



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**  
**ASSESSORATO DELLA DIFESA DELL'AMBIENTE**  
**SERVIZIO ANTINQUINAMENTO ATMOSFERICO E ACUSTICO**

**REALIZZAZIONE DELL'INVENTARIO REGIONALE DELLE SORGENTI DI EMISSIONE, DEL DOCUMENTO SULLA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA AMBIENTE IN SARDEGNA E INDIVIDUAZIONE DELLE POSSIBILI MISURE DA ATTUARE PER IL RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DI CUI AL D.LGS N. 351/99**

**VALUTAZIONE FINALE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA, ZONIZZAZIONE DEFINITIVA, PIANI DI RISANAMENTO E MANTENIMENTO**

**APPENDICE B**

**IL BISSIDO DI ZOLFO A PORTOSCUSO**

**SETTEMBRE 2005**

**Realizzazione del progetto a cura delle società**

**Progemisa S.p.a., Consorzio SAR s.r.l, Enviroware s.r.l., Orion s.r.l.**





## **S O M M A R I O**

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUZIONE</b>                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>INQUADRAMENTO DELL'AREA INDUSTRIALE DI PORTOSCUSO</b> | <b>2</b>  |
| 2.1      | i dati della rete di rilevamento                         | 4         |
| <b>3</b> | <b>CONDIZIONI METEOCLIMATICHE</b>                        | <b>12</b> |
| 3.1      | Qualità dei dati meteorologici                           | 12        |
| 3.2      | Classi di stabilità                                      | 14        |
| 3.3      | Altezza dello strato limite                              | 15        |
| 3.3.1    | Casi stabile e neutro                                    | 15        |
| 3.3.2    | Caso instabile   | 16        |
| 3.4      | Velocità di frizione                                     | 16        |
| 3.5      | Caratterizzazione anemologica                            | 17        |
| 3.6      | Capacità dispersiva                                      | 20        |
| <b>4</b> | <b>IL MODELLO DI DISPERSIONE ISC3</b>                    | <b>22</b> |
| <b>5</b> | <b>STIMA DEGLI IMPATTI</b>                               | <b>25</b> |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONI</b>                                       | <b>29</b> |

## **1 INTRODUZIONE**

Questa breve appendice sintetizza alcuni risultati dello studio eseguito dalla Enviroware srl per conto della Progemisa, nell'ambito di un progetto in essere per conto dell'Assessorato della Difesa dell'Ambiente della regione Sardegna. Lo studio, centrato sul periodo Giugno 2003-Settembre 2004, ha dimostrato come le sorgenti industriali dislocate nell'area di Portovesme non possano produrre, in condizioni normali di emissione, le concentrazioni di biossido di zolfo registrate dalle quattro stazioni automatiche della rete di monitoraggio della provincia di Cagliari presenti nella zona. Tali concentrazioni sono presumibilmente addebitabili a situazioni particolari di funzionamento degli impianti industriali, quali fermate e riavvii, che modificano drasticamente il regime emissivo nell'area industriale.

La relazione contiene una breve descrizione dell'area in esame e della relativa situazione meteorologica, necessaria sia per comprendere le capacità dispersive della zona, sia per la preparazione dei dati di input del modello di dispersione atmosferica.

Per calcolare gli effetti sulla qualità dell'aria indotti dall'esercizio degli impianti è stato utilizzato, come di consueto, l'approccio modellistico, mediante simulazioni al computer effettuate utilizzando modelli internazionalmente riconosciuti e validati dall'US-EPA.

## 2 INQUADRAMENTO DELL'AREA INDUSTRIALE DI PORTOSCUSO

L'area industriale di Portoscuso, inserita nell'area dei cinque comuni interessati agli interventi del Piano di Disinquinamento del Sulcis-Iglesiente, è soggetta alla pressione di numerose attività industriali, il cui apporto inquinante a carico dell'atmosfera è notevole. Nell'area sono infatti in esercizio numerosi impianti produttivi, di produzione di energia elettrica e della metallurgia non ferrosa, ognuno dei quali presenta numerosissimi centri di emissione.

Il territorio di Portoscuso è oggetto di monitoraggio della qualità dell'aria da parte di soggetti diversi: l'ENEL, la Provincia di Cagliari e la società Portovesme srl. La rete della Provincia di Cagliari ha nell'area quattro postazioni di misura, dislocate attorno all'area industriale di Portovesme. Le stazioni fanno parte della rete di monitoraggio realizzata, con interventi successivi nell'arco di diversi anni, dall'Assessorato Difesa Ambiente della R.A.S..

La seguente Figura 1 rappresenta l'area circostante l'agglomerato industriale di Portoscuso (in colore) e la posizione delle stazioni di misura della provincia di Cagliari.

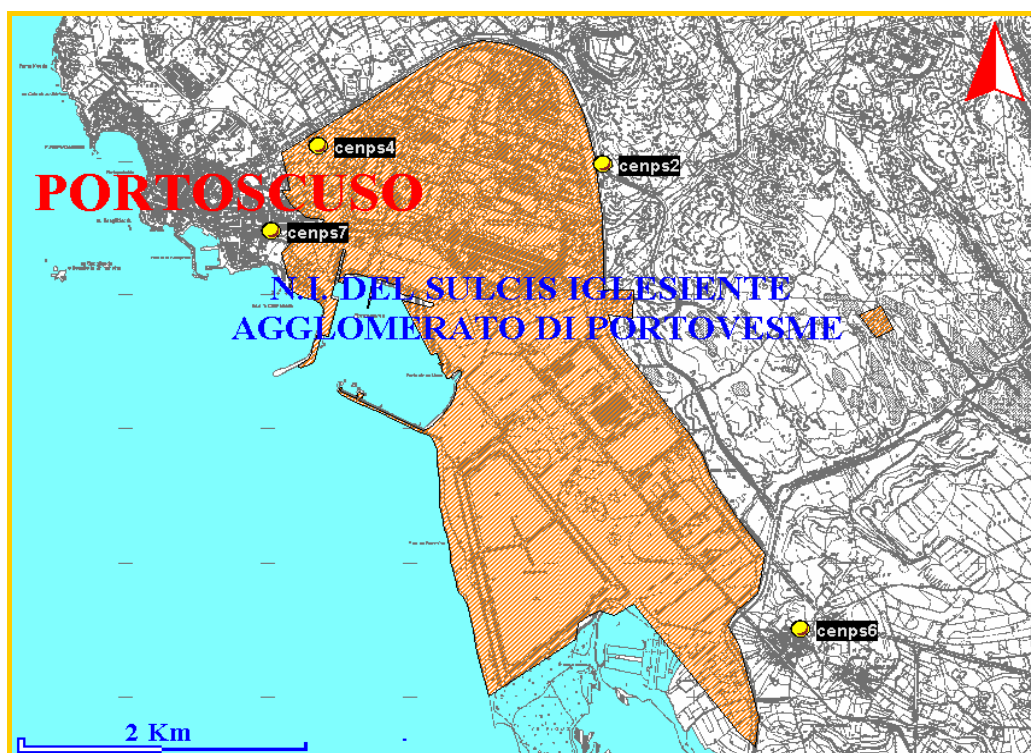


Figura 1 – Area industriale di Portoscuso

Le stazioni, a regime dal 1999, hanno subito, nel corso degli anni successivi al loro avvio, alcune modifiche logistiche e tecnologiche; esse sono ubicate, come si può vedere nella precedente figura, intono al perimetro dell'area industriale, distanti tra loro e dall'area industriale da 1 a 5 km.

La stazione CENPS2, dotata anche di strumenti per la registrazione dei parametri meteorologici principali, è ad una quota di 30 m (superiore alla quota media degli impianti presenti nell'area industriale) e a meno di un chilometro dai camini degli impianti stessi. Le stazioni CENPS7 e CENPS6 sono all'interno dei centri abitati di Portoscuso e Paringianu rispettivamente, mentre la CENPS4 è posizionata alla periferia di Portoscuso. L'attuale dotazione strumentale della rete di monitoraggio della zona di Portoscuso, riassunta nella seguente tabella, consente di monitorare i principali inquinanti normati, escluso il piombo.

|        | BTX | CO | NOX | O3 | PM10 | SO2 | TSP | meteo |
|--------|-----|----|-----|----|------|-----|-----|-------|
| CENPS2 |     |    | ✓   |    | ✓    | ✓   |     | ✓     |
| CENPS4 |     | ✓  | ✓   |    |      | ✓   | ✓   |       |
| CENPS6 |     |    | ✓   |    | ✓    | ✓   |     |       |
| CENPS7 | ✓   |    | ✓   | ✓  | ✓    | ✓   |     |       |

**Tabella 1 – Dotazione di strumenti delle stazioni di Portoscuso**

Il significato delle sigle riportate in tabella è il seguente:

BTX: Benzene, toluene e xilene

CO: Monossido di carbonio

NOX: Ossidi di azoto

O3: Ozono

PM10: Polveri di diametro inferiore a 10 micron (polveri inalabili)

SO2: Ossidi di zolfo

TSP: Particelle solide sospese totali

## 2.1 I DATI DELLA RETE DI RILEVAMENTO

Per quanto riguarda la protezione della salute umana da concentrazioni in aria ambiente di biossido di zolfo, la normativa stabilisce i limiti riportati nella seguente Tabella 2:

| Dato utilizzato                                | 2003                  | 2004                  | 2005                  | Descrizione   |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Media oraria                                   | 410 µg/m <sup>3</sup> | 380 µg/m <sup>3</sup> | 350 µg/m <sup>3</sup> | Valore limite per la protezione della salute umana.<br>Da non superare più di 24 volte per anno civile. |
| Media oraria                                   | 500 µg/m <sup>3</sup> | 500 µg/m <sup>3</sup> | 500 µg/m <sup>3</sup> | Soglia di allarme.<br>Da non superare per più di due ore consecutive                                    |
| Media giornaliera                              |                       |                       | 125 µg/m <sup>3</sup> | Valore limite per la protezione della salute umana.<br>Da non superare più di 3 volte per anno civile.  |
| Media invernale                                | 20 µg/m <sup>3</sup>  | 20 µg/m <sup>3</sup>  | 20 µg/m <sup>3</sup>  | Valore limite per la protezione degli ecosistemi  |
| Media annuale                                  | 20 µg/m <sup>3</sup>  | 20 µg/m <sup>3</sup>  | 20 µg/m <sup>3</sup>  | Valore limite per la protezione degli ecosistemi  |
| Mediana annuale delle medie giornaliere        | 80 µg/m <sup>3</sup>  | 80 µg/m <sup>3</sup>  |                       | Valore limite di qualità dell'aria  |
| 98° percentile annuale delle medie giornaliere | 250 µg/m <sup>3</sup> | 250 µg/m <sup>3</sup> |                       | Valore limite di qualità dell'aria  |
| Mediana invernale delle medie giornaliere      | 130 µg/m <sup>3</sup> | 130 µg/m <sup>3</sup> |                       | Valore limite di qualità dell'aria  |

**Tabella 2 – Valori limite per l'SO<sub>2</sub>**

Gli ultimi tre limiti (righe ombreggiate) derivano dal DPR 203/88 e non sono più in vigore dal 1 Gennaio 2005. I limiti in vigore derivano tutti dal DM 60/2002; come si può notare il valore limite per la protezione della salute umana sulla media giornaliera è entrato in vigore solo a partire dal 2005, mentre il valore limite per la protezione della salute umana sulla media oraria aveva nel 2003 e nel 2004 un margine di tolleranza rispetto al limite definitivo entrato in vigore nel 2005.

Mediante la elaborazione dei dati rilevati dalle stazioni di monitoraggio della provincia di Cagliari, la situazione della qualità dell'aria negli anni 2003 e 2004, limitatamente al biossido di zolfo, può essere sintetizzata come nella seguente Tabella 3.

| Anno | Parametro statistico                        | CENPS2 | CENPS4 | CENPS6 | CENPS7 |
|------|---|--------|--------|--------|--------|
| 2003 | % di dati validi                            | 92     | 90     | 94     | 93     |
|      | Valore medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )   | 74     | 31     | 39     | 40     |
|      | 98° percentile ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 589    | 369    | 190    | 253    |
|      | Valore massimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 2029   | 1555   | 814    | 1412   |
|      | n° superamenti del LPSU/mo                  | 403    | 172    | 23     | 68     |
|      | n° superamenti della SA                     | 25     | 3      | 0      | 2      |
|      | n° superamenti del LPSU/mg                  | 70     | 28     | 8      | 22     |
| 2004 | % di dati validi                            | 90     | 94     | 92     | 93     |
|      | Valore medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )   | 38     | 23     | 30     | 34     |
|      | 98° percentile ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 403    | 273    | 134    | 156    |
|      | Valore massimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 2531   | 1980   | 1202   | 669    |
|      | n° superamenti del LPSU/mo                  | 184    | 125    | 7      | 15     |
|      | n° superamenti della SA                     | 15     | 7      | 0      | 0      |
|      | n° superamenti del LPSU/mg                  | 25     | 19     | 2      | 6      |

**Tabella 3 – Principali indicatori statistici per l'SO<sub>2</sub> negli anni 2003-2004**

**Legenda:**

**LPSU/mo:** livello di protezione della salute umana (media oraria)

**SA:** soglia di allarme

**LPSU/mg:** livello di protezione della salute umana (media giornaliera)

Nel periodo di studio (giugno 2003 – settembre 2004) la situazione risulta quella della seguente Tabella 4.



| Anno                         | Parametro statistico                        | CENPS2 | CENPS4 | CENPS6 | CENPS7 |
|------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| Giugno 2003 - Settembre 2004 | % di dati validi                            |        |        |        |        |
|                              | Valore medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )   | 42     | 25     | 29     | 20     |
|                              | 98° percentile ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 385    | 171    | 146    | 135    |
|                              | Valore massimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 2097   | 1555   | 1202   | 1126   |
|                              | n° superamenti del LPSU/mo                  | 259    | 81     | 17     | 20     |
|                              | n° superamenti della SA                     | 12     | 1      | 0      | 0      |
|                              | n° superamenti del LPSU/mg                  | 44     | 15     | 4      | 5      |

**Tabella 4 - Parametri statistici osservati nel periodo Giugno 2003 - Settembre 2004**

Le seguenti figure riportano, con la simbologia dei plot-box, i principali andamenti mensili per le concentrazioni di SO<sub>2</sub> rilevate dalle stazioni della rete di monitoraggio; in ogni grafico sono riportati:

- la percentuale di funzionamento dello strumento di misura (linea continua con asse dei valori sulla destra);
- il valore minimo;
- il 5° percentile;
- la media;
- la mediana;
- il 98° percentile;
- il massimo.

Gli elementi del plot-box corrispondono ai valori sopra riportati secondo la legenda data nella seguente figura.

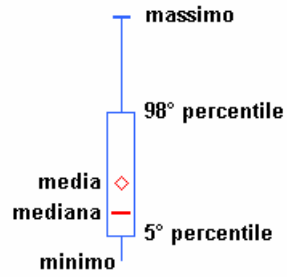


Figura 2 – Legenda dei plot-box

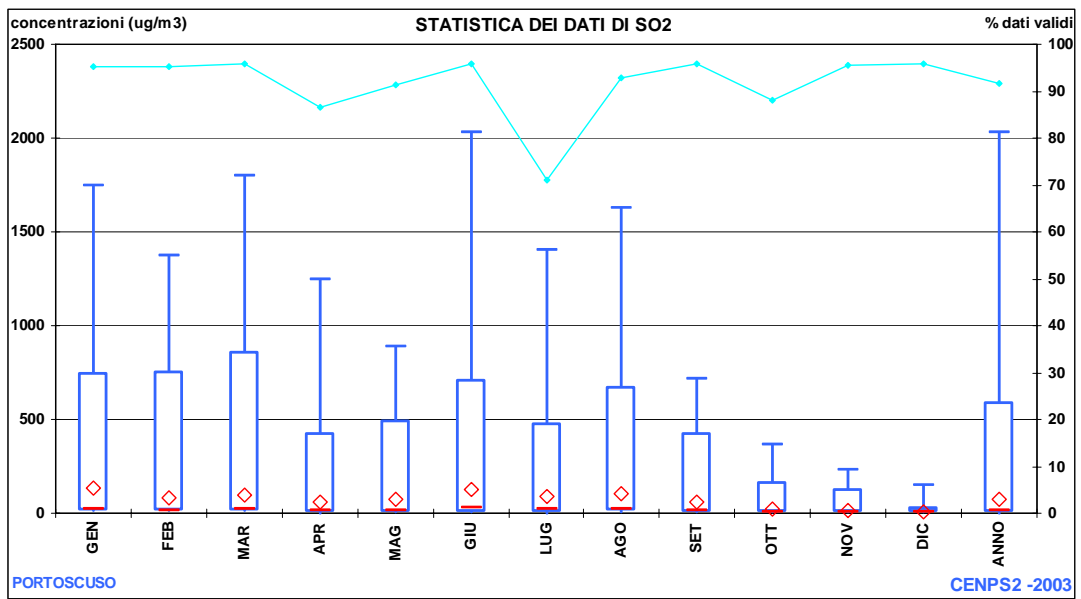


Figura 3 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS2 (2003)

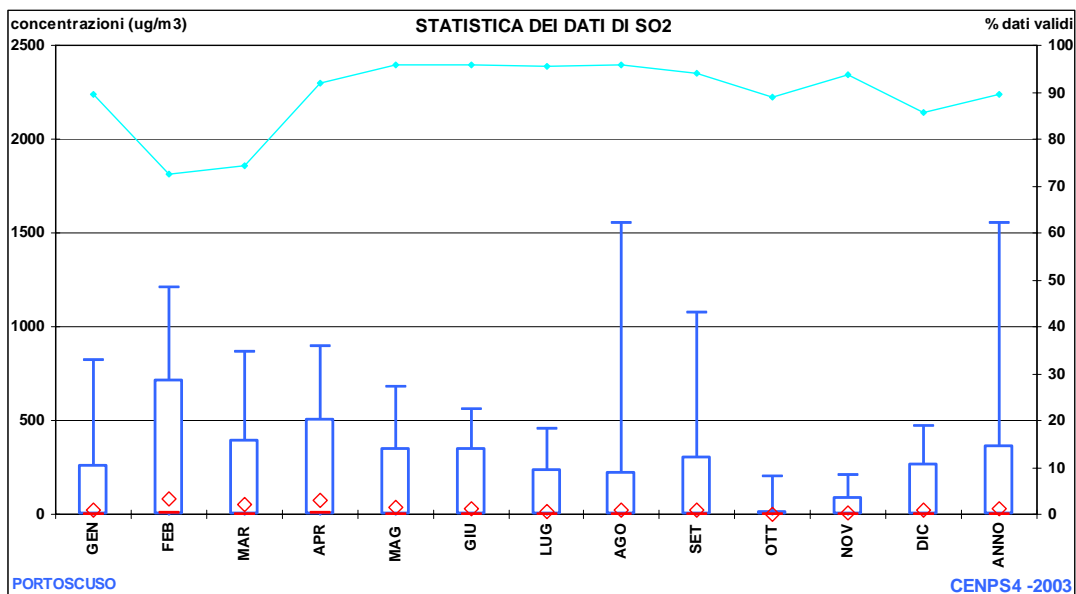


Figura 4 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS4 (2003)

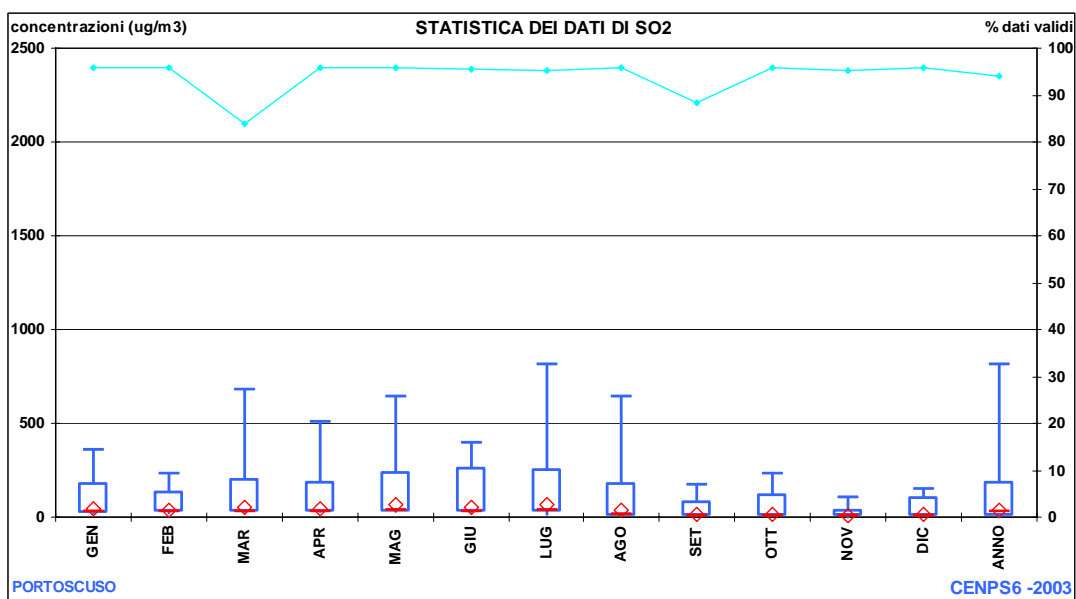


Figura 5 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS6 (2003)

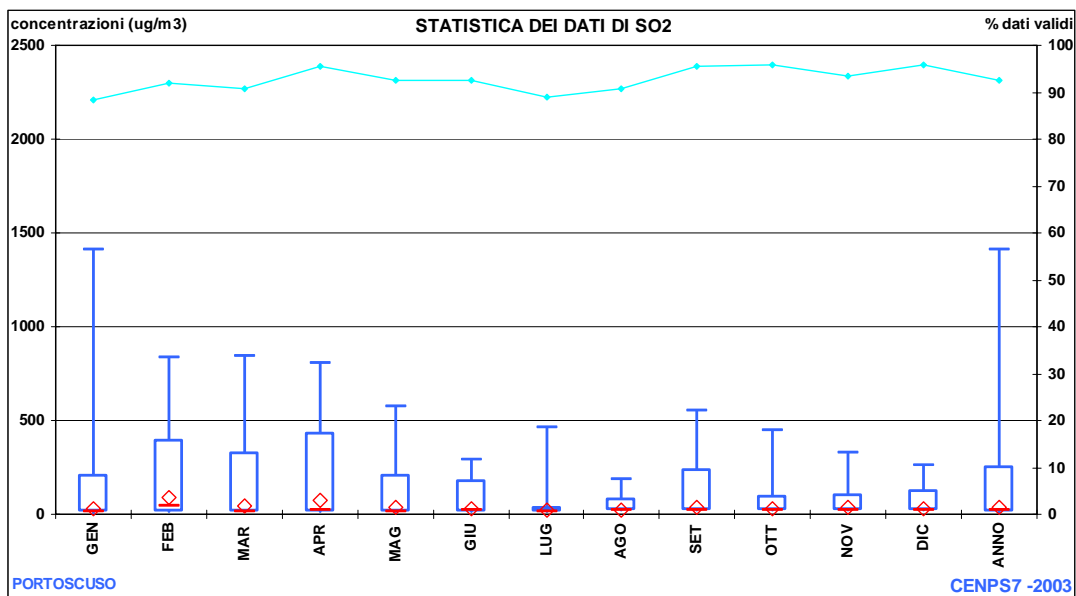


Figura 6 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS7 (2003)

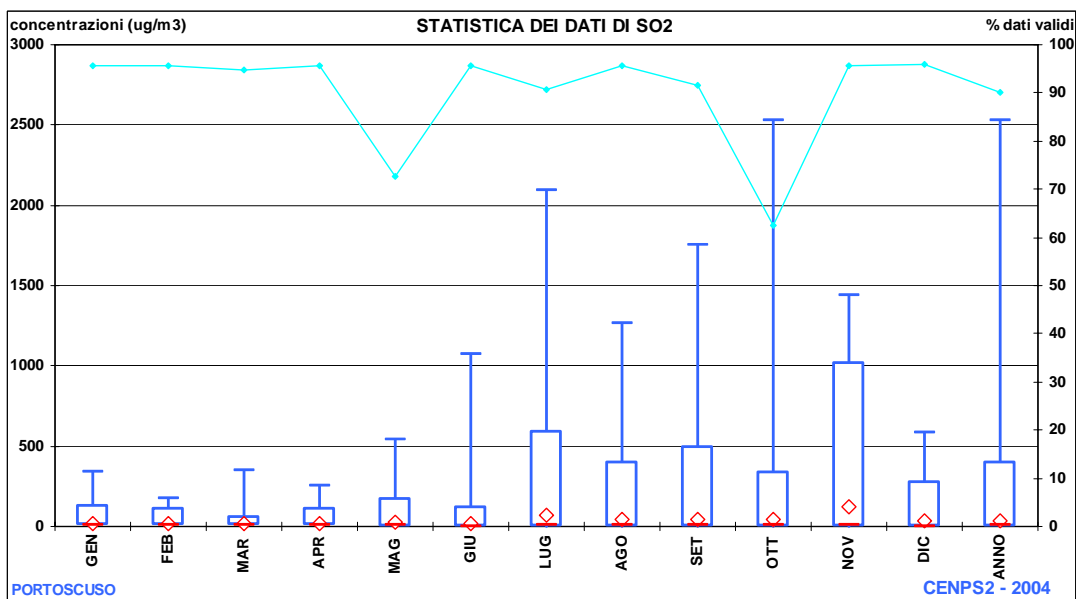


Figura 7 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS2 (2004)

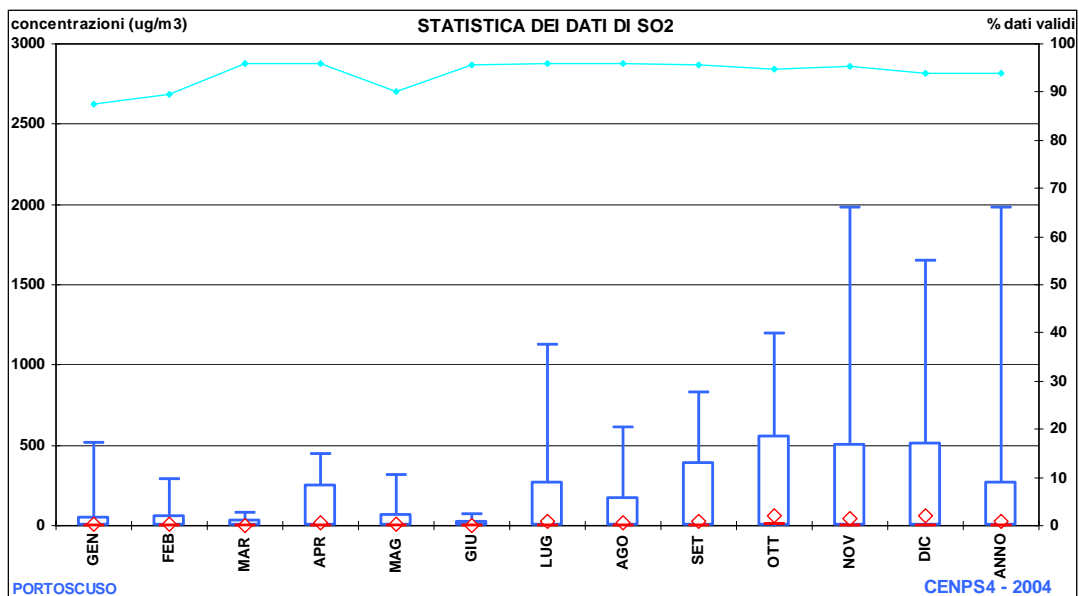


Figura 8 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS4 (2004)

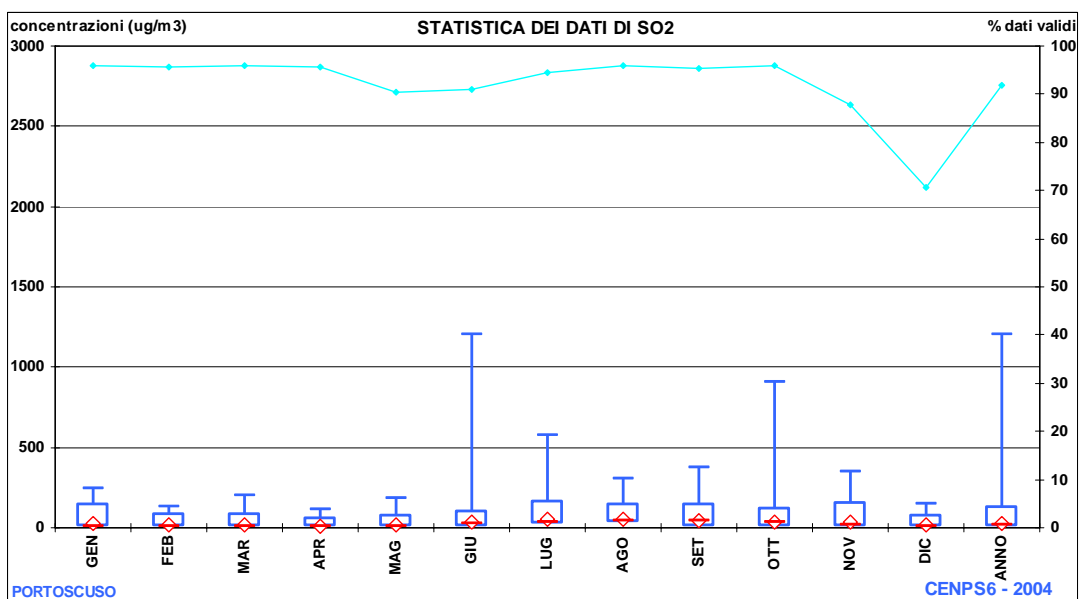
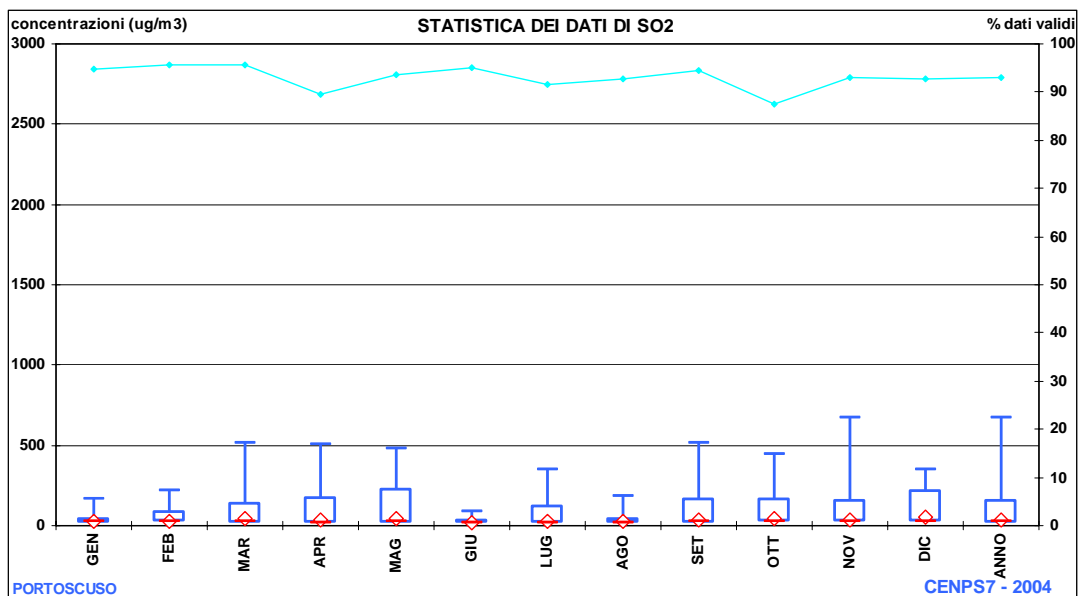


Figura 9 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS6 (2004)



**Figura 10 – Andamento mensile dei dati di SO2 per la stazione CENPS7 (2004)**

Come si può notare dagli andamenti, soprattutto da quelli della stazione CENPS2, vi è stato un brusco calo dei livelli nel periodo che va approssimativamente dal Settembre 2003 fino al Giugno 2004. Questa situazione è dovuta alla fermata progressiva di alcuni impianti presenti nella zona; alla ripresa delle attività i livelli hanno ripreso a salire. Questo comprova, ancora una volta, che l'inquinamento da SO2 nell'area di Portoscuso è quasi esclusivamente di origine industriale.

### 3 CONDIZIONI METEOCLIMATICHE

I dati meteorologici analizzati ed elaborati per la caratterizzazione dello strato limite planetario nella zona industriale di Portovesme sono stati misurati dalla stazione di monitoraggio CENPS2, gestita dalla provincia di Cagliari, nel periodo che va da gennaio 2001 a settembre 2004.

Le variabili misurate e le relative unità di misura sono:

- Direzione di provenienza del vento (gradi da Nord),
- Velocità del vento (m/s),
- Temperatura (°C),
- Pressione (mb),
- Pioggia (mm),
- Umidità relativa (%),
- Radiazione solare incidente (W/m<sup>2</sup>)

Le misure meteorologiche sopra elencate non completano l'insieme di variabili necessarie per l'applicazione di modelli di simulazione a scopo di regolamentazione quale il modello ISC3 (US-EPA, 1995a; US-EPA, 1995b) dell'Environmental Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti.

Le misure non forniscono infatti direttamente i valori dell'altezza di rimescolamento e della classe di stabilità atmosferica. Tali variabili sono quindi da derivare a partire dalle misure disponibili, come indicato nei paragrafi seguenti.

#### 3.1 QUALITÀ DEI DATI METEOROLOGICI

La qualità dei dati meteorologici misurati dalla centralina CENPS2 è illustrata in Tabella 5 per ogni variabile. Le abbreviazioni per le variabili meteorologiche indicano rispettivamente: velocità del vento (VV), direzione del vento (DV), temperatura atmosferica (TEMP), umidità relativa (UMR), precipitazione (PIO), pressione atmosferica (PRES) e radiazione solare incidente (RADS). La colonna "Ore mancanti" indica il numero di ore mancanti per la variabile e l'anno di interesse, la colonna "Ore totali" indica il numero di ore che dovrebbero essere teoricamente presenti se tutti i dati fossero validi, mentre la colonna "% Mancanti" indica la percentuale di ore mancanti per la variabile e per l'anno. Le 12 colonne successive contengono il numero di ore mancanti per la variabile e per ogni mese dell'anno.

**Regione Autonoma della Sardegna - Assessorato della Difesa dell'Ambiente**

| Anno | Variabile | Ore mancanti | Ore totali | % Mancanti | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|------|-----------|--------------|------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2001 | VV        | 7736         | 8760       | 88.3       | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 678 | 324 | 182 |
| 2001 | DV        | 7783         | 8760       | 88.8       | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 678 | 371 | 182 |
| 2001 | TEMP      | 7622         | 8760       | 87.0       | 744 | 672 | 744 | 720 | 700 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 272 | 98  |
| 2001 | UMR       | 6979         | 8760       | 79.7       | 744 | 672 | 744 | 450 | 566 | 720 | 744 | 744 | 720 | 612 | 166 | 97  |
| 2001 | PIO       | 5298         | 8760       | 60.5       | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 333 | 14  | 27  | 208 | 361 | 11  |
| 2001 | PRES      | 3669         | 8760       | 41.9       | 744 | 672 | 744 | 450 | 553 | 231 | 60  | 14  | 27  | 77  | 88  | 9   |
| 2001 | RADS      | 5086         | 8760       | 58.1       | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 333 | 14  | 126 | 153 | 108 | 8   |
| 2002 | VV        | 3121         | 8760       | 35.6       | 256 | 135 | 380 | 335 | 189 | 217 | 544 | 523 | 90  | 147 | 199 | 106 |
| 2002 | DV        | 3115         | 8760       | 35.6       | 256 | 135 | 379 | 309 | 189 | 217 | 544 | 544 | 90  | 147 | 199 | 106 |
| 2002 | TEMP      | 183          | 8760       | 2.1        | 4   | 0   | 34  | 16  | 3   | 1   | 39  | 5   | 30  | 25  | 26  | 0   |
| 2002 | UMR       | 183          | 8760       | 2.1        | 4   | 0   | 34  | 16  | 3   | 1   | 39  | 5   | 30  | 25  | 26  | 0   |
| 2002 | PIO       | 1164         | 8760       | 13.3       | 4   | 0   | 34  | 15  | 3   | 24  | 193 | 183 | 166 | 200 | 178 | 164 |
| 2002 | PRES      | 183          | 8760       | 2.1        | 4   | 0   | 34  | 16  | 3   | 1   | 39  | 5   | 30  | 25  | 26  | 0   |
| 2002 | RADS      | 183          | 8760       | 2.1        | 4   | 0   | 34  | 16  | 3   | 1   | 39  | 5   | 30  | 25  | 26  | 0   |
| 2003 | VV        | 1383         | 8760       | 15.8       | 100 | 102 | 79  | 144 | 141 | 121 | 141 | 139 | 82  | 174 | 121 | 39  |
| 2003 | DV        | 1383         | 8760       | 15.8       | 100 | 102 | 79  | 144 | 141 | 121 | 141 | 139 | 82  | 174 | 121 | 39  |
| 2003 | TEMP      | 233          | 8760       | 2.7        | 5   | 4   | 0   | 35  | 36  | 0   | 46  | 10  | 0   | 51  | 0   | 46  |
| 2003 | UMR       | 188          | 8760       | 2.1        | 5   | 4   | 0   | 35  | 36  | 0   | 46  | 10  | 0   | 51  | 0   | 1   |
| 2003 | PIO       | 2340         | 8760       | 26.7       | 158 | 177 | 199 | 237 | 230 | 200 | 231 | 225 | 185 | 217 | 106 | 175 |
| 2003 | PRES      | 210          | 8760       | 2.4        | 5   | 4   | 0   | 35  | 36  | 0   | 46  | 10  | 22  | 51  | 0   | 1   |
| 2003 | RADS      | 488          | 8760       | 5.6        | 5   | 4   | 0   | 35  | 36  | 0   | 46  | 10  | 28  | 323 | 0   | 1   |
| 2004 | VV        | 134          | 6576       | 2.0        | 1   | 1   | 8   | 0   | 59  | 2   | 33  | 1   | 29  | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | DV        | 134          | 6576       | 2.0        | 1   | 1   | 8   | 0   | 59  | 2   | 33  | 1   | 29  | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | TEMP      | 188          | 6576       | 2.9        | 45  | 1   | 7   | 0   | 70  | 0   | 33  | 1   | 31  | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | UMR       | 331          | 6576       | 5.0        | 198 | 1   | 7   | 0   | 60  | 0   | 33  | 1   | 31  | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | PIO       | 1375         | 6576       | 20.9       | 151 | 166 | 170 | 174 | 264 | 167 | 150 | 20  | 113 | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | PRES      | 134          | 6576       | 2.0        | 1   | 1   | 7   | 0   | 60  | 0   | 33  | 1   | 31  | ND  | ND  | ND  |
| 2004 | RADS      | 134          | 6576       | 2.0        | 1   | 1   | 7   | 0   | 60  | 0   | 33  | 1   | 31  | ND  | ND  | ND  |

**Tabella 5 - Qualità dei dati meteorologici misurati**



La tabella mostra che l'anno 2001 è quasi interamente inutilizzabile poiché tutte le variabili sono caratterizzate da elevate percentuali di dati mancanti in ogni mese. Per tale motivo l'anno 2001 non verrà utilizzato per le simulazioni.

### 3.2 CLASSI DI STABILITÀ

Le classi di stabilità atmosferica sono state calcolate con la tabella di Pasquill Gifford (e.g. Zannetti, 1990; Seinfeld and Pandis, 1998) che richiede la conoscenza della velocità del vento, della radiazione solare incidente durante le ore diurne, e della copertura nuvolosa durante le ore notturne (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Una modifica a tale tabella è stata recentemente proposta (Mohan and Siddiqui, 1998); essa consiste nell'attribuire classe neutra (D) alle ore di transizione giorno-notte e notte-giorno. Nel presente lavoro è stata utilizzata la definizione originale delle classi di stabilità riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Tuttavia le indicazioni di Mohan e Siddiqui (1998) sono state utilizzate al fine di definire le classi di stabilità nelle ore notturne per velocità del vento inferiore a 2 m/s, non contemplata nella tabella di Pasquill Gifford. A tali situazioni è stata attribuita la classe F.

| Velocità del<br>vento (m/s)<br>a 10 m | Ore diurne                                      |           |       | Ore notturne       |       |
|---------------------------------------|---|-----------|-------|--------------------|-------|
|                                       | Radiazione solare incidente (W/m <sup>2</sup> ) |           |       | Copertura nuvolosa |       |
|                                       | 700   | 350 - 700 | < 350 | ≥ 4/8              | ≤ 3/8 |
| < 2                                   | A   | A-B       | B     | -                  | -     |
| 2 - 3                                 | A-B   | B         | C     | E                  | F     |
| 3 - 5                                 | B   | B-C       | C     | D                  | E     |
| 5 - 6                                 | C   | C-D       | D     | D                  | D     |
| > 6                                   | C   | D         | D     | D                  | D     |

**Tabella 6 - Tabella per la determinazione delle classi di Pasquill-Gifford (Fonte: Seinfeld and Pandis, 1998)**

Nelle ore notturne, a parte i casi in cui la velocità del vento supera i 5 m/s che sono sempre associati a classe D, è necessario conoscere la copertura nuvolosa. Tale variabile non è misurata ed è stata stimata utilizzando la relazione empirica di Bristow and Campbell (1984):

$$FC = \exp\left[-0.003 (T_{\max} - T_{\min})^{2.4}\right]$$

dove  $T_{\min}$  e  $T_{\max}$  sono rispettivamente la temperatura minima e massima giornaliera, e FC è la frazione di cielo coperto dalle nubi in media durante l'intero giorno. La copertura nuvolosa media giornaliera è stata utilizzata per ogni ora al fine del calcolo della classe di stabilità.

### 3.3 ALTEZZA DELLO STRATO LIMITE

Una rassegna esaustiva sui metodi di calcolo dell'altezza dello strato limite è stata recentemente condotta da Siebert et al. (2000). Nei casi stabile e neutro le formule più attendibili sono quelle diagnostiche che forniscono l'altezza del PBL in funzione della turbolenza meccanica e/o convettiva. Nel caso convettivo il processo di crescita del PBL è non stazionario e le formule prognostiche sono da preferirsi a quelle diagnostiche. La scala temporale per la variazione dell'altezza del PBL è molto più breve rispetto a quella dei casi stabile e neutro.

#### 3.3.1 CASI STABILE E NEUTRO

Per calcolare l'altezza del PBL nei casi stabile e neutro è stata adottata la formula di Zilitinkevich (1989). Nel caso neutro (classe D) l'altezza del PBL dipende solamente dalla turbolenza meccanica ( $u_*$ ), mentre nel caso stabile essa è funzione anche della turbolenza convettiva che, assieme alla turbolenza meccanica, è contenuta nella formulazione della lunghezza di Monin Obukhov. La formula di Zilitinkevich (1989) è la seguente:

$$h = \frac{u_*}{f} \left( \frac{1}{\Lambda_0} + \frac{\sqrt{\mu}}{k C_h} \right)^{-1}$$

dove  $\Lambda_0 = 0.3$ , e  $C_h = 0.85$ , mentre  $\mu$  è dato da:

$$\mu = \frac{k u_*}{f L}$$

con  $k = 0.4$  (costante di von Karman),  $f$  parametro di Coriolis (1/s),  $u_*$  velocità di frizione (m/s) e  $L$  lunghezza di Monin Obukhov (m).

### 3.3.2 CASO INSTABILE

Nel caso instabile l'altezza del PBL è stata calcolata con il metodo prognostico descritto da Batcharova e Gryning (1991). Tale metodo considera l'effetto *spin-up*, cioè il fatto che aria proveniente dalla libera troposfera che entra nel *mixing layer* per *entrainment* deve aggiustare il suo livello energetico a quello medio del PBL. Questo effetto assume particolare importanza per (Fisher et al., 1998):

- condizioni prossime alla neutralità (presenza di flusso convettivo di bassa entità dalla superficie verso l'atmosfera),
- piccoli valori dell'altezza del PBL (tipicamente nella transizione notte → giorno).

L'equazione utilizzata è quindi la seguente:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \langle w'\Theta' \rangle_0 \left[ \frac{\gamma_{\Theta} h^2}{(1+2A)h - 2kBL} + \frac{c_T u_*^2}{\beta(1+A)h - kBL} \right]^{-1}$$

dove  $\gamma_{\Theta}$  gradiente di temperatura nello strato sopra il PBL (K/m),  $\beta$  parametro di galleggiamento ( $m/(K s^2)$ ),  $A = 0.2$ ,  $B = 2.5$ ,  $c_T = 8$ . Il flusso turbolento di calore al suolo ( $\langle w'\Theta' \rangle_0$ ) si ottiene invertendo l'espressione della lunghezza di Monin Obukhov una volta nota la velocità di frizione:

$$L = -\frac{u_*^3}{k\beta \langle w'\Theta' \rangle_0}$$

### 3.4 VELOCITÀ DI FRIZIONE

Il bilancio energetico, necessario per ottenere la lunghezza di Monin Obukhov, viene calcolato come indicato in Bellasio et al. (1994).

Note la lunghezza di Monin Obukhov  $L$ , la rugosità  $z_0$ , la velocità del vento  $u$  e l'altezza dell'anemometro  $z$ , si ottiene la velocità di frizione  $u_*$  invertendo la formula seguente:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m \left( \frac{z}{L} \right) \right)$$

dove  $k$  è la costante di von Karman ( $k=0.4$ ). La funzione universale è data da (e.g. Zannetti, 1990):

$$\Psi_m = \begin{cases} -5 \frac{z}{L} & L > 0 \\ 0 & \frac{1}{L} = 0 \\ \ln \left( \frac{1+x^2}{2} \left( \frac{1+x}{2} \right)^2 \right) - 2 \operatorname{arctg}(x) + \frac{\pi}{2} & L < 0 \end{cases}$$

dove  $x = (1 - 16 z/L)^{0.25}$ .

### 3.5 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

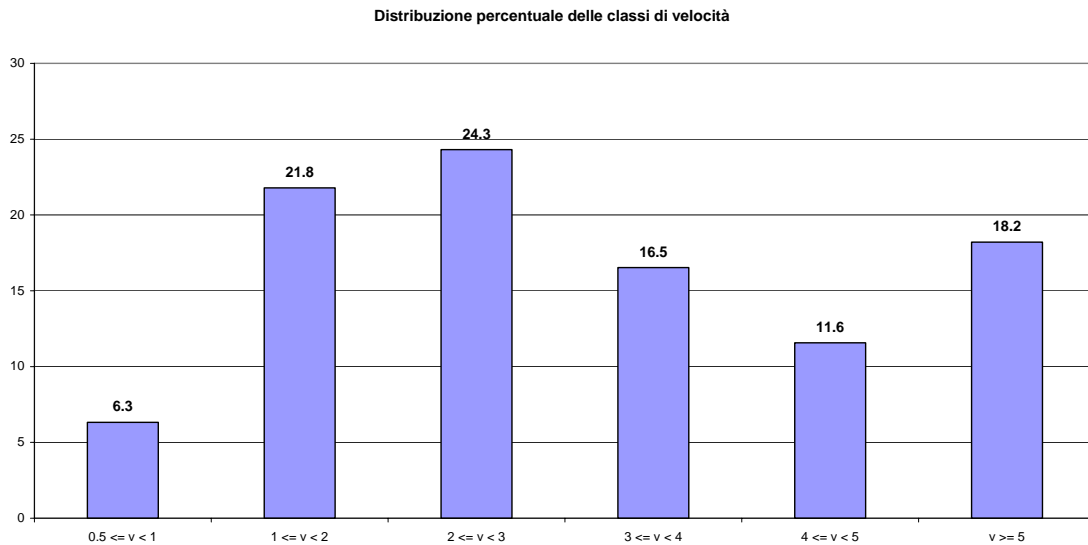
Per la caratterizzazione anemologica del sito è stato considerato un anno di dati. Il periodo selezionato è quello caratterizzato dalla maggior validità dei dati, e va da ottobre 2003 a settembre 2004. Si osserva che questo periodo non coincide con quello selezionato per la simulazione, che comprende tutti i dati ricevuti fatta eccezione per l'anno 2001.

Il periodo temporale individuato per l'analisi è composto da 8784 dati orari. I record in cui direzione ed eventualmente velocità del vento sono validi sono 8316 (94.7%). Le calme di vento (intese come le ore in cui la velocità è inferiore a 0.5 m/s) costituiscono l'1.2% delle ore valide.

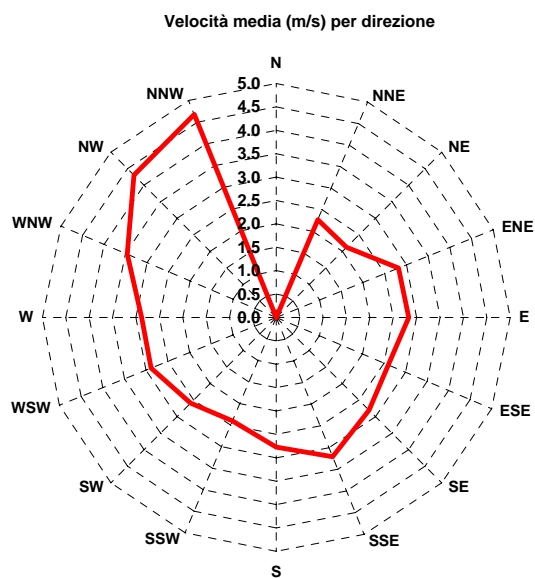
La distribuzione delle classi di velocità del vento, indipendentemente dalla direzione, è riportata in Figura 11. Le condizioni di vento debole (inferiore a 1 m/s) sono poco frequenti, anche a causa della posizione del sito in esame. Quasi il 50% delle ore di dati è caratterizzata da velocità superiori a 3 m/s.

La Figura 12 illustra la distribuzione della velocità media del vento per direzione di provenienza. I venti di intensità media maggiore (superiori a 4.5 m/s) provengono da NNW. Anche i venti da NW sono in media superiori a 4 m/s. Stranamente non ci sono mai venti provenienti da Nord.

Come si può vedere dalla rosa dei venti riportata in Figura 13, la direzione più frequente di provenienza è NW, con oltre il 27% degli eventi. Anche la direzione NE è molto frequente, con quasi il 15% degli eventi.



**Figura 11 - Distribuzione delle classi di velocità del vento nel periodo di analisi (sono escluse le calme, 1.2% dei dati validi)**



**Figura 12 - Distribuzione della velocità media del vento per direzione di provenienza nel periodo di analisi**

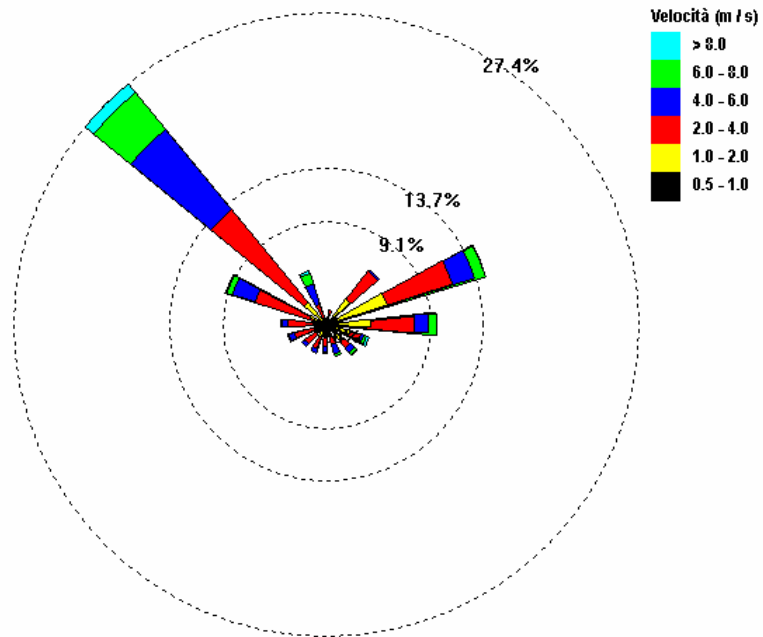


Figura 13 - Rosa dei venti sull'intero periodo di analisi (sono escluse le calme, 1.2% dei dati validi).

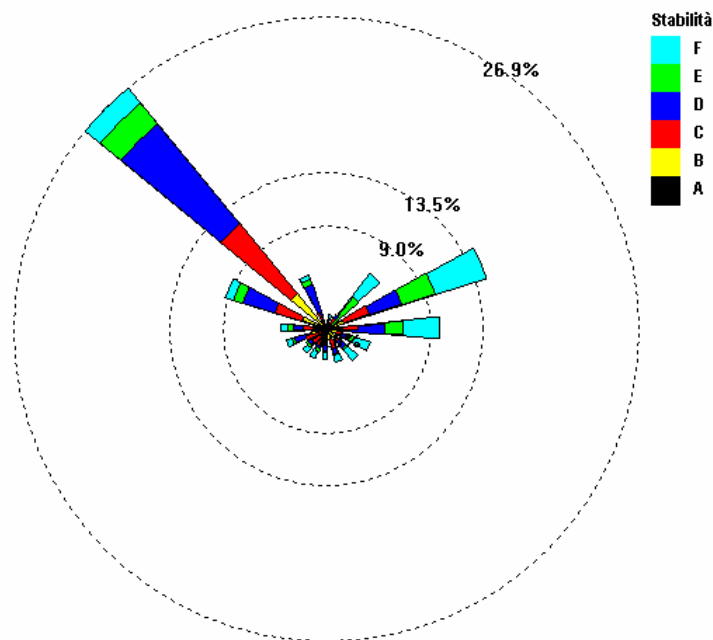


Figura 14 - Distribuzione delle classi di stabilità atmosferica per direzione di provenienza del vento nel periodo di analisi

La precedente Figura 14 mostra la distribuzione delle classi di stabilità atmosferica in funzione della direzione di provenienza del vento. La classe di stabilità meno frequente è la A, con una presenza poco superiore all'1%, mentre le più frequenti risultano essere le classi D e C, con circa il 28% e il 21% di presenze rispettivamente.

La Figura 15 illustra la distribuzione delle classi di stabilità per direzione di provenienza del vento nelle ore diurne e notturne. Le ore diurne e le ore notturne sono state determinate per ciascun giorno mediante un algoritmo che calcola l'altezza del sole sopra l'orizzonte. Nelle ore diurne prevale la classe di stabilità C, mentre nelle ore notturne prevale la classe D. Sia nelle ore notturne che in quelle diurne la direzione prevalente del vento è NW; nelle ore notturne però si registrano anche molti eventi da ENE. Inoltre, mentre il vento che arriva dal mare (NW) ha velocità elevate e dà origine prevalentemente a stabilità di classe D, il vento che arriva dal suolo è meno intenso e dà origine prevalentemente a classi di stabilità E ed F.

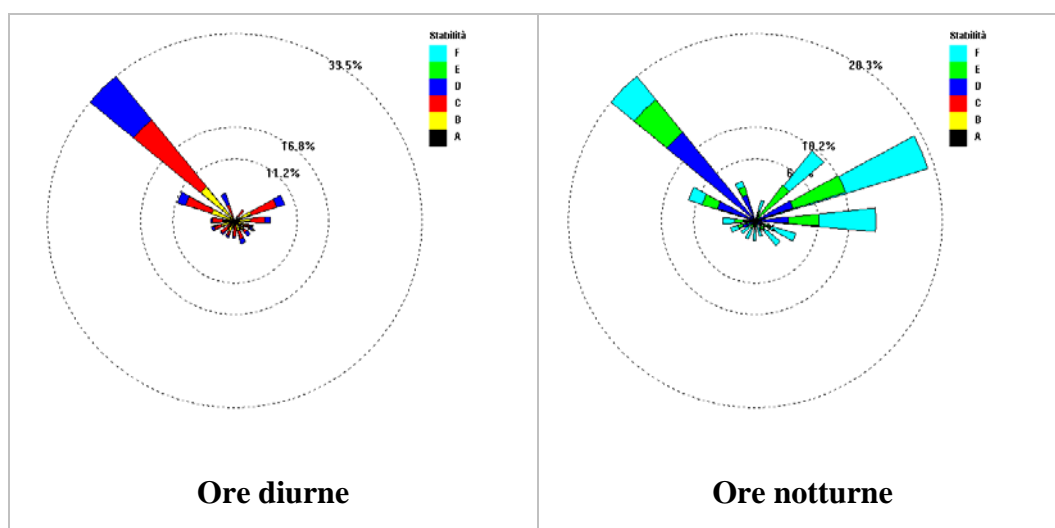
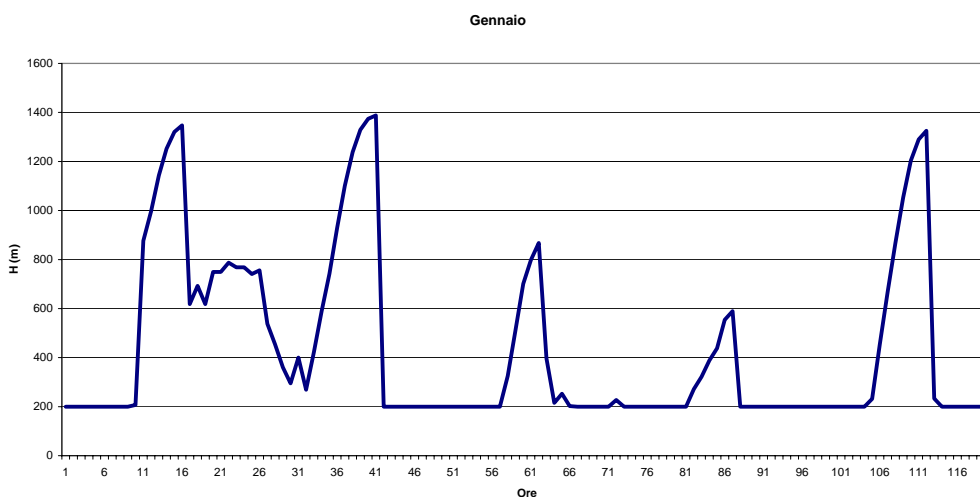


Figura 15 - Rose delle classi di stabilità per il giorno e per la notte

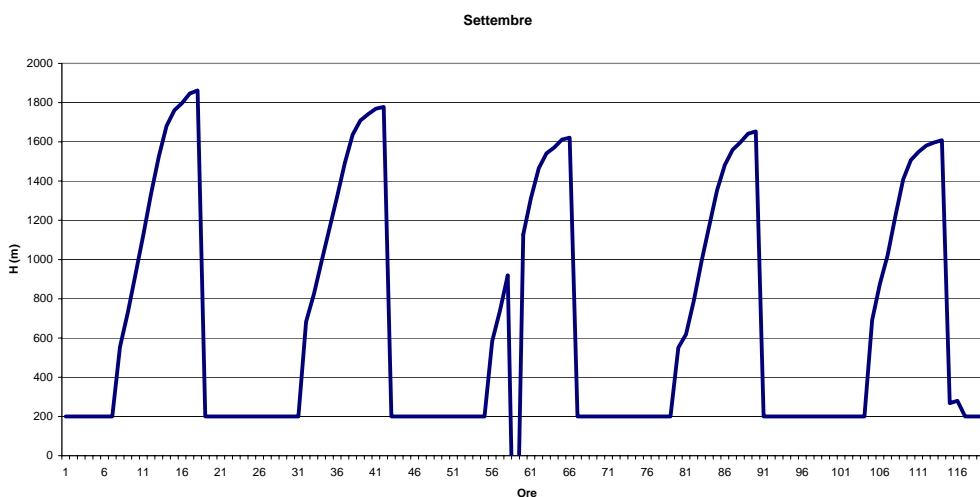
### 3.6 CAPACITÀ DISPERSIVA

La capacità dispersiva dell'atmosfera è determinata da diversi fattori, tra cui la stabilità atmosferica già discussa nel paragrafo precedente, e l'altezza dello strato di rimescolamento calcolata come descritto in un paragrafo precedente. La Figura 16 mostra, a titolo esemplificativo, l'andamento dello strato limite atmosferico durante alcuni giorni del mese di gennaio, mentre la Figura 17 mostra la stessa variabile nel mese di settembre. Nel mese di

settembre l'andamento dell'altezza di rimescolamento è abbastanza regolare poiché è dovuto principalmente alla turbolenza di origine convettiva indotta dalla radiazione solare. La forma un po' più irregolare del mese di gennaio è invece dovuta alla turbolenza di origine meccanica, cioè indotta dal vento.



**Figura 16 - Altezza dello strato limite atmosferico in alcuni giorni del mese di gennaio**



**Figura 17 - Altezza dello strato limite atmosferico in alcuni giorni del mese di settembre**



## 4 IL MODELLO DI DISPERSIONE ISC3

ISC3 (US-EPA, 1995a; US-EPA, 1995b) è un modello per la simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti primari, cioè sostanze che non vengono formate da reazioni chimiche in atmosfera (come ad esempio l'ozono) ma vengono esclusivamente emesse dalle sorgenti. ISC3 è un modello gaussiano stazionario che può essere utilizzato per valutare la concentrazione atmosferica di inquinanti emessi da diverse tipologie di sorgenti appartenenti ad un complesso industriale. Esso appartiene alla lista dei modelli preferiti dell'ente per la protezione dell'ambiente americano (US-EPA). La US-EPA include nella lista dei modelli preferiti quelli che essa ha constatato oggettivamente fornire dei risultati migliori rispetto agli altri. Tali modelli possono successivamente essere utilizzati a scopi di regolamentazione senza dover fornire ulteriori prove sulla loro attendibilità.

ISC3 è basato sull'equazione del pennacchio gaussiano stazionario. Questa equazione assume che la concentrazione ad una distanza fissata dalla sorgente puntuale di emissione abbia un profilo gaussiano la cui ampiezza è funzione della distanza stessa dalla sorgente e delle caratteristiche di turbolenza dell'atmosfera. La concentrazione massima raggiunta alle diverse distanze è direttamente proporzionale al rateo di emissione ed inversamente proporzionale alla velocità media del vento ed ai parametri di dispersione nelle direzioni orizzontali e verticali (comunemente chiamati deviazioni standard o sigma di dispersione). Le deviazioni standard dipendono a loro volta dalla distanza dalla sorgente e dalle caratteristiche di turbolenza atmosferica.

Il termine *stazionario* indica che non vi è la dipendenza della concentrazione dal tempo. Nell'approccio gaussiano le variabili meteorologiche, vento e turbolenza, devono poter essere considerate omogenee e stazionarie su tutto il dominio di simulazione; inoltre, data la proporzionalità inversa con la velocità media del vento, questa non può assumere valori prossimi allo zero (calma di vento).

Per quanto detto la soluzione gaussiana, così come implementata originariamente, descrive tanto meglio la realtà quanto più vengono soddisfatte le seguenti condizioni:

- la sorgente è puntiforme;

- l'emissione è continua e con rateo costante, ed è cominciata precedentemente all'inizio della simulazione, ad un tempo sufficientemente lungo da poter considerare che il sistema abbia raggiunto la stazionarietà;
- lo strato limite planetario è infinito;
- la velocità media del vento non è bassa (è superiore a 1 m/s).

Tuttavia la semplicità dell'approccio gaussiano, la sua relativa facilità d'uso dovuta anche all'utilizzo di variabili meteorologiche facilmente misurabili e, soprattutto l'adozione di questa metodologia da parte della US-EPA come strumento per pianificare provvedimenti di limitazione delle emissioni (Zannetti, 1990), hanno stimolato i ricercatori in campo ambientale a rimuovere alcune delle limitazioni originariamente presenti in esso.

Le soluzioni adottate sono per la maggior parte di natura prettamente matematica o semi empirica. Grazie a queste soluzioni ISC3 permette di considerare non solo il contributo di sorgenti puntuali, ma anche di sorgenti areali e volumetriche, descritte integrando il contributo di sorgenti puntuali disposte in posizioni opportune. Inoltre, ad esempio, esso permette di calcolare la concentrazione di inquinante a valle di un edificio attraverso opportune correzioni ai coefficienti di dispersione atmosferica che tengono conto dell'incremento alla turbolenza di origine meccanica indotto dall'interazione tra il campo di vento e l'edificio stesso.

Altri fenomeni che il modello ISC3 può simulare sono l'innalzamento dei pennacchi (*plume rise*) soggetti al fenomeno della *buoyancy* (pennacchi caldi o con velocità iniziale verticale non nulla), lo *stack-tip downwash* (fenomeno di interazione tra campo di vento e camino), l'eventuale decadimento esponenziale della sostanza emessa (per esempio dovuto a reazioni chimiche del primo ordine), e la deposizione secca.

Tra i principali input di cui il modello ISC3 necessita vi sono:

- definizione delle sorgenti: posizione, ratei di emissione, temperatura di emissione, velocità di emissione, caratteristiche fisiche (altezza dei camini e loro diametro)
- definizione della meteorologia: velocità e direzione del vento, classi di stabilità atmosferica, altezza dello strato limite atmosferico, ecc.
- definizione dei parametri di controllo della simulazione: quali variabili produrre in output (concentrazioni, deposizioni), quali parametri di dispersione utilizzare (urbani, rurali), informazioni per un eventuale decadimento esponenziale, ecc.

- definizione dei recettori: posizioni in cui le variabili d'uscita devono essere calcolate.

Il modello ISC3 può essere utilizzato sia in versione *short term* (ISC3-ST) per determinare gli effetti di episodi acuti di inquinamento di durata breve, che in versione *long term* (ISC3-LT), anche detta climatologica, per determinare i valori di concentrazione su periodi lunghi (mesi, stagioni, anni). In questo caso l'input meteorologico è raggruppato in frequenze congiunte di accadimento per particolari classi di velocità del vento, direzione del vento e classe di stabilità nel periodo considerato. Questi riepiloghi, chiamati STAR, possono includere frequenze su base mensile, stagionale o annuale in funzione delle concentrazioni medie che si vogliono calcolare. In questo caso ciascuna concentrazione calcolata con l'equazione gaussiana di base è pesata sulla frequenza di accadimento della corrispondente situazione meteorologica al fine di ottenere la concentrazione media finale.

## 5 STIMA DEGLI IMPATTI

Per valutare gli impatti nel periodo sotto esame, sono state prese in considerazione tutte le sorgenti emissive di SO<sub>2</sub> dei principali stabilimenti industriali presenti nell'area di studio, cioè:

- Alcoa Italia S.p.A.
- ENEL Centrale Termoelettrica Portoscuso
- ENEL Centrale Termoelettrica Sulcis
- Eurallumina S.p.A.
- Industrie Laminazione Alluminio S.p.A.

I ratei di emissione utilizzati per le sorgenti sono quelli dichiarati dalle aziende.

Il modello di simulazione ISC3 in modalità Short Term (Versione 02035 del febbraio 2002) è stato utilizzato con le seguenti opzioni:

- non è stata calcolata la deposizione secca;
- non è stata calcolata la deposizione umida;
- sono stati utilizzati parametri di dispersione urbana;
- non è stato considerato il building downwash (1);
- è stato considerato lo stack tip downwash (2);
- è stata considerata la buoyancy induced dispersion (3);
- non è stato considerato il gradual plume rise (4);
- si è ipotizzato terreno piatto.

*(1) Il termine building downwash indica l'interazione tra la piuma emessa da un camino e gli edifici circostanti. Questa interazione provoca sempre un aumento di concentrazione al suolo in prossimità del punto di emissione.*

*(2) Il termine stack tip downwash indica l'interazione tra la piuma emessa e il camino. Quando la velocità di emissione dei fumi è bassa relativamente alla velocità del vento (cioè inferiore a 1.5 volte la velocità del vento), le emissioni possono risentire dell'effetto di scia che si genera sottovento al camino per effetto della sua stessa presenza, e quindi risentire di una spinta verso il basso. Questo effetto, a parità di velocità di emissione e di velocità*

del vento, aumenta all'aumentare del diametro del camino, cioè del suo ingombro fisico. L'effetto finale di questo fenomeno è di provocare una diminuzione dell'altezza di rilascio. Quando la velocità di emissione è molto maggiore della velocità del vento questo fenomeno non si manifesta.

(3) Il termine *buoyancy induced dispersion* indica la dispersione aggiuntiva, oltre a quella di origine atmosferica, indotta dal galleggiamento termico della piuma.

(4) Il termine *gradual plume rise* indica l'opzione che permette di determinare la quota del pennacchio prima che esso raggiunga la sua quota di equilibrio. L'applicazione di questa opzione di simulazione è importante quando si attendono impatti non distante dal punto di emissione a causa di terreno relativamente complesso.

Si osserva che, anche se è stata ipotizzata orografia semplice (terreno piatto), per i recettori di interesse, cioè le quattro stazioni di monitoraggio, sono state utilizzate le loro reali quote. Le posizioni delle stazioni di monitoraggio sono state già illustrate in Figura 1. Si può notare che la stazione CENPS2 è la più prossima alle sorgenti e, inoltre, è sottovento alle sorgenti più a nord per la maggior parte del tempo (si veda la rosa dei venti riportata in Figura 13).

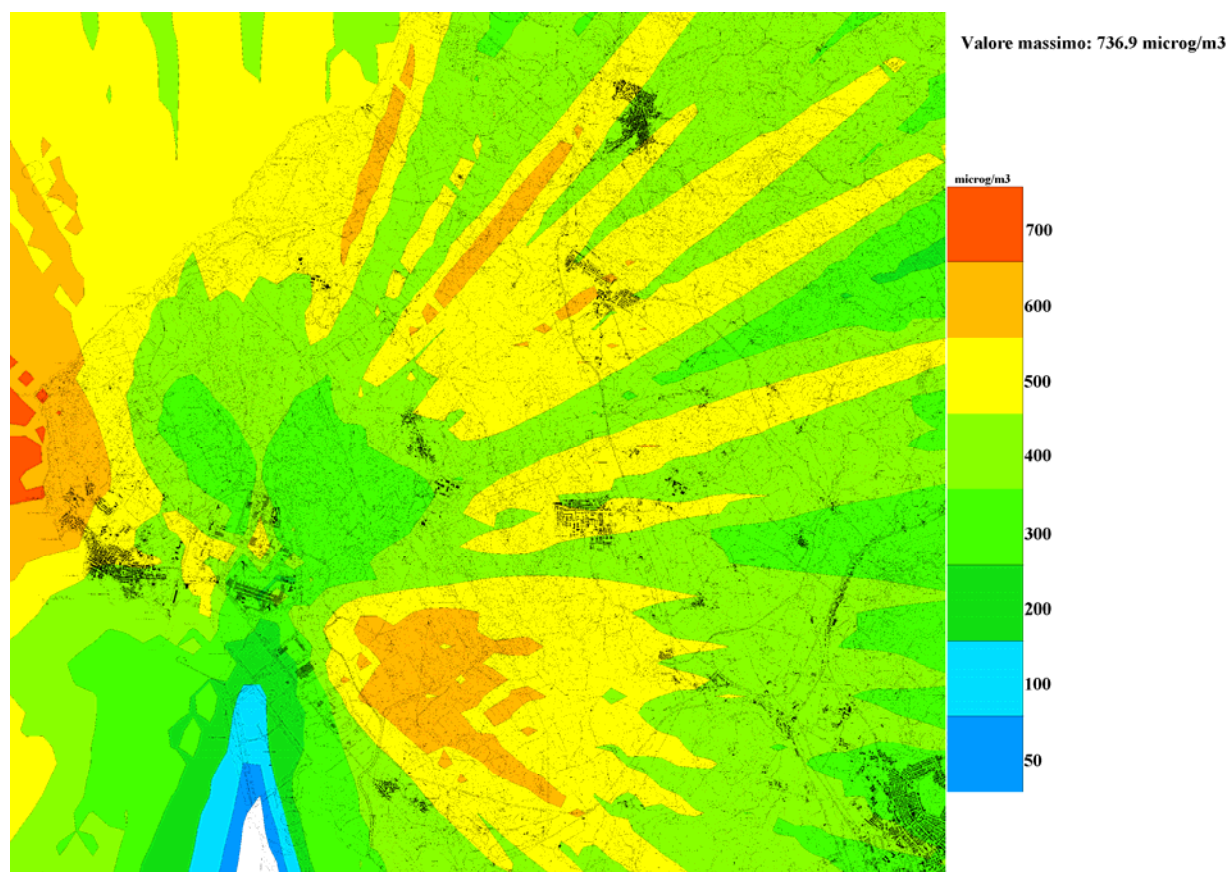
Le simulazioni sono state condotte utilizzando i dati meteorologici relativi al periodo che va dal gennaio 2002 al settembre 2004, corrispondenti a 24096 record orari.

La seguente Tabella 7 riporta le concentrazioni massime predette dal modello per ogni singolo stabilimento e le relative posizioni.

| <b>Stabilimento</b>                     | <b>C max<br/>(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>X (m)</b>   | <b>Y (m)</b>   |
|---|--|----------------|----------------|
| Portovesme srl                          | 215.8  | 1449000        | 4341000        |
| Alcoa Italia S.p.A.                     | 610.3  | 1448750        | 4340000        |
| ENEL Centrale Termoelettrica Portoscuso | 295.4  | 1453750        | 4342750        |
| ENEL Centrale Termoelettrica Sulcis     | 18.5   | 1448750        | 4340250        |
| Eurallumina S.p.A.                      | 237.8  | 1450000        | 4342250        |
| Industrie Laminazione Alluminio S.p.A.  | 292.2  | 1449500        | 4338500        |
| <b>Tutte</b>                            | <b>736.9</b>   | <b>1445000</b> | <b>4341000</b> |

**Tabella 7 - Concentrazioni massime predette e loro posizioni per le diverse sorgenti**

La Figura 18 mostra le concentrazioni massime orarie che vengono predette dal modello durante l'intero periodo di simulazione, considerando le emissioni di SO<sub>2</sub> di tutte le sorgenti presenti nell'area di studio. Il valore massimo assoluto predetto dal modello sul dominio di simulazione è pari a 736.9 µg/m<sup>3</sup> e viene registrato in mare, a ovest del centro abitato di Portoscuso.



**Figura 18 - Mappa delle concentrazioni massime orarie predette dal modello durante l'intero periodo di simulazione**

La Tabella 8 riporta i valori massimi di concentrazione predetti dal modello in corrispondenza alle posizioni delle stazioni di monitoraggio; vengono riportati i contributi complessivi di ogni singolo stabilimento. La concentrazione predetta in corrispondenza alla stazione CENPS2 è pari a circa 428 µg/m<sup>3</sup>; anche considerando tutti gli stabilimenti della zona essa è quindi notevolmente inferiore ai valori misurati dalla stazione di monitoraggio. L'ultima riga riporta invece le massime concentrazioni orarie registrate dalle stazioni.

| <b>Stabilimento</b>                     | <b>CENPS2</b> | <b>CENPS4</b> | <b>CENPS6</b> | <b>CENPS7</b> |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Portovesme srl                          | 140           | 127           | 86            | 111           |
| Alcoa Italia S.p.A.                     | 428           | 472           | 269           | 454           |
| ENEL Centrale Termoelettrica Portoscuso | 160           | 136           | 170           | 179           |
| ENEL Centrale Termoelettrica Sulcis     | 17            | 17            | 13            | 15            |
| Eurallumina S.p.A.                      | 138           | 213           | 119           | 181           |
| Industrie Laminazione Alluminio S.p.A.  | 86            | 48            | 53            | 50            |
| <b>Tutte</b>                            | <b>428</b>    | <b>500</b>    | <b>489</b>    | <b>465</b>    |
| <b>Registrati</b>                       | <b>2097</b>   | <b>1555</b>   | <b>1202</b>   | <b>1126</b>   |

**Tabella 8 - Concentrazioni massime predette nelle stazioni di misura per le diverse sorgenti**

Come si può vedere le concentrazioni previste risultano inferiori da circa 2.5 volte a circa 5 volte a quelle realmente registrate dalle stazioni di misura. Questo significa che moltiplicando i ratei emissivi di tutte le sorgenti per 2.5 si potrebbero riprodurre i massimi registrati nelle stazioni CENPS6 e CENPS7; per ottenere quelli registrati presso la stazione CENPS2 si dovrebbe moltiplicarli di circa 5 volte.

## 6 CONCLUSIONI

Si osserva che le stazioni di monitoraggio rilevano valori di concentrazione massima molto elevati, in particolare, in alcuni episodi, la stazione CENPS2 ha rilevato valori superiori ai 1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pur avendo in mente i limiti di ogni modello di dispersione, che non è in grado di riprodurre al 100% la realtà, i valori misurati non sembrano giustificati dai livelli emissivi. Inoltre, anche quando viene valutato l'impatto d'area considerando tutte le sorgenti di  $\text{SO}_2$  nella zona di studio, le concentrazioni massime predette in corrispondenza alle posizioni delle stazioni di monitoraggio non raggiungono i 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Gli elevati valori di concentrazione misurati dalle stazioni di monitoraggio possono essere ragionevolmente attribuibili ad eventi anomali particolari, quali ad esempio dei fermo impianto o il cattivo funzionamento di impianti di abbattimento. In alcuni casi l'effetto di questi eventi potrebbe essere amplificato dalla concomitanza di condizioni meteorologiche sfavorevoli.

In effetti, confrontando le concentrazioni registrate nel periodo Giugno 2003 – Agosto 2004 con le informazioni relative ai regimi di funzionamento dei maggiori stabilimenti della zona, è stato possibile determinare che i maggiori picchi di concentrazione si registrano in fase di riavvio di impianto; è stato anche possibile appurare che un periodo piuttosto prolungato di valori inferiori ai 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in tutte le stazioni, confrontabili quindi con quelli previsti dal modello, corrisponde al fermo di alcuni impianti dell'area. Questo, pur non dimostrando con certezza assoluta le responsabilità di singoli stabilimenti o impianti alla compromissione della qualità dell'aria nella zona, corrobora le conclusioni ottenute con i modelli: con ragionevole grado di sicurezza si può affermare che solo condizioni emissive particolari, differenti da quelle autorizzate, eventualmente agevolate da situazioni meteorologiche sfavorevoli, possono determinare le concentrazioni misurate al suolo dalle stazioni fisse.

Allo scopo di diminuire i casi di superamento del valore limite di  $\text{SO}_2$  è pertanto opportuno regolamentare le emergenze che possono avvenire in ogni impianto. Questo significa sia limitare il loro numero, sia definire un limite di concentrazione nei fumi nelle emissioni di emergenza, così come avviene per la marcia normale degli impianti. E' auspicabile un nuovo studio di impatto d'area relativo ai soli scenari di emergenza; a questo proposito i gestori degli impianti dovrebbero fornire tutti i dati necessari per la caratterizzazione delle emissioni di emergenza,



cioè le portate, le temperature in uscita e le concentrazioni nei fumi e, non ultimo, i punti di emissione nel caso in cui questi non coincidano con quelli della marcia normale.

In merito alle condizioni meteorologiche si sottolinea l'anomalia nella forma della rosa dei venti riportata nel paragrafo di caratterizzazione anemologica del sito. I venti da Nord risultano infatti sempre assenti; non si esclude che la situazione sia realmente questa, ma sembra più probabile che l'anemometro sia difettoso oppure che sia posizionato in maniera scorretta e che per questo risulti schermato rispetto ai venti da Nord.