

Allegato D.5.

Climatologia del Campidano meridionale

1 GENERALITA'

Questo studio meteoclimatico della Piana del Campidano e' stato eseguito per caratterizzare l'atmosfera nell'area interessata dalle emissioni dell'impianto di Macchiareddu. Tale caratterizzazione e' necessaria per valutare l'impatto ambientale dell'impianto in funzione delle capacita' dispersive dell'atmosfera locale, nonche' per calcolare alcuni parametri necessari come dati in ingresso per l'uso del modello previsionale che consente, come dato di uscita, di effettuare delle stime delle immissioni attribuibili all'impianto stesso.

Innanzitutto la caratterizzazione del sito non puo' prescindere dall'orografia della regione in cui e' situato, in quanto e' essa stessa che determina se la zona e' aperta o confinata, favorisca la persistenza delle calme di vento o la presenza di venti da incanalamento ed infine l'insorgere di fenomeni di brezza in funzione dell'ora del giorno, della stagione e della situazione meteorologica a scala sinottica. Nei paragrafi che seguono si riportano le valutazioni statistiche per l'area di interesse dedotte dalle osservazioni meteorologiche effettuate dalla Aeronautica Militare (A.M.) - Centro di meteorologia e Climatologia Aeronautica (C.N.M.C.A.), nel periodo 1951-1977.

Le valutazioni riguardano il regime anemologico, la stabilita' termodinamica dell'atmosfera, i valori di temperatura media dell'aria ambiente, la pressione atmosferica,

l'umidità relativa e le precipitazioni atmosferiche, per ciascun mese dell'anno; tutti gli elementi, come detto all'inizio, indispensabili nel calcolo delle ricadute al suolo delle sostanze inquinanti e nella valutazione delle capacità autodepurative dell'atmosfera della zona interessata dalle emissioni gassose. I dati utilizzati sono quelli della stazione meteorologica dell'aeroporto di Cagliari Elmas, raccolti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, elaborati e pubblicati sia dal C.N.M.C.A. sia dall'A.M. in collaborazione con l'ENEL.

La rappresentatività di tali dati per il sito di Macchiarreddu è assicurata dal fatto che la distanza tra le due zone, orograficamente simili, è dell'ordine di pochi chilometri e non si frappone fra esse alcun ostacolo naturale o artificiale di rilievo, ad esclusione dello stagno di Cagliari.

2 OROGRAFIA

Come detto nel paragrafo precedente, per caratterizzare il sito di Macchiareddu, nella piana del Campidano, e' necessario cominciare dall'orografia della regione, l'Isola di Sardegna, a cui il sito appartiene.

L'orografia della Sardegna e' molto accidentata e difficile da descrivere nei particolari: essa si eleva con massicci, dossi e altopiani che non formano vere e proprie catene montuose.

Inoltre le sue coste sono prevalentemente montuose, pertanto isolano le zone interne dall'influenza del mare, ad eccezione di brevi tratti in corrispondenza dei golfi di Oristano e di Cagliari, tra cui si estende la Piana del Campidano, nella parte meridionale della quale si trova il sito di Macchiareddu.

Esaminiamo ora in dettaglio l'orografia della Piana del Campidano: ad oriente e' delimitata da un blocco orografico, molto vario e vasto, che dal Gennargentu (1829 m), a nord, si prolunga verso sud, nella parte orientale dell'isola, con altimetrie medie di 6/700 metri e qualche cima oltre i 1000 m (monte Serpeddi e Sette Fratelli), sino a Capo Carbonara. Come gia' detto prima, partendo da Oristano, tagliando l'isola con asse NW-SE, si estende verso ovest l'ampia vallata del Campidano, la grande pianura che, allargandosi man mano verso sud, giunge sino al golfo di Cagliari.

Ad occidente il Campidano confina con un altro sistema montuoso che, dalla vicinanza di Oristano, si spinge, con pianta triangolare e con altitudine media di 700 m, sino all'estremo sud occidentale della Sardegna, formando un massiccio la cui vetta piu' alta e' il monte Linas (1236 m). Questa circostanza, come gia' accennato, influisce sensibilmente sul comportamento delle correnti aeree provenienti dal mare, alterandole e deviandole.

Uno degli aspetti piu' interessanti per il nostro sito e' rappresentato dall'incanalamento del maestrale, che infuria molto frequentemente sulla pianura del Campidano.

Accade infatti che tutti i venti dal settore di 290-330° che provengono dal Mediterraneo occidentale, presentandosi nel golfo di Oristano, si incanalino incanalati tra i sistemi montuosi precedentemente descritti, con il risultato di assumere la direzione di provenienza da NW.

Dipendente dalla orografia e' la "rugosita'" del territorio, un parametro che cresce al crescere della resistenza offerta dal terreno al vento.

La rugosita' e' influenzata dalla conformazione superficiale del terreno: sabbia, acqua, roccia, ecc.; dalla presenza di alberi isolati o in macchia, e dai centri abitati e presenta, a prescindere dalla presenza di insediamenti industriali, il valore minimo nella Piana del Campidano, con valore particolarmente basso nella zona dello Stagno di Cagliari.

3 CLIMATOLOGIA

3.0 CARATTERISTICHE GENERALI

Il clima della Sardegna, ed in particolare quello di Cagliari, e' definito come temperato-caldo; esso consiste in una stagione calda, lunga e arida, e di una stagione piovosa, meno fredda di quanto dovrebbe essere rispetto alla latitudine geografica.

L'inverno e' particolarmente mite nelle zone litoranee, nelle quali la normale rigidita' della stagione e' mitigata dal calore fornito ai bassi strati atmosferici, per irraggiamento e convezione, dalle acque superficiali del mare, la cui temperatura, al centro del golfo di Cagliari, si mantiene sui 16 °C sino alla prima decade di gennaio.

Piu' all'interno, e cioe' a distanze di oltre 15 km dal mare e ad altitudini superiori ai 600 m, gli sbalzi termici sono ovviamente piu' marcati che nelle zone costiere.

Le precipitazioni sono molto variabili nel tempo e nello spazio, talvolta, infatti lunghi periodi di siccita' si accodano alla stagione arida, interrotti da occasionali nubifragi alluvionali.

Tuttavia l'aspetto climatico piu' caratteristico della Sardegna e del Campidano in particolare e' il regime anemologico, che dipende dalla posizione geografica e dall'orografia della regione.

Si conviene di chiamare maestrale ogni vento di provenienza compresa tra i 290° e i 330°, che soffia con violenza e che proviene dalla valle del Rodano.

Il maestrale presenta queste frequenze percentuali: ad Alghero il 54%, ad Olbia il 20%, a Carlo Forte il 28%, ad Oristano il 38%, a Cagliari il 42% ed a Tortoli il 19%.

Le notevoli differenze tra le rilevazioni del maestrale effettuate nei diversi siti trovano spiegazione nell'orografia: infatti quando questo vento soffia a velocità superiori ai 40 km/h (11 m/s o 22 nodi), tutti i luoghi ne vengono investiti, mentre a velocità più basse, alcuni siti della costa orientale, come Olbia e Tortoli, ne risultano al riparo.

Nella zona di Cagliari, a causa, della sua posizione geografica particolare, sono molto rari i venti da E-NE, che hanno una frequenza complessiva intorno al 5%, ed analogamente quelli da W-SW, che hanno una frequenza complessiva di poco superiore all'8%.

Nonostante la notevole attività anemologica rilevata a Cagliari-Elmas, dove la velocità media del vento è di oltre 4/ms, non del tutto trascurabile è la frequenza delle calme di vento, sia strumentali, cioè i casi di velocità di vento inferiore a 6 km/h (1,7 m/s o 3,2 nodi), sia quelle effettive, con forza del vento inferiore a 1 nodo (0,5 m/s o 2 km/s), che ammontano rispettivamente al 29% ed al 17% del totale delle osservazioni annue.

La frequenza annuale delle calme strumentali ($v_v < 6$ km/h), come si vedrà meglio nel prossimo paragrafo, è molto elevata all'alba (43% delle osservazioni), ma non è del tutto trascurabile (14% dei casi) anche nel pomeriggio.

3.1 I VENTI

Vediamo ora in dettaglio le elaborazioni sintetiche eseguite sui parametri anemologici disponibili in letteratura.

Nella tabella A2.1 sono riportate le frequenze relative delle direzioni di provenienza del vento osservate alle ore 07 ed alle ore 16 (tempo solare), presso la stazione di Cagliari Elmas, nel periodo 1951-1978.

In questa tabella per calma si intende un vento da 0 a < 6 km/h e le direzioni sono quelle di provenienza del vento registrato nei 10 minuti precedenti l'osservazione sinottica.

In questa tabella spiccano subito le diverse frequenze del vento tra le due osservazioni, indicanti una rotazione diurna dei venti, sovrapposta alle correnti di maestrale da N-NW, in assoluto le più elevate.

Questa rotazione dei venti, poco marcata nel trimestre invernale (mesi di dicembre, gennaio e febbraio) e, invece, molto marcata nel trimestre estivo (mesi di giugno, luglio ed agosto), con una frequenza da S già superiore al 25%.

In tutte le stagioni la brezza notturna, essendo meno intensa, o è mascherata per metà delle giornate dalle

Tab. A2.1 - CAGLIARI ELMAS - Caratterizzazione diurna dei Venti e delle Calme

Periodo	DIREZIONI DI PROVENIENZA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme
Inverno									
ore 7	14.7	1.4	3.2	3.8	2.0	0.4	6.6	26.1	41.8
ore 16	13.1	1.1	2.8	8.3	10.9	2.0	12.4	26.6	2.8
media	13.9	1.3	3.0	6.0	6.5	1.2	9.5	26.3	32.3
Primavera									
ore 7	16.8	1.0	2.9	4.2	3.4	0.3	5.6	24.1	41.7
ore 16	10.4	0.5	2.8	16.8	25.3	1.7	10.4	20.8	11.3
media	13.6	0.8	2.8	10.5	14.4	1.0	8.0	22.4	26.5
Estate									
ore 7	21.1	0.7	0.2	1.9	3.6	0.4	3.6	27.1	41.4
ore 16	14.0	0.2	1.0	21.5	35.3	1.5	4.0	15.9	6.6
media	17.5	0.5	0.6	11.7	19.4	1.0	3.8	21.5	24.0
Autunno									
ore 7	14.9	1.2	2.6	4.6	2.3	0.4	3.6	22.2	48.2
ore 16	11.4	0.8	2.3	14.3	27.3	3.4	7.9	16.8	15.8
media	13.1	1.0	2.5	9.4	14.8	1.9	5.8	19.5	32.0

calme (43% dei casi) o, nel rimanente degli altri giorni, si sovrappone alle correnti di maestrale da N-NW che da sole assommano ad oltre il 40% dei casi di vento notturno.

Tuttavia, per meglio evidenziare le componenti di brezza, nella tabella A2.2 e' stata riportata la differenza fra le frequenze osservate alle ore 07 e quelle rilevate alle ore 16: se positiva e' stata assegnata come componente di brezza delle ore 07, se negativa come componente di brezza delle ore 16, mentre la minore tra le due frequenze e' stata considerata componente costante del vento sinottico, e dovuta alla circolazione atmosferica generale e non a quella locale termicamente indotta.

Premesso cio' possiamo constatare che le elevate frequenze di vento da N-NW sono di origine orografica nel periodo estate-autunno, e decisamente dovute al maestrale solo nel periodo inverno-primavera.

Inoltre, il secondo massimo di frequenze da S-SE e' effettivamente legato alle brezze di mare, molto sviluppate alle ore 16, mentre alle ore 07 risulta molto evidente una componente da N-NW legata alla brezza di terra, oltre ad una piu' elevata frequenza di calme strumentali di vento.

Nelle tabelle A2.3a, A2.3b e A2.3c. sono riportate le sintesi annuali analogamente a quanto fatto per le sintesi stagionali (Tabelle A2.1 e A2.2), tuttavia nella tabella A2.3b si puo' rilevare come, escludendo le calme, diventi piu' evidente la componente notturna prevalente da N-NW,

Tab. A2.2 - CAGLIARI ELMAS - Caratterizzazione delle Brezze e del Vento Sinottico (Costante)

Periodo	DIREZIONI DI PROVENIENZA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme
Inverno									
ore 7	1.6	0.3	0.4	-	-	-	-	-	19.0
ore 16	-	-	-	4.5	8.9	1.6	5.8	0.5	-
costante	13.1	1.1	2.8	3.8	2.0	0.4	6.6	26.1	22.8
Primavera									
ore 7	6.4	0.5	0.1	-	-	-	-	3.3	30.4
ore 16	-	-	-	12.6	21.9	1.4	4.8	-	-
costante	10.4	0.5	2.8	4.2	3.4	0.3	5.6	20.8	11.3
Estate									
ore 7	7.1	0.5	-	-	-	-	-	11.2	34.8
ore 16	-	-	0.8	19.6	31.7	1.1	0.4	-	-
costante	14.0	0.2	0.2	1.9	3.6	0.4	3.6	15.9	6.6
Autunno									
ore 7	3.5	0.4	0.3	-	-	-	-	6.4	32.4
ore 16	-	-	-	9.7	25.0	3.0	4.3	-	-
costante	11.4	0.8	2.3	4.6	2.3	0.4	3.6	16.8	15.8

Tab. A2.3a - CAGLIARI ELMAS - Caratterizzazione diurna dei Venti e delle Calme

Periodo	DIREZIONI DI PROVENIENZA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme
Anno									
ore 7	16.9	1.1	2.3	3.3	2.9	0.4	4.9	24.8	43.4
ore 16	12.3	0.6	2.3	15.3	24.8	2.2	8.7	20.0	13.8
media	14.6	0.8	2.3	9.3	13.9	1.3	6.8	22.4	28.6

Tab. A2.3b - CAGLIARI ELMAS - Caratterizzazione delle Brezze e del Vento Sinottico (Costante)

Periodo	DIREZIONI DI PROVENIENZA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme
Anno									
ore 7	4.6	0.5	0.0	-	-	-	-	4.8	29.6
ore 16	-	-	0.0	12.0	21.9	1.8	3.8	-	-
media	12.3	0.6	2.3	3.3	2.9	0.4	4.9	20.0	13.8

Tab. A2.3c - CAGLIARI ELMAS - Frequenze normalizzate escludendo le calme

Periodo	DIREZIONI DI PROVENIENZA								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calme
Anno									
ore 7	29.8	1.8	3.9	6.4	5.0	0.7	8.6	43.8	43.4
ore 16	14.2	0.8	2.5	17.8	28.8	2.5	10.2	23.2	13.8
media	22.0	1.3	3.2	12.1	16.9	1.6	9.4	33.5	28.6

mentre la componente diurna da S-SE e' dello stesso ordine di grandezza di quella sinottica da N-NW.

E' quindi chiaro che a Cagliari-Elmas, ovvero nella Piana del Campidano, si hanno due condizioni anemologiche molto differenziate:

- 1) periodi di burrasche con impetuosi venti di maestrale, spesso con velocita' superiori a 10 m/s (15 km/h);
- 2) periodi di calme meteorologiche, caratterizzate da uno spiccato regime di brezza.

Passando ora alla tabella A2.4, in cui e' riportata la distribuzione delle direzioni del vento in classi di velocita', si puo' constatare che le velocita' del vento piu' frequentemente elevate sono quelle associate al vento da NW, il maestrale, e che anche i venti da S-SE, relativi alle brezze di mare, si presentano con maggiore frequenza nell'intervallo di velocita' comprese tra 4 e 12 m/s, e quindi con velocita' piuttosto sostenute per dei venti di brezza.

Nella tabella A2.4 e' stata aggiunta anche la distribuzione di frequenza della nebbia per direzioni e per classi di velocita' del vento.

La nebbia, definita in meteorologia come meteora che riduce la visibilita' a meno di un chilometro, e' per Cagliari-Elmas un fenomeno molto raro (0,6% del totale delle osservazioni annue), scarsamente legato a situazioni di ristagno atmosferico (solo il 33% dei casi e' associato a calme di vento), ed essendo equidistribuito tra tutte le direzioni

dei venti e presente anche con velocità elevate del vento, e' molto probabilmente legato a fenomeni di avvezione umida con condensazione a bassa quota o a condizioni di tempo perturbato, e pertanto trascurabile come fenomeno negativo ai fini della valutazione della dispersione atmosferica.

Per concludere il paragrafo sulla distribuzione delle frequenze delle velocità del vento, per Cagliari-Elmas questa distribuzione e' ben rappresentata dalla funzione di Weibull:

$$p(v,k,c) = (k/c) (v/c)^{k-1} \exp(-(v/c)^k) \quad /1/ \text{ con:}$$

$$k, c > 0; v \geq 0.$$

k (adimensionale) e' detto fattore di forma;
 c (LT^{-1}), nelle unita' di misura di v) e' detto fattore di scala, la cui corrispondente funzione di distribuzione cumulativa e':

$$P(v(x)) = P(v \leq v(x)) = 1 - \exp(-(v(x)/c)^k) \quad /2/ \text{ con:}$$

$$k = 1.39, c = 4.6 \text{ e quindi: } \langle v \rangle = 4.21.$$

Inoltre, ricalcolando con la /2/ la sommatoria parziale della tabella A2.4, si puo' osservare una ridistribuzione delle frequenze delle classi di velocità nei primi due intervalli, con una piu' realistica riduzione delle calme effettive ($v < 0.5$ m/s), al 7%.

Un'altra importante considerazione necessaria e' quella relativa alla durate delle nebbie e delle calme di vento e della persistenza della direzione del vento da uno stesso settore, per le sue implicazioni sulle ricadute del pennacchio sempre nelle stesse zone, e cosi' pure le massime

velocita' raggiunte dal vento, per la valutazione della frequenza del <<downwash>>, fenomeno dell'abbattimento del pennacchio al suolo senza dispersione, che si verifica quando la velocita' del vento e' in un rapporto critico con la velocita' di uscita dei fumi dalla bocca del camino.

Come si puo' vedere dalla tabella A2.5, nel periodo 1951-1977 la massima persistenza del fenomeno della nebbia e' stato di appena 36 ore, e quindi del tutto trascurabile, mentre la massima durata di una situazione di calma di vento e' stata di 102 ore (oltre 4 giorni) nel trimestre invernale, fatto eccezionale per la zona del Campidano, ma da tenere in considerazione come caso estremo di condizioni critiche per la dispersione degli effluenti gassosi.

All'estremo opposto vediamo che, sempre dalla tabella A2.5, il vento puo' spirare a lungo e con forza sempre dalla stessa direzione, ma solo in situazione di maestrale, per un massimo finora registrato di circa 6 giorni ed una velocita' media di oltre 6 m/s; le altre direzioni, per motivi orografici, hanno una persistenza inferiore alle 60 ore, ad esclusione del vento da SE, legato a situazioni di scirocco o di libeccio, che ha fatto registrare una persistenza di 4 giorni ed una velocita' media di poco superiore a 6m/s.

Da ultimo, nella tabella A2.6, sono riportati alcuni casi di massime velocita' del vento (massime raffiche istantanee), registrate nel periodo 1951/1977 a Cagliari-Elmas: come si puo' vedere le massime raffiche sono state registrate quasi tutte nel periodo invernale in occasione di casi di

maestrale, anche se il fenomeno piu' violento si e' verificato il 24 settembre 1973 con una raffica di vento da SW di 71 nodi (132 km/h o 37 m/s).

Tab. A2.4 - CAGLIARI ELMAS -

Distribuzione delle direzioni del Vento e della nebbia in classi di velocità.

m/s nodi K m/h	0.0-0.7 0.0-1.5 0.0-2.6	0.7-2.3 1.5-4.5 2.6-8.1	2.3-3.8 4.5-7.5 8.1-13.7	3.8-6.4 7.5-12.5 13.7-23.0	6.4-12.0 12.5-23.5 23.0-43.3	>12.0 >23.5 >43.3	Totali	Frequenza % Nebbie (0.6%)
N	0.0	4.0	4.6	4.4	2.8	0.0	15.8	13.6
NE	0.0	1.0	0.6	0.4	0.1	0.0	2.1	0.1
E	0.0	0.9	0.9	0.8	0.6	0.0	3.2	0.4
SE	0.0	1.5	2.5	4.3	2.9	0.0	11.2	3.3
S	0.0	1.7	2.8	4.6	2.5	0.0	11.6	6.0
SW	0.0	0.6	0.6	0.6	0.3	0.0	2.1	1.6
W	0.0	1.0	1.0	1.7	2.2	0.2	6.1	2.1
NW	0.0	6.5	7.8	7.9	7.4	0.9	30.5	39.9
Calme	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.4	33.0
Teorico (*) Σ Parziale	7.4	24.6	21.8	18.3	2.3	100.0	-	
Σ Parziale	17.4	17.2	20.8	24.7	18.8	1.1	100.0	
Σ Cumulativa	17.4	34.6	55.4	80.1	98.9	100.0	-	
Nebbia Σ Parziale	33.0	29.4	22.7	14.1	0.8	0.0	-	100.0
Nebbia Σ Cumulativa	33.0	62.4	85.1	99.2	100.0	100.0	-	-

(*) Calcolato con la /2/

Tab. A2.5 - CAGLIARI ELMAS - Persistenza della direzione del Vento e della nebbia

persistenza e velocità media	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Nebbia	Calme (VV<0,5 m/s)
ore	54.0	12.0	63.0	96.0	60.0	18.0	45.0	138.0	36.0	102.0
Giorni	2.3	0.5	2.6	4.0	2.5	0.8	1.9	5.8	1.5	4.3 (*)
m/s	5.6	2.8	8.6	6.1	6.5	6.1	8.4	6.4	-	-
nodi	10.9	5.5	16.8	11.9	12.6	11.8	16.4	12.5	-	-
Km/h	20.2	10.2	31.1	22.0	23.3	21.9	30.4	23.2	-	-

(*) Nel periodo D.G.F.

Tab. A2.6 - CAGLIARI ELMAS - Velocità media e massimo del vento.

Periodo	Direzione di provenienza				Velocità		
	Giorno	mese	anno	Gradi	Settore	m/s	nodi
24	9	1973	210	SW	37	71	132
12	1	1968	330	NW	36	70	130
9	4	1964	90	E	36	70	130
30	10	1961	10	N	36	70	130
11	3	1975	100	E	34	66	122
30	12	1974	330	NW	34	66	122
7	1	1968	330	NW	34	66	122
2	12	1976	280	W	33	65	120
15	12	1973	300	NW	33	64	119
media annua	-	-	-	-	4.2	8.2	15.2

3.2 ULTERIORI PARAMETRI METEOROLOGICI

Per completare il quadro climatico, nella tabella A2.7 sono riportati i valori medi ed estremi di alcuni parametri meteorologici caratterizzanti il Campidano, come la temperatura, l'umidità, la pioggia, i temporali con pioggia e la pressione atmosferica, e nella tabella A2.8 la distribuzione in frequenza delle classi di stabilità mentre nell'Appendice 3 sono riportate le tabelle originali delle elaborazioni A.M. - ENEL riportanti le frequenze congiunte delle classi di stabilità atmosferica e di velocità del vento per settore di provenienza.

I parametri di tabella A2.7 evidenziano la generale mitezza del clima, ma anche una certa continentalità, testimoniata dai valori termici estremi, e giustificata dal fatto che la Piana del Campidano è una pianura valliva e quindi soggetta a forti raffreddamenti notturni ed invernali ed intensi riscaldamento diurni ed estivi, nei rari periodi (circa il 7%) di scarsa attività anemologica.

Questa situazione termica ed anemologica si ripercuote nella distribuzione delle frequenze delle classi di stabilità che sono un indice della turbolenza atmosferica e dello shear del vento (rotazione della direzione ed aumento della velocità con la quota) nei bassi strati per cause di natura termica e dinamica originate dalla interazione delle masse d'aria della libera atmosfera con il suolo.

La stabilita' atmosferica viene normalmente definita attraverso il gradiente termico verticale esistente, vale a dire attraverso le variazioni della temperatura dell'aria con la quota.

La caratterizzazione climatica del gradiente termico verticale implica l'effettuazione di sondaggi termici in quota nei bassi strati dell'atmosfera in numero rilevante affinche' si possa ritenere significativa l'analisi delle caratteristiche medie di turbolenza atmosferica esistente negli strati atmosferici piu' prossimi al suolo.

Naturalmente cio' non sempre e' possibile, per cui sono stati proposti vari criteri e metodi di valutazione delle caratteristiche del gradiente termico verticale (vedi Appendice 1) e quindi della turbolenza, basati su misure ed osservazioni al suolo.

Tali criteri e metodi sono stati sviluppati in relazione al particolare tipo di modello matematico applicativo e con precisione piu' o meno spinta a seconda della complessita' dello stesso modello.

Tenendo conto che nelle applicazioni per valutare la diffusione atmosferica e la deposizione al suolo, si fa ricorso a modelli matematici di tipo gaussiano, ed in particolare alla modellistica proposta da Pasquill-Gifford, il criterio di valutazione della stabilita' atmosferica e' anch'esso basato sulla metodologia di Pasquill-Gifford.

Essa si fonda sulla divisione delle caratteristiche turbolente dell'atmosfera nei bassi strati in classi o categorie di stabilita' definite secondo il seguente schema:

- Categoria A: situazione estremamente instabile, turbolenza termodinamica molto forte, shear del vento molto debole.
- Categoria B: situazione debolmente instabile, turbolenza termodinamica forte, shear del vento debole.
- Categoria C: situazione moderatamente instabile, turbolenza termodinamica media, shear del vento moderato.
- Categoria D: situazione neutra (adiabatica e pseudoadiabatica), turbolenza termodinamica debole, shear del vento moderato-forte.
- Categoria E: situazione debolmente stabile, turbolenza termodinamica molto debole, shear del vento forte.
- Categoria F (F+G): situazione stabile o molto stabile, turbolenza termodinamica assente, shear del vento molto forte.

Un altro fenomeno di rilevanza per la protezione dell'ambiente e' quello della fumigazione, non compreso nelle categorie di Pasquill-Gifford, tipico della Valle Padana ma, associato alle brezze, e' presente anche nelle zone costiere. In generale le brezze, tendendo a smuovere le masse d'aria, che altrimenti stagnerebbero a causa delle alte pressioni e dei venti sinottici nulli, dovrebbero condurre ad un miglioramento delle caratteristiche diffusive dell'atmosfera; in realta' cio' non e' sempre vero.

La brezza di mare che di giorno spira verso l'entroterra genera, all'interfaccia atmosfera-suolo, uno strato turbolento e generalmente instabile a causa sia del diverso attrito esistente passando dal mare alla terra, sia soprattutto della notevole differenza di temperatura esistente tra la superficie marina e la superficie terrestre.

Quando la brezza e' ben sviluppata, si forma in quota, ad altezze via via crescenti procedendo dalla costa verso l'interno, uno strato di inversione o di isotermia che tende a bloccare verso l'alto i processi diffusivi dell'atmosfera nei bassi strati; si forma, in definitiva, uno strato di fumigazione tra il suolo e tale strato di inversione o isotermia, la cui altezza e' funzione della distanza dalla costa ed e', in genere, assimilabile ad un arco di parabola. Se gli inquinanti vengono rilasciati entro tale strato di fumigazione, la notevole turbolenza termodinamica esistente fa si' che essi vengano rapidamente diffusi su tutto lo strato, indipendentemente o quasi dalla quota di rilascio o di emissione; in questo caso, pertanto, l'emissione in quota non garantisce bassi livelli di concentrazione degli inquinanti a livello del suolo alle brevi distanze; se, viceversa, gli inquinanti vengono rilasciati al di sopra dello strato di fumigazione, la diffusione avviene quasi totalmente in quota con nessuna pratica conseguenza a livello del suolo.

Tab. A2.7 - CAGLIARI ELMAS - Valori medi ed estremi di alcuni parametri meteorologici.

Periodo	Temperatura °C				%		piogge mm	temporali con pioggia Giorni	pressione h Pa
	media	media	estrema	estrema	umidità	umidità			
	minima	massima	minima	massima	ore 7	ore 13			
G	5.8	13.7	-3.5	21.8	86	69	46	1.6	1015.6
F	6.0	14.1	-3.2	21.5	85	66	53	1.9	1014.3
M	7.4	15.8	-3.7	27.3	86	62	43	1.6	1014.4
A	9.3	18.1	+1.4	26.2	85	60	33	2.2	1013.2
M	12.5	22.0	3.5	30.4	85	57	28	1.9	1014.7
G	16.4	26.0	8.4	38.4	82	56	12	1.5	1015.5
L	18.4	29.0	9.4	38.0	82	54	2	1.5	1015.3
A	19.0	29.1	12.4	39.4	82	56	8	1.9	1014.9
S	17.1	26.5	8.4	35.5	87	58	29	3.5	1016.2
O	13.6	22.4	2.5	30.2	88	62	61	3.6	1016.1
N	9.8	18.1	+0.2	28.0	87	67	53	2.6	1015.7
D	7.2	15.0	-0.2	21.2	86	71	60	2.0	1015.2
Anno	11.8	20.7	-3.7	39.4	85	61	429	25.8	1015.0

4 CONSIDERAZIONI MICROCLIMATICHE CONCLUSIVE

La conoscenza delle condizioni medie di stabilita' nei bassi strati e' molto importante ai fini della valutazione della sorte degli agenti inquinanti.

La valutazione statistica dell'intero giorno per gli stessi mesi (per un periodo di oltre 25 anni: dal gennaio 1951 al dicembre 1977) ha dato per la stazione in esame i risultati riportati nella tabella A2.8.

Da tali dati emerge che la frequenza delle condizioni di neutralita' (D) e' molto elevata: sempre superiore al 30% in ciascuna stagione; inoltre la frequenza delle condizioni di instabilita' e di neutralita' sommate fra loro e' sempre superiore a quelle di stabilita'.

Questo indica che sono maggiori le situazioni in cui l'ambiente atmosferico e' efficace ai fini della dispersione degli agenti aeriformi inquinanti.

Inoltre dalla tabella A2.4, che riporta la frequenza relativa in percentuale annuale della direzione di provenienza del vento per settori, per sei gradini di velocita' comprese le calme, si puo' vedere come il vento, da qualunque direzione provenga, abbia una distribuzione di frequenza concentrata su velocita' elevate.

Poiche' la velocita' media e' responsabile del trasporto degli agenti aeriformi inquinanti al momento della loro emissione nell'atmosfera (la diluizione iniziale e' proporzionale alla velocita' del vento), si puo' dedurre a priori

una buona dispersione atmosferica degli effluenti gassosi provenienti dal sito di Macchiareddu.

Per inciso, una forte velocita' del vento implica anche un elevato strato di rimescolamento, per cui il volume d'aria in cui si diluiscono gli inquinanti dovrebbe garantire una concentrazione al suolo molto bassa rispetto alla concentrazioni emesse in aria alla bocca del camino.

Tab. A2.8 - CAGLIARI ELMAS - Classi di stabilità - Distribuzione frequenze (in %)

Periodo	A	B	C	D	E	F+G	Nebbie
G	0.00	3.59	3.22	48.93	16.59	27.06	0.62
F	0.38	4.41	3.51	51.87	15.14	23.29	1.40
M	1.13	5.15	4.31	58.42	11.91	18.03	1.05
A	1.73	5.08	8.16	59.61	10.30	14.43	0.70
M	3.31	10.72	16.75	42.47	11.48	14.43	0.84
G	2.94	11.38	21.44	35.89	13.62	14.50	0.24
L	3.60	13.57	23.62	28.31	13.65	16.92	0.33
A	2.78	11.18	17.39	38.98	12.18	17.36	0.13
S	1.53	6.78	7.39	49.78	13.69	20.61	0.22
O	1.55	6.68	4.94	38.14	17.10	31.29	0.29
N	0.00	4.28	3.88	43.74	16.93	30.69	0.48
D	0.00	4.91	3.74	46.58	15.76	27.98	1.03
D-G-F	0.13	4.30	3.49	49.13	15.83	26.11	1.02
M-A-M	2.06	6.98	9.74	53.50	11.23	15.63	0.86
G-L-A	3.11	12.04	20.82	34.39	13.15	16.26	0.23
S-O-N	1.03	5.91	5.40	43.89	15.91	27.53	0.33
Anno	1.61	7.39	10.04	45.08	14.00	21.27	0.61

Appendice 1

Le Categorie di Pasquill-Gifford

Le categorie di Pasquill-Gifford vengono valutate secondo il seguente schema, che è basato su una serie di osservazioni meteorologiche al suolo di tipo sinottico.

VV(10 m) m/s	Classi di stabilità notturne			Classi di stabilità diurne			
	N=radiazione netta in mW/cm ²			R=radiazione solare in mW/cm ²			
u	-14.<N	-4.2<N	-2.1<N	0<R<15	15≤R<29	29≤R<58	58≤R<∞
	N≤-4.2	N≤-2.1	N≤-0.0				
0 ≤ u < 2	G	F	D	D	B	A-B	A
2 ≤ u < 3	F	E	D	D	C	B	A-B
3 ≤ u < 4	E	D	D	D	C	B-C	B
4 ≤ u < 6	D	D	D	D	D	C-D	C
6 ≤ u < ∞	D	D	D	D	D	D	C

Appendice 2

Le categorie di Turbolenza secondo B.N.L.

Le categorie di Stabilità Atmosferica secondo Brookhaven (B.N.L.), vengono valutate secondo il seguente schema, che è basato su una serie di osservazioni meteorologiche al suolo di tipo sinottico.

VV(10 m) m/s	Classi di stabilità notturne N=radiazione netta in mW/cm ²			Classi di stabilità diurne R=radiazione solare in mW/cm ²			
	-14.<N	-4.2<N	-2.1<N	0<R<15	15≤R<29	29≤R<58	58≤R<∞
u	N≤-4.2	N≤-2.1	N≤-0.0				
0 ≤ u < 2	D	D	C	C	B1	B2	B2
2 ≤ u < 3	D	D	C	C	B1	B1	B2
3 ≤ u < 4	D	C	C	C	B1	B1	B1
4 ≤ u < 6	C	C	C	C	C	C	B1
6 ≤ u < ∞	C	C	C	C	C	C	B1

CLASSI DI STABILITA' E VENTO
 CLASSE DI STABILITA' B

NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 3286

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI (%)

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA' (NODI)						TOTALE
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	
1	0.0 - 22.5		14.38	5.71	1.52	0.0	0.0	21.61
2	22.5 - 45.0		6.01	0.68	0.0	0.0	0.0	6.70
3	45.0 - 67.5		1.07	0.0	0.0	0.0	0.0	1.07
4	67.5 - 90.0		1.07	0.15	0.0	0.0	0.0	1.22
5	90.0 - 112.5		1.37	0.91	0.23	0.0	0.0	2.51
6	112.5 - 135.0		4.72	3.20	1.60	0.0	0.0	9.51
7	135.0 - 157.5		10.19	37.13	25.18	0.0	0.0	72.50
8	157.5 - 180.0		22.06	69.54	40.40	0.0	0.0	132.00
9	180.0 - 202.5		26.32	59.27	31.95	0.0	0.0	117.54
10	202.5 - 225.0		13.85	13.31	6.54	0.0	0.0	33.70
11	225.0 - 247.5		4.18	0.99	0.91	0.0	0.0	6.09
12	247.5 - 270.0		6.16	1.14	0.46	0.0	0.0	7.76
13	270.0 - 292.5		13.16	7.76	2.05	0.0	0.0	22.98
14	292.5 - 315.0		39.18	18.11	7.23	0.0	0.0	64.52
15	315.0 - 337.5		84.45	43.06	13.09	0.0	0.0	140.60
16	337.5 - 360.0		44.58	21.15	9.13	0.0	0.0	74.86
	VARIABILI		0.30	0.61	0.0	0.0	0.0	0.91
	0 - 1 NODO	283.93						283.93
	TOTALE	283.93	293.06	282.71	140.29	0.0	0.0	1000.00

CLASSI DI STABILITA' E VENTO
CLASSE DI STABILITA' C

NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 4463

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI (%)

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA' (NODI)						TOTALE
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	
1	0.0 - 22.5		3.47	15.24	12.21	3.98	0.22	35.12
2	22.5 - 45.0		1.23	2.80	1.68	0.06	0.0	5.77
3	45.0 - 67.5		0.22	0.45	0.06	0.0	0.0	0.73
4	67.5 - 90.0		0.22	0.11	0.84	0.0	0.0	1.18
5	90.0 - 112.5		0.45	0.95	2.80	0.0	0.0	4.20
6	112.5 - 135.0		0.67	2.97	10.87	5.15	0.22	19.89
7	135.0 - 157.5		1.96	13.95	64.47	26.61	0.22	107.21
8	157.5 - 180.0		3.87	14.40	88.45	37.36	0.11	144.19
9	180.0 - 202.5		3.42	11.88	71.92	28.90	0.11	116.23
10	202.5 - 225.0		1.06	6.83	14.45	3.70	0.0	26.05
11	225.0 - 247.5		0.45	0.50	1.34	0.34	0.0	2.63
12	247.5 - 270.0		0.11	2.07	3.59	1.57	0.0	7.34
13	270.0 - 292.5		2.46	9.24	12.94	8.29	0.95	33.89
14	292.5 - 315.0		11.32	35.46	31.43	13.11	1.29	92.59
15	315.0 - 337.5		25.21	78.87	84.02	51.93	7.17	247.20
16	337.5 - 360.0		13.78	50.08	56.46	33.22	1.57	155.11
	VARIABILI 0 - 1 NODO	0.0	0.22	0.0	0.22	0.22	0.0	0.67
	TOTALE	0.0	70.13	245.80	457.76	214.43	11.88	1000.00

CLASSI DI STABILITA' E VENTO

CLASSE DI STABILITA' D

NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 20037

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI (%)

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA' (NODI)						TOTALE
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	
1	0.0 - 22.5		5.78	5.59	12.26	7.46	0.17	31.27
2	22.5 - 45.0		3.21	2.99	3.18	1.15	0.0	10.53
3	45.0 - 67.5		2.12	1.61	1.82	1.27	0.05	6.87
4	67.5 - 90.0		2.25	2.11	4.94	3.79	0.17	31.26
5	90.0 - 112.5		3.72	3.71	10.85	7.57	0.16	26.01
6	112.5 - 135.0		3.19	4.85	19.16	22.40	0.36	49.97
7	135.0 - 157.5		4.04	6.63	40.38	29.55	0.60	81.19
8	157.5 - 180.0		5.19	6.08	28.52	22.16	0.45	62.40
9	180.0 - 202.5		3.62	5.24	21.44	17.68	0.32	48.30
10	202.5 - 225.0		2.47	2.37	6.94	4.68	0.02	16.48
11	225.0 - 247.5		1.14	1.10	2.42	2.35	0.09	7.09
12	247.5 - 270.0		1.63	1.05	5.86	8.21	0.54	17.29
13	270.0 - 292.5		4.03	4.43	22.75	32.34	2.84	66.39
14	292.5 - 315.0		10.72	13.54	41.74	48.19	5.37	119.54
15	315.0 - 337.5		21.90	23.92	71.72	95.66	12.69	225.88
16	337.5 - 360.0		12.94	12.76	45.84	46.00	3.01	120.55
	VARIABILI	96.12	0.05	0.05	0.25	0.50	0.0	0.85
	0 - I NODO							96.12
	TOTALE	96.12	87.99	98.02	340.07	350.95	26.85	1000.00

CLASSI DI STABILITA' E VENTO

CLASSE DI STABILITA' E

NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 6220

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI (-)

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA' (NODI)						
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	TOTALE
1	0.0 - 22.5		4.30	44.01	19.69	0.0	0.0	68.01
2	22.5 - 45.0		3.66	16.28	4.98	0.0	0.0	24.92
3	45.0 - 67.5		2.73	5.63	1.00	0.0	0.0	9.36
4	67.5 - 90.0		2.01	11.41	1.33	0.0	0.0	14.75
5	90.0 - 112.5		3.18	26.41	4.14	0.0	0.0	33.72
6	112.5 - 135.0		6.23	30.67	12.02	0.0	0.0	48.91
7	135.0 - 157.5		6.27	64.15	26.00	0.0	0.0	96.42
8	157.5 - 180.0		4.58	37.70	20.54	0.0	0.0	62.82
9	180.0 - 202.5		2.41	21.42	12.30	0.0	0.0	36.13
10	202.5 - 225.0		1.85	8.56	3.38	0.0	0.0	13.79
11	225.0 - 247.5		1.41	2.97	0.56	0.0	0.0	4.94
12	247.5 - 270.0		1.25	5.95	2.01	0.0	0.0	9.20
13	270.0 - 292.5		3.90	25.72	9.77	0.0	0.0	39.39
14	292.5 - 315.0		12.10	83.36	26.57	0.0	0.0	122.03
15	315.0 - 337.5		15.96	161.17	63.75	0.0	0.0	240.88
16	337.5 - 360.0		11.13	110.69	52.25	0.0	0.0	174.88
	VARIABILI 0 - 1 NODO	0.0	0.16	0.48	0.0	0.0	0.0	0.64
	TOTALE	0.0	83.12	656.59	260.29	0.0	0.0	1000.00

CLASSI DI STABILITA' E VENTO
 CLASSE DI STABILITA' F+G

NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 9454

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI (/--)

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA' (NODI)						TOTALE
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	
1	0.0 - 22.5		35.14	10.71	0.0	0.0	0.0	45.85
2	22.5 - 45.0		19.49	4.73	0.0	0.0	0.0	24.22
3	45.0 - 67.5		7.67	1.51	0.0	0.0	0.0	9.18
4	67.5 - 90.0		9.41	1.45	0.0	0.0	0.0	10.87
5	90.0 - 112.5		14.25	3.70	0.0	0.0	0.0	17.96
6	112.5 - 135.0		16.79	4.23	0.0	0.0	0.0	21.02
7	135.0 - 157.5		24.20	9.12	0.0	0.0	0.0	33.32
8	157.5 - 180.0		16.42	5.47	0.0	0.0	0.0	21.90
9	180.0 - 202.5		10.84	3.60	0.0	0.0	0.0	14.44
10	202.5 - 225.0		5.66	1.38	0.0	0.0	0.0	7.03
11	225.0 - 247.5		4.05	0.45	0.0	0.0	0.0	4.50
12	247.5 - 270.0		3.89	0.34	0.0	0.0	0.0	4.23
13	270.0 - 292.5		12.69	2.49	0.0	0.0	0.0	15.18
14	292.5 - 315.0		44.53	13.01	0.0	0.0	0.0	57.54
15	315.0 - 337.5		107.52	33.45	0.0	0.0	0.0	140.97
16	337.5 - 360.0		79.86	25.78	0.0	0.0	0.0	105.64
	VARIABILI 0 - 1 NODO	466.05	0.11	0.0	0.0	0.0	0.0	466.05
	TOTALE	466.05	412.52	121.43	0.0	0.0	0.0	1000.00