

Monumento Naturale "La Frasca"

Fenomeni meteorologi estremi Analisi meteo-climatica della tromba d'aria dell'8 settembre 2022



Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio



FENOMENI METEREOLOGICI ESTREMI SULLE COSTE LAZIALI -PREVISIONE E PREVENZIONE

"Analisi meteo-climatica della tromba d'aria dell'8 settembre 2022 (Civitavecchia)" "Analisi meteo-climatica della tromba d'aria dell'8 settembre 2022 (Civitavecchia)"

ARSIAL Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio"

Supervisione editoriale e scientifica: Luca Scarnati – ARSIAL Area Patrimonio <u>www.arsial.it</u> - <u>l.scarnati@arsial.it</u>

Testi a cura di: Dott. Elenio Avolio ISAC-CNR - Via P. Gobetti 101 - 40129 Bologna (BO) ITALY Sede Secondaria di LAMEZIA TERME - Zona Industriale-Comparto 15- presso Fondazione Mediterranea Terina-88046 Lamezia Terme (CZ) - <u>www.isac.cnr.it</u>

In copertina: Foto di Luca Scarnati

Pubblicato nel mese di febbraio 2024









Premessa

L'8 settembre 2022 un evento meteorologico eccezionale ha colpito la Pineta costiera della Frasca di proprietà ARSIAL, nel territorio del Comune di Civitavecchia (RM), per poi addentrarsi nell'entroterra, provocando ingenti danni sia alla pineta, con l'abbattimento di numerosi alberi, che alle aziende agricole. Nel tratto in cui ha toccato la viabilità, smorzando parte della sua energia proprio sulle fasce frangivento di proprietà ARSIAL, la strada è stata invasa da tronchi di grosse dimensioni. Le foto a disposizione e i successivi sopralluoghi hanno mostrato la pericolosità dell'evento, che solo per caso non ha provocato vittime. Si tenga presente inoltre che lo stesso ha sfiorato di poche centinaia di metri la centrale termoelettrica di Torrevaldaliga. In seguito alla valutazione dei danni e al ripristino dei luoghi, ARSIAL ha affidato all'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR, uno studio di approfondimento del fenomeno, al fine di valutare la sua frequenza e la possibilità di realizzare un sistema di previsione e di prevenzione dei danni. Da un primo approccio era infatti apparso come questa area costiera dovesse essere considerata, anche in virtù dei cambiamenti climatici in atto su larga scala, tra quelle del Mediterraneo maggiormente affette da tornado di forte intensità. Anche in considerazione della disponibilità dei dati del Servizio Integrato Agrometeorologico della Regione Lazio (SIARL) di ARSIAL, questo lavoro è un primo passo per poter predisporre un sistema di previsione e allerta, nonché per prendere coscienza dell'entità del fenomeno così da poter valutare correttamente le politiche di gestione del territorio, sia da parte dell'Agenzia che da parte delle altre istituzioni locali. In questa ottica risulta evidentemente rilevante la conservazione e la gestione dei numerosi chilometri di fasce frangivento, pineta compresa, presenti tutto il territorio costiero del Lazio.



Via Ugo Fontanatetta – foto VV.F.

1. Introduzione

Un tornado, o tromba d'aria, è un fenomeno meteorologico improvviso e violento, caratterizzato da moti vorticosi ascendenti, che può spostarsi in linea retta anche per decine di chilometri. All'interno di un tornado i venti possono raggiunge anche i 500 chilometri l'ora e i valori di pressione atmosferica sono bassissimi (anche inferiori a 900 millibar). Il vortice associato ad un tornado può avere un'ampiezza fino a 300 metri e, quando si origina durante forti temporali, è visibile un caratteristico "imbuto" che si estende dalla base della nube temporalesca fino in superficie.

Ingredienti tipicamente associati allo sviluppo di una tromba d'aria sono: elevata umidità e instabilità dell'aria (forte gradiente termico verticale), nonché la presenza di forte variazione della direzione e dell'intensità del vento con la quota, il cosiddetto *wind shear*; tale ultimo ingrediente è tipicamente associato allo sviluppo di celle temporalesche particolarmente intense e ad elevato impatto.

Un tornado può avere un'enorme forza distruttiva, principalmente determinata dall'aria calda che sale, in grado di sollevare da terra oggetti di grandi dimensioni dal peso di diversi quintali.

Non è possibile, allo stato attuale, stabilire connessioni scientificamente valide tra l'eventuale aumento di tornado e il cambiamento climatico. I dati e gli studi a disposizione sono ancora insufficienti ed è impossibile non considerare, quando si parla di eventi in aumento negli ultimi anni, l'enorme e costante sviluppo di piattaforme informatiche e dispositivi che rendono oggi, di fatto, decisamente più semplice la segnalazione di tali eventi rispetto al passato.

2. I tornado in Italia e sulle regioni centrali tirreniche (contesto di studio)

I tornado nell'area mediterranea, e in Italia in particolare, non sono più considerati degli eventi rari, sebbene i fenomeni non siano confrontabili con quelli degli Stati Uniti (sia per numero che per intensità). Alcuni recenti lavori condotti dall'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR) (Avolio e Miglietta, 2021; 2022; 2023), confermano l'esistenza di specifiche aree maggiormente affette da tornado di forte intensità. Una di queste è rappresentata dalle regioni centrali che si affacciano sul Tirreno (Lazio in particolare); altre zone particolarmente colpite in Italia sono le regioni sud-orientali (Puglia-Calabria) e la Pianura Padana.

Le conclusioni di cui sopra sono state raggiunte analizzando 32 anni di dati (1990-2021), isolando un numero considerevole di eventi tornadici ad elevata intensità (445 su tutta Italia). Sono presi in considerazione gli eventi classificati con intensità maggiore o uguale a EF1 (scala Enhanced Fujita).

Nella Figura 1 sono riportati gli eventi analizzati negli studi sopra-citati. Oltre a ben identificare le aree maggiormente interessate dal rischio tornado, si può vedere come la gran parte dei casi si registri in estate (178 eventi) e in autunno (174 eventi).



Fig. 1 I 445 tornado di intensità EF1+ selezionati sull'Italia nel periodo 1990-2021. I diversi colori identificano le diverse stagioni (*Figura derivata da: Avolio and Miglietta, 2023*)



Fig. 2 I 53 tornado di intensità EF1+ selezionati sul Lazio nel periodo 1990-2021. I diversi colori identificano le diverse stagioni

Al fine di analizzare con maggiore dettaglio i tornato sul centro Italia e, in particolare, sul Lazio, è mostrata la Figura 2. La mappa mostra i 52 tornado (con intensità EF1+) registrati nella sola regione Lazio (isolando i casi sul versante tirrenico) dal 1990-2021. Il numero di eventi è significativo, se rapportato al numero di eventi a livello nazionale e locale (su tutte le regioni centrali tirreniche, sono stati individuati 93 casi). È confermata, anche per il Lazio, una tendenza stagionale per gli eventi con predominanza per l'autunno (mesi "SON" – settembre-ottobre-novembre).

Sulla base dei numeri ottenuti sono state condotte delle analisi statistiche, analizzando sia misure (radiosondaggi) sia output da modelli a grande scala (re-analisi), al fine di individuare le condizioni atmosferiche prevalenti associate ai tornado individuati; si rimanda alle due pubblicazioni sopra-citate per i dettagli delle analisi.

È stato quindi possibile definire delle specifiche configurazioni atmosferiche prevalenti, potenzialmente favorevoli allo sviluppo di tornado nell'area in studio. Considerando le aree tirreniche, le condizioni atmosferiche prevalenti sono caratterizzate da un'area di bassa pressione (e aria più fredda) che approccia l'Italia nord-occidentale, sia in quota che in superficie, e da venti al suolo sud-occidentali in grado di trasportare aria più calda della media verso le regioni colpite.

La figura 3 riassume quanto detto, mostrando per lo più dei campi di anomalia rispetto alla media. Tale rappresentazione grafica consente di individuare in modo chiaro le aree maggiormente sensibili agli eventi in studio. In questo caso, i campi atmosferici sono messi in correlazione con i 93 eventi tornadici isolati per le regioni centrali tirreniche.

I pannelli (a) e (b) mostrano quanto detto in precedenza a proposito della bassa pressione e dell'aria più fredda della media sull'Italia nord-occidentale. Il pannello (c) rappresenta la SST (Sea Surface Temperature) in termini di anomalia rispetto alla media; la mappa descrive un ambiente favorevole ai tornado caratterizzato da anomalia positiva (temperatura superficiale del mare più alta della media). Il pannello (d) mostra il vento medio a 10m per i casi di tornado sul centro Italia; da questa si nota la presenza di un flusso di correnti intense in ingresso nel Mediterraneo attraverso la valle del Rodano e la presenza di correnti sud-occidentali sul Lazio. Infine, il pannello (e) mostra (in termini di anomalia, ancora) la chiara presenza di aree ad elevato valore di CAPE (*Convective Available Potential Energy*; J/kg) proprio in corrispondenza delle coste tirreniche adiacenti alle aree colpite da trombe d'aria.

La possibilità di individuare delle condizioni sinottiche prevalenti, pur non rappresentando di fatto delle previsioni localizzate, offre la preziosa opportunità di identificare, con buon anticipo, dei possibili elementi *precursori* per l'innesco degli eventi tornadici.



Fig. 3 Condizioni sinottiche / campi a grande scala prevalenti in corrispondenza dei 93 tornado di intensità EF1+ selezionati sulle regioni centrali tirreniche nel periodo 1990-2021 (*Alcuni pannelli della figura sono derivati da: Avolio and Miglietta, 2022*)

3. L'evento di Civitavecchia dell'8 settembre 2022

3.1 Osservazioni e misure

3.1.1 Report

Come è noto, l'unico metodo per stabilire il verificarsi di un tornado, e soprattutto per valutare l'entità dei danni (post-evento), è l'indagine visiva. Non esistono, infatti, strumenti meteorologici in grado di "misurare" un simile evento (piuttosto possono essere valutati gli effetti causati dallo stesso in termini di vento o altro). A tal proposito, rivestono una grande importanza sistemi di raccolta informazioni basati su testimonianze dirette da parte di cittadini e/o da professionisti (che vengono in tutti i casi successivamente validate e verificate da professionisti). Due esempi di tali sistemi sono: European Severe Weather Database (ESWD; https://eswd.eu) e, a livello nazionale, il sistema STORM REPORT, un progetto PRETEMP-METEONETWORK (http://www.pretemp.it).

Per il tornado di Civitavecchia le seguenti informazioni sono ricavate da tali sistemi informativi:

Data e Ora: 2022-09-08 09:00 (ora locale) - 07 UTC Precisione Data/Ora: +/- 15 Minuti Regione: Lazio Comune: Civitavecchia Latitudine: 42.1603353677962 Longitudine: 11.7591655817857 Categoria: EF1

Descrizione: Alberi spezzati o abbattuti, danni a qualche tetto, un"auto spostata, un camper rovesciato, un rimorchio danneggiato, serre danneggiate, pannelli solari distrutti, palo della corrente in acciaio piegato alla base. Osservata tipica forma ad imbuto.

Sempre dal sito del progetto STORM REPORT (in particolare alla descrizione dell'evento qui reperibile: https://www.meteonetwork.it/tt/stormreport/report.php?rep=14871 ; ultimo accesso 15/12/2023) è stato possibile ricavare l'immagine in Figura 4a, che rappresenta una foto del tornado (pannello in alto); invece, nella figura 4b (pannello in basso) è mostrato il percorso (ricostruzione post-evento da parte di personale ARSIAL) dello stesso nell'area in studio.

Dalla prima foto si può notare l'entità dell'evento, con una chiara e distinguibile forma a imbuto che si estenda dalla base di un cumulonembo fino al suolo. Il tragitto ricostruito, mostrato nel pannello in basso di figura 4, mostra come la tromba d'aria abbia percorso diverse centinaia di metri prima di dissolversi, attraversando fortunatamente aree prevalentemente rurali e poco abitate.





Fig. 4 Una foto del tornado (pannello in alto) e il percorso dello stesso (linee in rosso) nell'area in studio (pannello in basso); la foto in alto è ricavata dal sito <u>www.pretemp.it</u>, in particolare al link indicato nel testo, mentre il percorso del tornado in basso è stato fornito da ARSIAL.

3.1.2 Foto post-evento

Nelle ore successive all'evento, personale ARSIAL ha condotto un sopralluogo nella Pineta frangivento "La Frasca", parallela e vicina alla linea di costa e, quindi, perpendicolare al tragitto del tornado, fotografando i danni subiti dalla pineta.

Le immagini in figura 5 mostrano alberi divelti e tronchi spezzati dal passaggio della tromba d'aria. Quando si verifica un tornado, riveste enorme importanza la fase di analisi post-evento, mediante sopralluoghi accurati che consentono di comprendere al meglio la dinamica dell'evento e, soprattutto, aiutano alla sua classificazione. Tali foto, insieme ai report precedentemente discussi, confermano inequivocabilmente la presenza di un tornado nell'area.



Fig. 5 Foto Luca Scarnati ARSIAL - danni arrecati alla pineta "La Frasca"

3.1.3 Dati di vento (SIARL - Arsial)

Il Servizio Integrato Agrometeorologico della Regione Lazio (SIARL) provvede ad acquisire, elaborare e diffondere dati ed informazioni di interesse agrometeorologico. I dati sono pubblicati quotidianamente sul portale istituzionale di ARSIAL. Sono presenti 96 stazioni elettroniche (la figura 6 ne mostra la localizzazione, pannello a sinistra), alcune delle quali dotate di misuratore di vento (anemometro). Per i nostri scopi, la stazione (dotata di anemometro) più vicina al luogo interessato dal tornado è quella di

Tarquinia. Nella Figura 6 (pannello a destra) sono mostrati i valori di vento misurati ogni ora nella stazione. Si vede chiaramente come, in corrispondenza del rilevamento della tromba d'aria (gli orari nella tabella sono UTC), il vento raggiunga un picco relativo con massima raffica pari a 10.4 m/s (nell'ora precedente e in quella successiva il vento di raffica ha valore di 4.3/4.4 m/s).

Tale repentina variazione del modulo del vento è certamente imputabile al passaggio del vortice sull'area in studio.





Roma 30/05/2023

Oggetto: Misura del vento rilevato con frequenza oraria il giorno 08/09/2022 Centralina di TARQUINIA (VT), loc. Portaccia, quota: 19 m.slm.



Fig. 6 Rete di stazioni di misura del SIARL visibili sul sito ARSIAL (sx) e tabella dei venti orari (dx) nella stazione di Tarquinia.

3.1.4 Immagini Satellitari e RADAR

Nelle figure successive sono mostrate: un'immagine satellitare nell'infrarosso (Meteosat Second Generation), e una sequenza di tre immagini RADAR. Entrambi i prodotti qui riportati sono derivati dal sistema automatico "Dewetra" del Dipartimento di Protezione Civile (<u>www.mydewetra.org</u>).

La prima immagine rappresenta la temperatura di brillanza alle ore 07 UTC sull'Italia, dal canale IR 10.8, che mostra in modo evidente un'ampia area del centro Italia coperta da nubi molto fredde nella loro parte superiore (*cold cloud top*). Tale circostanza è riconosciuta come elemento determinante per il potenziale sviluppo di eventi meteorologici severi caratterizzati da venti intensi, piogge estreme (anche grandinigene), attività elettrica sostenuta e possibilità di tornado.

Le immagini RADAR si riferiscono invece agli istanti temporali 06:30 – 07:00 – 07:30 UTC, e descrivono pertanto l'intera fase di passaggio del tornado sull'area in studio. La variabile mostrata è VMI (*Vertical Maximum Intensity*), cioè la massima riflettività osservata alle quote 2, 3, e 5km, che fornisce informazioni

sulle zone in cui sono in corso fenomeni di un certo rilievo. I colori più caldi (quindi i valori maggiori (dBz)) identificano aree particolarmente instabili e ad elevato potenziale convettivo. Nella giornata in esame le aree instabili sono state molto ampie e non è semplice distinguere la struttura (cella/e convettiva/e) potenzialmente responsabile dello sviluppo del tornado; ma ciò è stato possibile sulla base dei report e delle osservazioni e, sulle figure, l'area della cella tornadica è evidenziata mediante la freccia di colore bianco. Dalla sequenza di immagini RADAR si vede la rapida transizione del sistema convettivo associabile alla tromba d'aria (che nasce tromba marina e diventa tromba d'aria dopo aver incontrato il terreno), con moto dapprima da Sud-Ovest a Sud-Est e, successivamente, da Ovest verso Est.

Si sottolinea che tali immagini rappresentano delle osservazioni e non dei prodotti previsionali; allo stesso tempo, esse rappresentano un utilissimo strumento per il *nowcasting* e per, eventualmente, la definizione di sistemi di *(very) early warning*.



Fig. 7 Temperatura di brillanza derivata da MSG- IR 10.8 alle ore 07 UTC del 8 settembre 2022. La mappa è derivata dal sistema automatico "Dewetra" del Dipartimento di Protezione Civile (www.mydewetra.org).



Fig. 8 Sequenza immagini RADAR dalle 06:30 UTC alle 07:30 UTC (ogni 30 minuti). È mostrato il parametro VMI (Vertical Maximum Intensity). Le mappe sono derivate dal sistema automatico "Dewetra" del Dipartimento di Protezione Civile (www.mydewetra.org).

Per quanto detto è ben chiaro che, per fornire delle previsioni in tempo utile, anche a sostegno delle decisioni finalizzate alla salvaguardia del territorio e alla mitigazione dei danni, risulta essere uno strumento di fondamentale importanza l'utilizzo dei modelli meteorologici ad area limitata.

3.2 Ricostruzione dell'evento mediante strumenti modellistici

L'utilizzo di modelli meteorologici previsionali ad alta risoluzione, nel corso degli anni, ha consentito di raggiungere livelli importanti di conoscenza sulla dinamica di tali eventi estremi, che per definizione sono altamente localizzati nel tempo e nello spazio e, quindi, particolarmente difficili da prevedere.

Un tornado verificatosi sul litorale laziale il 28 luglio 2019, tristemente noto per aver causato la morte di una persona, è stato studiato e analizzato in dettaglio (Avolio et al., 2022) mediante simulazioni numeriche ad alta risoluzione (modello ad area limitata WRF - *Weather Research and Forecasting*), al fine di comprendere al meglio le caratteristiche dinamiche e verificare la capacità predittiva di un simile fenomeno. Come anticipato, le risoluzioni spaziali dei modelli meteorologici non consentono la simulazione diretta del tipico "imbuto" identificato come tromba d'aria ma, piuttosto, consentono di simulare parametri e indicatori meteorologici ad esso associato. I risultati hanno mostrato come sia possibile prevedere con successo valori elevati di specifici indicatori d'instabilità atmosferica e di convezione profonda tipici dei tornado, nonché di simulare correttamente la struttura delle celle convettive responsabili della genesi di tali eventi.

Un simile approccio è stato seguito anche per l'evento di Civitavecchia qui analizzato, partendo da una base solida di conoscenza sia relativa al modello WRF e al suo set-up, sia relativa all'area in studio.

3.2.1 Analisi sinottica

Gli studi meteorologici locali non possono prescindere dal fornire utili informazioni sulle condizioni a larga scala. Per tale motivo sono di seguito mostrate le mappe sinottiche per l'evento in studio, al fine di individuare le condizioni meteorologiche potenzialmente responsabili dell'innesco dell'evento.

Le condizioni a larga scala sono analizzate mediante i campi IFS (*Integrated Forecasting System*) del modello europeo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), gli stessi utilizzati per le condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni WRF ad alta risoluzione.

Sono di seguito riportati campi in quota (500 hPa; circa 5500 m) e in superficie. In particolare, la figura 9 mostra la sequenza di altezza di Geopotenziale (m) per le ore 12 UTC del 07; 00 UTC del 08 e 12 UTC del 08. Dalla figura si identifica una condizione abbastanza stazionaria, con un promontorio di alta pressione che occupa l'Europa centrale e attraversa il Nord Italia, a separare una ampia area di alta pressione sul Mediterraneo da un'area di pressione inferiore sul Nord Europa. Ben visibile un *cut-off* in quota sul Regno Unito. In tale condizione, le correnti in quota seguono il flusso zonale (venti occidentali sul Mediterraneo

e l'Italia, come visibile dalla sequenza dei pannelli centrali di figura 9). Nei pannelli inferiori di figura 9 sono mostrati i venti in superficie (10m); si vede come le correnti interessino le coste tirreniche centrali con una marcata componente meridionale. Tale circostanza evidenzia la presenza di *wind shear* verticale (differenza di vento tra superficie e livelli superiori) a rotazione oraria, che è uno degli ingredienti chiave nell'innesco di fenomeni atmosferici intensi (si veda in seguito quantificazione dello *shear* con il modello WRF).

Le condizioni sinottiche relative al caso studio di Civitavecchia presentano delle analogie con quelle, definite prevalenti, mostrate in figura 3. In questo caso, tuttavia, il minimo di altezza di Geopotenziale è maggiormente spostato a nord rispetto alla configurazione prevalente ottenuta dagli studi statistici descritti in precedenza. Elemento di accordo è la presenza di correnti occidentali verso le coste tirreniche, con marcata componente meridionale nell'area in studio.



Fig. 9 Altezza di Geopotenziale a 500 hPa (pannelli in alto), vento a 500 hPa (pannelli al centro) e vento a 10m (pannelli in basso), rispettivamente alle 12 UTC del 07/09 (colonna a sx), alle 00 UTC del 08/09 (colonna centrale) e alle 12 UTC del 08/09 (colonna a destra). Tutti i campi sono derivati dagli output del modello IFS-ECMWF.

Per concludere la descrizione delle condizioni atmosferiche generali, si riporta un altro elemento degno di nota relativo allo stato del mar Mediterraneo; in figura 10 è mostrata l'anomalia (giornaliera) di Temperatura Superficiale del Mare (SST – Sea Surface Temperature) per il giorno 08 settembre. Tale dato è ottenuto da osservazioni satellitari e la mappa derivata dal sistema CMEMS (E.U. Copernicus Marine Service Information), che distribuisce vari prodotti sullo stato del mare (<u>https://doi.org/10.48670/moi-00172</u>). Come si può facilmente notare, la SST per il giorno in esame presenta una forte anomalia positiva, con valori prossimi ai 4° nelle aree marine a ridosso della costa laziale. Tale situazione amplifica la potenziale condizione di instabilità atmosferica, agevolando un gradiente termico verticale maggiore e, quindi, condizioni maggiormente probabili di sviluppo di convezione. Inoltre, alte temperature della superficie marina facilitano i processi di evaporazione, aumentando l'umidità della colonna d'aria sovrastante.



Fig. 10 Anomalia di SST per il giorno 08/09. Immagine derivata direttamente dalla piattaforma web CMEMS (https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004/description)

3.2.2 Il modello WRF @ CNR-ISAC

WRF (*Weather Research and Forecasting*) è un sistema di previsione meteorologica a mesoscala all'avanguardia, fornito dal *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), che può contare sulla più grande comunità di utenti registrati al mondo. Il modello è adottato all'ISAC-CNR da molti anni sia per scopi di ricerca sia per la previsione meteorologica operativa a diverse scale spaziali (dalla scala sinottica alla scala sub-chilometrica). Un modello meteorologico risolve un sistema di equazioni che rappresenta i processi dinamico-fisici dell'atmosfera. Tali equazioni non hanno una soluzione esatta e sono risolte con metodi approssimati che considerano l'atmosfera suddivisa in un certo numero di volumi di dimensione finita (grigliato tridimensionale).

Il modello prevede la possibilità di adottare numerose configurazioni, ad esempio spaziando tra differenti schemi di parametrizzazione dei processi fisici. Le condizioni iniziali e al contorno sono fornite dai modelli a circolazione generale. Per questo caso studio sono stati utilizzati i campi IFS (*Integrated Forecasting*

System) del modello europeo ECMWF; gli stessi utilizzati per descrivere le condizioni sinottiche nella sezione precedente.

Il set-up di WRF per il caso studio in oggetto è derivato da quello utilizzato già con successo in studi precedenti, in particolare in Avolio e Miglietta 2022; 2023. In particolare, sono stati utilizzate tre griglie innestate per il calcolo: una a 9 km di risoluzione orizzontale centrata sull'intera Penisola, una seconda centrata sul centro Italia con risoluzione di 3 km, e una terza griglia su Lazio e aree limitrofe alla risoluzione di 1km. Le analisi di dettaglio sono ricavate da quest'ultimo dominio ad alta risoluzione.

Sono state preliminarmente compiute diverse simulazioni con il modello variando 6 diverse configurazioni. Una dettagliata analisi delle uscite, confrontando i valori simulati con le osservazioni disponibili, ha consentito di individuare una configurazione ottimale per le analisi di dettaglio. La simulazione di riferimento è partita alle 00 UTC del 08/09 e durata 12 ore. Le condizioni iniziali sono quelle IFS delle ore 12 UTC del 07/09. Gli output, per la griglia a 1 km, sono stati prodotti ogni 10 minuti.

Si precisa che tutti gli output, in formato NETCDF, nonché le mappe derivate dalle operazioni di postprocessing, sono archiviate su server ISAC e a disposizione (anche del committente) per eventuali verifiche o integrazioni per future attività.

3.2.3 Risultati delle simulazioni

Come detto, sono stati utilizzati tre domini (tre griglie d'integrazione) per le simulazioni con il modello WRF. In questa sezione saranno mostrate le mappe relative a specifici parametri atmosferici d'interesse per tutti i tre domini, al fine di evidenziare le varie caratteristiche (alle diverse scale spaziali) di maggiore importanza per l'evento in studio.

Le mappe mostrate nella figura 11 si riferiscono alla prima griglia d'integrazione e forniscono informazioni estremamente importanti sulle condizioni di instabilità nell'ambiente circostanze, cioè nell'interno Bacino del Mediterraneo. Le mappe si riferiscono alle ore 03 UTC del 08/09 (al fine di descrivere le condizioni rilevanti <u>prima</u> del verificarsi dell'evento a Civitavecchia). Il pannello (a) mostra le correnti prevalenti alle medie altezze (quota di circa 1500 m); si nota come i venti siano diretti da sud-ovest e trasportino aria più calda (colori tendenti al rosso) dai quadranti meridionali verso le coste tirreniche italiane. Ciò provoca il contrasto con masse d'aria di diversa natura e soprattutto a diversa temperatura (aria più fredda in quota). La presenza di un gradiente termico verticale è uno degli ingredienti chiave dell'instabilità atmosferica; una quantificazione di tale effetto è dato dal pannello (b), che mostra la differenza di temperatura potenziale equivalente tra (circa) la superficie e la media troposfera. Si nota come sull'area tirrenica laziale siano simulati valori decisamente elevati (> 25 K) a testimoniare un ambiente molto instabile. Il CAPE (*convective available potential energy*) è un importante indicatore dell'energia potenziale disponibile per la convezione. Valori superiori a 1500-2000 J/kg sono ritenuti critici e potenzialmente pericolosi, in quanto associati a possibile forte sviluppo di convezione. In questo caso sono stati simulati valori prossimi a 4000 J/kg ad indicare, inequivocabilmente, condizioni ad elevatissimo potenziale convettivo e instabile. Per

quanto visto sinora le condizioni atmosferiche generali, nell'intero Bacino del Mediterraneo, erano decisamente propense all'instabilità.



Fig. 11 (a) temperatura e vento a 850 hPa (circa 1500 m); (b) differenza di temperatura potenziale equivalente tra 925 e 500 hPA (circa tra la superficie e 5500 m); (c) (most unstable) CAPE (Convective Available Potential Energy). Tutte le mappe si riferiscono alle ore 03 UTC del 08/09 e sono derivate dal dominio WRF a 9 km di risoluzione.

In figura 12 sono riportate altre mappe relative al dominio WRF a 9 km, che rappresentano due altri parametri molto importanti: *Storm Relative Helicty (SRH)* e *wind shear*, entrambi calcolati tra 0 e 3km di quota. Il primo rappresenta l'elicità, e corrisponde al trasferimento di vorticità dall'ambiente a masse d'aria in moto convettivo; il secondo, come già detto, descrive la variazione della direzione e dell'intensità del vento con la quota. Per entrambi (si veda sezione successiva, tabella 1) esistono dei valori soglia, oltre ai quali sono molto probabili determinati eventi estremi, tra cui i tornado. Le mappe mostrate, questa volta, si riferiscono alle ore 06 UTC del 08/09 (quindi immediatamente prima del verificarsi dell'evento a Civitavecchia). Lo shear del vento, pannello (a), raggiunge valori simulati tra 25-30 m/s proprio nell'area in studio, nello spazio di mare a ridosso delle coste laziali. In genere (si veda in seguito tabella 1) valori già di 15-20 m/s possono favorire lo sviluppo di supercelle.

Dal pannello (b) sono ben identificabili aree circoscritte con valori di SRH maggiori di 600 m²/s². Il valore simulato appare di notevole entità, considerando che (si veda tabella 1) già con valori di 300 m²/s², sono favoriti *updraft* rotazionale e sviluppo di supercelle.



Fig. 12 (a) wind shear e (b) Storm Relative Helicty tra 0–3 km; entrambi calcolati alle ore 06 UTC del 08/09. Le mappe sono derivate dal dominio WRF a 9 km di risoluzione.

In figura 13 sono riportate altre mappe WRF relative alla seconda griglia d'integrazione (a 3 km di risoluzione), rappresentativa dell'Italia centrale. Il pannello (a) si riferisce alla pioggia cumulata in 3h; si nota una zona altamente localizzata, a nord dell'area di Civitavecchia, al confine tra Lazio e Toscana, con accumuli di pioggia > 40 mm, a denotare la presenza di forti temporali che hanno interessato l'area in quel giorno (cosa confermata dai bollettini meteo del periodo, oltre che dalle mappe RADAR in figura 8). Il pannello (b) mostra la riflettività massima composita simulata da WRF alle 06 UTC del 08/09. Tale mappa può essere direttamente confrontata con le mappe di figura 8 (osservazioni RADAR). Dal confronto si nota un ottimo accordo tra i pattern osservati e simulati. Sono ben evidenti due diverse aree in cui è possibile attendersi fenomeni meteo intensi (valori maggiori di riflettività; colori più caldi); la prima area a nord di Civitavecchia, laddove sono stati simulati accumuli di pioggia sostenuti, e la seconda proprio sulla zona di Civitavecchia, chiaramente associabile al tornado verificatosi. La cella tornadica è quindi identificabile in tale seconda area ad elevata instabilità e, nelle figure successive, ciò sarà maggiormente visibile. Infine, il pannello (c) mostra il vento a 10m; sul Tirreno centrale le correnti investono la costa laziale con direzione da sud. Due cose sono evidenti: la conferma della presenza di shear verticale, come già visto in figura 12 (si confronti anche, a tal proposito, il vento a 10m con quello alle quote superiori in figure 9 e 11), e la presenza di un'area di convergenza dei venti in superficie in corrispondenza delle coste della Toscana, quindi associabile alla zona interessata dalle forti piogge e dal massimo di riflettività simulata/osservata più a nord.



Fig. 13 (a) precipitazione accumulata in 3h; (b) riflettività massima; vento a 10m. Tutte le mappe di riferiscono alle 06 UTC del 08/09 e sono derivate dal dominio WRF a 3 km di risoluzione.

In figura 14 sono riportate mappe WRF alla risoluzione massima di 1 km. Con tali mappe si intende mettere in luce le informazioni principali necessarie all'identificazione della possibile cella tornadica che ha generato l'evento a Civitavecchia.

La figura è costituita da diversi pannelli che mostrano la sequenza temporale dei vari parametri alle ore 06:00, 06:30 e 07:00 UTC; sono riportati i parametri massima riflettività (pannelli superiori), *updraft helicity* (pannelli centrali) e velocità verticale del vento a 700 hPa (circa 3000 m) (pannelli inferiori). Le frecce sulle mappe indicano la cella convettiva che ha plausibilmente generato il tornado, seguendone il moto da sud-ovest (dal mare) verso nord-est (verso terra, attraversando l'area di Civitavecchia).

La massima riflettività (pannelli superiori), già commentata in precedenza, descrive aree in cui sono in corso fenomeni di un certo rilievo. I colori più caldi (quindi i valori maggiori (dBz)) identificano aree particolarmente instabili e ad elevato potenziale convettivo. Valori superiori a 50-55 dBz (come quelli simulati in questo caso) sono spesso associati a celle convettive ben sviluppate e/o supercelle.

L'*updraft helicity* (UH) è un campo diagnostico, calcolato in questo caso tra 2-5 km, che consente di quantificare la forza delle correnti ascensionali rotanti durante i temporali; tale campo è spesso utilizzato proprio per identificare il percorso delle celle tornadiche a struttura mesociclonica. Una tipica soglia, al di sopra della quale si identificano tali eventi e pari a 50/100 m²/s². Nelle simulazioni condotte i risultati mostrano (pannelli centrali) valori ben superiori a 100 m²/s² nelle due zone a maggiore instabilità definite precedentemente. Nella zona più a nord (coste toscane), si osserva la presenza di più strutture a elevati valori di UH (sistemi multi-cellulari). Altrettanto evidente è la presenza di una cella isolata diretta verso la costa laziale (l'area di instabilità più a sud che interesserà, appunto, Civitavecchia), che identifica la cella che ha plausibilmente generato l'evento a Civitavecchia.

Infine, ad ulteriore ausilio per l'individuazione del sistema convettivo responsabile del tornado, è mostrata la velocità verticale a 700 hPa (pannelli inferiori). I valori positivi (colori caldi) della componente verticale del vento identificano correnti ascensionali; viceversa, quelli negativi (colori freddi) correnti discendenti. La sequenza delle mappe mostra il movimento verso nord-est della cella precedentemente individuata (area a sud, che si muove verso la zona di Civitavecchia). Come detto, in tutti i pannelli è mostrata una freccia che identifica la plausibile cella tornadica. Tutte le tre sequenze mostrate in figura sono chiaramente concordi nella localizzazione sia spaziale che temporale della cella.

Una precisazione è d'obbligo. Non esiste un metodo per "simulare" e, quindi, rappresentare un tornado dagli output del modello. Si tratta di strutture molto piccole e non esiste una loro rappresentazione grafica a partire dalle variabili prognostiche dei codici di calcolo. Quello che piuttosto può essere simulato è la cella / le celle / la supercella / il mesociclone che "genera" il tornado che, come detto in precedenza, generalmente poi si estende con caratteristica forma a imbuto dalla base della nube fino alla superficie. Le simulazioni condotte hanno mostrato come lo strumento previsionale adottato (WRF) sia stato in grado di identificare la cella convettiva responsabile della formazione del tornado. Allo stesso tempo, le simulazioni hanno consentito di derivare valori molto elevati dei principali parametri/indici di instabilità nell'area in studio, dimostrandosi strumento potenzialmente utile per la previsione di tali fenomeni. Dal confronto con le osservazioni (stazioni di misura in superficie, mappe radar, mappe satellitari, report testuali), le simulazioni numeriche appaiono consistenti sia da un punto di vista di individuazione spaziale che temporale del sistema perturbato che ha interessato le coste tirreniche dell'Italia centrale tra il 07 e l'08 settembre 2022.



Fig. 14 Riflettività massima (pannelli in alto), Upraft Helicity (pannelli al centro) e componente verticale del vento + vettore vento a 700 hPa (pannelli in basso), rispettivamente alle 06 UTC (colonna a sx), 06:30 UTC (colonna centrale) e 07 UTC (colonna a destra) del 08/09. le frecce identificano la cella tornadica.

3.2.4 Valutazione delle potenzialità predittive

In questa sezione sono brevemente discussi in modo quantitativo alcuni parametri/indici di instabilità utilizzati per diagnosticare la convezione, e diviene particolarmente utile il confronto dei loro valori (simulati per il caso studio in esame) con le soglie tipiche utilizzate per identificare condizioni meteorologiche severe. Per la definizione delle soglie e per il significato dettagliato dei singoli parametri si rimanda a una delle pubblicazioni già citate, per es. Avolio e Miglietta, 2021.

I valori sono stati estratti dagli output WRF. È stato considerando un intervallo temporale di 2 ore intorno all'orario di occorrenza del tornado e un'area di 20x20 km. In tali intervalli spazio-temporali sono stati

calcolati i valori massimi simulati. Oltre ai parametri / indici già definiti nel testo è qui riportato anche l'indice K, che tiene contro dell'instabilità di una massa d'aria nella bassa-media troposfera. Tale procedura, già utilizzata in precedenti lavori pubblicati e sopra citati, consente di avere degli indicatori numerici sulle condizioni composite di instabilità, prevedendo la simultanea stima di più parametri. Come si può vedere dalla tabella sottostante (tabella 1) tutti i parametri considerati presentano valori simulati decisamente elevati e ben superiori alle soglie tipiche di possibile innesco di fenomeni estremi. La procedura è particolarmente importante poiché gli indicatori derivano da prodotti modellistici previsionali e consentono, pertanto, di fornire utili informazioni di *warning* nell'area interessata.

Parametri / Indici	Valori <u>MAX</u> simulati	Soglie tipiche / Note
Updraft Helicity	$> 150 m^2 s^{-2}$	$50/100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ - favorito sviluppo di mesocicloni/tornado
CAPE	$> 4000 \ J Kg^{-1}$	2000-2500 J Kg ⁻¹ - favorito sviluppo di supercelle
Storm Relative Helicity 3km	$> 600 \ m^2 \ s^{-2}$	$300-350 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ - favorito updraft rotazionale e sviluppo di supercelle
Wind Shear 3km	$> 25 m s^{-1}$	15-20 m s ⁻¹ - favorito sviluppo di supercelle
Wind Shear 6km	$> 35 m s^{-1}$	25-30 m s ⁻¹ - favorito sviluppo di supercelle
K	> 40 K	30-40 K- favorita convezione profonda e sviluppo di temporali violenti

Tabella 1 Valori massimi simulati dei principali parametri/indici di instabilità e relative soglie tipiche di innesco fenomeni estremi.

4. Considerazioni finali

Il lavoro svolto ha previsto la ricostruzione del caso studio in oggetto: "Analisi meteo-climatica della tromba d'aria dell'8 settembre 2022 (Civitavecchia)". Un tornado (o tromba d'aria) di intensità EF1 ha interessato la zona di Civitavecchia la mattina (09 ora locale / 07 UTC) del 08 settembre 2022.

La ricostruzione del caso studio ha confermato la possibilità di simulare adeguatamente le condizioni di elevata instabilità nell'ambiente circostante e la cella convettiva responsabile del tornado a Civitavecchia. Inoltre, i parametri/indici di instabilità simulati sono certamente indicativi di condizioni favorevoli allo sviluppo di forte instabilità e convezione, che possono dar vita ad eventi come quello in studio.

Un sistema previsionale dedicato, specificatamente per la simulazione di tornado, richiede uno sforzo concettuale e soprattutto computazionale. Infatti, tali fenomeni richiedono risoluzioni spaziali e temporali elevate e, non da ultimo, procedure di post-processing che possono essere più o meno complesse.

Le buone performance riscontrate, in linea con i buoni risultati già ottenuti per casi studio passati (Avolio e Miglietta, 2021, 2022), confermano i benefici potenziali che si potrebbero ricavare da un sistema

modellistico previsionale opportunamente configurato e dedicato alla simulazione di eventi estremi. Tale sistema, auspicabilmente, dovrebbe essere integrato con strumenti osservativi avanzati (stazioni superficiali, radar, satelliti, etc.) per una più completa possibile rappresentazione dei fenomeni in studio. Possibili sviluppi futuri: il lavoro svolto pone le basi per la messa a punto, prototipale e/o pseudo-operativa, di una catena modellistica previsionale basata sul modello WRF, realizzata/mantenuta dal CNR-ISAC, in eventuale collaborazione con ARSIAL, che abbia come fine ultimo la previsione meteorologica ad alta risoluzione sul Lazio, con particolare focus su specifici parametri/indicatori relativi a fenomeni atmosferici estremi come tornado, eventi alluvionali, venti intensi, e estremi di temperatura.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Dipartimento italiano di Protezione Civile per le immagini RADAR e satellitari (derivate dal sistema automatico Dewetra).

La mappa di SST è stata ottenuta utilizzando i dati: "Mediterranean Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis". E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). DOI: 10.48670/moi-00172 (Accessed on 14-DEC-2023)"

I dati di vento mostrati, ricavati dal portale web ARSIAL, sono gestiti da Servizio Integrato Agrometeorologico della Regione Lazio (SIARL).

Informazioni descrittive sul tornado sono state dedotte anche grazie ai report pubblicati da: European Severe Weather Database (ESWD; https://eswd.eu) e STORM REPORT, un progetto PRETEMP-METEONETWORK (http://www.pretemp.it).

Le foto dei danni (sopralluogo post-evento) alla pineta sono state fornite da ARSIAL.

Bibliografia essenziale

- 1) Avolio, E., Miglietta, M.M. "A Comparative Analysis of Two Mediterranean Tornado Hotspots" (2023) Atmosphere, 14 (1), art. no. 189, DOI: 10.3390/atmos14010189
- 2) Avolio, E., Miglietta, M.M. "Tornadoes in the Tyrrhenian regions of the Italian peninsula: The case study of 28 July 2019" (2022) Atmospheric Research, 278, 106285, DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106285
- Avolio E, Miglietta M.M. "Multiple tornadoes in the Italian Ionian regions: Observations, sensitivity tests and mesoscale analysis of convective storm environmental parameters" (2021). Atmospheric Research, 263, 105800, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105800