di velocità del vento misurata presso il Centro ENEA di La Spezia nel 2007. In figura 4 è invece tracciato il prodotto di tale distribuzione (figura 3) per il rateo di emissione in mare aperto, riferito ad una umidità standard dell'80%, calcolato per ciascun intervallo di velocità del vento. Si può osservare che, mentre il vento più probabile è intorno a 3 m/s, la quantità annuale più elevata di sali è emessa intorno a 5-6 m/s; le alte velocità del vento, per le quali l'emissione in mare aperto comincia ad essere consistente (l'emissione è infatti proporzionale alla potenza 3.4 del vento a 10 m), sono poco probabili. Anche per questa ragione, l'emissione totale annuale in mare aperto è di $48 \text{ g anno}^{-1} \text{ m}^{-2}$, un ordine di grandezza inferiore a quella della zona dei frangenti, che vale $346 \text{ g anno}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Nel calcolo, è stato supposto che la zona dei frangenti sia presente per stati del mare superiori o uguali a “Mosso” (figura 2), con una probabilità di occorrenza del 70% circa.

Anche se l'emissione per unità di area in mare aperto è di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella dei frangenti, l'emissione totale dal mare aperto è chiaramente maggiore rispetto a quella vicino a costa. La sorgente di mare aperto è quindi una sorgente più debole ma distribuita su ampie superfici, mentre la “surf zone” è una sorgente elevata e localizzata, che produce elevate concentrazioni di picco e gradienti notevoli sulle aree costiere.

3.6 Applicazione del modello ISCST3

ISCST3 è un modello meteo diffusivo di tipo gaussiano a “plume”, che accetta sorgenti di varie geometrie e stima le concentrazioni in aria e i flussi di deposizione al suolo su recettori individuati mediante un sistema di coordinate.

Nelle simulazioni condotte, la sorgente emissiva, di tipo areale, è costituita dalla porzione di mare antistante al litorale (figura 1), la cui estremità esterna dista dalla costa 50 km; questa area viene ulteriormente suddivisa, in funzione dello stato del mare, in due sorgenti emissive: quella di mare aperto e quella dei frangenti.

Nella tabella 5 sono indicate, per le condizioni di stato del mare di interesse, le altezze delle onde al largo e l'ampiezza della zona dei frangenti usate nelle simulazioni e calcolate come indicato al §3.2. In questa applicazione, il modello è stato impostato secondo le specifiche di tabella 6, per ottenere i valori medi giornalieri di concentrazione in due recettori, situati a 2000 m e 4000 m dalla costa, dove l'ARPAT di Massa Carrara ha reso disponibili misure orarie di PM₁₀ per l'anno 2007.

Poiché l'emissione di aerosol varia con la velocità del vento, è stata sviluppata una procedura automatica che esegue simulazioni orarie partendo dalla velocità media del vento secondo il seguente criterio:

1. calcola il fattore di emissione di aerosol al largo, funzione della velocità del vento;
2. stima l'ampiezza della zona dei frangenti (v. §3.2);
3. calcola il fattore di emissione nella zona dei frangenti (v. §3.4);
4. crea il file di input per il modello ISCST3;

5. stima le concentrazioni orarie al suolo nei due recettori scelti;
6. memorizza queste concentrazioni e ritorna al punto 1;
7. dopo 24 simulazioni orarie calcola i valori medi giornalieri.

Per quanto riguarda la meteorologia, è stato usato un unico valore di categoria di stabilità secondo Pasquill, ovvero la classe D neutra. Ciò è ragionevole, in quanto gli scenari di interesse riguardano prevalentemente condizioni con venti elevati e copertura nuvolosa totale. Comunque, anche considerando la presenza di venti deboli e/o copertura nuvolosa assente e/o parziale, le concentrazioni più basse diurne “compensano” qualitativamente quelle più alte notturne, ai fini del computo della media giornaliera.

PM10 (RH=80%)		
velocità vento	mare aperto	zona “surf “
m/s	µg/m ² /s	µg/m ² /s
1	0.0001	16
2	0.001	16
3	0.004	16
4	0.01	16
5	0.03	16
6	0.05	16
7	0.08	16
8	0.13	16
9	0.19	16
10	0.27	16
11	0.38	16
12	0.51	16
13	0.66	16
14	0.86	16
15	1.1	16
16	1.3	16
17	1.7	16
18	2.0	16
19	2.4	16
20	2.9	16

Tabella 4. Quantità di aerosol, emessa per unità di area e di tempo e stimata dagli algoritmi proposti, per un'umidità dell'80%, per il mare aperto e per la zona dei frangenti. Si può notare che, per il mare aperto, essa varia in funzione della velocità del vento, mentre, per la zona di frangenti, è costante.

Stato del mare	Altezza delle onde al largo (m)	Ampiezza della zona dei frangenti (m)
4	1.9	1300
5	3.2	2300
6	5	3550

Tabella 5. Stato del mare, altezza delle onde al largo ed ampiezza della zona del “surf”.

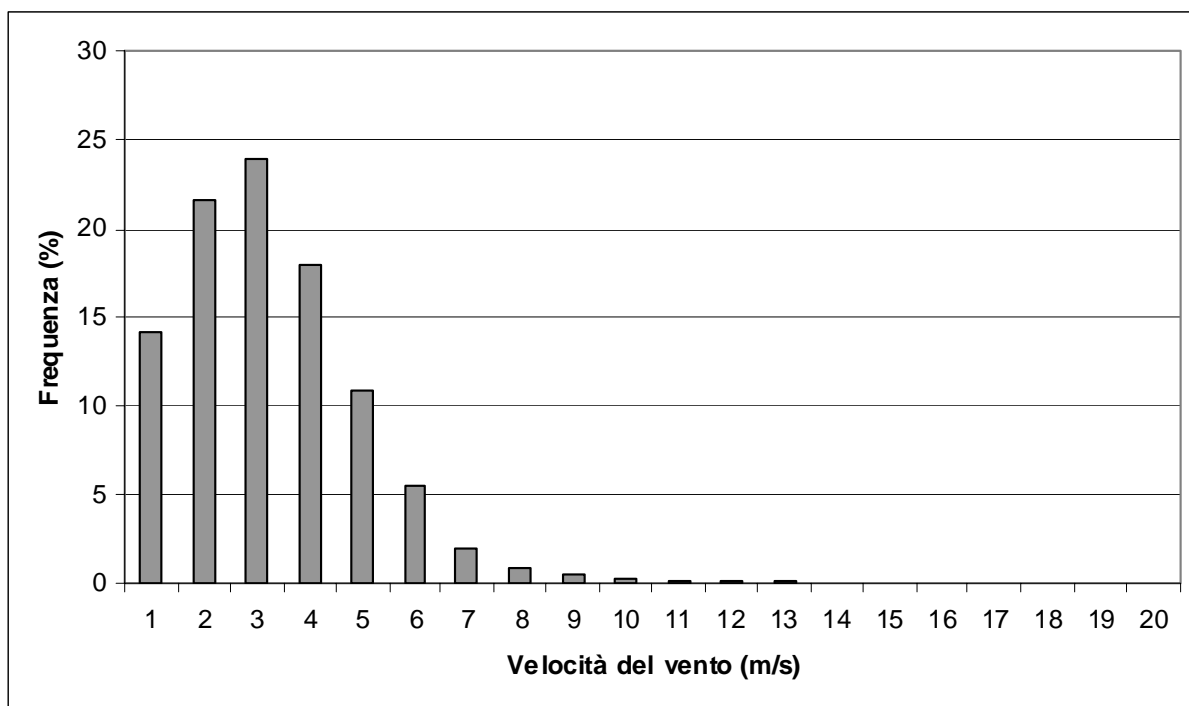


Figura 3. Distribuzione annuale delle osservazioni per intervalli di velocità del vento misurata presso il Centro ENEA di La Spezia nel 2007.

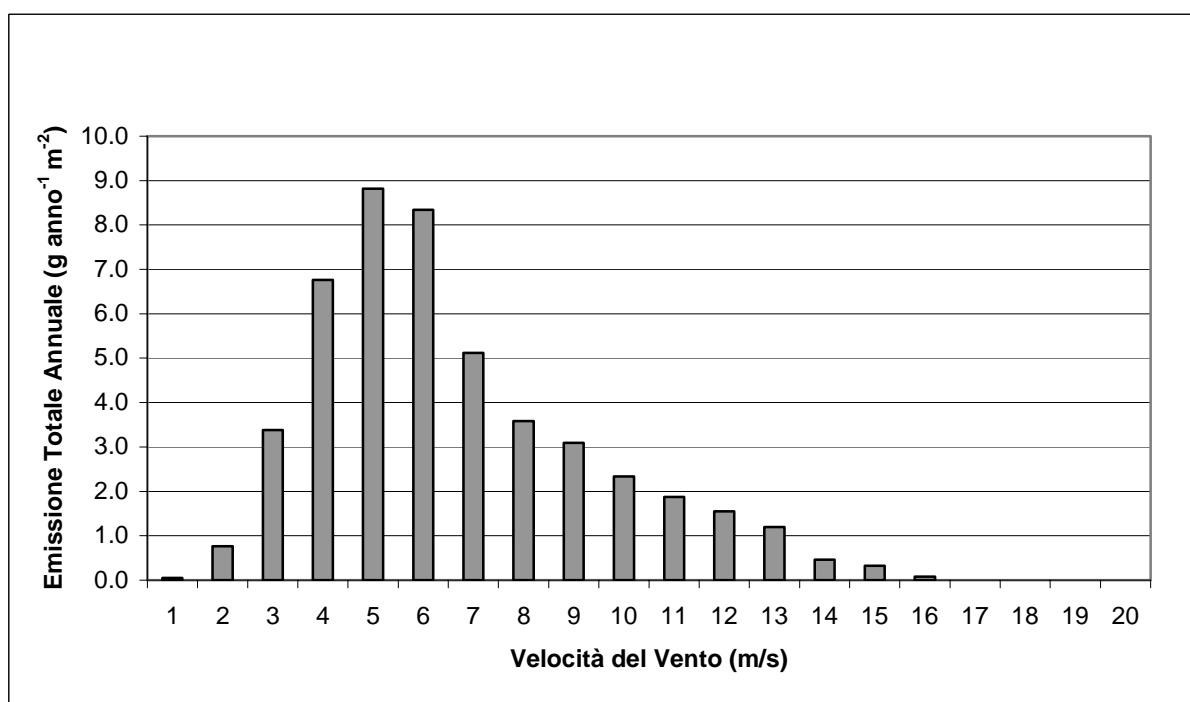


Figura 4. Distribuzione annuale delle emissioni calcolate per mare aperto in funzione della velocità del vento misurata presso il Centro ENEA di La Spezia nel 2007. L'emissione totale annuale per il mare aperto, riferita ad una umidità standard dell'80%, ammonta a $48 \text{ g anno}^{-1} \text{ m}^{-2}$; al confronto, nella zona dei frangenti, essa è pari a $346 \text{ g anno}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

E' stata fatta una analisi preliminare di sensibilità sull'influenza del valore dell'altezza di mescolamento iniziale della sorgente. Uno studio (Petelski and Chomka, 1998) sui processi di scambio di aerosol marini all'interfaccia acqua-aria ha dimostrato che la concentrazione degli aerosol ha un picco alla quota di 3 m sul mare, poi decresce fino a 4 m e, successivamente, tende a rimanere piuttosto costante; il valore del picco aumenta con l'incremento della velocità del vento. Dalla figura 5, che illustra i risultati dell'analisi di sensibilità, si può osservare che:

- l'aumento dell'altezza di mescolamento iniziale fa diminuire la concentrazione sulla linea di costa (0 m), ma ha poco effetto alle distanze superiori a 100 m;
- già a 100 m dalla costa le concentrazioni sono pressché indipendenti dalla diluizione iniziale;
- oltre 2000 m, il valore della diluizione iniziale risulta di scarsa importanza.

Poiché, in questo studio, interessa valutare i livelli di concentrazione alle distanze di 2000 m e 4000 m dalla riva, è stata scelta un'altezza di mescolamento iniziale uguale a 3 m.

Descrizione Uso ISCST3	Parametri e Commenti												
Caratterizzazione Sorgenti	La sorgente è composta da due aree: (1) quella in mare aperto e (2) quella dei frangenti; l'estremità della sorgente più esterna si estende fino a 50 km dalla costa. L'ampiezza della zona dei frangenti viene calcolata con gli algoritmi che tengono conto dello stato del mare (§3.2). L'entità delle emissioni di aerosol nelle due aree vengono stimate con gli algoritmi discussi nei §§3.3 e 3.4												
Coefficienti di Dispersione	Zona Urbana												
Tipo di Terreno	Piatto												
Classi di Velocità Vento	Default												
Deposizione Secca	Si												
Deposizione Umida	No												
Esponenti Profilo Vento	Default												
Gradienti Verticali Temperatura	Default												
Classe Stabilità Atmosferica	Classe D												
Parametri Usati per Valutare Deposizione	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoria</th> <th>Diametro (μm)</th> <th>Frazione Massa</th> <th>Densità (kg/dm^3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>0.13</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10.</td> <td>0.87</td> <td>1.</td> </tr> </tbody> </table>	Categoria	Diametro (μm)	Frazione Massa	Densità (kg/dm^3)	1	2.5	0.13	1.	2	10.	0.87	1.
Categoria	Diametro (μm)	Frazione Massa	Densità (kg/dm^3)										
1	2.5	0.13	1.										
2	10.	0.87	1.										

Tabella 6. Descrizione dell'uso del modello ISCST3

E' stata anche effettuata un'analisi di sensibilità, finalizzata a valutare i livelli di concentrazione in funzione dell'estensione della zona dei frangenti nei due giorni 27/06/2007 e 09/08/2007; il giorno 27/06 il vento era parallelo alla costa, mentre il 09/08 era perpendicolare. Nella figura 6 sono mostrati i livelli di concentrazione calcolati con il modello a 100 m dalla linea di riva; il grafico mostra che, a parità di distanza dalla costa, venti perpendicolari danno luogo a livelli di concentrazione superiori rispetto a quelli paralleli. Inoltre, l'ampiezza della zona dei frangenti, che dipende dallo stato del mare e dalla batimetria, determina sensibilmente le concentrazioni. Quindi, in occasione delle mareggiate, i livelli di concentrazione nella fascia costiera dipendono essenzialmente dall'ampiezza della zona dei frangenti e dalle direzioni prevalenti dei venti.

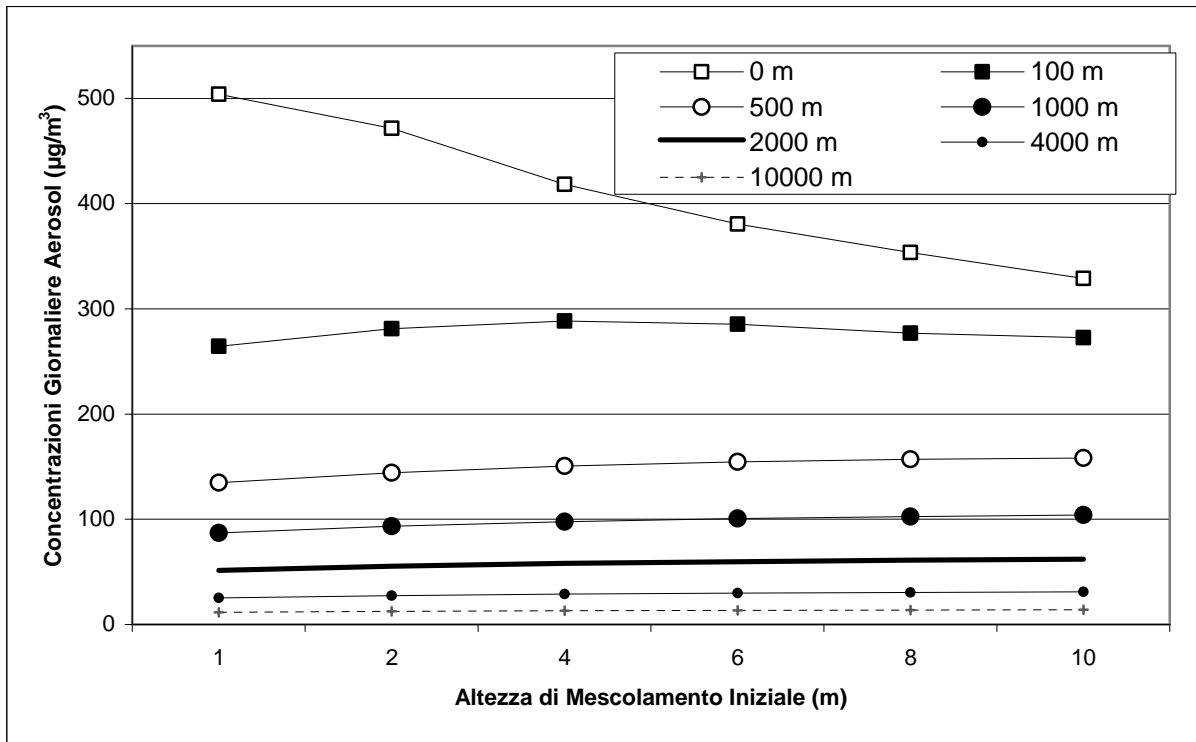


Figura 5. Concentrazioni simulate in funzione dell'altezza di mescolamento iniziale della sorgente per differenti distanze dalla costa.

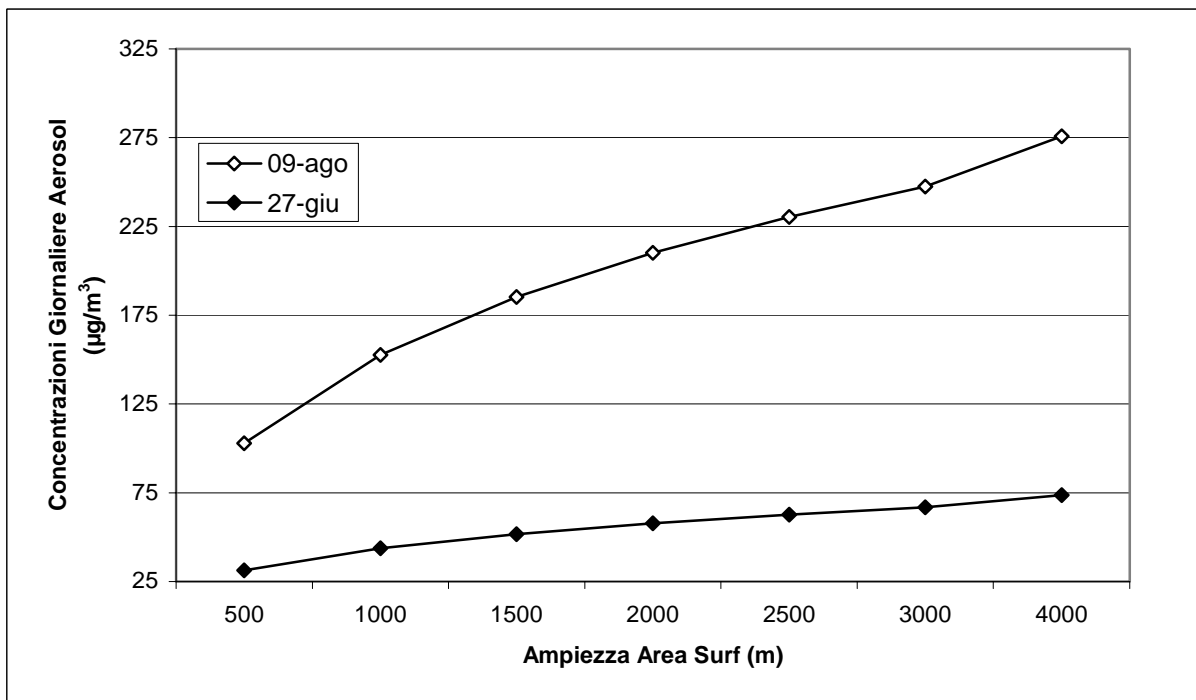


Figura 6. Concentrazioni di aerosol a 100 m dalla linea di riva, simulati con il modello, in funzione dell'ampiezza della zona dei frangenti nei giorni 27/06/2007 (direzione del vento parallela alla costa) e 09/08/2007 (direzione perpendicolare alla costa).

4. Analisi dei risultati delle simulazioni

Nella figura 7 sono illustrati i livelli di concentrazione media giornaliera simulati dal modello a varie distanze dalla costa, in presenza ed in assenza della zona del “surf”, per un giorno campione (4 luglio 2007), in cui la direzione prevalente del vento era perpendicolare a costa. Si può notare che l’assenza di frangenti implica livelli molto più bassi, anche di quasi due ordini di grandezza; quindi, la tipologia dei fondali influenza sensibilmente i livelli medi di concentrazione degli aerosol: in una costa con fondali profondi, dove le onde non frangono, sono attesi livelli più bassi rispetto a quelli di una costa con fondali poco profondi e con un’ampia zona dei frangenti.

Vale la pena osservare che, in assenza di sorgenti antropiche e nei limiti delle approssimazioni usate, la sola presenza di frangenti fa superare il valore di soglia stabilito dalla legge ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fino a distanze di circa 1500 m; senza area dei frangenti, i livelli sarebbero invece molto più bassi.

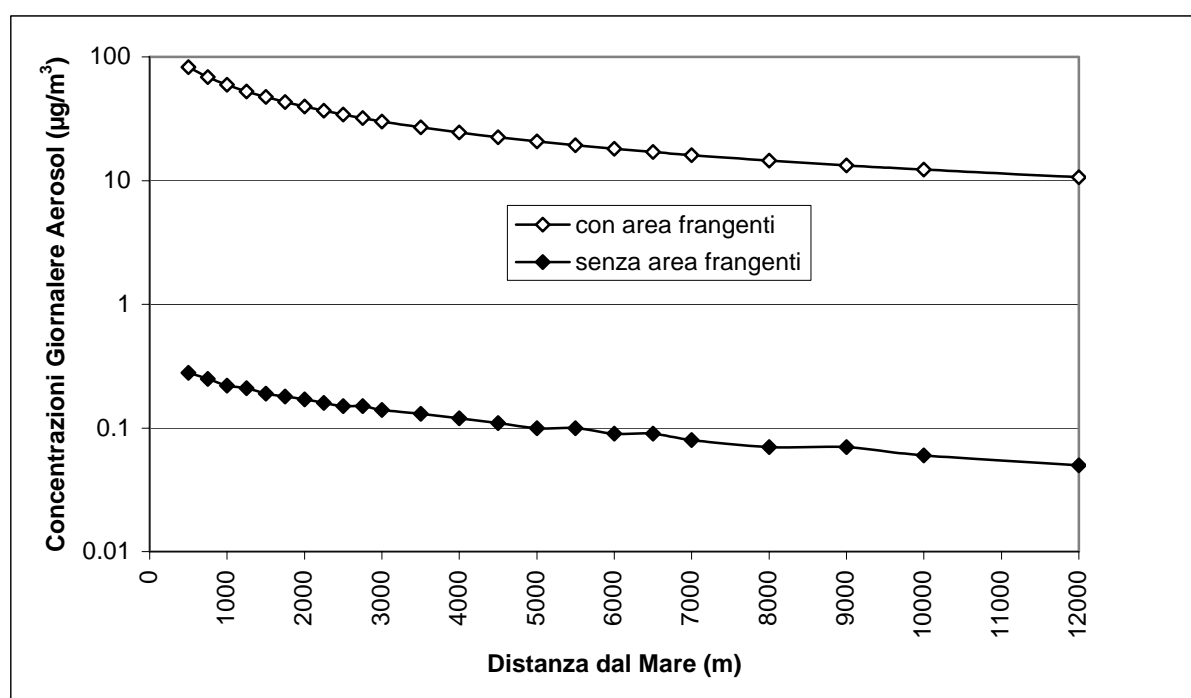


Figura 7. Livelli di concentrazione media giornaliera, in presenza ed in assenza dell’area dei frangenti, per il giorno 4 luglio 2007 (giorno giuliano 185); si può notare che, in assenza della zona dei frangenti, i livelli di concentrazione sono molto bassi.

Nella figura 8(a) sono sintetizzati gli andamenti dei livelli di concentrazione di PM10, stimati dal modello, al variare della distanza dalla costa, per alcuni giorni tipo della tabella 1; nella figura 8(b) sono invece rappresentati gli stessi risultati di figura 8(a), ma i livelli di concentrazione sono normalizzati rispetto al valore calcolato alla distanza di 500 m dalla costa. Si possono fare le seguenti osservazioni:

1. si osserva una estrema variabilità nelle concentrazioni, dovuta allo stato del mare ed alle direzioni ed intensità dei venti;
2. nella fascia costiera, fino a 500 m dalla riva, il livelli di concentrazione possono essere molto elevati, soprattutto in presenza di venti deboli e di un’ampia zona dei frangenti, come nei giorni 14 marzo e 14 dicembre 2006;

3. a circa 2000 m raggiungono valori circa uguali alla metà rispetto a quelli stimati a 500 m;
4. a distanze dell'ordine di 10000 m le concentrazioni si riducono al 10% rispetto a quelle calcolate a 500 m dalla costa.

Pertanto, in presenza di un'area dei frangenti estesa e con venti prevalenti perpendicolari a costa, il contributo degli aerosol è significativo su un'ampia porzione di territorio.

Poiché i risultati sono frutto di simulazioni modellistiche, un'indagine attraverso campagne sperimentali, finalizzate a valutare proprio l'entità dell'emissione degli aerosol e/o monitorare le concentrazioni vicino alla riva, potrebbero essere molto utili per validare la metodologia.

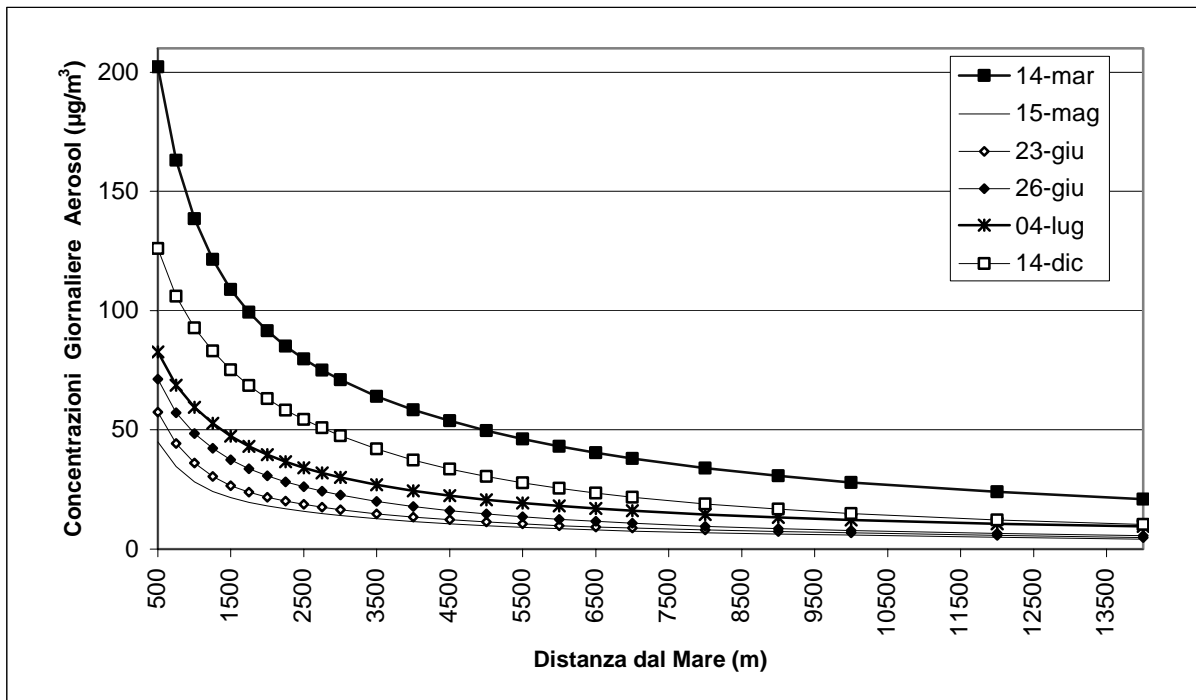
Nelle figure 9 e 10 sono riportati a confronto i valori di concentrazioni misurati nelle stazioni ARPAT ed il contributo simulato relativo ai soli aerosol marini. Si può osservare, in generale, che i valori misurati sono assai elevati, specialmente nella stazione a 2000 m dal mare (via Frassina), probabilmente a causa di sorgenti antropiche; inoltre, poiché i livelli di aerosol simulati a 2000 m e 4000 m non sono trascurabili, alcuni superamenti della soglia di legge potrebbero non essere legati esclusivamente a cause antropiche, ma anche alla presenza di particolato marino.

Analizzando nei dettagli la figura 11, dove sono rappresentate le percentuali dei valori simulati rispetto a quelli misurati, si può osservare che queste percentuali, sia a 2000 m che a 4000 m, sono elevate e raggiungono valori anche superiori al 50%; in alcuni casi, esse sono addirittura superiori al 70%. L'esame della figura 11 indica che, per gli eventi selezionati, i rapporti tra i valori medi giornalieri di concentrazione simulati e misurati sono pressoché indipendenti dalla distanza dalla costa (4000 m e 2000 m) e quelli calcolati a 4000 m sono, in genere, superiori a quelli a 2000 m.

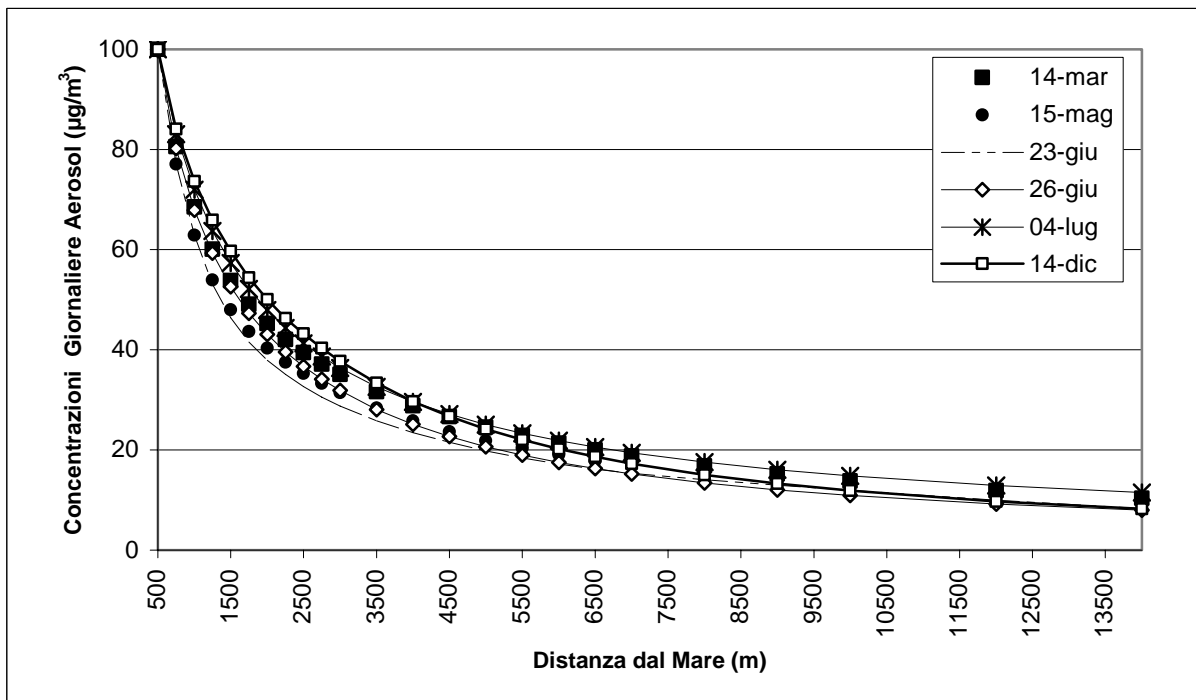
La figura 12 illustra quanto appena detto da un altro punto di vista: in essa sono tracciati, a confronto, i rapporti tra le concentrazioni a 4000 m e 2000 m, sia per le osservazioni che per le simulazioni. Si possono dedurre le seguenti considerazioni.

- La simulazione matematica della dispersione da una sorgente areale come quella che rappresenta la zona dei frangenti (l'emissione dal mare aperto è, infatti, trascurabile), valuta il rapporto delle concentrazioni tra 4000 m e 2000 m pari a circa 0.6, nella condizione di recettori sottovento alla sorgente (settori di provenienza del vento dal mare). Negli scenari selezionati, tutti i recettori sono in questa condizione, ad eccezione dei giorni 31 e 68, nei quali il recettore a 4000 m, in alcune ore del giorno, non si trova sottovento rispetto alla sorgente; in questi due giorni, il rapporto tra le concentrazioni scende, infatti, a 0.3.
- Il rapporto tra le concentrazioni misurate a 4000 m e 2000 m, anche se più variabile di quello simulato, mostra lo stesso valore medio di circa 0.6; ciò potrebbe costituire indizio di una cospicua presenza di aerosol di origine marina, i cui effetti si sovrappongono a quelli delle sorgenti antropiche, responsabili delle fluttuazioni. I giorni giuliani 2 e 221 mostrano una chiara deviazione dal comportamento medio, che potrebbe indicare la presenza di altre sorgenti significative, oltre all'aerosol. Tuttavia, l'osservazione che anche il rapporto tra i livelli di concentrazione sperimentali sia quasi uguale a quello delle simulazioni fa presupporre una origine prevalentemente marina degli aerosol campionati; infatti, la presenza di altre sorgenti significative di PM10, dislocate intorno ai punti di misura, darebbe luogo a rapporti tra le concentrazioni di via Frassina e via Galvani molto più variabili.

Poiché la metodologia ha evidenziato significativi contributi di aerosol marini, vale la pena condurre indagini sperimentali sul contenuto di NaCl presente nel PM10 di Massa, per verificare la validità delle previsioni. Quest'ultime sono, infatti, fortemente influenzate dall'estensione della zona dei frangenti, che è stata modellata, e dal regime anemologico, acquisito in una stazione abbastanza distante dai punti di campionamento.



(a)



(b)

Figura 8. Andamento delle concentrazioni simulate assolute (a) e normalizzate rispetto ai valori simulati alla distanza di 500 m dalla linea di riva (b) in sei scenari differenti.

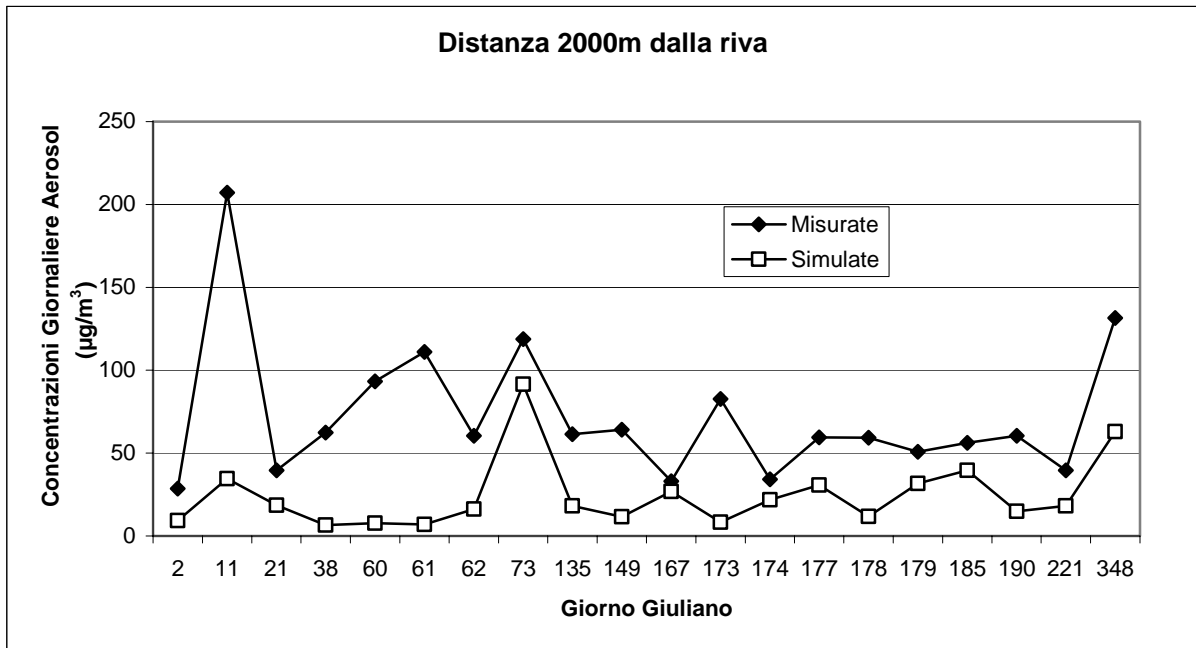


Figura 9. Andamento delle concentrazioni di PM10 misurate dall'ARPAT e di quelle simulate a 2000 m considerando solo l'emissione di aerosol; in ascissa sono indicati i giorni delle simulazioni.

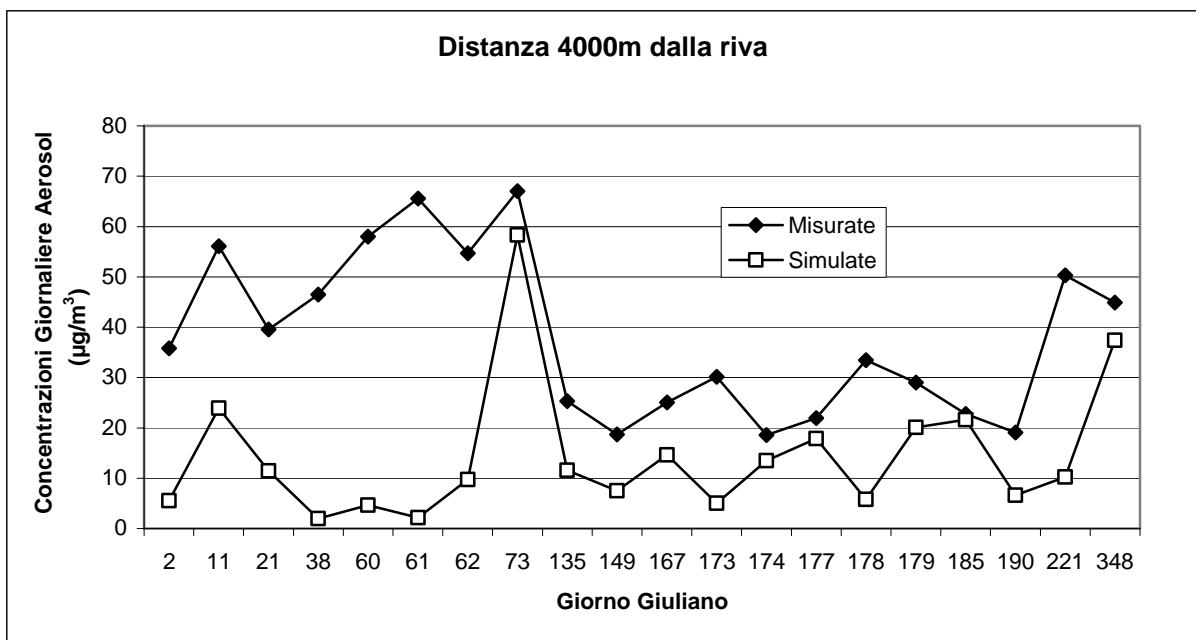


Figura 10. Andamento delle concentrazioni di PM10 misurate dall'ARPAT e di quelle simulate a 4000 m considerando solo l'emissione di aerosol; in ascissa sono indicati i giorni delle simulazioni.

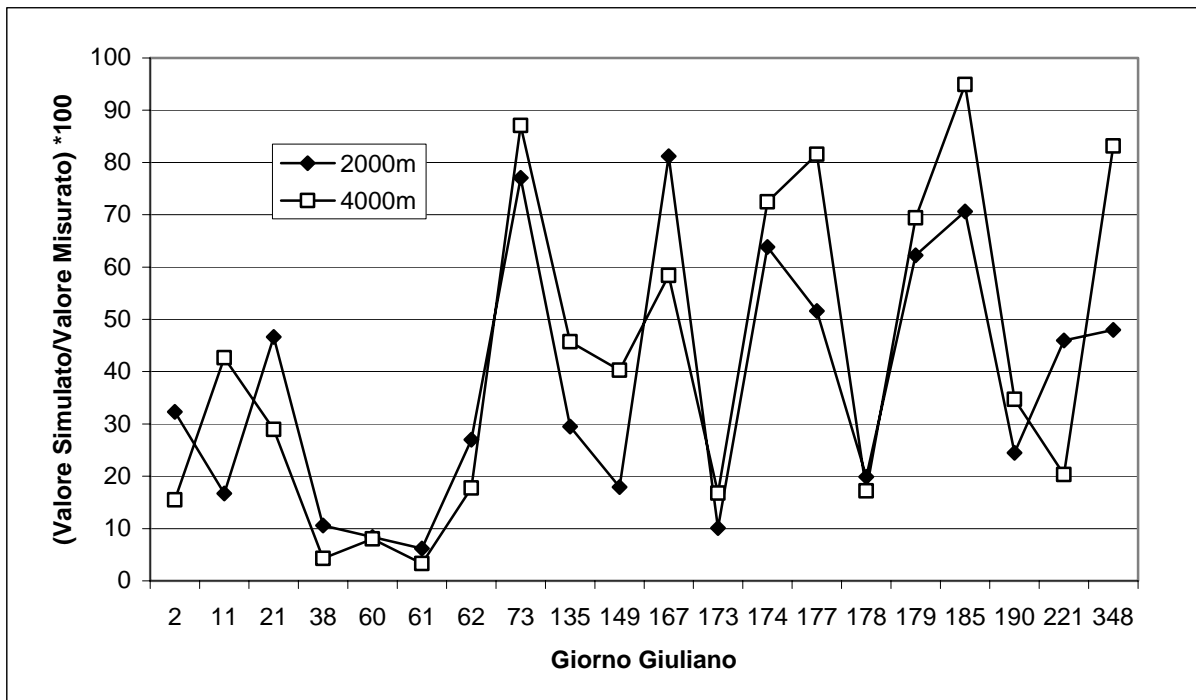


Figura 11. Andamento del rapporto percentuale tra i valori di concentrazione giornalieri simulati/misurati; si può osservare che i valori sono elevati e quelli a 4000 m sono, in genere, superiori a quelli a 2000 m.

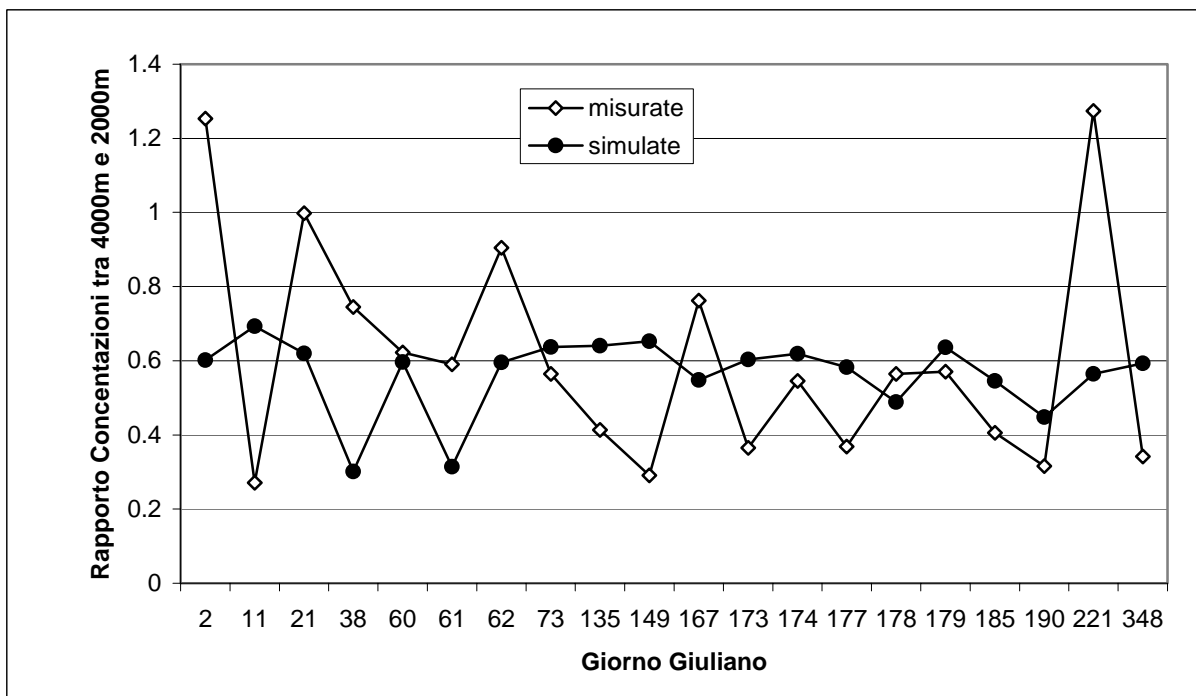


Figura 12. Confronto tra gli andamenti dei rapporti tra le concentrazioni a 4000 m e 2000 m, sia per le osservazioni che per le simulazioni. Il rapporto tra le concentrazioni misurate a 4000 m e 2000 m è pressoché costante e dello stesso ordine di grandezza di quello ottenuto con i dati simulati.

5. Conclusioni

Questo lavoro fornisce una metodologia volta a valutare l'emissione di aerosol in mare aperto e nella zona dei frangenti e calcolare i livelli di concentrazione di sali marini. Data la complessità del tema trattato, per il futuro si ritiene necessario sottoporre a validazione tale metodologia, utilizzando misure sperimentali di aerosol dispersi e di ampiezza della zona dei frangenti. Tuttavia, già in questa fase preliminare, sono emerse alcune interessanti conclusioni.

- L'emissione di aerosol al largo, in genere, non è elevata; può diventare importante solo in condizioni di vento particolarmente forte, che, nell'alta Toscana, sono peraltro poco frequenti e di breve durata. Invece, l'emissione dalla zona dei frangenti è molto maggiore di quella al largo e più persistente, perché è attiva non solo durante le mareggiate, ma anche con venti bassi o in attenuazione; questa sorgente è responsabile di elevati livelli di concentrazione sulla costa e nell'immediato entroterra.
- La conformazione della costa può determinare una prima classificazione del tipo di impatto degli aerosol marini: litorali con bassa profondità dei fondali, caratterizzati da ampie zone dei frangenti, possono essere interessati da concentrazioni più elevate rispetto a litorali con profondità notevoli già vicino a costa, dove le onde non frangono.
- Una zona dei frangenti estesa non è tuttavia condizione sufficiente a generare livelli di concentrazione elevati, perché un altro fattore importante da considerare è la direzione prevalente dei venti, soprattutto durante e dopo le mareggiate: infatti, venti di bassa intensità e perpendicolari alla costa favoriscono elevati livelli di concentrazione.

Uno studio effettuato in Toscana (Lucarelli et al., 2007) dimostra che i valori medi di contenuto di aerosol marini nel PM10 sono dell'ordine del 3% nell'entroterra (Firenze, Prato, Capannori, Arezzo) e variano dal 5% (Grosseto) al 9% (Livorno) sulla fascia costiera. In corrispondenza di episodi di trasporto di masse d'aria dal mare, il contenuto può arrivare fino al 50% (dato misurato a Livorno).

E' difficile paragonare i risultati del presente lavoro con quelli di Lucarelli et al. (2007); infatti, in questo studio, sono stati esaminati proprio brevi episodi di mareggiate e non sono state stimate le medie sul lungo termine. Tuttavia, vale la pena osservare che le previsioni qui effettuate, in un sito costiero con estesa zona dei frangenti, mostrano contenuti percentuali di sale marino che arrivano fino all'80%, che è un valore compatibile con quello del 50% misurato a Livorno (Lucarelli et al., 2007).

Nelle applicazioni modellistiche che seguiranno, un'importante problematica da affrontare è quella relativa alla definizione della struttura del "boundary layer" costiero: in particolare, è necessario stimare in maniera più approfondita il profilo verticale della turbolenza all'interfaccia aria-acqua, per una descrizione ottimale dello strato di fumigazione, che influenza i livelli di concentrazione degli aerosol che dal mare giungono sulla costa. Infatti, la condizione di stabilità dell'atmosfera può condizionare sensibilmente tali livelli di concentrazione.

Vale la pena specificare che i risultati di questo lavoro sono stati ottenuti utilizzando esclusivamente tecniche modellistiche; è dunque indispensabile condurre una validazione delle tecniche usate, mirata a stabilire l'entità reale dell'apporto di sali nel PM10 in occasione di mareggiate, mediante misure di contenuto di NaCl nel particolato, combinate con osservazioni di stato del mare ed estensione della zona dei frangenti. E' auspicabile, quindi, che questo studio non rimanga fine a se stesso, ma possa suscitare interesse e l'avvio di un'attività sperimentale di approfondimento, in collaborazione con soggetti istituzionali aventi compiti di controllo sulla qualità dell'aria.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Dott. Carlo Righini del Dipartimento Provinciale ARPAT di Massa Carrara per la fornitura di dati di PM10 e il personale della Capitaneria di Porto di Viareggio (LU) per aver messo a disposizione i dati di stato del mare.

Un ringraziamento va anche al nostro collega Ing. Antonio Lisca per la sua grande disponibilità e per l'invio dei dati raccolti presso la stazione meteorologica del Centro ENEA di La Spezia.

Bibliografia

Ambler H.R., Bain A.A.J. (1955). Corrosion of metals in the tropics. *Journal of Applied Chemistry*, 5, 437-467.

Andreas E.L., Edson J.B., Monahan E.C., Mathieu P.R., Smith S.D. (1995). The spray contribution to net evaporation from the sea: a review of recent progress. *Boundary Layer Meteorology*, 72, 1-2.

Barsanti P., Briganti G., Marri P., Vitali L. (2008). Metodologie per la determinazione dei fattori di emissione degli aerosol marini primari. *Rapporto Tecnico ENEA*, RT/2008/8/ACS.

Blanchard D.C. and Woodcock A.H. (1980). The production, concentration, and vertical distribution of the sea-salt aerosol. *Ann. NY Acad. Sci.*, 338 (1), 330-347.

Dean R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: US atlantic and gulf coasts. Departments of Civil Engineering. *Ocean Engineering Report N.12*, University of Delaware, Newark, DE.

Dean R.G. (1991). Equilibrium beach profiles: principles and applications. *Journal of Coastal Research*, 572-587.

D'Elia, I., Contaldi M., De Lauretis R., Pignatelli T., Vialetto G. (2007). Scenari di emissione di inquinanti atmosferici in Italia. *Ingegneria Ambientale*, XXXVI (6).

EPA (1995). User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models, Vol I- User Instructions and Vol. II- Description of Model Algorithms. *United States Environmental Protection Agency*, Office of Air Quality Planning and Standards, September, EPA-454/B-95-003a,b.

EPA (1996). 49 CFR 51 Appendix W. Guideline on Air Quality Models (Revised). *United States Environmental Protection Agency*, Office of Air Quality Planning and Standards, EPA 450/2-78-027R).

Farrugia P.S., Micallef A. (2006). Comparative analysis of estimators for wind direction standard deviation, *Meteorol. Appl.*, 13, 29-41.

Feliu S., Morbillo M., Chico B. (1999). Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate. *Corrosion-NACE* 55, 883-891.

Fitzgerald J.W. (1991). Marine aerosols: a review. *Atmospheric Environment*, 25A (3/4), 533-545.

Goda Y. (1975). Irregular Wave deformation in the Surf Zone. *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, 18, 13-26.

- Gustafsson M.E.R., Franzén L.G. (1996). Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. *Atmospheric Environment*, 30 (6), 169–177.
- ISO 9225 (1992). Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of Atmospheres. *Measurement of Pollution*, ISO, Geneva.
- ISO 2810 (1982). Paints and varnishes. *Notes for Guidance on the Conducting of Natural Weathering Tests*, ISO, Geneva.
- Kriebel D.L., Kraus N.C., Larson M. (1991). Engineering methods for predicting profile response. *Proceedings of Coastal Sediment 91*, American Society of Civil Engineers, 557-571.
- Lewis E., Schwartz S. (2006). Comment on "size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity". *Atmos. Env.*, 40, 588-590.
- Lovett R.F. (1978). Quantitative measurement of airborne sea salt in north atlantic. *Tellus*, 30, 358-364.
- Lucarelli F., Nava S., Chiari M., Paperetti L. (2007). La componente e l'origine del PM10 in Toscana- La componente naturale. *Progetto Regionale PATOS: il PM10 in Toscana, Workshop della Regione Toscana*, 26 marzo Firenze.
- Mårtensson E.M., Nilsson E.D., de Leeuw G., Cohen L.H., Hansson H.C. (2003). Laboratory simulations and parameterization of the primary marine aerosol production. *Journal of Geophysical Research*, 108 D9, 4297.
- Mc Donald R.L., Unni C.K., Duce R.A. (1982). Estimation of atmospheric sea salt dry deposition: Wind speed and particle size dependence. *Journal of Geophysical Research*, 87, 1246-1250.
- Meira G.R., Andrade M.C., Padaratz I.J., Alonso M.C., Borba J.C. Jr. (2006). Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. *Atmospheric Environment*, 40 (29), 5596-5607.
- Miche A. (1944). Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Annales des ponts et chaussées*, Tome 144, pp. 25-78, 131-164.
- Michell J.H. (1893). On the highest wave in water. *Philosophical Magazine*, 36, 430-435.
- Monahan E.C., Spiel D.E. and Davidson X.L. (1986). A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption. *Oceanic Whitecaps*, E.C. Monahan and G. Mac Niocaill (Eds.). D. Reidel Publishing Company, 167-174.
- Moore B.D., 1982, Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. *MCE Thesis, Department of Civil Engineering*, Newark University of Delaware.
- Morcillo M., Chico B., Mariaca L., Otero E. (2000). Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. *Corrosion Science*, 42 (1), 91-104.

- O'Dowd C.D., Smith M.H., Consterdine I.E., Lowe J.A. (1997). Marine aerosol, sea-salt and the marine sulphur cycle: a short review. *Atmospheric Environment*, 31 (1), 73-80.
- Petelski T. Chomka M. (1998). The Marine aerosol over the coastal zone. *J. Aerosol Sci.*, Supplement 1, S697-S698.
- Petelski T. (2000). Sea salt emission from the coastal zone. *Oceanologia*, 42 (4)..
- Piazzola J., Despiau S. (1997). Vertical distribution of aerosol in the particles near air-interface in coastal zone. *J. Aerosol Science*, 28, 8, 1579-1599, part-a.
- Piazzola J. and Despiau S. (1997). Contribution of marine aerosols in the particle size distributions observed in Mediterranean coastal zone. *Atmospheric Environment*, 31, 18, 2991-3009, part-b.
- Pruszek Z., Szmytkiewicz P., Osowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M., 2008. Shallow-water wave energy dissipation in a multi-bar coastal zone. *Oceanologia*, 50(1), 43-58.
- Shore Protection Manual, 4th Edition (1988). U.S. Army Engineer, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1008.
- Smith M., Harrison N. (1998). The sea spray generation function. *Journal of Aerosol Science*, 29 (1), S189-S190.
- Spiel D.E., De Leeuw G. (1996). Formation and production of sea spray aerosol. *Journal of Aerosol Science*, 27, Supplement 1, 2, 65-66.
- Stekalov P.V., Panchenko Y.M. (1994). The role of marine aerosols in atmospheric corrosion of metals. *Protection of Metals*, 30, 254.
- Taylor N. J., Wu J. (1992). Simultaneous measurements of spray and sea salt. *Journal of Geophysical Research*, 97(C5), 7355-7360.
- Thornton E.B. (1983) Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88, 5925-5938.
- Tsai C., Chen H., Huang M. (2002). Wave shoaling on steep slopes and breaking criteria. *Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, May 26–31, 2002.
- USACE (2002). Coastal Engineering Manual. *US Army Corps of Engineers*, Report Number: EM 1110-2-1100, Apr. 2002.
- Woodcock A.H. (1953). Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force. *Journal of Meteorology*, 10, 362-371
- Zeza F., Macri F. (1995). Marine aerosol and stone decay. *The Science of The Total Environment*, 167 (1-3), 123-143.
- Zhang K.M., Knipping M.K., Wexler A.S., Bhavsar P.V., Tonnesen G.S. (2005). Size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity. *Atmospheric Environment*, 39, 3373-3379.

Edito dall' **ENEA**
Funzione Centrale Relazioni Esterne
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it
Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati
Finito di stampare nel mese di febbraio 2009