



# **Ricostruzione numerica di alcune trombe d'aria osservate nel comune di Rosignano Marittimo con il modello Meso-NH**

Consorzio LaMMA

*Data:* 14 luglio 2022

Consorzio LaMMA  
Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale  
per lo sviluppo sostenibile  
Via madonna del piano, 10  
Sesto Fiorentino (Firenze) - Italia  
E-mail: [info@lamma.toscana.it](mailto:info@lamma.toscana.it)

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Contesto meteorologico</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>“Climatologia” delle trombe marine/d'aria</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Dati osservati</b>	<b>5</b>
4.1	17 Dicembre 2011 . . . . .	5
4.2	27 Novembre 2012 . . . . .	6
4.3	10 Settembre 2017 . . . . .	7
4.4	25 Settembre 2020 . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Considerazioni circa la predicibilità delle trombe marine</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Descrizione della ricostruzione numerica</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Risultati</b>	<b>16</b>
7.1	Test di sensitività sulla temperatura superficiale del mare . . . . .	21
<b>8</b>	<b>Considerazioni finali</b>	<b>22</b>

# 1 Introduzione

Il LaMMA, Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale per lo sviluppo sostenibile, é un consorzio pubblico tra la Regione Toscana e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Grazie alla sua particolare natura che lo colloca all'intersezione tra il mondo della ricerca e il servizio pubblico, il LaMMA puó mettere a disposizione del territorio e della collettività toscana i servizi ad alto valore aggiunto sviluppati all'interno del CNR. La sinergia tra la componente di ricerca e l'operatività richiesta dai servizi a carattere regionale ha spinto il LaMMA a realizzare negli anni prodotti ad alto valore aggiunto tecnico-scientifico, come ad esempio gli sviluppi nel settore della modellistica numerica per la previsione meteorologica ed oceanografica.

Nell'Ottobre del 2020, il Comune di Rosignano Marittimo (provincia di Livorno), ha chiesto al Consorzio LaMMA una relazione circa le condizioni atmosferiche, dalla scala sinottica alla mesoscala, che hanno determinato l'occorrenza di alcune trombe d'aria nella frazione di Rosignano Solvay.

I casi segnalati sono quattro:

1. 17/Dicembre/2011, prima mattina;
2. 27/Novembre/2012, ore 12.30 circa;
3. 10/Settembre/2017, tra le 4.30 e le 5.30;
4. 25/Settembre/2020, ore 20.30 circa.

Un'ipotesi di percorso delle trombe marine é stata fornita dal Comune di Rosignano Marittimo ed é visibile in Figura 1.



Figura 1: Ipotesi di percorso delle trombe marine nella frazione di Rosignano Solvay.

Nel Novembre del 2020, il Consorzio LaMMA ha prodotto il report richiesto dal Comune di Rosignano Marittimo. Alcune conclusioni del report sono state pubblicate sulle

pagine web del sito istituzionale del Comune (si veda [qui](#), data di accesso 22 Aprile 2022). In breve, gli elementi in comune agli eventi calamitosi sono la presenza costante di vento forte in quota (intorno agli 8/10 mila metri), la presenza di avvezione di aria fredda su aria calda, elevati valori di “shear” del vento, ovvero una variazione del vento in intensità e direzione salendo in quota, presenza di un fronte freddo, elevati valori di umidità prima dell’ingresso di tale fronte freddo, linee di convergenza del vento nei bassi strati dell’atmosfera e intrusioni di aria più secca, prima in quota e poi al suolo. Il Consorzio LaMMA ha evidenziato che anche la morfologia del territorio costiero ha un’influenza sul possibile percorso delle trombe marine e come una zona pianeggiante sia più favorevole al possibile impatto delle stesse sulla costa. La zona di Rosignano é, infatti, la prima pianeggiante subito dopo la scogliera di Castiglioncello. Inoltre alcuni studi pubblicati dal CNR (si veda ad esempio [[MM18](#)]) hanno messo in evidenza che la costa toscana è particolarmente colpita da eventi quali le trombe marine. Elementi questi che tenderebbero a far escludere cause dovute ad altre situazioni locali. Nonostante ciò, l’Amministrazione Comunale, a tutela dei cittadini, ha chiesto al Consorzio LaMMA in data 2 Dicembre 2020 di analizzare con un maggior dettaglio le situazioni meteorologiche caratteristiche degli eventi attraverso simulazioni modellistiche ad alta risoluzione per valutare ulteriormente i parametri che possono giocare un ruolo nel “guidare” le trombe marine verso la zona più frequentemente interessata (quartiere detto dei “Palazzoni”), o nel favorirne il rin vigorimento.

Nel seguito, si descrivono le attività condotte dal Consorzio LaMMA nella simulazione numerica ad alta risoluzione dei fenomeni calamitosi.

## **2 Contesto meteorologico**

Riportiamo nuovamente, in forma sintetica, alcune conclusioni contenute nella relazione che il Consorzio LaMMA ha consegnato al Comune di Rosignano Solvay nel Novembre 2020. Gli elementi in comune agli eventi sono:

- presenza costante del getto in quota (forti venti intorno agli 8-10 mila metri);
- configurazioni fortemente barocline (presenza di avvezione di aria fredda su aria calda);
- elevati valori di shear del vento (variazione del vento in intensità e direzione salendo di quota);
- presenza del fronte freddo, o in transito, o stazionario, ma comunque sempre in prossimità;
- presenza di elevati valori di umidità prima dell’ingresso del fronte freddo;
- presenza di linee di convergenza del vento nei bassi strati dell’atmosfera (fra WWSW e NW e fra S e SW-SSW);
- elevati valori di energia disponibile per la convezione (CAPE);
- intrusione di aria più secca, prima in quota e poi al suolo.

Un primo gruppo costituito da due casi (17 Dicembre 2011 e 25 Settembre 2020) si caratterizza per possibili eventi di trombe marine (poi entrate su terra e quindi divenute trombe d'aria) formatesi in concomitanza con i temporali che si sono sviluppati durante il transito di un fronte freddo proveniente da nord-ovest. Tale fronte era associato ad una avvezione di aria fredda e secca (ben visibile da una netta linea di demarcazione fra i valori di Theta-E a 850 hPa) e da una linea di convergenza nei bassi strati dell'atmosfera fra venti occidentali e venti nord occidentali, in seno alla quale si sono formati i temporali e le trombe marine.

Il secondo gruppo é costituito dagli altri due casi (27 Novembre 2012 e 10 Settembre 2017) ed é caratterizzato dalla presenza di un flusso meridionale intenso e molto umido, con linee di convergenza meno evidenti ma comunque presenti, fra Sud e SSW/SW. A differenza del primo gruppo di casi, lo sviluppo dei temporali é avvenuto nella fase pre-frontale, cioè prima dell'ingresso del fronte vero e proprio, quando la zona in esame si trovava ancora pienamente nel settore caldo (valori di Theta-E più elevati), ma in tutti e due i casi la Theta-E mostra, proprio in corrispondenza degli eventi, intrusioni d'aria meno umida che potrebbe aver favorito lo sviluppo delle trombe marine.

Come considerazione generale, possiamo affermare che l'innescare e l'evolversi di questi fenomeni sembrano legati a configurazioni meteorologiche a grande scala piuttosto simili fra loro, questo elemento tenderebbe a far escludere cause dovute a situazioni locali. Tuttavia il fatto che la zona colpita (alla scala del quartiere) sia sempre la stessa può far pensare ad accadimenti non del tutto casuali. Una motivazione potrebbe essere rappresentata dalla morfologia: possiamo osservare, infatti, come il quartiere colpito dalle trombe d'aria, sia costruito su una zona pianeggiante situata a circa 200 metri dal mare, con solo dei campi interposti. Tale situazione è adatta alla propagazione delle trombe marine verso l'interno. Più a nord invece la morfologia (più montuosa) e le costruzioni (più fitte e presenti fino al mare) costituiscono un ambiente meno favorevole. Questa conformazione morfologica potrebbe influenzare soprattutto le trombe marine provenienti da W/NW.

### 3 “Climatologia” delle trombe marine/d'aria

La climatologia più aggiornata delle trombe d'aria e tornado occorse sul territorio italiano negli ultimi anni é disponibile in [MM18]. Nel loro studio, gli autori riportano, la distribuzione geografica, stagionale, mensile e diurna utilizzando i dati presenti nel database European Severe Weather Database (ESWD, si veda [il link qui](#)) gestito dall'European Severe Storms Laboratory (ESSL) per il periodo 2007-2016. In forma sintetica, alcuni risultati sono i seguenti:

- le trombe marine si sviluppano principalmente sulle coste esposte ai venti occidentali (costa Tirrenica);
- sono più frequenti in autunno (43%) e in estate (33%)
- mediamente se ne verificano 5 all'anno per ogni 100 km di costa tirrenica

Da [MM18] riprendiamo la Figura 2 dove mostriamo la distribuzione geografica (Figura 2a) e stagionale (Figura 2b) delle trombe marine per il periodo 2007-2016. In [MM18], si ripor-

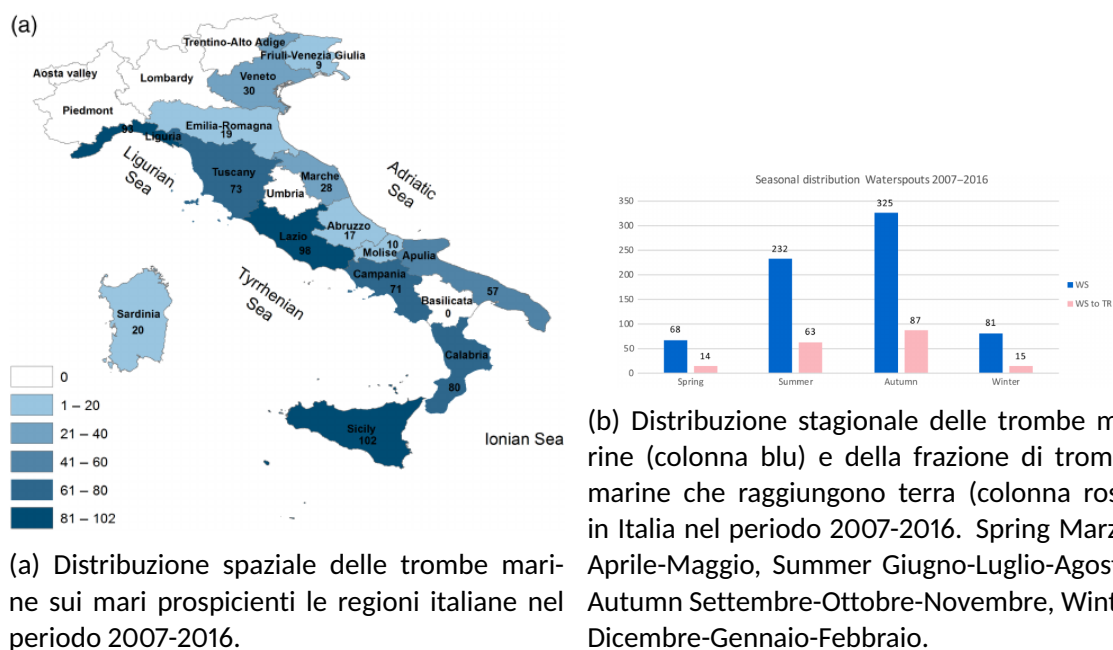


Figura 2

<b>Durata media</b>	11 minuti
<b>Lunghezza min/med/max del percorso</b>	0.5/6/40 km
<b>Decessi/feriti</b>	6/106
<b>Costi (stima)</b>	80 M €

Tabella 1: Caratteristiche spazio-temporali e altre informazioni delle trombe marine nel periodo 2007-2016. La lunghezza minima/media/massima é stimata per le sole trombe marine che raggiungono terra (colonna rosa nella Figura 2b).

tano inoltre alcune caratteristiche spazio-temporali delle trombe marine insieme ad altre caratteristiche che si possono desumere dai report del database ESWD. Riassumiamo alcuni dati nella Tabella 1.

## 4 Dati osservati

In questa sezione riportiamo, per ogni caso studio (di seguito CS) segnalato dal Comune di Rosignano Marittimo, i dati relativi ai danni riportati. Per quest'analisi é stato utilizzato il database ESWD.

### 4.1 17 Dicembre 2011

Dati: non sono presenti dati nel database ESWD.

Considerazioni: dal report meteorologico redatto dal Consorzio LaMMA si legge:

- Situazione sinottica: Sulla penisola italiana è presente un minimo secondario in fase di colmamento associato a **marcata instabilità e forti venti nord-occidentali**.
- Fenomeni: rovesci o brevi temporali (con grandinate) sulle province di Siena, Pisa e Grosseto in mattinata.
- Venti: di Maestrale **molto forti in mattinata sulla costa** e sull'Arcipelago (è stata registrata una raffica di 141 km/h sul Monte Perone all'Elba alle 00:45, di 117 km/h a Capraia alle 04:15 e di 115 km/h all'Argentario alle 06:15). Attenuazione nel corso della giornata.
- Mare: **violenta mareggiata su tutta la costa a nord dell'Elba** con mare sino a grosso (6.5 metri) in mattinata al largo, rapida attenuazione nel corso della giornata sino a mare molto mosso in serata.

Si riporta in Figura 3 la mappa di criticità regionale emessa il 16/12/2011 per il giorno successivo; si evidenzia l'emissione di criticità rossa per mareggiate sulle aree di allerta A2, C1, C3, C4. Un'analisi sinottica e di dettaglio è disponibile nel report meteorologico

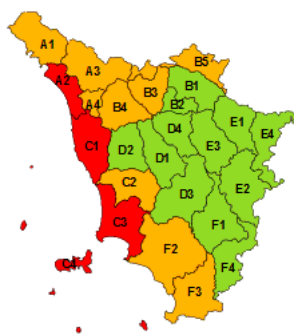


Figura 3: Mappa di criticità regionale emessa il giorno 16-12-2011 per il giorno successivo. Il colore rosso per le aree di allerta A2, C1, C3, C4 si riferisce al rischio mareggiate.

d'evento (si veda il [link](#), data di accesso 24 Aprile 2022).

## 4.2 27 Novembre 2012

Dati: Fenomeno "Tornado/tromba d'aria o marina"

Rosignano Marittimo, Italy (43.41 N,10.47 E)

27-11-2012 (Tuesday)

12:45 UTC (+/- 5 min.)

Based on information from: a report on a website, photo or video of the event, a newspaper report. Occurring over: land. **Intensity and other characteristics:** F1. The intensity rating was based on photograph(s) and/or video footage of the inflicted damage. The funnel cloud was observed. Accompanying weather: heavy rain.

Seguono alcuni link a documenti video/fotografici.

Considerazioni: a questo CS è assegnata la categoria F1. Qui si fa probabilmente riferimento alla International Fujita (IF) Scale (categorie da FO a F5), adattamento della Enhanced Fujita Scale [DIBD09], sviluppata nei primi anni 2000 negli USA. Lo scopo della IF Scale è



sviluppare una scala applicabile a livello globale per classificare i tornado sulla base dei danni causati. Informazioni sulla IF Scale si possono trovare [qui](#) (accesso al link 24 Aprile 2022) e nel documento *The International Fujita (IF) Scale Tornado and Wind Damage Assessment Guide* redatto nel 2018 da IF Scale Steering Group. Al report é assegnato un codice di qualità QC1, in una scala che va da QCO (“as received”), a QCO+ (“plausibility check passed”), a QC1 (“report confirmed by reliable source”), fino a QC2 (“scientific case study”).

L'avviso di criticità regionale emesso in data 27 Novembre 2012 segnala, dalla sera del giorno stesso, **forti temporali, vento di Burrasca da sud-est, mare agitato a sud dell'Elba, tendente a molto agitato** e conseguente emissione di allerta di tipo arancio per rischio idrogeologico-idraulico nell'area contenente la frazione di Rosignano Solvay.

### 4.3 10 Settembre 2017

Dati: ESWD non riporta dati sulla zona di Rosignano Solvay. É segnalata la pioggia intensa su Livorno (tra le 21 UTC e le 02 UTC circa della notte tra il 9 e 10 Settembre) e la presenza di una tromba d'aria più a sud, tra Tarquinia e Toscana, classificata F0 (codice controllo di qualità QCO+) attorno alle 6:00 UTC (8:00 ora locale).

Considerazioni: questo CS é ben studiato in bibliografia, si veda [[CAB<sup>+</sup>21](#)], [[FTA<sup>+</sup>19](#)], [[LPP<sup>+</sup>19a](#)] e [[LPP<sup>+</sup>19b](#)].

L'avviso di criticità regionale emesso in data 9 Settembre 2017 assegna all'area A6 contenente Rosignano Solvay un codice giallo temporali forti dalle 21:00 del 9 Settembre 2017, innalzato a codice arancione dalle 00:00 del 10 Settembre 2017.

### 4.4 25 Settembre 2020

Dati: ESWD contiene tre record nella zona d'interesse.

- Fenomeno “Tornado/tromba d'aria o marina”

Rosignano Marittimo

Italy (43.38 N,10.44 E) < 1 km

25-09-2020 (Friday)

18:30 UTC (+/- 15 min.)

Based on information from: photo or video of the event, an eyewitness report of the damage, an eye-witness report, a report on a website, a trained storm spotter. Occurring over: waterland. **Intensity and other characteristics: F2.** The funnel cloud was not observed. Number of people injured: 8. Seguono vari link a documenti video/fotografici. Codice di controllo qualità QCO+.

- Fenomeno “Grandine grossa”

Rosignano Marittimo

Italy (43.39 N,10.43 E)

25-09-2020 (Friday)

19:00 UTC (+/- 15 min.)

Based on information from: photo or video of the event, an eyewitness report of the damage, an eye-witness report, a report on a website, a trained storm spotter. Maximum hail diameter: 2 cm. Codice di controllo qualità QC1.

- Fenomeno “Tornado/tromba d'aria o marina”



Rosignano Marittimo (località Vada)

Italy (43.35 N,10.45 E) < 3 km

25-09-2020 (Friday)

19:15 UTC (+/- 15 min.)

Based on information from: photo or video of the event, an eyewitness report of the damage, an eye-witness report, a report on a website, a trained storm spotter. Occurring over: waterland. Impacts: Ship(s) damaged or destroyed. **Intensity and other characteristics: F1.** Codice di controllo qualità QC1.

Considerazioni: Per ognuno dei tre fenomeni sono disponibili alcuni link a documenti video/fotografici su ESWD. Inoltre, molte osservazioni meteo certificano l'estensione e la magnitudo dei danni. Alcune immagini satellitari e da radar mostrano come, un nucleo di precipitazioni intense si formi sul mare di fronte a Livorno, intorno alle ore 19 UTC (Figura 4). Successivamente tale nucleo si sposta in direzione nord-ovest/sud-est, andando a interessare la zona di Rosignano Marittimo/Solvay intorno alle ore 20:30 (ora locale). Il radar suggerisce come i fenomeni tendano a distribuirsi lungo una linea di convergenza venutasi a creare fra i venti provenienti da sud-ovest e quelli provenienti da nord-ovest (Figura 5). Inoltre, il nucleo rosso visibile nell'immagine indica, oltre che la presenza di temporali, anche la possibile presenza di fenomeni intensi associati a elevata turbolenza, come le trombe d'aria. La direzione di spostamento dei fenomeni, infine, indica come la tromba d'aria effettivamente osservata nella zona di Rosignano Solvay, abbia avuto origine inizialmente come una tromba marina, che ha raggiunto il litorale addentrandovisi per poche centinaia di metri per poi dissolversi.

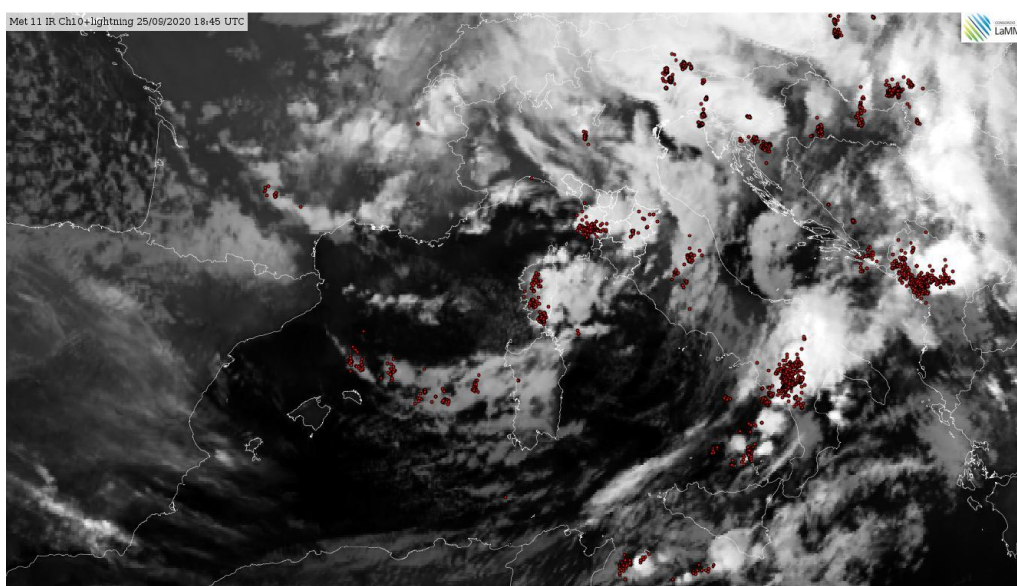


Figura 4: Immagine satellitare nel canale dell'infrarosso con fulminazioni sovrapposte (punti rossi) delle ore 20:45 locali.

Concludiamo osservando che il database ESWD riporta, nell'arco temporale compreso tra le 18:00 e le 24:00 (ora locale) e sul dominio italiano, 11 record così suddivisi: 3 "grandine grossa", 2 "fulmini" e 6 "tornado/tromba d'aria o marina", uno di essi in località San Vincenzo situato sulla costa tirrenica, alcune decine di km a sud dell'area d'interesse.

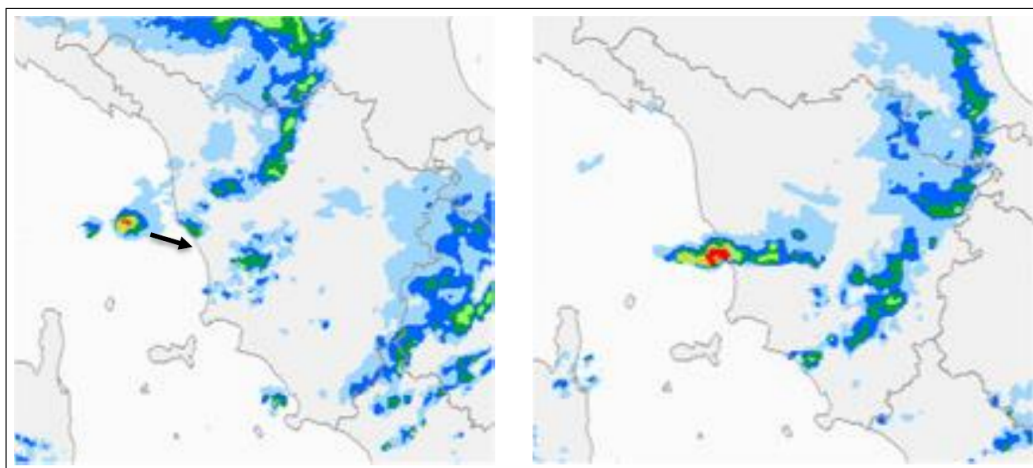


Figura 5: Pioggia registrata dal radar meteorologico alle ore 19:00 (immagine sulla sinistra) e alle ore 20:30 (immagine sulla destra) di Venerdì 25 Settembre 2020.

L'avviso di criticità regionale emesso in data 25 Settembre 2020 assegna all'area A6 contenente Rosignano Solvay un codice arancione per vento dalle 13:00 alle 20:00 del 25 Settembre e un codice giallo per mareggiate dalle ore 20:00 del 25 Settembre alle ore 06:00 del 26 Settembre 2020.

## 5 Considerazioni circa la predicibilità delle trombe marine

Come sostenuto in [BIM21], i modelli meteo operativi non sono affidabili per quanto riguarda l'esatta previsione spaziale e temporale dei tornado/trombe marine. Infatti come si può facilmente desumere dai dati riportati in Tabella 1, le caratteristiche spaziotemporali (una durata media di pochi minuti, scale spaziali dell'ordine di poche decine/centinaia di metri sia sul piano orizzontale che verticale), rendono il fenomeno di difficile ricostruzione. Nonostante ciò molti lavori scientifici recenti [MPN14, MNP16, HTCL21, AM21] hanno utilizzato i modelli di previsione numerica del tempo come strumento per lo studio delle trombe marine/d'aria. In particolare tali studi si sono concentrati sull'analisi delle condizioni meteo, sia alla scala sinottica che alla mesoscala, che sono favorevoli per l'origine, sviluppo e rinvigorimento delle trombe marine/d'aria. Recentemente gli autori di [BIM21] hanno enucleato un set di precursori atmosferici alla scala sinottica e alla mesoscala che si sono dimostrati essere rilevanti nella generazione di tornado/trombe marine; nel loro studio sono stati considerati solo i casi segnalati come EF1 o superiori (Enhanced Fujita Scale, [DIBD09]). Riportiamo sinteticamente alcuni indici.

- shear verticale del vento (o wind shear,  $WS$ ) a tre diversi livelli, segnatamente DLS (Deep Layer Shear; nello strato 0-6 km), MLS (Mid-Level Shear; nello strato 0-3 km) e LLS (Low Level Shear; nello strato 0-1 km). In generale, il  $WS$  al livello di pressione  $p$  è definito da:

$$WS = || \mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{10m} || \quad (1)$$

dove  $\mathbf{u}_p$  e  $\mathbf{u}_{10m}$  sono i vettori orizzontali del vento al livello di pressione  $p$  e a 10 m di altezza dal suolo rispettivamente e  $|| \cdot ||$  indica la norma euclidea. Nel caso in

esame  $p$  assume i valori 900, 700 e 500  $hPa$  per LLS, MLS e DLS, rispettivamente. Unità di misura  $m/s$ ;

- storm-relative helicity nel layer 0-3 km (SRH3km) e 0-1 km (SRH1km). Definito in accordo con [MMMP17]

$$SRH3km = \int_{0\ km}^{3\ km} (\mathbf{v} - \mathbf{c}) \cdot d\boldsymbol{\omega}, \quad (2)$$

dove  $\mathbf{v} = (u, v)$  é il vettore orizzontale del vento,  $\mathbf{c}$  é lo storm motion vector e  $\boldsymbol{\omega}$  é il vettore orizzontale della vorticità associato allo shear verticale del vento, in formula  $(\partial w / \partial y - \partial v / \partial z, \partial u / \partial z - \partial w / \partial x)$ . Unità di misura  $m^2/s^2$ ;

- $K$ -index definito da:

$$K = (T850 - T500) + Td850 - (T700 - Td700) \quad (3)$$

dove  $T$  é la temperatura,  $Td$  é la temperatura di dew point e il numero indica il livello isobarico in  $hPa$  a cui é valutata la variabile atmosferica. Unità di misura gradi Kelvin,  $K$ ;

- Convective Available Potential Energy ( $CAPE$ ), definita da:

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} B dz \quad (4)$$

dove  $z$  é la quota,  $B$  é la buoyancy o forza di galleggiamento,  $LFC$  é il livello di convezione libera (level of free convection) e  $EL$  é il livello di equilibrio. Unità di misura  $J/Kg$ . Per le ragioni indicate in [BIM21], spesso in luogo di  $CAPE$  si usa  $WMAX = \sqrt{2 \cdot CAPE}$  o  $WMAXSHEAR = \sqrt{2 \cdot CAPE} \times DLS$ ;

- Lifting Condensation Level ( $LCL$ ), indica l'altezza (in  $m$ ) in cui una particella d'aria forzata a salire dalla superficie raggiunge il livello di saturazione (umidità relativa uguale a 100 %); può essere considerato come una buona approssimazione dell'altezza della base delle nubi. Si può calcolare mediante la formula approssimata riportata in [Law05], vale a dire:

$$LCL \simeq 125(T_{10m} - Td_{10m}); \quad (5)$$

- raffica del vento (wind gust), l'intensità e direzione del vento medio a 10 metri. Unità di misura  $m/s$ .

Vale la pena riportare in Tabella 2 la distribuzione statistica dei valori tipici di alcuni precursori alla mesoscala elencati sopra e calcolati da [BIM21] durante gli eventi di tornado classificati come EF1 e EF2+. Tale sottoinsieme é costituito da quei precursori (LLS, SRH1km, WMAX e LCL) che [BIM21] hanno trovato essere tra i più robusti da un punto di vista statistico. I valori sono estratti nel punto griglia più vicino al luogo dell'evento e all'istante temporale prossimo all'ora presunta dell'evento (derivata dal database ESWD).

Si sottolinea il fatto che fare una diretta comparazione tra i valori che abbiamo trovato con il modello Meso-NH con quelli calcolati da [BIM21] non sia immediato né corretto. In fatti, i due dataset scelti per il calcolo dei precursori sono diversi poiché [BIM21] utilizza i dati ERA5 [HBB<sup>+</sup>20] che hanno una risoluzione spaziale di 31 km e sono prodotti con il modello a scala globale IFS; pertanto un BIAS tra i due dataset é probabile.

Variabile	5-esimo	Mediana	95-esimo
(a) EF1			
LLS	1.1	6.1	13.9
SRH1km	-0.5	43.5	187.5
WMAX	1.8	31.7	67.1
LCL	109	358	1139
(b) EF2+			
LLS	2.5	8.2	13.1
SRH1km	12.2	76	214.5
WMAX	15.1	36.9	61.3
LCL	174	438	1559

Tabella 2: Distribuzione statistica (quinto, cinquantesimo e 95-esimo percentile) dei precursori a mesoscala nel caso di tornado/waterspout classificati EF1 (a) o EF2+ (b).

## 6 Descrizione della ricostruzione numerica

Le simulazioni modellistiche dei CS sono state realizzate per mezzo del modello [Meso-NH](#), versione 5.4.3 rilasciata nel Marzo del 2020. Il modello Meso-NH é sviluppato per scopi di ricerca dal CNRM (Meteo-France/CNRS) e dal Laboratoire d'Aérodynamique dell'Università di Tolosa per studiare i fenomeni atmosferici dalla scala sinottica (1000-10 km), alla meso (10-1 km) e micro- $\gamma$  (1000-10 m) scala. Una dettagliata descrizione delle caratteristiche del modello e dell'ampio spettro di applicazioni nelle quali é impiegato può essere trovata in [\[LCM<sup>+</sup>18\]](#). Le condizioni iniziali e al contorno sono fornite dai dati operativi globali prodotti dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio-Termine (ECMWF; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Per ognuno dei 4 CS elencati sopra sono state realizzate delle simulazioni a breve termine (orizzonte temporale di simulazione < 24 ore) con il modello Meso-NH su 2 griglie a 2500m e 500m di passo griglia; tali domini d'integrazione sono mostrati in Figura [6a](#) e [6b](#), rispettivamente. Alcuni settaggi del modello sono riassunti brevemente nella Tabella [3](#) e sono gli stessi utilizzati in [\[Cap21\]](#) per alcuni casi studio di precipitazione estrema. I moti convettivi non sono parametrizzati in nessuna delle due griglie (convection-permitting model). I livelli verticali sono 60, distribuiti dalla superficie fino a circa 22 km di altezza, con circa 30 livelli nei primi 1500 metri di altezza.

Per il solo CS del 2020-09-25 é stata eseguita una simulazione ad alta risoluzione (passo griglia 100m) innestata sulla simulazione a 500m; tale dominio d'integrazione é mostrato in figura [7a](#). Per questo CS, oltre alla simulazione di controllo (di seguito CNTRL) nella quale le condizioni iniziali sono interpolate dai dati del modello globale, sono stati eseguiti due test di sensitività alla temperatura superficiale del mare (di seguito SST). Nel primo test (di seguito SST15), la SST del tratto di mare delimitato dal trapezio mostrato in Figura [7b](#) é stata aumentata di +1.5 K rispetto al valore medio di temperatura superficiale del mare riportato dal modello a larga scala. Il campo di SST all'istante iniziale si presenta come mostrato in Figura [8a](#) in CNTRL, mentre in SST15 il campo di SST si

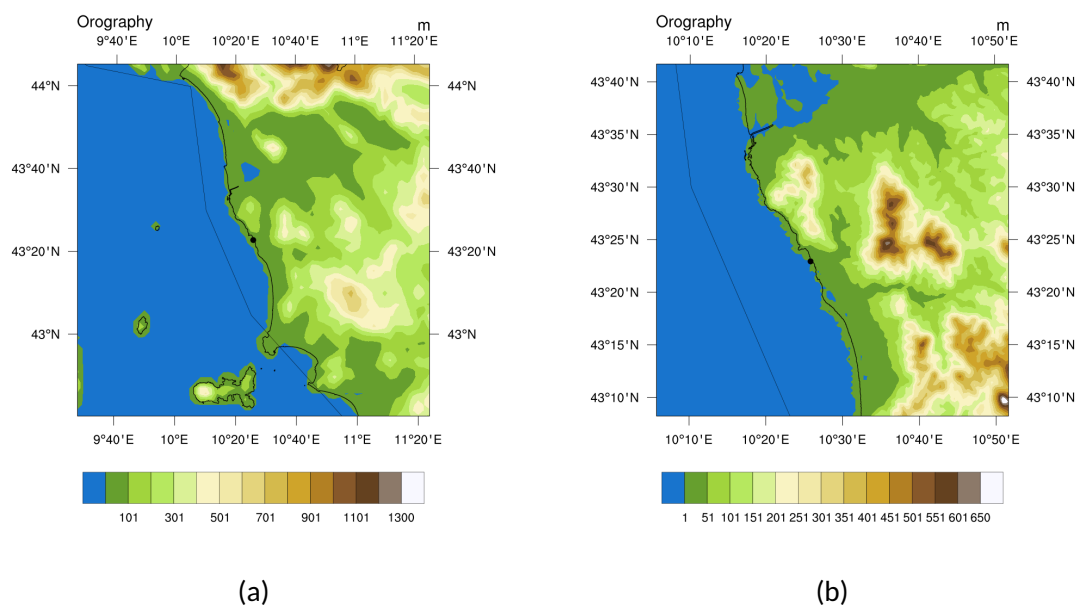
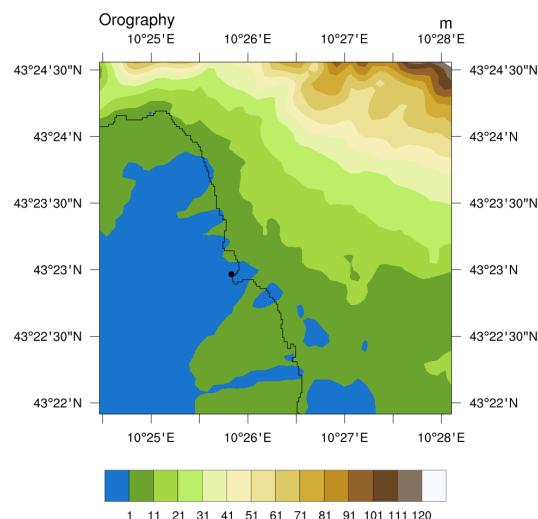


Figura 6: Domini di integrazione del modello Meso-NH per la griglia con passo griglia di 2500 m (a) e 500 m (b). In entrambe le figure il punto nero nel centro della griglia indica approssimativamente la frazione di Rosignano Solvay.

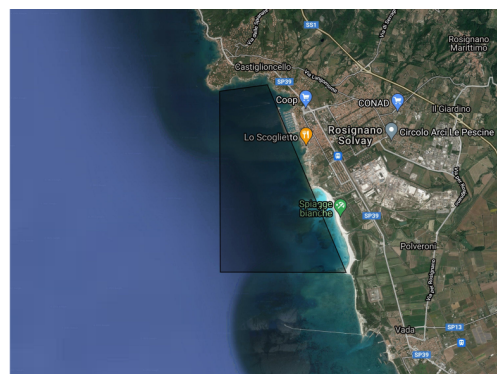
Tabella 3: Referenze agli schemi di radiazione, strato limite, microfisica, land-surface e turbolenza implementati nel modello Meso-NH.

Schema	Referenza
<b>Radiazione</b>	ECMWF radiation scheme [ <a href="#">MBC<sup>+</sup>08</a> ]
<b>Strato limite</b>	Bougeault and Lacarrere (1989) [ <a href="#">BL89</a> ]
<b>Microfisica</b>	ICE3 scheme [ <a href="#">CRL94</a> ]
<b>Land-surface</b>	SURFEX model [ <a href="#">MLMM<sup>+</sup>13</a> ]
<b>Turbolenza</b>	2-order equation [ <a href="#">CBRO0</a> ]





(a)



(b) Porzione di mare per la quale è stata modificata la temperatura superficiale del mare. Si tratta di un'area con un'estensione di circa  $2.5 \times 4 = 10 \text{ km}^2$ .

Figura 7: In (a), dominio di integrazione del modello Meso-NH a 100 m di passo griglia. Il punto nero nel centro della griglia indica approssimativamente la frazione di Rosignano Solvay. In (b), area (trapezio ombreggiato) nella quale è stata modificata la temperatura superficiale del mare.

presenta come mostrato in Figura 8b. Si sottolinea il fatto che le legende di colori nelle Figure 8a e 8b sono diverse per tener in conto la bassa variabilità della SST nel dominio in esame. L'incremento di SST pari a +1.5 K, è stato dedotto da [MMMP17]. Infatti, analizzando la traiettoria di una supercella tornadica mediterranea, in [MMMP17] si stabilisce come variazioni di temperatura superficiale del mare di  $\pm 0.5 \text{ K}$  e  $\pm 1 \text{ K}$  abbiano effetti determinanti e non lineari sulla velocità verticale della supercella che ha dato luogo al tornado. La scelta di aumentare la temperatura superficiale del mare di +1.5 K nella porzione di mare antistante la frazione di Rosignano Solvay è anche suggerita e supportata dalle osservazioni di SST che si ottengono da satellite. In Figura 9a si mostra l'anomalia di SST utilizzando i dati forniti dal JPL MUR MEaSUREs Project 2015 (GHRST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis Ver. 4.1., [link](#)); osserviamo la presenza di un'anomalia positiva di SST in tutto il Tirreno centro-settentrionale e sul Mar Ligure. Uno zoom sulla zona d'interesse, si veda la Figura 9b, dimostra che la porzione di mare antistante la frazione di Rosignano Solvay è caratterizzata da un'anomalia rispetto alla media climatologica per il periodo 2003-2014 di circa +1.2 K. Il secondo test (di seguito SOLVA) di sensitività alla temperatura superficiale del mare è suggerito dai dati, forniti da Solvay Chimica Italia, di temperatura e portata dello scarico generale dell'impianto industriale posto nell'immediato entroterra di Rosignano Solvay. Nelle Figure 10a e 10b sono mostrate la portata e la temperatura, rispettivamente, del canale di scarico per il mese di Settembre 2020. La linea nera verticale indica le 00:00 (probabilmente ora locale, questo punto non è chiaro dalla comunicazione ricevuta) del 25 Settembre 2020. La temperatura media di uscita del canale di scarico è approssimativamente  $28.7^\circ \text{C}$  fino alle 00:00 del 25 Settembre (circa  $28.2^\circ \text{C}$  per tutto il mese di Settembre 2020). Per questo motivo durante il test SOLVA è stata assunta un valore di SST all'istante iniziale

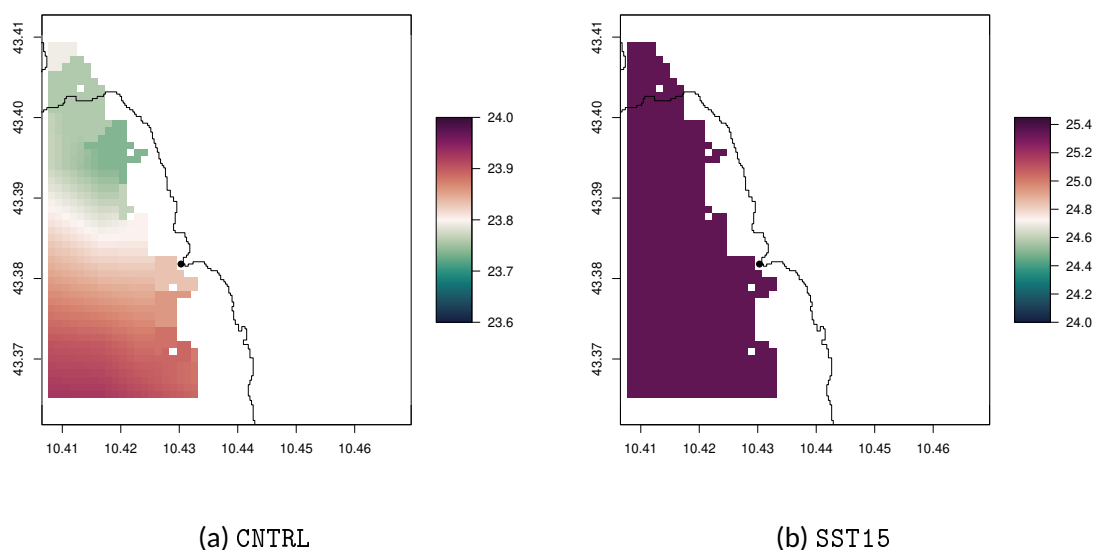


Figura 8: Valori di SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) all'istante iniziale nella simulazione CNTRL e SST15.

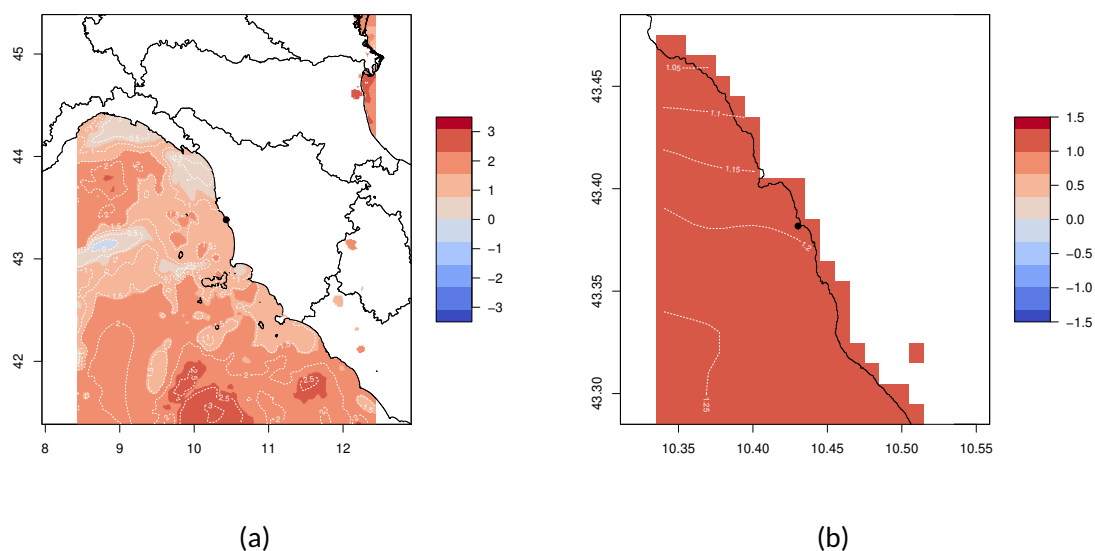
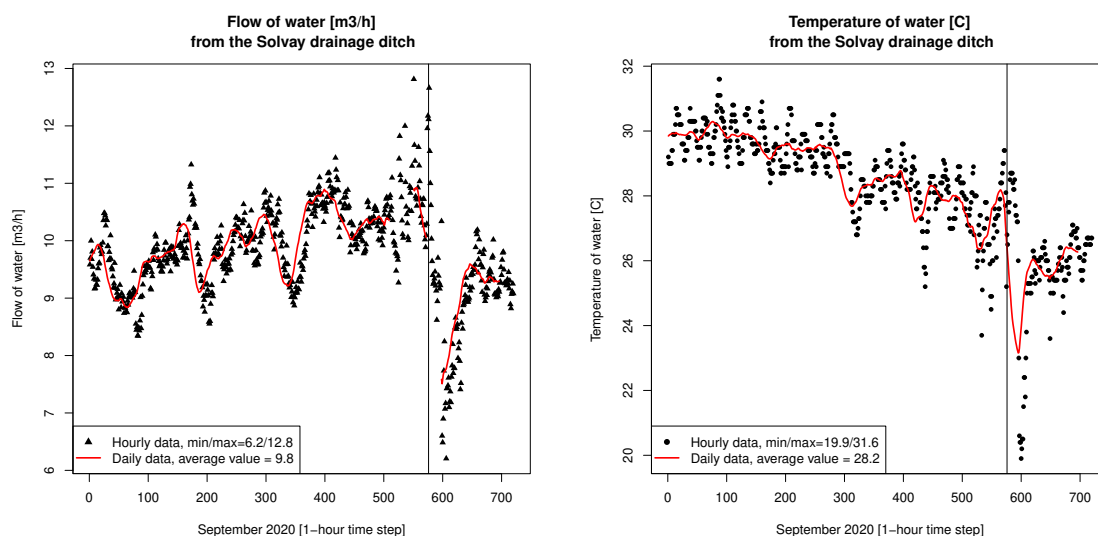


Figura 9: 25 Settembre 2020, anomalia di temperatura superficiale del mare (unità di misura  $^{\circ}\text{C}$ ) nel dominio con 2500 m (a) e 100 m di passo griglia (b). L'anomalia é calcolata rispetto alla climatologia 2003-2014. Per produrre i grafici sono stati utilizzati i dati forniti dal JPL MUR MEaSUREs Project 2015.





(a) Portata oraria (unità di misura  $m^3/ora$ ).

(b) Temperatura oraria (unità  $^{\circ}C$ ).

Figura 10: Portata (a) e temperatura (b) dello scarico generale dell'impianto di Solvay Chimica Italia posto in località Rosignano Solvay. I dati sono forniti da Solvay Chimica Italia.

di  $28.5^{\circ}C$ , che corrisponde, mediamente, a un incremento di circa  $5^{\circ}K$  rispetto alla SST fornita dal modello globale. Sottolineiamo che sia nella simulazione SST15 che in SOLVA, è stato attivato il modulo di interfaccia mare/atmosfera, che considera il mare come un singolo layer secondo la formulazione di [GGL90]. In questa maniera il modello atmosferico è accoppiato con un semplice modello oceanografico a una dimensione e i flussi di energia tra mare e atmosfera sono corretti tenendo conto delle raffiche e della convezione. Questo è un settaggio piuttosto comune nelle ricostruzioni numeriche di eventi severi che coinvolgono le interazioni oceano/atmosfera e che è stato dimostrato produrre buoni risultati anche nel Mar Mediterraneo (si veda ad esempio [RBC<sup>+</sup>21]).

Infine, dato l'interesse per una porzione limitata di territorio (la frazione di Rosignano Solvay), prima di eseguire le simulazioni atmosferiche, sono stati analizzati i campi statici che caratterizzano il dominio di integrazione a larga scala (Figura 6a) e l'area d'interesse in particolare (Figura 7a). Ad esempio sono stati valutati due diversi dataset di land cover (copertura del suolo): ECOCLIMAP v2.6 (informazioni disponibili [qui](#) e in [TCK19]) e ECOCLIMAP-SG (informazioni disponibili [qui](#) e [qui](#)). I plot dei dati di ognuno dei due dataset sono mostrati nella Figura 11 per quanto riguarda il terzo dominio innestato alla risoluzione di 100 m. Malgrado la migliore risoluzione del database ECOCLIMAP-SG ( $\simeq 300$  m, Figura 11b) rispetto a ECOCLIMAP v2.6 ( $\simeq 1$  km, Figura 11a), è stato deciso di utilizzare quest'ultimo dataset perché più recente (è stato rilasciato nel 2019), più utilizzato dalla comunità di utenti del modello Meso-NH e perché presenta una vasta zona caratterizzata dalla categoria "Industries and commercial areas" (pixel di colore rosso nel centro della Figura 11a), che simula la presenza dell'impianto industriale della Solvay Chimica Italia. Si sottolinea tuttavia che, per motivi di tempo, non è stato effettuato un test numerico di sensibilità per supportare la bontà di tale scelta.

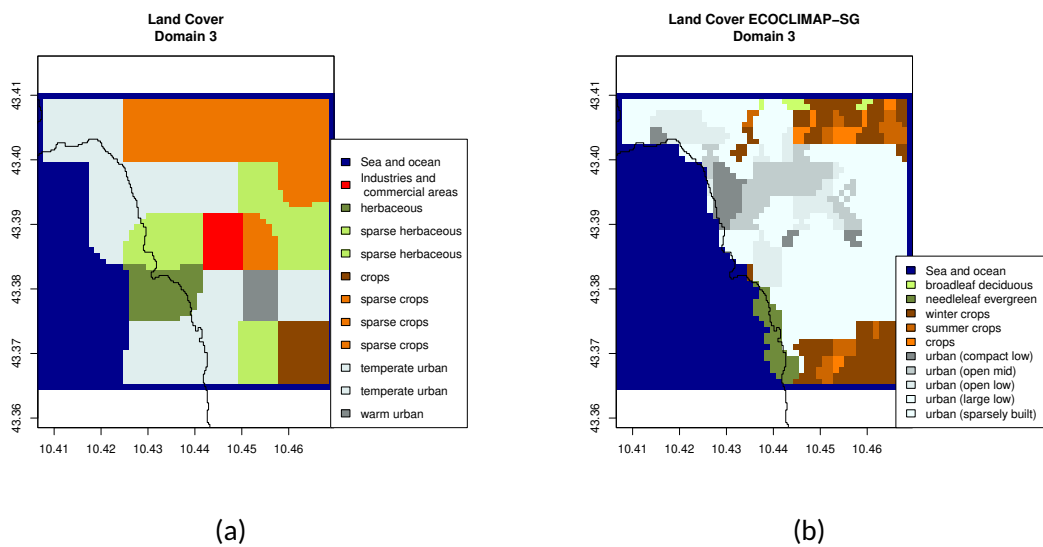
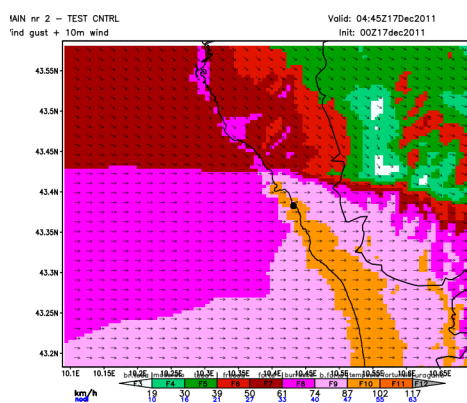


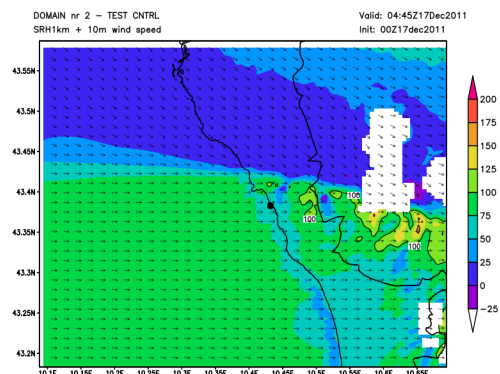
Figura 11: Copertura del suolo del database ECOCLIMAP v2.6 (a) e ECOCLIMAP-SG (b).

## 7 Risultati

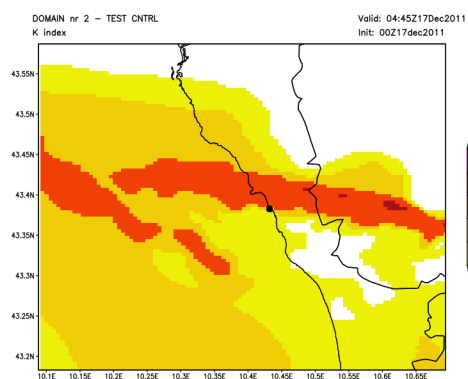
Nelle Figure 12, 13, 14 e 15 mostriamo, a titolo esemplificativo, alcune uscite del modello Meso-NH per ogni CS ; sono mostrate le mappe della raffica del vento a 10 m, SRH1km, K-index e CAPE nei pannelli (a), (b), (c) e (d), rispettivamente.



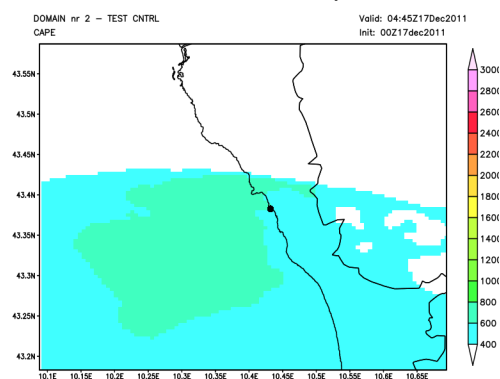
(a) Raffica del vento a 10 m.



(b) Storm relative helicity 0-1 km.

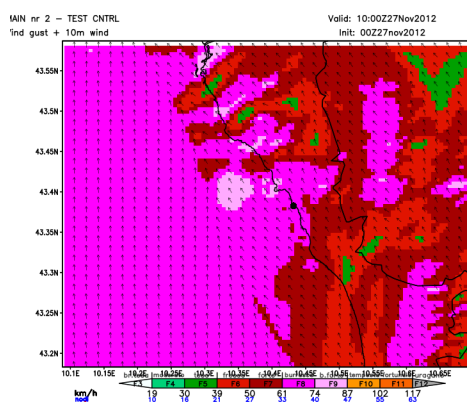


(c) K-index.

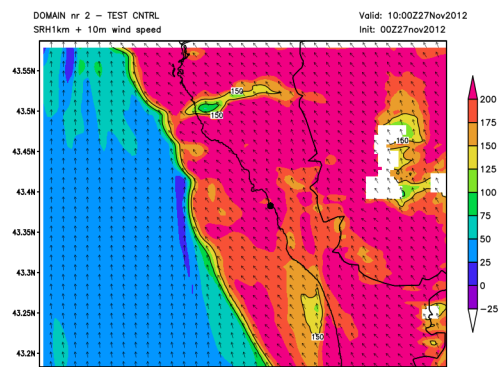


(d) Convective available potential energy.

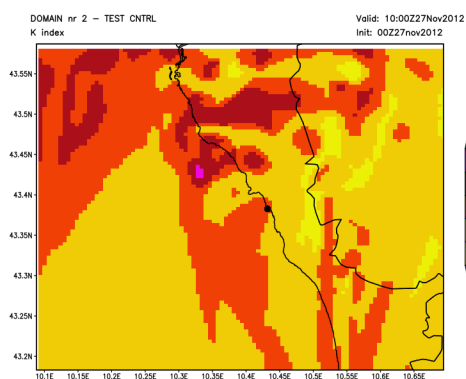
Figura 12: CS 2011-12-17



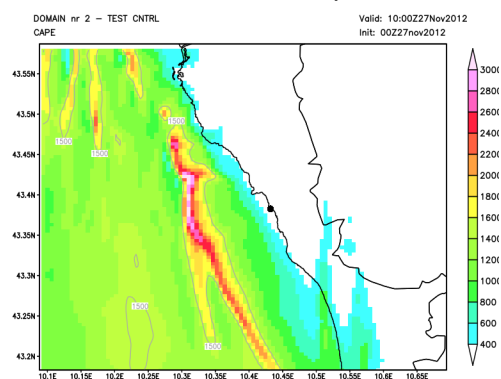
(a) Raffica del vento a 10 m.



(b) Storm relative helicity 0-1 km.

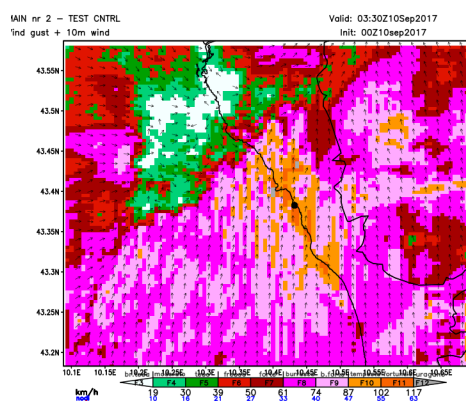


(c) K-index.

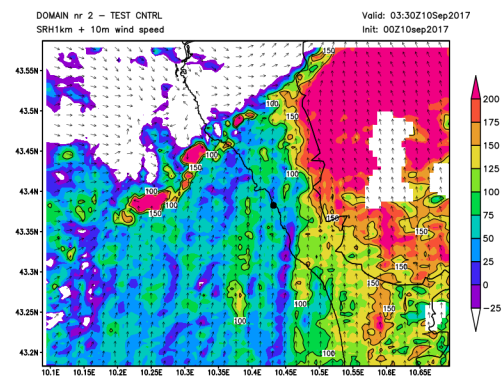


(d) Convective available potential energy.

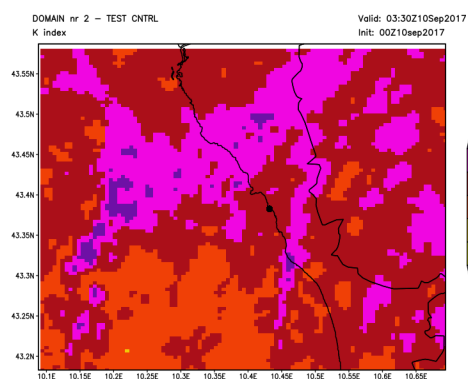
Figura 13: CS 2012-11-27



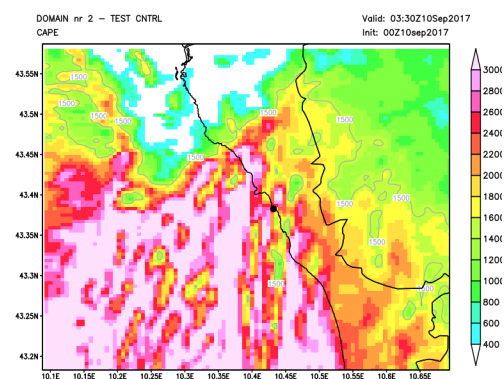
(a) Raffica del vento a 10 m.



(b) Storm relative helicity 0-1 km + 10 m wind.

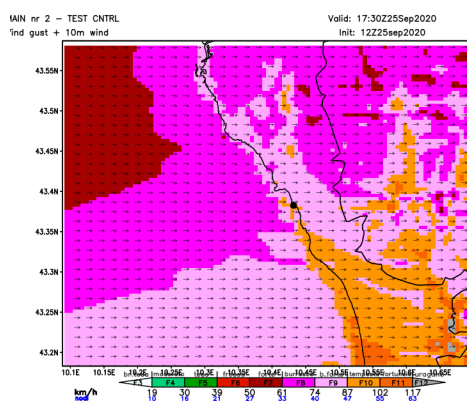


(c) K-index.

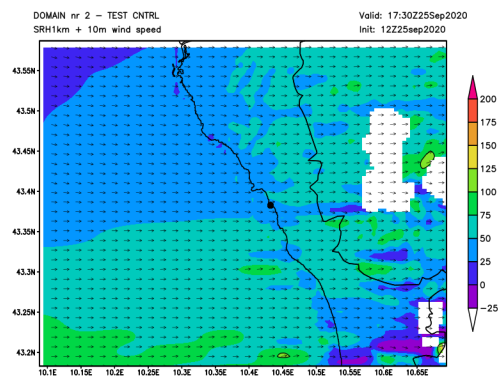


(d) Convective available potential energy.

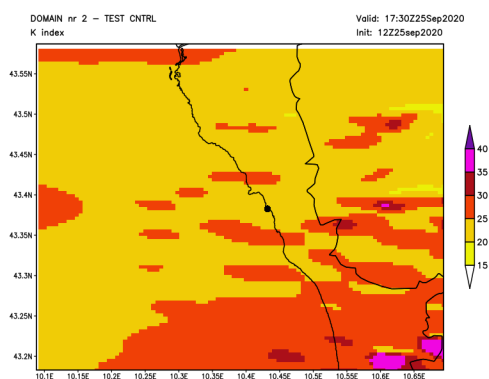
Figura 14: CS 2017-09-10



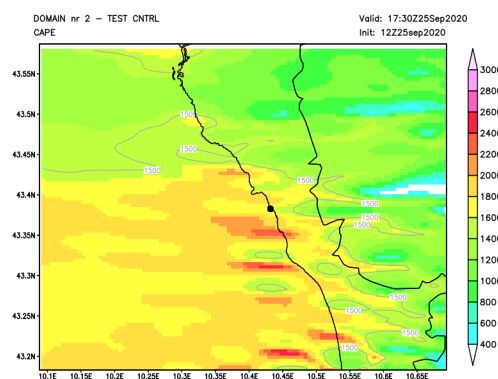
(a) Raffica del vento a 10 m.



(b) Storm relative helicity 0-1 km + 10 m wind.



(c) K-index.



(d) Convective available potential energy.

Figura 15: CS 2020-09-25

Le Figure 12, 13, 14 e 15 sono delle “fotografie” dei campi atmosferici all’ora presunta dell’evento. Per avere una visione più ampia della dinamica temporale degli eventi, in Figura 16 mostriamo i profili dei precursori alla mesoscala elencati nella Tabella 2 estratti in un box attorno a Rosignano Solvay che corrisponde, approssimativamente, al dominio mostrato in Figura 7a. Le linee orizzontali tratteggiate nere (grigie) indicano la soglia del 50-esimo e 95-esimo percentile per i casi di EF1 (EF2+). Le linee verticali continue indicano l’ora presunta dell’evento (si vedano i dati raccolti dal database ESWD<sup>1</sup> e riportati nella Sezione 4). Dai profili mostrati in Figura 16 abbiamo calcolato i valori mediani, il quinto e 95-esimo percentile in una finestra temporale centrata all’ora presunta dell’evento (linee continue verticali colorate)  $\pm 2$  ore. Tali statistiche sono mostrate nella Tabella 4. Solo per i valori mediani, il testo sottolineato indica il superamento della soglia per fenomeni EF1 mentre il testo in **grassetto** indica il superamento della soglia per fenomeni EF2+ (soglie determinate sulla base di [BIM21], si veda anche la Tabella 2). Osservando attentamente i plot di Figura 16, notiamo che per alcuni eventi (ad esempio il CS del 2012-11-27, indicato con il colore rosso), i valori massimi dei precursori sono raggiunti qualche istante temporale (vale a dire qualche quarto d’ora) prima dell’ora presunta dell’evento. Pertanto è verosimile che le statistiche riportate in Tabella 4 sottostimino le effettive capacità predittive del modello.

## 7.1 Test di sensitività sulla temperatura superficiale del mare

Come descritto in precedenza, per il solo caso del 2020-09-25, sono stati eseguiti due simulazioni di test di sensitività alla temperatura superficiale del mare (i codici associati alle due simulazioni SST15 e SOLVA). I risultati sono stati confrontati con la simulazione di controllo CNTRL, nella quale la temperatura superficiale del mare è stata derivata dal modello globale. Nella simulazione SST15 (SOLVA) il campo di SST all’istante iniziale è stato aumentato di circa  $1.5\text{ K}$  ( $5\text{ K}$ ) sullo specchio di mare mostrato in Figura 7b. Analogamente a quanto fatto nella sezione precedente, nella Tabella 5, mostriamo i valori mediani, il quinto e il 95-esimo percentile calcolati in una finestra temporale centrata all’ora presunta dell’evento (le 20:30 ora locale del 25 Settembre 2020)  $\pm 2$  ore. L’area di estrazione è un box attorno alla località di Rosignano Solvay e i dati utilizzati sono quelli prodotti dalla simulazione a 100 m di passo griglia (Figura 7a). I valori in grassetto indicano gli indici più alti tra le tre simulazioni e maggiormente associati alla formazione e presenza di trombe d’aria o marine.

In Figura 17, mostriamo i profili temporali dei precursori alla mesoscala. Si nota che la ricostruzione modellistica del CS 25/09/2020 in tutte e tre le simulazioni tende ad anticipare l’occorrenza dell’evento. Deduciamo, in maniera arbitraria, che l’ora di occorrenza dell’evento, così come ricostruita dal modello, sia attorno alle 16:00 UTC, vale a dire circa 2.5 ore prima dell’ora fornita dai report dell’ESWD. Questa conclusione è supportata anche dal profilo temporale della velocità della raffica del vento nelle tre simulazioni mostrata in Figura 18.

<sup>1</sup>Per il CS del 17 Dicembre 2011, la cui ora presunta non è riportata, si è assunto arbitrariamente le 06:00 ora locale



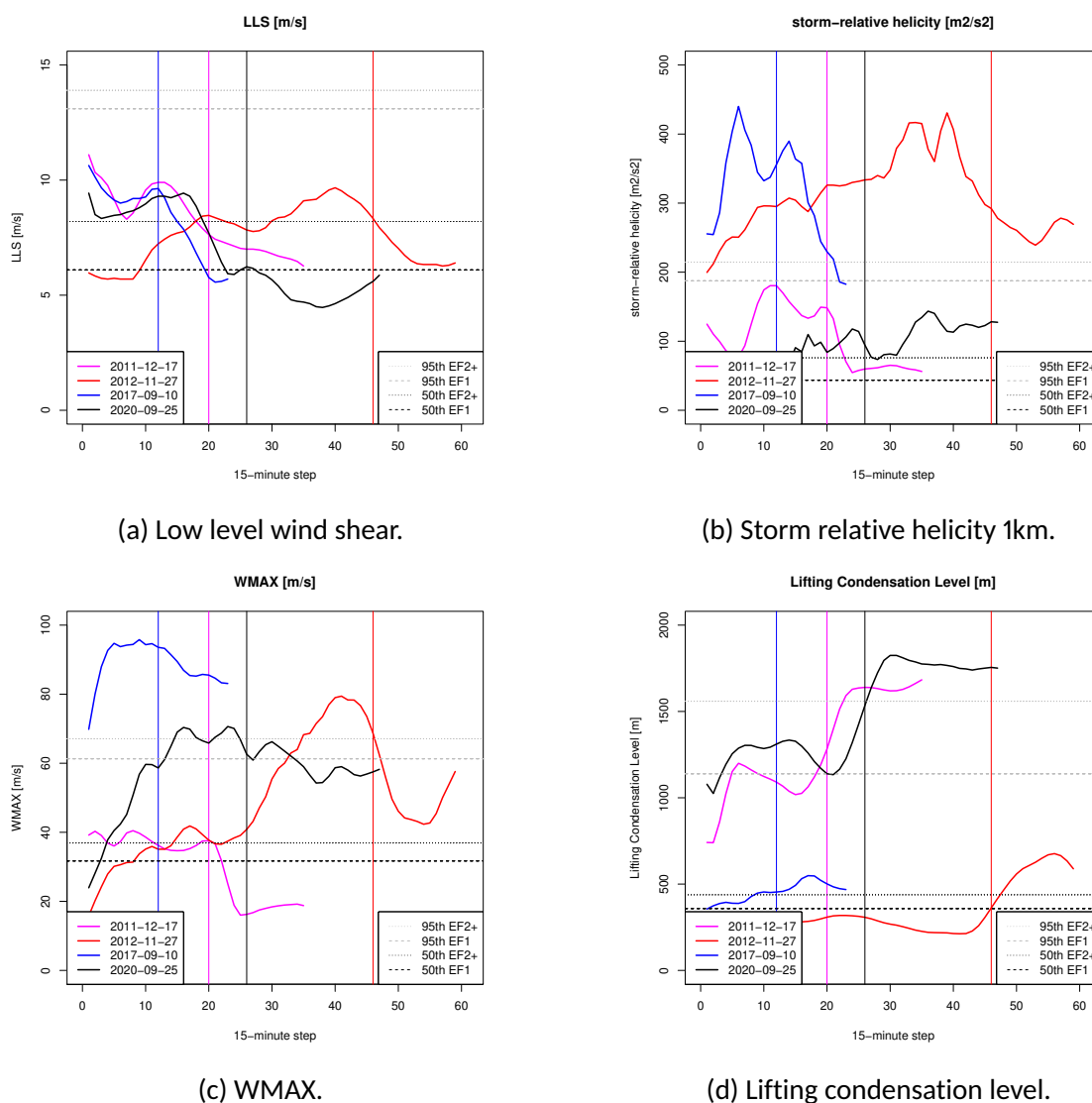
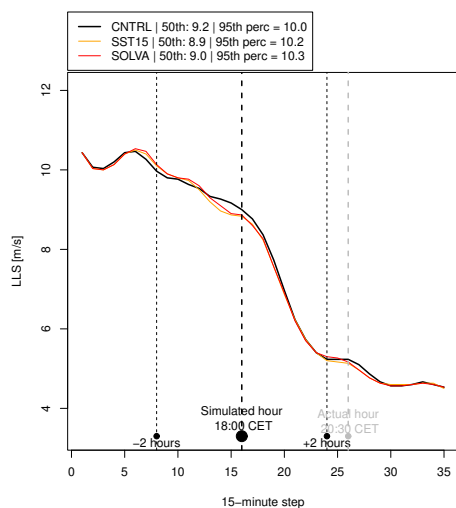


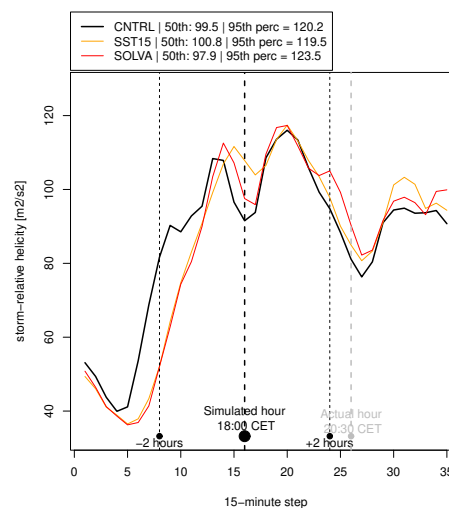
Figura 16: Per ognuno dei quattro CS (colori indicati nella legenda in basso a sinistra) è mostrato il profilo temporale dei precursori alla mesoscala elencati in Tabella 2 ed estratti dalle simulazioni numeriche in un dominio attorno al punto di interesse (Rosignano Solvay). Le linee tratteggiate orizzontali indicano la mediana e il 95-esimo percentile dei precursori alla mesoscala per eventi di tipo EF1 ed EF2+ individuati da [BIM21]. Le linee verticali continue indicano l'ora presunta dell'evento. Sull'asse delle x l'incremento temporale, unità di misura 15 minuti, dall'ora di inizializzazione del modello.

## 8 Considerazioni finali

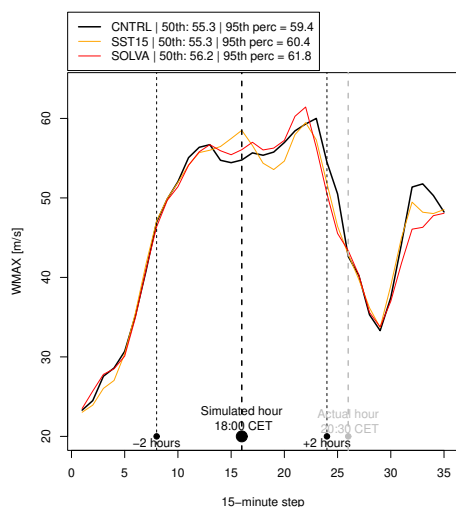
Utilizzando il modello atmosferico ad area limitata Meso-NH abbiamo ricostruito le condizioni meteorologiche alla mesoscala che hanno caratterizzato quattro eventi severi occorsi nei pressi di Rosignano Solvay (comune di Rosignano Marittimo, Livorno) negli ultimi 10 anni. Per un CS dei quattro considerati (25 Settembre 2020), sono stati eseguiti due test di sensibilità alla temperatura superficiale del mare che, in uno specchio di mare limitato antistante la frazione di Rosignano Solvay (Figura 7b), è stata aumentata di 1.5 K e 5



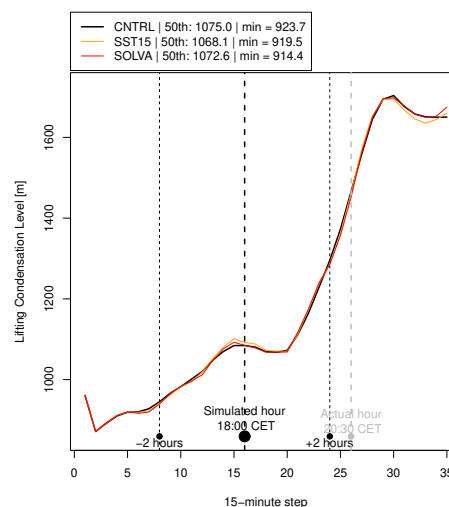
(a) Low level wind shear.



(b) Storm relative helicity 1 km.



(c) WMAX.



(d) Lifting condensation level.

Figura 17: CS 25/09/2022, precursorii alla mesoscala estratti dalla simulazione CNTRL (linea continua nera), SST15 (linea continua arancione) e SOLVA (linea continua rossa). La linea verticale grigia tratteggiata indica l'ora presunta dell'evento riportata dal database ESWD, le linee verticali tratteggiate nere indicano l'ora dell'evento ricostruita dalle simulazioni  $\pm 2$  ore.

Variabile	5-esimo	Mediana	95-esimo
(a) 2011-12-17			
LLS	7.0	<u>7.9</u>	9.9
SRH1km	53.8	<b><u>130.8</u></b>	181.8
WMAX	16.0	<u>34.9</u>	38.2
LCL	1008	1180	1640
(b) 2012-11-27			
LLS	6.5	<b><u>8.7</u></b>	9.7
SRH1km	239.9	<b><u>298.3</u></b>	429.2
WMAX	43.7	<u>71.5</u>	79.4
LCL	212	468	677
(c) 2017-09-10			
LLS	6.8	<b><u>9.0</u></b>	9.7
SRH1km	245.1	<b><u>351.0</u></b>	451.1
WMAX	84.5	<u>92.9</u>	96.6
LCL	387	480	554
(d) 2020-09-25			
LLS	4.9	6.0	8.9
SRH1km	66.5	<b><u>87.9</u></b>	128.6
WMAX	59.8	<u>66.2</u>	70.2
LCL	1131	1428	1827

Tabella 4: Per ognuno dei quattro eventi considerati, si mostrano la mediana, il quinto e 95-esimo percentile dei precursori alla mesoscala (sulla base di [BIM21]) estratti dalle ricostruzioni numeriche nei pressi della frazione di Rosignano Solvay all'ora presunta del passaggio della tromba marina  $\pm 2$  ore. I dati sono stati estratti dalla simulazione con passo griglia di 500 m mostrata in Figura 6b.

K. Il primo test é suggerito dai risultati ottenuti in [MMMP17], il secondo é stato eseguito per mimare il possibile aumento della temperatura del mare dovuto all'acqua di scarico dell'impianto Solvay (i dati di temperatura dell'acqua di scarico sono stati forniti da Solvay Chimica Italia).

Il database ESWD é stato utilizzato per caratterizzare i fenomeni dal punto di vista osservativo. Dei quattro CS in esame due (27 Novembre 2012 e 25 Settembre 2020) riportano l'occorrenza di un "tornado/tromba d'aria o marina" nell'area di Rosignano Marittimo; al primo caso é assegnata la categoria F1, al secondo la categoria F2, secondo lo schema di classificazione della International Fujita (IF) Scale. Il caso del 10 Settembre 2017 non riporta dati sulla zona di Rosignano Solvay, bensí il fenomeno "pioggia intensa" alcuni km piú a nord (Livorno città); questo caso é stato ben studiato nella recente letteratura (si veda [CAB+21], [FTA+19], [LPP+19a] e [LPP+19b]). Per il caso del 17 Dicembre

Variabile	5-esimo	Mediana	95th
(a) CNTRL			
LLS	4.7	5.2	<b>8.5</b>
SRH1km	76.8	97.7	116.8
WMAX	55.9	59.4	<b>65.0</b>
LCL	1070	1367	1714
(b) SST15			
LLS	4.6	5.2	8.4
SRH1km	79.7	100.8	119.5
WMAX	56.3	58.7	64.5
LCL	<b>1066</b>	1341	1701
(c) SOLVA			
LLS	4.6	5.3	8.3
SRH1km	82.7	101.3	<b>120.1</b>
WMAX	56.3	58.9	64.1
LCL	1068	1337	1702

Tabella 5: CS 2020-09-25: valori mediani, quinto e 95-esimo percentile dei precursori alla mesoscala selezionati sulla base di [BIM21] ed estratti dalle ricostruzioni numeriche CNTRL, SST15 e SOLVA nei pressi della frazione di Rosignano Solvay all'ora presunta del passaggio della tromba marina  $\pm 2$  ore. I dati sono stati estratti considerando la griglia mostrata in Figura 7a che ha un passo griglia di 100 m.

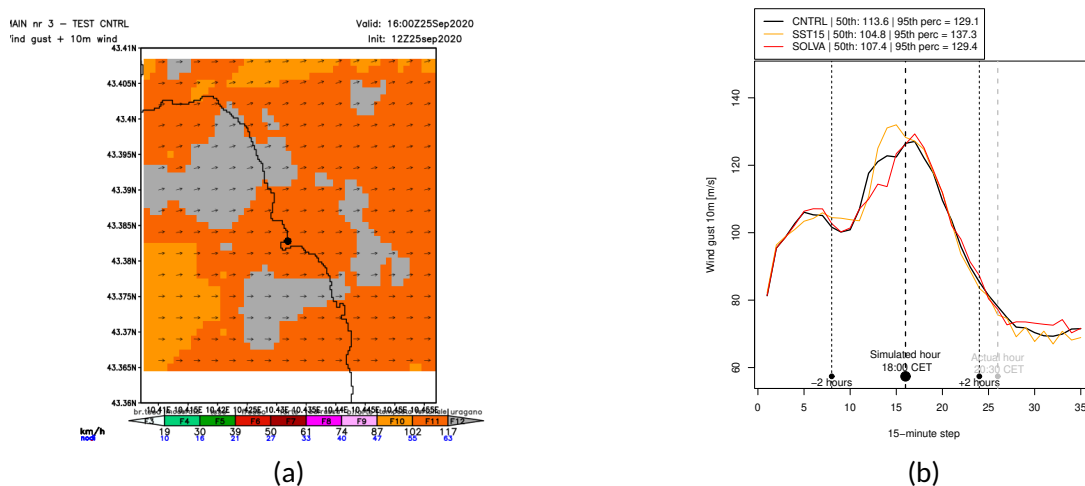


Figura 18: CS 25/09/2022, (a) mappa della raffica del vento a 10 m ricostruita da CNTRL alle 18:00 ora locale; (b) profilo temporale della raffica del vento a 10 m ricostruita da CNTRL (linea nera) e dalle due simulazioni di test SST15 e SOLVA (linea arancione e rossa, rispettivamente).

2011, non sono presenti dati nel database ESWD. Tuttavia, dall'archivio dei report meteorologici in possesso del Consorzio LaMMA e dall'analisi della criticità regionale emessa il giorno precedente, le condizioni meteo indicano la presenza di diffuso maltempo su tutta la regione con forti venti in Arcipelago e un'intensa mareggiata a nord dell'isola d'Elba (altezza d'onda significativa superiore a 6.5 m alla boa della Gorgona).

Poiché le capacità predittive di un modello numerico ad area limitata sono limitate nel caso di tornado/trombe marine (ad esempio si veda [BIM21] e [ILMS20]), abbiamo considerato, tra le possibili variabili alla mesoscala elencate nel paragrafo 5, quelle che si sono dimostrate [BIM21] dei robusti precursori per l'origine, sviluppo e rinvigorimento di tornado/trombe marine. Da una prima analisi visuale degli output del modello (Figure 12, 13, 14 e 15), possiamo osservare come gli indici siano compatibili con fenomeni severi. Per il CS del 17 Dicembre 2011 possiamo osservare (Figure 12c-d) bassi valori di CAPE e valori relativamente bassi del K-index, coerenti con i valori che mediamente si osservano in quel periodo dell'anno. Tuttavia elevati valori di  $SRH1km > 100 \frac{m^2}{s^2}$  si trovano in un'area vicina ( $< 20$  km) al punto d'interesse. Per il CS del 27 Novembre 2012, la frazione di Rosignano Solvay è caratterizzata da ancor più elevati valori di  $SRH1km > 200 \frac{m^2}{s^2}$  (Figura 13b) e alti valori di CAPE ( $> 2500 \frac{J}{Kg}$ ) in una zona di mare prossima al punto d'interesse (Figura 13d). Tuttavia, i valori della raffica del vento a 10 m non sono indicativi di fenomeni particolarmente estremi; infatti la raffica del vento è inferiore a 90 km/h (soglia caratteristica per un evento F0 secondo la scala Fujita). Come discusso precedentemente, il CS del 17 Settembre 2017 (plot in Figura 14) è un evento che ha interessato una larga parte delle coste tirreniche con diffuso maltempo sia a nord che a sud dell'area d'interesse [FTA<sup>+</sup>19]. I valori ricostruiti dal modello sono coerenti con il contesto meteorologico osservato: alti valori di energia (plot 14d), forti gradienti termici alle varie quote (plot 14c), elevata elicità (plot 14c) e venti, probabilmente associati ai downdraft dei temporali, la cui intensità supera i 120 km/h (plot 14a). Dev'essere tuttavia sottolineato che per questo caso studio le condizioni iniziali (i.e., analisi) fornite dal modello globale, conducono a simulazioni ad alta risoluzione che producono errori sia di posizione che di intensità delle precipitazioni più intense ([CAB<sup>+</sup>21], [FTA<sup>+</sup>19]). È solo tramite l'assimilazione di osservazioni da radar che è possibile correggere le convergenze al suolo, responsabili dei temporali e dei conseguenti venti di groppo. Infine per il CS del 25 Settembre 2020, per il quale il database ESWD riporta un fenomeno di "tornado/tromba d'aria o marina" di intensità F1, il modello ad alta risoluzione ricostruisce alti valori di energia disponibile per la convezione (Figura 15c) e gradienti termici medio-alti (Figura 15c); i valori di raffica del vento a 10 m e di elicità nel layer 0-1 km non sono estremi (Figura 15a-b), per quanto riguarda il particolare istante temporale mostrato nella Figura.

Un'ulteriore analisi degli output del modello è possibile estraendo i valori dei precursori alla mesoscala suggeriti in [BIM21] in una zona prossima al punto d'interesse e considerandone il profilo temporale. Dall'analisi dei plot in Figura 16 è possibile apprezzare come il modello tenda ad anticipare l'occorrenza del massimo di qualche ora (il passo temporale nei plot è di 15 minuti). Si veda ad esempio l'energia disponibile per la convezione (variabile WMAX nel pannello 16c) per il caso del 27 Novembre 2021 (linea rossa) e per il caso del 25 Settembre 2020 (linea nera). Dai profili mostrati in Figura 16, abbiamo calcolato (si veda la Tabella 4) le statistiche in una finestra temporale di  $\pm 2$  ore, e le abbiamo confrontate con i valori presenti in bibliografia [BIM21] e riassunti nella Tabella 2. Dal confronto tra i valori riportati nelle Tabelle 2 e 4 possiamo concludere che **le ricostru-**

**zioni numeriche dei quattro CS di Rosignano Solvay sono compatibili con la possibile occorrenza di fenomeni di trombe d'aria/marine di categoria almeno EF1.** Dev'essere tuttavia osservato, come fatto in precedenza, che i valori che abbiamo trovato provengono da un modello atmosferico ad area limitata con una risoluzione (vale a dire passo griglia) di 500 m e per il quale, inoltre, la convezione profonda non è parametrizzata ma calcolata esplicitamente. Viceversa, le soglie tipiche per fenomeni di categoria EF1 e EF2+ riportate in Tabella 2 provengono dal dataset ERA5 [HBB<sup>+</sup>20] prodotto con un modello globale a risoluzione di circa 31 km, ed è noto [AM22] che i dati ERA5 soffrono di una sottostima rispetto alle osservazioni, almeno per quanto riguarda SRH1km e DLS (si veda la Figura 4 in [AM22]).

Utilizzando i dati forniti da Solvay Chimica Italia circa la portata e la temperatura dell'acqua di scarico dell'impianto Solvay (si vedano le Figure 10a e 10b) posto nell'immediato entroterra della zona d'interesse, abbiamo ipotizzato la presenza di una temperatura superficiale del mare (SST) superiore rispetto alle zone circostanti. È infatti noto in bibliografia (si veda ad esempio [MMMP17], [AM21] e [AM22]) che SST più alte implicano un'atmosfera più calda e umida nei bassi strati, pertanto condizioni più favorevolmente instabili e, potenzialmente, movimenti ascendenti più forti. Precedenti studi hanno mostrato che variazioni relativamente piccole nei valori di SST ( $\pm 1\text{ K}$ ) sono capaci di sopprimere o rinforzare considerevolmente il vigore di una supercella capace di dar luogo a più fenomeni tornadici [MMMP17]. Per il solo CS del 25 Settembre 2020, oltre alla simulazione di controllo CNTRL, nella quale le SST sono dedotte dal modello globale, abbiamo realizzato due simulazioni di test atte a verificare l'influenza di SST più calde sui risultati del modello. Nel primo test (SST15), la SST dello specchio di mare antistante la frazione di Rosignano Solvay (si veda il trapezio ombreggiato in Figura 7b) è stata aumentata, mediamente, di  $+1.5\text{ K}$  rispetto al valore fornito dal modello globale. Nel secondo test (SOLVA), l'incremento di SST è stato scelto pari a  $+5\text{ K}$ . Questo valore, apparentemente elevato rispetto ai test presenti in letteratura, è suggerito dai dati forniti da Solvay Chimica Italia che riportano una temperatura media delle acque del canale di scarico per il mese di Settembre 2020 (fino al giorno 24 compreso) di circa  $28.7^\circ\text{C}$ . Nella Figura 17, mostriamo i valori dei precursori alla mesoscala estratti in un box contenente il punto d'interesse per le tre simulazioni CNTRL, SST15 e SOLVA. I dati sono stati estratti considerando la griglia mostrata in Figura 7a che ha un passo griglia di 100 m. Se estraiamo i dati all'ora presunta dell'evento otteniamo le statistiche riassunte nella Tabella 5, dalla quale si può concludere che le due simulazioni di test non si discostano significativamente da CNTRL, malgrado i valori mediani e i 95-esimo percentili di SRH1km siano leggermente più elevati di quanto fornito da CNTRL. Per quanto riguarda LLS e WMAX, le statistiche di SST15 e SOLVA sono leggermente inferiori a CNTRL, suggerendo che SST più alte non influenzino l'aumento di indici associati all'occorrenza di trombe d'aria/marine. Tuttavia, osservando i profili temporali dei precursori (Figura 17) e della raffica del vento a 10 m (Figura 18), osserviamo che il modello tende ad anticipare di almeno un paio d'ore i massimi, fornendo le statistiche per il 95-esimo percentile riassunte nella Tabella 6, dove in **grassetto** abbiamo indicato i valori più favorevoli, o maggiormente associati, alla formazione e presenza di trombe d'aria/marine. A commento della Tabella 6 possiamo concludere che le due simulazioni di test con SST più alte rispetto alla simulazione di controllo impattano sugli indici per quanto riguarda il 95-esimo percentile.

È evidente che rimane un elevato grado di incertezza circa la porzione di mare la cui

Variabile	95th
(a) CNTRL	
LLS	10.0
SRH1km	120.2
WMAX	59.4
LCL*	923
Raffica del vento	129.1
(b) SST15	
LLS	10.2
SRH1km	119.5
WMAX	60.4
LCL*	919
Raffica del vento	<b>137.3</b>
(c) SOLVA	
LLS	<b>10.3</b>
SRH1km	<b>123.5</b>
WMAX	<b>61.8</b>
LCL*	<b>914</b>
Raffica del vento	129.4

Tabella 6: CS 2020-09-25: 95-esimo percentile dei precursori alla mesoscala selezionati sulla base di [BIM21] ed estratti dalle ricostruzioni numeriche nei pressi della frazione di Rosignano Solvay e in una finestra temporale centrata circa due ore prima all'ora presunta del passaggio della tromba marina  $\pm 2$  ore. I dati sono stati estratti considerando la griglia mostrata in Figura 7a che ha un passo griglia di 100 m.

\*Per LCL abbiamo indicato il quinto percentile.



SST é influenzata della temperatura dell'acqua del canale di scarico. Con la scelta del trapezio mostrato in Figura 7b abbiamo supposto che il volume di acqua interessato dal canale di scarico sia di circa 50 M  $m^3$  di acqua. Infatti l'area del trapezio é circa 10  $km^2$  e la profonditá media di circa 5 m (questa é la batimetria della zona assunta dal modello e proveniente dal database ETOPO5). Come ipotesi di lavoro, piuttosto grossolana, supponiamo che non ci siano scambi tra l'acqua all'interno del trapezio detto  $\Omega$  e le acque circostanti (supponiamo cioé che  $\Omega$  sia un sistema chiuso); possiamo supporre allora che la sua temperatura superficiale  $T(t)$ , vari nel tempo  $t$  (per semplicitá consideriamo intervalli discreti di tempo,  $t \in \mathbb{N}$ ) secondo la relazione:

$$T(t) = T(t-1) + \alpha \frac{R(t)}{m_0} \Delta T_S(t-1), \quad (6)$$

dove  $R(t)$  é la portata al tempo  $t$  attraverso la frontiera di  $\Omega$  (la portata per il mese di Settembre 2020 é mostrata in Figura 10a),  $m_0$  é la massa di acqua totale all'interno del trapezio  $\Omega$  (approssimata a 50 M di tonnellate),  $\Delta T_S(t-1)$  la differenza tra la temperatura dell'acqua del canale di scarico Solvay  $T_S$  e la temperatura dell'acqua del trapezio  $T$  all'istante  $(t-1)$  e  $\alpha$  una costante che ha le dimensioni di un tempo. Assumendo per semplicitá come istante iniziale le 00:00 ora locale del 1 Agosto 2020 e ponendo  $T(0) = 26.0^\circ C$  (valore approssimato a quello misurato dalla boa di Gorgona) abbiamo che la temperatura superficiale dell'acqua di mare compresa nel trapezio aumenta di poco meno  $0.7^\circ C$  per raggiungere  $26.68^\circ C$ . Si veda in Figura 19 il grafico ottenuto applicando l'equazione 6 con  $T(0) = 26.0^\circ C$  al 1 Agosto 2020. É evidente tuttavia che la temperatura superficiale dell'acqua contenuta nel trapezio mostrato in Figura 7b non puó essere influenzato solo dall'acqua del canale di scarico ma anche dai flussi in entrata e uscita con la porzione di mare circostante. In un modello ancor piú generale dovremmo considerare anche i flussi (evaporazione/precipitazioni) attraverso la superficie costituita dall'interfaccia mare/atmosfera, che per adesso consideriamo trascurabili. Modificando leggermente l'ipotesi originale, qualora considerassimo anche la variazione di temperatura dovuta dovuta a un flusso in entrata (pari a quello del canale di scarico) dovuto alla temperatura superficiale delle acque circostanti, l'equazione 6 potrebbe essere modificata in:

$$T(t) = T(t-1) + \alpha \left( \frac{R(t)}{m_0} \Delta T_S(t-1) + \frac{R(t)}{m_0} \Delta T_M(t-1) \right), \quad (7)$$

dove  $\Delta T_M(t-1)$  é la differenza tra la temperatura del mare circostante  $T_M$  e quella del trapezio. In maniera piú generale, la variazione di temperatura superficiale dell'acqua nel trapezio é data:

$$T(t) = T(t-1) + \alpha \int_{\partial\Omega} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} \, ds \quad (8)$$

dove  $\partial\Omega$  é la frontiera di  $\Omega$  (i bordi),  $\mathbf{B}$  é il campo vettoriale che tiene conto del flusso del fluido e delle sue proprietá (i.e., temperatura) attraverso  $\partial\Omega$  al tempo  $t$  e  $\mathbf{n}$  é il versore normale a  $\partial\Omega$ . Nel caso pratico in esame abbiamo assunto nell'equazione 6 che  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$  sia uguale a  $\frac{R(t)}{m_0} \Delta T_S(t-1)$  e che la frontiera di  $\Omega$  sia costituita da un solo punto; nel caso generale, la stima di  $\mathbf{B}$  é difficile, pertanto l'equazione 8 é poco applicabile malgrado il suo maggior rigore.

Concludiamo osservando che realizzare una simulazione modellistica delle correnti marine e indagare le variazioni del gradiente termico orizzontale e verticale delle acque

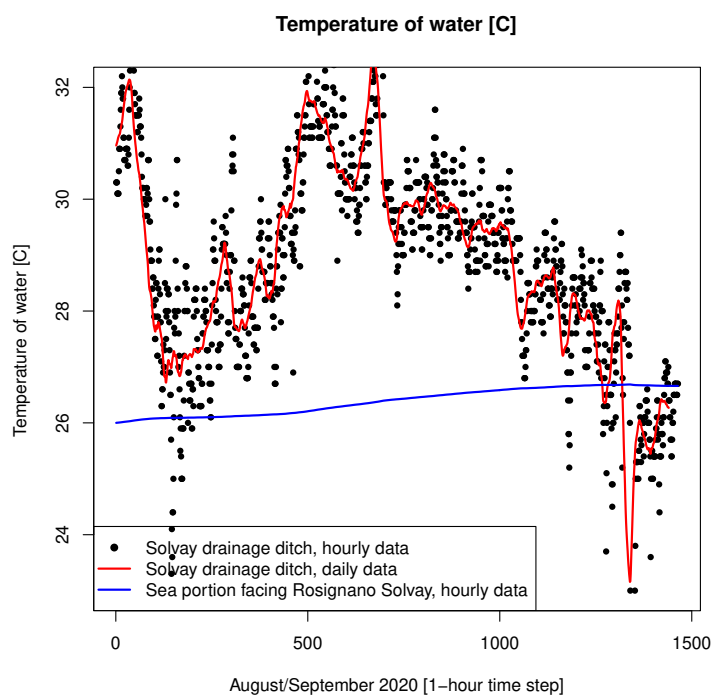


Figura 19: Agosto/settembre 2020: ipotesi (equazione 6) di variazione della temperatura superficiale del mare (linea blu) compreso nel trapezio antistante la frazione di Rosignano Solvay per effetto dell'acqua di scarico dell'impianto Solvay (linea rossa).

nello specchio di mare antistante la frazione di Rosignano Solvay è al di là dello scopo di questo report. Riteniamo altresì che, sulla base delle evidenze scientifiche presenti in letteratura ([MMMP17], [AM21] e [AM22]) sia lecito aspettarsi un'influenza più marcata dell'anomalia di SST sugli indici di instabilità atmosferica, qualora considerassimo una zona ben più ampia del trapezio  $\Omega$  mostrato in Figura 7b.

## Riferimenti bibliografici

- [AM21] Elenio Avolio and Mario Marcello Miglietta. Multiple tornadoes in the italian ionian regions: Observations, sensitivity tests and mesoscale analysis of convective storm environmental parameters. *Atmospheric Research*, 263:105800, 2021.
- [AM22] Elenio Avolio and Mario Marcello Miglietta. Tornadoes in the tyrrhenian regions of the italian peninsula: The case study of 28 july 2019. *Atmospheric Research*, page 106285, 2022.
- [BIM21] Leonardo Bagaglini, Roberto Ingrosso, and Mario Marcello Miglietta. Synoptic patterns and mesoscale precursors of italian tornadoes. *Atmospheric Research*, 253:105503, 2021.
- [BL89] Philippe Bougeault and Pierre Lacarrere. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly Weather Review*, 117(8):1872–1890, 1989.
- [CAB<sup>+</sup>21] Valerio Capecchi, Andrea Antonini, Riccardo Benedetti, Luca Fibbi, Samantha Melani, Luca Rovai, Antonio Ricchi, and Diego Cerrai. Assimilating X-and S-band radar data for a heavy precipitation event in Italy. *Water*, 13(13):1727, 2021.
- [Cap21] Valerio Capecchi. Reforecasting two heavy-precipitation events with three convection-permitting ensembles. *Weather and Forecasting*, 36(3):769–790, 2021.
- [CBR00] Joan Cuxart, Philippe Bougeault, and J-L Redelsperger. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(562):1–30, 2000.
- [CRL94] G Caniaux, JL Redelsperger, and J Ph Lafore. A numerical study of the stratiform region of a fast-moving squall line. Part I: General description and water and heat budgets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(14):2046–2074, 1994.
- [DIBD09] Charles A Doswell III, Harold E Brooks, and Nikolai Dotzek. On the implementation of the enhanced fujita scale in the usa. *Atmospheric Research*, 93(1-3):554–563, 2009.
- [FTA<sup>+</sup>19] Stefano Federico, Rosa Claudia Torcasio, Elenio Avolio, Olivier Caumont, Mario Montopoli, Luca Baldini, Gianfranco Vulpiani, and Stefano Dietrich. The impact of lightning and radar reflectivity factor data assimilation on the very short-term rainfall forecasts of RAMS@ISAC: application to two case studies in Italy. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 19(8), 2019.
- [GGL90] Philippe Gaspar, Yves Grégoris, and Jean-Michel Lefevre. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at

- station Papa and long-term upper ocean study site. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C9):16179–16193, 1990.
- [HBB<sup>+</sup>20] Hans Hersbach, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dinand Schepers, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049, 2020.
- [HTCL21] KK Hon, SM Tse, PW Chan, and QS Li. Observation and numerical simulation of a weak waterspout at hong kong international airport. *Meteorological Applications*, 28(1):e1975, 2021.
- [ILMS20] Roberto Inghrosso, Piero Lionello, Mario Marcello Miglietta, and Gianfausto Salvadori. A statistical investigation of mesoscale precursors of significant tornadoes: The italian case study. *Atmosphere*, 11(3):301, 2020.
- [Law05] Mark G Lawrence. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2):225–234, 2005.
- [LCM<sup>+</sup>18] Christine Lac, Jean-Pierre Chaboureau, Valéry Masson, Jean-Pierre Pinty, Pierre Tulet, Juan Escobar, Maud Leriche, Christelle Barthe, Benjamin Aouizerats, Clotilde Augros, et al. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5):1929, 2018.
- [LPP<sup>+</sup>19a] Martina Lagasio, Antonio Parodi, Luca Pulvirenti, Agostino N Meroni, Giorgio Boni, Nazzareno Pierdicca, Frank S Marzano, Lorenzo Luini, Giovanna Venuti, Eugenio Realini, et al. A synergistic use of a high-resolution numerical weather prediction model and high-resolution earth observation products to improve precipitation forecast. *Remote Sensing*, 11(20):2387, 2019.
- [LPP<sup>+</sup>19b] Martina Lagasio, Luca Pulvirenti, Antonio Parodi, Giorgio Boni, Nazzareno Pierdicca, Giovanna Venuti, Eugenio Realini, Giulio Tagliaferro, Stefano Barindelli, and Bjorn Rommen. Effect of the ingestion in the WRF model of different sentinel-derived and GNSS-derived products: Analysis of the forecasts of a high impact weather event. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup4):16–33, 2019.
- [MBC<sup>+</sup>08] JJ Morcrette, Howard W Barker, JNS Cole, Michael J Iacono, and Robert Pincus. Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Monthly Weather Review*, 136(12):4773–4798, 2008.
- [MLMM<sup>+</sup>13] V. Masson, P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouysse, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet,

- B. Vincendon, V. Vionnet, and A. Voldoire. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6(4):929–960, 2013.
- [MM18] Mario Marcello Miglietta and Ioannis T Matsangouras. An updated “climatology” of tornadoes and waterspouts in Italy. *International Journal of Climatology*, 38(9):3667–3683, 2018.
- [MMMP17] Mario Marcello Miglietta, Jordi Mazon, Vincenzo Motola, and Antonello Pasini. Effect of a positive sea surface temperature anomaly on a Mediterranean tornadic supercell. *Scientific reports*, 7(1):1–8, 2017.
- [MNP16] IT Matsangouras, PT Nastos, and I Pytharoulis. Study of the tornado event in greece on march 25, 2009: Synoptic analysis and numerical modeling using modified topography. *Atmospheric Research*, 169:566–583, 2016.
- [MPN14] IT Matsangouras, I Pytharoulis, and PT Nastos. Numerical modeling and analysis of the effect of complex greek topography on tornadogenesis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7):1905–1919, 2014.
- [RBC<sup>+</sup>21] Antonio Ricchi, Davide Bonaldo, Guido Cioni, Sandro Carniel, and Mario Marcello Miglietta. Simulation of a flash-flood event over the adriatic sea with a high-resolution atmosphere–ocean–wave coupled system. *Scientific reports*, 11(1):1–11, 2021.
- [TCK19] Olga Toptunova, Margarita Choulga, and Ekaterina Kurzeneva. Status and progress in global lake database developments. *Advances in Science and Research*, 16:57–61, 2019.