

**CONVENZIONE N. 479 DEL 27/9/2016**

**TRA**

***ARPA Sicilia e DIING dell'Università degli Studi di Palermo***

# **RISULTATO DELLE ATTIVITÀ**

## **RESPONSABILI DELLA CONVENZIONE**

### **ARPA Sicilia**

*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente*

**Dir. Dott.ssa Anna Abita**

*Direttore UOC ST2 Monitoraggi Ambientali*

### **DI**

*Dipartimento di Ingegneria*

**Prof.ssa Mariarosa Giardina**

*Assistant Professor  
Università di Palermo*

## **COLLABORATORI**

**Ing. Giuseppe Madonia, PhD**

*Responsabile pr. Modellistica ARPA Sicilia*

**Ing. Pietro Buffa, PhD**

*Titolare borsa di studio*

Premessa.....	3
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Classificazione del territorio della regione Sicilia e descrizione della rete di monitoraggio ARPA.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Fuzzy logic e operazioni sugli insiemi Fuzzy.....</b>	<b>7</b>
3.1 Costruzione del sistema di regole Fuzzy .....	9
<b>4. Modello Fuzzy per la valutazione degli indici IPA e IPM e calcolo dell'indice IAATO .....</b>	<b>12</b>
4.1 Fuzzification dell'Indice di Pressione Meteorologica (IPM).....	12
4.2 Fuzzification dell'Indice di Pressione Antropica (IPA).....	15
4.3 Procedura di calcolo dell'Indicatore di Complessità Orografica (ICO).....	18
4.4 Costruzione delle regole Fuzzy utilizzate per il calcolo degli indici IPA e IPM .....	20
4.5 Algoritmo di calcolo e analisi dei risultati ottenuti.....	22
<b>5. Descrizione dei principali risultati ottenuti.....</b>	<b>28</b>
5.1 Zona IT1911, Agglomerato di Palermo .....	32
5.2 Zona IT1912, Agglomerato di Catania .....	34
5.3 Zona IT1913 Agglomerato di Messina .....	35
5.4 Zona IT1914, Aree Industriali.....	35
Zona A.....	36
Zona B .....	36
Zona C .....	37
Zona D.....	38
Zona E .....	39
Zona F .....	40
Zona G.....	41
5.5 Zona IT1915.....	42
<b>6. Lavoro di validazione dei risultati .....</b>	<b>44</b>
<b>7. Conclusioni.....</b>	<b>46</b>
Bibliografia.....	49
<b>APPENDICE A – Listato R-Cran per il calcolo dell'indice IPM .....</b>	<b>50</b>
<b>APPENDICE B – Listato R-Cran per il calcolo dell'indice IPA .....</b>	<b>72</b>
<b>APPENDICE C – Listato R-Cran per il calcolo dell'indice ICO .....</b>	<b>104</b>
<b>APPENDICE D – Listato R-Cran per il calcolo dell'Indice IAATO .....</b>	<b>108</b>

## **Premessa**

Nell'ambito della convenzione stipulata nel 2016 (D.D.G. n. 479 del 27/09/2016) tra l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, ARPA Sicilia, e l'ex Dipartimento dell'Energia, Ingegneria dell'Informazione, modelli Matematici (DEIM), confluito nell'attuale Dipartimento di Ingegneria (DI) dell'Università degli Studi di Palermo, sono state condotte attività di ricerca per qualificare, all'interno dell'assetto di rete di monitoraggio previsto nel "Progetto di razionalizzazione del monitoraggio della qualità dell'aria in Sicilia e relativo programma di valutazione (PdV)" ai sensi dell'art.5, comma 6, del D.L. 13 agosto 2010, n.155, i sottogruppi delle stazioni di misura utili per il supporto modellistico (e.g. codici per la valutazione del trasporto e dispersione degli inquinanti in atmosfera), nonché per lo scambio di dati tra Stati membri, così come previsto con decisione della Commissione Europea 97/101/CE del 27 gennaio 1997 (Exchange of Information – EoI).

Il presente studio consente di predisporre un documento integrativo al "Progetto di razionalizzazione del monitoraggio della qualità dell'aria in Sicilia", che individua la catena modellistica da applicare a valutazioni areali della qualità dell'aria sul territorio regionale a valle dei dati di monitoraggio.

## **1. Introduzione**

Le attività di ricerca condotte nell'ambito della borsa di studio hanno comportato lo sviluppo di strumenti di calcolo capaci di individuare, sul territorio siciliano, aree geografiche con analogie dal punto di vista delle pressioni ambientali concatenate a sorgenti antropiche e naturali di tipo puntuale, lineare e areale.

In particolare, sono stati definiti i seguenti nuovi indici ambientali, basati sulla logica FUZZY:

- IPA (Indice di Pressione Antropica), che permette di analizzare relazioni tra le caratteristiche orografiche del territorio e le emissioni di inquinanti, tratte dall'inventario delle emissioni 2012 di ARPA Sicilia;
- IPM (Indice di Pressione Meteorologica), che consente d'indagare affinità connesse ai campi di vento tridimensionali, in celle confinanti del dominio di calcolo;
- IAATO (Indice di Affinità Ambientale del Territorio), che, in qualità di indice composito di IPA e IPM, permette di rilevare analogie ambientali tra aree limitrofe per il territorio di interesse.

Gli obiettivi raggiunti sono i seguenti:

- definizione di zone territoriali che hanno elevate analogie rispetto alle pressioni ambientali connesse a sorgenti di inquinanti puntuali, lineari e areali di origine antropica e naturale;
- disponibilità di nuovi strumenti di calcolo volti a qualificare gruppi di stazioni di misura di riferimento per gli studi modellistici.

Per quanto riguarda l'ultimo obiettivo, sono stati determinati i sottogruppi dell'insieme delle stazioni, individuate nel programma di valutazione (PdV) definito con Decreto Assessoriale (D.A.) 97/GAB del 25/06/2012, che possono essere considerati punti di riferimento negli studi modellistici (e.g. uso di codici per la valutazione del trasporto e dispersione degli inquinanti in atmosfera) e per lo scambio reciproco di dati provenienti dalle reti di misura degli Stati membri, così come previsto con decisione della Commissione Europea 97/101/CE del 27 gennaio 1997 (Exchange of Information – EoI).

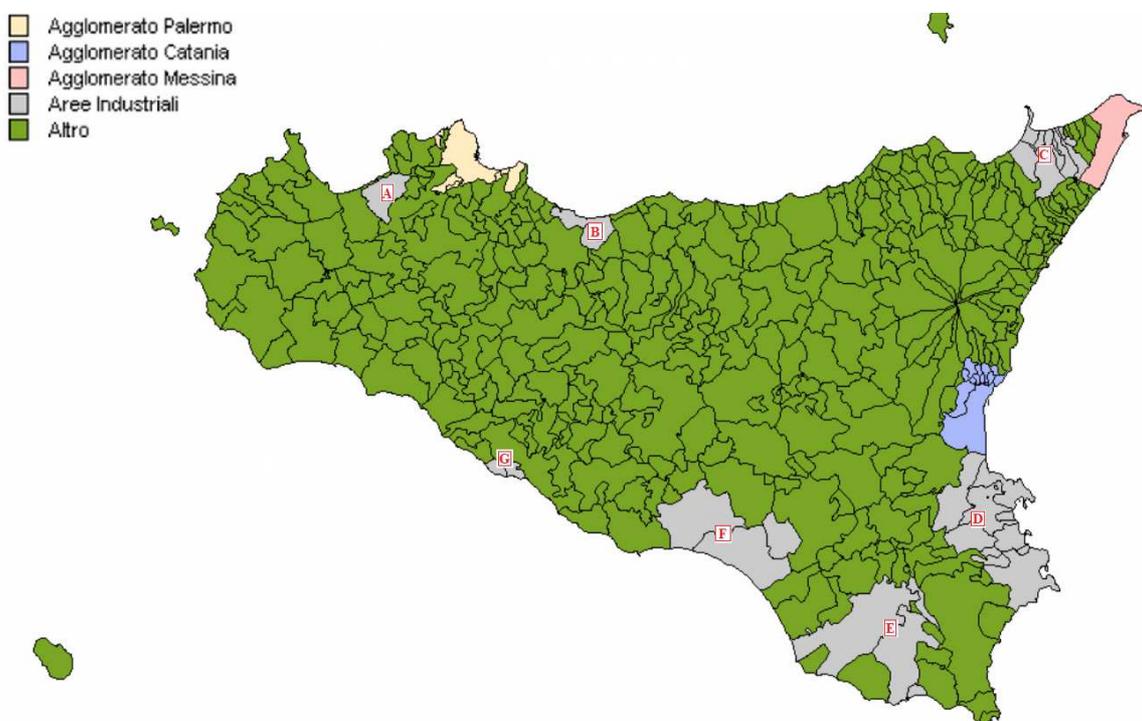
## **2. Classificazione del territorio della regione Sicilia e descrizione della rete di monitoraggio ARPA**

La Regione Siciliana, con D.A. 97/GAB del 25/06/2012, ha approvato la zonizzazione regionale, individuando cinque zone di riferimento sulla base delle caratteristiche orografiche, meteorologiche, del grado di urbanizzazione, nonché degli elementi conoscitivi acquisiti con il monitoraggio e la redazione dell'inventario regionale delle emissioni in aria relativo per l'anno 2005.

Il territorio viene suddiviso in 3 Agglomerati, un'Area industriale, che include 7 aree non contigue, e la zona "Altro", come descritto di seguito:

- **IT1911**, agglomerato di Palermo: include il territorio del Comune di Palermo e dei Comuni limitrofi, in continuità territoriale con Palermo;
- **IT1912**, agglomerato di Catania: include il territorio del Comune di Catania e dei Comuni limitrofi, in continuità territoriale con Catania;
- **IT1913**, agglomerato di Messina: include il Comune di Messina;
- **IT1914**, aree Industriali: include i Comuni sul cui territorio insistono le principali aree industriali ed i Comuni che la modellistica di dispersione degli inquinanti atmosferici ha individuato essere oggetto di ricaduta delle emissioni delle aree industriali;
- **IT1915**, Altro; include l'area del territorio regionale non inclusa nelle zone precedenti.

La Fig. 1 mostra, sulla mappa dei confini amministrativi comunali, le aree appartenenti alla zonizzazione descritta in precedenza.



*Fig. 1. Zonizzazione e classificazione del territorio della Regione Siciliana*

La Tab. 1 riporta la numerazione identificativa, il nome, le coordinate e la zonizzazione di appartenenza delle stazioni di misura previste nel PdV (ARPA, 2018) per il monitoraggio delle concentrazioni in aria ambiente degli inquinanti previsti dal D.Lgs. 155/2010.

Le stazioni saranno utilizzate anche per il monitoraggio degli inquinanti SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>, esaminati in questo studio.

**Tab.1.** Numerazione e descrizione delle stazioni di misura previste nel PdV per il monitoraggio delle concentrazioni in aria ambiente di SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>

ID	Denominazione	Prov.	Longitudine	Latitudine	Zonizzazione
1	Bagheria	PA	13.504103	38.086111	IT1911
2	PA - Belgio	PA	13.33156	38.15170	IT1911
3	PA - Boccadifalco	PA	13.30218	38.12054	IT1911
4	PA - Indipendenza	PA	13.35025	38.11103	IT1911
5	PA - Castelnuovo	PA	13.35421	38.12438	IT1911
6	PA - Di Blasi	PA	13.32930	38.12166	IT1911
7	PA - UNIPA	PA	13.346530	38.105096	IT1911
8	CT - Garibaldi	CT	15.075233	37.511594	IT1912
9	CT - Veneto	CT	15.097211	37.515808	IT1912
10	CT - Gioieni	CT	15.081122	37.529257	IT1912
11	San Giovanni La Punta	CT	15.10117	37.57861	IT1912
12	Misterbianco	CT	15.01083	37.51575	IT1912
13	ME - Bocchetta	ME	15.55294	38.19826	IT1913
14	ME - Villa Dante	ME	15.54652	38.17434	IT1913
15	Porto Empedocle	AG	13.53233	37.29174	IT1914
16	Gela - Ex autoparco comunale	CL	14.297144	37.055867	IT1914
17	Gela tribunale	CL	14.261254	37.065105	IT1914
18	Gela - Agip Mineraria	CL	14.28358	37.06271	IT1914
19	Gela - Biviere	CL	14.344965	37.022486	IT1914
20	Gela - Capo Soprano	CL	14.22395	37.07567	IT1914
21	Gela - Venezia	CL	14.253618	37.070349	IT1914
22	Niscemi	CL	14.39070	37.14735	IT1914
23	Barcellona P. G.	ME	15.231209	38.160290	IT1914
24	Pace del Mela	ME	15.310064	38.205556	IT1914
25	Milazzo - Termica	ME	15.249112	38.190608	IT1914
26	Milazzo A2A -	ME	15.247567	38.231469	IT1914
27	Pace del Mela A2A -	ME	15.301496	38.183005	IT1914
28	S. Filippo del Mela A2A - S. Filippo del Mela	ME	15.271443	38.174624	IT1914
29	S. Lucia del Mela	ME	15.275031	38.160495	IT1914
30	Partinico	PA	13.11867	38.05018	IT1914
31	Termini Imerese	PA	13.68793	37.97790	IT1914
32	RG - Campo d'atletica	RG	14.73402	36.91711	IT1914

33	RG - Villa Archimede	RG	14.71444	36.92636	IT1914
34	Pozzallo	RG	14.838648	36.729474	IT1914
35	Augusta	SR	15.220500	37.218400	IT1914
36	SR - Belvedere	SR	15.208712	37.085751	IT1914
37	Melilli	SR	15.12888	37.18238	IT1914
38	Priolo	SR	15.19100	37.15620	IT1914
39	SR - Via Gela	SR	15.262506	37.098447	IT1914
40	SR – Asp Pizzuta	SR	15.27050	37.07920	IT1914
41	SR - Verga	SR	15.285297	37.091295	IT1914
42	SR – Pantheon	SR	15.285331	37.067768	IT1914
43	SR - Teracati	SR	15.278581	37.075831	IT1914
44	Solarino	SR	15.13211	37.09670	IT1914
45	AG - Centro	AG	13.589904	37.306413	IT1915
46	AG - Monserrato	AG	13.551601	37.299240	IT1915
47	AG - ASP	AG	13.60006	37.30370	IT1915
48	Lampedusa	AG	12.59589	35.50394	IT1915
49	Caltanissetta	CL	14.051110	37.489848	IT1915
50	Enna	EN	14.28197	37.56468	IT1915
51	Trapani	TP	12.54689	38.01236	IT1915
52	Cesarò Femmina Morta	ME	14.662009	37.924522	IT1915
53	TP - Diga Rubino	TP	12.72257	37.88085	IT1915

### 3. Fuzzy logic e operazioni sugli insiemi Fuzzy

La “fuzzy logic” e gli insiemi Fuzzy sono stati introdotti da Zadeh per affrontare problemi caratterizzati da fenomeni imprecisi e vaghi, o per modellare esperienze definite da espressioni linguistiche (Zadeh,1975;1992).

La teoria degli insiemi di tipo classico (aristotelico) si basa su una logica bivalente in cui un numero, oppure un oggetto, è un membro di un insieme, oppure no (l’enunciato “l’oggetto appartiene all’insieme” può assumere il valore vero, oppure falso).

Al contrario, la logica Fuzzy attribuisce all’oggetto un grado di verità di appartenenza all’insieme che può assumere un valore compreso tra 0 ed 1, estremi 0 ed 1 compresi. Quindi, l’insiemistica basata sull’approccio classico diventa un sottoinsieme dell’insiemistica Fuzzy e la teoria Fuzzy estende la logica tradizionale a due valori (vero e falso, oppure 0 e 1) ad un "continuo di sfumature" di verità.

Definito con  $X$  un set di numeri, o oggetti (set Fuzzy), chiamato universo del discorso, i cui elementi sono indicati da  $x$ ; un sottoinsieme Fuzzy  $A$  in  $X$  è caratterizzato da una funzione di appartenenza  $\mu_A(x)$  che associa ciascun elemento  $x$  in  $X$  ad un numero reale, nell'intervallo  $[0,1]$ .

La funzione  $\mu_A(x)$  rappresenta il grado di appartenenza di  $x$  nel set Fuzzy  $A$ .

Gli insiemi Fuzzy più comunemente usati sono caratterizzati da funzioni di appartenenza di tipo triangolare o trapezoidale:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ \frac{x-x_3}{x_2-x_3} & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{funzione di appartenenza triangolare} \quad (1)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ \frac{x-x_4}{x_3-x_4} & x_3 \leq x \leq x_4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{funzione di appartenenza trapezoidale} \quad (2)$$

Per la distribuzione triangolare,  $x_2$  restituisce il valore massimo di  $\mu_A(x)$ , i.e.  $\mu_A(x_2)=1$ , rendendo questo il valore più plausibile, mentre  $x_1$  e  $x_3$  sono i limiti inferiore e superiore dell'intervallo di variazione dei dati in oggetto (valori meno plausibili).

Per la distribuzione trapezoidale, i valori più plausibili di  $\mu_A(x)$  cadono nell'intervallo  $[x_2; x_3]$ , mentre  $x_1$  e  $x_4$  sono i limiti inferiore e superiore dell'intervallo di variazione dei dati in oggetto.

Per brevità, i numeri Fuzzy triangolari e trapezoidali sono indicati come  $(x_1, x_2, x_3)$  e  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ , rispettivamente.

Sugli insiemi Fuzzy è possibile applicare tutte le operazioni fondamentali degli insiemi classici quali unione, intersezione e negazione. Tali operazioni vengono effettuate mediante l'utilizzo delle seguenti funzioni (Hanss, 2005):

- per l'unione si applica la funzione s-norm, che può essere implementata con l'uso del massimo;
- per l'intersezione si applica la funzione t-norm, che può essere implementata con l'uso del minimo;
- per la negazione si applica la funzione  $\mu(x) = 1 - x$ .

Zadeh (1975) suggerisce l'uso dell'operatore minimo per l'intersezione e dell'operatore massimo per l'unione, come descritto di seguito.

Se consideriamo con A e B due insiemi Fuzzy dello stesso universo X, l'intersezione e l'unione sono valutati utilizzando le seguenti relazioni (Hong & Leeb, 1996):

$$A \cap B \equiv \{ \langle x, \mu_{A \cap B}(x) \rangle | x \in X \text{ e } \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \} \quad (3)$$

$$A \cup B \equiv \{ \langle x, \mu_{A \cup B}(x) \rangle | x \in X \text{ e } \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \} \quad (4)$$

La combinazione di questi due operatori viene generalmente utilizzata per la costruzione delle regole *fuzzy if-then* (operazione di inferenza Fuzzy) come descritto nella sezione seguente.

### 3.1 Costruzione del sistema di regole Fuzzy

Come è noto, l'uso più importante della teoria degli insiemi Fuzzy è costituito dalla definizione di sistemi di regole applicabili con successo ad una vasta gamma di problemi in cui sono presenti incertezze ed imprecisioni in modi differenti (Pedrycz, 1996; Zimmermann, 2001). Spesso non si ragiona con calcoli e numeri, ma con pensieri logici, espressioni linguistiche e incertezza non-probabilistica (intrinseca al fenomeno, non al suo verificarsi). In questo ambito, i modelli Fuzzy, che sono robusti (tolleranti al rumore), consentono di gestire informazioni incerte attraverso regole logiche multivalenti.

Un tale strumento, quindi, può essere utile in settori quali la modellistica ambientale che spesso comporta l'elaborazione di indici e l'analisi di un numero significativo di dati oggetto di imprecisione.

In generale, la costruzione del sistema di regole Fuzzy è caratterizzata dai seguenti principali steps (Fig. 2):

- Procedura di *fuzzification*;
- Costruzione del processo di inferenza Fuzzy (Fuzzy Inference System, FIS);
- Procedura di *defuzzification*.

Il primo step è volto a trasformare il valore reale del dato in un set Fuzzy, attraverso la definizione di variabili linguistiche e, quindi, delle relative funzioni di appartenenza, come descritto nella sezione precedente.

Il processo, denominato FIS, è l'insieme delle regole costruite secondo la logica Fuzzy. Definiti i dati da studiare (ad esempio, temperatura, pressione,...), classificati secondo variabili linguistiche (temperatura alta, temperatura bassa, etc.) eventualmente modificate con *linguistical hedges*, quali negazioni o rafforzativi (per esempio, temperatura non molto alta), si costruisce il ragionamento con cui si trae una conseguenza partendo da una o più premesse (e.g. se la temperatura è molto alta è necessario incrementare al massimo la velocità della ventola di refrigerazione).

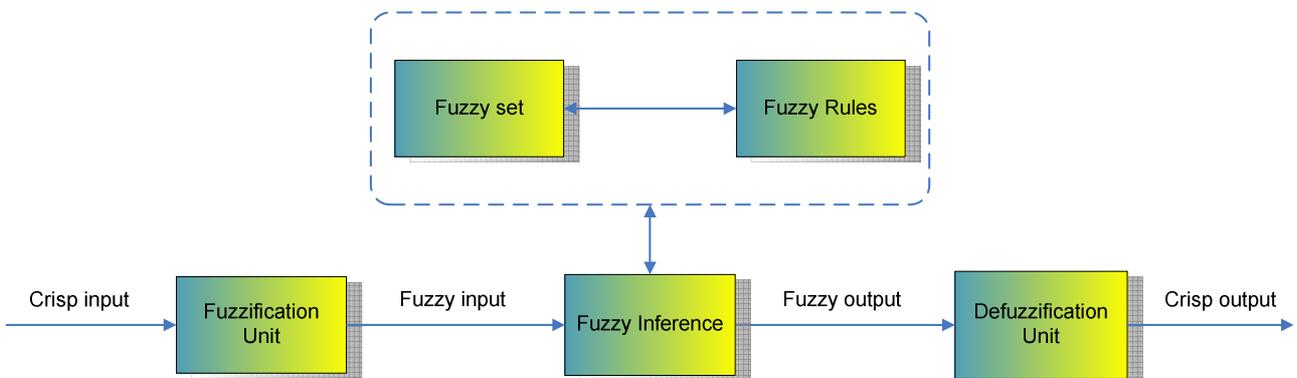
Quindi, l'inferenza Fuzzy è la regola del tipo *if-then* che interpreta il set Fuzzy di input e, sfruttando gli operatori quali l'unione e l'intersezione di Eq.s (3) e (4), assegna il set Fuzzy di output, mentre il sistema FIS è l'insieme delle regole che definiscono il modello di calcolo.

Se consideriamo un set di input Fuzzy definito nell'universo del discorso  $X$ , essendo  $X \subset R_n$ , ed un set di output Fuzzy definito nell'universo del discorso  $Y$ , essendo  $Y \subset R_m$ , le regole *Fuzzy if-then* possono essere determinate come segue:

$$\text{Regola } R_j: \text{If } \mathbf{x}_1 \text{ is } \mathbf{A}_{j1} \text{ and ... and } \mathbf{x}_n \text{ is } \mathbf{A}_{jn} \text{ then } \mathbf{y} \text{ is } \mathbf{B}_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (w_j) \quad (5)$$

dove  $A_{ij}$  e  $B_j$  sono le variabili linguistiche definite in  $X$  e  $Y$ , sopra citati come universo del discorso di input e di output.

La parte *if* della regola " $\mathbf{x}_n$  is  $\mathbf{A}_{jn}$ " è detta antecedente, o premessa, mentre la parte *then* della regola " $\mathbf{y}$  is  $\mathbf{B}_j$ " è chiamata conseguente.



**Fig.2.** Struttura di un tipico sistema Fuzzy.

Il parametro,  $w_j$ , in Eq. (5) denota il peso attribuito alla  $j$ -esima regola, rispetto alle altre regole del sistema FIS. Tale parametro, che varia nell'intervallo  $[0,1]$ , consente all'analista di attribuire un grado di importanza alle regole e spesso viene usato per descrivere l'incertezza della valutazione delle regole da parte dell'esperto.

Esistono diversi modelli per combinare le regole ed ottenere un unico insieme Fuzzy di output, tra questi, in letteratura, è molto utilizzato il metodo Min-Max (Zadeh,1992).

In Fig.3 viene mostrato un esempio di applicazione di inferenza Min-Max. In particolare, assegnati due valori di input  $x_1$  e  $x_2$  che attivano due delle regole del sistema FIS, il processo di inferenza inizia con la selezione del valore minimo tra  $\mu(x_1)$  e  $\mu(x_2)$  (i.e. intersezione) delle funzioni di appartenenza degli antecedenti  $A_{ij}$ . La funzione di appartenenza dell'output  $B$  è ottenuta dall'aggregazione (unione) degli insiemi Fuzzy conseguenti ( $B_j$ ), il cui grado di appartenenza viene ridotto al valore minimo dei gradi di appartenenza degli antecedenti (cut-off di  $B_j$  in Fig. 3).

Se l'Eq. (5) viene utilizzata con l'attribuzione di un peso ( $w_j$ ), la funzione di appartenenza del conseguente  $B_j$  viene modificata come segue:

$$\mu_j^*(x) = \max \{w_j \mu_j(x): j = 1, 2, \dots, m\} \quad (6)$$

In Fig. 3 il risultato del conseguente Fuzzy  $B_j$  senza peso viene rappresentato con area grigia, mentre il risultato del conseguente Fuzzy con l'attribuzione di un peso (i.e. uso dell'Eq. (6)), con area nera.

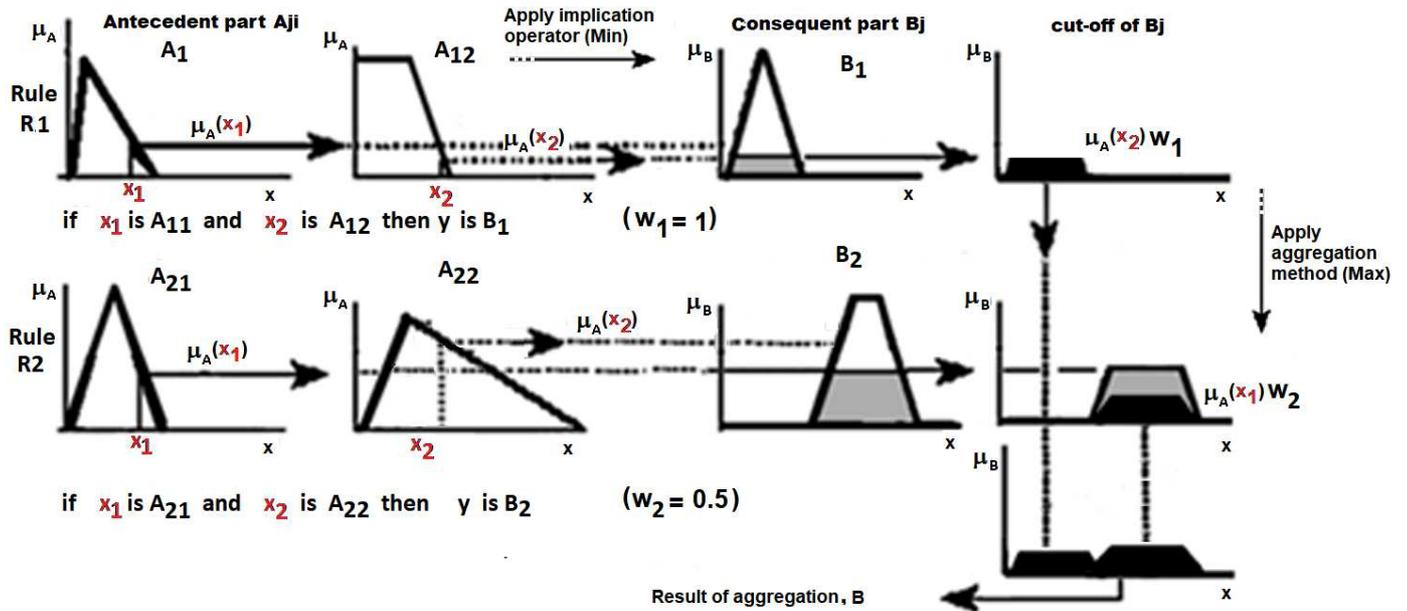


Fig. 3. Generico esempio di processo di inferenza basato sul metodo Min-Max

Il passo finale è il processo di *defuzzification*, che consente di trasformare il set Fuzzy di output (cioè il risultato dell'operazione di aggregazione Fuzzy) in un singolo valore reale (*crisp*).

Tra i metodi proposti in letteratura, il centro di gravità (Center Of Gravity, COG), calcolato per l'area unione dei conseguenti (B in Fig. 3), è ampiamente utilizzato per il suo semplice significato geometrico (Hellendoorn & Thomas, 1993; Ramli & Mohamad, 2009).

Il parametro COG viene calcolato, quindi, come segue:

$$\text{COG}^* = \frac{\int x \mu^*(x) dx}{\int \mu^*(x) dx} \quad (7)$$

dove la funzione di appartenenza  $\mu^*(x)$  è valutata con l'Eq. (6), se l'inferenza Fuzzy è costruita ricorrendo ai pesi  $w_j$ . Gli estremi di integrazioni saranno i valori di  $x$  minimo e massimo del risultato unione B (Fig. 3) nell'inferenza Fuzzy.

## 4. Modello Fuzzy per la valutazione degli indici IPA e IPM e calcolo dell'indice IAATO

Di seguito vengono descritte le procedure utilizzate per la definizione degli insiemi Fuzzy dei parametri impiegati per il calcolo degli indici IPA e IPM, la costruzione del modello Fuzzy e gli algoritmi messi a punto per l'applicazione dei modelli. I vari algoritmi sono stati scritti utilizzando il linguaggio di programmazione R-CRAN.

### 4.1 Fuzzification dell'Indice di Pressione Meteorologica (IPM)

L'indice IPM è stato sviluppato utilizzando le seguenti variabili:

- velocità del vento (WS) [m/s];
- frequenza del vento (WF), in percentuale [%].

La scala di Beaufort (Barua, 2005), riguardante le condizioni osservate delle velocità del vento in mare o sulla terra, è stata impiegata per definire le rappresentazioni linguistiche di WS. Tale scala è stata utilizzata anche per la distribuzione della frequenza del vento sulla base di cinque classi di frequenza e otto direzioni. Tale classificazione viene realizzata attraverso il postprocessore Meteseries (Scire et al., 2000), opportunamente modificato per elaborare le velocità del vento calcolate attraverso il codice Calmet.

Le classificazioni Fuzzy sono basate sulle distribuzioni linguistiche riportate nelle Tab.s 2 e 3 e rappresentate in forma grafica nelle Fig.s 4 e 5.

Gli output Fuzzy dell'indice IPM, riportati in Tab. 4 ed in Fig. 6, sono classificati tenendo presente le attribuzioni linguistiche delle due variabili WS e WF.

I dati di velocità e frequenza del vento, utilizzati per i calcoli su un dominio costituito da una griglia regionale e maglie (celle) di risoluzione 3x3 km, sono stati ottenuti effettuando simulazioni con il codice 3-D CALMET.

**Tabella 2.** Termini linguistici e Fuzzy sets di input relativi alla velocità del vento, WS, [m/s].

Linguistic value of WS parameter [m/s]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )*	Weight $W_{WS}$
Very Low (SVL)	(0; 1.5; 3.3)	1/5 = 0.2
Low (SL)	(1.5; 3.3; 6)	2/5 = 0.4
Medium (SM)	(3.3; 5.5; 7; 10)	3/5 = 0.6
High (SH)	(6; 9.5; 11; 14)	4/5 = 0.8
Very High (SVH)	(10; 14; 100;100)	1

\*I numeri Fuzzy triangolari e trapezoidali sono indicati come ( $x_1, x_2, x_3$ ) e ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ), rispettivamente

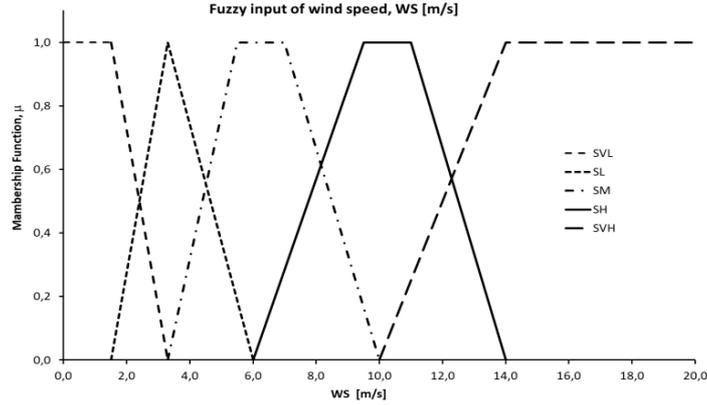


Fig. 4. Rappresentazione delle variabili linguistiche Fuzzy relative alla velocità del vento (WS).

Tabella 3. Termini linguistici e Fuzzy sets di input relativi alla frequenza del vento, WF, [%].

Linguistic value of WF parameter [%]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_{WF}$
Very Low (FVL)	(0; 0; 5; 10)	$1/5 = 0.2$
Low (FL)	(5; 10; 15)	$2/5 = 0.4$
Medium (FM)	(10; 15; 20)	$3/5 = 0.6$
High (FH)	(15; 20; 25)	$4/5 = 0.8$
Very High (FVH)	(20; 25; 100; 100)	1

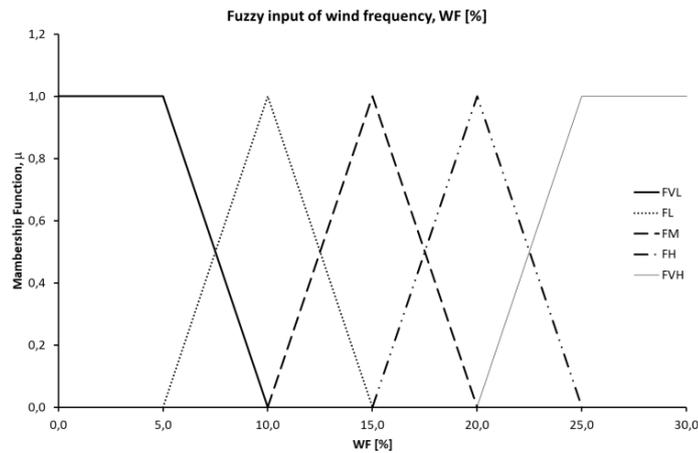
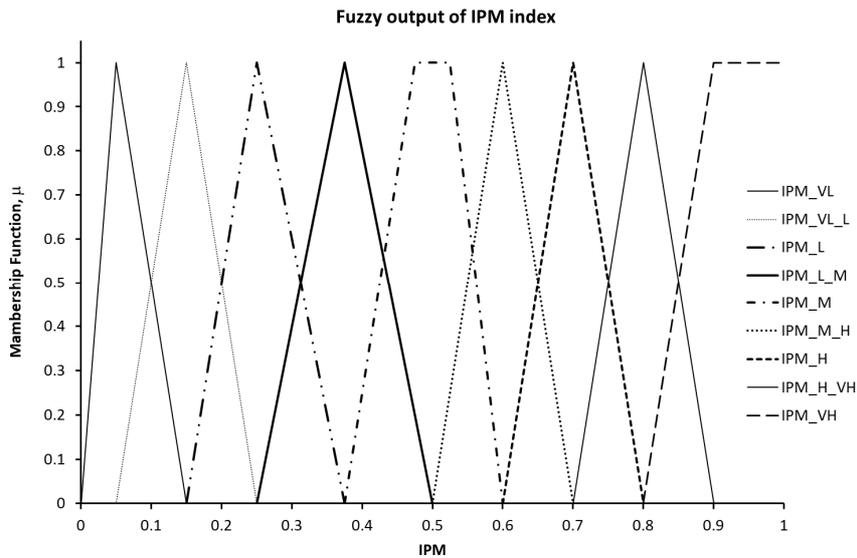


Fig. 5. Rappresentazione delle variabili linguistiche Fuzzy relative alla frequenza del vento (WF).

Tabella 4. Termini linguistici e Fuzzy sets di output relativi all'indice IPM.

Linguistic value of IPM [-]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_{IPM}$
Very Low (IPM_VL)	(0; 0.1; 0.2)	$1/9 = 0.111$
Between Very low and Low (IPM_VL_L)	(0.1; 0.2; 0.3)	$2/9 = 0.222$
Low (IPM_L)	(0.2; 0.3; 0.4)	$3/9 = 0.333$
Between Low and Medium (IPM_L_M)	(0.3; 0.4; 0.5)	$4/9 = 0.444$
Medium (IPM_M)	(0.4; 0.475; 0.525; 0.6)	$5/9 = 0.556$
Between Medium and High (IPM_M_H)	(0.5; 0.6; 0.7)	$6/9 = 0.667$
High (IPM_H)	(0.6; 0.7; 0.8)	$7/9 = 0.778$
Between High and Very High (IPM_H_VH)	(0.7; 0.8; 0.9)	$8/9 = 0.889$
Very High (IPMI_VH)	(0.8; 0.9; 1; 1)	1



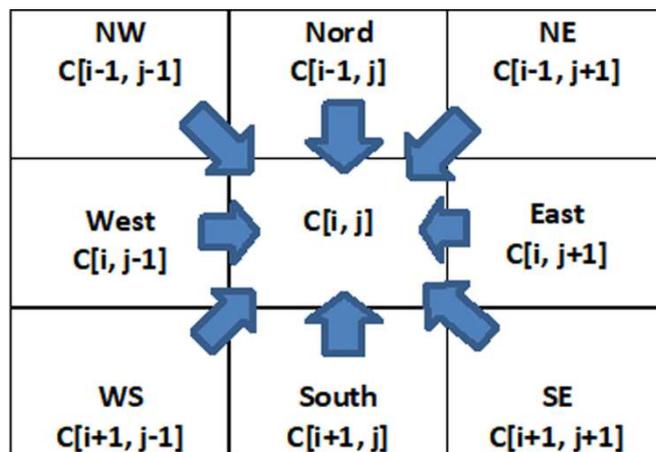
**Fig. 6.** Rappresentazione delle variabili linguistiche Fuzzy dell'indice IPM.

Come è noto, CALMET è un modello meteorologico diagnostico che, a partire da dati osservati (al suolo e di profilo verticale) e dati geofisici, produce campi orari tridimensionali di vento, insieme ad altre grandezze meteorologiche.

Il calcolo dell'indice IPM viene fatto per ciascuno dei primi tre strati verticali che, nelle simulazioni CALMET, schematizzano le condizioni atmosferiche in quota a 10, 20, 40 m.

Un algoritmo di pre-processamento elabora i dati calcolati dal codice CALMET e crea l'input necessario per l'applicazione del modello Fuzzy.

In dettaglio, i valori della velocità e frequenza del vento attribuiti da CALMET nelle otto celle, confinanti alla cella  $C[i,j]$  (Fig. 7), vengono utilizzati come input nel processo di inferenza Fuzzy.



**Fig. 7** Schematizzazione della cella  $C[i,j]$  del dominio di calcolo utilizzata per l'elaborazione degli indici  $IPM[i,j]$  e dell'indicatore  $ICO[i,j]$

Il valore finale dell'indice IPM è attribuito alla cella  $C[i,j]$ , essendo questa la cella oggetto di pressioni

meteorologiche da parte delle otto celle adiacenti. Questo approccio permette di prendere in considerazione, nella stessa combinazione di calcolo, le otto direzioni del vento (North, NE, East, SE, South, WS, West, NW in Fig. 7) che influenzano, con maggiore o minore frequenza, la cella  $C[i,j]$ .

Questa procedura viene applicata per tutte le celle del dominio di calcolo e per ciascuno dei tre strati atmosferici verticali descritti in precedenza.

I risultati riguardanti i tre strati atmosferici verticali della singola cella vengono, infine, sommati.

## 4.2 Fuzzification dell'Indice di Pressione Antropica (IPA)

Per il calcolo dell'indice IPA, sono stati utilizzati i seguenti parametri come sets di input Fuzzy:

- indicatore di complessità orografica (ICO) [m];
- portata dell'inquinante emessa da ciascuna sorgente (media annuale), normalizzata rispetto al valore massimo presente all'interno dell'area geografica di interesse (P) [-];
- distanza della cella generica dalla cella in cui è ubicata la sorgente di emissione (D) [km].

Le variabili linguistiche utilizzate per la definizione dei parametri ICO, P e D sono riportate nelle Tab.s da 5 a 7, mentre per l'indice IPA in Tab. 8.

L'indicatore ICO è calcolato come media delle differenze tra l'altezza geodetica della cella  $C[i,j]$  e l'altezza geodetica di ciascuna delle otto celle confinanti. I calcoli vengono eseguiti utilizzando un algoritmo che elabora i dati delle mappe topografiche USGS, come descritto nella sezione 4.3.

Ai fini delle classificazioni linguistiche, è stata analizzata la distribuzione dei dati ICO nel dominio in esame, tenendo presente la corrispondenza tra la variazione orografica del territorio rispetto all'estensione della relativa superficie.

Le portate di inquinante fanno riferimento ai dati emissivi georeferenziati riportati nell'inventario delle emissioni 2012 (ARPA, 2012). Si noti che la normalizzazione ha facilitato la classificazione dell'intensità delle emissioni che, quindi, varia nell'intervallo  $[0, 1]$  (0 nessuna emissione, 1 emissione massima).

La Fig. 8 riporta, a titolo di esempio, la mappa delle emissioni dell'inquinante NO<sub>x</sub>, per il territorio siciliano, con risoluzione 1x1 km. La Fig. 9 mostra, invece, le emissioni con risoluzione 3x3 km ottenute a seguito delle elaborazioni con il preprocessore Terrel (Scire et al., 2000).

Tale elaborazione è stata necessaria per uniformare le mappe delle emissioni alla risoluzione del dominio di calcolo impiegato per il calcolo degli indici Fuzzy IPM e IPA (i.e. 3x3 km).

In Appendice A è riportato l'algoritmo per l'applicazione del modello Fuzzy riguardante la valutazione dell'indice IPM.

Il calcolo dell'indice IPA è riportato nell'Appendice B, che mostra l'algoritmo relativo all'applicazione del modello Fuzzy.

**Tabella 5. Termini linguistici e input fuzzy sets relativi all'indicatore ICO.**

Linguistic value of ICO indicator [m]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_{ICO}$
Extremely complex (EC)	(425; 500; 620;620)	1/9 = 0.111
Between Extremely Complex and High Complexity (EC_HC)	(375;425;475)	2/9 = 0.222
High Complexity (HC)	(325; 375; 425)	3/9 = 0.333
Between High Complexity and Medium Complexity (HC_MC)	(275;325;375)	4/9 = 0.444
Medium Complexity (MC)	(225;275;325)	5/9 = 0.556
Between Medium Complexity and Low Complexity (MC_LC)	(175;225;275)	6/9 = 0.667
Low Complexity (LC)	(125; 175; 225)	7/9 = 0.778
Between Low Complexity and Very Low Complexity (LC_VLC)	(50; 112.5; 175)	8/9 = 0.889
Very Low Complexity (VLC)	(0; 50; 125)	1

**Tabella 6. Termini linguistici e fuzzy sets di input relativi alla portata di inquinante normalizzata P.**

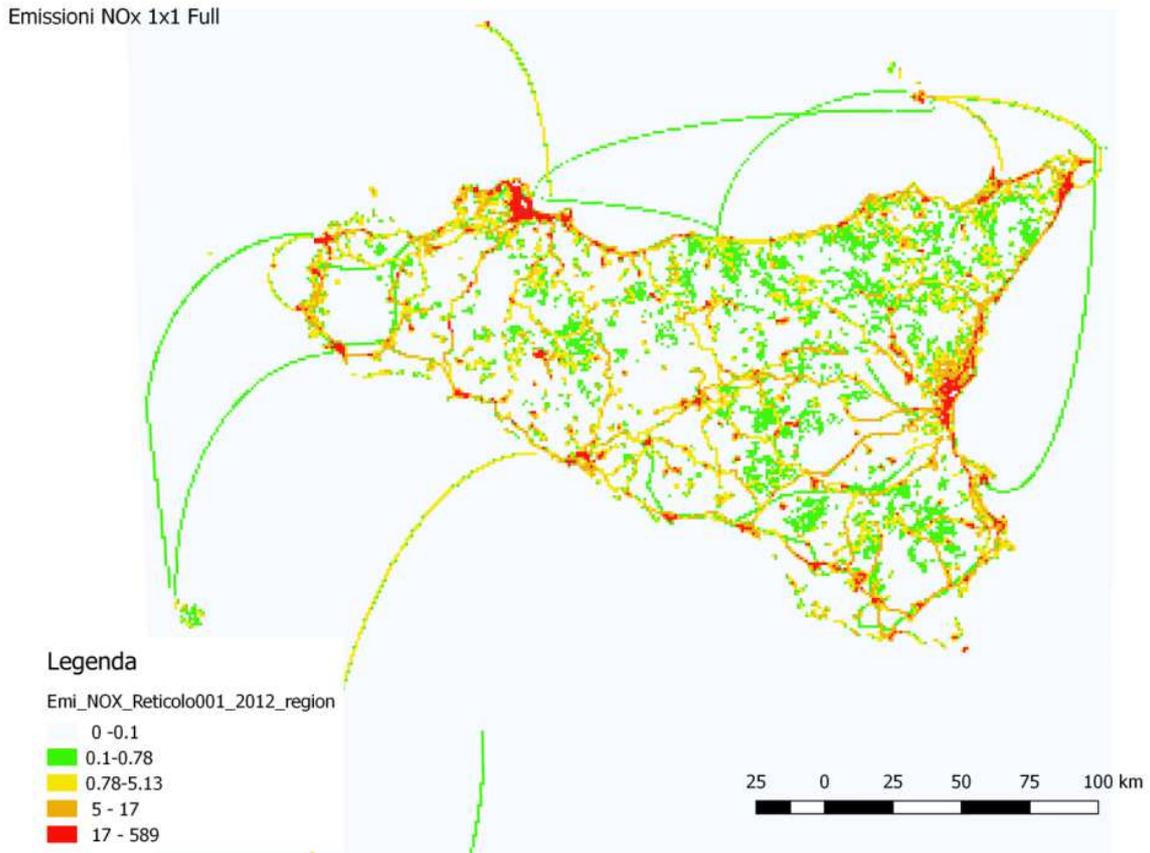
Linguistic value of P parameter [-]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_P$
Very Low (PVL)	(0; 0.05; 0.1)	1/9 = 0.111
Between Very low and Low (PVL_PL )	(0.05; 0.1; 0.15)	2/9 = 0.222
Low (PL)	(0.1; 0.15; 0.2)	3/9 = 0.333
Between Low and Medium (PL_PM )	(0.15; 0.225; 0.3)	4/9 = 0.444
Medium (PM)	(0.2; 0.3; 0.4)	5/9 = 0.556
Between Medium and High (PM_PH )	(0.3; 0.4; 0.5)	6/9 = 0.667
High (PH)	(0.4; 0.5; 0.6)	7/9 = 0.778
Between High and Very High (PVH _ PH )	(0.5; 0.6; 0.7)	8/9 = 0.889
Very High (PVH)	(0; 6; 0.7;1.0)	1

**Tabella 7. Termini linguistici e Fuzzy sets di input relativi alle distanze tra celle, D, per il dominio di calcolo.**

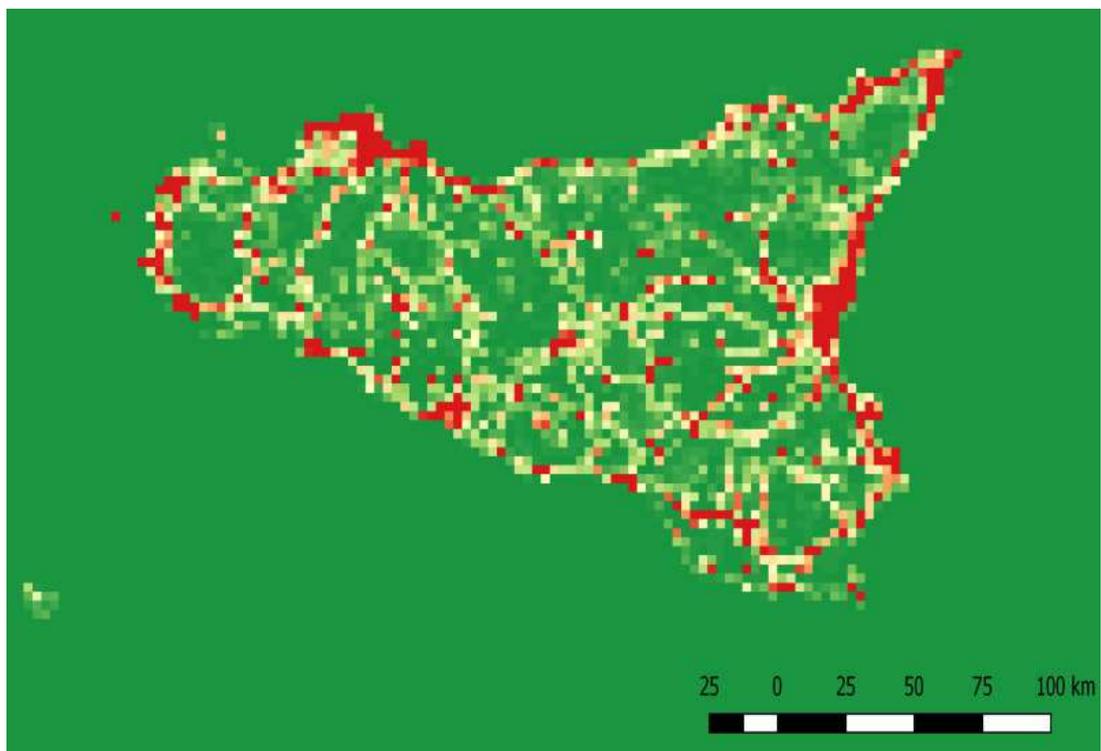
Linguistic value of D parameter [km]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_D$
Very High (DVH)	(9; 10; 12; 12)	1/9 = 0.111
Between High and Very High (DVH_H)	(8; 9; 10)	2/9 = 0.222
High (DH)	(7; 8; 9)	3/9 = 0.333
Between Medium and High (DH_M)	(6; 7; 8)	4/9 = 0.444
Medium (DM)	(5.25; 6; 7)	5/9 = 0.556
Between Low and Medium (DM_L)	(4.5; 5.25; 6)	6/9 = 0.667
Low (DL)	(3.75; 4.5; 5.25)	7/9 = 0.778
Between low and Very Low (DL_VL)	(3.25; 3.75; 4.5)	8/9 = 0.889
Very Low (DVL)	(0; 3; 3.25;3.75)	1

**Tabella 8. Termini linguistici e Fuzzy sets di output relativi all'indice IPA.**

Linguistic value of IPA [-]	Fuzzy linguistic number ( $x_1; x_2; x_3; x_4$ ); ( $x_1; x_2; x_3$ )	weight $W_{IPA}$
Very Low (API_VL)	(0; 0.1; 0.2)	1/9 = 0.111
Between Very low and Low (API_VL_L)	(0.1; 0.2; 0.3)	2/9 = 0.222
Low (API_L)	(0.2; 0.3; 0.4)	3/9 = 0.333
Between Low and Medium (API_L_M)	(0.3; 0.4; 0.5)	4/9 = 0.444
Medium (API_M)	(0.4; 0.475; 0.525; 0.6)	5/9 = 0.556
Between Medium and High (API_M_H)	(0.5; 0.6; 0.7)	6/9 = 0.667
High (API_H)	(0.6; 0.7; 0.8)	7/9 = 0.778
Between High and Very High (API_H_VH)	(0.7; 0.8; 0.9)	8/9 = 0.889
Very High (API_VH)	(0.8; 0.9; 1;1)	1



**Fig. 8** Rappresentazione grafica, in falsi colori, delle emissioni nel 2012 per l'inquinante NOx, risoluzione 1x1 km (ARPA, 2012)



**Fig. 9** Rappresentazione grafica, in falsi colori, della mappa delle emissioni di NOx, risoluzione 3x3 km.

### 4.3 Procedura di calcolo dell'Indicatore di Complessità Orografica (ICO)

ICO viene valutato utilizzando la seguente relazione:

$$ICO_{i,j} = \frac{\sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} |h_{i,j} - h_{n,m}|}{8} \quad \forall i = 2, 3, \dots, r - 1; j = 2, 3, \dots, c - 1 \quad (8)$$

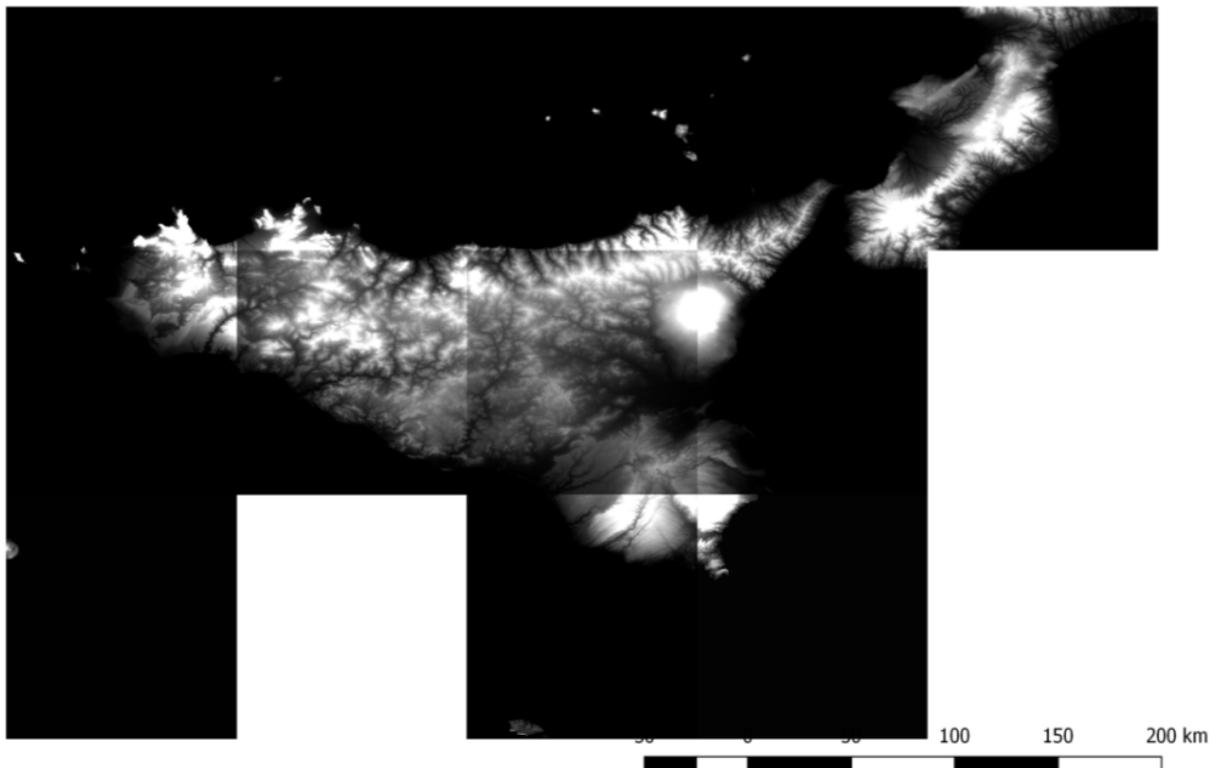
dove:

- $h_{i,j}$  è l'altezza media della generica cella  $C[i, j]$  (Fig. 7);
- $h_{n,m}$  è l'altezza media della cella confinante a  $C[i,j]$ ;
- $r$  è il numero di celle che compongono il dominio di calcolo lungo la coordinata  $x$ ;
- $c$  è il numero di celle che compongono il dominio di calcolo lungo la coordinata  $y$ .

Il listato software dell'algoritmo di calcolo dell'indicatore ICO è riportato in Appendice C.

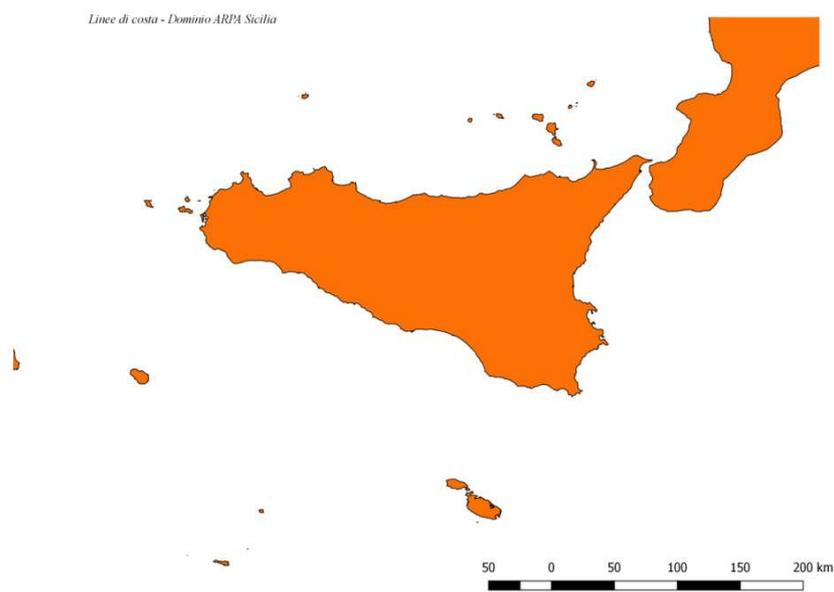
I dati di input sono ottenuti utilizzando i file GeoTIFF (Fig. 10) elaborati tramite il preprocessore Terrel.

I GeoTIFF sono relativi alla missione topografica radar Shuttle (SRTM), scaricabili dal sito <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



**Fig. 10.** Rappresentazione cartografica dei File GeoTIFF (DTM) utilizzati come dati di input per il calcolo dell'indicatore ICO.

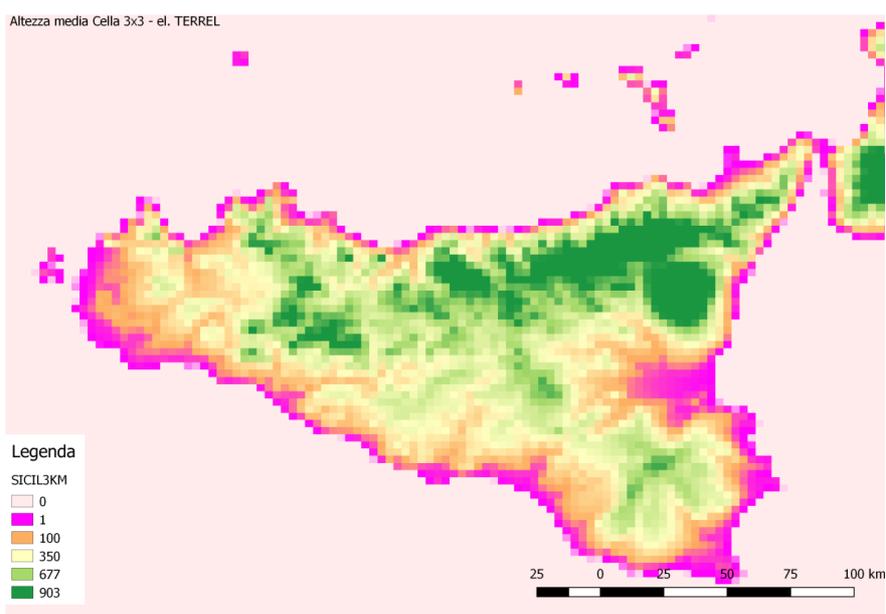
Per aumentare la risoluzione delle linee di costa, è stato impiegato il file GSHHS\_F.B (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shorelines), riportato in Fig. 11.



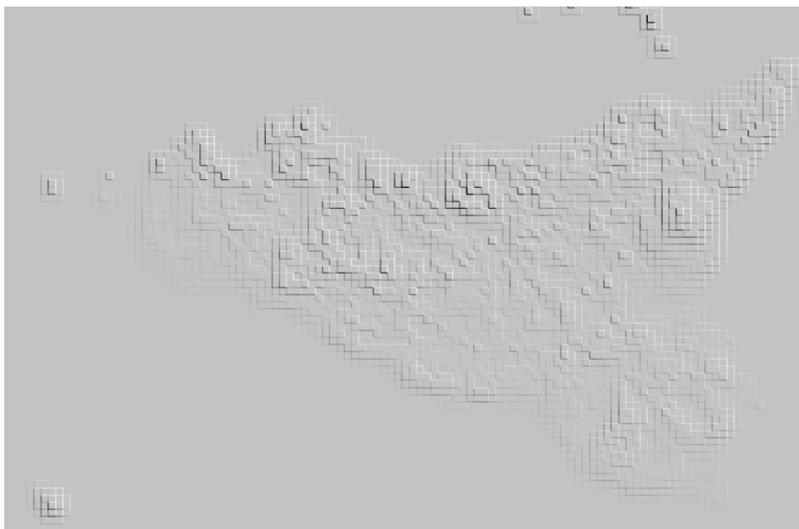
**Fig. 11.** Rappresentazione cartografica del File GSHHS per il dominio di interesse.

In Fig. 12 viene mostrata la rappresentazione cartografica, in falsi colori, dell'indicatore ICO, mentre la Fig. 13 mostra la stessa mappa ottenuta ricorrendo ad elaborazioni QGIS che mettono in evidenza le differenze orografiche tra celle confinanti.

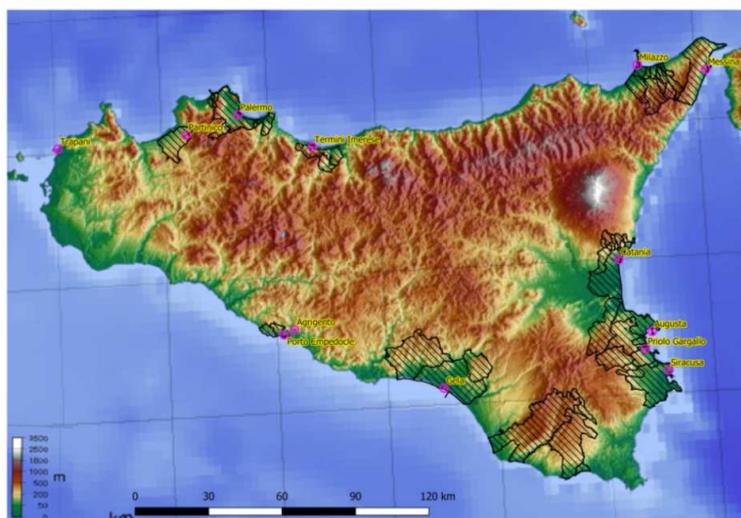
Il confronto tra la mappa ICO riportata in Fig. 13 e la mappa topografica, riportata in Fig. 14, consente di verificare la corrispondenza tra aree confinanti caratterizzate da più marcate differenze orografiche.



**Fig. 12.** Rappresentazione cartografica, in falsi colori, della elaborazione intermedia dell'indicatore ICO.



*Fig. 13. Mappa dell'indicatore ICO ottenuta tramite elaborazioni QGIS.*



*Fig. 14. Cartina topografia della Sicilia (Zamonin 2006).*

#### **4.4 Costruzione delle regole Fuzzy utilizzate per il calcolo degli indici IPA e IPM**

Il metodo per la costruzione delle regole del Fuzzy Inference System si basa sulla metodologia proposta in (Giardina et al., 2014). Ogni regola Fuzzy viene determinata tenendo in conto l'importanza relativa,  $R$ , delle variabili Fuzzy di input, riportate nelle Tab.s 9 e 10, e dei pesi,  $w_j$ , attribuiti alle variabili linguistiche, come riportato nelle Tab.s 2÷8. I pesi  $w_j$  sono ottenuti assumendo relazioni lineari del grado di importanza tra le regole del sistema FIS come proposto in (Giardina et al., 2014).

Di seguito si riportano due esempi di procedura di definizione di regole Fuzzy per l'indice IPM.

Prendiamo in esame i sets Fuzzy di input velocità del vento  $WS$  [m/s] e frequenza del vento  $WF$  [%] (Tab.s 2 e 3), i pertinenti pesi  $W_{WS}$  e  $W_{WF}$  e gli insiemi Fuzzy di output dell'indice IPM con i relativi pesi riportati in Tab. 4.

Il termine linguistico dell'output IPM viene definito partendo dal calcolo del peso  $W_{IPM}$  come segue:

$$W_{IPM} = R_{WS} W_{WS} + R_{WF} W_{WF} \quad (9)$$

essendo  $R_{WS} = 0.4$  e  $R_{WF} = 0.6$ , se si effettua il calcolo per il secondo (oppure il terzo) layer verticale del modello meteorologico tridimensionale (vedi Tab. 9).

Sulla base della relazione Eq. (9), è possibile identificare le seguenti regole *if-based*:

**Rule 1:** *If* the wind speed (WS) is **Very Low** (SVL with  $W_{WS} = 0.2$ ) **and** wind frequency (WF) is **Low** (FL with  $W_{WF} = 0.4$ ) **then** the consequent part is obtained using Eq. (9), namely  $W_{IPM} = 0.4 \times 0.2 + 0.6 \times 0.4 = 0.32$ . This number is placed between  $W_{IPM} = 0.222$  of IPM as *Between Very Low and Low (MPI\_VL\_L)* and  $W_{IPM} = 0.333$  of IPM as *Low (MPI\_L)*; by using minimum condition the result is as follows: **IPM is Between Very Low\_Low (IPM\_VL\_L) with  $W_{IPM}=0.32$ ;**

**Rule 2:** *If* the wind speed (WS) is **Very High** (SVH with  $W_{WS} = 1.0$ ) **and** wind frequency (WF) is **Very Low** (FVL with  $W_{WF} = 0.2$ ), **then** the consequent part is obtained using Eq. (9), namely  $W_{IPM} = 0.4 \times 1.0 + 0.6 \times 0.2 = 0.52$ . This number is placed between  $W_{IPM} = 0.444$  of IPM as *Between Low and Medium (IPM\_L\_M)* and  $W_{IPM} = 0.556$  of IPM as *Medium (IPM\_M)*; by using minimum condition the result is as follows: **IPM is Between Low and Medium (IPM\_L\_M) with  $W_{IPM}=0.52$ .**

Utilizzando l'approccio descritto sopra, sono state sviluppate 50 regole per IPM (25 regole per il primo layer di 10 m ed ulteriori 25 regole per i due layer che schematizzano le condizioni atmosferiche in quota a 20 e 40 m) e 729 per IPA.

Il processo di inferenza, in base al quale gli insiemi fuzzy di input sono associati ad un set fuzzy di output, è costruito utilizzando la procedura Min-Max descritta nella sezione 3.2.

La fase di *defuzzification* viene eseguita utilizzando la relazione riportata in Eq. (7).

Va notato che per il calcolo dell'indice IPM l'importanza relativa, R, utilizzata per la definizione delle regole come descritto sopra, assegna lo stesso peso alle variabili WS e WF nel primo strato (vedi Tab. 9) che schematizza il profilo verticale del vento, mentre, attribuisce un peso leggermente più elevato alla variabile WF per il secondo e terzo strato.

Ciò viene fatto per tenere in considerazione che l'attrito della superficie terrestre ha un impatto sempre meno importante sui valori della velocità del vento negli strati superiori al primo, per cui, la differenza dei valori della velocità del vento tra celle confinanti diventa meno significativa. Di contro, la frequenza della direzione del vento diventa il parametro che meglio rappresenta gli interscambi tra celle limitrofe.

**Tabella 9.** *Importanza relativa attribuita ai Fuzzy sets di input, utilizzata per generare le regole del sistema FIS per il calcolo dell'indice IPM*

Relative importance	Fuzzy variable	Value of Relative importance, 1° layer	Value of Relative importance, 2° and 3° layer
$R_{WS}$	wind speed	0.5	0.4
$R_{WF}$	wind frequency	0.5	0.6

**Tabella 10.** *Importanza relativa attribuita ai fuzzy sets di input, utilizzata per generare le regole del sistema FIS per il calcolo dell'indice IPA*

<b>Relative importance</b>	<b>Fuzzy variable</b>	<b>Value of Relative importance</b>
R <sub>ICO</sub>	Orography complex index	0.35
R <sub>P</sub>	normalised pollutant mass flow rates	0.4
R <sub>D</sub>	distance between cells	0.25

## 4.5 Algoritmo di calcolo e analisi dei risultati ottenuti

Per il calcolo degli indici IPA e IPM, l'algoritmo utilizza le seguenti routine del pacchetto software frbs per R-CRAN:

- modello di inferenza regole fuzzy Mamdani;
- COG;
- t-norm: min;
- s-norm: max;
- funzione di implicazione: "ZADEH"<sup>1</sup>.

Per tenere in considerazione gli approcci modellistici, descritti nei paragrafi precedenti, è stato necessario modificare alcune routine del pacchetto software sopra menzionato.

Inoltre, l'algoritmo di calcolo della funzione di implicazione di "ZADEH" è stato modificato sulla base dei modelli Fuzzy riportati in (Giardina et al., 2014) e, in parte, descritti nella sezione 4.4.

Vale la pena sottolineare che l'uso di un singolo indice, derivato dall'integrazione di diversi indicatori che definiscono un problema, ha il vantaggio di fornire in modo sintetico le informazioni necessarie per monitorare/individuare condizioni complesse. Tuttavia, questo compito risulta essere particolarmente difficile se siamo in presenza di informazioni disaggregate, o frammentate, poiché il processo di aggregazione diventa difficile da concretizzare, a meno di compromessi. Inoltre, se viene perseguita l'idea di combinare diversi indicatori, la complessità semantica può aumentare in modo significativo. Ciò potrebbe portare alla perdita di informazioni utili, o all'amplificazione delle distorsioni derivanti dai singoli indicatori.

L'uso della logica Fuzzy e l'attribuzione di proprietà linguistiche affini per l'indice IPM e IPA hanno permesso di ridurre la complessità semantica e, quindi, di agevolare le operazioni di aggregazione ai fini della valutazione di un singolo indice.

Tenendo presente ciò, si è proceduto al calcolo dell'Indice IAATO così come descritto di seguito.

Il primo step ha comportato l'uso di una procedura di normalizzazione degli indici IPM e IPA, attraverso l'attribuzione di un punteggio, che varia nell'intervallo [0, 10]. L'assegnazione viene fatta effettuando una

<sup>1</sup> Zadeh L.A. 1992. The calculus of fuzzy if/then rules. *AI Expert*, 7, 23-7.

distribuzione in quantili, similmente a quanto suggerito in (OECD, 2008) proprio per la normalizzazione di indici.

I valori normalizzati, assegnati alla generica cella C[i,j], vengono calcolati come segue:

$$IPM [i,j], \text{ or } IPA[i,j] = \begin{cases} 0 \text{ if } IPM, IPA < Q^{0.2} & 5 \text{ if } Q^{0.6} \leq IPM, IPA < Q^{0.7} \\ 1 \text{ if } Q^{0.2} \leq IPM, IPA < Q^{0.3} & 6 \text{ if } Q^{0.7} \leq IPM, IPA < Q^{0.8} \\ 2 \text{ if } Q^{0.3} \leq IPM, IPA < Q^{0.4} & 7 \text{ if } Q^{0.8} \leq IPM, IPA < Q^{0.85} \\ 3 \text{ if } Q^{0.4} \leq IPM, IPA < Q^{0.5} & 8 \text{ if } Q^{0.85} \leq IPM, IPA < Q^{0.9} \\ 4 \text{ if } Q^{0.5} \leq IPM, IPA < Q^{0.6} & 9 \text{ if } Q^{0.9} \leq IPM, IPA < Q^{0.95} \\ & 10 \text{ if } IPM, IPA \geq Q^{0.95} \end{cases} \quad (10)$$

In Eq. (10) il parametro  $Q^{0.5}$  corrisponde alla mediana del vettore dati in oggetto.

Nelle Fig.s 15÷17 sono riportati i risultati IPA ottenuti per gli inquinanti SOx, NOx, PM10, mentre nelle Fig.s 18÷22 i risultati IPM per gli anni dal 2010 al 2014. In tutte le figure, le diverse gradazioni di colore individuano celle caratterizzate da valori che ricadono dal quantile  $Q^{0.85}$  in poi<sup>2</sup>. Quindi, le celle con colore più intenso caratterizzano alta affinità in termini di pressioni ambientali (IPA), oppure elevati interscambi meteorologici (IPM).

Va sottolineato che la rappresentatività territoriale delle informazioni fornite dai due indici deve essere strettamente correlata alle aree che sono rigorosamente confinanti, dato che la costruzione del modello si basa su valutazioni che riguardano la singola cella con le celle limitrofe. Quindi, l'intensità degli interscambi meteorologici, ad esempio, nella zona di Palermo non deve essere messa in relazione con quanto si verifica in altre aree regionali non confinanti. La stessa considerazione va fatta per l'indice IPA.

In tutte le figure, i layers degli indici sono stati sovrapposti su una mappa che riporta alcuni dei centri urbani principali, nonché le autostrade e le strade provinciali che insistono sul territorio siciliano.

L'indice IAATO, per ogni cella C[i,j] della griglia, viene valutato sommando gli indici IPM e IPA normalizzati ricorrendo all'Eq. (10):

$$IAATO[i,j] = IPM[i,j] + IPA[i,j] \quad i = 2, 3, \dots, r; j = 2, 3, \dots, c \quad (11)$$

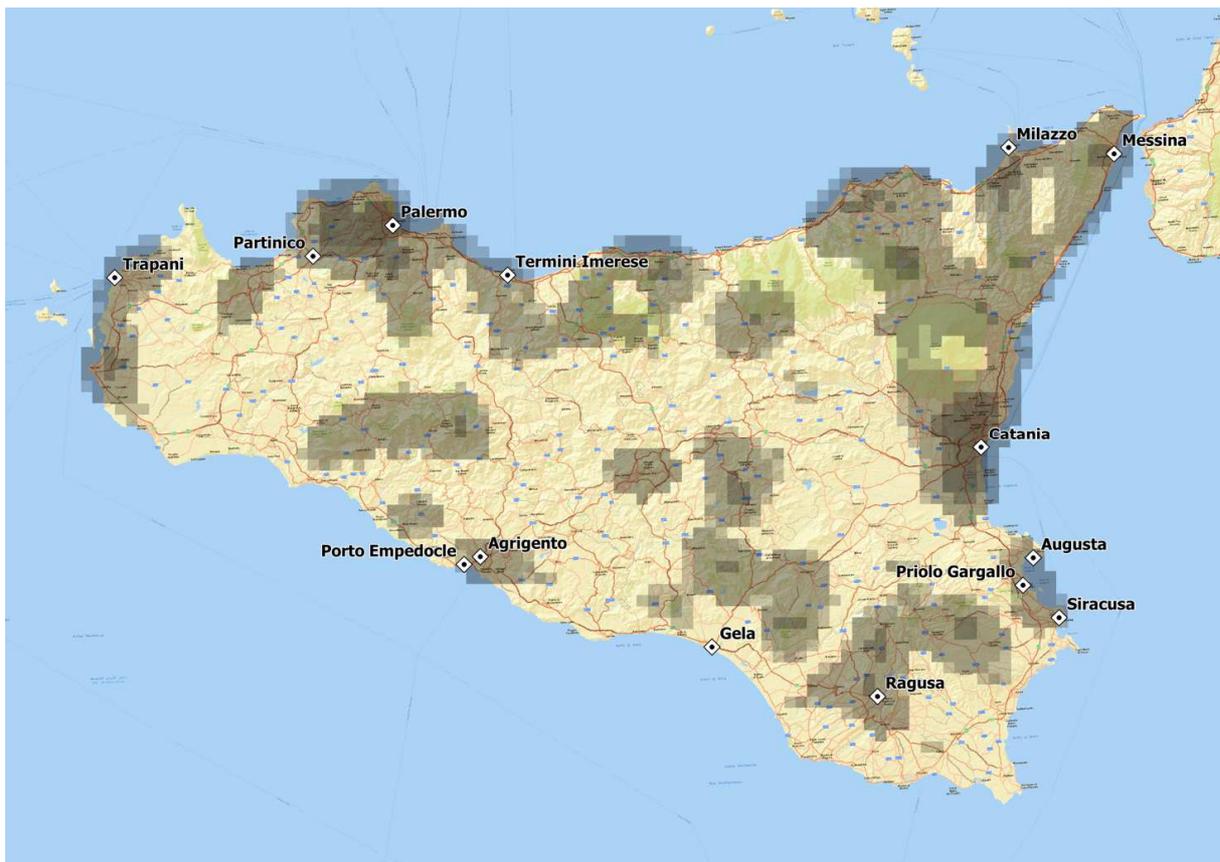
essendo r e c il numero di righe e colonne della griglia di calcolo.

La Fig. 23 riporta i flow chart della procedura messa a punto per il calcolo dell'indice IAATO sulla base dei processi di calcolo descritti nei paragrafi precedenti, il cui listato è riportato in appendice D.

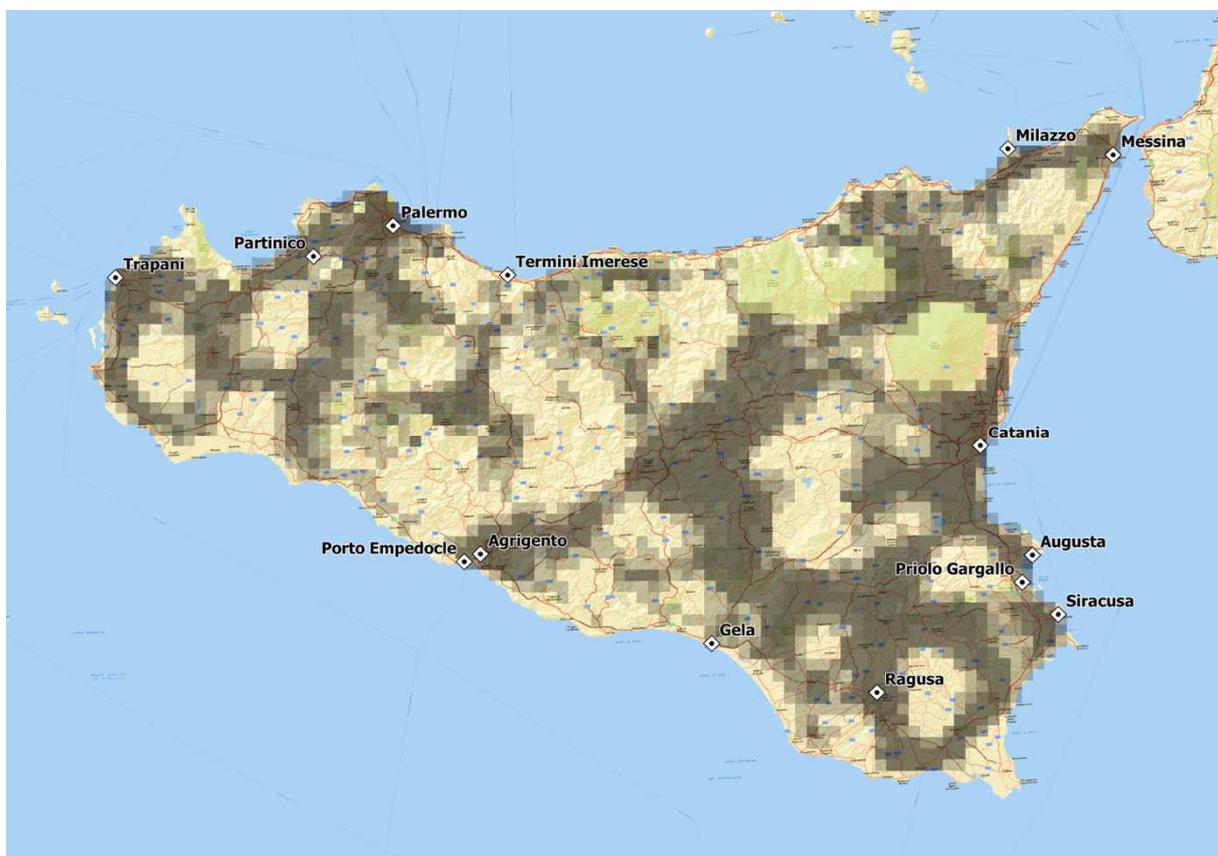
<sup>2</sup> Il percentile è il valore di una variabile (aleatoria) sotto il quale si verifica una certa percentuale dell'osservazione. Ad esempio l'85° percentile è il valore sotto al quale si trovano l'85% delle osservazioni. Riguardo al calcolo, si consideri un campione di n dati, ordinati in maniera crescente. L'indice del k-esimo percentile è dato da:  $I_k = (n+1) \times k / 100$  Dall'indice si ricava quindi il valore esatto con un'interpolazione lineare tra i due dati (con indici pari all'intero prima e dopo di  $I_k$ )

Esempio: n=100 dati xi. Calcoliamo l'85-esimo percentile.  $I_{85} = (100+1) \times 85 / 100 = 85.85$  Il valore dell'85-esimo percentile sarà compreso tra l'85° e l'86° dato ( $x_{85}$  e  $x_{86}$ ).

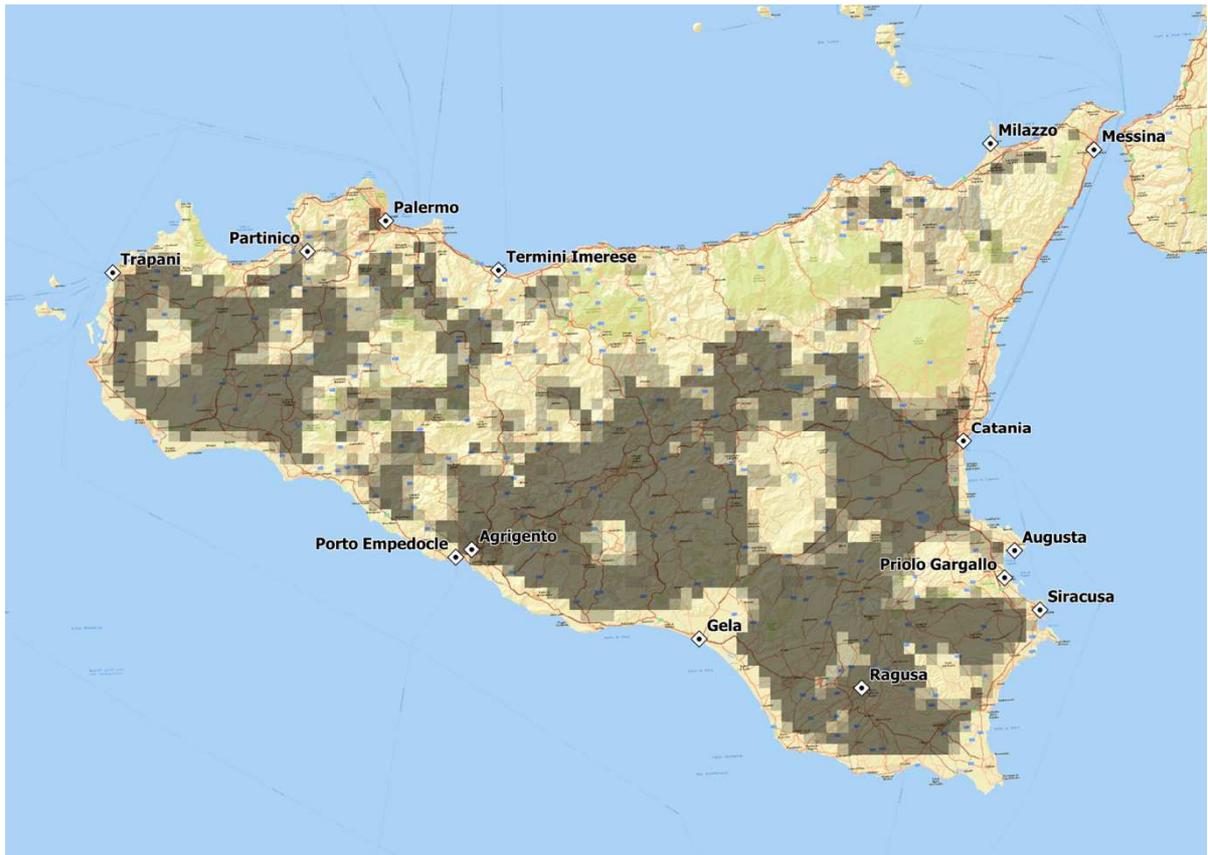
Numericamente vale:  $x_{85} + (x_{86} - x_{85}) \times 0.85$  (interpolazione lineare)



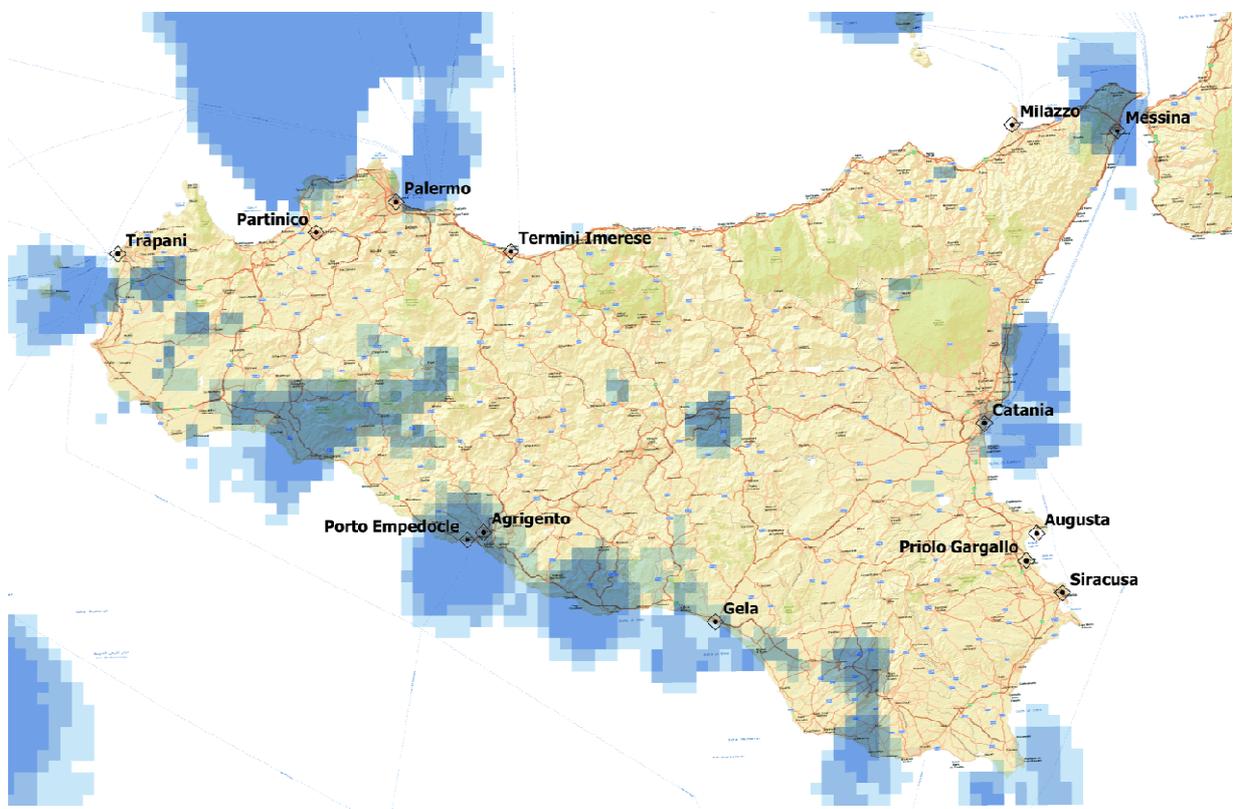
*Fig. 15. Risultati dell'indice IPA, a partire dal 85° quantile, per SOx.*



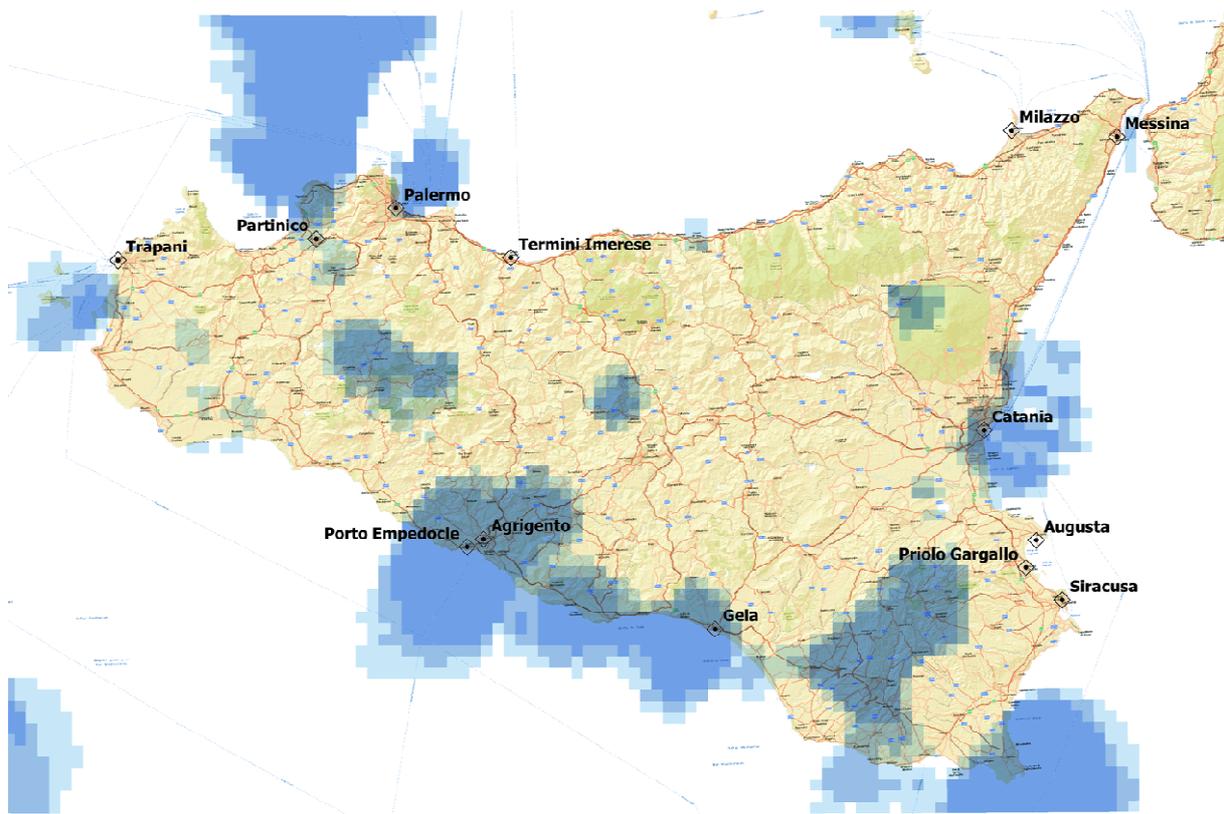
*Fig. 16. Risultati dell'indice IPA, a partire dal 85° quantile, per NOx.*



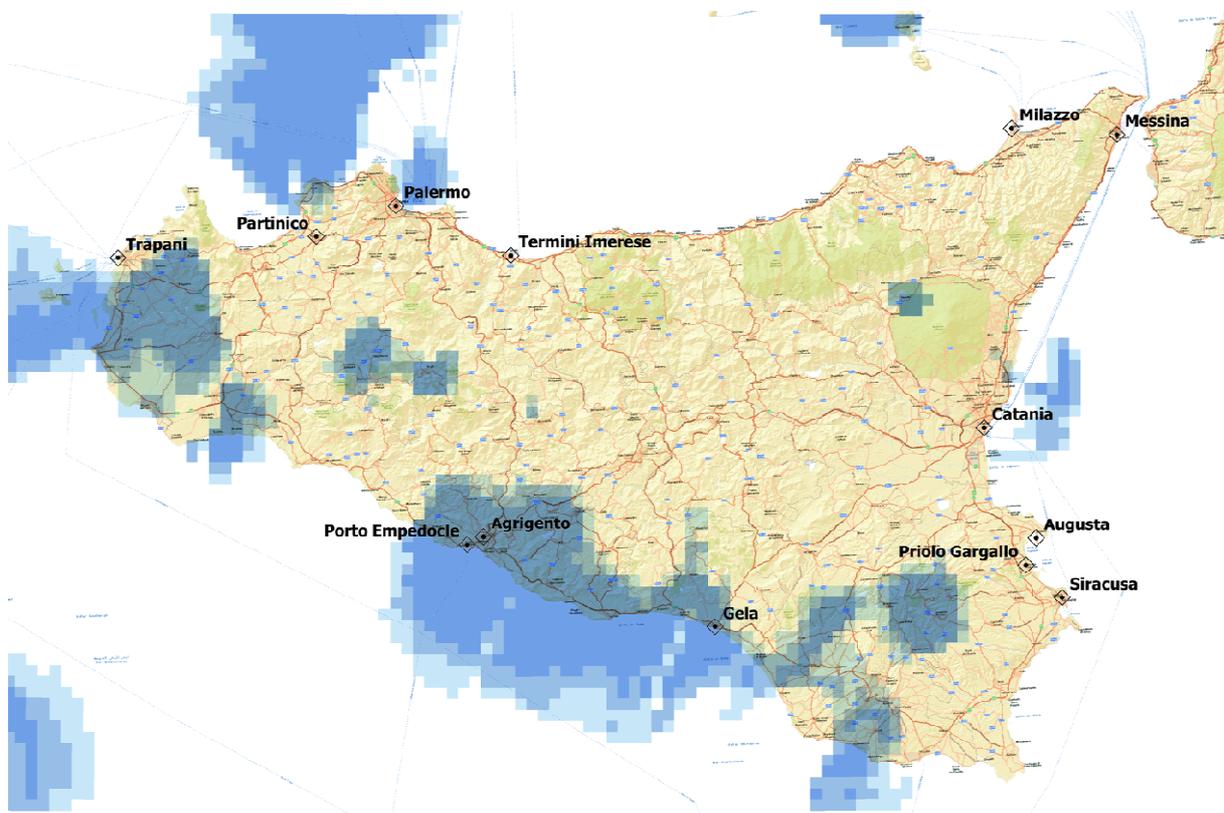
*Fig. 17. Risultati dell'indice IPA, a partire dal 85° quantile, per PM10.*



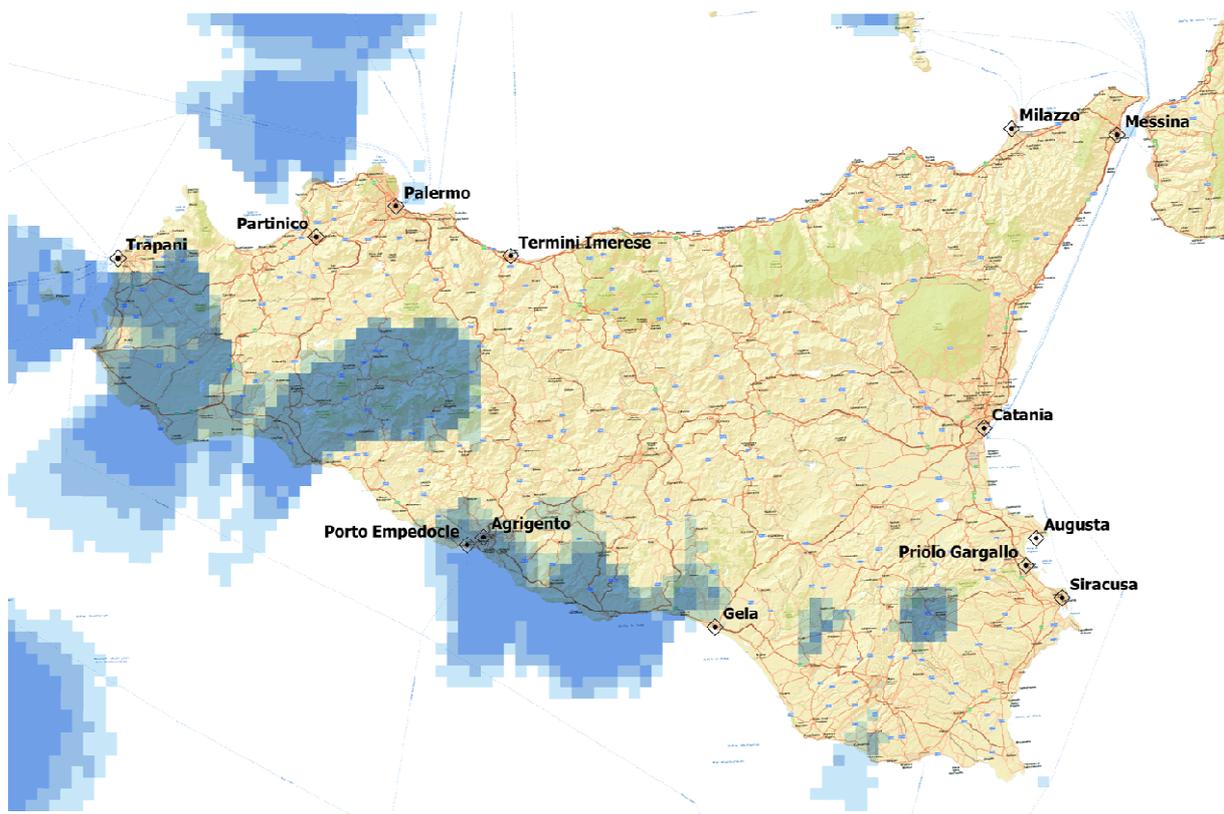
*Fig. 18. Risultati dell'indice IPM, a partire dal 85° quantile, per l'anno 2010.*



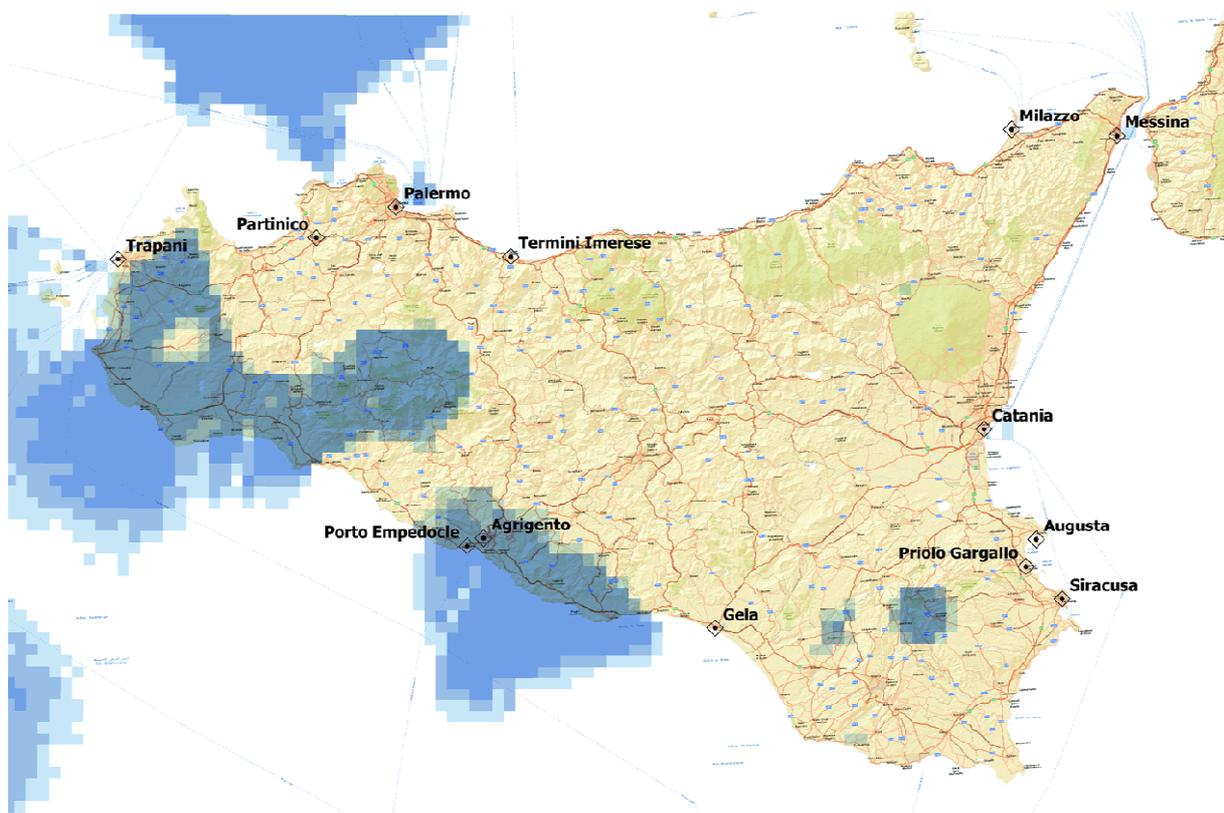
*Fig. 19. Risultati dell'indice IPM, a partire dal 85° quantile, per l'anno 2011.*



*Fig. 20. Risultati dell'indice IPM, a partire dal 85° quantile, per l'anno 2012.*



*Fig. 21. Risultati dell'indice IPM, a partire dal 85° quantile, per l'anno 2013.*



*Fig. 22. Risultati dell'indice IPM, a partire dal 85° quantile, per l'anno 2014.*

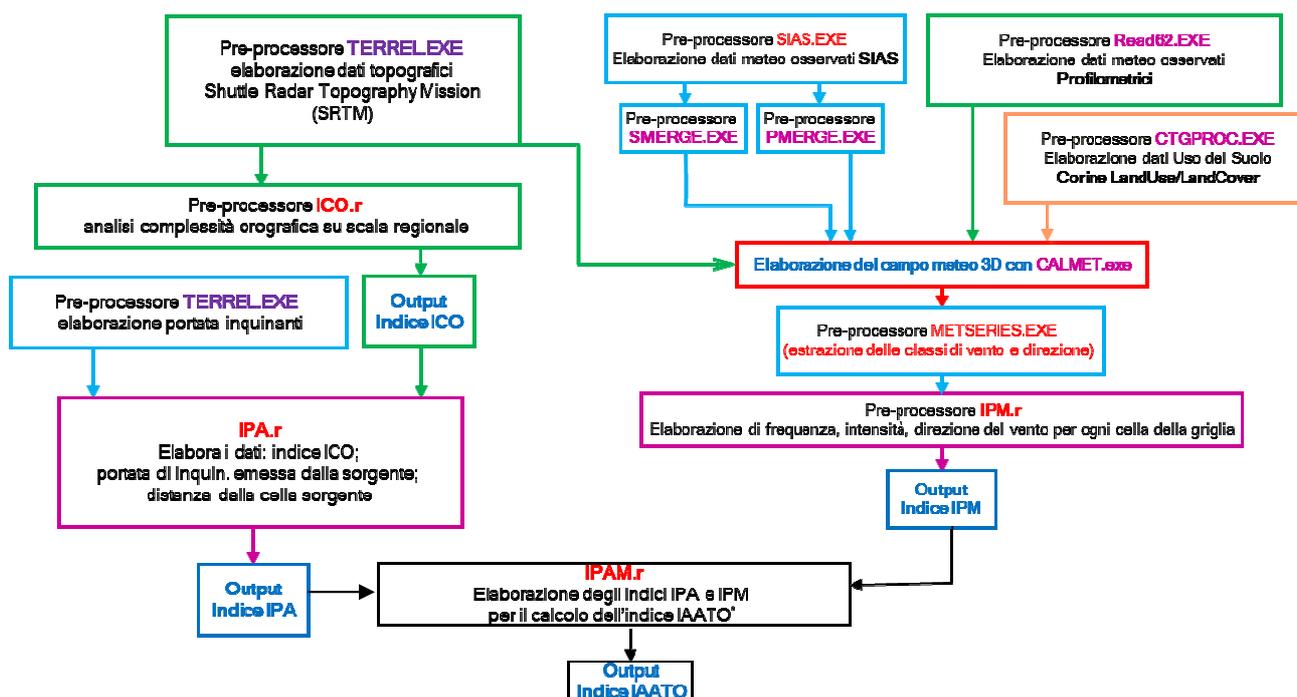


Fig. 23. Flow Chart del processo di calcolo dell'indice IAATO.

## 5. Descrizione dei principali risultati ottenuti

Le simulazioni CALMET sono state svolte utilizzando le misure di temperatura, umidità relativa, radiazione solare incidente, direzione e velocità del vento di 77 stazioni superficiali, distribuite nel territorio siciliano, ed i dati profilometrici verticali della stazione di osservazione del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, ubicata vicino all'aeroporto di Trapani Birgi.

Le stazioni superficiali, per il rilevamento delle condizioni atmosferiche alla quota di 2 e 10 m, riguardano 60 punti di misura della rete SIAS (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano), 13 della rete WMO (World Meteorological Organization) e 4 della rete Mareografica. I dati sono stati impiegati per valutare i campi meteorologici tridimensionali, per il periodo di un anno con intervallo orario, su un dominio con risoluzione 3x3 km. Sono state svolte cinque simulazioni per gli anni dal 2010 al 2014.

Gli inventari delle emissioni di SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>, utilizzati per lo studio, si riferiscono, come già detto, ai dati dell'anno 2012. Le sorgenti naturali ed antropogeniche sono classificate come puntuali (e.g. centrali elettriche, o impianti industriali), lineari (e.g. trasporto stradale) e areali diffuse (e.g. area urbana, sorgenti naturali).

Al fine di avere risultati statisticamente validi per l'individuazione del sottogruppo di stazioni di misura dell'assetto di rete, utile ai fini delle valutazioni con approcci modellistici, i layer dell'indice IAATO, per i cinque anni in studio, sono stati sovrapposti.

Ciò ha consentito di raggiungere un risultato più robusto in quanto permette di individuare le zone

caratterizzate da elevate analogie ambientali per un intervallo temporale significativo.

Per tale attività si è fatto ricorso al software QGIS, utilizzando la modalità di fusione “somma”, che aggiunge ai valori dei pixel delle celle del primo layer i valori dei pixel delle celle dei *layers* sovrapposti. Le Fig.s 24, 25 e 26 riportano i risultati del *layer* intersezione, insieme alla numerazione delle stazioni di misura, riportate in Tab. 1.

In queste figure sono evidenziate in grigio le celle con IAATO intersezione maggiore di 52, valore che ricade nella classe del quantile  $Q^{0.85}$ . Tale assunzione è stata oggetto di validazione attraverso l’analisi di verifica di ipotesi statistica, realizzata imponendo come accettabile l’ipotesi che è appropriato considerare una superficie, con elevate analogie ambientali, pari all’area della zonizzazione degli agglomerati urbani ed industriali (circa il 5% del dominio di calcolo e il 15% del territorio siciliano), con probabilità dell’ipotesi zero uguale, o superiore, a 90 %. Lo studio è stato realizzato utilizzando un livello di significatività del test del 1%.

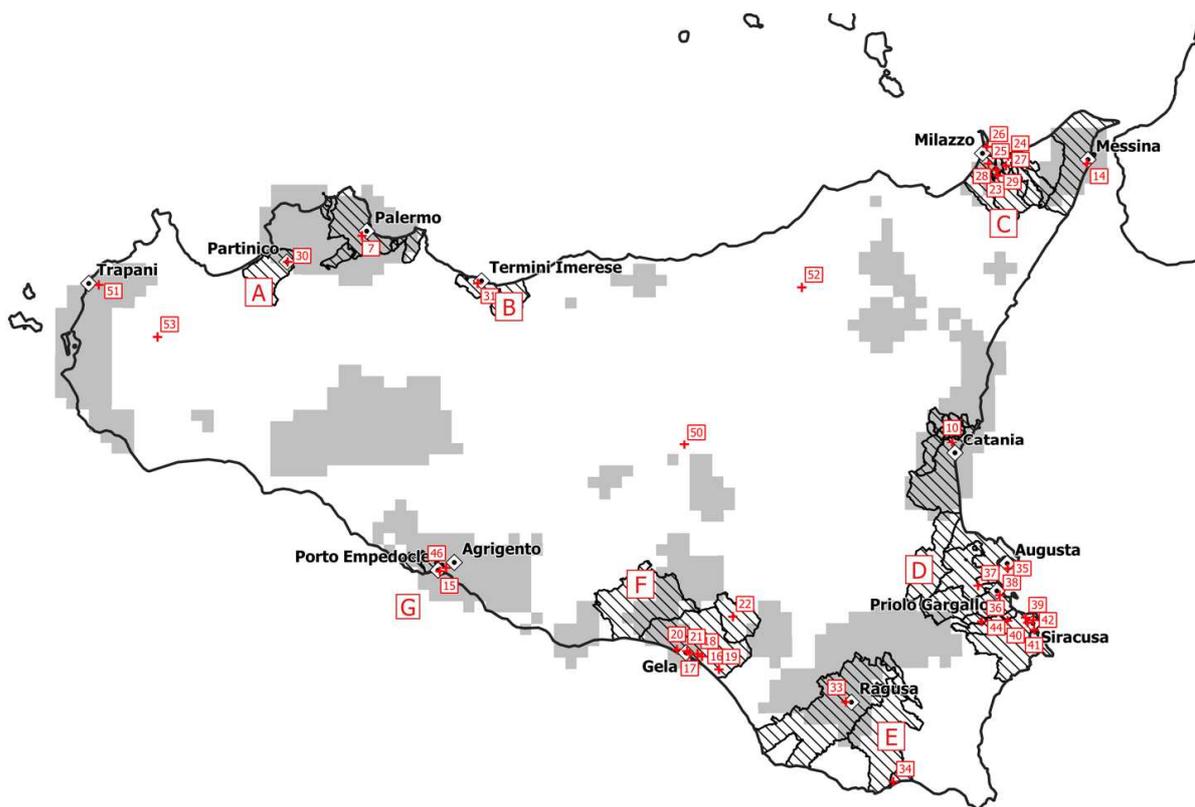
Le centraline che ricadono nelle aree grigie possono rappresentare zone più estese rispetto alla singola cella in cui viene effettuata la misura. Invece, per le aree non colorate (minore affinità) si può dedurre che la stazione che cade nella cella può essere un riferimento solo della cella in questione.

L’indice IAATO di SOx e NOx, riportato in Fig.s 24 e 25, evidenzia che le AERCA del Comprensorio del Mela e di Priolo, le aree industriali di Termini e parte delle altre aree industriali non ricadono in aree grigie, per cui possono essere definite zone con bassa affinità ambientale. Quindi, le stazioni presenti in queste aree sono un riferimento per le celle di appartenenza.

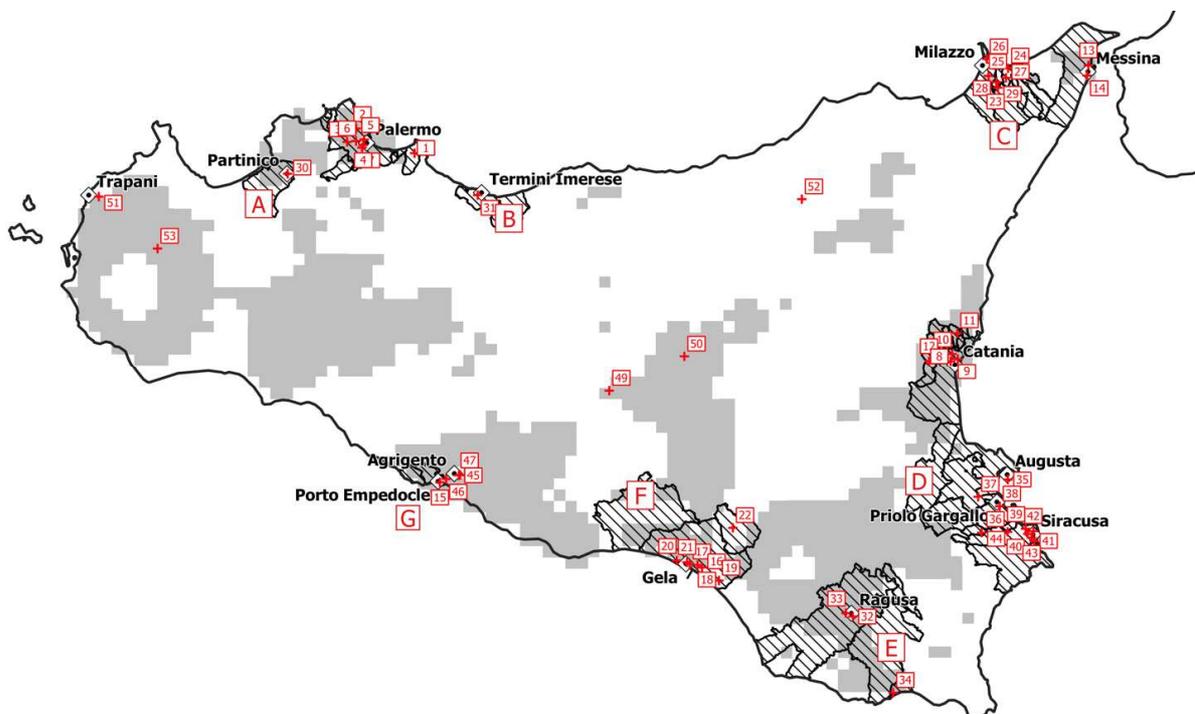
Dalla Fig. 26, che si riferisce all’indice IAATO per il PM10, si nota che le maggiori affinità ambientali si hanno nella zona "altro" (zona meridionale), nell’area industriale di Porto Empedocle ed in parte delle aree industriali del ragusano. Ciò probabilmente perché tali aree risentono del contributo naturale del particolato atmosferico.

La Fig. 27 mostra, per il PM10, l’elaborazione realizzata con il modello Chimere, riportata nella redazione del Piano Aria (ARPA, 2018).

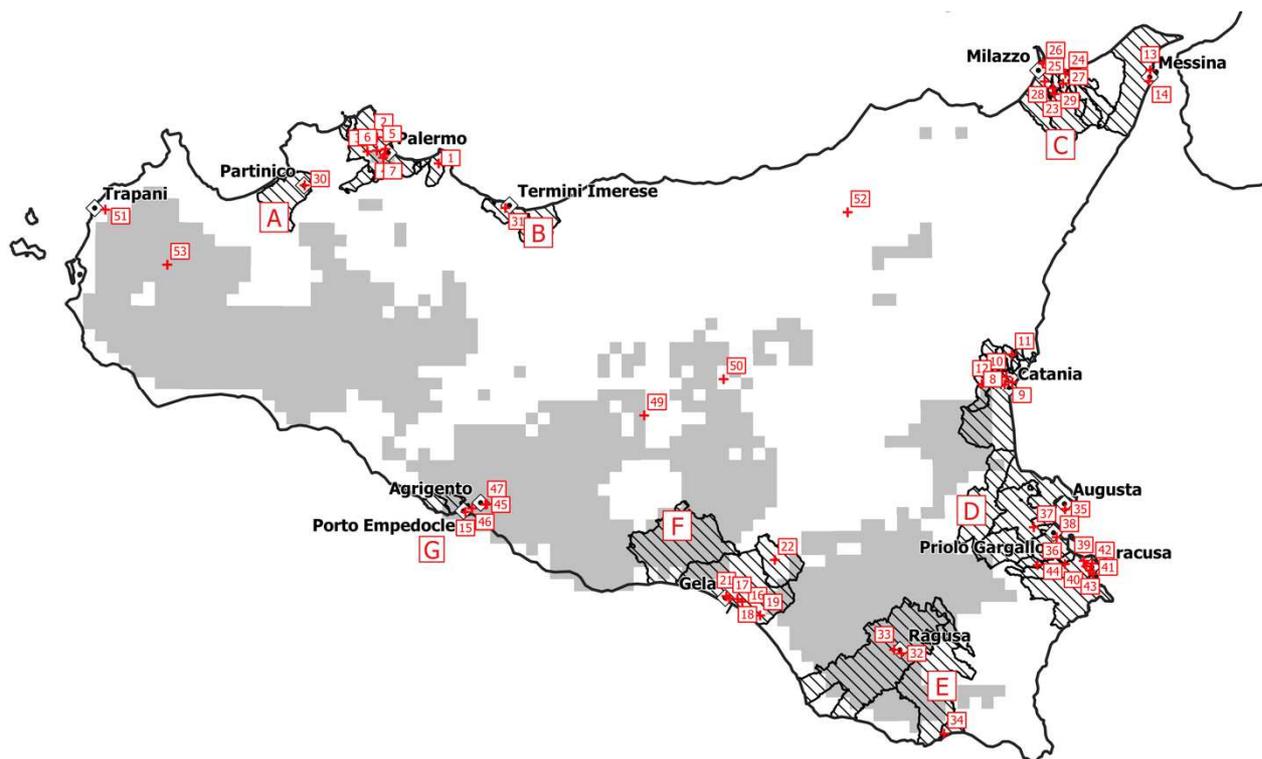
Se si vuole fare un confronto tra le mappe di Fig.s 26 e 27, tenendo presente che i due modelli trattano differenti aspetti del problema (il modello Fuzzy fornisce indicazioni in ordine al grado di sensibilità di interscambio tra celle dal punto di vista ambientale, mentre lo Chimere si basa su modelli di trasporto e dispersione utili al calcolo della deposizione degli inquinanti), si può osservare che nella zona centrale della Sicilia il modello Fuzzy indica bassa affinità tra celle confinanti (zone non colorate), mentre il modello Chimere fornisce le maggiori concentrazioni di deposizione al suolo; viceversa dove si verifica un significativo interscambio tra celle confinanti (i.e. zone grigie indicative di alta affinità ambientale in Fig. 26) le concentrazioni di PM10 stimate da Chimere risultano ricadere in intervalli con più bassa concentrazione. Va sottolineato che il confronto precedente ha scopo puramente qualitativo, poiché i due modelli, oltre a interpretare problematiche diverse, si riferiscono ad intervalli temporali differenti.



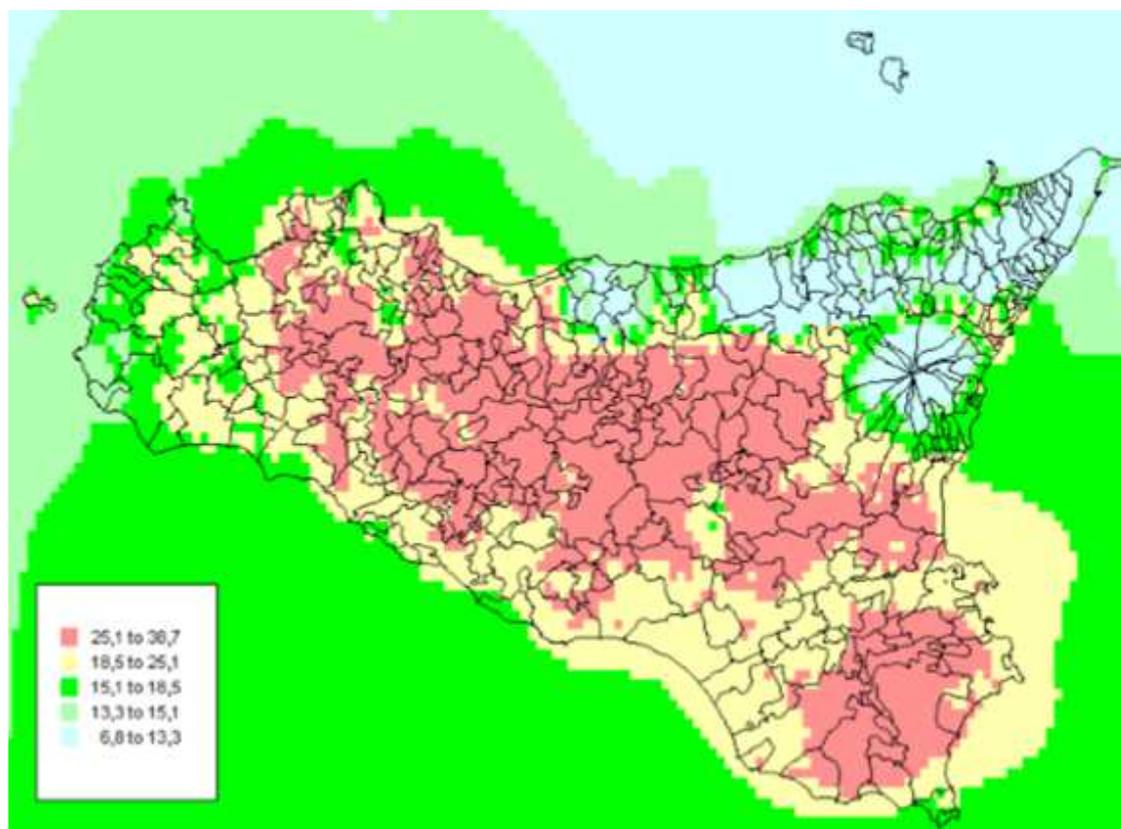
*Fig. 24. Risultati IAATO intersezione per SOx, ottenuti sovrapponendo i layers relativi ai cinque anni in studio, 2010÷2014.*



*Fig. 25. Risultati IAATO intersezione per NOx, ottenuti sovrapponendo i layers relativi ai cinque anni in studio, 2010÷2014.*



*Fig. 26. Risultati IAATO intersezione per PM10, ottenuti sovrapponendo i layers relativi ai cinque anni in studio, 2010÷2014.*



*Fig. 27. Risultati ottenuti applicando il modello Chimere per il calcolo della deposizione del PM10 totale per l'anno 2017*

Va evidenziato che, analizzando i risultati per la zonizzazione urbana nel suo complesso, l'agglomerato di Messina, in cui ovviamente sono presenti emissioni di NOx per traffico veicolare, è contraddistinto da poche celle con valori dell'indice IAATO leggermente superiori a 52 (Fig. 25). Ciò può essere giustificato dalla particolare configurazione orografica della città di Messina che ricade su quattro celle (risoluzione 3x3 km) che si sviluppano lungo la linea di costa. Ciò comporta che le celle con le zone urbane sono confinanti tra loro su due lati (un lato per le celle più esterne), mentre per gli altri lati sono limitrofe a celle che ricadono nella zona sub urbana e marittima, in cui non sono presenti sorgenti. Inoltre, dall'analisi dell'inventario delle emissioni del 2012 si evince che l'area di Messina, rispetto agli altri agglomerati urbani, risulta essere caratterizzata da valori di emissioni di NOx più bassi (mediamente inferiori alla metà), ciò porta a differenze dei valori dell'indice IPA per le diverse aree urbane.

Per quanto riguarda il PM10 (Fig. 26) non si evidenziano, per l'agglomerato di Messina, celle con valore di IAATO superiore a 52. Tuttavia, analizzando i risultati nel particolare la cella all'uscita dell'autostrada (al confine dell'area urbana) è caratterizzata da un valore dell'indice IAATO pari a 51.

Per quanto riguarda le zone industriali di Milazzo e del siracusano, l'indice IPA per SOx e NOx (Fig.s 15 e 16) mostra una evidente pressione ambientale antropica, di contro l'indice IPM (Fig.s 17÷21) indica una bassa affinità dal punto di vista delle condizioni meteorologiche. Ne risulta che il parametro IAATO caratterizza queste aree con celle a bassa affinità ambientale.

Nel paragrafo successivo, sulla base dei risultati dell'indice IAATO intersezione e la zonizzazione descritta nella sezione 2, vengono definiti i sottogruppi delle centraline previste nel PdV che possono essere utilizzate come punti di riferimento per gli studi modellistici.

Nei grafici, le celle del dominio in studio vengono colorate con diverse gradazioni di blu per rappresentare la distribuzione dei valori dell'indice IAATO a partire dal  $Q^{0.85}$ . Il colore blu notte identifica celle con IAATO maggiore di 90.

Si noti che, per quanto riguarda la zona industriale, è stato necessario distinguere le varie aeree utilizzando l'identificazione letterale riportata in Fig. 1.

## **5.1 Zona IT1911, Agglomerato di Palermo**

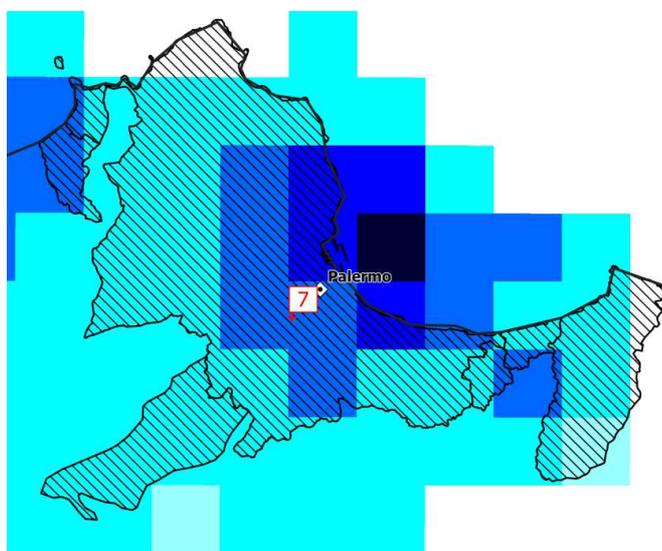
- Per l'inquinante SOx, l'analisi dell'indice IAATO evidenzia un'analogia ambientale che si estende su buona parte della zonizzazione in oggetto. Inoltre, la centralina n. 7 è rappresentativa della zona urbana e suburbana dell'agglomerato di Palermo (Fig. 28a).
- Per l'inquinante NOx, si evidenzia una buona analogia ambientale nell'area cittadina con maggiore traffico veicolare. L'insieme dei punti di misura rappresentativi di tale area, utili a supporto degli

studi modellistici, sono da scegliersi tra le centraline n. 2÷7 (Fig. 28b). Se si vuole effettuare una differenza tra la zona urbana e suburbana, possono essere fatte le seguenti scelte:

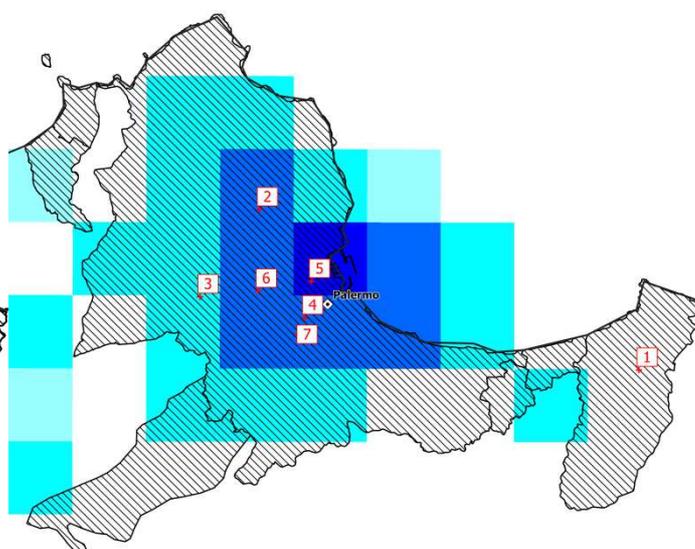
- Per la zona urbana, il sottogruppo è costituito dalle centraline n. 2, 4, 5, 6, 7;
- Per la zona suburbana, il sottogruppo è costituito dalla sola centralina n. 3.

La centralina n. 1 ricade in un'area in cui le affinità ambientali sono basse (IAATO<52), quindi, rappresenta un singolo punto di misura per il riferimento modellistico (Fig. 28b).

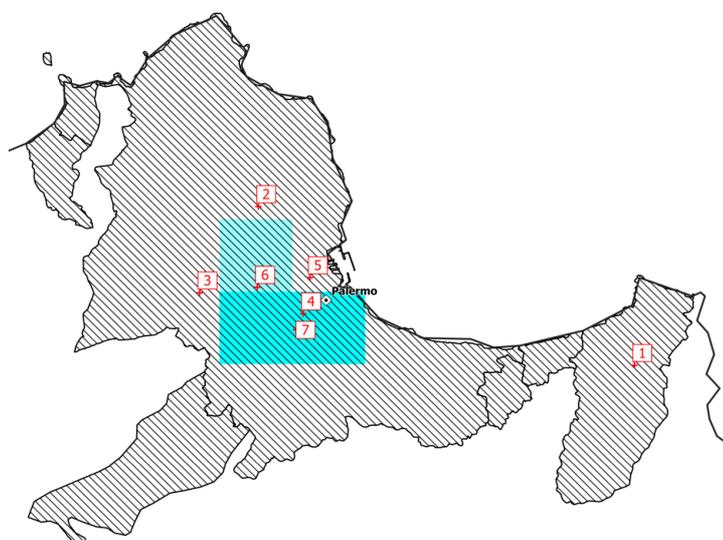
- Per l'inquinante PM10, sulla base dei risultati riportati in Fig. 28c, si evidenzia una discreta analogia ambientale (IAATO tra 52 e 54, corrispondenti ai valori più bassi della classe  $Q^{0,85}$ ) e le centraline n. 4, 6, 7 sono rappresentative di un'area urbana tuttavia limitata.



**Fig. 28a.** Indice IAATO per l'inquinante SOx nell'agglomerato urbano di Palermo.



**Fig. 28b.** Indice IAATO per l'inquinante NOx nell'agglomerato urbano di Palermo

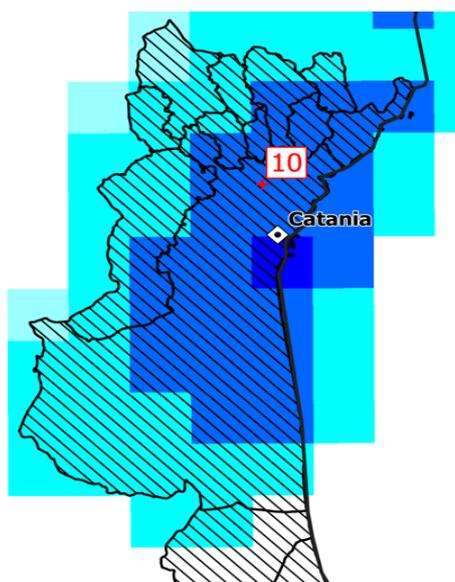


**Fig. 28c.** Indice IAATO per l'inquinante PM10 nell'agglomerato urbano di Palermo.

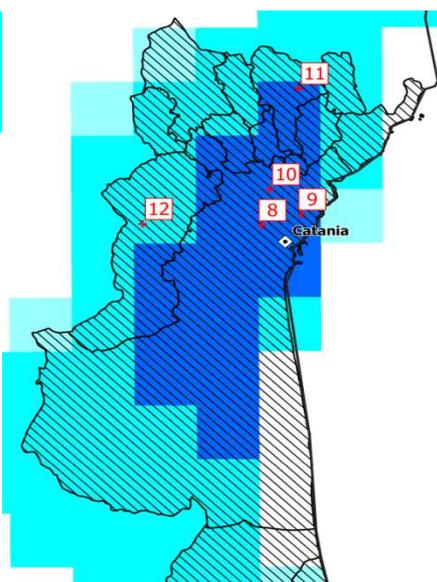
Centralina	Denominazione
[1]	Bagheria
[2]	PA - Belgio
[3]	PA - Boccadifalco
[4]	PA - Indipendenza
[5]	PA - Castelnuovo
[6]	PA - Di Blasi
[7]	PA - UNIPA

## 5.2 Zona IT1912, Agglomerato di Catania

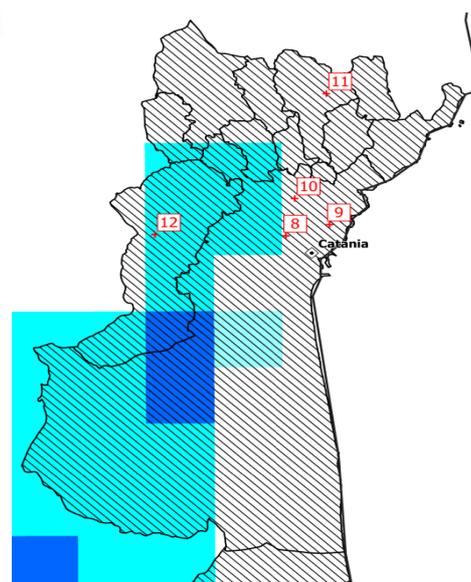
- Per l'inquinante SO<sub>x</sub>, risulta che la centralina n. 10 consente di rappresentare un territorio che si estende lungo la costa del mar Ionio, dalla piana di Catania fino alla zona prossima alla città di Acireale. Quindi, tale centralina può essere considerata un riferimento per l'agglomerato urbano in oggetto (Fig. 29a).
- Per l'inquinante NO<sub>x</sub>, le centraline n. 8÷12 costituiscono un sottogruppo di riferimento (Fig. 29b) in quanto il territorio, in cui sono ubicate, presenta buone analogie ambientali. Se si vuole effettuare una differenza tra la zona urbana e suburbana, possono essere fatte le seguenti scelte:
  - Per la zona urbana, il sottogruppo è costituito dalle centraline n. 8, 9, 10, 11;
  - Per la zona suburbana, il sottogruppo è costituito dalla sola centralina n. 12.
- Per l'inquinante PM<sub>10</sub>, l'agglomerato non presenta elevate analogie ambientali. Solo la centralina n. 12 rappresenta una limitata porzione dell'area urbana (Fig. 29c).



**Fig. 29a.** Indice IAATO per l'inquinante SO<sub>x</sub> nell'agglomerato urbano di Catania.



**Fig. 29b.** Indice IAATO per l'inquinante NO<sub>x</sub> nell'agglomerato urbano di Catania.

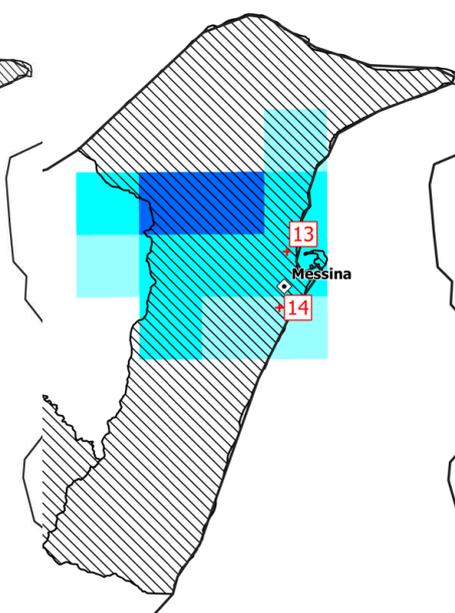
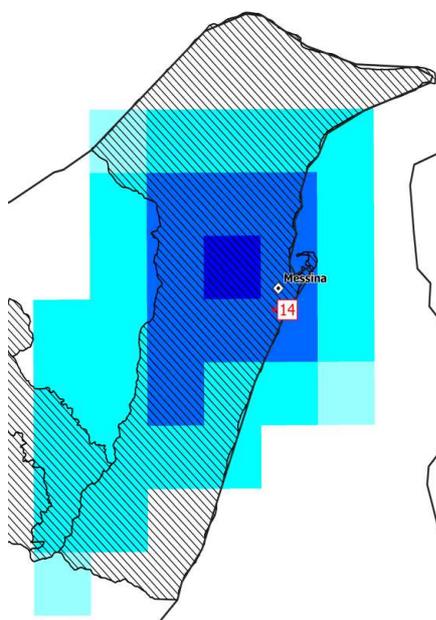


**Fig. 29c.** Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nell'agglomerato urbano di Catania.

Centralina	Denominazione
[8]	CT - Garibaldi
[9]	CT - Veneto
[10]	CT - Gioieni
[11]	San Giovanni La Punta
[12]	Misterbianco

### 5.3 Zona IT1913 Agglomerato di Messina

- Per l'inquinante SO<sub>x</sub>, la centralina n. 14 è localizzata in una cella con elevato valore dell'indice IAATO, per cui è rappresentativa della zona urbana e suburbana di Messina (Fig. 30a).
- Per l'inquinante NO<sub>x</sub>, le centraline n. 13 e 14 rappresentano un sottogruppo di punti di misura per il riferimento modellistico, tenendo presente i risultati riportati in Fig. 30b.
- Per l'inquinante PM<sub>10</sub>, le centraline n. 13 e 14 rappresentano singoli punti di misura per il riferimento modellistico, tenendo presente che l'indice IAATO è risultato minore di 52, come si evince dalle Fig. 30c.



*Fig. 30b. Indice IAATO per l'inquinante NO<sub>x</sub> nell'agglomerato urbano di Messina*



*Fig. 30c. Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nell'agglomerato urbano di Messina.*

Centralina	Denominazione
[13]	ME - Bocchetta
[14]	ME - Villa Dante

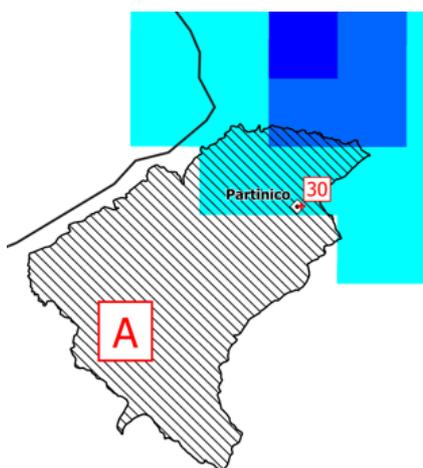
### 5.4 Zona IT1914, Aree Industriali

Per semplificare la descrizione dei risultati riguardanti la zona industriale, si è attribuita una lettera identificativa alle varie aree che fanno parte della zona IT1914, come riportato in Fig. 1.

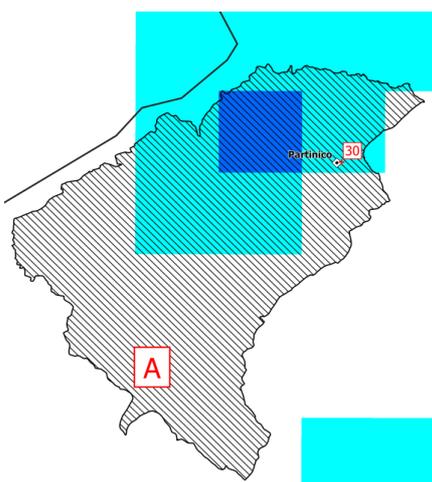
Di seguito si farà riferimento a questa indicizzazione.

## Zona A

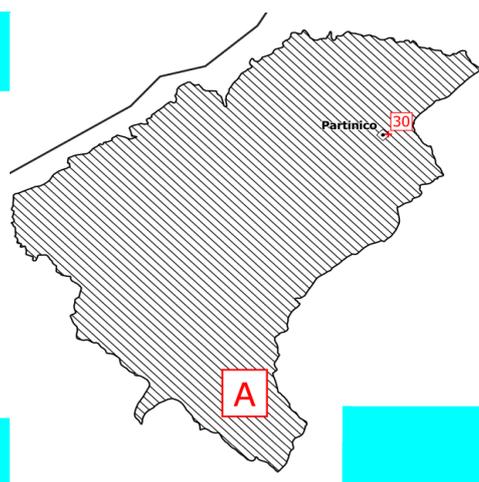
- Per gli inquinanti SOx e NOx, le Fig.s 31a e 31b evidenziano che la centralina n. 30 è rappresentativa di una limitata area della zonizzazione A.
- Per l'inquinante PM10 la centralina n. 30 è rappresentativa della cella in cui viene effettuata la misura, come si evince dalla Fig. 31c.



**Fig. 31a.** Indice IAATO per l'inquinante SOx nella Zona A dell'IT1914



**Fig. 31b.** Indice IAATO per l'inquinante NOx nella Zona A dell'IT1914

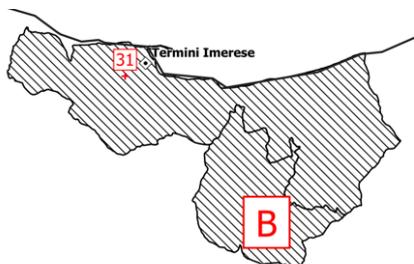


**Fig. 31c.** Indice IAATO per l'inquinante PM10 nella Zona A dell'IT1914

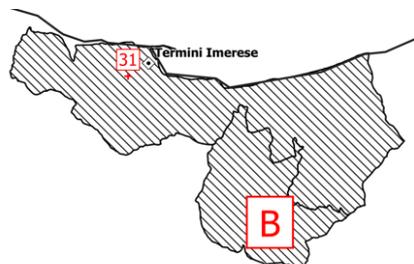
Centralina	Denominazione
[30]	Partinico

## Zona B

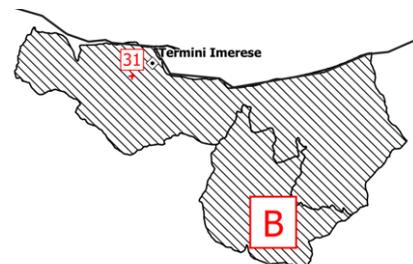
- Per tutti gli inquinanti, la centralina n. 31 è da considerarsi singolo punto di riferimento ai fini modellistici, come si evince dalle Fig.s 32a, 32b, 32c.



**Fig. 32a.** Indice IAATO per l'inquinante SOx nella Zona B dell'IT1914



**Fig. 32b.** Indice IAATO per l'inquinante NOx nella Zona B dell'IT1914

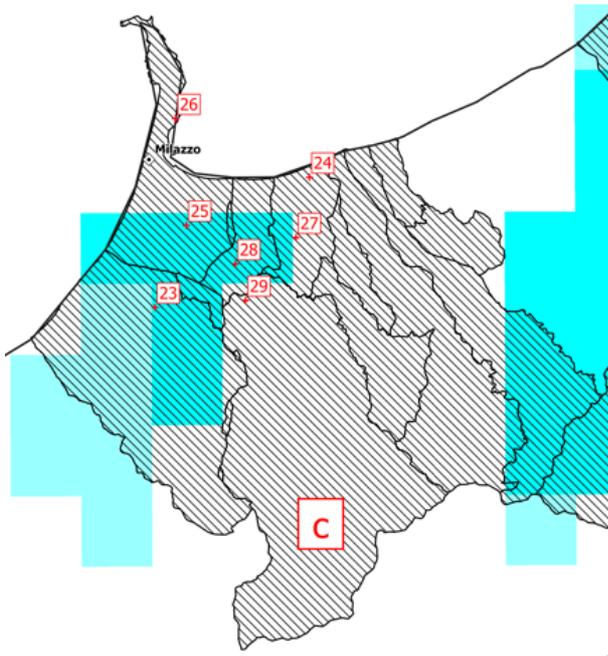


**Fig. 32c.** Indice IAATO per l'inquinante PM10 nella Zona B dell'IT1914

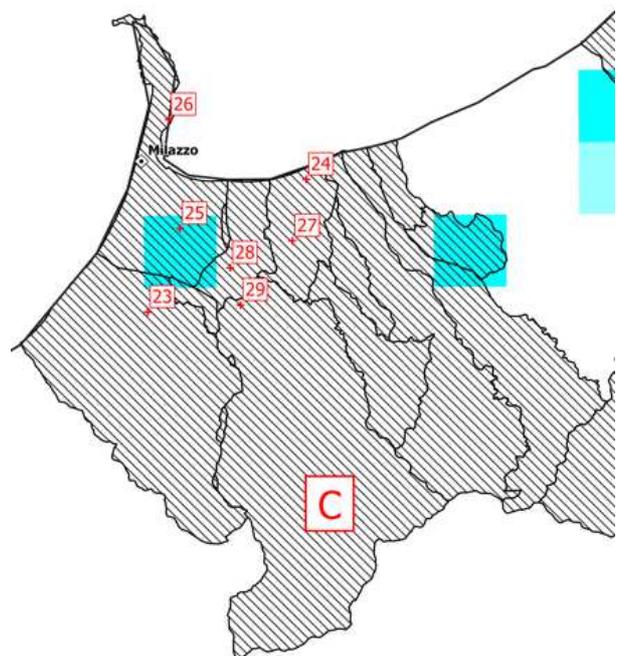
Centralina	Denominazione
[31]	Termini Imerese

## Zona C

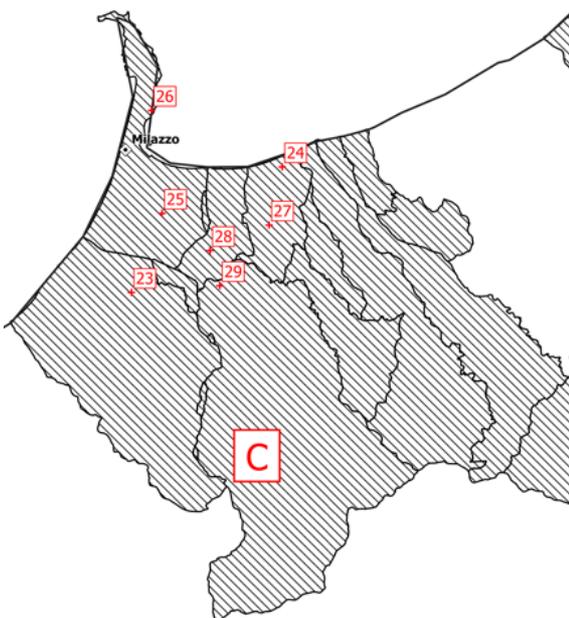
- Per l'inquinante SO<sub>x</sub> le centraline n. 23, 25 e 28 sono da considerarsi un sottogruppo rappresentativo di una limitata porzione ovest dell'area C. Va evidenziato, tuttavia, che l'affinità ambientale è caratterizzata da valori dell'indice IAATO che corrispondono al limite inferiore di accettabilità (Fig. 33a).
- Per gli inquinanti NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub> le centraline n. da 23 a 29 sono da considerarsi singoli punti di riferimento ai fini modellistici, come si evince dalle Fig.s 33b, 33c, per cui non sono rappresentative dell'AERCA del Comprensorio del Mela nel suo complesso.



**Fig. 33a.** Indice IAATO per l'inquinante SO<sub>x</sub> nella Zona C dell'IT1914



**Fig. 33b.** Indice IAATO per l'inquinante NO<sub>x</sub> nella Zona C dell'IT1914



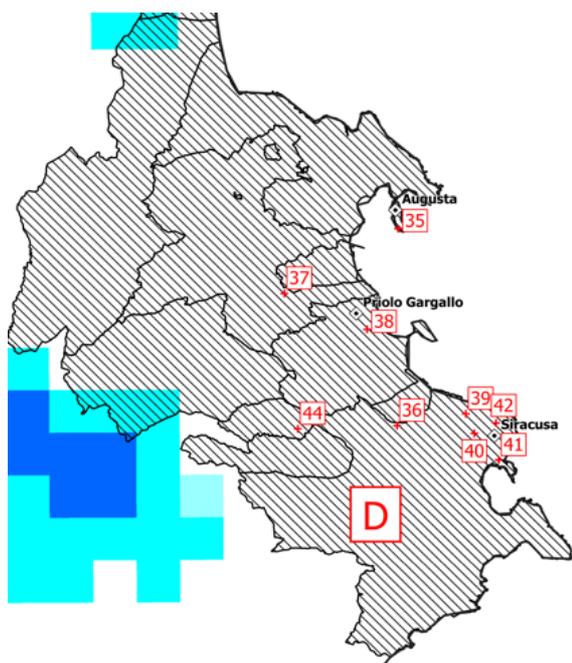
**Fig. 33c.** Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nella Zona C dell'IT1914

Centralina	Denominazione
[23]	Barcellona P. G.
[24]	Pace del Mela
[25]	Milazzo - Termica
[26]	Milazzo A2A
[27]	Pace del Mela A2A
[28]	S. Filippo del Mela A2A - S. Filippo del Mela
[29]	S. Lucia del Mela

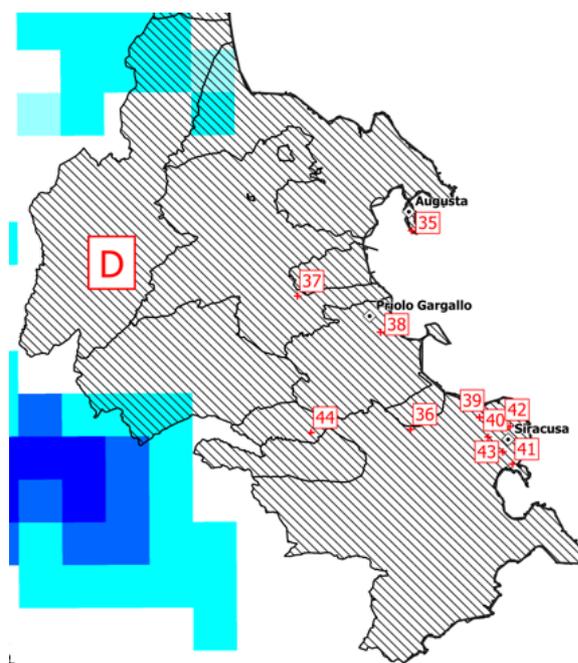
## Zona D

- Per gli inquinanti SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>, le centraline n. da 35 a 44 sono da considerarsi singoli punti di riferimento ai fini modellistici, come si evince dalle Fig.s 34a, 34b, 34c.

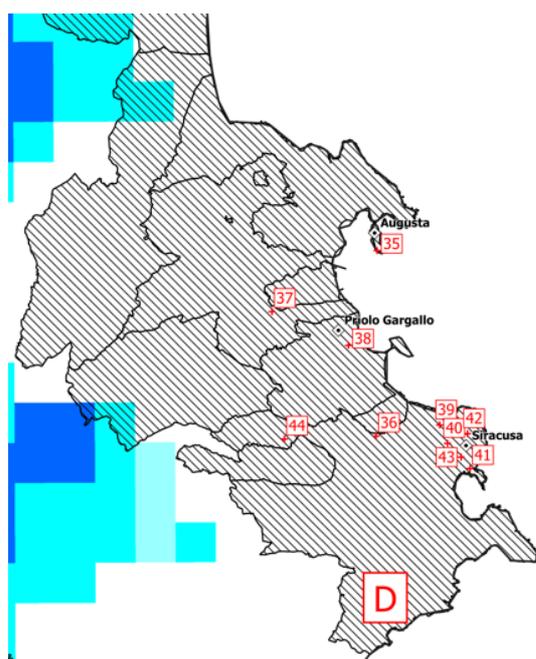
Nessuna delle stazioni prevista nel PdV per l'AERCA di Priolo è, quindi, rappresentativa di aree estese per la zonizzazione in esame.



*Fig. 34a. Indice IAATO per l'inquinante SO<sub>x</sub> nella Zona D dell'IT1914*



*Fig. 34b. Indice IAATO per l'inquinante NO<sub>x</sub> nella Zona D dell'IT1914*

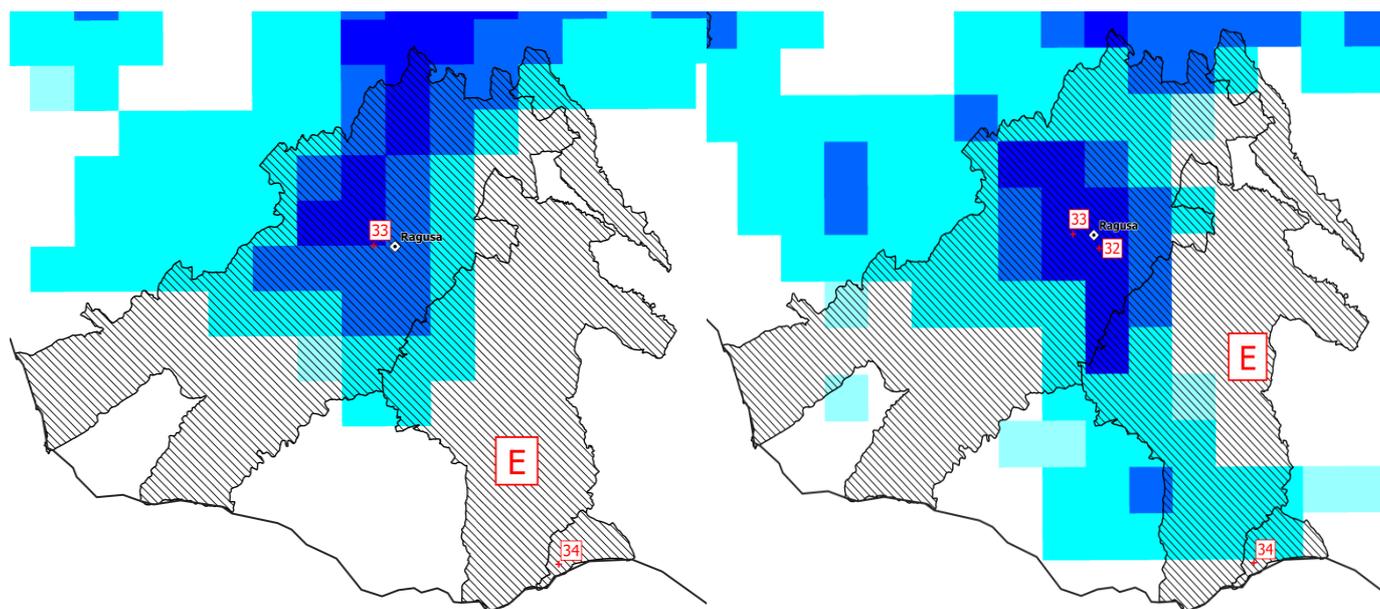


*Fig. 34c. Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nella Zona D dell'IT1914*

Centralina	Denominazione
[35]	Augusta
[36]	SR - Belvedere
[37]	Melilli
[38]	Priolo
[39]	SR - Via Gela
[40]	SR - Asp Pizzuta
[41]	SR - Verga
[42]	SR - Pantheon
[43]	SR - Teracati
[44]	Solarino

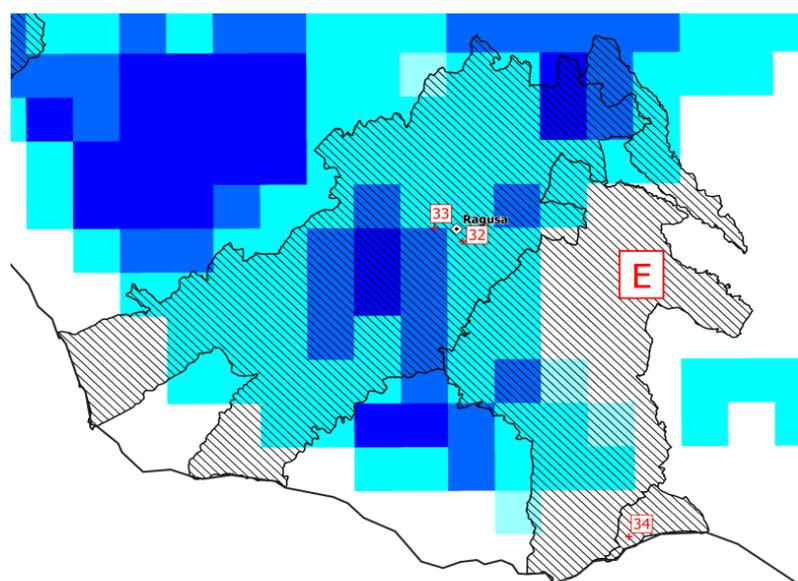
## Zona E

- Per l'inquinante SOx, la centralina n. 33 è rappresentativa di una parte della zona E, mentre la centralina n. 34 è da considerarsi singolo punto di riferimento ai fini modellistici, come si evince dalla Fig. 35a.
- Per gli inquinanti NOx e PM10, dalle Fig.s 35b e 35c, si deduce che le centraline n. 32 e 33 sono da considerarsi un sottogruppo di punti di riferimento rappresentativo dell'area industriale del ragusano, mentre la centralina n. 34 è da considerarsi singolo punto di riferimento.



*Fig. 35a. Indice IAATO per l'inquinante SOx nella Zona dell'IT1914*

*Fig. 35b. Indice IAATO per l'inquinante NOx nella Zona dell'IT1914*

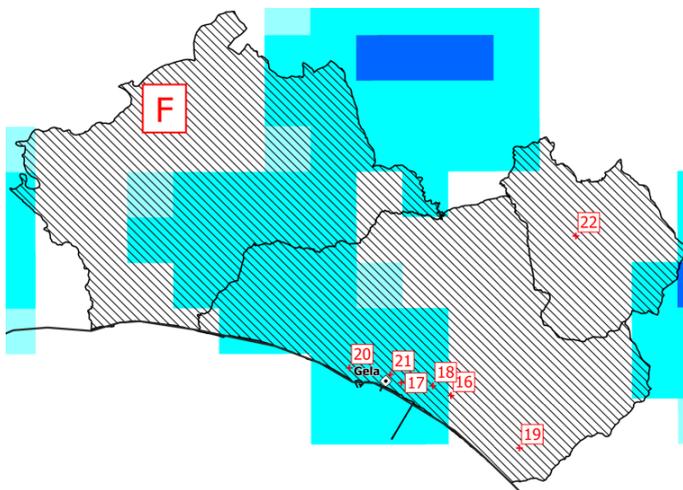


*Fig. 35c. Indice IAATO per l'inquinante PM10 nella Zona E dell'IT1914*

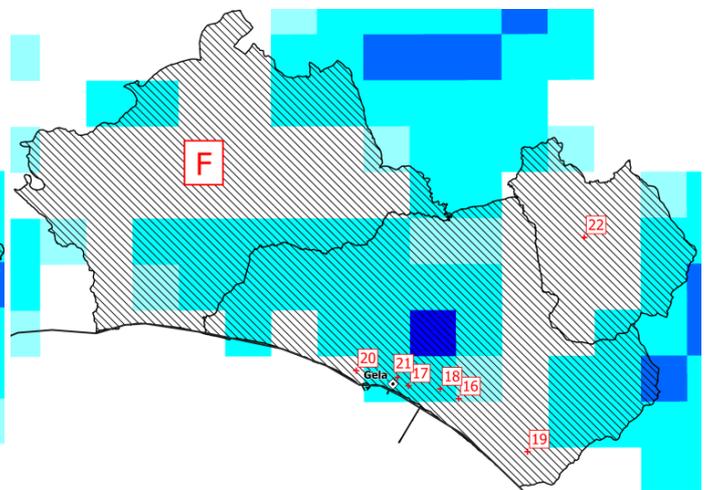
Centralina	Denominazione
[32]	RG - Campo d'atletica
[33]	RG - Villa Archimede

## Zona F

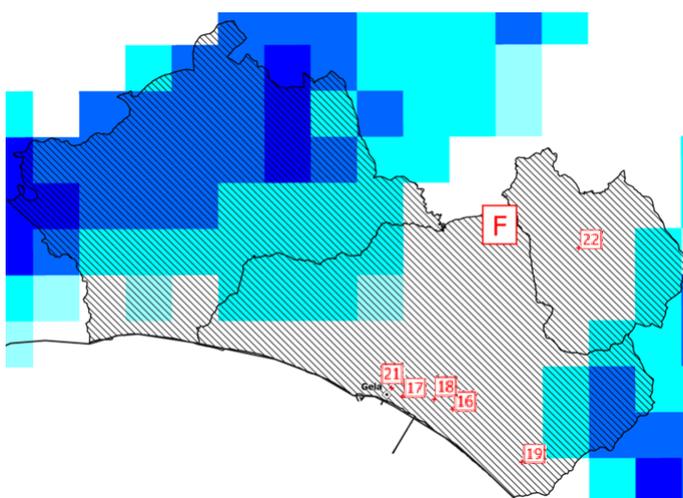
- Per l'inquinante SO<sub>x</sub>, le centraline n. 17, 18, 20 e 21 sono da considerarsi un sottogruppo di riferimento ai fini modellistici e consentono la rappresentatività di una parte dell'area della zona F (Fig. 36a). Le centraline 16, 19 e 22 sono invece da considerarsi singoli punti di riferimento.
- Per l'inquinante NO<sub>x</sub>, dalla Fig. 36b si deduce che le centraline da n. 16 a 18, e n. 21 sono da considerarsi un sottogruppo di punti di riferimento ai fini modellistici, mentre le centraline n. 19, 20, e 22 sono singoli punti di riferimento.
- Per l'inquinante PM<sub>10</sub>, dalla Fig. 36c si deduce che le centraline da n.16 a 19, e n. 21 e 22 sono da considerarsi singoli punti di riferimento.



**Fig. 36a.** Indice IAATO per l'inquinante SO<sub>x</sub> nella Zona F dell'IT1914



**Fig. 36b.** Indice IAATO per l'inquinante NO<sub>x</sub> nella Zona F dell'IT1914



**Fig. 36c.** Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nella Zona F dell'IT1914

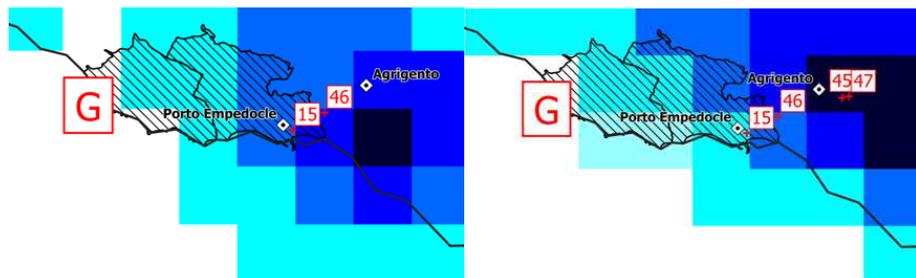
Centralina	Denominazione
[16]	Gela - Ex autoparco comunale
[17]	Gela tribunale
[18]	Gela - Agip Mineraria
[19]	Gela - Biviere
[20]	Gela - Capo Soprano
[21]	Gela - Venezia
[22]	Niscemi

Va osservato che per Gela, così come per il territorio costiero sud della Sicilia, le componenti del vento delle condizioni meteorologiche esercitano una pressione più significativa rispetto al versante nord della

regione. Quindi, essendo favorito lo scambio tra celle, l'indice che rappresenta l'analogia ambientale tra aree confinanti risulta essere più elevato.

## Zona G

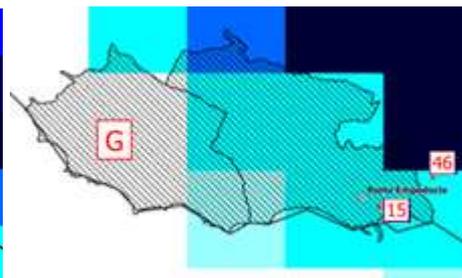
- Per tutti gli inquinanti, la centralina n. 15 è da considerarsi punto di riferimento ai fini modellistici, come si evince dalla Fig.s 37a, 37b, 37c.



**Fig. 37a.** Indice IAATO per l'inquinante SOx nella Zona G dell'IT1914



**Fig. 37b.** Indice IAATO per l'inquinante NOx nella Zona G dell'IT1914



**Fig. 37c.** Indice IAATO per l'inquinante PM<sub>10</sub> nella Zona G dell'IT1914

Centralina	Denominazione
[15]	Porto Empedocle
[45]	AG- Centro
[46]	AG - Monserrato
[47]	AG - ASP

Nella Tab. 11 vengono riassunti i sottogruppi delle centraline di riferimento per gli studi modellistici sulla base della zonizzazione regionale in vigore per le aree urbane. Nella Tab. 12 vengono riportati, invece, i sottogruppi di riferimento per le aree industriali.

**Tab. 11.** Descrizione dei sottogruppi o singoli punti di misura riguardanti le centraline, previste nel PdV, che possono essere considerate di riferimento per gli studi modellistici per la zonizzazione delle aree urbane (i sottogruppi sono riportati nella stessa cella).

Zonizzazione regione Sicilia	Sottogruppi per SOx	Sottogruppi per NOx	Sottogruppi per PM10
<b>Zona IT1911</b>	7	2, 3, 4, 5, 6, 7	4, 7
			1
			2
			3
			5
			6
<b>Zona IT1912</b>	10	8, 9, 10, 11, 12	8
			9
			10
			11
			12
<b>Zona IT1913</b>	14	13, 14	13
			14

**Tab. 12.** Descrizione dei sottogruppi o singoli punti di misura riguardanti le centraline, previste nel PdV, che possono essere considerate di riferimento per gli studi modellistici per la zonizzazione delle aree industriali (i sottogruppi sono riportati nella stessa cella).

Zona IT1911	Sottogruppi per SOx	Sottogruppi per NOx	Sottogruppi per PM10
Zona A	30	30	30
Zona B	31	31	31
Zona C	23, 25, 28	23	23
		24	24
		25	25
	24	26	26
	26	27	27
	27	28	28
	29	29	29
Zona D	35	35	35
	36	36	36
	37	37	37
	38	38	38
	39	39	39
	40	40	40
	41	41	41
	42	42	42
	44	43	43
44		44	
Zona E	33	32, 33	32, 33
	34	34	34
Zona F	17, 18, 20, 21	16, 17, 18, 21	16
			17
			18
	16	19	19
	19	20	21
	22	22	22
Zona G	15	15	15

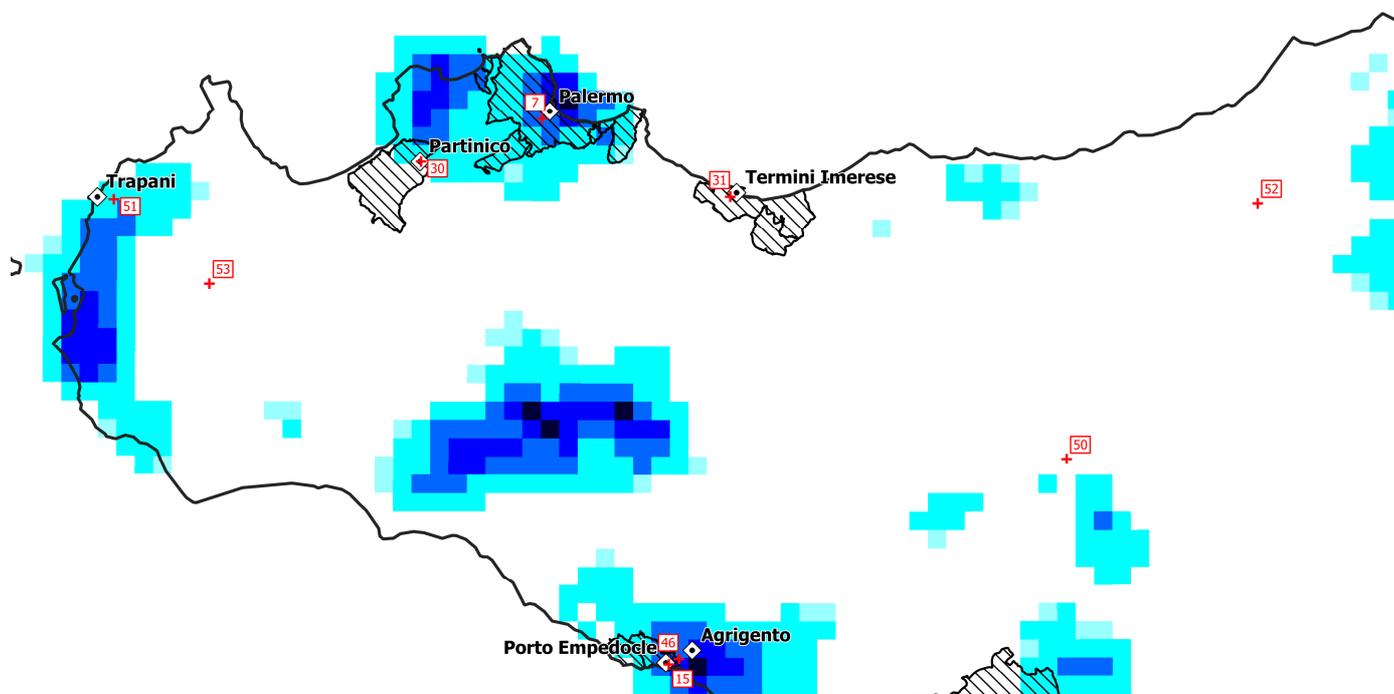
## 5.5 Zona IT1915

Per la zonizzazione definita “altro”, essendo l’area regionale appartenente a questa classificazione molto estesa, ovviamente, le centraline sono rappresentative delle pressioni ambientali locali, per cui sono tutte da considerarsi singoli punti di misura per il riferimento modellistico. Tuttavia, possono fare le seguenti osservazioni:

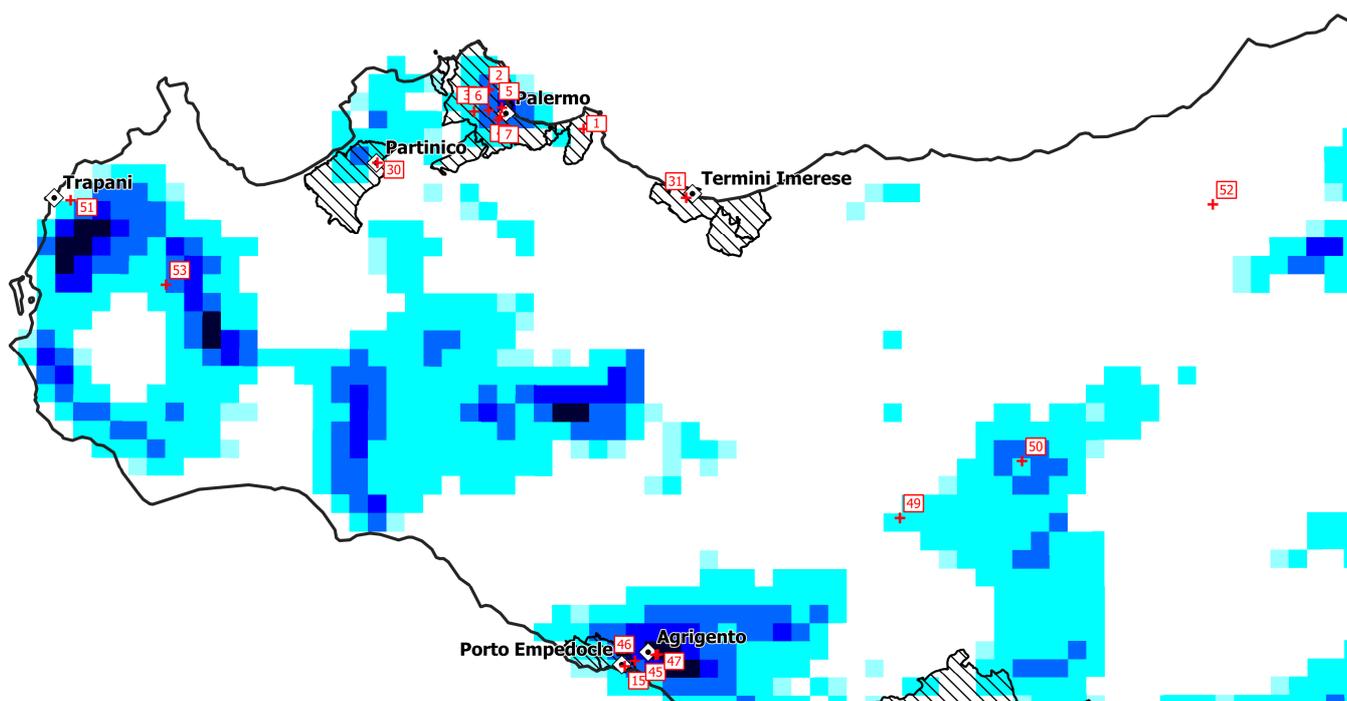
- per l’inquinante SOx, l’analisi dell’indice IAATO riportato in Fig. 37a evidenzia che la centralina n. 46 può essere un riferimento modellistico per un’area limitata della zona confinante con la città di Agrigento. Dalla Fig. 38a è possibile notare che la centralina n. 51 ricade in un’area caratterizzata da celle con indice IAATO che ha valori prossimi al limite inferiore di accettabilità, mentre le centraline n. 50, 52 e 53 ricadono in aree in cui le analogie ambientali hanno un effetto primariamente locale (IAATO<52).
- Per l’inquinante NOx, le centraline n. 45÷47 possono costituire un sottogruppo di riferimento modellistico, che consente di coprire parte del territorio urbano e suburbano di Agrigento (Fig.

37b). Le centraline n. 49÷53 ricadono in aree molto distanti tra loro. Inoltre, tali zone sono caratterizzate da celle con indice IAATO prossimo al limite inferiore di accettabilità (Fig. 38b).

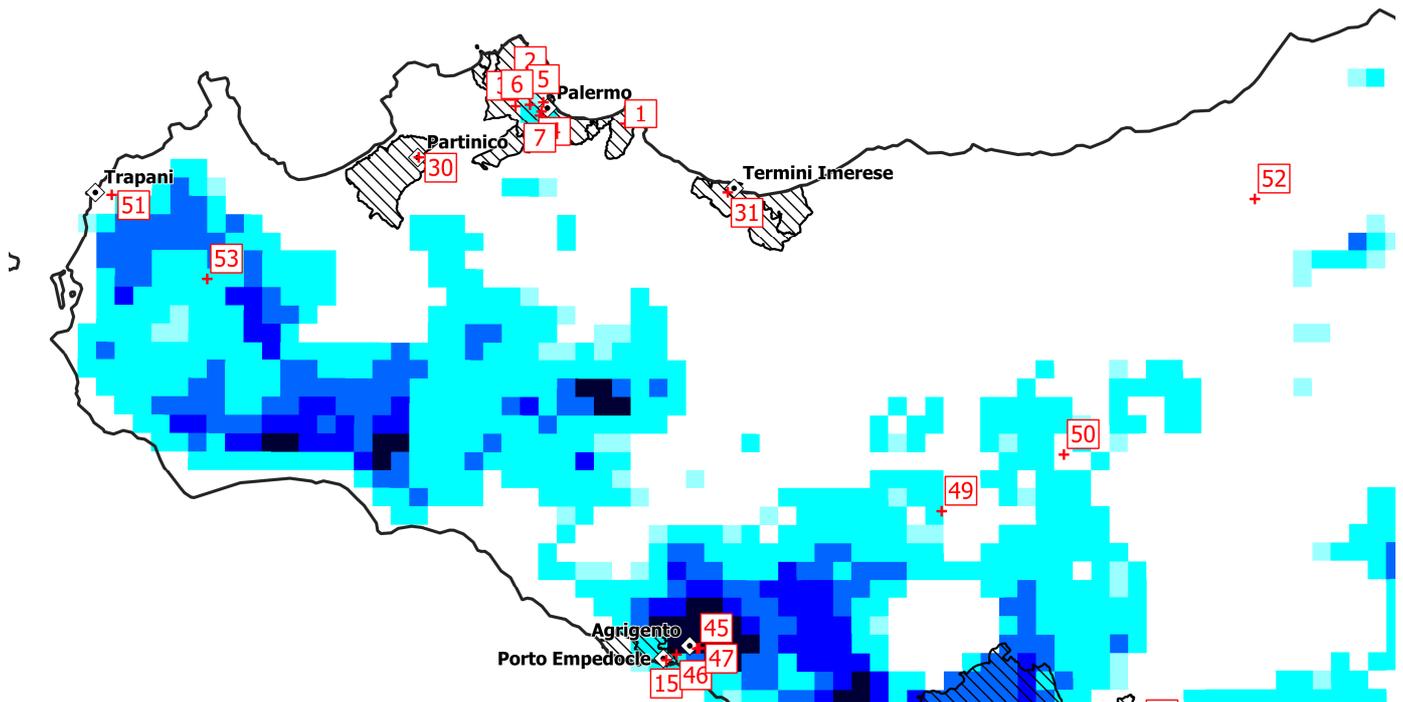
- Per l'inquinante PM10, le centraline 45÷47 possono costituire un sottogruppo per il riferimento modellistico che copre parte del territorio urbano e suburbano di Agrigento. Per quanto riguarda le centraline n.49÷53 possono essere estese le considerazioni fatte per l'inquinante NOx (Fig. 38c).



*Fig. 38a. Indice IAATO per l'inquinante SOx nella Zona IT1915.*



*Fig. 38b. Indice IAATO per l'inquinante NOx nella Zona IT1915*



*Fig. 38c. Indice IAATO per l'inquinante PM10 nella Zona IT1915*

Centralina	Denominazione
[45]	AG- Centro
[46]	AG - Monserrato
[47]	AG - ASP
[49]	Caltanissetta
[50]	Enna
[51]	Trapani
[52]	Cesarò Femmina Morta
[53]	TP - Diga Rubino

## 6. Lavoro di validazione dei risultati

Per validare i risultati descritti nei paragrafi precedenti, sono state svolte analisi di sensibilità variando, ad esempio, i valori degli insiemi Fuzzy di input, i metodi di aggregazione dell'indice IAATO, i pesi utilizzati per la costruzione del sistema FIS e studi di robustezza della metodologia attraverso analisi di perturbazione della velocità e frequenza del vento. Inoltre, è stato effettuato un lavoro di confronto con i risultati ottenuti utilizzando la tecnica cluster analysis (o analisi di aggregazione), e il metodo K-mean.

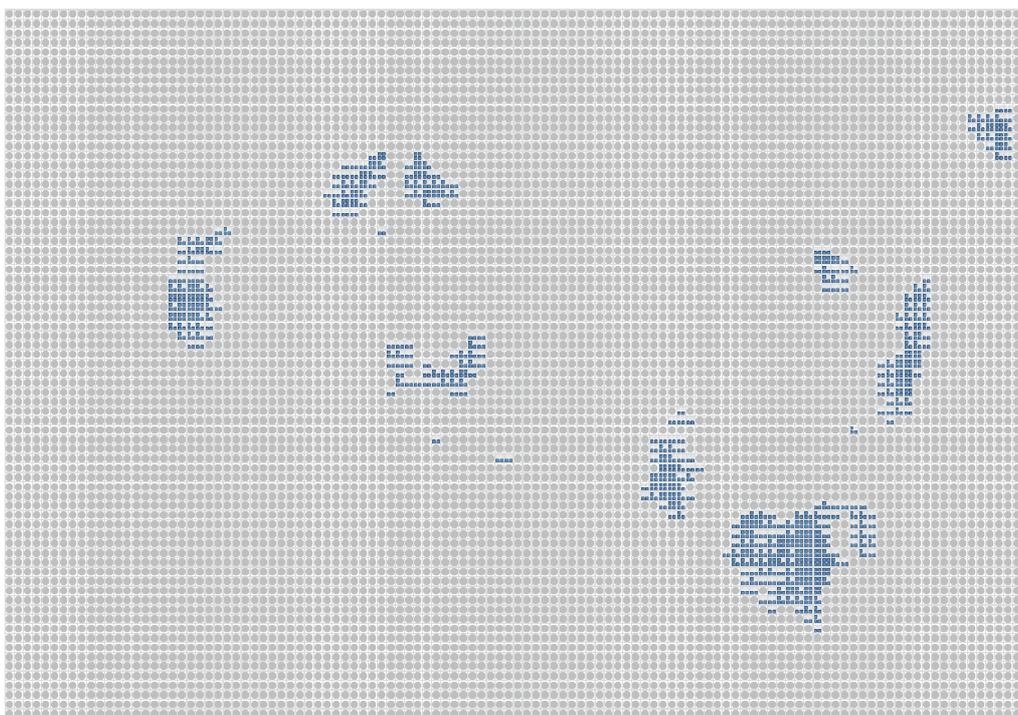
Lo scopo della cluster analysis è raggruppare i dati secondo criteri di similarità. Tali criteri consentono di determinare un numero di classi in modo tale che le osservazioni siano il più possibile omogenee all'interno delle classi ed il più possibile disomogenee tra le diverse classi.

La tecnica è stata impiegata per esaminare le similitudini tra gli indici IPA e IPM, per i cinque anni in studio.

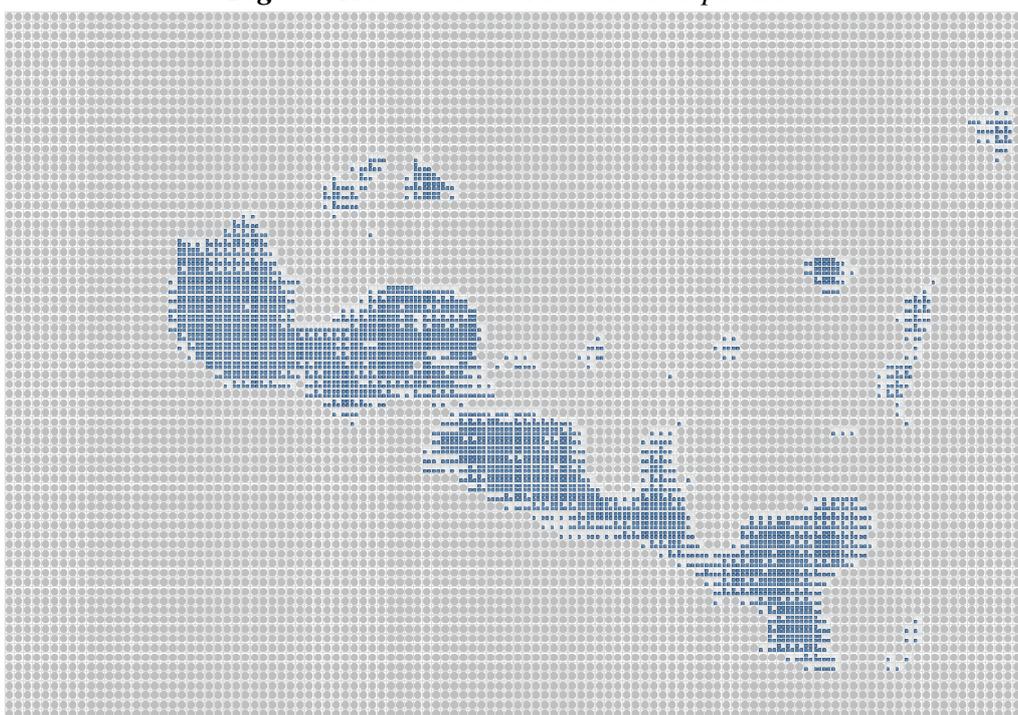
La Fig.s. 39, 40 e 41, riportano i risultati ottenuti dalla cluster analysis per gli inquinanti in esame.

Il confronto con le Fig.s. 24, 25 e 26 permette di osservare che la metodologia messa a punto per il calcolo dell'indice IAATO fornisce risultati congruenti con quelli ottenuti dalla cluster analysis.

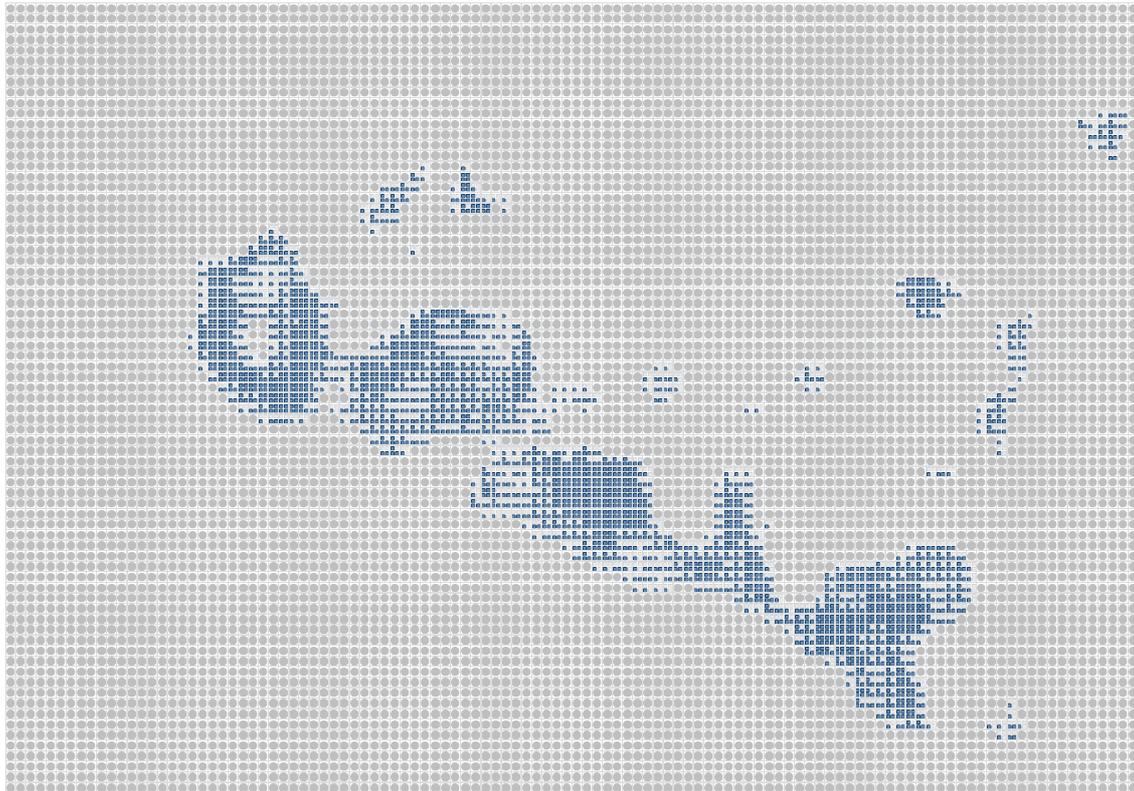
Si nota, tuttavia, una differenza dei due metodi per la zona di Messina e l'inquinante PM10 (Fig.s 26 e 41). Infatti, la cluster analysis evidenzia una affinità tra celle che non viene, invece, interpretata correttamente dall'indice IAATO.



*Fig. 39. Risultati dell'analisi cluster per SOx*



*Fig. 40. Risultati dell'analisi cluster per NOx*



*Fig. 41. Risultati dell'analisi cluster per PM10*

## 7. Conclusioni

Nell'ambito della presente attività di ricerca è stata messa a punto una nuova metodologia, basata sulla teoria degli insiemi Fuzzy che consente di valutare un nuovo indice, chiamato IAATO (Indice di Affinità Ambientale del Territorio), finalizzato a trovare relazioni esistenti tra aree oggetto di analogie ambientali connesse alle emissioni di inquinanti di origine antropica e naturale.

IAATO è un indice composito, dedotto dalla combinazione di un indicatore di pressione meteorologica (IPM) che, per celle confinanti nel dominio di calcolo, indaga le affinità connesse ai campi di vento tridimensionali e l'indice di pressione antropica (IPA), che trova relazioni tra le caratteristiche orografiche del territorio e l'intensità delle sorgenti inquinanti. Per le portate di inquinante sono state utilizzate le informazioni fornite in (ARPA, 2012) riguardanti l'inventario delle emissioni su scala regionale.

L'IPM viene valutato elaborando i dati di frequenza e velocità del vento ottenuti utilizzando i risultati delle simulazioni CALMET, un modello meteorologico diagnostico che, a partire da dati osservati e geofisici, produce campi orari tridimensionali di vento e bidimensionali di diverse variabili meteorologiche e micrometeorologiche.

Per le simulazioni sono state utilizzate le misure di temperatura, umidità relativa, radiazione solare incidente, direzione e velocità del vento di 77 stazioni superficiali, distribuite sul territorio siciliano,

insieme ai dati della stazione di osservazione profilometrica del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, ubicata presso l'aeroporto di Trapani-Birgi.

Il calcolo dell'indice IAATO ha riguardato gli inquinanti SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>, per un periodo temporale di cinque anni (dal 2010 al 2014).

Va sottolineato che sono state svolte analisi di sensibilità, variando i valori degli insiemi Fuzzy di input, i metodi di aggregazione dell'indice IAATO e i pesi utilizzati per la costruzione del sistema FIS, nonché studi di robustezza della metodologia, eseguendo procedure di perturbazioni dei valori della velocità e frequenza del vento. Queste attività hanno permesso di confermare la solidità e la coerenza della metodologia Fuzzy proposta.

Per rafforzare le conclusioni ottenute dall'analisi dei risultati IAATO, è stata svolta anche una cluster analysis (o analisi di aggregazione), che ha confermato le conclusioni riportate nel presente rapporto.

L'analisi dei risultati ha consentito di determinare i sottogruppi, dell'insieme delle stazioni del PdV, più adatte per gli studi modellistici e per lo scambio di dati previsto con decisione della Commissione Europea 97/101/CE del 27 gennaio 1997 (Exchange of Information – EoI).

L'analisi dettagliata dei risultati mostra che:

- per gli agglomerati di Palermo, Messina e Catania, è stato possibile individuare sottogruppi di centraline di riferimento per il supporto modellistico. Alcune delle stazioni degli agglomerati di Palermo e Catania sono rappresentative anche delle aree sub-urbane;
- per gli agglomerati industriali delle zone di Termini Imerese (zona B, Fig. 1) e di Siracusa (zona D), l'indice IAATO risulta essere inferiore a 52, valore soglia imposto per l'individuazione di buone affinità territoriali in termini di analogie ambientali. Pertanto, le centraline che insistono in queste aree risultano essere singoli punti di misura per il riferimento modellistico, senza possibilità di estensione alle celle confinanti. Di contro, per gli agglomerati industriali di Ragusa (zona E, Fig. 1) e Gela (zona F), l'indice IAATO permette di individuare sottogruppi di centraline di riferimento, che consentono una rappresentatività di una parte delle aree territoriali che caratterizzano la zonizzazione di appartenenza.
- per quanto riguarda la zona di Milazzo, soltanto per l'inquinante SO<sub>x</sub> è possibile individuare un sottogruppo di 3 stazioni che è rappresentativo di una limitata porzione ovest dell'area C. Tuttavia, va sottolineato che tale area è caratterizzata da valori dell'indice IAATO prossimi al limite inferiore di accettabilità.
- nella zona D, che notoriamente è caratterizzata da una notevole presenza industriale in ragione del polo "Augusta-Priolo-Melilli", l'indice IAATO indica che le stazioni di misura sono autoreferenti, per cui non consentono di rappresentare altra porzione del territorio al di fuori della cella in cui sono ubicate. Pertanto, in queste aree, con celle poco "comunicanti" dal punto

di vista ambientale, la valutazione della qualità dell'aria potrebbe essere definita attraverso modelli di dispersione e trasporto degli inquinanti dedicati, opportunamente validati e basati su domini di calcolo con elevata risoluzione.

- per la zonizzazione definita “altro”, le centraline sono rappresentative delle pressioni ambientali locali, per cui sono tutte da considerarsi singoli punti di misura per il riferimento modellistico. Ciò era da attendersi, tenendo presente che la loro rappresentatività riguarda aree del territorio siciliano molto estese.

## **Bibliografia**

- ARPA. 2018. Piano regionale di tutela della qualità dell'aria in Sicilia. Report ARPA Sicilia anno 2017.  
[http://www.artasicilia.eu/old\\_site/web/tutela\\_aria/04%20-%20Rapporto%20Ambientale\\_PianoQA.pdf](http://www.artasicilia.eu/old_site/web/tutela_aria/04%20-%20Rapporto%20Ambientale_PianoQA.pdf)
- ARPA. 2102. L'inventario delle emissioni in atmosfera della regione Sicilia. Report ARPA Sicilia 2012.  
<http://www.arpa.sicilia.it/wp-content/uploads/2015/08/Relazione-Inventario-Emissioni.pdf>
- Barua D.K. 2005. Beaufort Wind Scale. In: Schwartz M.L. (eds) Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Science Series. Springer, Dordrecht, doi: 10.1007/1-4020-3880-1\_45
- Giardina M., Castiglia F., Tomarchio E. 2014. Risk assessment of component failure modes and human errors using a new FMECA approach: application in the safety analysis of HDR brachytherapy. J Radiol Prot., 34(4), 891-914. doi: 10.1088/0952-4746/34/4/891.
- Hanss M., 2005. Applied Fuzzy Arithmetic, An Introduction with Engineering Applications. Springer, ISBN 3-540-24201-5
- Hellendoorn H., Thomas C. 1993. Defuzzification in fuzzy controllers, Intell. Fuzzy Syst., vol. 1, pp. 109-123.
- Hong T., Leeb C. 1996. Induction of fuzzy rules and membership functions from training examples Fuzzy Sets Syst. 84 33-47.
- OECD. 2008. Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and User Guide. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Pedrycz W. 1996. Fuzzy Modelling. Paradigms and Practice (Dordrecht: Kluwer).
- Ramli N., Mohamad D. 2009 A comparative analysis of centroid methods in ranking fuzzy numbers, Eur. J. Sci. Res., 28, 492-501
- Scire J. S., Robe F. R., Fernau M. E., Yamartino R. J. 2000. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model
- Zadeh L. A. 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Inf. Sci. Part I and II, 8
- Zadeh L.A. 1992. The calculus of fuzzy if/then rules. AI Expert, 7, 23-7.
- Zamonin. 2006.[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Topography\\_of\\_Sicily.png#filehistory](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Topography_of_Sicily.png#filehistory)
- Zimmermann H. 2001. Fuzzy Set Theory-and Its Applications, Springer Science & Business Media