

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Laurea Magistrale in Fisica del Sistema Terra

**Analisi alla microscala attraverso una
simulazione operativa Micro-SWIFT e
contestualizzazione climatologica di un
evento di Bora a Trieste**

Presentata da:
Matteo Avena

Relatore:
Prof.ssa Silvana di Sabatino

Correlatore:
Dr. Carlo Cintolesi

Indice

Sommario	7
1 Introduzione	9
1.1 Fenomenologia della Bora	9
1.2 Modellistica multiscala	10
1.3 Obiettivi e struttura della Tesi	14
2 Climatologia della Bora a Trieste	17
2.1 Descrizione dei dati	17
2.2 Metodologia dell'analisi	20
2.3 Risultati dell'analisi	27
2.4 Panoramica sulla sinottica della Bora	37
2.5 Riepilogo dei risultati	41
3 Set-up modellistico e strumenti di validazione	45
3.1 Configurazione della simulazione	45
3.2 Inizializzazione della simulazione	49
3.3 Equazioni del modello	56
3.4 Descrizione e <i>pre-processing</i> delle misure	59
3.5 Descrizione sintetica del caso studio	64
4 Risultati della simulazione	67
4.1 Convergenza della simulazione	67
4.2 Confronto con i dati LIDAR	68
4.3 Confronto con i dati anemometrici	77
4.4 Confronto con le simulazioni RANS	82
4.5 Riepilogo dei risultati	90
Conclusioni	95
A Appendice	97
A.1 Classificazione in <i>Weather Types</i>	98
A.2 Scala Beaufort della forza del vento	101
A.3 Distribuzioni in intensità nei giorni di Bora	102
Bibliografia	123

Ringraziamenti

Si ringraziano il gruppo di ricerca di Fisica dell'Atmosfera dell'Università di Bologna e il gruppo del Centro Regionale di Modellistica Ambientale di ARPA FVG per i materiali messi a disposizione e le opportunità scaturite da questa collaborazione, in particolare a Giovanni e Francesco che mi hanno accolto con grande disponibilità durante il periodo di tirocinio.

Dedico questo lavoro a tutte le persone che mi hanno sostenuto in questi anni, a partire dagli amici che ho avuto la fortuna di conoscere a Trieste e a Bologna, fisici e non, a cui auguro ogni bene per il futuro. Una dedica speciale agli amici della Carnia, in particolare ad Antonio, Luca e Nicolò (in ordine alfabetico), amici di una vita con cui spero di poter continuare a condividere i momenti migliori, e a tutti i miei familiari, in particolare ai miei genitori Angela e Mauro e a mio fratello Alessandro.

Sommario

Il vento di Bora è un fenomeno atmosferico che storicamente ha destato curiosità principalmente per i suoi aspetti fenomenologici, in particolare per le eccezionali intensità delle raffiche che vengono raggiunte nelle località sottovento al Carso triestino e sulla costa adriatica orientale, anche vicino al suolo, capaci di creare disagi ai cittadini e lievi danni alle infrastrutture, lasciando un segno tanto profondo nella memoria collettiva di una città da entrare a far parte della sua stessa identità. Per gli aspetti dinamici tipici del vento di discesa, si tratta di un fenomeno molto studiato anche dalla comunità scientifica, essendo modulato da processi che interessano una vasto spettro di scale, dalla forzante sinottica all'origine alla mesoscala dovuta all'interazione con le Alpi Dinariche, dalla creazione, propagazione e dissipazione di onde di gravità orografiche alla cascata energetica turbolenta alla microscala, specialmente in terreno complesso dove trasferimenti non lineari di quantità di moto possono essere amplificati nelle zone di separazione, nelle scie e sottovento alle canalizzazioni, fino alla scala degli edifici. Una simulazione accurata e con tempi di risposta brevi dei campi di velocità e turbolenza alla microscala potrebbe permettere la determinazione di una statistica degli impatti locali della Bora sulla base di eventi di Bora passati attraverso cui costruire delle procedure di allerta, consentendo previsioni con un preavviso sufficiente ad attivare tali procedure.

Per questi motivi, in questo lavoro viene testata una catena modellistica costruita da ARPA FVG (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, Regione Friuli Venezia-Giulia) per previsioni operative di dispersione degli inquinanti alla scala degli edifici con orizzonte temporale dell'ordine dei giorni, nella stima di campi di velocità ed energia cinetica turbolenta in terreno complesso e in condizioni di vento intenso. La catena modellistica è composta da una configurazione operativa del modello meteorologico alla mesoscala WRF (*Weather Research and Forecasting model*), sviluppato da NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), che informa il modello meteorologico alla microscala Micro-SWIFT (*Microscale Stationary Wind Field and Turbulence model*), componente della catena modellistica per la qualità dell'aria PMSS (*Parallel Micro-SWIFT-SPRAY*) sviluppata da ARIANET. Il test viene effettuato su un evento di Bora ciclonica marittima avvenuto il 26 marzo 2026, un evento recente la cui intensità media ha superato la mediana della statistica degli eventi di Bora persistente a Trieste degli ultimi 25 anni. Tale statistica è stata determinata attraverso un'analisi dei dati storici di intensità media oraria a 10 m presso varie stazioni meteorologiche distribuite sul territorio carsico, triestino e sloveno, che ha consentito, assieme a una classificazione operativa giornaliera dei *Weather Type* effettuata da ARPA FVG, di individuare e caratterizzare in frequenza, intensità, durata e *Bora Type* sinottici discussi in letteratura gli eventi passati

di Bora a Trieste. La simulazione, effettuata su un dominio individuato considerando l'Ospedale di Cattinara come area di interesse, situato in terreno complesso sottovento all'altopiano carsico triestino, è stata validata attraverso i dati di una campagna sperimentale attualmente in corso in tale località; in particolare, vengono usati profili verticali orari di velocità ricostruiti da scansioni verticali LIDAR DBS (*LIdar Detection And Ranging, Doppler Beam Swinging*) e serie temporali con frequenza di mezz'ora ottenute da misure anemometriche. Infine, è stato condotto un confronto qualitativo tra i profili verticali estratti in alcune posizioni strategiche del dominio della simulazione Micro-SWIFT e i profili verticali ottenuti nelle stesse posizioni attraverso delle simulazioni *benchmark* CFD RANS (*Computational Fluid Dynamics, Reynolds Averaged Navier-Stokes*), effettuate in ([Ampatzidis et al., 2026](#)) nella stessa area di interesse ma per il caso studio di Bora più estremo del febbraio 2012.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Fenomenologia della Bora

La Bora è un vento di discesa freddo e secco che interessa l'estremo nord-est italiano e la costa adriatica orientale ([Grisogono et al., 2009](#)), tipicamente durante la stagione invernale. È caratterizzato da un'instaurazione graduale ma si manifesta con raffiche anche molto forti (oltre i 140 km/h a Trieste) provenienti da nord-est/est (25% del tempo da 67.5°N a Trieste), con una durata dell'evento che spazia dalle 6 ore a svariati giorni. Gli eventi più estremi sono in grado di creare disagi e lievi danni alle infrastrutture anche nei centri abitati, specie se si sviluppano in altezza ([Cintolesi et al., 2024](#)). La genesi di questo vento risiede nell'interazione dinamica tra le forzanti sinottiche in atmosfera libera e l'orografia ([Klemp et al., 1987](#)), dalla mesoscala (scale ≥ 1 km) fino al livello della microscala (scale < 1 km): per questo motivo il contesto di studio della Bora è spesso rappresentato da uno strato limite planetario, ossia lo strato di atmosfera a contatto con la superficie terrestre in cui avvengono gli scambi di massa, quantità di moto e calore, che si sviluppa su terreno complesso, ossia caratterizzato da profili orografici irregolari.

La complessità del terreno e le alte velocità che vengono raggiunte nei bassi strati fanno sì che la turbolenza giochi un ruolo decisivo nell'evoluzione locale del vento di Bora alla microscala, tanto che il rimescolamento indotto tende a favorire condizioni di stratificazione neutra ([Šoljan et al., 2018](#)). In ([Bervida et al., 2021](#)), misurazioni LIDAR (*Light Detection And Ranging*) condotte durante una campagna sperimentale nella valle di Lipava (Slovenia) hanno mostrato che durante gli eventi di Bora persistenti l'intensità della turbolenza può superare considerevolmente i valori standard relativi alle categorie di terreno complesso identificati nelle classificazioni ESDU (*Engineering Sciences Data Unit*) ed Eurocode (a 80 m AGL valori compresi tra 0.06 e 0.50 in direzione longitudinale e trasversale al moto e tra 0.06 e 0.16 in direzione verticale). In ([Večenaj et al., 2021](#)) e ([Golem et al., 2023](#)), misurazioni anemometriche hanno mostrato che nelle località sottovento alla catena montuosa (isola di Segna, Croazia) l'energia cinetica turbolenta e la lunghezza di scala integrale della turbolenza possono raggiungere valori rispettivamente doppi e tripli rispetto a una località sopravento (passo di Vratnik, Croazia), con un bilancio di energia cinetica turbolenta che nelle località sottovento può rivelarsi più complesso di un modello di bilanciamento tra produzione e dissipazione ([Večenaj et al., 2010](#)).

Dagli anni Ottanta del secolo scorso la letteratura scientifica ha cominciato a spostare l'attenzione da una descrizione del fenomeno prettamente termica (di vento catabatico) a una descrizione meccanica (di vento di discesa), un cambiamento di paradigma necessario per spiegare i picchi di velocità che vengono osservati durante le raffiche (Grisogono et al., 2009). In (Klemp et al., 1987) l'intensità dei venti che caratterizzano la Bora viene spiegata fondamentalmente con un meccanismo non lineare di "salto idraulico" (Smith, 1985), descrivendo l'aria secca continentale proveniente da nord-est che scorre sull'orografia, sovrastata da un'inversione termica, in modo simile a dell'acqua che scorre in un canale che termina in una rampa discendente. Lo sviluppo orizzontale viene determinato dallo scorrimento sulla struttura tridimensionale dell'orografia; in particolare i canali orografici, di cui il più settentrionale sfocia sul Golfo di Trieste, favoriscono l'accelerazione del moto.

A livello climatologico, non è chiaro l'effetto del cambiamento climatico sulla statistica degli eventi di vento intenso sull'Adriatico: esplorando l'accoppiamento tra diversi GCM (*Global Climate Model*) e RCM (*Regional Climate Model*) della branca europea del programma CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling EXperiment*), si è notata una forte sensibilità dei risultati alla scelta del modello globale e all'area dell'Adriatico presa in considerazione (Vozila et al., 2019), con una generale diminuzione di intensità che, tuttavia, sembra non interessare gli eventi di Bora nel nord Adriatico. Con lo scenario di emissioni antropiche più pessimistico RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway 8.5*) le proiezioni climatiche suggeriscono che rispetto allo storico (periodo 1971-2000) nel corso del secolo (periodo 2041-2070) ci sarà una riduzione dell'attività ciclonica (del 10% in mediana) e un aumento dell'attività anticiclonica (del 5% in mediana) nell'Adriatico: ne consegue una riduzione degli eventi di Bora ciclonica, tipicamente invernali, e un aumento degli eventi di Bora anticiclonica, tipicamente estivi (Vozila et al., 2021). Un'analisi effettuata con le stesse metodologie ma focalizzata espressamente sul territorio triestino (il dominio comprende anche parte della Slovenia e dell'Istria) è concorde nel non attribuire una variazione significativa dell'intensità degli eventi di Bora futuri (2040-2100) nel nord Adriatico (Cintolesi et al., 2024). Viene sottolineato, tuttavia, che le discrepanze tra i diversi modelli, in gran parte dovute alla risoluzione, all'approccio analitico e alle parametrizzazioni, rendono le stime di intensità del vento superficiale particolarmente incerte, specialmente per gli eventi estremi.

1.2 Modellistica multiscala

I processi che governano la formazione e lo sviluppo locale del vento di Bora coinvolgono una grande varietà di scale spaziali, rendendo necessarie delle operazioni di "discesa di scala" che mettono alla prova le configurazioni dei modelli utilizzati per le simulazioni, con le relative scelte degli schemi di parametrizzazione per i processi fisici non risolti alle varie scale, la rappresentazione della topografia e dell'uso del terreno, nonché le condizioni iniziali e al contorno da imporre (Carvalho et al., 2012): la risoluzione spaziale delle rianalisi globali ERA5, ad esempio, che spesso non si spinge oltre la decina di chilometri, non è adeguata per descrivere moti che si sviluppano in un'orografia complessa come quella che si trova solitamente in Europa.

In letteratura il problema della discesa di scala è stato affrontato con due approcci diversi: mentre metodi di “*downscaling* statistico” utilizzano relazioni statistiche o semi-empiriche tra la dinamica di larga scala e quella regionale, validate con osservazioni o con simulazioni storiche, come in (Larsén et al., 2009), (Salameh et al., 2010), (Soares et al., 2019), più economici dal punto di vista computazionale ma in generale meno accurati di un modello fisico, il “*downscaling* dinamico” è basato sull’accoppiamento di modelli fisici diversi con diverse risoluzioni spaziali (ad esempio un modello globale come ERA5 e un modello regionale come WRF) e/o l’utilizzo di domini innestati all’interno dello stesso modello, come in (Horvath et al., 2011), (Vozila et al., 2019), (Cintolesi et al., 2024), passando le condizioni al contorno da quello più esterno a quello più interno in modo unidirezionale (*one-way nesting*) o permettendo lo scambio di informazioni in entrambe le direzioni (*two-way nesting*). Nonostante metodi di “*downscaling* statistico” possano portare a stime accurate dei venti superficiali quando il ruolo della forzante sinottica è dominante (Salameh et al., 2010), si registra la tendenza di tali metodi a sottostimare l’intensità degli eventi estremi, specie in terreno complesso (Horvath et al., 2011). Sebbene in (Soares et al., 2019) si evidenzia che metodi di *downscaling* statistico possano portare a un miglioramento della rappresentazione della variabilità del vento superficiale durante gli eventi di Bora rispetto al solo utilizzo dei dati delle rianalisi globali, quindi a bassa risoluzione, il “*downscaling* dinamico” risulta più accurato quando l’accoppiamento tra la dinamica di larga scala e la dinamica regionale è regolato dall’orografia, come nel caso della Bora (Larsén et al., 2009).

Tra le simulazioni a bassa risoluzione, alcuni studi evidenziano come nella rappresentazione dei venti superficiali le rianalisi globali ERA dell’ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) mostrino un accordo migliore con i dati delle stazioni al suolo rispetto ad altre rianalisi globali allo stato dell’arte (Olauson, 2018), sia come variabilità che come correlazione, mentre per i venti medi stagionali le prestazioni risultano pressoché equivalenti (Ramon et al., 2019). Il miglior accordo delle rianalisi ERA-Interim ed ERA 5 si riflette anche nelle discese di scala a risoluzioni più fini col modello alla mesoscala WRF (*Weather Research and Forecast*) di NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), soprattutto in terreno complesso (Mughal et al., 2017). L’efficacia dell’accoppiamento ERA5-WRF in terreno complesso, ancora migliore della generazione precedente di rianalisi ERA-Interim, viene confermata in (Solbakken et al., 2021), dove viene valutata anche la sensibilità del modello WRF alla risoluzione orizzontale della griglia: passando da 27 km, a 9 km e a 3 km di risoluzione bias e correlazione migliorano sensibilmente; riducendo ancora a 1 km tali indici non migliorano necessariamente, tuttavia la descrizione locale del vento risulta più fedele, mostrando una capacità maggiore nel cogliere gli effetti del terreno grazie alla migliore rappresentazione dell’orografia. Tra le criticità maggiori si evidenzia una tendenza alla sottostima dei venti intensi, specie delle raffiche, peculiarità che si inasprisce con la complessità del terreno (Carvalho et al., 2012).

In seguito alle prime sperimentazioni risalenti allo scorso decennio, si stanno attualmente diffondendo metodi di discesa dalla mesoscala (lunghezze dell’ordine ≥ 1 km) alla microscala (lunghezze dell’ordine < 1 km), con l’intento di superare le

limitazioni date dall'imporre come condizioni al contorno delle simulazioni alla microscala profili semi-empirici (Yamada et al., 2011). In questo caso l'accoppiamento avviene tra modelli meteorologici ad area limitata (come WRF), diffusi anche in ambienti operativi oltre che di ricerca, e modelli meteorologici alla microscala (come Micro-SWIFT), utilizzati in studi di valutazione della qualità dell'aria, oppure con modelli CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utilizzati anche per studi aerodinamici. Quest'ultimi, a fronte di un'attenta taratura dei parametri, in particolare la rugosità e la porosità delle superfici (Schiavini, 2026), rappresentano lo stato dell'arte nella modellistica meteorologica alla microscala essendo in grado di risolvere la dinamica, e in parte la turbolenza associata, nelle zone d'interazione con gli ostacoli: tra gli esempi di simulazioni CFD informate con campi meteorologici rientrano studi di circolazione in parchi eolici, come in (Letzgus et al., 2020), (Castorrini et al., 2021), (Avila et al., 2022), (Xiao et al., 2026) e di dispersione degli inquinanti, come in (Li et al., 2026) oltre che studi aerodinamici alla scala degli edifici, come in (Ricci et al., 2022), (Cintolesi et al., 2024), (Huang et al., 2024), (Liu et al., 2025). Non sembrano esserci procedure standard per i metodi di discesa dalla mesoscala alla microscala, considerando anche le varietà delle applicazioni, inquadrando un ramo di ricerca attualmente in via di sperimentazione: casi di “*downscaling* statico”, come in (Castorrini et al., 2021), (Ricci et al., 2022), (Cintolesi et al., 2024), dove vengono imposti profili medi senza un accoppiamento temporale continuo (per valutare soluzioni stazionarie, ad esempio con modelli RANS), sono alternati a casi di “*downscaling* dinamico unidirezionale”, come in (Xiao et al., 2026), o “bidirezionale”, come in (Huang et al., 2024), con esempi di “*downscaling* statistico” tramite relazioni semi-empiriche o reti neurali, soprattutto per previsioni a breve termine, come in (Ma et al., 2024).

In (Bilal et al., 2016) emerge che la prestazione dei modelli usati per le simulazioni alla microscala dipende largamente dalla qualità dei dati meteorologici di input, tuttavia l'accoppiamento permette di raggiungere risultati generalmente più accurati, specie utilizzando WRF (*Weather Research and Forecast*), che può consentire una riduzione degli errori sul campo di vento fino al 70% rispetto a MERRA (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*): le risoluzioni di un modello meteorologico alla microscala o di un modello CFD, che possono spingersi fino all'ordine del metro, permettono di descrivere fenomeni locali come separazioni, scie e canalizzazioni dovute a variazioni topografiche fini che un modello alla mesoscala non ha la possibilità di cogliere (Duran et al., 2020). Ciò consente di migliorare la comprensione dell'effetto degli eventi estremi anche alla scala urbana e dei singoli edifici: in (Cintolesi et al., 2024) e (Ampatzidis et al., 2026) viene mostrato come, in condizione di vento intenso, informando le simulazioni con profili simulati alla mesoscala, si modifichi in modo sostanziale l'interazione tra la circolazione, il terreno e le infrastrutture anche alla microscala, permettendo stime più accurate dei livelli di carico aerodinamico a cui vengono sottoposti gli edifici, che altrimenti potrebbero risultare sovrastimate o, peggio, sottostimate al variare dei profili imposti come condizioni al contorno.

A seconda delle risorse computazionali necessarie, che dipendono essenzialmente dal dominio e dalle geometrie coinvolte oltre che dal livello di accuratezza cercato nella descrizione del moto medio e della turbolenza, sono stati usati modelli

RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) o U-RANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), in cui vengono risolti esclusivamente campi medi stazionari o mediati nel tempo attraverso la parametrizzazione dello spettro della turbolenza, come in (Castorrini et al., 2021), (Ma et al., 2024) per RANS; come in (Avila et al., 2022), (Xiao et al., 2026) per U-RANS, riducendo le risorse di calcolo necessarie ma ottenendo risultati comunque sufficientemente accurati per la descrizione del moto medio; con modelli LES (*Large-Eddy Simulations*), in cui vengono risolte le strutture turbolente fino alla scala permessa dal passo di griglia attraverso la parametrizzazione della sola porzione di spettro della turbolenza di sottogriglia, come in (Mughal et al., 2018), (Avila et al., 2022), (Giani et al., 2024), (Huang et al., 2024), (Liu et al., 2025), consentendo di ottenere risultati più accurati anche sulla turbolenza al prezzo di un costo computazionale maggiore a parità di geometrie; o con un approccio ibrido, attraverso una discesa di scala RANS intermedia tra un modello meteorologico alla mesoscala e un modello LES più risoluto, come in (Letzgus et al., 2020). In (Uchida et al., 2018) si sottolinea che in terreno complesso i modelli RANS mostrano le maggiori limitazioni nelle regioni di ricircolo e in scia agli ostacoli, che invece i modelli LES riescono a descrivere in modo accurato proprio per loro costituzione, sia con modelli CFD che con modelli costruiti specificatamente per applicazioni atmosferiche come WRF-LES (Cao et al., 2023), anche se quest'ultimo sembra non essere ideale a risoluzioni inferiori alle centinaia di metri (Al Oqaily et al., 2025). Tramite l'analisi di alcuni casi idealizzati, in (Bin et al., 2023) è emerso che un modello LES, che normalmente richie griglie molto fini, possa garantire maggiore accuratezza di un modello RANS anche sulla sua stessa griglia di qualità, risultato già trovato in simulazioni aerodinamiche aerospaziali (Goc et al., 2021), in quel caso con un tempo di calcolo intorno al quintuplo che scala approssimativamente con il numero di *time-step* della simulazione. La miglior accuratezza dei modelli LES in scia viene confermata in (Avila et al., 2022), a cui si aggiunge una maggiore abilità nella rappresentazione delle raffiche rispetto ai modelli U-RANS, con un tempo di calcolo in quel caso poco inferiore al doppio.

D'altra parte, modelli RANS o U-RANS accoppiati con un modello alla mesoscala rendono possibile creare delle catene operative, come in (Mana et al., 2020), (Che et al., 2022), (Xiao et al., 2026), quindi con un costo computazionale contenuto, capace di competere anche con modelli ANN (*Artificial Neural Networks*) (Mana et al., 2020), che consentono di ottenere previsioni giornaliere su terreno complesso con frequenza oraria e risoluzioni spaziali fino a 50 m (sebbene con la limitazione dell'assunzione di uno strato limite assunto neutro), risultato che con modelli LES sembra non sia ancora stato ottenuto nè facilmente ottenibile (Xiao et al., 2026). Sempre per motivi legati alle risorse computazionali, ma anche per la vasta applicabilità, affidabilità e robustezza, garantite anche con geometrie e condizioni al contorno complesse (Li et al., 2026), spesso si preferisce ricorrere a modelli RANS anche quando si prendono in considerazione più scenari, ad esempio valutando l'impatto del vento proveniente da molte direzioni, come in (Ricci et al., 2022), e/o con diverse intensità, come in (Cintolesi et al., 2024), o magari in più località, come in (Duran et al., 2020), soprattutto in studi iniziali dove rappresentare fenomeni non stazionari o descrivere con grande accuratezza la turbolenza non rientra tra gli

obiettivi principali. Per scopi operativi dove risultano fondamentali tempi di risposta molto rapidi, invece, come valutazioni di impatto di dispersione di inquinanti in casi emergenziali alla scala degli edifici, i modelli CFD non sono ancora utilizzabili a causa dei tempi di calcolo attualmente richiesti, rendendo ancora necessari modelli meteorologici alla microscala diagnostici o prognostici semplificati rispetto a un modello CFD, come in (Oldrini et al., 2019), (Dong et al., 2021), (Schiavini, 2026).

1.3 Obiettivi e struttura della Tesi

In questo lavoro vengono valutate le prestazioni di una catena modellistica pensata per previsioni operative di dispersione degli inquinanti alla scala degli edifici con orizzonte temporale dell'ordine dei giorni, verificando l'accuratezza nella rappresentazione dei campi di velocità ed energia cinetica turbolenta in terreno complesso e in condizioni estreme di vento intenso, come quelle rappresentate dalla Bora. Il test viene eseguito sul caso studio di Bora persistente del 26 marzo 2026, validando la simulazione attraverso i dati della campagna sperimentale condotta nei pressi dell'Ospedale di Cattinara, situato in terreno complesso sottovento all'altopiano carsico triestino. La simulazione, inoltre, viene confrontata con delle simulazioni CFD effettuate in (Ampatzidis et al., 2026), ottimizzate per tale dominio ma eseguite sul caso studio più estremo del febbraio 2012, in modo da estendere la valutazione in punti diversi del dominio.

Il Capitolo 2 è dedicato a una contestualizzazione climatologica del vento di Bora a Trieste in questo primo quarto di secolo, effettuata per individuare e collocare il caso studio su cui viene effettuato il test. Partendo da dati puntuali al suolo e da una classificazione dei singoli giorni in certe condizioni sinottiche, i cosiddetti *Weather Type*, si cerca di distinguere quel sottoinsieme di eventi di Bora di origine sinottica che presentano una certa persistenza, in modo da inferire la loro statistica sulla base delle condizioni quasi-stazionarie che li hanno generati, gettando un ponte tra le definizioni che caratterizzano la Bora sinottica, ampiamente discusse in letteratura, e il problema di una definizione condivisa di Bora a partire dal suo sviluppo locale, legato all'orografia del territorio. Nei Capitoli 3 e 4, invece, scelto un caso studio di Bora coperto dalla campagna sperimentale (26 marzo 2026), vengono descritte le metodologie, l'approccio modellistico e di discesa di scala, le equazioni del modello e i risultati della simulazione alla microscala, confrontando catene modellistiche pensate per scopi molto diversi tra loro: da una parte una catena operativa dell'agenzia regionale ARPA FVG (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, Regione Friuli Venezia-Giulia), composta dall'accoppiamento del modello alla mesoscala WRF (*Weather Research and Forecasting model*), usato in chiave previsionale, col modello alla microscala Micro-SWIFT (*Microscale Stationary Wind Field and Turbulence model*), a sua volta componente della catena modellistica PMSS (*Parallel Micro-SWIFT-SPRAY*) sviluppata da ARIANET per stime di dispersione degli inquinanti in atmosfera ad alta risoluzione; dall'altra la catena usata per le simulazioni *benchmark* effettuate in (Ampatzidis et al., 2026), composta da una configurazione di WRF con una risoluzione massima più fine costruita appositamente per il dominio coinvolto, accoppiata con un modello CFD RANS. Quest'ultimo confronto è parzialmente limitato dal fatto che le simulazioni

sono condotte su due casi di studio di Bora differenti.

In particolare, si identificano i seguenti obiettivi:

- creazione di un algoritmo automatico di identificazione degli eventi di Bora persistenti a Trieste a partire da dati puntuali di direzione e intensità media di vento superficiale e classificazione di tali eventi sulla base delle definizioni sinottiche fornite dalla letteratura (Capitolo 2);
- validazione della simulazione operativa Micro-SWIFT con i dati della campagna sperimentale per il caso studio di Bora persistente del 26 marzo 2026 (Capitolo 4);
- confronto qualitativo della simulazione Micro-SWIFT con le simulazioni CFD *benchmark* (Capitolo 4).

Capitolo 2

Climatologia della Bora a Trieste

In questo capitolo viene presentata un’analisi climatologica degli eventi di Bora più persistenti a Trieste (v. Sezione 2.3), definendone i criteri di individuazione (v. Sezione 2.2) sulla base di dati puntuali (v. Sezione 2.1) e classificandoli attraverso le definizioni sinottiche diffuse in letteratura (v. Sezione 2.4). Chiude il capitolo una sintesi dei risultati ottenuti (v. Sezione 2.5).

2.1 Descrizione dei dati

La seguente analisi è stata condotta utilizzando osservazioni storiche puntuali di 7 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio carsico triestino e sloveno (v. Tabella 2.1, che sintetizza le principali caratteristiche e i periodi di disponibilità dei dati, e la Figura A.10 collocata alla fine della Sezione A.3, che sintetizza la distribuzione spaziale delle stazioni). I dati sono stati processati e resi disponibili con frequenza oraria dall’agenzia regionale ARPA FVG (Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente, Regione Friuli Venezia-Giulia). Per gli scopi di questo lavoro, sono stati considerati dati di intensità media oraria (i) e intensità massima oraria, altrimenti detta raffica (r), del vento superficiale a 10 m di quota (direzione e velocità), nella finestra temporale identificata dagli anni 2001-2025. Tra tutte le stazioni prese in considerazione (v. Tabella 2.1), solamente alla stazione meteorologica molo F.lli Bandiera a Trieste sono disponibili dati storici di vento superficiale che coprono l’intera finestra temporale oggetto dell’analisi (di cui solo quelli relativi all’intensità media oraria sono costituiti da valori congiunti di velocità e direzione per tutta la finestra temporale).

Tale disponibilità di dati storici è il motivo principale che ha portato a eleggere la stazione molo F.lli Bandiera, al pari di (Cintolesi et al., 2024) come riferimento per l’identificazione delle ore di Bora a Trieste, ma anche la sua particolare posizione ha avuto un ruolo rilevante: quando il vento spira da nord-est, la stazione si trova sottovento alla città, facendo registrare i valori di velocità più alti rispetto alle altre stazioni a causa della canalizzazione del vento lungo i principali viali cittadini; l’ampliamento dello spettro di velocità rispetto alle altre stazioni facilita l’isolamento della Bora da altri regimi di vento sinottici che caratterizzato l’Adriatico, come lo Scirocco (Vozila et al., 2021), ma soprattutto da venti locali con la medesima direzione di provenienza della Bora.

Stazione	Dati velocità	Dati vel. e dir.	Rappresentatività sinottica
Molo F.lli Bandiera Trieste (ITA) molo urbano 1 m s.l.m. 13.752242°E 45.649996°N	i: 01/01 - 06/19 01/20 - 08/20 12/20 - 12/25 r: 01/01 - 07/04 11/04 - 08/20 12/20 - 12/25	i: idem idem idem r: 11/10 - 06/19 01/20 - 08/20 12/20 - 12/25	adeguata (2012): - intensità (9) - direzione (9)
Muggia (ITA) molo urbano 2 m s.l.m. 13.752633°E 45.610484°N	i: 08/06 - 03/21 05/21 - 12/25 r: 08/06 - 03/21 05/21 - 12/25	i: idem idem r: 03/17 - 03/21 05/21 - 12/25	terreno non piano; sufficiente (2012): - intensità (7) - direzione (9)
Cattinara (ITA) altopiano carsico 257 m s.l.m. 13.833167°E 45.635432°N	i: 10/07 - 08/15 02/16 - 01/21 04/21 - 12/25 r: 10/07 - 08/15 02/16 - 12/25	i: idem idem idem r: idem idem	terreno non piano e presenza di ostacoli ravvicinati (2012)
Sgonico (ITA) altopiano carsico 268 m s.l.m. 13.742056°E 45.738004°N	i: 01/01 - 12/25 r: 08/05 - 12/25	i: idem r: 03/11 - 12/25	adeguata (2012): - intensità (9) - direzione (9)
Borgo Grotta Gigante (ITA) altopiano carsico 275 m s.l.m. 13.764681°E 45.709385°N	i: 08/07 - 03/18 09/18 - 07/20 01/21 - 04/21 08/21 - 12/25 r: 09/07 - 04/21 08/21 - 12/25	i: 10/07 - 03/18 idem idem idem r: no idem	presenza di ostacoli ravvicinati; adeguata (2012): - intensità (7) - direzione (9)
Godnje (SVN) altopiano carsico 320 m s.l.m. 13.8433°E 45.7547°N	i: 01/23 - 12/25 r: 01/23 - 12/25		
Postojna (SVN) altopiano carsico 538 m s.l.m. 14.1973°E 45.7722°N	i: 01/23 - 12/25 r: 02/23 - 12/25		
Mt. Nanos (SVN) picco carsico 1242 m s.l.m. 14.0532°E 45.7714°N	i: 03/23 - 12/25 r: 03/23 - 12/25		

Tabella 2.1: In ordine di altitudine, stazioni meteorologiche in territorio carsico usate per l'analisi statistica con sintesi dei periodi di disponibilità dei dati di intensità media (i) e raffica (r), concessi dall'agenzia regionale ARPA FVG (ognuno dei mesi compresi nella lista contiene almeno 15 giorni con 12 ore di dati della variabile a cui si riferisce). In questi mesi, i dati mancanti costituiscono sempre percentuali inferiori al 2.1% (velocità e direzioni congiunte mancanti delle raffiche a Sgonico), che al molo F.lli Bandiera diventano inferiori allo 0.5%. La scala di rappresentatività sinottica va da 0 a 10.

Una volta completata la selezione degli eventi di Bora persistenti nella finestra temporale 2001-2025 sulla base dei dati di direzione e intensità media oraria al molo F.lli Bandiera, l'analisi è stata estesa a tutti i dati disponibili di intensità media e raffica delle altre stazioni meteorologiche considerate. Lo scopo è di allargare la panoramica, evidenziando come l'interazione con l'orografia tenda ad attribuire alla Bora impronte diverse al variare delle località in cui si manifesta, in parte in direzione (anche se sono sempre coinvolti i settori angolari nord/nord-est e nord-est) ma soprattutto in intensità: le stazioni molo F.lli Bandiera e Muggia si trovano a livello del mare, su molo urbano; Sgonico, Borgo Grotta Gigante e Cattinara si distribuiscono da nord a sud sull'altopiano carsico triestino, mentre Godnje e Postojna su quello sloveno; il mt. Nanos, infine, è un picco sopravento al canale della Bora triestino (v. Figura A.10 alla fine della Sezione A.3). Al netto di interruzioni sparse o più prolungate, quest'ultime probabilmente dovute a manutenzione, la copertura spaziale del Carso triestino risulta omogenea solamente a partire da ottobre 2007 per dati di velocità relativi all'intensità media oraria e alla raffica (in concomitanza con l'attivazione della stazione meteorologica nella zona di Cattinara) e solo da marzo 2011 per dati di raffica congiunti in velocità e direzione (escludendo la stazione Borgo Grotta Gigante, che dispone delle direzioni delle raffiche solo da agosto 2021). Le tre stazioni slovene selezionate, invece, sono state attivate solamente durante i primi mesi del 2023. Bisogna sottolineare la mancanza di dati al molo F.lli Bandiera negli ultimi mesi del 2019 e del 2020, che porta a una sottostima della statistica degli eventi nel lustro 2016-2020 (v. Sezioni 2.3 e 2.5).

L'analisi è stata arricchita da un contributo di classificazione effettuato dalla stessa agenzia regionale ARPA FVG (v. Sezione A.1) che consentirà di gettare un primo ponte tra le intensità locali che la Bora genera alla microscala e l'origine sinottica che causa gli eventi di Bora particolarmente persistenti: a ogni giorno del trentennio 1991-2020, che si interseca con la finestra temporale considerata nel ventennio 2001-2020, la classificazione attribuisce univocamente una certa condizione sinottica che l'ha caratterizzato, il cosiddetto *Weather Type*. Quest'informazione, appoggiandosi al lavoro svolto da ARPA FVG, verrà inclusa nell'analisi con lo *status* di dato.

In (Vozila et al., 2021), che rappresenta la letteratura di riferimento più aggiornata per la definizione dei *Weather Type* nella regione adriatica, viene utilizzato un "metodo semi-oggettivo", ossia un metodo di classificazione basato su criteri statistici (correlazioni tra campi, analisi delle componenti principali o attraverso indici climatici) costruiti sulla fisica che determina la climatologia della regione. La definizione di tali criteri è necessaria per l'automatizzazione degli algoritmi di identificazione e classificazione, resa imprescindibile dalla mole di dati coinvolti appartenenti a una vasta finestra temporale. In tale lavoro, innestando un dominio centrato sull'Adriatico (dall'Italia centrale a parte dell'Albania, dall'Austria meridionale alla Puglia) in un dominio più esteso centrato sull'Italia (dalla Francia sud-orientale all'Albania, da parte della Cecchia alla punta settentrionale della Tunisia) vengono identificati 17 *Weather Type* attraverso i campi di pressione al suolo e di geopotenziale a 500 hPa (indicativamente metà atmosfera) di un *ensemble* di 9 simulazioni storiche (30 anni) multi-modello (vari GCM forniscono le condizioni al contorno a

2 modelli EURO-CORDEX), con un peso doppio dei punti-griglia interni al dominio regionale innestato. I 17 *Weather Type* sono distinti da diverse posizioni della struttura sinottica dominante (8 ciclonici e 9 anticiclonici, di cui 1 in realtà viene definito neutro per il basso gradiente di pressione) presente sulla regione.

La classificazione effettuata da ARPA FVG, documentata nel report interno (Bonafè et al., 2022), di cui si riporta un passo in Appendice (v. Sezione A.1), utilizza metodi simili ma con un orientamento più operativo, identificando in un dominio decisamente più esteso (dalla Spagna a parte della Turchia, dalla punta meridionale della Norvegia alla costa africana settentrionale), ricoperto con una risoluzione meno fine (un ordine di grandezza rispetto a (Vozila et al., 2021)), un numero più esiguo di *Weather Type* (11) attraverso i campi di pressione al suolo, geopotenziale a 500 hPa e anomalie di temperatura a 2 m delle rianalisi globali effettuate da NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), sempre su un periodo storico di 30 anni. Di questi 11 *Weather Type*, 5 sono ciclonici (WT1, WT2, WT3, WT8, WT10) e 6 sono anticiclonici (WT4, WT5, WT6, WT7, WT9, WT11). Nella Sezione 2.4 si argomenterà come soprattutto WT1 e WT3 possano favorire la “Bora ciclonica continentale”, WT8 e WT10 la “Bora ciclonica marittima” e WT5 e WT7 la “Bora anticiclonica”, mentre casi meno numerosi di Bora ciclonica continentale WT9, di Bora ciclonica marittima WT2, WT4, WT6 e di Bora anticiclonica WT11 completano la classificazione.

2.2 Metodologia dell’analisi

Revisione della letteratura

A causa del diverso sviluppo che interessa le varie località in base alla topografia del territorio, in letteratura non sembra esistere una definizione univoca dei criteri per identificare automaticamente il vento di Bora a scala locale (quindi a partire da dati puntuali), portando ad elaborare dei filtri operativi sviluppati sulla base dei dati disponibili e con validità *ad hoc*. Tuttavia, i criteri di selezione di tali filtri mostrano caratteristiche ricorrenti, essendo accomunati da: direzione di provenienza del vento superficiale (tipicamente settori angolari nel primo quadrante, essendo la Bora un vento persistente da nord-est); una soglia minima di intensità media oraria (essendo la Bora caratterizzata da velocità elevate), preferita alla raffica presumibilmente per la maggiore stabilità della direzione di provenienza; una soglia minima di durata (per l’identificazione di singoli eventi).

Ad esempio, in (Dorman et al., 2007) viene definito l’“evento di Bora” sulla base di dati puntuali raccolti all’aeroporto di Zadar (Croazia), sito costiero in cui si registrano intensità meno elevate rispetto a località direttamente investite dalle canalizzazioni della Bora (come il canale di Senj), con i seguenti criteri di identificazione: componente a 60°N dell’intensità media oraria di almeno 2.6 m/s mantenuta per almeno 24 h con al massimo 1 ora di discontinuità (considerando quindi solo eventi particolarmente persistenti). Nello stesso articolo, per estendere la disponibilità di dati storici con lo scopo di effettuare un’analisi climatologica, vengono utilizzati anche i dati della stazione sull’isola di Mali Lošinj (Croazia), ridefinendo i criteri di selezione (la soglia di intensità oraria viene alzata a 5 m/s). In (Šoljan et

al., 2018) tale soglia diventa di 4 m/s per dati puntuali a circa 30 km a nord-est di Zadar, prendendo in considerazione anche eventi meno persistenti di durata minima di 6 ore con al massimo 1 ora di discontinuità; in tale lavoro, inoltre, beneficiando di dati da radiosondaggio, viene introdotta la classificazione di “Bora profonda” e “Bora superficiale”, estendendo il criterio della direzione di provenienza, in questo caso un settore angolare di 80° centrato su 40°N, fino a 500 hPa (indicativamente a metà troposfera).

Si registra, invece, una maggior uniformità nella classificazione della Bora in strutture sinottiche quasi-stazionarie, distinguendo in “Bora ciclonica” e “Bora anticiclonica” a seconda che la forzante dinamica (gradiente di pressione negativo tra il continente e il mare) sia generata da un ciclone che si sviluppa sull'Italia o da un anticiclone stabile sull'Europa continentale (Jurčec, 1980). La “Bora anticiclonica”, ad esempio, tende a essere più spesso “profonda” rispetto alla “Bora ciclonica”, anche se entrambe possono essere di entrambi i tipi (Pullen et al., 2007). La classificazione sinottica viene completata dalla cosiddetta “Bora frontale”, dovuta al passaggio di una fronte freddo (transiente) sull'Adriatico. Tipicamente, la “Bora frontale” risulta di durata minore ma non necessariamente meno intensa (Jurčec, 1988).

Le masse d'aria coinvolte, che nella classificazione risalente alla scuola di Bergen hanno preso il nome di aria polare o artica, marittima o continentale, possono influire sulla formazione (aria marittima) o meno (aria continentale) di precipitazioni. Interessante notare la classificazione introdotta in (Camuffo, 1990) e riportata in (Cesini et al., 2004), dove si distingue la “Bora chiara” dalla “Bora anticiclonica”, la prima caratterizzata da un'alta pressione sull'Europa centro-orientale (che sarebbe correlata a un'assenza di precipitazioni) mentre la seconda sull'estrema Europa occidentale (che sarebbe correlata a una presenza di precipitazioni a causa di una depressione che si forma sull'Adriatico), e la “Bora scura” dalla “Bora ciclonica”, la prima caratterizzata da una depressione sul Mediterraneo centrale e la seconda da una depressione a ovest delle Alpi: le definizioni inducono a ricondurre la “Bora anticiclonica” della classificazione di Camuffo alla “Bora ciclonica marittima” (spostando quindi il centro della definizione dall'alta pressione sull'estrema Europa occidentale alla depressione sull'Adriatico), la “Bora ciclonica” a un sottoinsieme di “Bora ciclonica continentale” (che potrebbe coincidere con il WT3), la “Bora scura” alla “Bora ciclonica continentale” e la “Bora chiara” alla “Bora anticiclonica” (v. Sezione 2.4).

Definizione dei criteri di selezione

Lo scopo dell'analisi vuole essere caratterizzare in modo automatico gli eventi di Bora a Trieste attraverso le definizioni di Bora sinottica basate su strutture quasi-stazionarie, ossia la “Bora ciclonica” e la “Bora anticiclonica”. Tale caratterizzazione verrà condotta attraverso statistiche mensili, di frequenza, intensità media e durata di eventi particolarmente persistenti, a cui si annettono considerazioni sulle distribuzioni in intensità delle ore interessate da questi eventi. Prima di procedere, tuttavia, bisogna sottolineare che se un evento è persistente implica solo probabilisticamente, e non necessariamente, che tale evento sia dovuto a strutture sinottiche

quasi-stazionarie, e, soprattutto, che se un evento è di origine sinottica non necessariamente è persistente: da una parte si possono immaginare casi di Bora frontale particolarmente duraturi, sebbene rari; dall'altra possono esserci casi di Bora ciclonica con sviluppo inferiore anche alla mezza giornata (è il caso di alcuni eventi presi in considerazione in (Šoljan et al., 2018)). Di conseguenza, a rigore, i risultati dell'analisi sono limitati ai soli eventi di origine sinottica caratterizzati da una certa persistenza: non essendo possibile determinare in linea di principio se un evento è sinottico esclusivamente attraverso dati puntuali (nel seguito si porrà il problema di distinguere la Bora, che si ricorda essere un vento generato da una forzante dinamica, dal Borino, un vento catabatico regionale originato da gradienti termici), si renderà necessario imporre una soglia severa di durata. Sulla scia di queste considerazioni si procede a introdurre le definizioni di “ora di Bora” ed “evento di Bora persistente”, che a sua volta sarà composto da “giornate di Bora” in modo da poter utilizzare la classificazione dei singoli giorni in *Weather Type*.

In questa sede un'ora viene definita “ora di Bora” se alla stazione meteorologica molo F.lli Bandiera a Trieste l'intensità media oraria del vento supera gli 8 m/s e la sua direzione è compresa nel settore angolare 20° - 110° (di ampiezza 90° e centrato su 65° N). Le soglie in direzione e in intensità media sono state scelte con criteri statistici in modo da isolare la Bora dallo Scirocco, con provenienza est/sud-est, e dalle brezze locali. Per definire il settore angolare di provenienza è stata usata la distribuzione di tutte le ore disponibili in direzione e in intensità media mostrata in Figura 2.1, cercando di isolare tutti gli angoli che interessano il picco della Bora; una variazione di qualche grado degli estremi di tale settore angolare non impatta significativamente sulla statistica proprio perchè collocati in coda alla distribuzione direzionale: si è scelto per semplicità, quindi, un settore angolare di ampiezza esattamente 90° . Da notare una parziale sovrapposizione del picco della Bora con quello che si ipotizza essere dovuto alla brezza di monte (Jeromel et al., 2009), che in inverno può raggiungere velocità piuttosto elevate grazie al raffreddamento notturno dell'entroterra e agli effetti di canalizzazione legati all'orografia, guadagnandosi il nome di “Borino” (Jurčec, 1980): ciò rende necessaria una soglia di intensità per la definizione di “ora di Bora” e, come si vedrà in seguito, una soglia minima di numero di ore di Bora per la definizione di “giornata di Bora”.

Per definire la soglia di intensità è stato usato il *fit* lineare a tratti sul logaritmo della distribuzione delle ore in intensità media in cui il vento proveniva dal settore angolare scelto (20° - 110°), mostrata in Figura 2.2, tramite cui si possono notare un paio di cambi di regime evidenti nella coda delle alte velocità (Muggeo, 2003) che suggeriscono una separazione statistica tra “Bora” e “Borino” a 8 m/s (vento teso secondo la scala Beaufort, v. Sezione A.3) e tra “Bora” e “Bora intensa” a 17 m/s (burrasca moderata secondo la scala Beaufort); i valori scelti corrispondono ai valori di separazione tra le barre dell'istogramma appena successivi alla barra in cui ricade il cambio di pendenza. In questa sede, infine, una giornata viene definita “giornata di Bora” (da intendersi, appunto, come una giornata caratterizzata dalla presenza di un evento di Bora sinottico persistente) se nel corso del giorno ci sono state almeno 18 ore di Bora, anche non consecutive, mentre si definisce un “evento di Bora persistente” come una o più giornate consecutive di Bora.

Si noti, innanzitutto, che, mentre la definizione di “ora di Bora” è strettamente locale, ossia è indipendente dal fatto che il gradiente di pressione che la genera sia parte di strutture sinottiche più ampie o che sia dovuta a gradienti di pressione regionali o locali, termici o dinamici, la definizione di “giornata di Bora”, e conseguentemente di “evento di Bora persistente”, ha lo scopo di classificare in modo univoco le singole giornate per poter inferire se i singoli *Weather Type* che le caratterizzano tendano o meno a favorire degli eventi che risultano dominanti in termini di computo di ore, ipotizzando, sulla scorta delle considerazioni precedenti, che siano di origine sinottica quasi-stazionaria.

Si rende necessario, quindi, escludere dalla statistica eventi particolarmente duraturi e intensi di origine prettamente termica, legati quindi al ciclo diurno. In particolare, la soglia delle 18 ore costringe la presenza di ore di Bora diurne nel computo di una “giornata di Bora”, escludendo attraverso tale limite fisico gli eventi notturni più duraturi di Borino: i giorni invernali più corti contano 16 ore senza Sole, a cui si aggiunge 1 ora al mattino e 1 ora serale per tenere conto delle transizioni giorno-notte, dato che la completa cessazione e l'instaurazione di un moto termico catabatico possono avvenire rispettivamente decine di minuti dopo l'alba e fino a un'ora orina del tramonto (Fernando, 2010). Non sono stati aggiunti ulteriori criteri, ad esempio, sulla continuità, per evitare di escludere eventi che possono registrare dei momentanei indebolimenti o addirittura inversioni in direzione causati da fenomeni orografici transienti, come la formazione di rotori ed eventuali separazioni nei bassi strati (Šoljan et al., 2018). D'altra parte, la soglia del numero di ore risulta severa (v. Figura 2.3) dato che vengono escluse tutte le giornate in cui un evento inizia o finisce, occupando solo una certa fascia del giorno (fino a 17 ore), in particolare vengono persi tutti gli eventi che si sviluppano solamente a cavallo tra due giorni (fino a 34 ore) e che a buon diritto potrebbero essere chiamati persistenti: l'intento della presente analisi, che si ripete essere di classificare gli eventi di Bora persistenti in base a strutture sinottiche che permangono per uno o più giorni, ha portato ad accettare queste limitazioni pur di garantire che la statistica riguardi esclusivamente eventi di origine dinamica, con la consapevolezza che la durata e il numero degli eventi all'anno risultano sensibili a questa soglia. Con le definizioni appena introdotte, si ottengono i valori elencati in Tabella 2.2.

Per un controllo ulteriore sui criteri di selezione adottati, la Figura 2.4 mostra un *fit* sulla distribuzione delle ore nelle “giornate di Bora” in intensità media oraria v attraverso la densità di Weibull a due parametri $f_{\beta,\delta}(v)$, che rappresenta con buona approssimazione la distribuzione in intensità dei venti superficiali (Jeromel et al., 2009): si tratta di un'estensione della densità esponenziale (che si ottiene con $\delta = 1$) con distribuzione cumulativa $F_{\beta,\delta}(v) = 1 - e^{-\phi_{\beta,\delta}(v)}$ (Weibull, 1951), dove $\phi_{\beta,\delta}(v) = (v/\beta)^\delta$ è la “funzione di rischio cumulativo”, che determina direttamente l'andamento della coda delle alte velocità della distribuzione. I parametri della distribuzione di Weibull hanno il seguente significato: $\beta > 0$, “parametro di scala” in m/s, definisce la scala del picco della distribuzione, adimensionalizzando la velocità $x = v/\beta$; per valori crescenti di $\delta > 1$, “parametro di forma” adimensionale (definito positivo), diminuisce la probabilità $P(x) = 1 - F(x) = e^{-\phi(x)}$ di superare una certa soglia $x > 1$ (ossia $v > \beta$), ricordando che $\phi(x) = -\ln P(x) = x^\delta$. La

funzione di rischio cumulativo, pertanto, modula il decadimento esponenziale di tale probabilità. La velocità media è $\bar{v} = \beta\Gamma(1 + 1/\delta)$, proporzionale alla funzione Gamma $\Gamma(1 + 1/\delta) = \int_0^\infty dt t^{1/\delta} e^{-t}$. In termini dimensionali, la densità di Weibull assume la forma espressa dall'Equazione 2.1:

$$f_{\beta,\delta}(v) = F'_{\beta,\delta}(v) = \frac{\delta}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\delta-1} e^{-(\frac{v}{\beta})^\delta}. \quad (2.1)$$

Dato	Valore
Anni analizzati	25
Ore totali analizzate	217436
Ore di Bora selezionate	25576
Frequenza ore di Bora	11.8%
Media ore di Bora / anno	1023
Giorni totali analizzati	9067 (7305 con WT ¹ : 01/01 - 12/20)
Giorni di Bora selezionati	444*
Frequenza giorni di Bora	4.9%*
Media giorni di Bora / anno	17.8*
Eventi di Bora persistenti selezionati	289*
Durata media eventi di Bora persistenti (giorni)	1.5* (min: 1; max: 10*)
Media eventi di Bora persistenti / anno	11.6*
Ore di Bora in giorni di Bora su ore di Bora totali	37%*
Media ore di Bora giorni di Bora / giorno	21.4*
Intensità media giorni di Bora (m/s)	13.6* (max: 30.0) al molo F.lli Bandiera

Tabella 2.2: Statistica generale di ore, giorni ed eventi di Bora persistenti individuati tramite i dati della stazione molo F.lli Bandiera con le seguenti soglie: direzione 20°-110°, intensità media oraria > 8 m/s, ore di Bora al giorno > 18 h. In asterisco i valori che dipendono dalla soglia delle 18 ore.

In fase d'esplorazione delle soglie di selezione delle “giornate di Bora”, analizzando le ore notturne è capitato di osservare distribuzioni bimodali in intensità: come anticipato in precedenza, in linea con (Jeromel et al., 2009), si ipotizza che tali distribuzioni bimodali siano dovute alla brezza di monte locale che genera il picco delle basse velocità (tale picco, ad esempio, è visibile in Figura 2.2). Nel lavoro citato è stato introdotto un filtro della brezza basato sulla fisica della brezza di monte (vento catabatico), prendendo in considerazione come variabile di riferimento la differenza di MMLPT (*Mean Mixed Layer Potential Temperature*), definita come la media della temperatura potenziale dei primi 500 m di atmosfera, nelle località di Zagreb (entroterra continentale) e Udine (entroterra “costiero”), separate da più di 200 km. Se $\text{MMLPT}_{\text{Zagreb}} - \text{MMLPT}_{\text{Udine}} > 0$ il gradiente di pressione che genera il vento da nord-est deve essere causato dal raffreddamento dell'entroterra costiero, motore

¹Sezione A.1

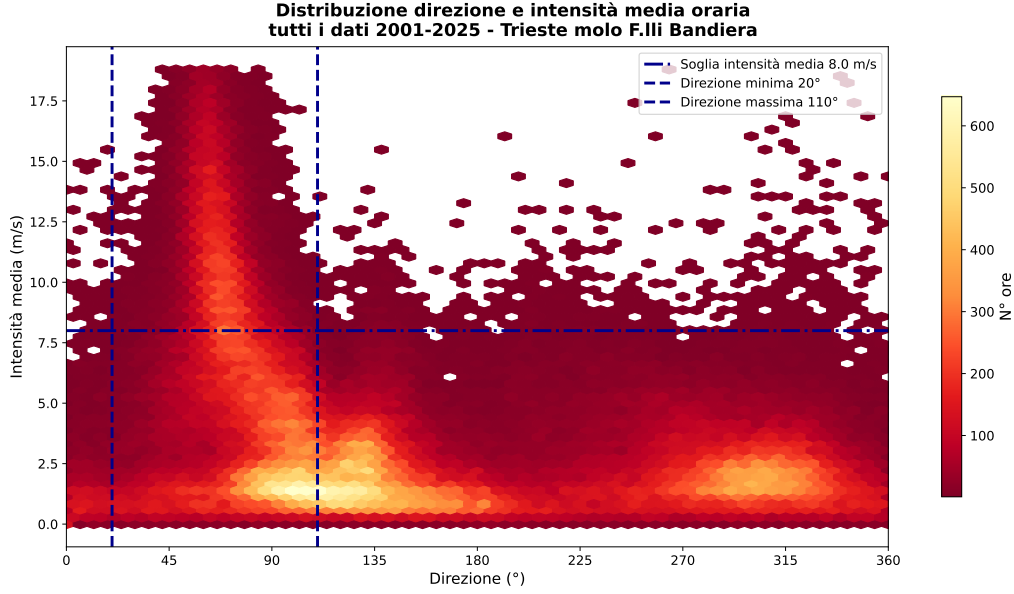


Figura 2.1: Distribuzione delle ore per intensità media oraria e direzione al molo F.lli Bandiera. Da sinistra a destra si distinguono il picco della Bora ($\simeq 60^\circ$), il picco della brezza di monte ($\simeq 90^\circ$), il picco dello Scirocco ($\simeq 120^\circ$) e il picco della brezza di mare ($\simeq 300^\circ$). In blu le soglie di direzione e intensità per l'ora di Bora.

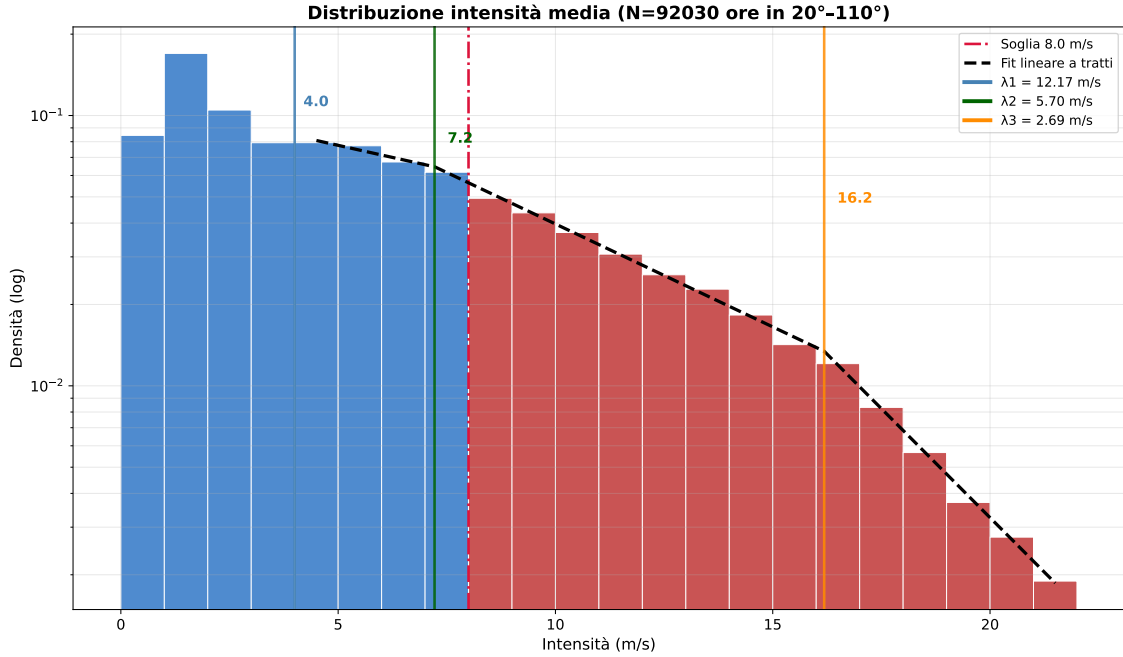


Figura 2.2: Logaritmo della distribuzione delle ore in intensità media appartenenti al settore angolare 20° - 110° al molo F.lli Bandiera con *fit* lineare a tratti (con i pendenze $1/\lambda_i$) per la coda alle alte velocità ($\propto -v^\delta$ nel caso Weibull puro, v. Equazione 2.1). In rosso le ore che vengono classificate di Bora secondo la soglia degli 8 m/s ($\simeq$ soglia verde coincidente con vento teso), in blu le ore che vengono filtrate. Secondo la soglia dei 17 m/s ($\simeq$ soglia gialla coincidente con burrasca moderata) la Bora viene considerata intensa.

della brezza di monte; se il raffreddamento interessa maggiormente il continente, invece, viene attribuito all'avvezione di aria fredda continentale del vento di Bora. Sebbene non escluda i casi di brezza di monte che si verificano in concomitanza di un forte raffreddamento dell'entroterra profondo, questo criterio consente di eliminare

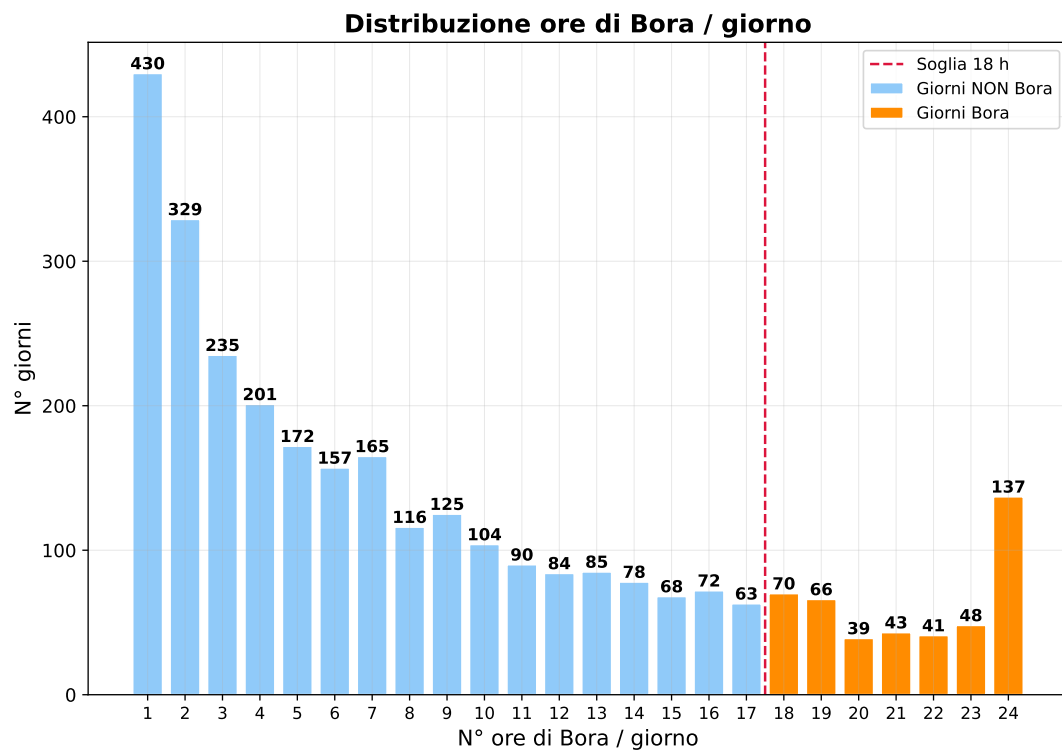


Figura 2.3: Distribuzione dei giorni per numero di ore di Bora nel giorno al molo F.lli Bandiera. In arancione i giorni che vengono classificati di Bora secondo la soglia delle 18 h, in azzurro i giorni che vengono filtrati.

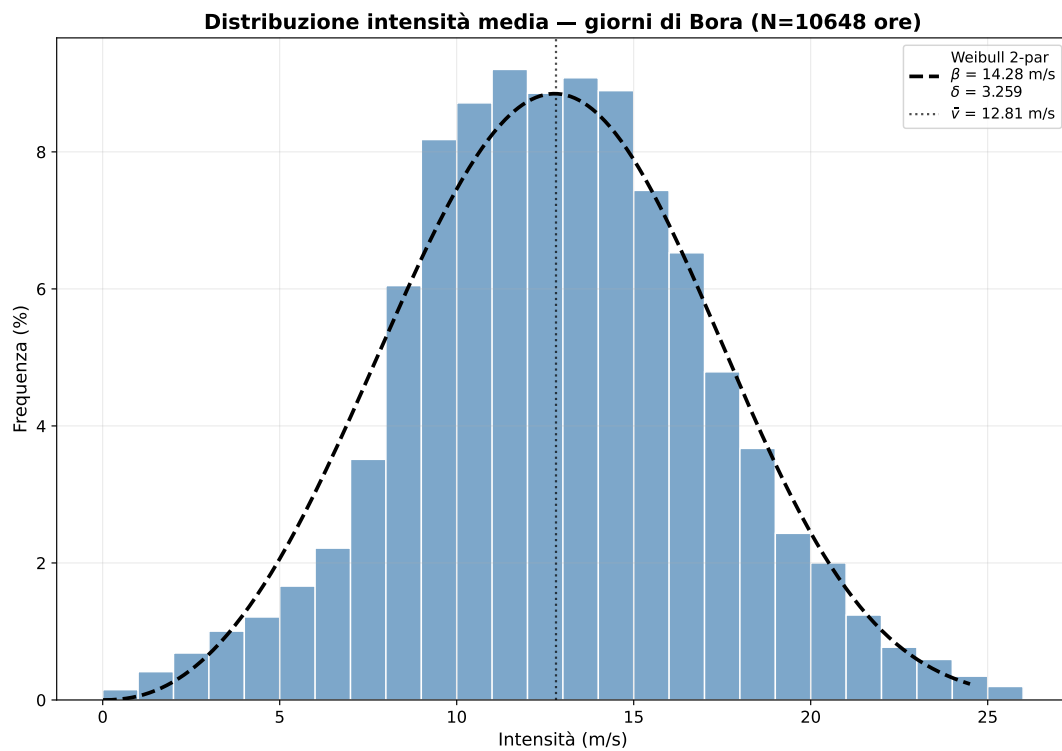


Figura 2.4: Distribuzione delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria al molo F.lli Bandiera. Il *fit* con la densità di Weibull a due parametri mostra un buon accordo visivo nonostante la semplicità del filtro.

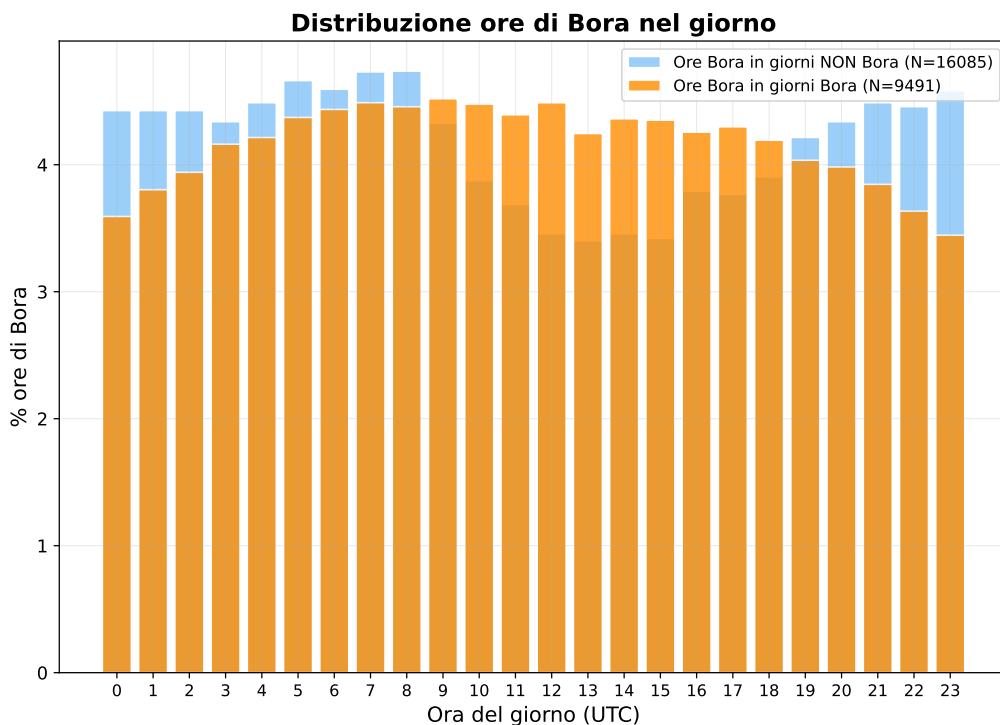


Figura 2.5: Distribuzioni delle ore di Bora per ora del giorno al molo F.lli Bandiera. In arancione i giorni che vengono classificati di Bora, in azzurro i giorni che vengono filtrati.

il picco alle basse velocità. In questa analisi tale filtro non è stato adottato per utilizzare esclusivamente dati puntuali, tuttavia può essere utile se l'intento è studiare anche gli eventi di Bora più brevi, non rendendo necessaria una soglia di durata per filtrare la brezza di monte. Si sottolinea, tuttavia, che l'interazione tra Bora e brezze locali sembra rimanere una questione non ancora affrontata apertamente in letteratura, così come è poco esplorata la variabilità diurna dell'intensità della Bora: in (Makjanić, 1970), ad esempio, si cerca di spiegare una distribuzione bimodale di anomalia di intensità (con massimi in tarda mattinata e tarda serata) sulla costa croata (Senj e Rab) attraverso un'analisi spettrale basata su onde di gravità. Dai dati a Trieste, invece, in termini di distribuzione del numero di ore di Bora nel corso della giornata (v. Figura 2.5), nei “giorni di Bora” emerge un solo picco in tarda mattinata, con una flessione nelle ore serali e notturne, in parte accentuato dal criterio di selezione delle 18 ore che filtra l'inizio o la fine di alcuni eventi, ma che si vede anche nelle distribuzioni di intensità delle Figure A.8 e A.9 della Sezione A.3. Nei giorni classificati come “non di Bora” (ossia in cui non è presente un evento di Bora persistente), invece, la distribuzione delle ore di Bora risulta effettivamente bimodale.

2.3 Risultati dell'analisi

La distribuzione mensile dei giorni e degli eventi di Bora persistenti (v. pannello in alto Figura 2.6) rivela che il maggior numero di giornate si concentra nella stagione invernale, in particolare tra gennaio e febbraio, e a marzo; con le soglie presentate in

WT	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025
1	giorni: 25 eventi: 18	giorni: 28 eventi: 17	giorni: 38 eventi: 16	giorni: 26 eventi: 14	?
2	giorni: 2 eventi: 1	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 1 eventi: 1	giorni: 3 eventi: 2	?
3	giorni: 11 eventi: 8	giorni: 2 eventi: 1	giorni: 4 eventi: 1	giorni: 5 eventi: 3	?
4	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 1 eventi: 1	giorni: 0 eventi: 0	?
5	giorni: 7 eventi: 5	giorni: 6 eventi: 6	giorni: 6 eventi: 5	giorni: 2* eventi: 2*	?
6	giorni: 1 eventi: 0	giorni: 2 eventi: 2	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 0 eventi: 0	?
7	giorni: 17 eventi: 10	giorni: 8 eventi: 6	giorni: 13 eventi: 9	giorni: 5* eventi: 3*	?
8	giorni: 13 eventi: 9	giorni: 10 eventi: 7	giorni: 9 eventi: 7	giorni: 9 eventi: 7	?
9	giorni: 4 eventi: 3	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 3 eventi: 2	giorni: 2 eventi: 2	?
10	giorni: 19 eventi: 12	giorni: 22 eventi: 17	giorni: 23 eventi: 14	giorni: 20* eventi: 15*	?
11	giorni: 2 eventi: 2	giorni: 4 eventi: 4	giorni: 3 eventi: 2	giorni: 1 eventi: 1	?
Stagione	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025
DJF	giorni: 44 eventi: 27	giorni: 37 eventi: 25	giorni: 40 eventi: 18	giorni: 35 eventi: 20	giorni: 38 eventi: 20
MAM	giorni: 22 eventi: 18	giorni: 16 eventi: 10	giorni: 18 eventi: 13	giorni: 17 eventi: 13	giorni: 20 eventi: 12
JJA	giorni: 4 eventi: 3	giorni: 7 eventi: 7	giorni: 11 eventi: 8	giorni: 5* eventi: 5*	giorni: 10 eventi: 8
SON	giorni: 31 eventi: 20	giorni: 22 eventi: 18	giorni: 32 eventi: 19	giorni: 16* eventi: 11*	giorni: 19 eventi: 14
Totale	giorni: 101 eventi: 68	giorni: 82 eventi: 60	giorni: 101 eventi: 58	giorni: 73* eventi: 49*	giorni: 87 eventi: 54

Tabella 2.3: Giorni ed eventi di Bora divisi per *Weather Type*, stagione e quinquennio. Agli eventi è stato associato il WT più presente o, a parità di giorni, quello che si è manifestato prima. La classificazione dei giorni per *Weather Type* è disponibile solamente fino al 2020, non coprendo l'ultimo lustro (87 giorni e 54 eventi); inoltre, negli ultimi sei mesi del 2019 e del 2020 non sono disponibili dati per il molo F.lli Bandiera, contribuendo a una sottostima della statistica nel lustro 2016-2020. In asterisco i valori che si ritengono per questo motivo sottostimati.

Sezione 2.2, in ognuno di questi mesi si arriva tra 1 e 2 eventi all'anno con una durata media tra 1.5 e 1.7 giorni, con l'eccezione dei 2.3 giorni medi degli eventi di febbraio (il rapporto tra le altezze delle barre blu e delle barre viola è indicativo della durata media dell'evento, anche se la presenza di eventi di 3 o più giorni consecutivi, sebbene

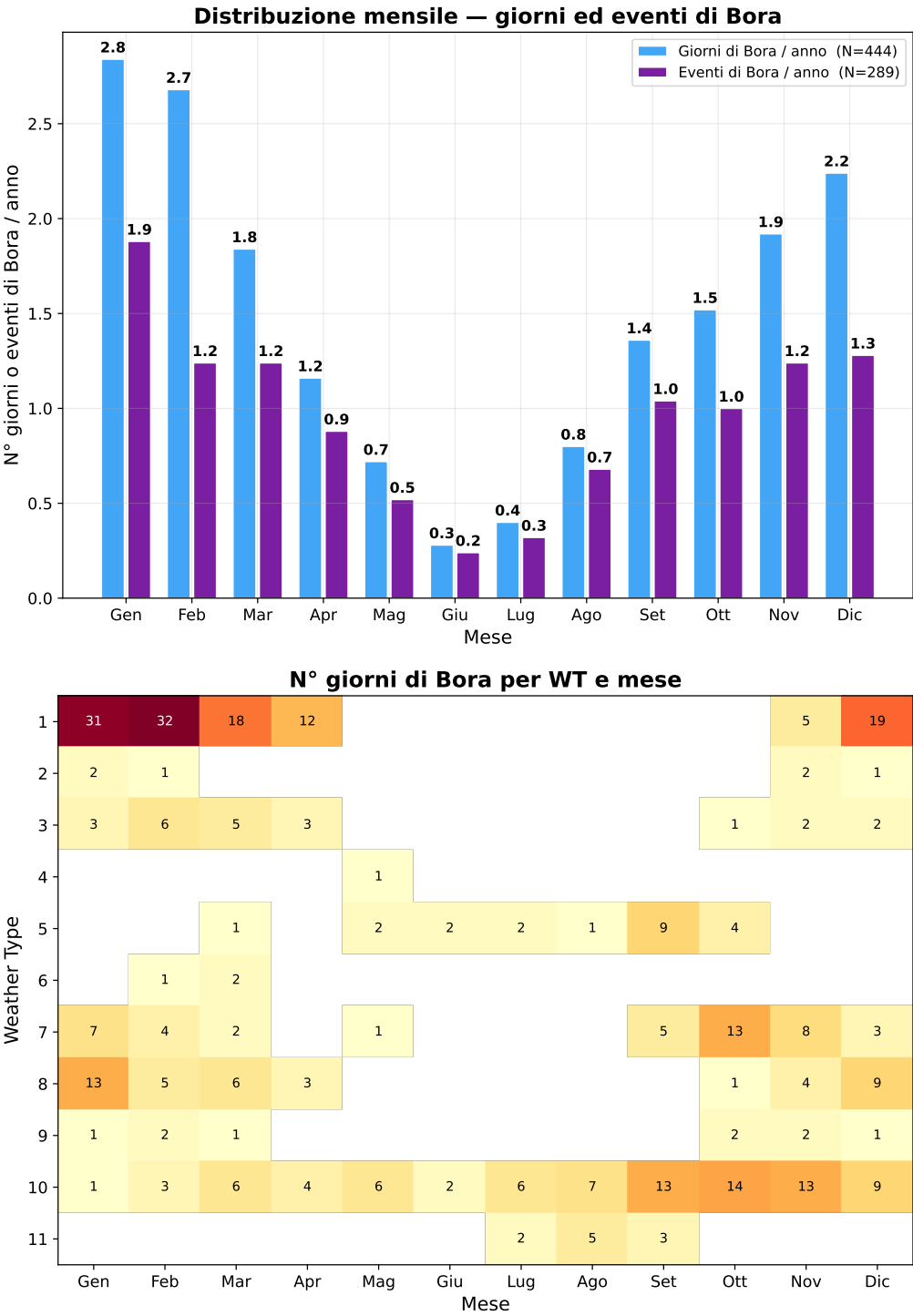


Figura 2.6: In alto: distribuzione mensile di giorni (in blu) ed eventi (in viola) di Bora. In basso: distribuzione dei giorni di Bora per mese e *Weather Type* (v. Sezione A.1)

rara, tende ad influire su una statistica mensile comunque generalmente abbastanza esigua): ciò avviene perchè le condizioni sinottiche che favoriscono maggiormente la Bora sono tipicamente invernali (v. pannello in basso Figura 2.6). Tra aprile e maggio inizia una netta diminuzione che interessa soprattutto la stagione estiva, con un successivo aumento che arriva solamente tra settembre e ottobre e che culmina col

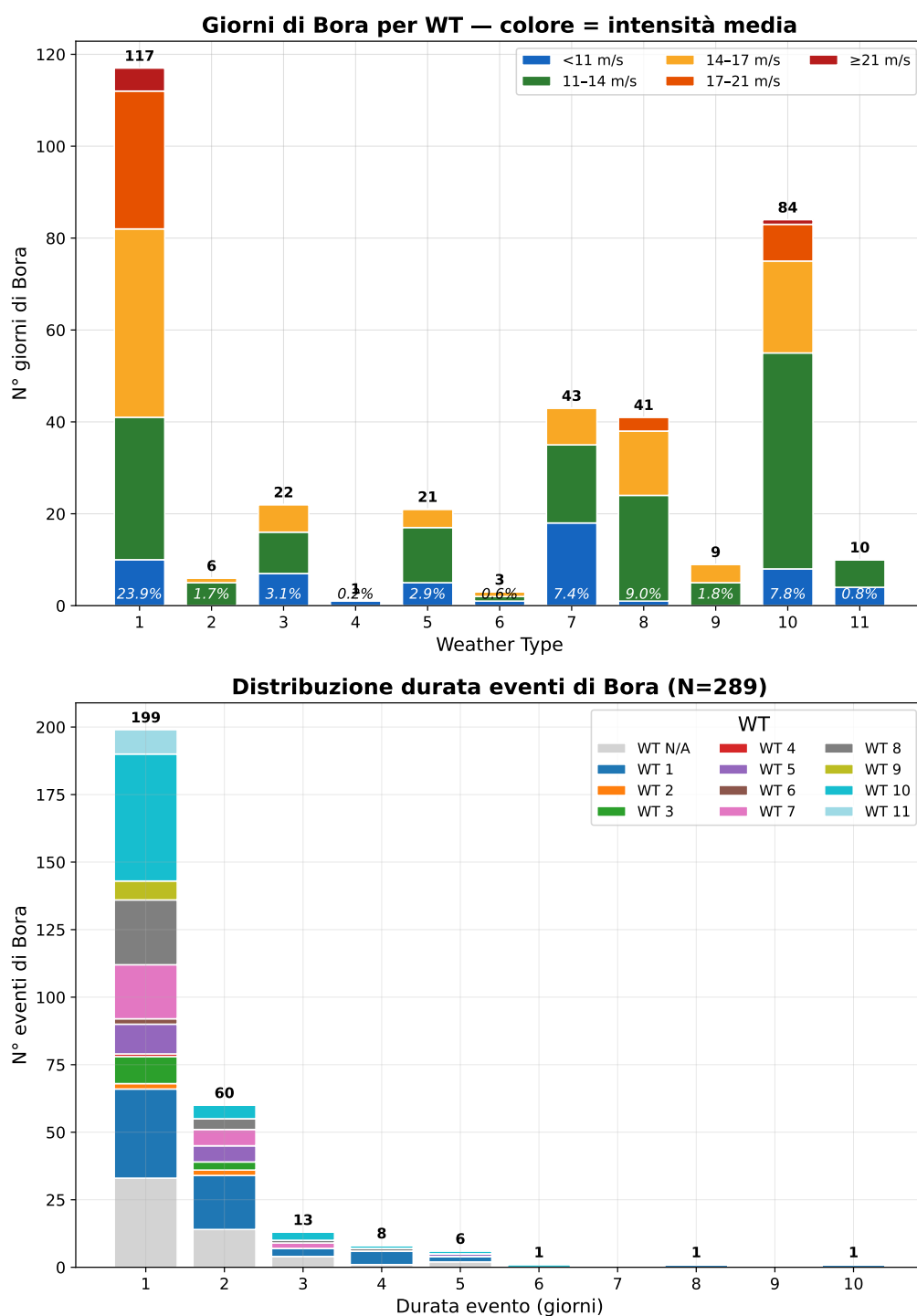


Figura 2.7: In alto: distribuzione dei giorni di Bora per *Weather Type* (v. Sezione A.1). Le percentuali ai piedi delle barre rappresentano le occorrenze relative dei giorni di Bora per quel *Weather Type* e l'altezza delle porzioni colorate delle barre è proporzionale al numero di giorni sopra soglia d'intensità media giornaliera: in blu, verde e giallo rispettivamente condizioni di vento teso, fresco e forte, in arancione e in rosso di burrasca moderata e forte, secondo la scala Beaufort (v. Sezione A.2). In basso: distribuzione degli eventi di Bora persistenti per durata. L'altezza delle porzioni colorate delle barre è proporzionale al numero di giorni con uno specifico *Weather Type*.

picco invernale: anche in estate possono verificarsi eventi persistenti intensi, come quello di fine luglio 2012 (v. Sezione 2.4), sebbene tendano a essere più brevi rispetto

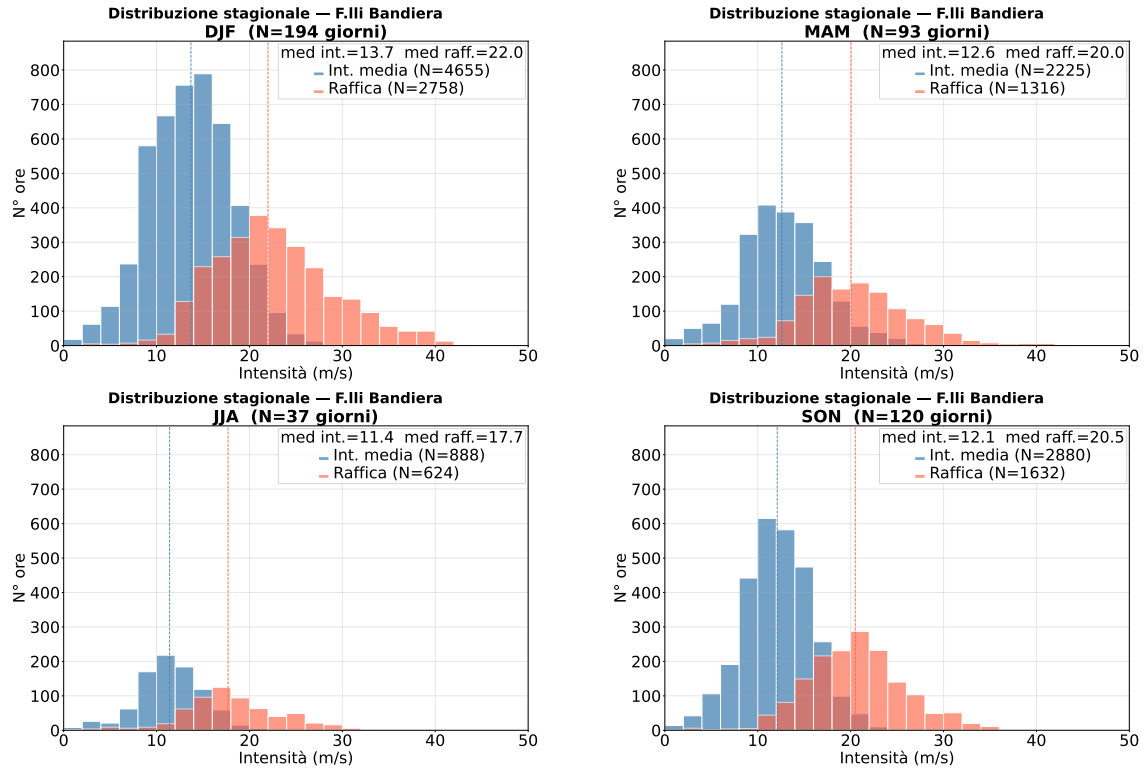


Figura 2.8: Distribuzioni stagionali delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni.

agli eventi invernali, non riuscendo a superare una durata media di 1.3 giorni. In settembre e in ottobre si arriva al singolo evento all'anno, con una durata media tra 1.3 e 1.5 giorni, mentre a maggio, giugno e luglio, a differenza di aprile e agosto, non si supera il singolo evento al biennio.

In Figura 2.6 e Figura 2.7 si può vedere come la distribuzione mensile, l'intensità media giornaliera e la durata media degli eventi persistenti (di cui meno di 1/3 dura più giorni consecutivi) dipende dalle condizioni sinottiche in cui si sviluppa la giornata di Bora. Più di 1/4 dei giorni di Bora è caratterizzato da WT1 (depressione sul Mediterraneo centrale con afmoto di aria continentale), il *Weather Type* in cui poco più di 1 giorno su 5 è classificato come giorno di Bora, praticamente tutti distribuiti nei mesi invernali e in marzo, ma costituendo anche la grande maggioranza delle meno numerose giornate di Bora primaverili. In questa categoria rientrano la maggior parte degli eventi che si sono sviluppati su 4 o più giorni e oltre 3/4 dei giorni con un'intensità media giornaliera > 17 m/s (> 60 km/h), ossia di Bora intensa secondo la Figura 2.2 e in condizioni di burrasca secondo la scala Beaufort (v. Sezione A.2), in cui risulta praticamente impossibile camminare controvento ed è probabile la caduta di rami e tegole; comprende anche, ad eccezione di un giorno WT10 (simile al WT8 ma più estivo-autunnale), tutti i giorni che raggiungono la soglia di burrasca forte, corrispondente a un'intensità media > 21 m/s ($\simeq 75$ km/h), in cui possono verificarsi leggeri danni strutturali agli edifici. La seconda categoria per frequenza relativa di giorni di Bora è il WT8 (ciclone profondo sull'Italia con afmoto di aria marittima), sempre invernale, in cui poco meno di 1 giorno su 10

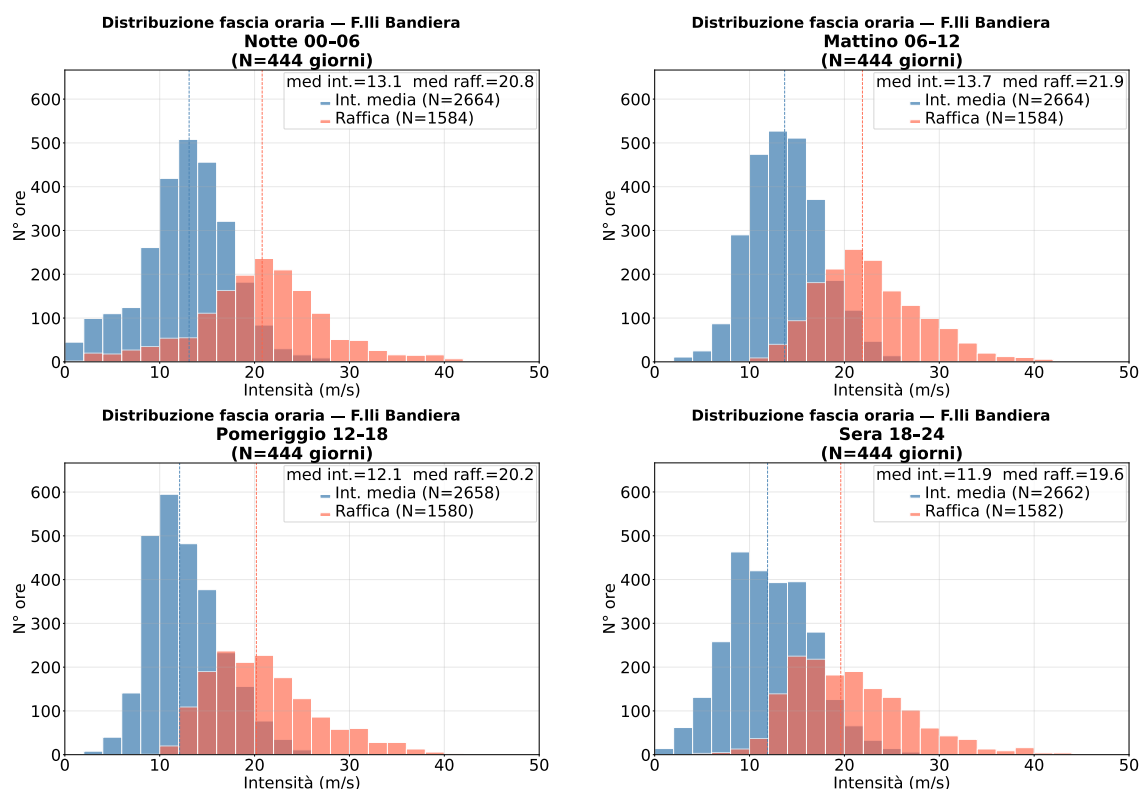


Figura 2.9: Distribuzioni per fascia oraria delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni.

è classificato come giorno di Bora, mentre per frequenza assoluta viene superato dal WT10 che costituisce circa i $2/5$ delle giornate autunnali e i $2/3$ delle giornate estive comprendendo maggio: queste due categorie completano assieme al WT1 le giornate di burrasca moderata, mentre il WT10 completa, a parte qualche giorno WT8 e WT7, gli eventi di 4 o più giorni (in totale 17 eventi in 25 anni, circa 2 eventi ogni 3 anni, al netto della possibile sottostima di un giorno data dai criteri di selezione). In ordine di occorrenza, degni di menzione sono anche WT7 (espansione dell'anticiclone russo-siberiano sull'Europa orientale), WT3 (depressione atlantica sul Mediterraneo occidentale), WT5 (espansione dell'anticiclone delle Azzorre sull'Europa occidentale) e WT9 (espansione dell'anticiclone africano sui Balcani) che contano almeno 3 giorni di vento forte, ossia con intensità media giornaliera > 14 m/s; WT3 e WT9 sono tipicamente invernali, WT5 estivo e WT7 autunnale (v. Sezione A.1).

In Tabella 2.3 viene sintetizzata la distribuzione dei giorni e degli eventi di Bora persistenti per stagione e *Weather Type* nei 5 quinquenni del periodo 2001-2025, da notare: l'occorrenza di $1/3$ dei giorni di Bora WT1 in più nel lustro 2011-2015 rispetto agli altri periodi, che non si traduce in un aumento degli eventi (indice della presenza di eventi particolarmente lunghi), e la presenza relativa di parecchi giorni ed eventi WT3 nel lustro 2001-2005, che ha contribuito ai ben 68 eventi totali. Si registra anche un netto calo dei giorni ed eventi WT5 e WT7 nel lustro 2016-2020, meno della metà rispetto agli altri periodi portando a soli 49 eventi totali, che però

potrebbe essere interamente dovuto alla mancanza di dati al molo F.lli Bandiera negli ultimi mesi del 2019 e del 2020 (stagioni preferite da eventi WT5 e WT7, nonché WT10, tutti probabilmente sottostimati). Rispetto al quinquennio 2001-2005, si evince un generale calo degli eventi totali di Bora dovuto a una diminuzione degli eventi invernali e primaverili, solo parzialmente compensato da un aumento degli eventi estivi, mentre nell'ultimo lustro si registra un calo anche degli eventi autunnali.

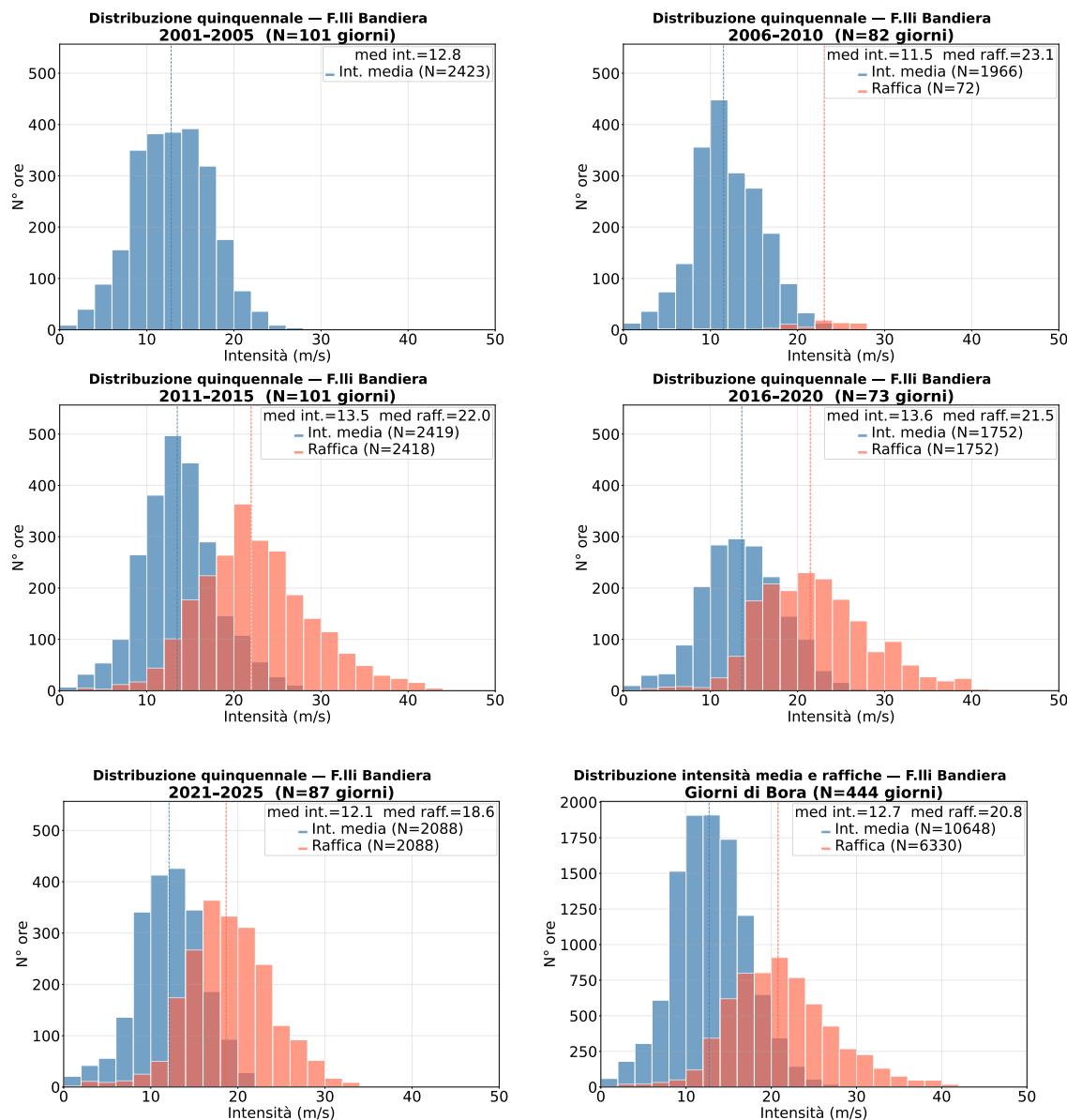


Figura 2.10: Distribuzioni quinquennali delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni. Il pannello in basso a destra mostra le distribuzioni per tutto il venticinquennio. Non sono disponibili dati di direzione delle raffiche prima di novembre 2010.

Passando alle statistiche relative alle ore nei giorni di Bora al molo F.lli Bandiera, le distribuzioni del vento stagionali per intensità media oraria (in blu) e per raffica oraria (in rosso) in Figura 2.8 confermano che in inverno ci sono più eventi e più

eventi estremi, specie nelle raffiche, mentre in estate intensità media e raffica non raggiungono rispettivamente i 20 m/s (> 70 km/h), burrasca forte, e i 32 m/s (> 115 km/h), uragano; in primavera, per le condizioni sinottiche di Bora potenzialmente più estreme (WT1), le code delle alte velocità sono più lunghe rispetto all'autunno. Le distribuzioni per periodo della giornata in Figura 2.9 rivelano che intensità medie e raffiche tendono a essere più forti di mattina. Le code lunghe alle basse velocità di sera e di notte sono probabilmente dovute alla brezza di monte nelle ore notturne in cui non soffia la Bora.

Il pannello in basso a destra della Figura 2.10 mostra le distribuzioni del vento per intensità media oraria (in blu) e per raffica oraria (in rosso) considerando tutto il primo quarto di secolo: entrambe sono asimmetriche, specialmente quella delle raffiche, ma mentre per l'intensità media la coda (leggermente) più lunga è quella delle basse velocità, con quella delle alte velocità che comunque arriva a superare la soglia di burrasca fortissima, ossia di 25 m/s (> 90 km/h), per le raffiche c'è una lunga coda dovuta agli eventi più estremi che arriva a superare addirittura i 40 m/s (> 140 km/h), abbondantemente sopra la soglia di uragano. Negli altri pannelli di Figura 2.10 sono raffigurate le stesse distribuzioni ma per periodi di 5 anni: nell'ultimo lustro (pannello in basso a sinistra) si nota una diminuzione della mediana sia dell'intensità media che della raffica rispetto al decennio precedente, con code delle alte velocità che rispettivamente superano appena i 20 m/s (> 70 km/h), burrasca forte, e i 32 m/s (> 115 km/h), uragano, registrando intensità medie più comparabili al primo decennio del secolo.

In Figura 2.11 vengono mostrate le distribuzioni delle ore per intensità media oraria (in blu) e raffica (in rosso) nei “giorni di Bora” (colori più accesi) e nei “giorni non di Bora” (colori più spenti) dalla Bora. Il confronto viene effettuato alle stazioni meteorologiche molo F.lli Bandiera e Cattinara (v. Tabella 2.1), si rimanda alla Figura A.3 della Sezione A.3 per le altre stazioni. Nei giorni non di Bora le distribuzioni mostrano un'asimmetria più pronunciata, con code delle basse velocità molto corte che causano un abbassamento della mediana, e code delle alte velocità molto lunghe, con le ore più estreme che comunque superano il baffo superiore delle distribuzioni dei giorni di Bora (a Cattinara, addirittura, alcune di queste ore superano in intensità media le ore più intense dei giorni di Bora): ciò conferma che eventi non persistenti possono comunque risultare molto intensi. Inoltre, a Cattinara si registrano velocità decisamente più basse nei giorni di Bora rispetto al molo F.lli Bandiera, soprattutto per gli effetti di discesa dall'altopiano carsico e canalizzazione urbana che subisce l'aria giungendo al molo, ma in parte anche perchè la stazione di Cattinara è situata in terreno non piano e influenzato da ostacoli vicini (vegetazione). Nei giorni non di Bora, invece, non si registrano variazioni significative in mediana e primo e terzo interquantile tra le due stazioni (a Cattinara, anzi, la mediana e il primo interquantile sono più alti per le raffiche) con tuttavia code alle alte velocità più lunghe per la stazione sul molo dovute proprio alla Bora: questa differenza di comportamento tra giorni di Bora e non di Bora nel confronto tra le due stazioni (ma condiviso anche dalle altre stazioni prese in considerazione, v. Figura A.3 della Sezione A.3), ossia la maggiore sensibilità delle distribuzioni nei giorni di Bora al variare della posizione della stazione, è un segnale positivo sui criteri di selezione scelti, dato che lo sviluppo della Bora è particolarmente legato all'orografia.

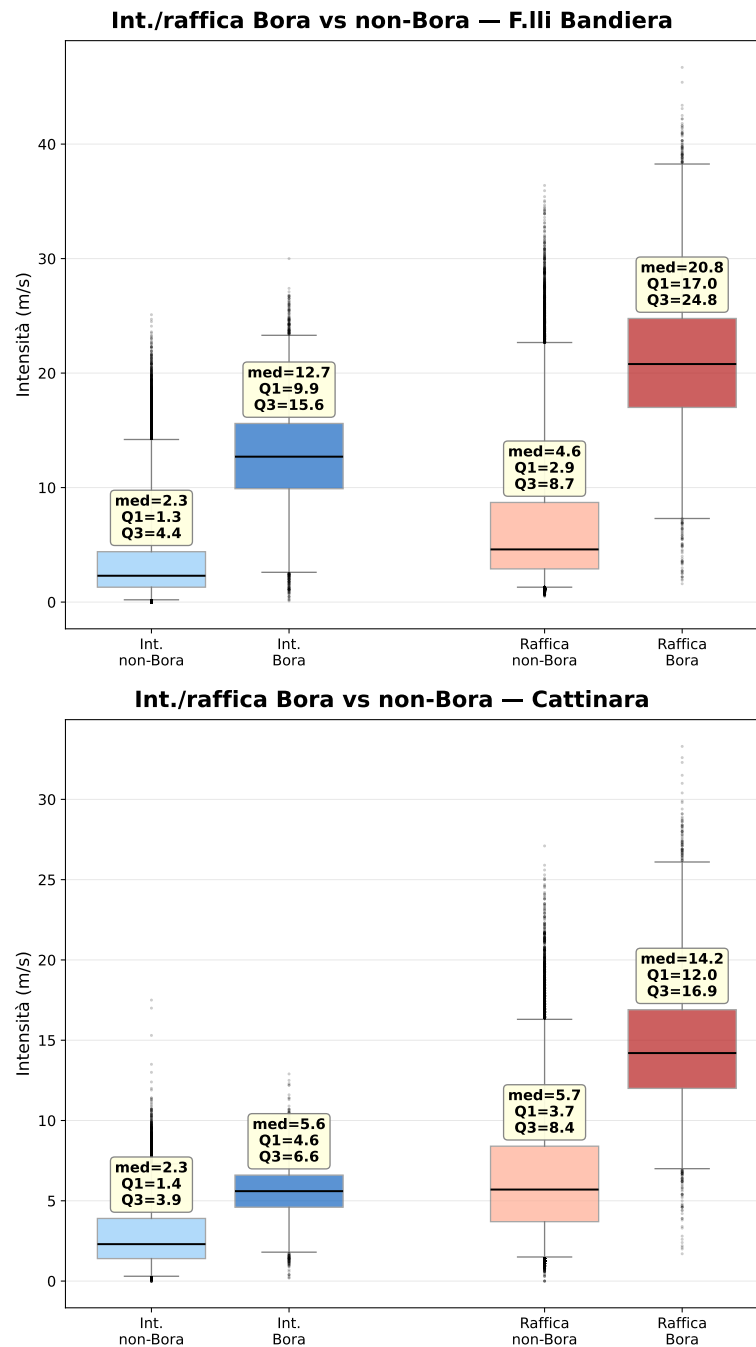


Figura 2.11: Distribuzione delle ore nei giorni non di Bora (colori più spenti) e nei giorni di Bora (colori più accesi) in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera (in alto) e Cattinara (in basso). I baffi rappresentano il 1° e il 99° interquantile.

In Figura 2.12, in cui è mostrata la distribuzione angolare e in intensità delle raffiche massime giornaliere nei giorni di Bora per le stazioni molo F.lli Bandiera e Cattinara, a Cattinara si nota una tendenza alla rotazione verso est del vento di Bora e una maggior dispersione angolare oltre che a una riduzione dell'intensità, caratteristiche apprezzabili anche in Figura A.10 alla fine della Sezione A.3, dove è rappresentata una mappa del territorio carsico con le rose dei venti delle raffiche orarie nei giorni di Bora per tutte le stazioni prese in considerazione.

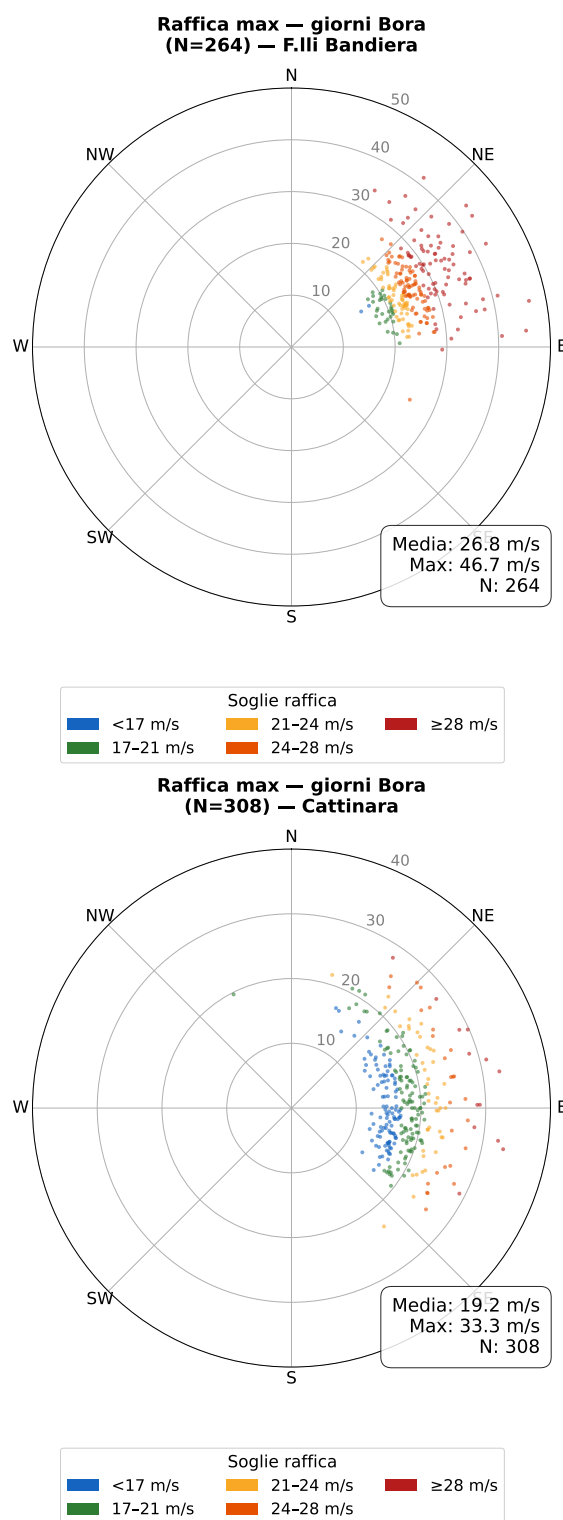


Figura 2.12: Distribuzione angolare e in intensità delle raffiche massime giornaliere nei giorni di Bora al molo F.lli Bandiera (in alto) e a Cattinara (in basso). In blu valori relativi a vento forte, in verde, giallo e arancione rispettivamente a burrasca moderata, forte e fortissima, in rosso a fortunale, secondo la scala Beaufort (v. Sezione A.2). Sono presenti meno dati per il molo a causa della mancanza di dati di direzione delle raffiche prima di novembre 2010.

2.4 Panoramica sulla sinottica della Bora

WT	Data	Durata (giorni)	Intensità (m/s)	Raffica (m/s)
1-1-1 ciclonica continentale	10-12/02/12	3	media: 20.6 max: 26.5	media: 32.5 max: 46.7
9 ciclonica continentale	08-08/03/04	1	media: 17.2 max: 20.2	media: 21.0 max: 27.0
3-3 ciclonica continentale	19-20/02/04	2	media: 16.4 max: 21.6	media: 20.7 max: 27.8
10-10-8 ciclonica marittima	05-07/03/08	3	media: 17.3 max: 23.5	media: 28.1 max: 39.5
8-8 ciclonica marittima	26-27/11/15	2	media: 14.4 max: 22.6	media: 24.4 max: 36.8
5-7 anticiclonica	22-23/07/12	2	media: 16.6 max: 22.1	media: 27.3 max: 34.7
5-5-7-7-10 anticiclonica	28-02/10/15	5	media: 13.1 max: 18.6	media: 21.1 max: 29.4

Tabella 2.4: Lista degli eventi di Bora persistenti più rappresentativi del venticinquennio 2001-2025. I dati di intensità e raffica sono relativi al molo F.lli Bandiera.

Dall'analisi è emerso che la configurazione sinottica WT1 (depressione sul Mediterraneo Centrale con afmoto di aria continentale) è particolarmente favorevole allo sviluppo di giornate di Bora, compresi gli eventi più lunghi e intensi (v. Figure 2.6 e 2.7). Assieme al WT8 (ciclogenesi profonda mediterranea con afmoto di aria marittima), al WT9 (espansione dell'anticiclone africano sui Balcani) e al WT3 (depressione atlantica sul Mediterraneo occidentale), in ordine di intensità media, costituisce la maggior parte degli eventi persistenti invernali e di inizio primavera, e assieme al WT10 (simile al WT8 ma più estivo-autunnale) degli eventi persistenti primaverili, mentre la maggior parte delle giornate estive e di inizio autunno si dividono rispettivamente tra WT10 e WT5 (espansione dell'anticiclone delle Azzorre sull'Europa occidentale) e di quelle autunnali tra WT10 e WT7 (espansione dell'anticiclone russo-siberiano sull'Europa orientale). Nella Tabella 2.4 vengono considerati i 7 eventi persistenti più intensi che hanno coinvolto queste configurazioni, di cui si fornisce delle rappresentazioni sinottiche nelle Figure 2.13 (visione d'insieme del solo evento WT1), 2.14 (campi a metà troposfera e al suolo nel corso del pieno sviluppo degli eventi), 2.15 (campi negli strati intermedi 48 h prima dell'inizio degli eventi, in modo da ricostruire l'origine delle masse d'aria).

Innanzitutto, si può notare come in tutti i casi presi in considerazione, indipendentemente dalla classificazione per *Weather Type*, sia presente una lingua altopressoria atlantica che si inserisce a nord dell'Europa settentrionale, spingendosi talvolta fino alla penisola scandinava: tale configurazione, conosciuta come ponte di Voejkov, costituisce un ostacolo per l'aria atlantica, favorendo il moto retrogrado di aria artica o polare continentale, o di aria artica marittima, fino alla penisola italiana e

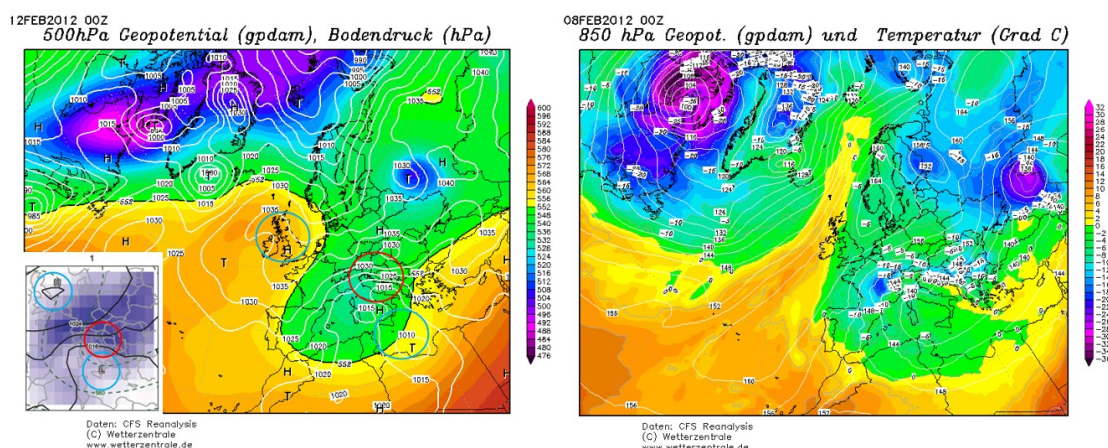


Figura 2.13: Da sinistra a destra: mappe di geopotenziale a 500hPa durante lo svolgimento dell'evento e temperatura a 850 hPa a 48 h dall'inizio dell'evento (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) dell'evento del febbraio 2012 (WT1). Il cerchio rosso indica il nord Adriatico mentre i cerchi blu individuano le posizioni delle strutture sinottiche secondo la rappresentazione standard del *Weather Type*.

allo Ionio. A parità di configurazione sinottica l'orientazione del ponte di Voejkov, con sviluppo maggiormente da sud-ovest a nord-est negli eventi della prima colonna di Figura 2.14 (compreso l'evento WT1 in Figura 2.13) e più zonale negli eventi nella seconda colonna, che nell'ultima riga (eventi anticiclonici) diventa rispettivamente con sviluppo più zonale nella prima colonna e da nord-ovest a sud-est nella seconda, favorisce più o meno il moto retrogrado, determinando gradienti di pressione più o meno pronunciati nel nord-est italiano e di conseguenza intensità medie e raffiche più o meno elevate.

La Figura 2.13 e i primi due pannelli delle Figure 2.14 e 2.15 rappresentano le strutture di geopotenziale a 500 hPa (indicativamente metà troposfera), con pressione al suolo, e di temperatura a 850 hPa (strati intermedi), con geopotenziale a 850 hPa, che hanno caratterizzato gli eventi tardo-invernali di febbraio 2012, marzo 2004 e febbraio 2004. In particolare, febbraio 2012 (v. Figura 2.13) costituisce attualmente l'evento più intenso del secolo, sia come intensità che come raffica (raffica media oraria di 32.5 m/s con un massimo di 46.7 m/s al molo F.lli Bandiera). Questi esempi rappresentano tre varianti di "Bora ciclonica continentale", caratterizzata da un vortice polare profondamente decompattato dal ponte di Voejkov che consente un moto retrogrado dell'aria continentale (v. secondo pannello di Figura 2.13 e primi due pannelli di Figura 2.15): febbraio 2012 è caratterizzato da un'incursione stabile d'aria fredda continentale che interessa tutta l'Europa centrale e orientale, con una ciclogenesi sul Tirreno che poi si sposta sull'Italia settentrionale, acuendo il gradiente di pressione sul nord-est italiano; marzo 2004 si innesca allo stesso modo, ma una ciclogenesi più debole e l'espansione dell'anticiclone africano verso l'Europa orientale (determinando la classificazione WT9) rendono l'evento più limitato al nord Adriatico; anche febbraio 2004 si innesca in modo molto simile, ma un vortice polare molto più presente sulla Siberia e un *cut-off low* atlantico che si fonde con la goccia fredda continentale (determinando la classificazione WT3) spostano la ciclogenesi sul Mediterraneo occidentale (da qui l'ipotesi che la Bora ciclonica

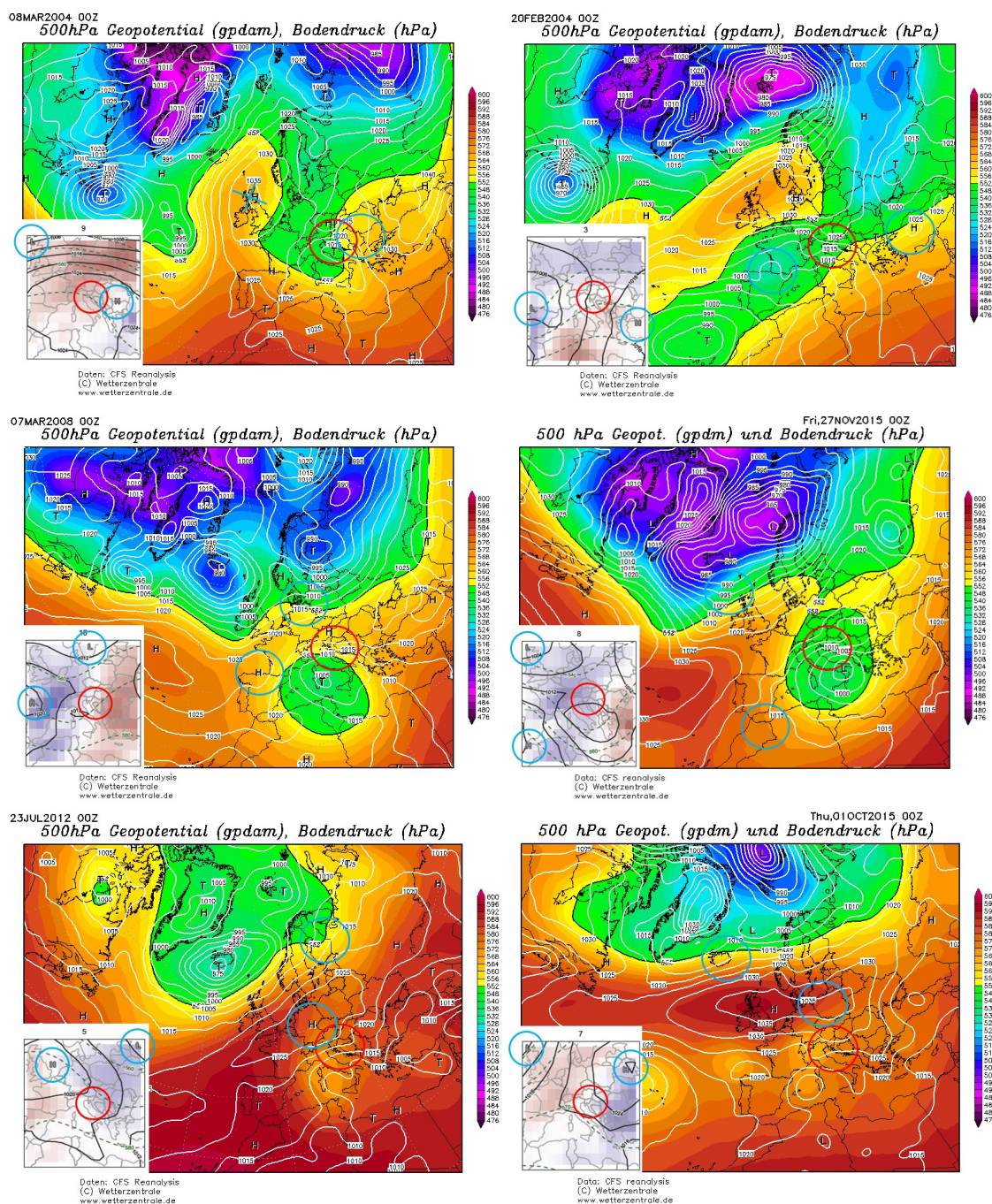


Figura 2.14: Mappe di geopotenziale a 500hPa (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) rappresentative degli eventi elencati in Tabella 2.4 con sovrapposte rappresentazioni grafiche dei WT dominanti dell'evento (v. Sezione A.1). Nella stessa riga eventi con configurazioni sinottiche simili, in ordine: incursione di aria continentale (il pannello isolato di marzo 2004 è assimilabile alla riga successiva), di aria artica marittima, anticiclone scandinavo. Nella stessa colonna eventi con diversa orientazione generale del ponte di Voejkov, in ordine: più meridionale o più zonale (che per l'anticiclone scandinavo nell'ultima riga si traducono rispettivamente in più zonale o con sviluppo nord-ovest/sud-est). La croce azzurra nel pannello relativo a marzo 2004 indica un caso isolato in cui ci sono condizioni opposte in quella zona rispetto alla rappresentazione grafica canonica del WT9.

della classificazione di Camuffo corrisponda a WT3, v. Sezione 2.2), indebolendo il gradiente di pressione che potenzialmente si sarebbe potuto sviluppare sul nord-est italiano (anche in questo caso l'evento è limitato al nord Adriatico).

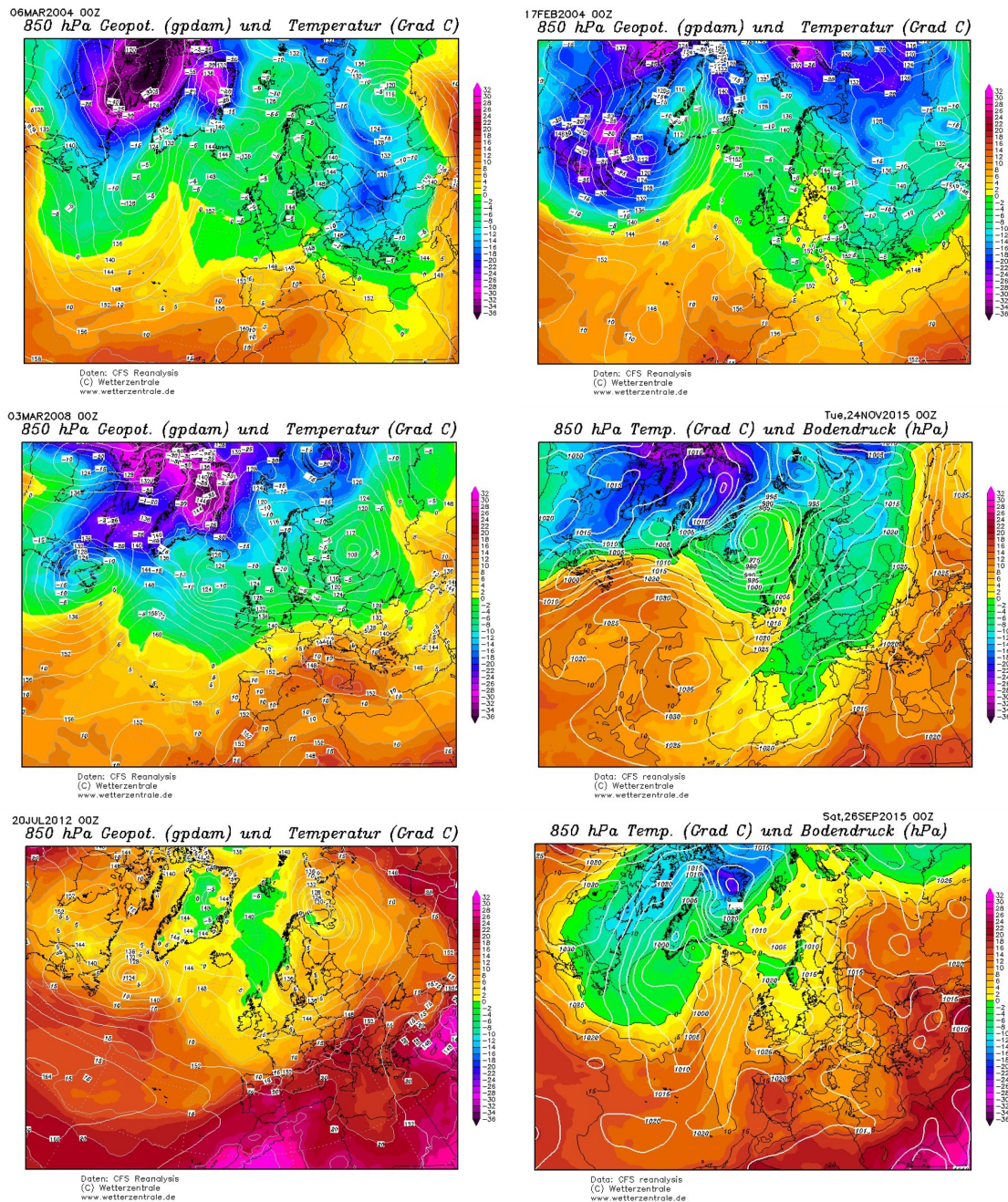


Figura 2.15: Mappe di temperatura a 850hPa (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) a 48 h dall'inizio degli eventi elencati in Tabella 2.4 con sovrapposte rappresentazioni grafiche dei WT dominanti dell'evento (v. Sezione A.1). Nella stessa riga eventi con configurazioni sinottiche simili, in ordine: incursione di aria continentale (il pannello isolato di marzo 2004 è assimilabile alla riga successiva), *cut-off low* di aria artica marittima, anticiclone scandinavo. A differenza della prima e della terza riga, nella seconda è presente una corrente a getto zonale coerente sul nord Atlantico che favorisce l'incursione di aria artica marittima.

Gli eventi di marzo 2008 e novembre 2015, caratterizzati da evoluzioni sinottiche più tipiche di inizio e fine inverno e delle stagioni di transizione (primavera e tardo autunno), sono fortemente rappresentativi della “Bora ciclonica marittima”: i pannelli della seconda riga di Figura 2.15 mostrano 48 h prima dell'innesco degli eventi la presenza di una corrente a getto zonale coerente sul nord Atlantico anche negli strati intermedi, che, unita al successivo moto retrogrado sull'Europa centrale,

tende a portare aria artica marittima sull'Italia e una maggiore umidità in quota (anche se il moto retrogrado potrebbe determinare un contributo misto con aria continentale); i pannelli della seconda riga di Figura 2.14 mostrano la formazione di *cut-off low* e una profonda ciclogenesi sul Tirreno. La differenza nella classificazione dei due eventi (rispettivamente con più giorni WT10 e WT8), oltre all'orientazione del ponte di Voejkov, risiede nella non presenza o sì dell'anticiclone africano nella zona dello stretto di Gibilterra. I giorni WT2 (ciclone profondo sul Mediterraneo orientale) e WT6 (moto zonale sull'Europa centrale) ne costituiscono delle eccezioni invernali, mentre il giorno WT4 (simile a WT6 ma più tardo-primaverile ed estivo) è un caso isolato tardo-primaverile (v. Figure 2.6 e Figure 2.7).

Gli eventi di luglio 2012 e ottobre 2012, caratterizzati da evoluzioni sinottiche più tipiche di fine primavera, estate e autunno, sono fortemente rappresentativi della “Bora anticiclonica”: il ponte di Voejkov si estende sull'Europa settentrionale causando la congiunzione tra l'anticiclone delle Azzorre e l'anticiclone russo-siberiano nel cosiddetto anticiclone scandinavo (v. terza riga Figura 2.14), con *cut-off low* che scorrono velocemente con moto retrogrado sull'Europa centrale e meridionale portando aria continentale (v. terza riga Figura 2.15). La differenza nella classificazione dei due eventi (rispettivamente con più giorni WT5 e WT7), oltre all'orientazione del ponte di Voejkov, risiede nella presenza o meno dell'anticiclone delle Azzorre sulla costa atlantica portoghese e nord-africana. I giorni WT11 (simile a WT9 ma più estivo) ne costituiscono un'eccezione estiva con afmoto di aria marittima e anticiclone scandinavo zonale che si spinge particolarmente a sud.

2.5 Riepilogo dei risultati

In questo capitolo è stata introdotta una classificazione degli eventi di Bora persistenti a Trieste originati da strutture sinottiche quasi-stazionarie, analizzando 7 casi studio particolarmente rappresentativi (v. Sezione 2.4). Sono stati individuati i seguenti *Bora Type* coerenti con le definizioni classiche introdotte in letteratura: “Bora ciclonica continentale”, “Bora ciclonica marittima” e “Bora anticiclonica”. La provenienza delle masse d'aria che giungono sull'Italia, l'orientazione più o meno zonale del ponte di Voejkov, sempre presente in questi eventi, e la posizione delle strutture sinottiche coinvolte distribuiscono ulteriormente queste categorie nei più generali *Weather Type*, configurazioni sinottiche definite dall'agenzia regionale ARPA FVG attraverso metodi usati in letteratura ma con un approccio più operativo (v. Sezione A.1), che tendono più o meno a generare eventi di Bora sul nord Adriatico. I dati della stazione meteorologica molo F.lli Bandiera (v. Sezione 2.1) hanno consentito l'individuazione e la caratterizzazione statistica di questi eventi (v. Sezioni 2.2, 2.3 e A.3) attraverso le definizioni di “ora di Bora”, con intensità media oraria $> 8 \text{ m/s}$ e direzione $65^\circ \pm 45^\circ$ (soglie individuate secondo criteri statistici), e di “giornata di Bora”, con la presenza di almeno 18 ore di Bora (soglia individuata per escludere eventi di Borino, di origine termica e quindi limitati in durata dal ciclo diurno), in modo da considerare solo “eventi di Bora persistenti”, che, essendo composti da giornate di Bora, sono sicuramente di origine sinottica. La disponibilità di dati da radiosondaggio consentirebbe di implementare un filtro della brezza più mirato, come discusso nella Sezione 2.2, dando modo di estendere l'analisi anche

a eventi di Bora più brevi; tuttavia, la validità dei criteri di selezione adottati per l'individuazione degli eventi di Bora persistenti, che sfruttano esclusivamente l'informazione di dati puntuali, facilitando l'applicabilità operativa, viene confermato dal buon accordo della distribuzione delle ore dei giorni di Bora in intensità media con una densità di Weibull (v. Figura 2.4 della Sezione 2.2). Dall'analisi è emerso che a Trieste gli eventi non persistenti, che comunque possono dimostrarsi molto intensi, sembrano essere caratterizzati da una distribuzione di ore bimodale nel corso della giornata (che rispecchia una distribuzione bimodale in intensità (Makjanić, 1970)), mentre per gli eventi di Bora persistenti tale distribuzione presenta un solo picco in tarda mattinata, confermato dalle distribuzioni in intensità nel corso della giornata (v. Figure A.8 e A.9). La differenza tra le due distribuzioni è dovuta al filtro di durata che, escludendo gli eventi di Bora non persistenti nell'individuazione degli eventi di Bora persistenti, elimina il picco notturno.

Gran parte degli eventi di Bora persistenti sono invernali; seguono in numero gli eventi autunnali, primaverili (quest'ultimi generalmente più intensi rispetto all'autunno) ed estivi (v. Tabella 2.5). Gli eventi più duraturi e intensi sono ascrivibili alla Bora ciclonica continentale con WT1 (depressione sul Mediterraneo centrale con afmoto di aria continentale). Nel corso della finestra temporale analizzata, corrispondente al venticinquennio 2001-2025, si è registrato un generale calo di eventi di Bora persistenti (più del 13% per i giorni e del 20% degli eventi dal primo all'ultimo lustro), dovuto a una riduzione di eventi di Bora ciclonica non sufficientemente compensata da un aumento di Bora anticiclonica (l'aumento della Bora anticiclonica estiva è bilanciato da una diminuzione della Bora anticiclonica autunnale, v. Tabella 2.3): nel corso del secolo tale andamento potrebbe continuare, affiancato da un aumento degli eventi di Bora anticiclonica (Vozila et al., 2021). Il quinquennio 2011-2015 è stato caratterizzato da mediane particolarmente alte e code alle alte velocità particolarmente lunghe (v. Figura 2.10) a causa di una concentrazione di eventi intensi e persistenti di Bora ciclonica continentale (v. Tabella 2.5). Il quinquennio 2021-2025 (v. Figura 2.10) è stato caratterizzato da meno eventi estremi rispetto al recente passato, con mediane più in linea col decennio 2001-2010.

Si riporta in seguito la classificazione per *Bora Type* a cui si è pervenuti in questo lavoro, rimandando alle Sezione 2.3 e ai grafici della Sezione A.3 per una caratterizzazione più approfondita nei diversi *Weather Type*.

- **Bora ciclonica continentale.** Vortice polare scisso con moto retrogrado di aria polare o artica continentale e ciclogenesi sul Tirreno. Orientazione sud-ovest/nord-est del ponte di Voejkov ($WT1+WT9 \simeq 85\%$), che favorisce particolarmente il moto retrogrado, o più zonale ($WT3 \simeq 15\%$). Comprende circa 2/5 delle giornate di Bora, oltre 3/4 delle giornate di Bora in condizioni almeno di burrasca e quasi tutti gli eventi sviluppati su 4 o più giorni. Tende a svilupparsi tra inverno e inizio primavera, in particolare da dicembre a marzo, con alcuni giorni anche in aprile e a fine autunno.
- **Bora ciclonica marittima.** Vortice polare complessivamente più compatto con *cut-off low* di aria artica marittima e profonda ciclogenesi sul Tirreno.

Orientazione sud-ovest/nord-est del ponte di Voejkov (WT10 + WT6 + WT4 $\simeq$ 65 %), che favorisce il moto retrogrado, o più zonale (WT8 + WT2 $\simeq$ 35 %). Comprende circa 2/5 delle giornate di Bora, il restante 1/4 delle giornate di Bora in condizioni di burrasca e completa con la Bora ciclonica continentale (a parte una singolo evento) gli eventi sviluppati su 4 o più giorni. Presente tutto l'anno ma tende a concentrarsi in ottobre, novembre e in inverno, con sviluppo stagionale complementare tra WT10 + WT4 e WT8 + WT6 + WT2, i primi estivi e i secondi invernali, intersecandosi nelle stagioni di transizione, specie in primavera.

- **Bora anticiclonica.** Anticiclone scandinavo che permette lo scorrimento di *cut-off low* di aria polare o artica continentale sull'Europa centrale e meridionale. Orientazione più zonale dell'anticiclone scandinavo (WT5 + WT11 $\simeq$ 42 %), favorendo lo scorrimento dei *cut-off low*, o nord-ovest/sud-est (WT7 $\simeq$ 58 %). Comprende circa 1/5 delle giornate di Bora. Presente tutto l'anno ma tende a concentrarsi in settembre e ottobre con sviluppo stagionale complementare tra WT5+WT11 e WT7, i primi estivi e il secondo invernale, intersecandosi nelle stagioni di transizione, specie in autunno.

<i>Bora Type</i>	DJF	MAM	JJA	SON	Totale
Ciclonica continentale	giorni: 97 eventi: 49	giorni: 39 eventi: 27	giorni: 0 eventi: 0	giorni: 12* eventi: 9*	giorni:148* eventi: 85*
Ciclonica marittima	giorni: 45 eventi: 32	giorni: 28 eventi: 21	giorni: 15* eventi: 13*	giorni: 47* eventi: 29*	giorni:135* eventi: 95*
Anticiclonica	giorni: 14 eventi: 9	giorni: 6 eventi: 6	giorni: 12* eventi: 10*	giorni: 42* eventi: 30*	giorni: 74* eventi: 55*
Totale	giorni: 156 eventi: 90	giorni: 73 eventi: 54	giorni: 27* eventi: 23*	giorni: 101* eventi: 68*	giorni: 357* eventi: 235*
<i>Bora Type</i>	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	Totale
Ciclonica continentale	giorni: 40 eventi: 29	giorni: 30 eventi: 18	giorni: 45 eventi: 19	giorni: 33* eventi: 19*	giorni:148* eventi: 85*
Ciclonica marittima	giorni: 35 eventi: 22	giorni: 34 eventi: 26	giorni: 34 eventi: 23	giorni: 32* eventi: 24*	giorni:135* eventi: 95*
Anticiclonica	giorni: 26 eventi: 17	giorni: 18 eventi: 16	giorni: 22 eventi: 16	giorni: 8* eventi: 6*	giorni: 74* eventi: 55*
Totale	giorni: 101 eventi: 68	giorni: 82 eventi: 60	giorni: 101 eventi: 58	giorni: 73* eventi: 49*	giorni: 357* eventi: 235*

Tabella 2.5: Giorni ed eventi di Bora divisi per *Bora Type*, stagione e quinquennio. Nell'ultimo lustro (v. Figura 2.10 e Tabella 2.3) è confermata la generale riduzione dei giorni e degli eventi di Bora (87 giorni e 54 eventi) da inizio secolo, accompagnata da una riduzione in intensità. In asterisco i valori che si ritengono sottostimati per la mancanza di dati negli ultimi mesi del 2019 e del 2020.

Capitolo 3

Set-up modellistico e strumenti di validazione

In questo capitolo verranno innanzitutto approfonditi la configurazione della simulazione per il caso studio e il funzionamento della catena modellistica, in particolare la procedura di *downscaling* dalla mesoscala alla microscala e l'approccio modellistico di Micro-SWIFT (v. Sezione 3.1), la procedura di inizializzazione della simulazione (v. Sezione 3.2) e le equazioni del modello (v. Sezione 3.3). Concludono il capitolo una descrizione dei dati usati per la validazione della simulazione (v. Sezione 3.4) e una breve descrizione del caso studio (v. Sezione 3.5).

3.1 Configurazione della simulazione

Campi meteorologici di input

La catena di *downscaling* è stata implementata dall'agenzia regionale ARPA FVG con lo scopo di informare le simulazioni alla microscala attraverso dati orari provenienti da simulazioni WRF (*Weather Research and Forecasting*, versione 4.7.1), usato internamente all'agenzia per elaborare previsioni ad area limitata sulla Regione Friuli Venezia-Giulia (Gallai et al., 2025). I dati di input per la simulazione alla microscala appartengono all'ultima corsa disponibile, così da rappresentare lo stato dell'atmosfera nel modo più aggiornato possibile prima dell'incorrere dell'evento. La corsa di WRF è a sua volta inizializzata con i dati previsionali del modello globale GFS (*Global Forecast System*) di NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), con risoluzione orizzontale di 50 km e temporale di 6 h. La configurazione operativa di WRF prevede 31 livelli verticali, ma per la catena modellistica della qualità dell'aria i campi vengono interpolati su 16 livelli verticali, espressi dalle seguenti coordinate *terrain-following* z^* (in metri): 10; 30; 68; 134; 239; 393; 609; 901; 1280; 1770; 2390; 3150; 4070; 5170; 6470; 8000. Tali coordinate corrispondono alla quota z s.l.m. secondo l'Equazione 3.1: i livelli più bassi rappresentano approssimativamente la quota AGL (*Above Ground Level*) mentre i livelli più alti sono man mano indipendenti dal profilo del terreno.

A un dominio su scala continentale (dall'Islanda alla penisola arabica), ricoperto con una risoluzione orizzontale di 50 km, sono innestati un dominio su scala nazionale

(dalla Francia occidentale fino all'Albania e all'Algeria nord-occidentale) e uno su scala regionale centrato sul Friuli Venezia-Giulia (che comprende la maggior parte dell'Austria, della Slovenia e la Croazia settentrionale, fino alla Regione Emilia-Romagna), per arrivare a risoluzioni rispettivamente di 10 km e 2 km (v. Figura 3.1). La Figura 3.3 mostra la rappresentazione dell'orografia da parte di Micro-SWIFT (pannello in alto) e di WRF (pannello in basso), quest'ultima fortemente limitata dalla risoluzione orizzontale.

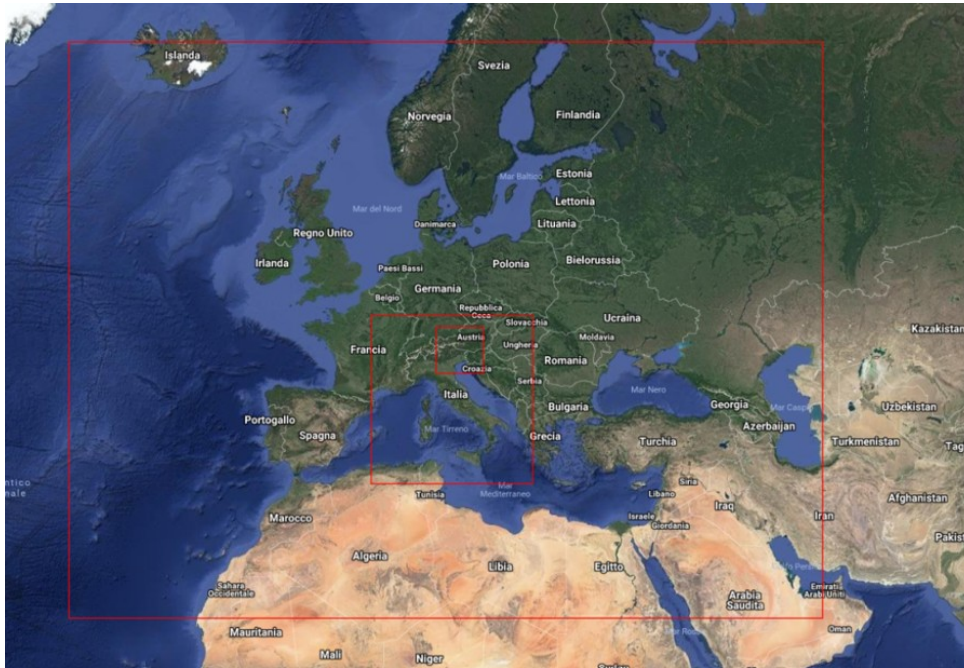


Figura 3.1: Rappresentazione dei domini di *downscaling* dinamico interno alla simulazione WRF, tratta da (CRMA ARPA FVG, 2018): il dominio continentale ha una risoluzione di 50 km, il dominio nazionale di 10 km, il dominio regionale di 2 km.

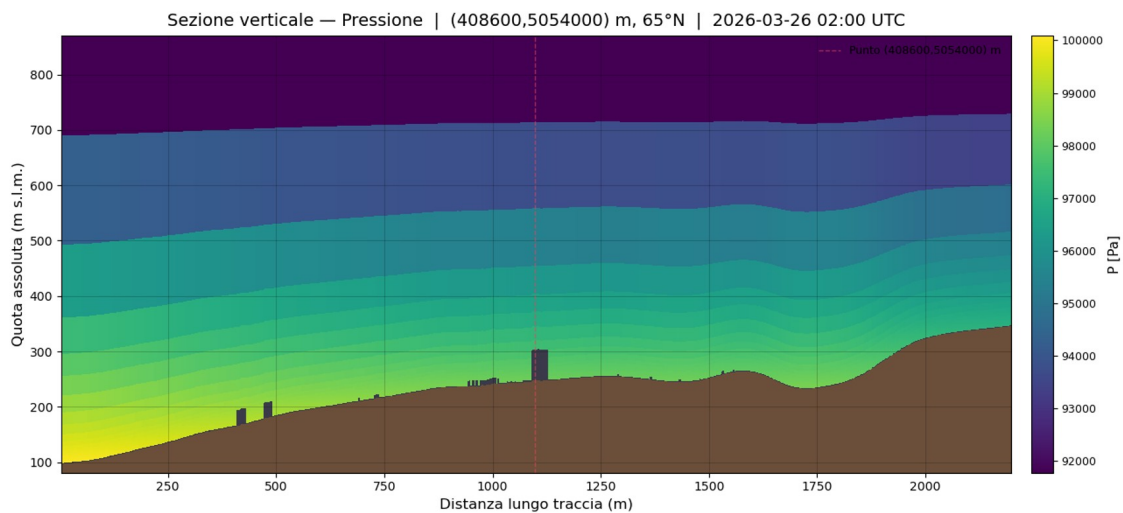


Figura 3.2: Sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di pressione interpolato sulla griglia della simulazione Micro-SWIFT, anch'essa formata da livelli verticali *terrain-following*. Gli ostacoli sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale: nel grafico la Bora soffia da destra a sinistra.

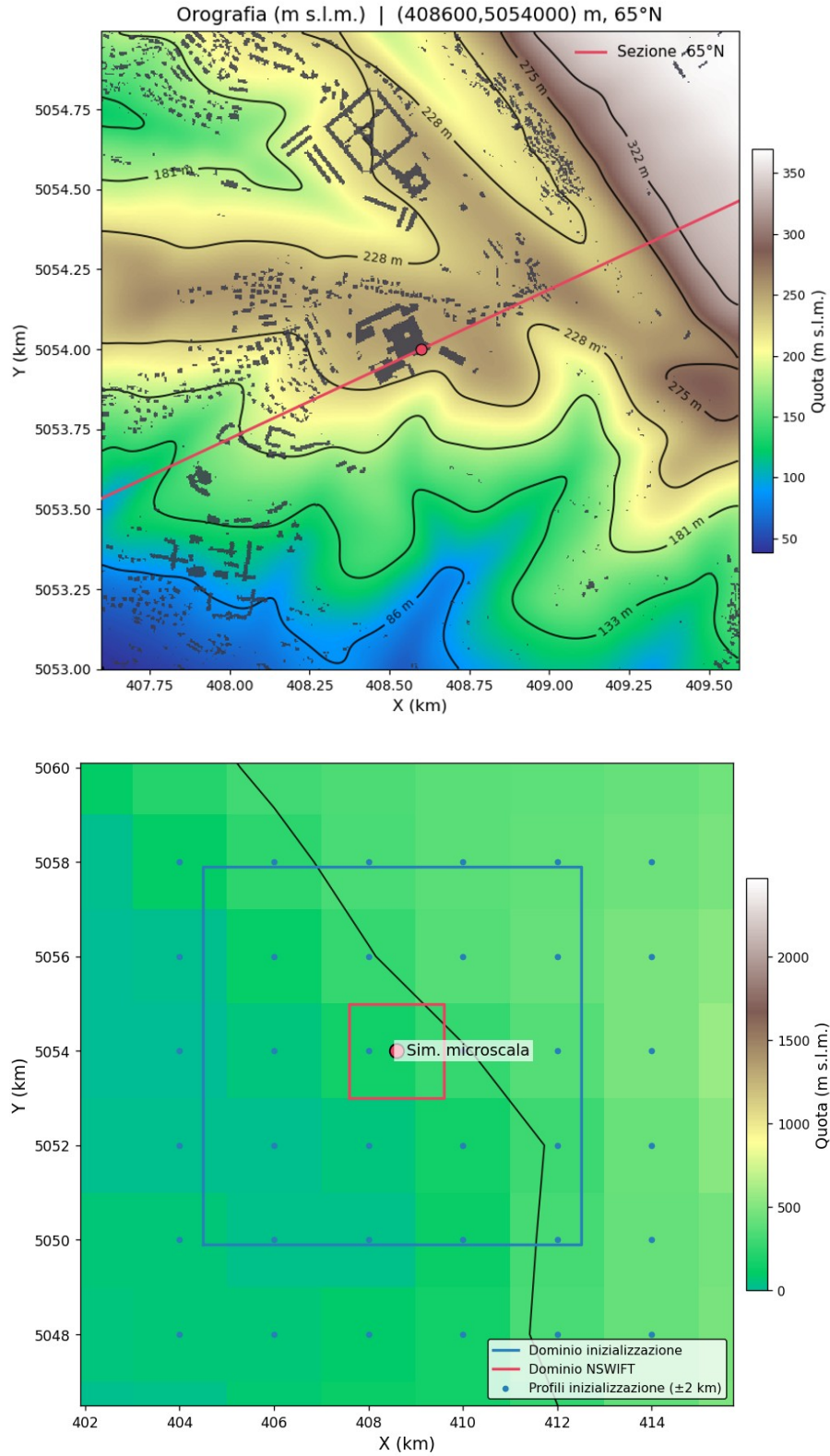


Figura 3.3: Confronto tra la rappresentazione dell'orografia all'interno di Micro-SWIFT (in alto, risoluzione 4 m) e la rappresentazione dell'orografia all'interno di WRF (in basso, risoluzione 2 km): il dislivello graduale di oltre 300 m nell'orografia di Micro-SWIFT viene sottostimato come un unico salto tra 266 m s.l.m. e 156 m s.l.m. all'interno di WRF. La linea rossa rappresenta la proiezione della sezione verticale passante per la Torre Chirurgica dell'ospedale di Cattinara (punto rosso) orientata in direzione di provenienza indicativa della Bora (65°N). Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2$ m) sono rappresentati in grigio scuro. La linea nera nell'orografia di WRF corrisponde all'isolina dei 266 m s.l.m. mentre i punti in blu rappresentano i profili utilizzati per l'interpolazione sulla griglia del dominio di Micro-SWIFT (riquadro rosso). Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

Dominio della simulazione

Il dominio della simulazione alla microscala ha estensione 1996 m x 1996 m (v. pannello in alto della Figura 3.3), che corrispondono a 499 x 499 punti-griglia di risoluzione orizzontale 4 m per ognuno dei 27 livelli verticali *terrain-following* distribuiti tra il livello del terreno e il limite superiore piatto del dominio, posto a $H = 800$ m s.l.m. Il vertice sud-ovest del dominio ha coordinate (407.600; 5053.000), espresse in chilometri nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84 (*Universal Transverse Mercator 33 World Geodetic System 84*). Tali scelte derivano dal compromesso tra una rappresentazione sufficientemente accurata degli ostacoli, la descrizione del moto all'interno di canali molto stretti e un'estensione del dominio tale da comprendere le caratteristiche orografiche significative per lo sviluppo locale del vento di Bora. La seguente distribuzione dei livelli verticali, identificati da z^* , è stata scelta tenendo conto delle altezze massime che raggiungono gli edifici compresi nel dominio (> 50 m), coprendo al contempo, sebbene con una risoluzione verticale via via più rada, gli strati anche più in quota: in metri 0; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 15; 18; 21; 25; 30; 40; 50; 70; 90; 120; 160; 200; 250; 350; 550; 800. L'altezza z in m s.l.m. del singolo punto-griglia, posto sul livello z^* , dipende dall'altezza del suolo z_g espressa in metri s.l.m. e dall'altezza del limite superiore del dominio ($H = 800$ m s.l.m.), dato che

$$z^* = H \frac{z - z_g}{H - z_g}. \quad (3.1)$$

Il livello del terreno viene costruito a partire dal DTM (*Digital Terrain Model*) con risoluzione 10 m della Protezione Civile Regionale del Friuli Venezia-Giulia attraverso un'operazione di *smoothing*. Gli ostacoli, consistenti in prismi costruiti a partire da documenti di edificato redatti della Regione, vengono inseriti successivamente all'interpolazione dei campi meteorologici, mascherando singoli punti della griglia computazionale, e vengono trattati come corpi totalmente impermeabili immersi in atmosfera. L'altezza di rugosità del terreno è fissata a $z_0 = 0.35$, valore minimo per terreni “*continuous bushland*” secondo la classificazione presentata in (Wieringa, 1992).

Approccio modellistico

Micro-SWIFT (*Micro Stationary Wind Field and Turbulence*, versione 2.0.1) è il processore meteorologico del sistema modellistico PMSS (*Parallel Micro-SWIFT SPRAY*), sviluppato dalla società ARIANET Technologies. È concepito per fornire campi tridimensionali stazionari di vento, temperatura, umidità e turbolenza alla microscala su domini locali (decine di chilometri) o regionali (centinaia di chilometri) con tempi di risposta molto rapidi, attraverso la sola costruzione di campi meteorologici diagnostici *mass-consistent* oppure tramite un *solver* prognostico RANS semplificato (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), inizializzato con tali campi diagnostici. Richiede dati di input provenienti da una rete meteorologica (composta almeno da un dato puntuale al suolo e un profilo verticale), a cui possono aggiungersi dati topografici, di edificato e di uso del suolo. I campi prodotti vengono utilizzati all'interno della catena per simulare la dispersione di inquinanti: lo scopo è abbattere i

costi computazionali per estendere l'orizzonte temporale della simulazione a periodi relativamente lunghi (giorni o settimane), tempi che difficilmente un tradizionale modello CFD (*Computational Fluid Dynamics*) permetterebbe di raggiungere senza incorrere in tempi di calcolo proibitivi. La documentazione di riferimento è ([ARIA Technologies, 2019](#)).

I campi diagnostici sono ottenuti attraverso i seguenti passi:

- “interpolazione” (*interpolation*) sull'intera griglia della simulazione dei dati di velocità, temperatura e umidità della rete meteorologica (a cui possono aggiungersi dati di turbolenza);
- “modificazione” (*modification*) del “campo di velocità interpolato” nelle zone di influenza degli edifici, identificate attraverso parametrizzazioni basate su dimensioni caratteristiche, angolo di attacco e intensità del vento;
- “correzione” (*adjustment*) del “campo di velocità modificato” attraverso condizioni al contorno e di conservazione della massa, tenendo conto in modo parametrico della stabilità atmosferica.

I campi calcolati in tal modo sono consistenti con la presenza degli ostacoli e del terreno e tengono conto del principio di conservazione della massa per fluidi incomprimibili (v. Sezione 3.2). Tuttavia, in nessuno dei passi precedenti viene posta alcuna condizione sulla conservazione della quantità di moto o dell'energia che, invece, il *solver* prognostico di Micro-SWIFT garantisce attraverso la risoluzione di equazioni RANS (v. Sezione 3.3). Attualmente, tale *solver* non prevede la risoluzione dell'equazione termodinamica, non dando modo di risolvere esplicitamente fenomeni convettivi e circolazioni termiche: le informazioni sui campi di input di temperatura e umidità si trasferiscono direttamente sulla griglia della simulazione solamente attraverso il processo di interpolazione. Tuttavia, il processo di “correzione” del campo di velocità viene influenzato in maniera parametrica dalla stabilità atmosferica (v. Sezione 3.2).

3.2 Inizializzazione della simulazione

Interpolazione dei dati meteorologici

Nel contesto della catena modellistica di ARPA FVG, la rete meteorologica che fornisce i dati di input a Micro-SWIFT è formata dai profili estratti dalla simulazione WRF evidenziati nel pannello in basso della Figura 3.3: si tratta di 36 profili verticali distribuiti su un quadrato totale di 12 km x 12 km. Tali profili vengono individuati sulla base del quadrato blu visibile nello stesso pannello di Figura 3.3, una regione di 8 km x 8 km centrata sul dominio 2 km x 2 km di Micro-SWIFT: vengono selezionati i profili all'interno del quadrato e presso la cornice immediatamente esterna. Ogni profilo è composto da 16 punti corrispondenti ai livelli verticali dei dati di input. Le variabili meteorologiche sottoposte a interpolazione sono le

componenti orizzontali del vento e il campo di temperatura, mentre la componente verticale, inizialmente posta nulla, viene costruita esclusivamente nelle procedure di modificazione e correzione del campo di velocità.

Dato che la distribuzione dei livelli verticali non è omogenea e che gli stessi livelli verticali sono *terrain following*, sia nei profili di input che nella griglia della simulazione, per le componenti orizzontali del vento $U_i(x, y, z^*)$ è stata scelta la “procedura di interpolazione di Cressman 2D livello per livello” (v. Equazioni 3.2). Tale metodo è composto da due fasi: una prima interpolazione lineare tra i $N_{LIV} = 17$ livelli verticali dei profili di input (compreso il livello del terreno) su tutti i livelli verticali z^* della simulazione precede una successiva interpolazione di Cressman 2D tra i $N_{MSUR} = 36$ punti orizzontali su tutti i punti-griglia dei singoli livelli z^* .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i(x_k, y_k, z^*) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{LIV}} U_i(x_k, y_k, z_j) P_{jm}(z^*)}{\sum_{j=1}^{N_{MSUR}} P_{jm}(z^*)} \quad \text{per } i = 1 \text{ e } 2. \\ \\ U_i(x, y, z^*) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{MSUR}} U_i(x_k, y_k, z^*) P_k(x, y)}{\sum_{k=1}^{N_{MSUR}} P_k(x, y)} \quad \text{per } i = 1 \text{ e } 2. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Si denota con $P_{jm}(z^*) = (z_{m+1} - z^*)\delta_{jm}$ e $P_{j,m+1}(z^*) = (z^* - z_m)\delta_{j,m+1}$ i pesi dell’interpolazione lineare verticale, dove m è il livello verticale dei dati di input appena inferiore a z^* ; si denota, invece, con $P_k(x, y) = 1/[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2]$ i pesi dell’interpolazione di Cressman 2D. Le distanze orizzontali sono adimensionalizzate in chilometri mentre le distanze verticali sono adimensionalizzate in metri, rappresentando rispettivamente l’ordine di grandezza della copertura spaziale orizzontale e verticale dei dati di input. Si noti che l’interpolazione lineare verticale utilizza i soli dati di input dei due livelli verticali m e $m + 1$ che comprendono z^* : inserendo l’espressione dei pesi all’interno della prima Equazione 3.2 si ottiene $U_i(x_k, y_k, z^*) = U_i(x_k, y_k, z_m)P_m(z^*) + U_i(x_k, y_k, z_{m+1})P_{m+1}(z^*)$. L’interpolazione di Cressman 2D, invece, che avviene sui singoli livelli z^* , utilizza tutti i punti (x_k, y_k) prodotti dall’interpolazione verticale su ogni livello z^* , premiando i punti più vicini al punto (x, y) di interesse attraverso una legge dell’inverso del quadrato.

Non essendo possibile interpolare con questa procedura la temperatura nelle impostazioni standard di Micro-SWIFT, è stata scelta per coerenza un’interpolazione di “Cressman 3D”:

$$T(x, y, z^*) = \frac{\sum_{j,k} T(x_k, y_k, z_j) P_{jk}(x, y, z^*)}{\sum_{j,k} P_{jk}(x, y, z^*)}. \quad (3.3)$$

denotando i pesi con $P_{jk}(x, y, z^*) = 1/[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2]$, dove le distanze orizzontali e verticali sono adimensionalizzate rispettivamente in chilometri e metri, come in precedenza. Entrambe le scelte riflettono la struttura stratificata dell'atmosfera, ma, mentre nel caso del vento orizzontale la geometria di interpolazione risulta sostanzialmente cilindrica, nel caso della temperatura tale geometria risulta ellissoidale.

In precedenza alla procedura di interpolazione, viene costruito il campo di velocità sul primo livello verticale della simulazione per tenere conto del *surface layer* del terreno (con lunghezza di rugosità $z_0 = 0.35$), evitando la possibile sovrastima delle velocità superficiali quando i dati di input, come in questo caso, provengono da un modello invece che da misure. La stima avviene attraverso un metodo basato sullo schema di chiusura della turbolenza di Louis ((Louis, 1979) e (Louis et al., 1982)): sia $F(z/z_0, z/L_{mo})$ la funzione universale di Louis per il *surface layer*, con L_{mo} la lunghezza di Monin-Obukhov, allora si approssima il profilo di intensità del vento orizzontale nel *surface layer* con il profilo analitico $U(z) = u_* F(z/z_0, z/L_{mo})$, dove u_* è la velocità d'attrito. In condizioni di stabilità atmosferica neutra (è il caso di queste simulazioni) si ha che $F(z/z_0) = \log(z/z_0)/\kappa$ con κ costante di Von Karman. Sia z_s l'altezza del primo livello verticale della simulazione al di sopra del terreno (ricavato da $z_s^* = 2$ m) e z_m l'altezza del primo livello verticale dei dati di input (ricavato $z_m^* = 10$ m): allora, eliminando u_* , il campo di intensità orizzontale sul primo livello verticale della simulazione viene stimato con $U(z_s) = U(z_m) \log^{-1}(z_m/z_0) \log(z_s/z_0)$, mantenendo la stessa direzione di $\vec{U}(z_m)$.

“Modificazione” del campo di velocità attorno agli edifici

Una volta interpolato i campi meteorologici sulla griglia della simulazione, Micro-SWIFT procede con la “modificazione” del campo di vento nelle zone di influenza degli edifici. Si sottolinea che il campo modificato, siano u_{0i} per $i = 1; 2; 3$ le sue componenti, non è ancora consistente con le condizioni al contorno e con la conservazione della massa, lasciando tale compito all'algoritmo di “correzione” del campo di velocità, descritto nella sottosezione successiva. Tutti i punti della griglia non occupati da edifici vengono classificati nelle seguenti categorie sulla base del campo di vento interpolato e della distanza dagli edifici:

- 0) **Unperturbed zone.** In questa zona il campo di vento interpolato non viene modificato, ritenendola sufficientemente lontana dagli edifici.
- 1) **Rooftop recirculation zone.** Presente in edifici col tetto piatto e attivabile solo con una risoluzione spaziale della griglia sufficientemente fine, si tratta di una zona di ricircolo dovuta al brusco rallentamento del vento in prossimità del tetto dell'edificio. Tale zona non è attivabile per la configurazione di queste simulazioni.
- 2) **Skimming zone.** Presente quando la distanza tra due edifici non supera una certa distanza di riferimento, pari alla somma del 125% dell'altezza e del 25% della larghezza dell'edificio sopravento, in questa zona si forma una circolazione

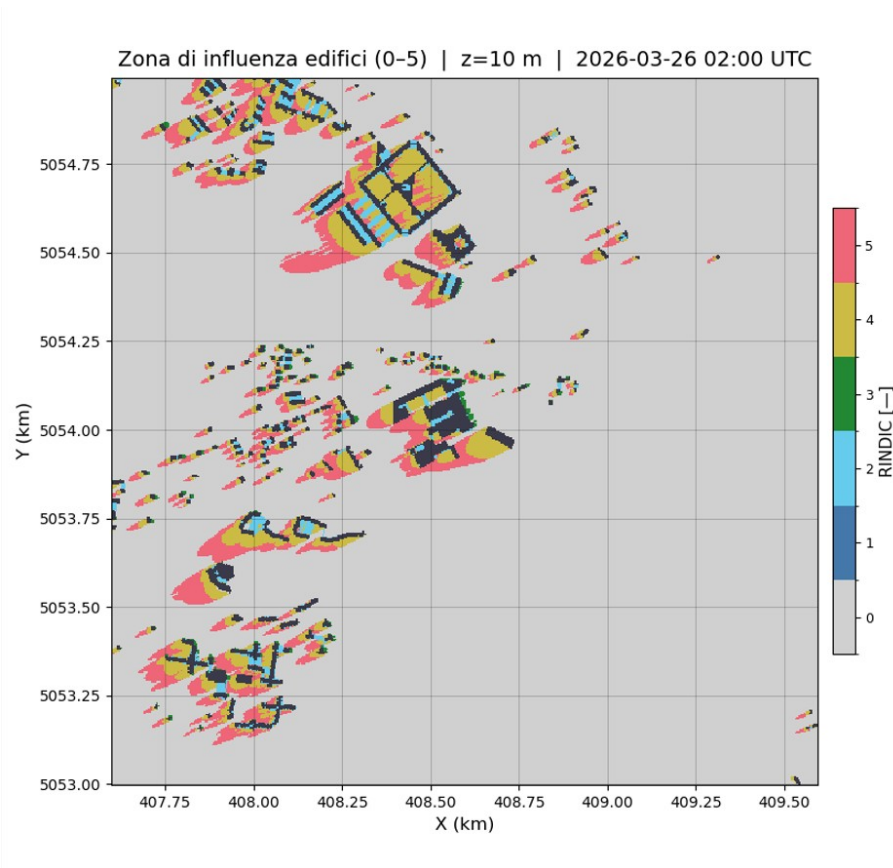


Figura 3.4: Mappa delle zone di influenza degli edifici a $z^* = 10$ m: in grigio la *unperturbed zone*, in blu la *rooftop recirculation zone* (non presente in queste simulazioni), in azzurro la *skimming zone*, in verde la *displacement zone*, in ocra la *cavity zone* e in rosa la *wake zone*, in grigio scuro gli edifici. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

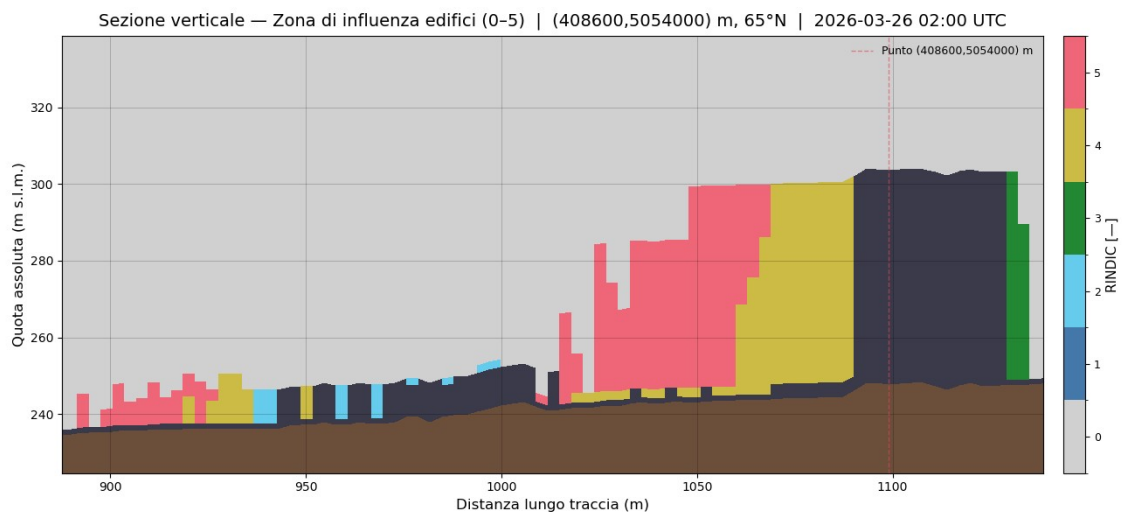


Figura 3.5: Sezione verticale identificata in Figura 3.3 delle zone di influenza degli edifici nei pressi dell'ospedale di Cattinara: in grigio la *unperturbed zone*, in blu la *rooftop recirculation zone* (non presente in queste simulazioni), in azzurro la *skimming zone*, in verde la *displacement zone*, in ocra la *cavity zone* e in rosa la *wake zone*, in grigio scuro gli edifici e il livello del terreno. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale.

quasi completamente isolata dal moto libero (a causa del “coperchio” generato dallo sforzo di taglio all’interfaccia); vengono modificate: la componente del vento verticale, caratterizzata da un andamento semiparabolico tra le pareti e il centro, verso il basso in prossimità della parete dell’edificio sottovento e verso l’alto in prossimità della parete dell’edificio sopravvento; la componente del vento orizzontale perpendicolare alla parete dell’edificio sopravvento, di verso opposto rispetto al moto libero, caratterizzata da un andamento orizzontale parabolico, con intensità massima al centro e nulla alle pareti.

- 3) **Displacement zone.** Collocata sulle pareti sopravvento degli edifici investiti dal moto, in tale zona si creano delle ricircolazioni causate dalla discontinuità improvvisa tra l’assenza di ostacoli e la parete verticale, tendendo a deviare il vento verso l’esterno e verso l’alto; viene annullata la componente del vento perpendicolare alla parete sopravvento.
- 4) **Cavity zone.** Collocata sulle pareti sottovento ai raggruppamenti di edifici investiti dal moto, in tale zona si creano delle ricircolazioni causate dalla discontinuità improvvisa tra la la parete verticale e l’assenza di ostacoli sottovento all’edificio, tendendo a deviare il vento verso l’interno e verso il basso; viene modificata la componente del vento perpendicolare alla parete sottovento, di verso opposto rispetto al moto libero e caratterizzata da un andamento orizzontale semiparabolico, con massimo alla parete sottovento e zero al limite esterno della zona.
- 5) **Wake zone.** Estesa in lunghezza il triplo rispetto alla *cavity zone*, in tale zona il moto continua a essere influenzato dalla presenza dell’edificio, tendendo a deviare verso l’interno e verso il basso senza la presenza ricircolazioni; viene modificata la componente del vento perpendicolare alla parete sottovento, con lo stesso verso del moto libero ma caratterizzata da un andamento orizzontale polinomiale (di potenza $3/2$), con zero al limite esterno della *cavity zone* e massimo al limite esterno della *wake zone* (valore di moto libero)

“Correzione” del campo di velocità

L’algoritmo di “correzione” del campo di velocità, tipico dei modelli diagnostici *mass-consistent* (Ratto et al., 1994), è basato sulla minimizzazione di un funzionale J composto dalla somma di tre contributi (in questo caso la nomenclatura descritta in seguito è stata introdotta *ad hoc* per semplicità di esposizione), di cui i primi due di volume e l’ultimo di superficie. Siano u_i^k per $i = 1; 2; 3$ le componenti del campo di velocità corretto dalla k -esima iterazione dell’algoritmo di minimizzazione, allora J è definito in questo modo:

$$J(u_i^k, \lambda^k) = \int_{\Omega} \left[(u^k - u_0)^2 + (v^k - v_0)^2 + \frac{1}{\alpha} (w^k - w_0)^2 \right] d\Omega + \\ + \int_{\Omega} \left(\lambda^k \frac{\partial u^k}{\partial x} + \frac{\partial v^k}{\partial y} + \frac{\partial w^k}{\partial z} \right) d\Omega + \beta \int_{\Gamma} \left(\vec{n} \cdot (\vec{U}^k - \vec{U}_0) \right)^2 d\Gamma \quad (3.4)$$

dove λ^k è il moltiplicatore di Lagrange locale, Ω e Γ indicano rispettivamente l'insieme dei punti interni del dominio e del bordo del dominio con vettore normale $\vec{n}$, α e β sono parametri fissi (α può essere un parametro locale ma non in queste simulazioni).

- 1) **Regularization term.** Questo termine è proporzionale all'energia meccanica specifica totale del campo di velocità residuale $u_i^k - u_{0i}$ rispetto al campo interpolato, la cui minimizzazione corrisponde a conservare (in assenza di dissipazione) l'energia meccanica specifica totale del campo di vento modificato. Il “parametro di stabilità” $0 \leq \alpha \leq 1$, calcolato dal profilo di temperatura o scelto a discrezione dell'utente, tiene conto della stabilità termica dell'atmosfera (del suo significato fisico se ne parlerà più approfonditamente in seguito): per $\alpha = 1$ la stratificazione è neutra, favorendo il trasferimento di energia cinetica in verticale come in orizzontale; per $\alpha = 0$ la stratificazione è estremamente stabile, impedendo di fatto qualunque moto verticale. In queste simulazioni si ipotizzeranno condizioni neutre, ossia $\alpha = 1$.
- 2) **Mass-consistency term.** Questo termine è proporzionale alla divergenza del campo di velocità integrata sul volume del dominio (ossia al moto integrale di massa sui bordi del dominio) e una sua minimizzazione è consistente con il principio di conservazione della massa per un fluido incompressibile.
- 3) **Boundary-consistency term.** Questo termine è proporzionale all'energia cinetica specifica della componente di vento perpendicolare ai bordi del dominio e una sua minimizzazione contribuisce a mantenere le condizioni al contorno consistenti con il campo modificato. Per $\beta = 0$ vengono applicate a λ^k condizioni al contorno di Dirichlet, per $\beta \rightarrow \infty$ vengono applicate a λ^k condizioni al contorno di Neumann. Micro-SWIFT utilizza condizioni al contorno di Dirichlet per λ^k , quindi $\beta = 0$.

Si noti che l'unico termine di J che può essere negativo è il *mass-consistent term*, ma per il vincolo posto dalla conservazione della massa $\vec{\nabla} \cdot \vec{U}^k = 0$ (condizione usata espressamente nei calcoli successivi), ne consegue che J è semidefinito positivo nei pressi del minimo cercato: minimizzare il funzionale globale, allora, risulta equivalente a minimizzare un funzionale definito allo stesso modo ma localmente (stessa espressione dell'Equazione 3.4 ma con Ω e Γ che denotano rispettivamente il volume e il bordo di una cella computazionale). Applicando il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, minimizzare il funzionale locale equivale ad annullarne le derivate rispetto a λ^k e a u_i^k . In questo modo si ottengono¹ le condizioni espresse dalle Equazioni 3.5 all'interno del dominio e 3.6 ai bordi (si noti che $\beta = 0$ implica $\lambda^k = 0$ ai bordi per ogni interazione, ossia condizioni al contorno di Dirichlet per λ^k).

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{U}^k = 0 \\ \vec{\nabla} \lambda^k = [A](\vec{U}^k - \vec{U}_0) \quad \text{con } [A] = \text{diag}(1, 1, \frac{1}{\alpha}). \end{cases} \quad (3.5)$$

¹Si noti che per ottenere la seconda equazione in 3.5 e in 3.6 si procede con una semplificazione di $\vec{\nabla} \cdot \vec{U}^k = 0$, il che presupporrebbe, a rigore, che non fosse identicamente nullo.

$$\begin{cases} \vec{n} \cdot \vec{U}^k = \vec{n} \cdot \vec{U}_0 = 0 \\ \lambda^k = -\beta \vec{n} \cdot (\vec{U}^k - \vec{U}_0). \end{cases} \quad (3.6)$$

Si noti, quindi, che il campo residuo $\vec{U}^k - \vec{U}_0$ è proprio $[A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^k$. Eliminando $\vec{U}^k = \vec{U}_0 + [A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^k$ dalle Equazioni 3.5 e 3.6 e usando il teorema della divergenza sulla singola cella computazionale (Γ denota il bordo della cella) si ottengono le Equazioni 3.7, che permettono di trovare λ^k e conseguentemente (anche se esplicitamente solo all'ultima iterazione) $\vec{U}^k$:

$$\begin{cases} \int_{\Gamma} [A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^k \cdot \vec{n} d\Gamma = - \int_{\Gamma} \vec{U}_0 \cdot \vec{n} d\Gamma & \text{all'interno del dominio} \\ \vec{n} \cdot ([A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^k) = 0 & \text{ai bordi inferiore e superiore} \\ \beta \vec{n} \cdot ([A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^k) + \lambda^k = 0 & \text{ai bordi laterali} \end{cases} \quad (3.7)$$

I calcoli relativi a λ^k e a $\vec{U}^k$ avvengono su una particolare griglia ortogonale, ottenuta dalla griglia della simulazione attraverso una trasformazione di coordinate, in cui ogni punti-griglia di λ^k è inserito all'interno di una cella formata dai punti-griglia di U_k (e viceversa). All'ultima iterazione viene calcolato il campo $\vec{U}^{conv} = \vec{U}_0 + [A]^{-1} \vec{\nabla} \lambda^{conv}$ che soddisfa la convergenza e l'anomalia di pressione Δp^{conv} sulla particella d'aria rispetto alle condizioni idrostatiche (a rigore l'anomalia del lavoro specifico dovuto alla pressione) risolvendo $\nabla^2 \Delta p^{conv} = -\partial_i \partial_j (u_i^{conv} u_j^{conv})$, dove si è usata la notazione di Einstein (tale equazione si ricava applicando l'operatore divergenza alle equazioni di Navier-Stokes tenendo conto di un campo $\vec{U}^{conv}$ stazionario e indivergente e trascurando il termine dissipativo). L'algoritmo di minimizzazione termina quando viene soddisfatta la condizione di convergenza definita sul campo λ^k , decisa dall'utente attraverso ϵ_{λ} ($\|\cdot\|$ indica la norma euclidea):

$$\frac{\|\lambda^{k+1} - \lambda^k\|}{\|\lambda^k\|} < \epsilon_{\lambda}. \quad (3.8)$$

Si approfondisce, infine, il significato fisico del parametro di stabilità α attraverso una semplificazione dell'interpretazione di (Moussiopoulos et al., 1998). Siano u_{∞} e v_{∞} le componenti del moto libero (per semplicità orizzontale) e u , v e w le componenti del moto interagente con un ostacolo. Ipotizzando l'assenza di dissipazione e di scambi di calore, vale la conservazione dell'energia meccanica specifica della particella d'aria. Spostandosi da una quota H_s a una quota z in un'atmosfera stratificata, con frequenza di Brunt-Vaisala $N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \geq 0$ (g è il modulo dell'accelerazione di gravità e θ la temperatura potenziale), ipotizzando di poter trascurare i gradienti di pressione:

$$\frac{1}{2}(u_{\infty}^2 + v_{\infty}^2) = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + g \int_{H_s}^z \frac{z - H_s}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z'} dz' = \text{costante}. \quad (3.9)$$

Ad esempio, se N^2 è costante con la quota, l'energia potenziale si esprime con $\frac{1}{2}N^2(z - H_s)^2$. Introducendo α nell'espressione dell'energia meccanica specifica l'Equazione 3.9 prende la forma

$$\frac{1}{2}(u_\infty^2 + v_\infty^2) = \frac{1}{2} \left(u^2 + v^2 + \frac{1}{\alpha} w^2 \right) = \text{costante.} \quad (3.10)$$

Denotando con $K_h = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ e con $K_v = \frac{1}{2}w^2$ rispettivamente l'energia cinetica orizzontale e verticale, quindi con $\Delta K_h = K_h - K_{h\infty}$ la variazione (negativa) di energia cinetica orizzontale e $\Delta K_v = K_v$ la variazione (positiva) di energia cinetica verticale, e con $\Delta P = g \int_{H_s}^z \frac{z-H_s}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z'} dz'$ la variazione di energia potenziale specifica, si ottiene $-\Delta K_h = \Delta K_v + \Delta P$ dall'Equazione 3.9 e $-\Delta K_h = \Delta K_v/\alpha$ dall'Equazione 3.10, quindi, eliminando K_v , $\Delta P = -(1 - \alpha)\Delta K_h$ e $\Delta K_v = -\alpha\Delta K_h$. Il parametro di stabilità $\alpha = 1 + \Delta P/\Delta K_h = -\Delta K_v/\Delta K_h$ rappresenta la percentuale di energia cinetica orizzontale che si converte in energia cinetica verticale, mentre $1 - \alpha$ rappresenta la percentuale di energia cinetica orizzontale che si converte in energia potenziale attraverso il guadagno di quota. Notando che la variazione (negativa) del quadrato del numero di Froude locale è esattamente $\Delta \text{Fr}^2 = \Delta K_h/\Delta P$:

$$\alpha = 1 + \Delta \text{Fr}^{-2}. \quad (3.11)$$

Si noti che $0 \leq \Delta P \leq -\Delta K_h$. In condizioni neutre $\Delta P \rightarrow 0$, quindi $\Delta \text{Fr} \rightarrow -\infty$ e $\alpha \rightarrow 1$, ossia una perdita di energia cinetica orizzontale si converte totalmente in un guadagno di energia cinetica verticale. In condizioni fortemente stabili $\Delta P \rightarrow -\Delta K_h$, quindi $\Delta \text{Fr} \rightarrow -1$ e $\alpha \rightarrow 0$, ossia sono fortemente impediti i moti verticali (a qualunque quota non ci sarebbe velocità verticale residua per mantenere il moto verticale).

3.3 Equazioni del modello

Nella Sezione 3.1 si è accennato che il “campo di velocità corretto” è consistente col principio di conservazione della massa (espresso dalla prima Equazione 3.12, l'equazione di continuità per fluidi incompressibili), ma non con i principi di conservazione del quantità di moto e dell'energia (meccanica e termica). Inoltre, non tiene conto degli effetti dissipativi dovuti allo strato limite in prossimità delle superfici. Per questo motivo questo campo viene utilizzato come campo iniziale di una simulazione effettuata con il *solver* di Micro-SWIFT, un modello RANS semplificato rispetto a un modello CFD tradizionale. Per fluidi newtoniani incompressibili, trascurando il termine inerziale di Coriolis dovuto alla rotazione terrestre (che per scale di velocità U dell'ordine delle decine di metri al secondo diventa rilevante solo a partire da lunghezze di scala $L = U/f$ dell'ordine delle centinaia di chilometri alle medie latitudini, molto maggiore delle lunghezze caratteristiche della simulazione), il principio di conservazione del quantità di moto e dell'energia sono espressi congiuntamente dalle equazioni di Navier-Stokes e dall'equazione termodinamica: le equazioni di Navier-Stokes sono espresse dalla seconda Equazione 3.12 mentre l'equazione termodinamica non viene risolta, ipotizzando l'atmosfera isoterma (il campo di temperatura ha solo un ruolo esclusivamente diagnostico). Ci si riferisce

a (Pope, 2000), oltre che alla documentazione di riferimento (ARIA Technologies, 2019), per la seguente trattazione.

Le Equazioni 3.12 descrivono un fluido atmosferico che può dimostrare un comportamento fortemente non lineare se il termine avvevativo è particolarmente dominante. L'estrema sensibilità alle condizioni iniziali (comportamento caotico) e la presenza di processi che interessano molte scale contemporaneamente (comportamento multiscala), sono rappresentate nelle equazioni esattamente da questo termine non lineare. L'approccio RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) consiste nel trovare una soluzione stazionaria attraverso il formalismo di Reynolds, che sfrutta proprio il comportamento caotico del fluido atmosferico per darne una descrizione statistica globale. Sia T un intervallo di tempo molto maggiore del tempo di decorrelazione (temporale) delle strutture turbolente (ossia $\overline{u'_i(t)u'_j(t+T)} \simeq 0$ per tutti i punti del dominio, con le definizioni di media e di fluttuazione date fra poche righe), idealmente lungo a sufficienza da permettere al sistema di raggiungere una condizione di ergodicità (in modo che la media temporale sia rappresentativa della media d'ensemble nello spazio delle realizzazioni). Definendo $u_i = \bar{u}_i + u'_i$, con $\bar{u}_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt$ ipotizzato stazionario, le equazioni di continuità e di Navier-Stokes assumono la seguente forma (si usa la notazione di Einstein, δ_{ij} è il delta di Kronecker):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{\Delta p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (3.12)$$

dove il tensore (simmetrico) degli sforzi di Reynolds $\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ emerge proprio dal termine avvevativo non lineare, introducendo la correlazione tra le componenti di velocità dovuta alle strutture turbolente e descrivendo i conseguenti flussi turbolenti di quantità di moto.

L'introduzione del tensore degli sforzi di Reynolds comporta sei incognite aggiuntive, dieci in totale, senza aggiungere alcuna equazione: le Equazioni 3.12 non costituiscono un sistema chiuso. Attraverso la parametrizzazione di Prandtl, basata sull'analogia della teoria molecolare, le componenti del tensore degli sforzi di Reynolds vengono espresse in funzione di un unico campo di viscosità turbolenta, riducendo a cinque il numero di incognite totali. L'effetto efficace della turbolenza sul moto medio è rappresentato dal contributo anisotropo del tensore degli sforzi di Reynolds: con l'ipotesi di Prandtl tale contributo è espresso da $\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{ll} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}$, dove $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ è il tensore (simmetrico) di deformazione, a traccia nulla dato che il fluido è incomprimibile. In analogia alla viscosità molecolare, ν_t rappresenta la viscosità turbolenta, con la differenza che quest'ultima è un campo che riflette l'intensità locale della turbolenza. Introducendo l'energia cinetica turbolenta $k = \overline{u'_i u'_i} / 2 = \tau_{ll} / 2$ e l'anomalia di pressione efficace $\bar{\Delta p}^* = \bar{\Delta p} + 2k\delta_{ij}/3$ (che ingloba l'effetto di k sul moto medio) si ottengono le Equazioni 3.13:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{\Delta p^*}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2(\nu + \nu_t) \bar{S}_{ij}] , \end{cases} \quad (3.13)$$

in cui il primo termine al membro destro delle equazioni di Navier-Stokes rappresenta un contributo di volume (campo irrotazionale) mentre il secondo termine rappresenta un contributo di superficie dovuto alla deformazione.

Per ridurre nuovamente a quattro le incognite in gioco, è necessaria un'ulteriore ipotesi di chiusura. Negli approcci CFD tradizionali sono diffusi schemi di chiusura al second'ordine, come il modello k - ϵ (dove ϵ è il rateo di dissipazione di k), ossia con l'aggiunta di due incognite che determinano univocamente ν_t risolvendo delle equazioni di bilancio. In Micro-SWIFT, invece, viene utilizzato uno schema di chiusura di ordine zero, ossia senza l'aggiunta di altre equazioni ed incognite: la viscosità turbolenta ν_t viene stimata algebricamente (*algebraic stress model*) a partire dai gradienti di velocità e dalla distanza minima d dell'ostacolo più vicino al punto-griglia (saturando a $d_{\max} = 100$ m):

$$\nu_t = (\kappa d)^2 ||S_{ij}|| \quad (3.14)$$

con κ la costante di Von Karman e $||\bar{S}_{ij}|| = \sqrt{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$. L'energia cinetica turbolenta viene calcolata attraverso $k = \sqrt{\epsilon \nu_t} = \sqrt{2(\kappa d)^2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$, ipotizzando che il suo rateo di dissipazione ϵ coincida con il suo rateo di produzione $P = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}$. Le equazioni che vengono discretizzate in Micro-SWIFT, definendo la coordinata continua s del "tempo delle iterazioni" e rendendo implicita la notazione di media, sono le seguenti:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial s} = -\frac{\partial \Delta p^*}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \kappa d \left\| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\| \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] . \end{cases} \quad (3.15)$$

dove è stata usata l'indivergenza di $\vec{u}$ e l'Equazione 3.14. Si denoti con $-a_{adv}$ e a_{diff} rispettivamente il secondo e il terzo termine al membro destro della seconda Equazione 3.15. Ogni iterazione n prevede il calcolo di un campo di vento provvisorio u_i^* secondo uno schema di predizione-proiezione-correzione composto dai seguenti passi (l'indice i è implicito):

- 1) $\frac{u^* - u^n}{\Delta s} = -a_{adv}^n + a_{diff}^n$
- 2) $\nabla^2 \Delta p^{*n+1} = \frac{1}{\Delta s} \vec{\nabla} \cdot u^*$
- 3) $\frac{u^{n+1} - u^*}{\Delta s} = -\vec{\nabla} \Delta p^{*n+1}.$

Ciò consente la risoluzione parziale del solo campo di anomalia di pressione efficace al punto 2) attraverso l'utilizzo di un metodo numerico di minimizzazione, la cui condizione di convergenza è rappresentata da un certo numero di iterazioni interne (fissata a 15 per queste simulazioni, il valore massimo consigliato dal manuale d'utilizzo di Micro-SWIFT). Si noti che il punto 2) equivale all'applicazione dell'operatore divergenza all'equazione del punto 3) ipotizzando l'indivergenza di $\vec{u}^{n+1}$.

Il calcolo di u_i^n avviene su una griglia Arakawa-C: si ipotizzi per semplicità che la griglia di p^* sia uniforme, allora, costruendo una cella primitiva cubica centrata su di esso, i punti-griglia di u_i^n e u_i^* sono collocati al centro delle facce del parallelepipedo individuate dall' i -esima direzione. I termini a_{adv}^n e a_{diff}^n sono discretizzati rispettivamente con uno schema *upwind* (*side-difference* spostato in direzione *upwind*) e uno schema centrato. Le condizioni al contorno per u_i^n sono *no slip* per i bordi interni del dominio, *free slip* al bordo superiore e un campo di vento *mass-consistent* al bordo di uscita; per Δp^* sono imposte condizioni al contorno di Neumann ($\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \Delta p^* = 0$ con $\vec{n}$ vettore normale al bordo).

3.4 Descrizione e *pre-processing* delle misure

Tra gli strumenti utilizzati per la campagna sperimentale condotta nei pressi dell'Ospedale di Cattinara (Trieste) si contano 5 anemometri ultrasonici triassiali WindMaster Pro con campionamento a 20 Hz (risoluzione di 0.01 m/s sulle misure delle componenti di velocità), di cui 4 nel dominio della simulazione (v. Figura 3.6), e un Windcube Scanning Doppler-LIDAR (accuratezza dichiarata < 0.5 m/s sulle misure di velocità radiale), anch'esso nel dominio della simulazione. I dati anemometrici grezzi delle tre componenti della velocità sono stati filtrati (esclusione dei valori anomali, oltre le 3.5 deviazioni standard, e interpolazione lineare sugli intervalli di dati mancanti di al massimo 3 secondi) e mediati su intervalli di mezz'ora (corrispondenti a 36000 misure in assenza di dati mancanti) in modo da ottenere valori medi di intensità, direzione del vento ed energia cinetica turbolenta su tali intervalli.

Posizione	Livelli verticali	Coordinate al suolo	Quota copertura	Altezza anemometro
Eliporto	2	258 m s.l.m. 13.830370°E 45.633411°N	261 m s.l.m.	L1: 1.5 m L2: 2.5 m
Torre Medica	1	253 m s.l.m. 13.826086°E 45.633819°N	309 m s.l.m.	2.10 m
Torre Chirurgica	1	253 m s.l.m. 13.827186°E 45.633569°N	309 m s.l.m.	2.20 m

Tabella 3.1: In ordine di altitudine, anemometri ultrasonici triassiali della campagna sperimentale di Cattinara posizionati all'interno del dominio della simulazione alla microscala.

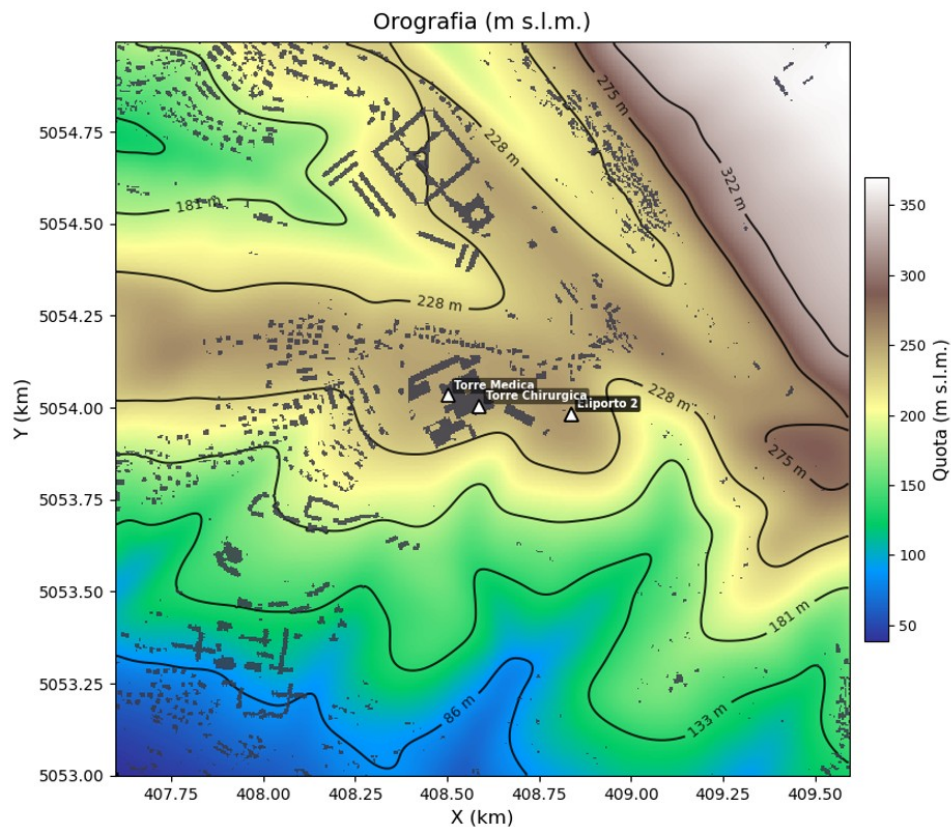


Figura 3.6: Mappa dell'orografia con le posizioni degli anemometri (triangoli in bianco). A causa della risoluzione orizzontale di 4 m, nella simulazione l'anemometro posizionato al primo livello dell'eliporto risulta sovrapposto a quello posizionato al secondo livello nonostante nella realtà siano sfasati orizzontalmente di 1.5 m. Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2$ m) sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

Tra le modalità di scansione del LIDAR, posizionato alle coordinate (13.83041° , 45.6332°) a poche decine di metri a nord-est degli anemometri dell'eliporto, in questo lavoro sono state prese in considerazione scansioni PPI (*Plan Position Indicator*), sezioni azimutali a una certa elevazione, e DBS (*Doppler Beam Swinging*), per la ricostruzione di profili di vento verticali. Tali modalità forniscono, rispettivamente: la componente radiale della velocità rispetto al LIDAR misurata su una sezione "orizzontale" con una certa elevazione (elevazione minima di 15°) e un dato settore angolare azimutale centrato in 55°N (10°N - 120°N , ricoperto con una risoluzione angolare di 1° in senso orario in circa 2 minuti), tra due scansioni a una certa elevazione intercorrono circa 27 minuti; la velocità orizzontale, la direzione e la velocità verticale calcolate tramite algoritmo proprietario a partire dalle velocità radiali misurate da 5 raggi, di cui 1 di elevazione 90° (verticale) per la misura della velocità verticale e gli altri 4 con elevazione 75° presso i punti cardinali per la misura della velocità orizzontale e della direzione, tra due misure intercorrono circa 6 minuti. Tutte le scansioni citate hanno *gate* di 25 m (risoluzione radiale) e un *range* di 3 km (portata). A partire dai dati PPI che hanno superato il controllo di qualità interno sono state ricavate la velocità orizzontale e la direzione (v. Figura 3.7) al variare del *gate* della sezione di elevazione 15° (limitandosi ai *range* 500-1000 m dove c'è una buona copertura angolare per tutta la giornata) attraverso una semplificazione

2D dell'algoritmo VADtrad (*Velocity-Azimuth Display* tradizionale, (Baidar et al., 2023)) descritto in (Browning et al., 1967), ossia non includendo la velocità verticale nella stima: nonostante la complessità del terreno, tale semplificazione migliora nettamente la coerenza spaziale in termini di MAD delle variabili ricavate (*Median Absolute Deviation*), calcolate nell'intervallo 500-1000 m per ognuna delle 51 scansioni (quindi le mediane delle variabili variano durante lo sviluppo dell'evento e le MAD rappresentano la variabilità sulla singola scansione), a fronte di prestazioni sostanzialmente equivalenti in termini di RMSE (*Root Mean Square Error*) e CI (*Correlation Index*) della velocità radiale misurata rispetto al *fit*, calcolati nell'intervallo 10-110° per ognuno dei 20 *gate* considerati e per ognuna delle 51 scansioni (quindi le medie della velocità radiali sono diverse per ogni *gate* e variano durante lo sviluppo dell'evento), v. Tabella 3.2.

Indice VAD	Q5 3D vs 2D	Q25 3D vs 2D	Q50 3D vs 2D	Q75 3D vs 2D	Q95 3D vs 2D
MAD WSPD(m/s)	0.4 vs 0.2	0.7 vs 0.4	1.3 vs 0.8	2.2 vs 1.0	4.0 vs 1.7
MAD WDIR (°)	0.3 vs 0.4	1.0 vs 0.9	1.6 vs 1.6	4.2 vs 2.2	11.7 vs 5.6
MAD W (m/s)	1.3 vs /	2.8 vs /	4.2 vs /	7.8 vs /	15.2 vs /
RMSE(m/s)	0.94 vs 0.96	1.31 vs 1.42	1.70 vs 1.83	2.05 vs 2.25	2.62 vs 2.96
CI	0.69 vs 0.62	0.82 vs 0.80	0.88 vs 0.86	0.93 vs 0.92	0.96 vs 0.95

Tabella 3.2: Diagnostica per interquantili (in termini di *Mean Absolute Deviation*, *Root Mean Square Error*, *Correlation Index*) dei fit VADtrad 2D e VADtrad 3D sulla scansione PPI del LIDAR di settore angolare 10°-120°, distanze radiali considerate 500-1000 m e con elevazione 15° (distanza orizzontale $\simeq$ 483-966 m a parità di quota assoluta e $\simeq$ 129-258 m di differenza di quota assoluta). La statistica delle MAD, relative alle variabili ricavate, è calcolata sulle scansioni, mentre quella degli RMSE e CI, relative alla velocità radiale misurata, è calcolata sui *gate* e sulle scansioni. L'aumento delle MAD per VADtrad 3D, specie per le velocità orizzontali e per la coda alta della distribuzione delle MAD relative alla direzione, è dovuta a valori non fisici delle velocità verticali causati da *overfitting* (una MAD mediana di 4.2 m/s relativa alla velocità verticale è irrealistica, ricordando che la MAD rappresenta la variabilità sui 500-1000 m di una singola scansione a elevazione 15°).

I dati DBS, utilizzati per confrontare i profili verticali presso il LIDAR con quelli delle simulazioni con frequenza oraria (v. Sezione 4.2), sono stati filtrati attraverso un adattamento per scansioni DBS del metodo utilizzato in (Menke et al., 2020), originariamente concepito per scansioni PPI, in modo da ottenere dei profili verticali di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR: l'idea è applicare un filtro sulle singole scansioni attraverso criteri di coerenza spaziale locale (*stage 1*) e globale (*stage 2* e *stage 3*) lungo i singoli *gate*, eliminando i valori anomali secondo soglie fissate empiricamente e interpolando linearmente per ricostruire gli intervalli di dati mancanti quando non sono troppo estesi (nel caso di (Menke et al., 2020) solamente se i *gate* immediatamente vicini hanno valori validi) in modo da rendere più rappresentative le medie temporali su un certo intervallo di tempo. Tale metodo risulta molto valido in presenza di un'elevata copertura spaziale

con valori anomali localizzati, mentre perde di efficacia in presenza di interruzioni estese e soprattutto quando non sono adeguatamente soddisfatte le condizioni di uniformità locale e globale lungo i *gate* (col rischio che il profilo interpolato non sia rappresentativo della fisica reale).

L'utilizzo del filtro su dati DBS considerati in questo lavoro, con caratteristiche diverse rispetto ai dati PPI del lavoro originale, ne richiede un'adattamento: mentre nel primo caso erano a disposizione scansioni di 48 secondi (PPI) che si susseguono continuamente, con un'ottima copertura spaziale e in condizioni quasi uniformi (elevazione 5°), in questa sede le misure DBS si susseguono solo ogni 6 minuti per l'intervallarsi di altre modalità di scansione, con una copertura spaziale intermittente a causa delle condizioni di vento forte (che tende a ridurre la concentrazione di aerosol su cui si basano le misure, diminuendo il rapporto segnale-rumore) e in condizioni non uniformi lungo i *gate* (elevazioni di 75° e 90°). Per questo motivo assieme ai dettagli viene modificato anche lo scopo del filtro: mentre in quel lavoro l'obiettivo era principalmente estendere la copertura spaziale dei dati rispetto a un filtro CNR (*Carrier to Noise Ratio*) sufficientemente severo da eliminare caratteristiche non fisiche (Menke et al., 2020), in questa sede viene usato esclusivamente per migliorarne la qualità e la rappresentatività su un intervallo orario, in modo da ottenere un riferimento di maggior qualità per il confronto coi profili simulati con WRF, anche a costo di ridurre i dati disponibili per la statistica; per non modificare la variabilità verticale, inoltre, non viene implementata l'interpolazione.

Di conseguenza, sono state apportate le modifiche elencate di seguito. Le soglie scelte per i valori anomali delle singole variabili corrispondono a 3 volte la MAD locale media (per *stage* 1) e globale (per *stage* 2) delle singole variabili. Il filtro viene applicato a ogni scansione sul raggio verticale (elevazione 90°), ottenendo un singolo profilo di velocità verticale per ogni scansione, e sul raggio "obliquo" verso ovest (elevazione 75°), ottenendo un singolo profilo di velocità orizzontale e direzione per ogni scansione (che comunque tiene conto dell'informazione di tutti i 4 profili obliqui nel calcolo delle variabili, informazione sempre aggiornata essendo il raggio verso ovest l'ultimo raggio obliquo in cui viene effettuata la misura): i profili orari nella località del LIDAR vengono ottenuti dai profili filtrati attraverso una media mobile in una finestra temporale di 1 h.

- **Pre-filtro di qualità.** Esclusione iniziale dei dati che non superano il controllo di qualità interno dell'algoritmo proprietario; in questo modo si evitano intere regioni non rappresentative delle condizioni locali che altererebbero l'esito del filtro (v. *stage* 1).
- **Pre-filtro di continuità temporale.** Esclusione a ogni altezza dei dati che superano il controllo di qualità ma che sono preceduti e susseguiti da almeno 2 dati mancanti per parte; in questo modo si evitano misure isolate temporalmente da almeno una periodicità caratteristica della Bora (< 11 min, (Petkovsek, 1987)).
- **Pre-filtro di copertura temporale.** Esclusione a ogni altezza dei dati che superano il controllo di qualità ma che sono preceduti o susseguiti da almeno 5 dati mancanti in una finestra temporale di 10 misure centrata sul dato (che

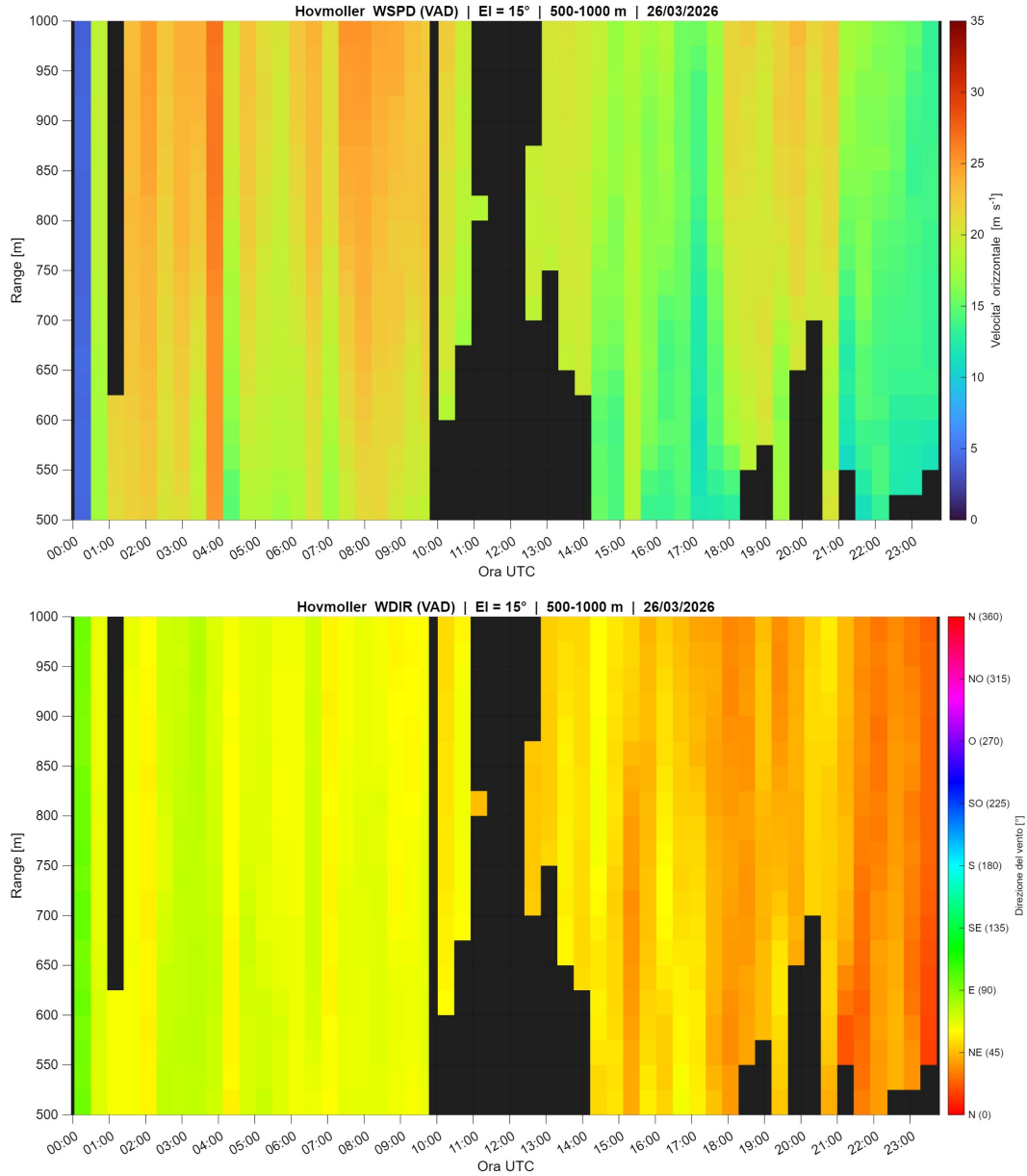


Figura 3.7: Diagrammi Hovmöller *range* vs tempo di velocità orizzontale e direzione del vento relativi alle distanze radiali 500-1000 m della sezione PPI del LIDAR con elevazione 15° (distanza orizzontale $\simeq$ 483-966 m a parità di quota assoluta e $\simeq$ 129-258 m di differenza di quota assoluta), ottenuti tramite algoritmo VADtrad 2D. Dati ogni $\simeq$ 27 minuti. In nero dati assenti o con meno dell'80% degli angoli azimutali sopravvissuti al controllo di qualità.

corrisponde almeno al 60%, 6 su 10, di dati validi su una finestra temporale oraria); in questo modo si ipotizza che la media temporale a finestra mobile successiva al filtro sia effettivamente rappresentativa dell'intervallo orario.

- **Stage 1.** Esclusione dei valori anomali rispetto alla mediana locale del singolo profilo, calcolata su una finestra di 6 *gate* lungo i raggi (che corrispondono a 150 metri); questo passo è compreso nel filtro originale, il numero di *gate* è stato abbassato da 15 a 6, compromesso tra una finestra spaziale non troppo estesa per non scambiare gli estremi di forti gradienti verticali per valori anomali (in entrambi i casi 150 m, risoluzione di 25 m contro i 10 m del lavoro originale)

e un numero di valori sufficienti a una stima solida della mediana locale.

- **Stage 2.** Esclusione dei valori anomali rispetto alla mediana globale del singolo profilo; questo passo è compreso nel filtro originale.
- **Stage 3.** Esclusione dei valori spazialmente isolati, ossia con 2 *gate* sotto e 2 *gate* sopra vuoti; questo passo è compreso nel filtro originale.

3.5 Descrizione sintetica del caso studio

Attraverso la metodologia presentata nella Sezione 2.2, nei primi tre mesi del 2026 sono stati individuati 4 eventi di Bora persistenti, elencati in Figura 3.8 e confermati dai report dell’agenzia regionale ARPA FVG (v. (ARPA FVG, 01/26) e (ARPA FVG, 03/26)). Per il primo evento di gennaio e l’ultimo evento di marzo, al molo F.lli Bandiera si sono registrate intensità orarie (vento fresco secondo la scala Beaufort, v. Sezione A.2) e raffiche orarie medie (burrasca moderata) poco superiori alle mediane della distribuzione di intensità nei giorni di Bora nel lustro 2021-2025 (v. Figura 2.10 della Sezione 2.3), con i rispettivi massimi che hanno raggiunto la soglia di burrasca moderata e di burrasca fortissima (addirittura fortunale nel caso del primo evento di gennaio). Si è scelto come caso studio il 26 marzo 2026 perchè rappresenta l’evento più intenso coperto dalla finestra temporale della campagna sperimentale nel periodo considerato: si tratta di un evento di Bora ciclonica marittima provocata da una goccia fredda atlantica (v. Figure 3.9 e 3.10) che ha portato precipitazioni moderate sulla Regione.

<i>Bora Type</i>	Data	Durata (giorni)	Intensità (m/s)	Raffica (m/s)
ciclonica continentale	04-07/01/26	4	media: 13.3 max: 19.6	media: 19.2 max: 30.5
ciclonica continentale	18-19/01/26	2	media: 11.4 max: 13.9	media: 16.9 max: 22.0
ciclonica marittima	17/03/26	1	media: 9.9 max: 15.2	media: 15.7 max: 22.7
ciclonica marittima	26/03/26	1	media: 12.6 max: 18.2	media: 18.9 max: 26.0

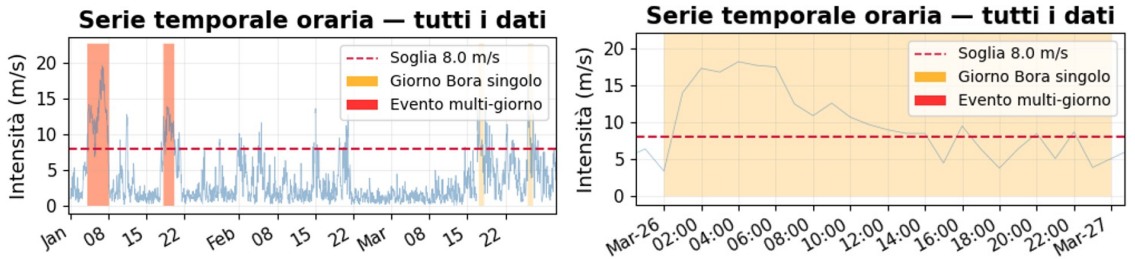


Figura 3.8: Lista degli eventi di Bora persistenti individuati nel periodo gennaio-marzo 2026, in ordine cronologico. I dati di intensità e raffica sono relativi al molo F.lli Bandiera. Le serie temporali rappresentano l’intensità media oraria al molo F.lli Bandiera nei periodi gennaio-marzo (a sinistra) e del caso studio, ossia il 26 marzo (a destra).

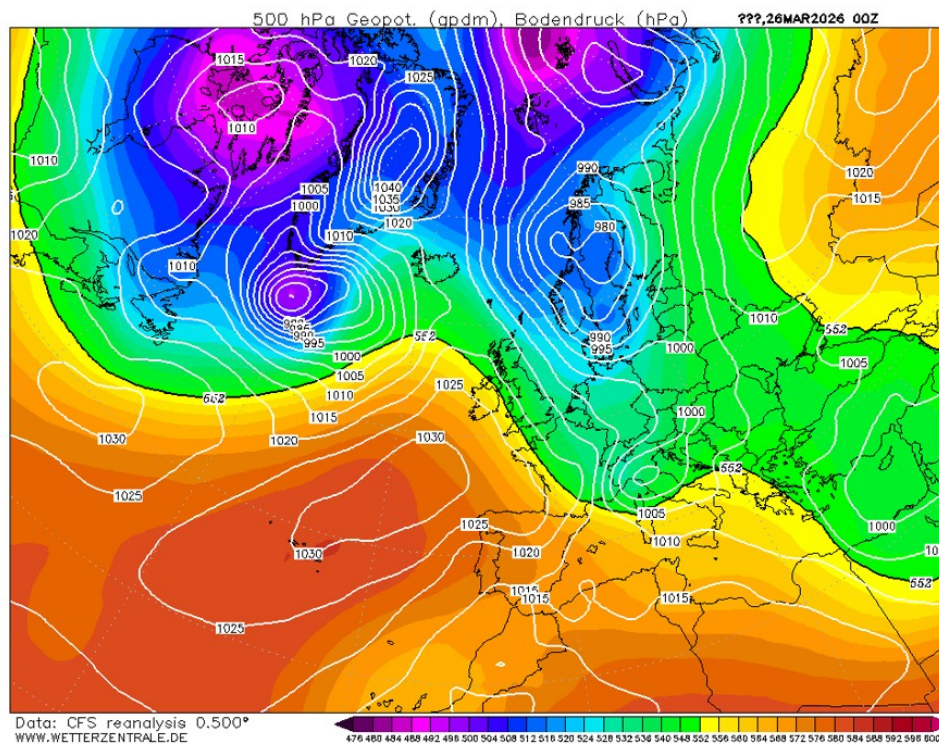


Figura 3.9: Mappa di geopotenziale a 500hPa (tratta da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) rappresentativa dell'evento del 26 marzo 2026 (Bora ciclonica marittima).

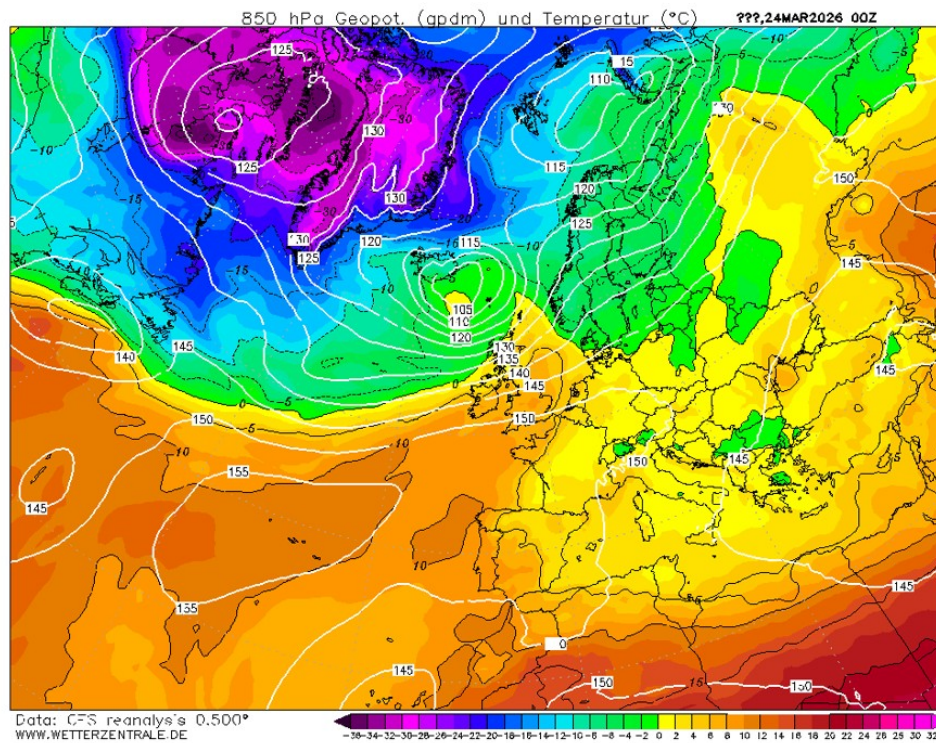


Figura 3.10: Mappa di temperatura a 850hPa (tratta da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) a 48 h dall'inizio dell'evento del 26 marzo 2026 (Bora ciclonica marittima).

Alle 00 UTC del 26 marzo al molo F.lli Bandiera il vento superficiale (10 m) ha

virato bruscamente dai settori angolari meridionali ai settori di nord-est; alle 01 UTC è formalmente iniziato l'evento di Bora con un improvviso aumento dell'intensità sopra i 14 m/s (vento forte), con un massimo alle 04 UTC sopra i 17 m/s (burrasca moderata) e una successiva diminuzione graduale (altri picchi si sono verificati alle 02 UTC, alle 06 UTC, alle 09 UTC), con valori stabilmente sotto i 14 m/s (vento forte) dalle 7 UTC e degli 11 m/s (vento fresco) dalle 10 UTC; dalle 15 UTC il vento ha virato leggermente verso i settori nord/nord-est e nord-est, scendendo per la prima volta sotto gli 8 m/s (vento moderato, soglia per le ore di Bora); le 18 ore soprasoglia sono completate dalle 16 UTC, 20 UTC e 22 UTC. Questi andamenti si possono apprezzare anche dai dati LIDAR nel dominio della simulazione alla microscala (v. Figura 3.7). L'evento si è definitivamente spento il 27 marzo, in seguito alle ultime ore che al molo F.lli Bandiera hanno superato la soglia degli 8 m/s (dalle 02 UTC alle 07 UTC).

Capitolo 4

Risultati della simulazione

In questo capitolo, in seguito a delle considerazioni sulle condizioni di convergenza della simulazione (v. Sezione 4.1), si useranno i dati LIDAR (v. Sezione 4.2) e anemometrici (v. Sezione 4.3) della campagna sperimentale per la validazione della simulazione alla microscala effettuata con Micro-SWIFT e dei dati di input ricavati dalla simulazione WRF. La simulazione è effettuata sul caso studio di Bora del 26 marzo 2026. Conclude il capitolo una sezione dedicata al confronto tra la simulazione Micro-SWIFT e delle simulazioni CFD RANS di riferimento (v. Sezione 4.3) presentate in (Ampatzidis et al., 2026), effettuate sul caso studio del febbraio 2012.

4.1 Convergenza della simulazione

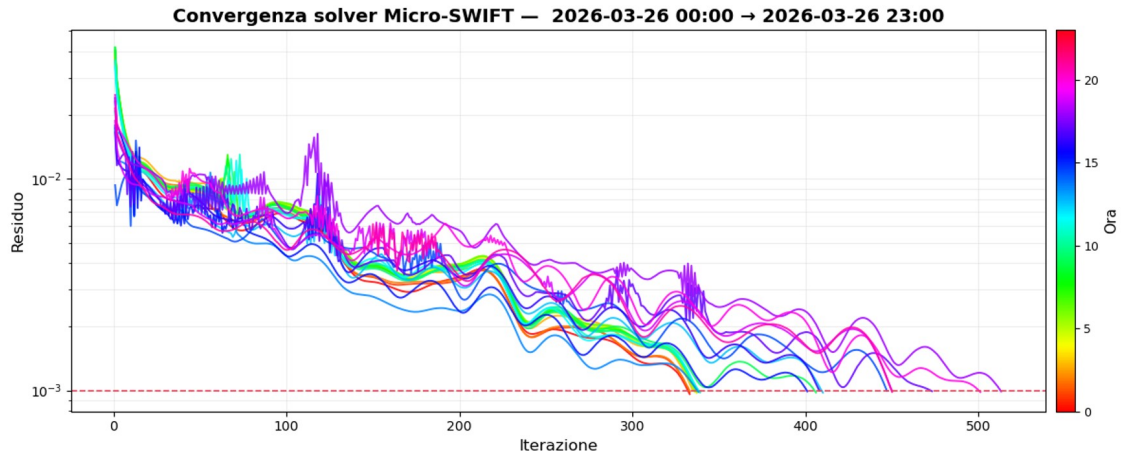


Figura 4.1: Andamento del residuo nel corso delle iterazioni dell'algoritmo di risoluzione del *solver* prognostico di Micro-SWIFT per le 24 ore di simulazione relative al 26 marzo 2026.

Una stima diagnostica della stabilità della soluzione della simulazione Micro-SWIFT è data dall'andamento del residuo nel corso delle iterazioni dell'algoritmo ricorsivo di risoluzione del *solver* RANS. Il residuo fornisce una misura di quanto è diversa una soluzione rispetto alla soluzione calcolata all'iterazione precedente: l'algoritmo termina quando, secondo un certo criterio di convergenza, le due soluzioni sono ritenute sufficientemente vicine. Nel caso del *solver* di Micro-SWIFT, la

distanza tra le due soluzioni viene valutata attraverso un residuo RMS (*Root Mean Square*) sul campo di velocità: denotando rispettivamente con R^n e con u_i^n il residuo e le componenti del campo di velocità ($i = 1; 2; 3$) calcolati all' n -esima iterazione sui punti-griglia (j, k, l) della griglia computazionale, il residuo si esprime con

$$R^n = \frac{\sqrt{\sum_{ijkl} (u_{ijkl}^n - u_{ijkl}^{n-1})^2}}{\sqrt{\sum_{ijkl} (u_{ijkl}^n)^2}}.$$

Il manuale di Micro-SWIFT raccomanda di scegliere come criterio di convergenza un valore soglia del residuo inferiore o uguale a $1 \cdot 10^{-3}$ che consenta di ottenere la convergenza della simulazione con al massimo 200 iterazioni ([ARIA Technologies, 2019](#)). Non potendo soddisfare entrambe le condizioni (v. Figura 4.1), probabilmente a causa delle alte intensità coinvolte e della complessità dell'orografia nel dominio della simulazione, si è scelta la soglia massima consigliata (appunto $1 \cdot 10^{-3}$) allentando il vincolo sul numero massimo di iterazioni consentite. La Figura 4.1 mostra l'andamento del residuo per ognuna delle 24 ore della simulazione per il giorno 26 marzo 2026, calcolate in parallelo sul cluster di calcolo del CRMA (Centro Regionale di Modellistica Ambientale) di ARPA FVG: la condizione di convergenza è stata soddisfatta in un numero di iterazioni compreso tra 325 e poco più di 500; dato che ogni iterazione ha richiesto un tempo di calcolo dell'ordine dei 15 secondi, la soluzione è stata ottenuta in circa 2 ore. Il residuo mostra un comportamento oscillatorio per tutte le ore, con almeno una zona dominata da modi ad alta frequenza prima della 200-esima iterazione dalle 4 UTC e con più zone a partire dalle 14 UTC. L'assenza per ogni ora di zone dominate da modi ad alta frequenza nelle 100 iterazioni precedenti alla convergenza induce a ritenere la soluzione ottenuta sufficientemente stabile.

4.2 Confronto con i dati LIDAR

Nelle Figure 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 viene verificata l'accuratezza dei dati di input forniti dalla simulazione WRF (v. Figure 4.3, e 4.5) e di conseguenza della simulazione Micro-SWIFT (v. Figure 4.4 e 4.6), nella rappresentazione dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale rispetto ai dati LIDAR DBS (profili verticali al di sopra della posizione del LIDAR) della campagna sperimentale (v. Sezione 3.4) nel corso della giornata del 26 marzo 2026. I profili WRF sono stati estratti presso la colonna di punti-griglia che ricade nel dominio della simulazione Micro-SWIFT (v. Figura 3.3), mentre i profili Micro-SWIFT sono stati estratti nella posizione del LIDAR. La diagnostica delle simulazioni, espressa in termini di bias, RMSE (*Root Mean Square Error*), NSD (*Normalised Standard Deviation*) e CI (*Correlation Index*), è sintetizzata nelle Tabelle 4.1 e 4.2 (la disponibilità dei dati LIDAR DBS permette il confronto con WRF solo nei primi 2 km, l'estensione verticale del dominio Micro-SWIFT permette il confronto con Micro-SWIFT solo nei primi 500 m). Quando la dinamica simulata è simile a quella osservata, ossia fino alle 12 UTC (per completezza la Tabella 4.1 mostra comunque gli indici anche per le ore successive), emerge rispettivamente un'ottima, buona e discreta correlazione

tra i profili di velocità orizzontale (> 0.8 per il 1° km, > 0.7 per il 2° km), verticale (> 0.6), e direzione (> 0.4 per i primi 500 m, > 0.5 per il 1° km, e > 0.7 per il 2° km), con una tendenza alla sottostima della direzione da nord ($< 18^\circ$ per i primi 500 m) e alla sovrastima delle velocità verticale (sottostima > 1 m/s in valore assoluto) e orizzontale (> 5 m/s). Nei report di ARPA FVG (Bonafè et al., 2022) e (Gallai et al., 2025) viene confermata la tendenza della configurazione operativa di WRF a sottostimare la direzione da nord e a sovrastimare l'intensità dei venti superficiali sul Carso; in particolare, in (Gallai et al., 2025) viene testata una configurazione di WRF con un maggior numero di livelli verticali rispetto alla configurazione operativa e con l'attivazione di parametrizzazioni legate a processi di interazione tra il moto e l'orografia di sottogriglia (onde di gravità a diverse scale, effetti di blocco dovuti a rilievi estesi, effetti di resistenza aerodinamica dovuta alla turbolenza generata da variazioni topografiche minori), fondamentali nello sviluppo locale degli eventi di Bora: dal lavoro emerge che con tali accortezze queste tendenze possono essere corrette anche mantenendo la risoluzione orizzontale a 2 km, migliorando potenzialmente l'accordo tra le simulazioni e le misure anche per casi studio simili a quello oggetto di questo lavoro. Da notare che lo schema di parametrizzazione dello strato limite planetario attivato in tale configurazione sperimentale, ossia lo schema YSU PBL (*YonSei University Planetary Boundary Layer scheme*), viene utilizzato anche nelle simulazioni presentate in (Cintolesi et al., 2024) sulla base di un test di sensibilità a vari schemi di parametrizzazione.

In ogni caso, nelle simulazioni Micro-SWIFT la velocità orizzontale viene corretta vicino alla superficie prima dell'interpolazione (v. Sezione 3.2), generando un generale miglioramento dell'accordo tra la simulazione e le misure (la sovrastima è ridotta a < 2 m/s). Per quanto riguarda la velocità verticale, invece, nella simulazione Micro-SWIFT l'accordo peggiora per tutti gli indicatori (bias di 2.8 m/s, RMSE di 3.0 m/s, NSD di 0.18 e soprattutto CI di 0.2): bisogna ricordare che il campo di velocità verticale non viene informato direttamente dalla simulazione WRF (l'interpolazione avviene solo per le componenti orizzontali, v. Sezione 3.2). In termini di bias, le discrepanze sono maggiori nel 1° chilometro rispetto al 2° chilometro per tutte le variabili, mentre l'errore quadratico medio è sempre maggiore del bias: > 6 m/s per la velocità orizzontale, ridotto a > 4 m/s in Micro-SWIFT, $> 25^\circ$ per la direzione e < 2 m/s per la velocità verticale; questi valori coincidono con valori relativi $> 15\%$ per la velocità orizzontale, $> 50\%$ per la direzione e $> 30\%$ per la velocità verticale. La variabilità viene generalmente sottostimata dal modello, con deviazioni standard dei dati simulati $< 85\%$ per la velocità orizzontale, $< 60\%$ per la velocità orizzontale e $< 45\%$ per la direzione: si ipotizza che la sottostima della variabilità sia in parte dovuta ai dati LIDAR, come conseguenza della frequenza limitata delle scansioni DBS ($\simeq 6$ minuti, che corrispondono al massimo a 10 valori per la determinazione di un profilo orario), sacrificata in fase di progettazione della campagna sperimentale per favorire l'alternanza con altri tipi di scansioni.

Di seguito viene confrontata la dinamica simulata con quella osservata ora per ora. L'inizio dell'evento di Bora coincide con il disturbo di un moto precedentemente meridionale da parte di un'intensa infiltrazione di aria fredda da nord-est (con un abbattimento di qualche grado e una lieve riduzione della stabilità, secondo la si-

Variabile < 12 UTC	1°-2° km (N° dati)	BIAS	RMSE	NSD (#)	CI (#)
WSPD	1° km (298)	6.2	7.2	0.84	0.85
5 - 35 m/s	2° km (101*)	1.8*	6.1*	0.78*	0.75*
WDIR	1° km (298)	-22.2	38.5	0.27	0.57
45° - 180°	2° km (99*)	-14.4*	33.3*	0.45*	0.77*
W	1° km (399)	1.2	1.6	0.32	0.68
-5 - 1 m/s	2° km (166*)	1.0*	1.2*	0.58*	0.67*
Variabile ≥ 12 UTC	1°-2° km (N° dati)	BIAS	RMSE	NSD (#)	CI (#)
WSPD	1° km (166)	-3.3	8.4	2.70	0.45
5 - 35 m/s	2° km (229)	6.0	7.4	1.32	0.33
WDIR	1° km (166)	-14.9	29.3	3.51	0.06
0° - 90°	2° km (229)	-13.9	14.8	0.75	0.71
W	1° km (254)	0.9	1.2	0.66	0.27
-3 - 1 m/s	2° km (405)	0.5	1.2	0.92	-0.14

Tabella 4.1: Diagnostica in termini di bias, *Root Mean Square Error*, *Normalized Standard Deviation* (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), *Correlation Index*, delle prestazioni della simulazione WRF nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima (prime righe, 00-11 UTC) e la seconda parte (ultime righe, 12-23 UTC) dell'evento di Bora del 26 marzo per il 1° e 2° chilometro AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). In asterisco gli indici calcolati su dati con una copertura temporale pari o inferiore al 50%.

Variabile < 12 UTC	500° m (N° dati)	BIAS	RMSE	NSD (#)	CI (#)
WSPD	WRF (123)	5.0	6.0	0.73	0.86
5 - 35 m/s	M-S. (123)	1.8	4.1	0.67	0.85
WDIR	WRF (123)	-17.6	28.4	0.35	0.40
45° - 180°	M-S. (123)	-17.2	26.0	0.37	0.44
W	WRF (189)	1.6	1.9	0.30	0.65
-5 - 1 m/s	M-S. (189)	2.8	3.0	0.18	0.20

Tabella 4.2: Diagnostica in termini di bias, *Root Mean Square Error*, *Normalized Standard Deviation* (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), *Correlation Index*, delle prestazioni della simulazione WRF e Micro-SWIFT (con dati di input della simulazione WRF) nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (00-11 UTC) per i primi 500 m AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). Il confronto è limitato alla prima parte dell'evento per carenza di osservazioni.

mulazione) che interessa i bassi strati, prima in superficie (primi 500 m) e poi anche più in quota (1-1.5 km): dalle 01 UTC si registra una repentina rotazione del vento nei settori di nord-est e un aumento delle velocità orizzontali superficiali e in valore assoluto delle velocità verticali dovuto al LLJ (*Low Level Jet*) generato dall'accelerazione del vento di discesa (velocità verticali negative) nel “canale di Trieste”; il LLJ presenta inizialmente una struttura a “naso singolo” evolvendo in mattinata in

Variabile < 6 UTC	1° km, lag (N° dati)	BIAS	RMSE	NSD (#)	CI (#)
WSPD	0 h (153)	7.0	8.0	0.78	0.84
5 - 35 m/s	-3 h (153)	2.3	5.1	0.89	0.79
WDIR	0 h (153)	-33.3	52.6	0.15	0.34
45° - 180°	-3 h (153)	10.8	35.1	0.54	0.89
W	0 h (208)	1.3	1.8	0.31	0.80
-5 - 1 m/s	-3 h (208)	2.1	2.3	0.60	0.72
Variabile 6-11 UTC	1° km, lag (N° dati)	BIAS	RMSE	NSD (#)	CI (#)
WSPD	0 h (145)	5.2	6.2	1.50	0.47
5 - 35 m/s	-3 h (145)	3.6	3.9	0.99	0.84
WDIR	0 h (145)	-10.5	11.5	0.90	0.79
45° - 180°	-3 h (145)	-3.5	6.4	0.49	0.74
W	0 h (191)	1.1	1.4	0.35	0.40
-5 - 1 m/s	-3 h (191)	1.0	1.4	0.24	0.36

Tabella 4.3: Diagnostica in termini di bias, *Root Mean Square Error*, *Normalized Standard Deviation* (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), *Correlation Index*, delle prestazioni della simulazione WRF nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante le prime 6 h (prime tre righe) e le seconde 6 h (ultime tre righe) dell'evento di Bora del 26 marzo per il 1° chilometro AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). Gli indici tendono a migliorare considerando un *lag* di 3 h tra dati osservati e dati simulati, suggerendo che la simulazione anticipa di 3 h l'inizio dell'evento di Bora.

una struttura a “doppio naso” (evidente alle 08 UTC, triangoli gialli alla seconda riga di Figura 4.3). Si ipotizza che la formazione della struttura a “doppio naso” sia dovuta a meccanismi *wave-driven*, ossia alla propagazione verticale di onde di gravità che regolano la formazione e la successiva dissipazione del secondo naso (Brogno et al., 2021). Gli strati intermedi (sopra gli 1.5 km) vengono interessati dall'infiltrazione solo qualche ora dopo l'inizio dell'evento. Lo sviluppo dell'infiltrazione viene rappresentato in maniera differente dalle simulazioni rispetto ai dati osservati (v. prima riga delle Figure 4.3 e 4.4) probabilmente proprio per l'assenza delle parametrizzazioni SSO (*Subgride-Scale Orography*), attivate, invece, nella configurazione sperimentale testata in (Gallai et al., 2025): mentre secondo le osservazioni alle 00 UTC, 01 UTC, 02 UTC aveva rispettivamente interessato solamente i primi 500 m, 1000 m, 1500 m nei settori orientali, secondo la simulazione WRF aveva interessato i primi 1700 m già dalle 22 UTC del giorno precedente (v. Figura 4.2); ciò è indice di un *lag* dell'inizio dell'evento tra simulazione e osservazione, a cui si aggiunge, probabilmente, una sovrastima della velocità di spostamento del LLJ da parte della simulazione; queste differenze potrebbero essere dovute a una sottostima dei flussi di quantità di moto associati alle onde di gravità orografiche e alla turbolenza, risultando in una sottostima della resistenza aerodinamica. Considerando un *lag* di 3 h (la simulazione anticipa l'inizio dell'evento), nelle prime 12 h della giornata si verifica un miglioramento di tutti gli indici per la velocità orizzontale e la direzione nel 1° chilometro, specie nei bias, nella correlazione della direzione nelle prime 6 h

e nella correlazione della velocità orizzontale nelle seconde 6 h.

Nel corso del primo pomeriggio (v. prima riga delle Figure 4.5 e 4.6) si registra una progressiva rotazione del vento verso i settori di nord-est a tutte le quote, accompagnata da una riduzione della velocità orizzontale nei bassi strati e a un generale appiattimento del gradiente verticale dovuto al rimescolamento turbolento. Un momentaneo aumento della velocità orizzontale nei bassi strati in quota nel corso del tardo pomeriggio è seguito da una riduzione in tarda serata, dalle 22 UTC (v. seconda riga delle Figure 4.5 e 4.6). Al netto della sottostima sistematica della direzione da nord, la rotazione viene rappresentata correttamente dalla simulazione solo nel 2° chilometro (correlazione > 0.7): secondo la simulazione, nei bassi strati il vento avrebbe virato bruscamente verso i settori settentrionali e nord-occidentali dalle 14 UTC, una rotazione che secondo le scansioni PPI del LIDAR (sostenuta anche dai dati al molo F.lli Bandiera, v. Sezione 3.5, e dai dati anemometrici della campagna sperimentale, v. Sezione 4.3) risulta confinata ai soli settori nord-orientali (v. il pannello in basso delle Figure 4.5 e 4.6 e i risultati della VAD in Figura 3.7); la sovrastima della rotazione potrebbe contribuire alla sottostima dell'intensità del vento superficiale. La dinamica della simulazione evolve in maniera molto diversa rispetto ai profili osservati (nel 1° km correlazioni rispettivamente < 0.5 , 0.3 , 0.1 per velocità orizzontale, velocità verticale e direzione; variabilità rispettivamente $> 250\%$ e 350% di quella dei dati osservati per velocità orizzontale e direzione): il LLJ simulato risulta sempre ben strutturato e a “naso singolo” (ulteriore indice di una rappresentazione non ottimale dei bilanci di quantità di moto), che si sposta al di sopra dei 1.5 km solo a partire dalle 15 UTC; il risultato è un'importante sovrastima del gradiente verticale di velocità orizzontale (bias negativo di velocità orizzontale nel 1° km e positivo nel 2° km). Dalle 18 UTC l'aumento nei dati osservati delle velocità orizzontali nei bassi strati in quota e negli strati intermedi migliora l'accordo con la simulazione a tali quote.

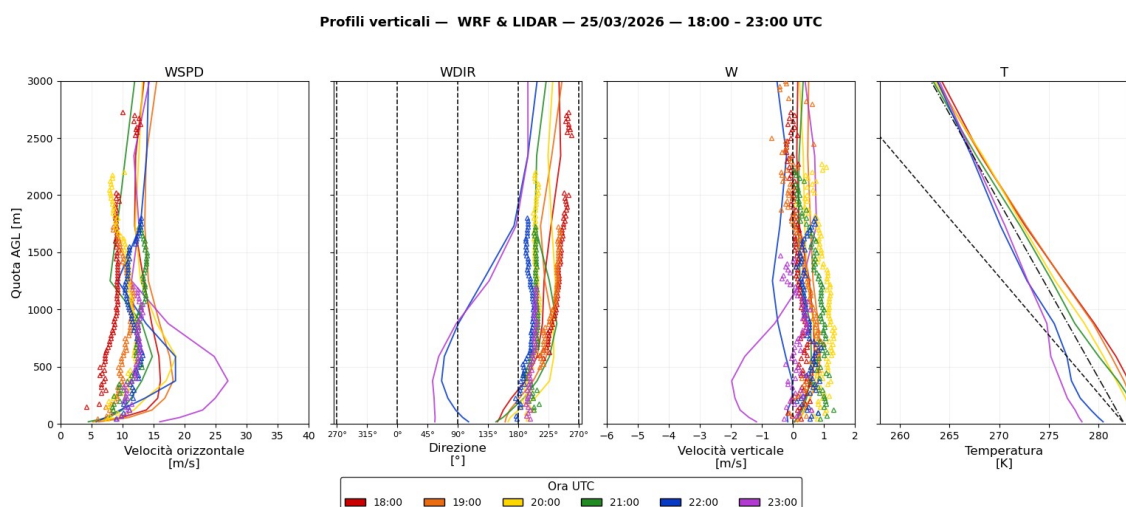


Figura 4.2: Da sinistra a destra: confronto dei profili simulati WRF di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la sera del 25 marzo (18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*).

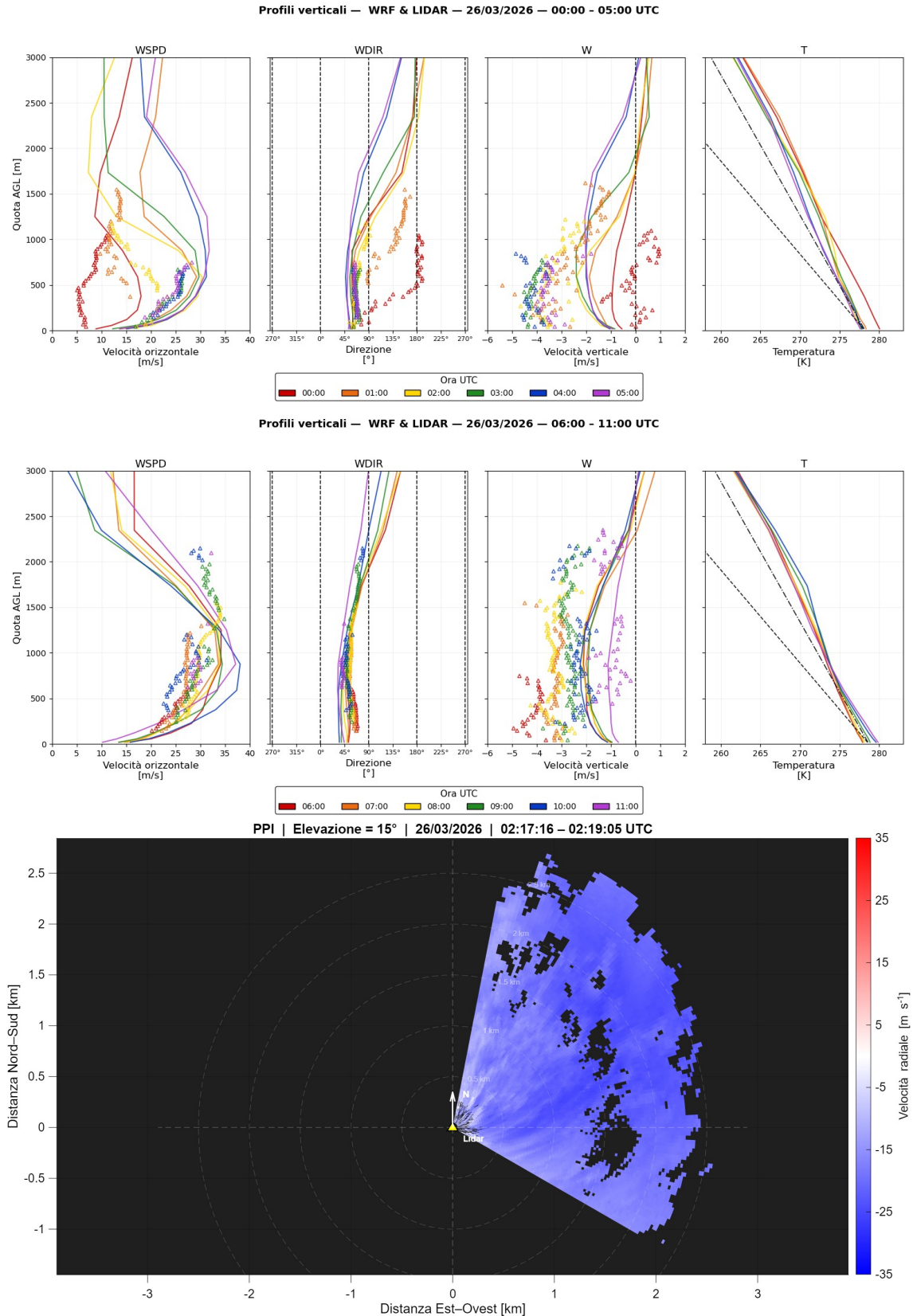


Figura 4.3: In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati WRF di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 00-05 UTC, seconda riga 06-11 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* notturno del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta).

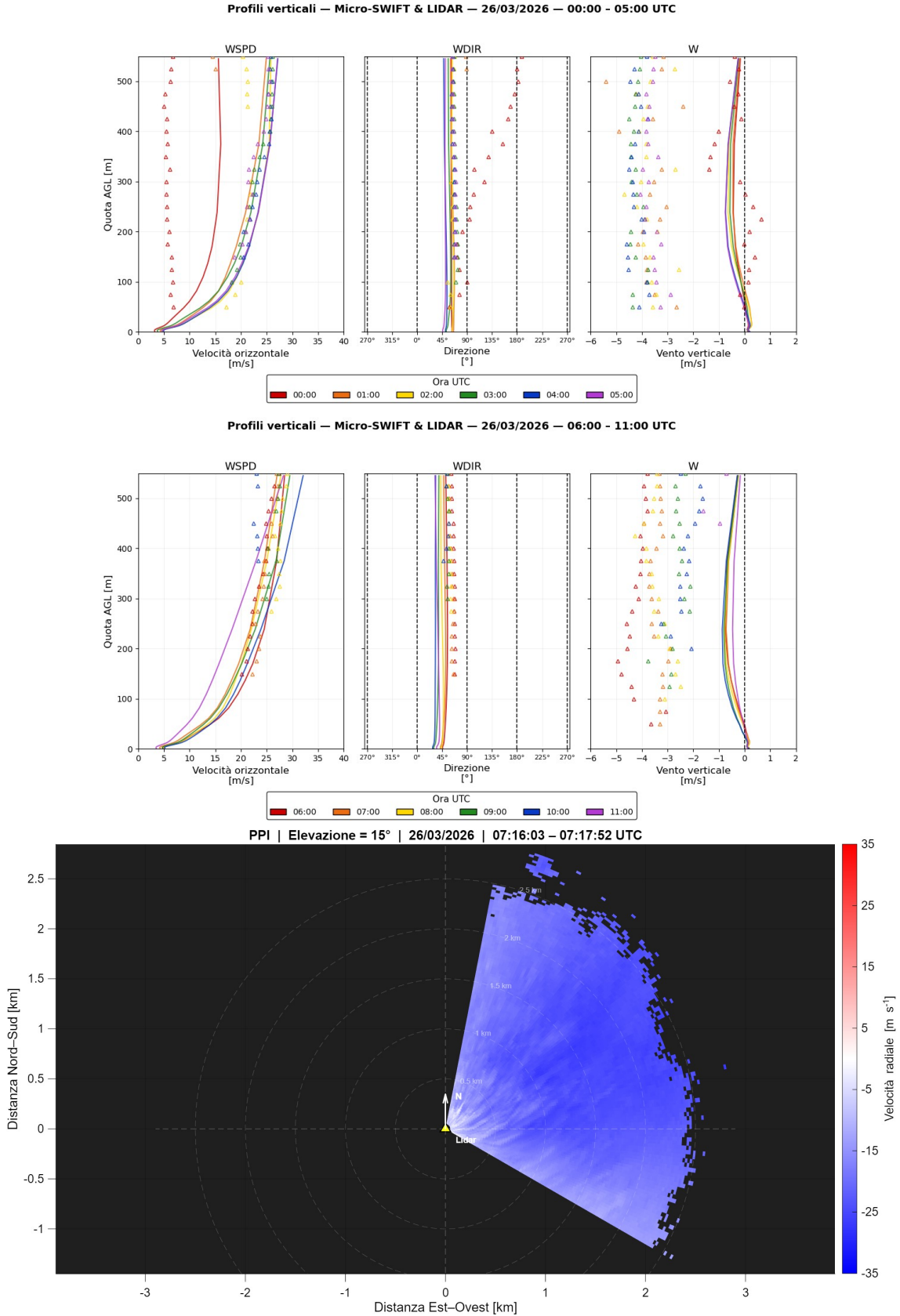


Figura 4.4: In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 00-05 UTC, seconda riga 06-11 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* mattutino del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta).

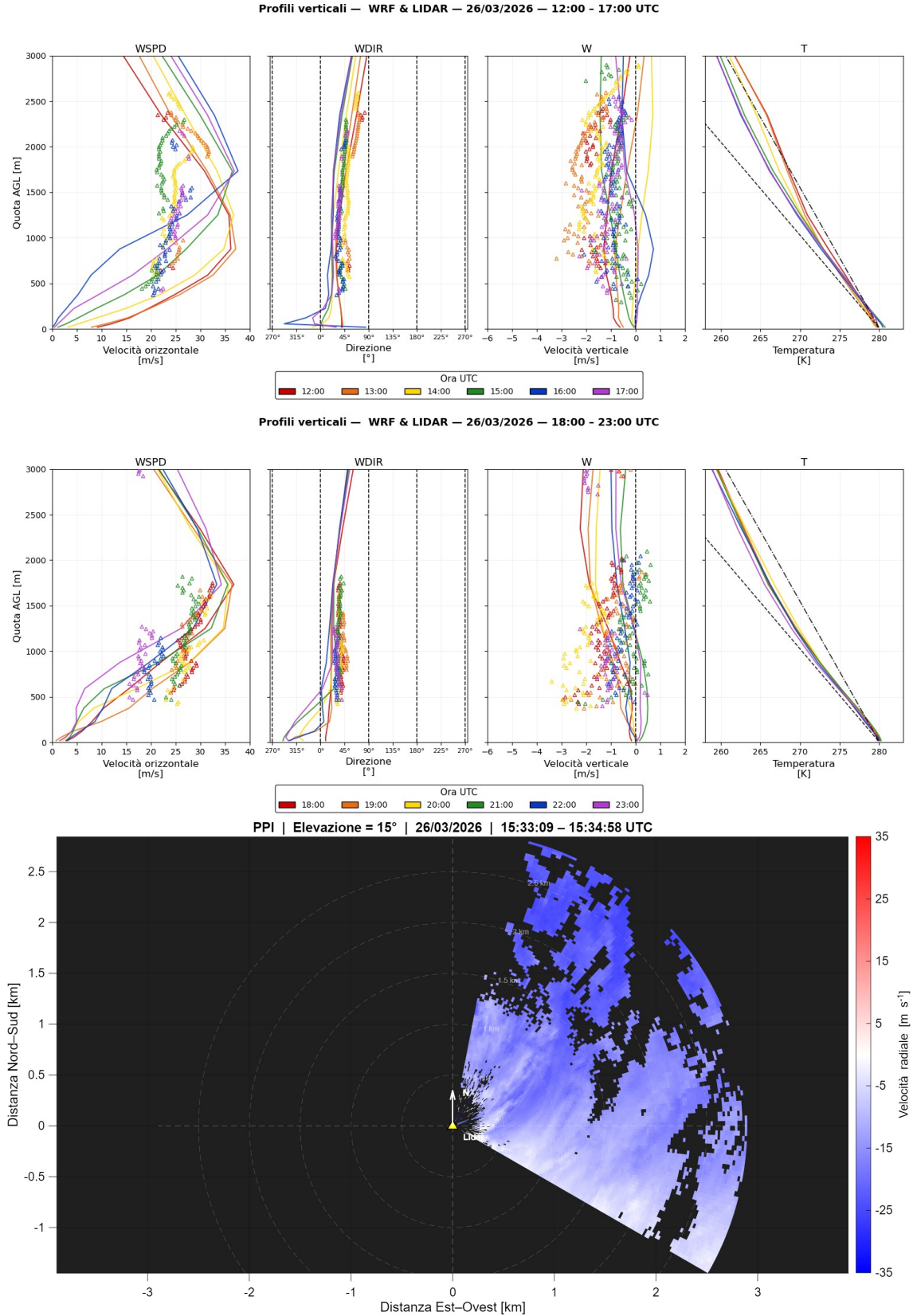


Figura 4.5: In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la seconda parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 12-17 UTC, seconda riga 18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* pomeridiano del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta).

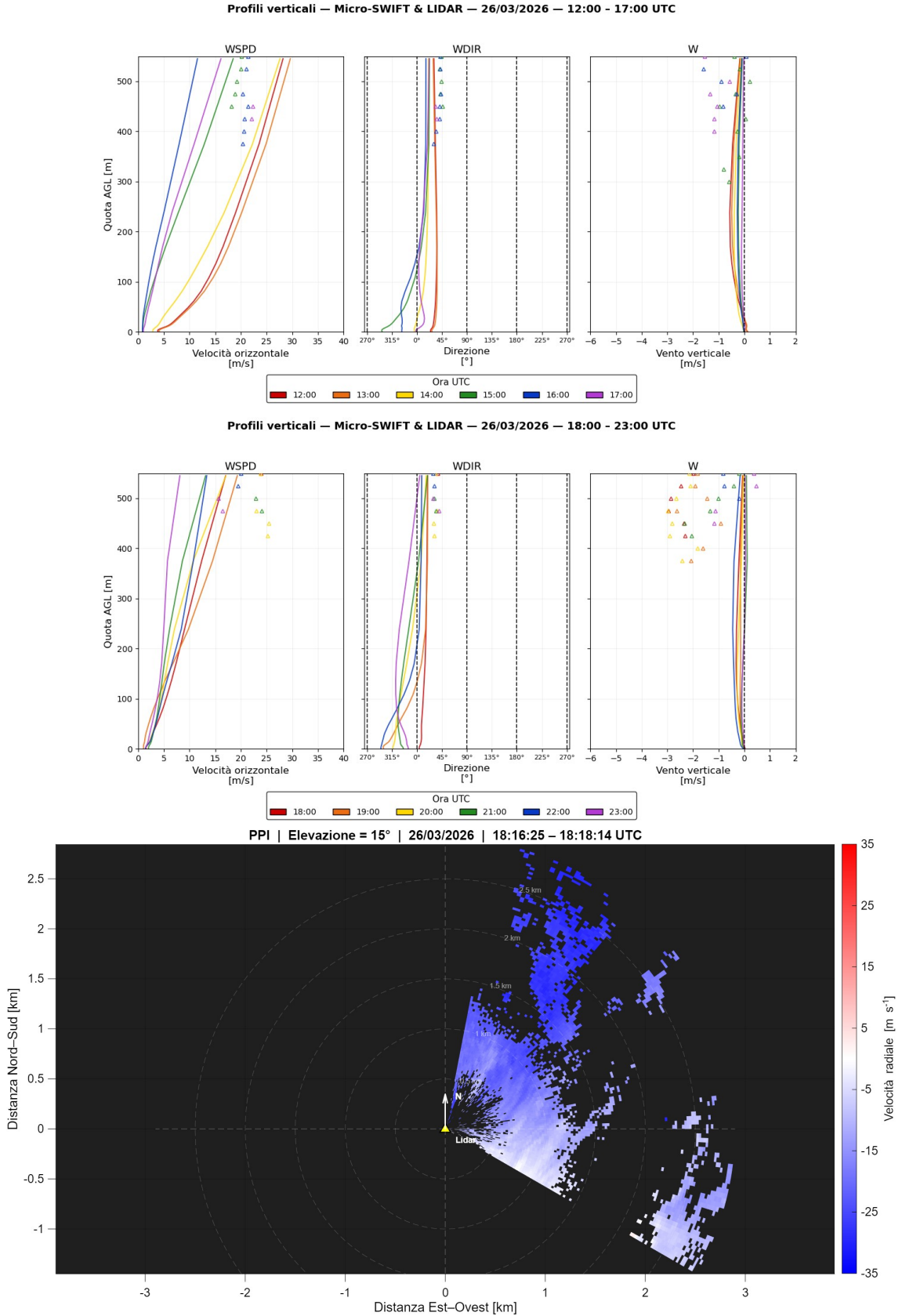


Figura 4.6: In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la seconda parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 12-17 UTC, seconda riga 18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno scan serale del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, range massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta).

4.3 Confronto con i dati anemometrici

Nelle Figure 4.8 e 4.9 viene verificata l'accuratezza della simulazione Micro-SWIFT nella rappresentazione del vento superficiale, sia in intensità che in direzione, e dell'energia cinetica turbolenta rispetto ai dati anemometrici della campagna sperimentale (v. Sezione 3.4). Innanzitutto, bisogna ricordare che dal primo pomeriggio (indicativamente dalle 15 UTC, v. Sezione 3.5) il vento superficiale ha virato verso i settori nord-est e nord/nord-est, rotazione confermata dai dati LIDAR (v. Sezione 4.2) e dall'andamento all'eliporto (primi due grafici della Figura 4.8). Nella simulazione Micro-SWIFT, invece, tale rotazione risulta sovrastimata, invadendo anche i settori nord e nord/nord-ovest. Come discusso nella Sezione 4.2, questo comportamento viene ereditato dai dati di input ed è dovuto a una rappresentazione non ottimale del vento superficiale da parte della configurazione operativa di WRF: per questo motivo il confronto con i dati anemometrici può essere ritenuto valido solamente fino alle 13 UTC, dato che un errore tale nella determinazione della direzione di provenienza del vento impatta sull'intero sviluppo dell'evento nel dominio alla microscala.

L'andamento dei dati anemometrici mostra delle differenze passando dall'eliporto (primi due grafici delle Figure 4.8 e 4.9) alle due torri dell'ospedale (ultimi due grafici delle Figure 4.8 e 4.9): mentre nel primo caso si distinguono cinque picchi principali di intensità del vento alle 02/02:30 UTC, alle 08:30/09 UTC, alle 14 UTC, alle 19 UTC e alle 21 UTC, nel secondo caso se ne registrano tre principali alle 01/01:30 UTC (anticipato rispetto all'eliporto), alle 04 UTC (presente anche all'eliporto ma secondario) e alle 08:30 UTC (registrato anche all'eliporto). Si confrontino anche i picchi rilevati al molo F.lli Bandiera (v. Figura 3.8), corrispondenti alle 02 UTC, alle 04 UTC, alle 09 UTC, a cui si aggiungono quelli delle 16 UTC (accennato anche all'eliporto), delle 20 UTC e delle 22 UTC (leggermente ritardati rispetto all'eliporto). L'assenza di picchi pronunciati sulle torri dopo le 14 UTC è probabilmente dovuta alla diversa direzione d'attacco del vento sul tetto degli edifici su cui sono posizionati gli anemometri, ricordando che tra l'eliporto e le torri c'è una differenza di quota di quasi 50 m (v. Tabella 3.1): mentre all'eliporto la direzione dall'inizio dell'evento è sempre nel primo quadrante, riflettendo la progressiva rotazione verso nord del moto indisturbato, alla Torre Medica e alla Torre Chirurgica dalle 15 UTC sconfinano rispettivamente nel secondo e nel terzo quadrante, secondo circolazioni locali fortemente condizionate dalla presenza degli edifici, circolazioni che evolvono con la rotazione del moto indisturbato. Presso i vari anemometri i picchi di intensità rilevati vengono rispecchiati, seppur con diverso peso relativo, dagli andamenti dell'energia cinetica turbolenta osservata: ad eccezione di un picco alle 05 UTC al secondo livello dell'eliporto (probabilmente un *outlier* perchè non rilevato al primo livello), si sono registrati dei picchi alle 02/02:30 UTC, alle 04/04:30 UTC, alle 08:30/09:30 UTC, alle 13/14 UTC, alle 19 UTC e alle 21 UTC.

All'eliporto il picco di intensità più alto risulta quello delle 02/02:30 UTC, rispettivamente superiore a 7.5 m/s e 8.5 m/s al primo e al secondo livello, accompagnato da valori di energia cinetica turbolenta rispettivamente superiori ai 15 m²/s² e ai 17.5 m²/s²; anche alle 21 UTC si sono registrati valori di energia cinetica turbolenta rispettivamente superiori ai 13 m²/s² e ai 14 m²/s², con picchi di intensità relati-

Posizione	$TI = \sqrt{TI^2} = \sqrt{TKE/3MKE}$	Legge di potenza $TKE = a MKE^b$	CI rispetto al <i>fit</i>
Eliporto L1	oss: 0.49 ± 0.08 sim: 0.10 ± 0.03	oss: $a = 1.85$ $b = 0.58$ sim: $a = 0.01$ $b = 1.65$	oss: 0.72 sim: 0.96
Eliporto L2	oss: 0.44 ± 0.07 sim: 0.12 ± 0.03	oss: $a = 1.10$ $b = 0.76$ sim: $a = 0.01$ $b = 1.59$	oss: 0.80 sim: 0.95
Torre Medica	oss: 1.2 ± 0.4 sim: 0.008 ± 0.004	oss: $a = 8.53$ $b = 0.41$ sim: $a < 10^{-3}$ $b = 1.01$	oss: 0.77 sim: 0.82
Torre Chirurgica	oss: 1.8 ± 0.5 sim: 0.007 ± 0.004	oss: $a = 12.14$ $b = 0.30$ sim: $a < 10^{-3}$ $b = 0.66$	oss: 0.60 sim: 0.88

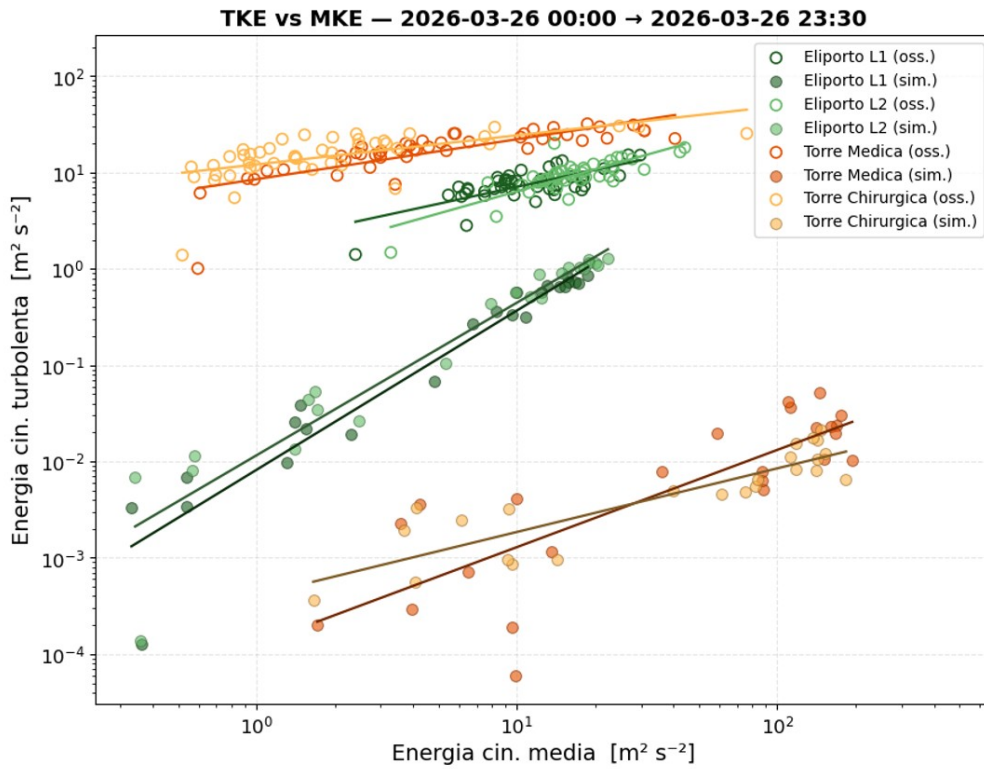


Figura 4.7: In alto, seconda colonna: stime dell'intensità media della turbolenza TI osservata e simulata nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale per l'evento di Bora del 26 marzo. L'errore statistico su TI è propagato dall'errore statistico su TI^2 . In alto, terza e quarta colonna: risultati dei *fit* tramite leggi di potenza mostrati in Figura 4.7. In basso: *scatterplot* sul piano energia cinetica turbolenta vs energia cinetica media dei dati osservati e simulati nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale per l'evento di Bora del 26 marzo con *fit* lineare in scala log-log.

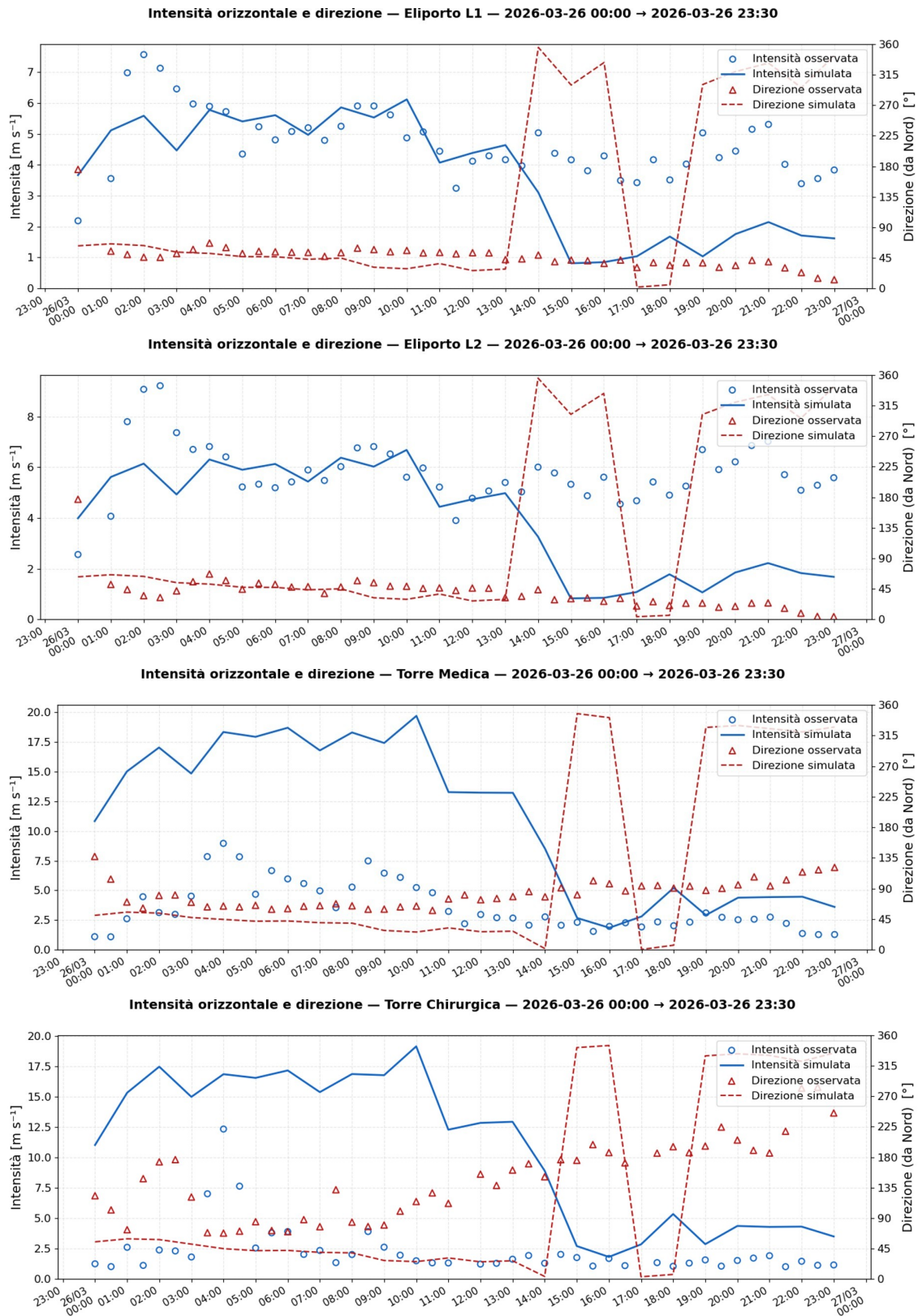


Figura 4.8: Confronto delle serie temporali simulate (dato orario, linee) e osservate (dato mediato su mezz'ora, punti) di intensità orizzontale (blu) e direzione (in rosso) del vento nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale (dall'alto in basso in ordine di altitudine) durante l'evento di Bora del 26 marzo.

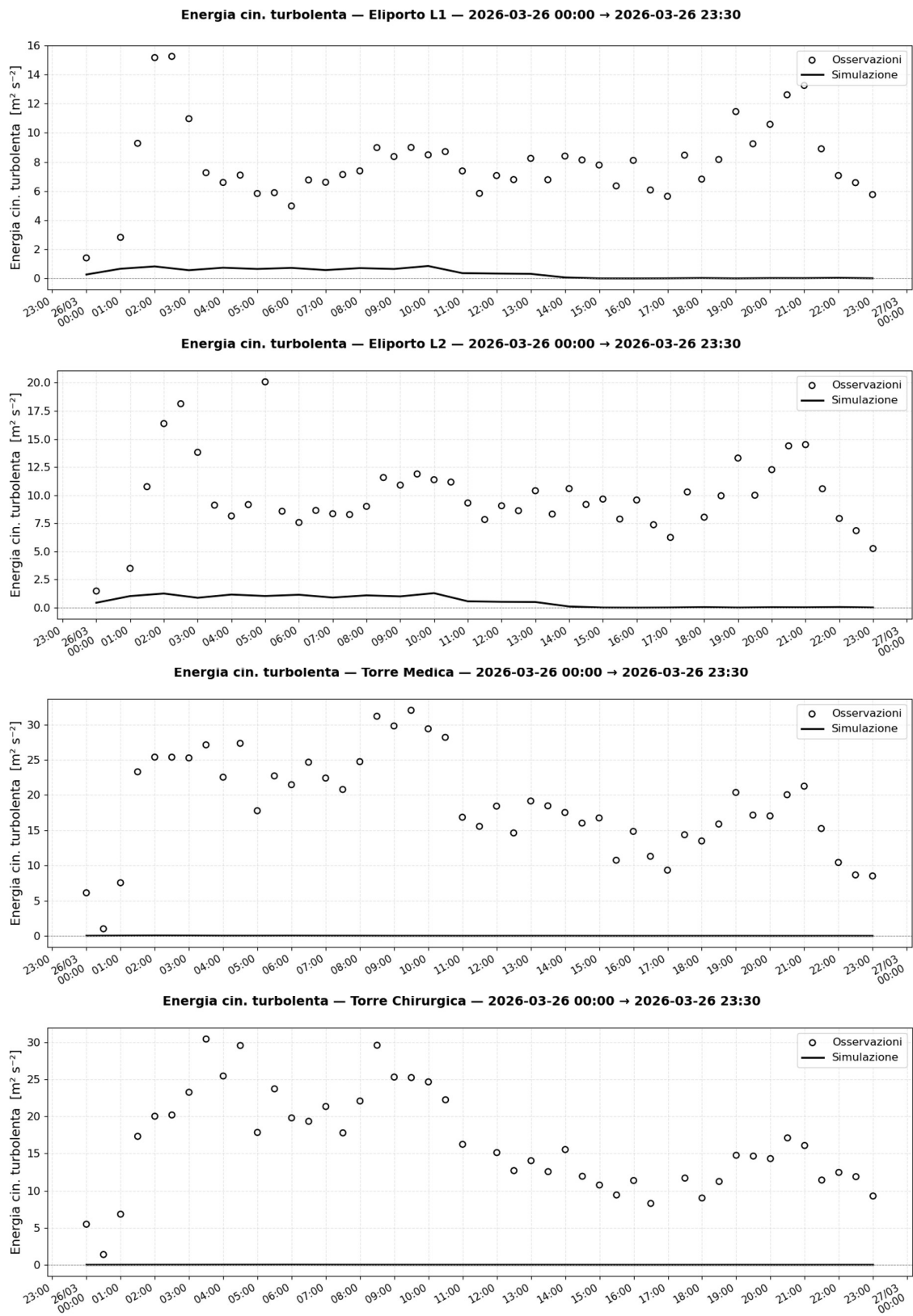


Figura 4.9: Confronto delle serie temporali simulate (dato orario, linee) e osservate (dato mediato su mezz'ora, punti) dell'energia cinetica turbolenta nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale (dall'alto in basso in ordine di altitudine) durante l'evento di Bora del 26 marzo.

vamente più bassi (rispettivamente superiori ai 5 m/s e ai 7 m/s). Sulle torri (si ricordano i circa 50 m di differenza di quota rispetto all'eliporto) il picco di intensità più alto risulta quello delle 04 UTC, rispettivamente superiore agli 8.0 m/s e ai 12 m/s alla Torre Medica e alla Torre Chirurgica, accompagnato da valori di energia cinetica turbolenta rispettivamente superiori ai 27 m²/s² e ai 30 m²/s²; anche alle 08:30/09:30 UTC si sono registrati valori di energia cinetica turbolenta rispettivamente superiori ai 32 m²/s² e ai 29 m²/s², con relativi picchi di intensità più bassi (rispettivamente superiori ai 7.5 m/s e ai 4 m/s).

Per quanto riguarda la simulazione, si può notare che le serie temporali mostrano gli stessi andamenti in tutte le località degli anemometri, indice che, in questi punti, la simulazione coglie il moto indisturbato piuttosto che le circolazioni locali dovute alla presenza degli edifici: la risoluzione di 4 m, oltre a non risolvere la superficie di copertura degli edifici (sulle torri dell'ospedale sono presenti ostacoli, come le griglie di areazione, con sezioni geometriche dell'ordine del metro quadro), non consente l'attivazione della *rooftop zone* in fase di modificazione del campo di velocità (v. Sezione 3.2), togliendo alla simulazione la possibilità di cogliere gli effetti di resistenza aerodinamica dovuti alle coperture degli edifici, che influenzano il moto proprio dove sono posizionati gli anemometri. Una diretta conseguenza dell'indifferenza del moto simulato alla presenza della copertura degli edifici è la netta sottostima dell'energia cinetica turbolenta presso tutti gli anemometri (che sulle torri risulta praticamente nulla nella simulazione, mentre all'eliporto la sottostima può essere anche di 20 volte), dovuta in parte anche ai limiti del modello di chiusura della turbolenza del *solver* di Micro-SWIFT (v. Sezioni 3.3 e 4.4). Sulle torri, dove gli effetti di resistenza aerodinamica sono amplificati dalla più alta velocità del moto indisturbato in quota e al contempo dalla maggiore lunghezza di rugosità associabile alle coperture (v. ultimi due grafici delle Figure 4.8 e 4.9), si registra una netta sovrastima di intensità (fino a 6 volte). All'eliporto, invece, l'ordine di grandezza dell'intensità simulata coincide con quello dell'intensità osservata quando il confronto è reso possibile dalla direzione d'attacco del vento (fino alle 13 UTC, prima della rotazione verso i settori nord-est e nord/nord-est), con un andamento che ricorda quello delle osservazioni (picchi intorno alle 02 UTC, 04 UTC, 09 UTC), con l'eccezione di una sottostima del picco di intensità delle 02 UTC (rispettivamente di circa 1.4 volte e 1.5 volte al primo e secondo livello dell'eliporto).

La Figura 4.7 sintetizza queste caratteristiche dei moti osservati e simulati in termini di energia cinetica turbolenta ed energia cinetica media, seppur bisogna sottolineare che il seguente confronto è basato su pochi dati (24 dati simulati, ogni ora, e 48 dati osservati, ogni mezz'ora). L'intensità media della turbolenza, definita in modo approssimato come

$$TI = \sqrt{TKE/3MKE},$$

dove TKE è l'energia cinetica turbolenta e MKE l'energia cinetica del moto medio, risulta tra 0.4 e 0.5 all'eliporto e addirittura 1.2 e 1.8 rispettivamente sulla Torre Medica e sulla Torre Chirurgica, mentre nelle simulazioni risulta intorno a 0.01 all'eliporto e praticamente nulla sulle torri (risultato della netta e generale sottostima di energia cinetica turbolenta e della sovrastima di energia cinetica del moto medio).

sulle torri). Come ci si aspetta, gli andamenti di energia cinetica turbolenta in funzione dell'energia cinetica del moto medio sono simili tra i due livelli dell'eliporto e tra le due torri, sia nelle osservazioni che nella simulazione (v. Figura 4.7). I dati simulati mostrano due *cluster*, uno associato alle ore precedenti alle 13 UTC (alta energia cinetica media) e uno associato alle ore successive, che comunque risultano coerenti con lo stesso *fit* (gli indici di correlazione sono compresi tra 0.60 e 0.80 per i dati osservati e tra 0.82 e 0.96 per i dati simulati). Le leggi di potenza ricavate dai fit sui dati osservati rivelano dipendenze sublineari con una sensibilità maggiore della turbolenza al moto medio all'eliporto rispetto che alle torri, che potrebbe essere dovuta alla minore produzione locale di energia cinetica turbolenta. Nelle simulazioni, tale sensibilità risulta sovrastimata tanto che, al netto della torre chirurgica, gli andamenti risultano superlineari, ulteriore indice dell'inadeguatezza nella rappresentazione della *rooftop zone* da parte della simulazione, e in generale della rappresentazione dell'energia cinetica turbolenta attorno agli edifici (si rimanda alla Sezione 4.4 per un approfondimento di questo aspetto).

4.4 Confronto con le simulazioni RANS

In questa sezione vengono confrontati in otto punti-griglia selezionati (v. Figura 4.10) i profili verticali di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta ottenuti attraverso la simulazione Micro-SWIFT con i profili ottenuti attraverso 3 simulazioni CFD di riferimento effettuate in (Ampatzidis et al., 2026) nella stessa area di interesse ma per il caso studio di Bora del febbraio 2012. Si tratta di simulazioni RANS con chiusura $k-\epsilon$ effettuate tramite il *software open-source* OpenFOAM (*Open Field Operation And Manipulation*): dominio ruotato di 67.5° , in direzione tipica della Bora; griglia computazionale complessa formata da una griglia di base, con risoluzione orizzontale minima di 20 m che aumenta avvicinandosi al terreno fino a 1.25 m, e una griglia secondaria per tenere conto degli edifici, con progressivi strati di rifinitura fino a una risoluzione massima di 0.625 m per la zona dell'Ospedale di Cattinara; condizioni iniziali a riposo per determinare la dinamica esclusivamente attraverso le condizioni al contorno. All'entrata del dominio sono stati imposti dei diversi profili di velocità orizzontale, energia cinetica turbolenta e dissipazione di energia cinetica turbolenta diversi per ogni simulazione: rispettivamente logaritmico, costante e iperbolico con la quota per la simulazione "LOG"; interpolati da una simulazione WRF effettuata per il caso studio del febbraio 2012 per le simulazioni "WRF-U" e "WRF-W", rispettivamente con profilo di velocità verticale nullo o interpolato. Per ridurre i costi computazionali della simulazione di riferimento, in sede di *pre-processing* dei dati topografici sono stati esclusi gli edifici che non hanno un impatto significativo sul moto attorno all'ospedale.

I profili relativi alla simulazione Micro-SWIFT usati per il confronto sono i profili medi delle ore 02-13 UTC, in cui l'evento di Bora ha conosciuto il suo pieno sviluppo con il LLJ collocato nei bassi strati in quota; le fasce grigie nelle Figure 4.11 e 4.12 contengono per ogni quota il 50% dei dati (25°-75° percentile) in quelle 12 h. I punti-griglia in cui viene effettuato il confronto (v. Figura 4.10), posti su tre sezioni parallele all'estensione del dominio delle simulazioni di riferimento, posizionate a nord, presso e a sud dell'Ospedale di Cattinara, sono individuate in (Ampatzidis

et al., 2026): a due punti per ogni sezione, posti su sezioni ortogonali prima e dopo l'Ospedale di Cattinara (a parte *downwind* che è posizionato sopravento a un piccolo centro abitato) si aggiungono ulteriori due punti sulla sezione che interseca l'ospedale (v. Figura 4.11), uno all'entrata est del dominio (*inlet*) e uno presso la valle appena sottovento l'altopiano da cui proviene il vento di Bora (*valley*). I profili sono adimensionalizzati attraverso $U_{\text{ref}}^{\text{SWIFT}} = 7.6 \text{ m/s}$ e $U_{\text{ref}}^{\text{CFD}} = 13.7 \text{ m/s}$, riferiti rispettivamente al caso studio del 26 marzo 2026 e al caso studio del febbraio 2012, calcolati al livello più vicino a 10 m AGL alla posizione *inlet* delle rispettive simulazioni.

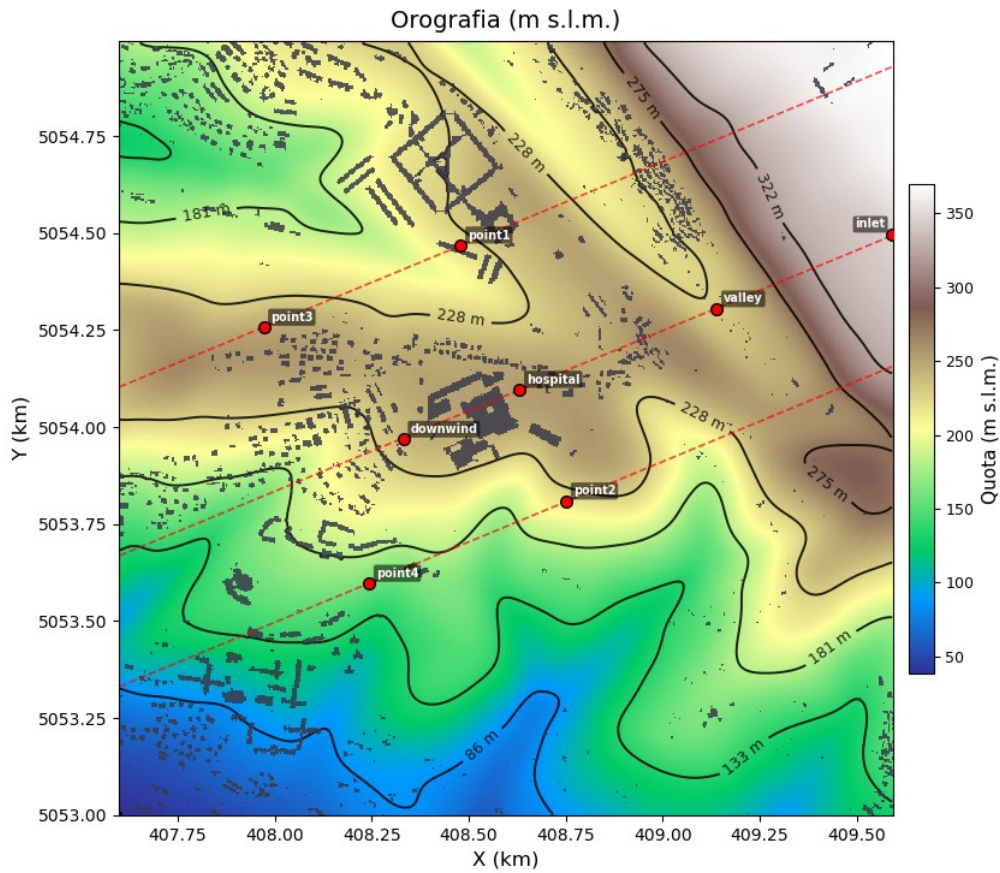


Figura 4.10: Mappa dell'orografia con le posizioni in cui viene effettuato il confronto tra i profili verticali della simulazione Micro-SWIFT e delle simulazioni CFD di (punti rossi collegati da sezioni verticali tratteggiate). Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2 \text{ m}$) sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

Le Figure 4.13 e 4.14 mostrano come il moto interagisce con l'orografia complessa del dominio della simulazione e con la presenza dell'edificato alle 02 UTC del 26 marzo 2026. Il vento, proveniente dall'altopiano all'angolo nord-est del dominio della simulazione (alla posizione *inlet* l'altitudine è pari quasi a 350 m s.l.m.), incontra in circa mezzo chilometro un improvviso dislivello negativo (v. Figura 4.10) dovuto alla presenza di una valle con sviluppo quasi trasversale (alla posizione *valley* l'alti-

tudine è indicativamente 230 m s.l.m., tuttavia più a nord la valle si approfondisce anche al di sotto dei 200 m s.l.m.), subendo una decelerazione a causa dell'improvvisa apertura verticale del canale: l'angolo di attacco del vento al profilo della valle e le alte intensità in gioco ($U_{\text{ref}}^{\text{SWIFT}} = 7.6$ m/s a 10 m AGL nella posizione *inlet*) contribuiscono alla separazione tra l'interno della valle, che si incanala con velocità di deriva inferiori a 2 m/s verso nord a tale quota AGL (v. pannello in alto Figura 4.13) e una zona di ricircolo nel punto più basso dell'attraversamento (v. pannello centrale Figura 4.14), e l'esterno della valle, dove il moto tende a scorrere mantenendo la direzione di attacco.

Confrontando, innanzitutto, i profili di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta presso *inlet*, tra la simulazione Micro-SWIFT e la simulazione di riferimento LOG (profilo logaritmico di velocità orizzontale all'*inlet*) emergono delle differenze macroscopiche dovute al diverso approccio modellistico e alle diverse condizioni imposte all'*inlet* (v. Figura 4.11), che si ripercuotono sull'intero dominio della simulazione durante l'attraversamento. Il profilo di velocità orizzontale simulato in Micro-SWIFT risulta superlogaritmico all'*inlet*, con una velocità adimensionale doppia a 200 m AGL rispetto al profilo logaritmico: tale andamento, come dimostra il maggior accordo con le simulazioni di riferimento WRF-U e WRF-UW piuttosto che con LOG in tutti i pannelli di Figura 4.12, è dovuto all'informazione dalla mesoscala portata dai profili interpolati dalla simulazione WRF, in grado di rappresentare il LLJ della Bora e quindi una maggiore velocità nei bassi strati superficiali rispetto al profilo logaritmico standard.

Prima di estendere il confronto ai profili di energia cinetica turbolenta, bisogna ricordare non viene informata dalla simulazione WRF, a differenza delle simulazioni di riferimento WRF-U e WRF-UW; inoltre, il modello di chiusura della turbolenza del *solver* prognostico di Micro-SWIFT è un modello algebrico basato essenzialmente sulla distanza dall'ostacolo più prossimo d (che satura a $d_{\text{max}} = 100$ m) e sui gradienti di velocità S_{ij} ($k = \sqrt{2}(\kappa d)^2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}$, v. Sezione 3.3), a differenza delle simulazioni RANS tradizionali che risolvono un'equazione di bilancio per k tramite modelli di chiusura come il modello $k-\epsilon$. Ne consegue che l'energia cinetica turbolenta simulata da Micro-SWIFT, a differenza delle simulazioni di riferimento, non può tenere conto direttamente dei contributi di trasporto, in particolare dell'avvezione dovuta al moto medio (trasporto di k attraverso il dominio della simulazione), rappresentando solo una stima del contributo prodotto dal gradiente di velocità locale (in questo caso soprattutto verticale). Date queste premesse, quindi, non deve sorprendere che in tutti i pannelli della Figura 4.12, diversamente dai profili di velocità orizzontale, per k l'accordo sia migliore con la simulazione LOG piuttosto che con le simulazioni WRF-U e WRF-UW, dato che queste ultime sono state ottenute imponendo un profilo di k all'*inlet* che tiene conto anche della turbolenza prodotta in sede di formazione del LLJ. Per lo stesso motivo, mentre all'*inlet* e alla *valley* l'accordo dei profili di energia cinetica turbolenta tra le simulazioni Micro-SWIFT e LOG risulta buono (v. Figura 4.11), con il procedere dell'attraversamento del dominio si acuisce la sottostima da parte di Micro-SWIFT anche rispetto a LOG (v. Figura 4.12).

Concentrandosi sui profili alla *valley*, si può innanzitutto notare che il massimo di energia cinetica turbolenta viene collocato correttamente intorno ai 65 m AGL, testimoniando la validità della stima di Micro-SWIFT dell'energia cinetica turbolenta

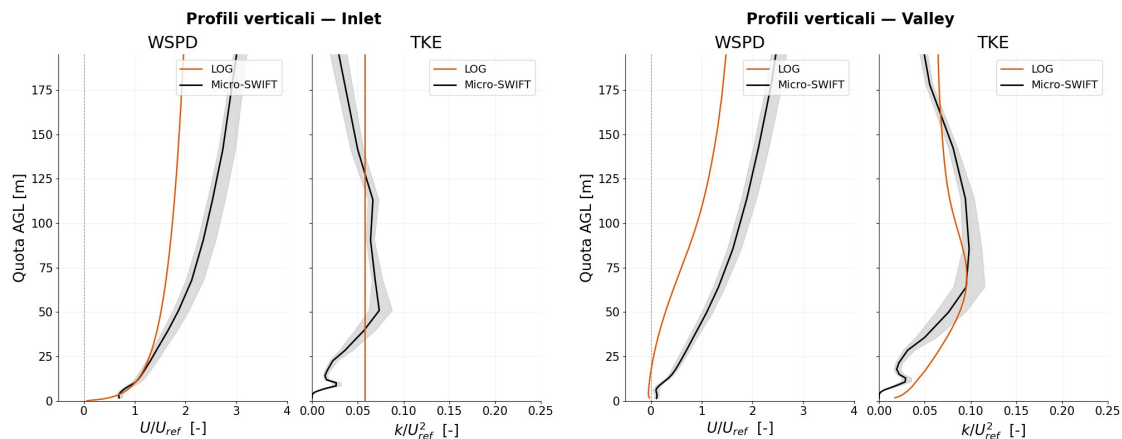


Figura 4.11: Da sinistra a destra: confronto dei profili di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta simulati attraverso Micro-SWIFT (in nero la media tra le ore 02-13 UTC e in grigio la fascia del 25°-75° percentile) con i profili simulati attraverso CFD (in arancione simulazione con profilo di vento logaritmico imposto all'entrata del dominio) nelle posizioni *inlet* e *valley*. I profili sono adimensionalizzati attraverso $U_{ref}^{SWIFT} = 7.6$ m/s e $U_{ref}^{CFD} = 13.7$ m/s calcolati alla posizione *inlet* più vicino a 10 m AGL delle rispettive simulazioni. Quote s.l.m.: *inlet* = 347.7 m, *point3* = 230.5 m;

quando viene prodotta localmente dall'interazione del moto col terreno complesso. Il profilo di velocità orizzontale, tuttavia, presenta un andamento diverso rispetto alla simulazione di riferimento LOG, caratterizzato da un cambio di concavità intorno ai 75 m AGL (profilo convesso al di sotto del flesso, concavo al di sopra), quindi in scia al pendio da cui proviene il vento di Bora, che si traduce in una regione di separazione (gradiente di velocità negativo) nei primi metri AGL (assente nella simulazione Micro-SWIFT nella posizione *valley*). Il comportamento sembra simile a quello analizzato in galleria del vento in (Song et al., 2000): il cambio di concavità sotto una certa quota del profilo di velocità è causato dal gradiente di pressione avverso, che si genera con l'apertura verticale del canale, e dal profilo inizialmente concavo del pendio (v. pannello in basso delle Figure 4.13 e 4.14), che fornisce allo strato limite una curvatura convessa in fase di discesa, con un progressivo aumento dell'altezza AGL del flesso con il procedere dell'attraversamento. In *valley* tale altezza corrisponde a più della metà della differenza di quota rispetto all'altopiano, mentre il picco di energia cinetica turbolenta si colloca poco sotto il flesso. In (Song et al., 2000) il pieno recupero della concavità avviene, in terreno piano, dopo una distanza corrispondente a 7 volte lo sviluppo orizzontale del pendio (che corrisponderebbe a più di 2 km nel dominio della simulazione); in questo caso, invece, l'aumento di altitudine successivo alla valle tende a ridurre l'estensione della scia (in Figura 4.12 si apprezza come nel caso LOG la concavità sia già stata recuperata alle successive posizioni del confronto, mentre nei casi WRF solamente dopo *hospital* e a *point4* considerando le rispettive sezioni verticali). Nella simulazione Micro-SWIFT, invece, tale comportamento non si verifica, incorrendo in una sovrastima della velocità orizzontale nelle posizioni *hospital*, *downwind*, *point2* e *point4*: si ipotizza che questa differenza sia attribuibile al diverso caso studio piuttosto che al diverso approccio modellistico, dovuta al minore U_{ref}^{SWIFT} rispetto a U_{ref}^{CFD} che, a parità di geometria, contribuisce quadraticamente al gradiente di pressione avverso (Kaimal et al., 1994); tuttavia, per confermare quest'ipotesi sarebbe necessario un confronto

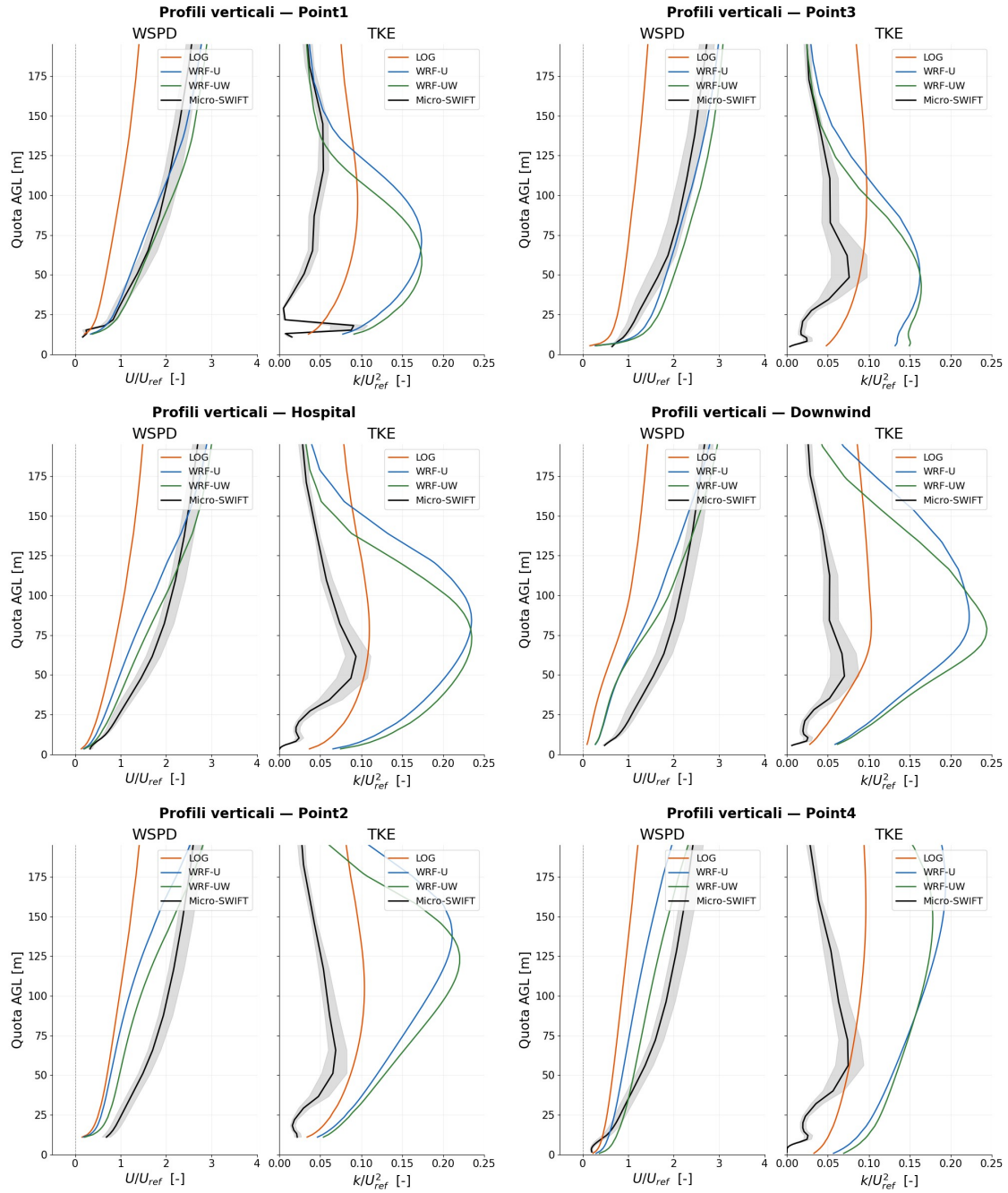


Figura 4.12: Da sinistra a destra: confronto dei profili di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta simulati attraverso Micro-SWIFT (in nero la media tra le ore 02-13 UTC e in grigio la fascia del 25°-75° percentile) con i profili simulati attraverso CFD (in arancione, blu e verde rispettivamente la simulazione con profilo di vento logaritmico, interpolato dai profil di velocità orizzontale di WRF e anche verticale di WRF imposti all'entrata del dominio) nelle posizioni relative alla prima (prima riga), seconda (seconda riga) e terza sezione (terza riga). I profili sono adimensionalizzati attraverso $U_{ref}^{SWIFT} = 7.6$ m/s e $U_{ref}^{CFD} = 13.7$ m/s calcolati alla posizione *inlet* più vicino a 10 m AGL delle rispettive simulazioni. Quote s.l.m.: *point1* = 204.4 m, *point3* = 247.6 m; *hospital* = 252.6 m, *downwind* = 237.7 m; *point2* = 215.6 m, *point4* = 158.6 m.

sullo stesso caso studio. D'altra parte, l'aumento dei gradienti verticali nelle simulazioni di riferimento WRF rispetto alla simulazione di riferimento LOG ne cambia la distribuzione verticale, generando una tendenza all'espansione delle scie e delle zone di ricircolo rispetto al caso LOG (Ampatzidis et al., 2026). Le considerazioni sulla

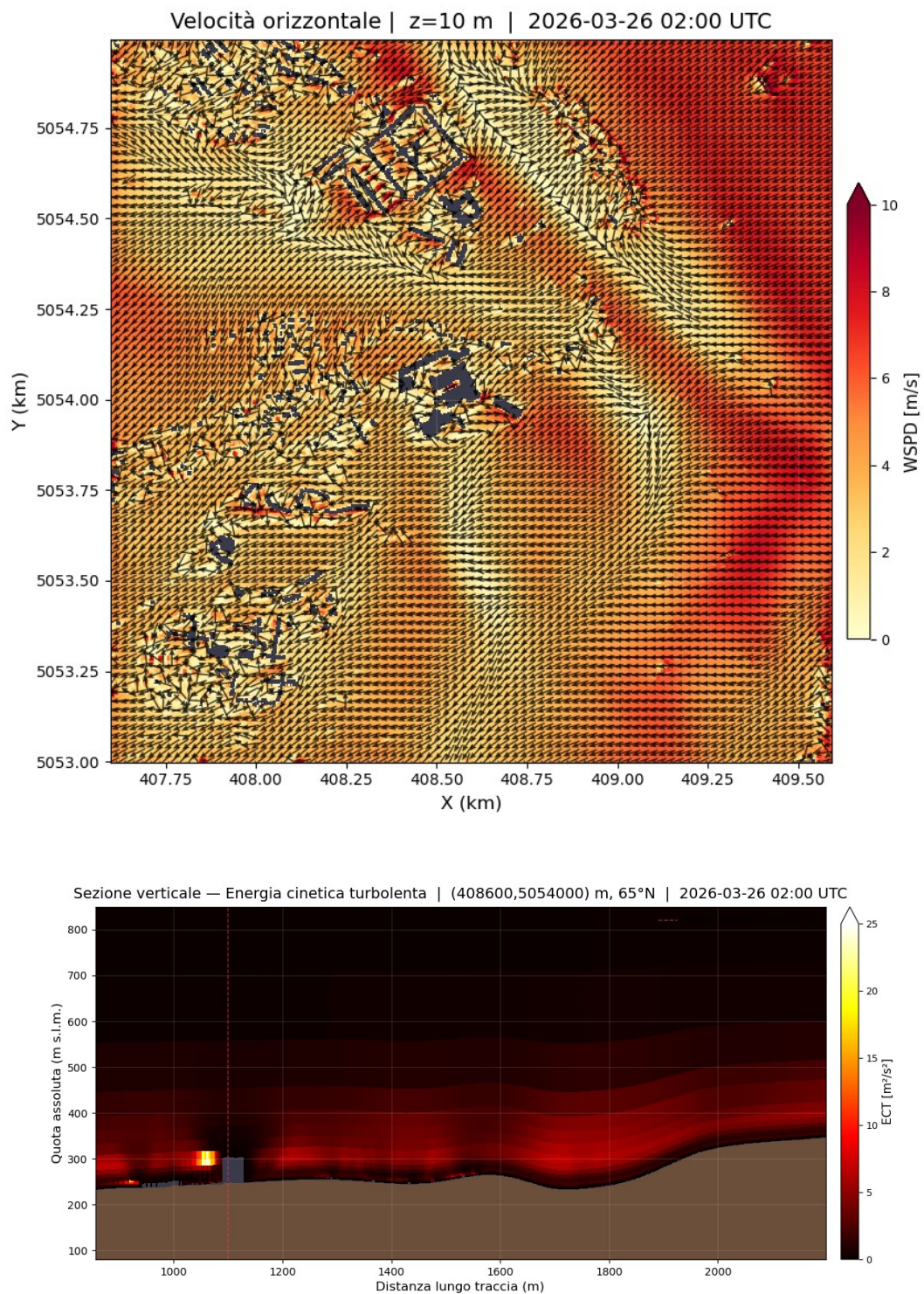


Figura 4.13: In alto: mappa del campo di velocità orizzontale al livello $z^* = 10$ m su tutto il dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84. In basso: sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di energia cinetica turbolenta per tutta la lunghezza del dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale.

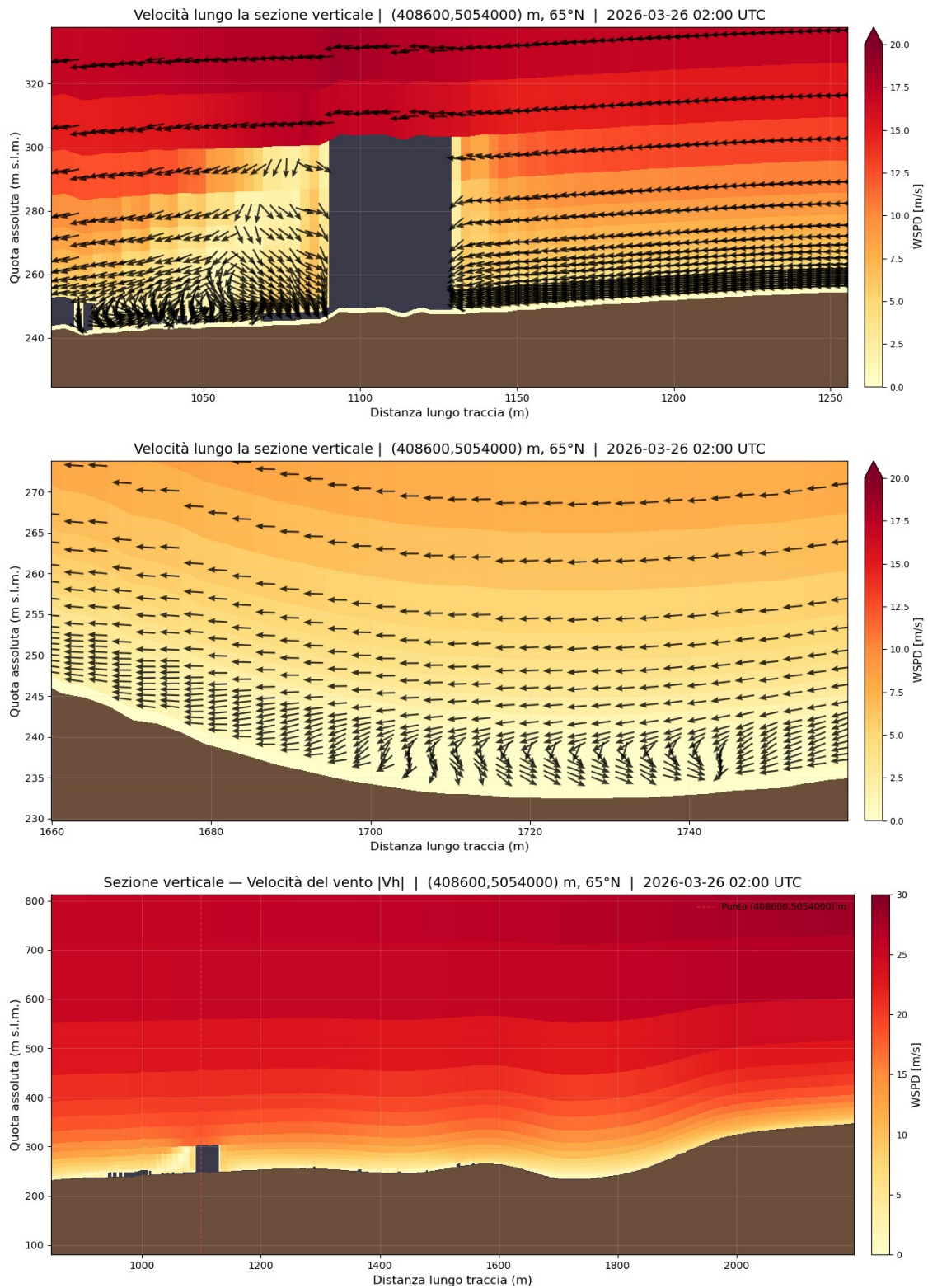


Figura 4.14: In basso: sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di velocità orizzontale per tutta la lunghezza del dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale. In alto e in centro: *zoom* sulle zone di ricircolo rispettivamente in scia all'Ospedale di Cattinara e presso la zona di risalita della valle.

concavità effettuate per la *valley* sembrano valere anche per la posizione *downwind*, dove i profili di velocità orizzontale delle simulazioni di riferimento mostrano un nuovo flesso in scia all'Ospedale di Cattinara.

Per la simulazione Micro-SWIFT, in prossimità del terreno si possono notare in tutti i pannelli delle Figure 4.11 e 4.12 un cambio di concavità del profilo di velocità orizzontale, presente anche nella simulazione Micro-SWIFT effettuata in (Dong et al., 2021), e un picco locale di energia cinetica turbolenta al di sotto dei 15-20 m AGL; si ipotizza che tali andamenti vicino al suolo siano degli artefatti dovuti al modello di chiusura nello strato superficiale del terreno: essendo $k \propto d^2 S_{ij} S_{ij}$ il prodotto di una funzione decrescente (d) e di una funzione crescente ($S_{ij} S_{ij}$) avvicinandosi al terreno, quando S_{ij} cresce più velocemente di un profilo logaritmico k aumenta mentre quando cresce più lentamente k diminuisce (nel caso logaritmico il gradiente verticale scala come $1/d$, quindi $k \propto d^2 S_{ij} S_{ij}$ è costante con la quota); di conseguenza, se il profilo risulta sovralogaritmico, una sottostima del gradiente di velocità in prossimità del terreno (il *solver* Micro-SWIFT non utilizza delle *near wall functions* per gestire lo strato interno del terreno e in generale degli ostacoli, a differenza delle simulazioni di riferimento) può generare un massimo artificiale di energia cinetica turbolenta. Alla posizione *point1* (v. pannello in alto a sinistra della Figura 4.12), invece, il picco di energia cinetica turbolenta è dovuto alla presenza di un edificio sopravento nella simulazione Micro-SWIFT, che nelle simulazioni di riferimento era stato escluso per la lontananza dall'Ospedale di Cattinara (v. Figura 4.10).

Le sezioni verticali delle Figure 4.13 e 4.14 mostrano dei gradienti verticali di velocità sviluppati per la presenza del LLJ, una lieve riduzione della velocità orizzontale su tutti i livelli percorrendo la sezione nel verso del vento (a causa del generale abbassamento dell'orografia, coerentemente con (Ampatzidis et al., 2026)), e un massimo di energia cinetica turbolenta costantemente sopra i 50 m AGL. Da notare un picco locale di energia cinetica turbolenta in fase di risalita dal fondo della valle, coerentemente con la simulazione di riferimento LOG per le motivazioni discusse in precedenza. Diverso risulta il comportamento dell'energia cinetica turbolenta in prossimità degli ostacoli: dal pannello in basso della Figura 4.13, concentrandosi sull'Ospedale di Cattinara, si può vedere un massimo nella parte superiore della scia dell'edificio (dove il gradiente di velocità è massimo) e un minimo sopra e sopravento alla copertura (dovuto a un'accelerazione al di sopra della copertura che riduce il gradiente verticale, si ricorda che non viene rappresentata la *rooftop zone*, v. Sezione 3.1); il comportamento è opposto nelle simulazioni di riferimento, con massimi presso gli spigoli dell'edificio in cui impatta il vento (dove la separazione del moto è più netta) e minimi in scia e nelle zone di stagnazione, mostrando l'incapacità del modello di chiusura di Micro-SWIFT, confermata in (Oldrini et al., 2019), di rappresentare adeguatamente la turbolenza in prossimità agli ostacoli. Nello stesso lavoro viene sottolineato che nelle zone di interazione tra il moto e gli ostacoli l'energia cinetica turbolenta presenta degli andamenti troppo localizzati e dipendenti dai gradienti di velocità, risultando in una sottostima globale.

Le Figure 4.15 e 4.16, infine, mostrano delle sezioni orizzontali del campo di vento simulato con Micro-SWIFT a varie quote (circa 10% e 20% dell'altezza dell'o-

spedale per la Figura 4.15 e circa 50% e 80% per la Figura 4.16) presso l'Ospedale di Cattinara, in cui si può vedere un buon accordo qualitativo con il moto medio delle simulazioni di riferimento. Come in (Ampatzidis et al., 2026), nelle rientranze sopravento si formano delle zone di stagnazione e alla base sopravento dell'ospedale delle zone di ricircolo, mentre a tutte le altezze emergono tre zone di accelerazione (a cui si aggiunge la canalizzazione tra la struttura più a sud e l'edificio a sud-est nelle sezioni più a bassa quota): le due zone esterne agli spigoli delle torri, dove il moto è quasi tangente allo spigolo, e la canalizzazione centrale alle due strutture principali dell'ospedale. Sottovento all'ospedale e in scia alle torri (le scie risultano meno sviluppate in direzione longitudinale) il moto tende a curvare in senso antiorario dallo spigolo della torre più a nord e dalla canalizzazione centrale verso la porzione interna della scia, ma, a differenza di (Ampatzidis et al., 2026), le zone di ricircolo non si chiudono; inoltre, non si forma la zona di ricircolo sottovento alla canalizzazione centrale, presente nelle simulazioni di riferimento: si ipotizza che anche queste differenze siano attribuibili principalmente alla minore intensità $U_{\text{ref}}^{\text{SWIFT}}$ relativa all'evento, che riduce in scia i gradienti di velocità; tuttavia, per confermare quest'ipotesi sarebbe necessario un confronto sullo stesso caso studio. Si sottolinea, inoltre, la possibile presenza di difficoltà da parte Micro-SWIFT nel rappresentare l'interazione tra le scie nelle zone ad alta densità di edifici dato che vengono trattate separatamente edificio per edificio nel calcolo dei campi diagnostici iniziali (Schiavini, 2026): ciò potrebbe essere la causa dell'assenza della zona di ricircolo sottovento alla canalizzazione centrale.

4.5 Riepilogo dei risultati

Il test sulla catena modellistica, effettuato sull'evento di Bora del 26 marzo 2026, ha mostrato una buona rappresentatività nella descrizione del vento superficiale in termini di bias e correlazione (v. Tabella 4.2) finquando l'evoluzione dell'evento simulata è simile a quella osservata, ossia fino alle 13 UTC. Va sottolineato che la significatività delle seguenti considerazioni, basate su un singolo evento, andrebbe verificata su altri casi studio di Bora. In Micro-SWIFT la velocità orizzontale risulta sovrastimata di circa 2 m/s con una correlazione superiore a 0.8, la direzione da nord viene sottostimata di circa 17° con una correlazione poco superiore a 0.4; la simulazione Micro-SWIFT, inoltre, tende a peggiorare gli indici per la velocità verticale rispetto alla simulazione WRF (sottostima di circa 3 m/s in valore assoluto e correlazione di 0.2): ciò potrebbe essere dovuto al fatto che nella catena modellistica la velocità verticale non viene interpolata dai dati di input. Considerando un lag di 3 h tra l'inizio dell'evento simulato da WRF e l'inizio dell'evento reale, nelle prime 12 h gli indici relativi a velocità orizzontale e direzione tendono a migliorare per il 1° km (v. Tabella 4.3), specialmente la correlazione della direzione nelle prime 6 h e di velocità orizzontale nelle seconde 6 h, suggerendo che la simulazione WRF tende ad anticipare l'inizio dell'evento. Oltre a ciò, dopo le 13 UTC emergono criticità importanti nella simulazione dell'evoluzione oraria dell'evento di Bora da parte della simulazione WRF (che si ripercuotono sulla simulazione Micro-SWIFT) e nella descrizione del campo di energia cinetica turbolenta in terreno complesso da parte della simulazione Micro-SWIFT, in particolare in prossimità degli edifici (dovute al mo-

dello algebrico di chiusura della turbolenza del *solver* prognostico di Micro-SWIFT). Mentre la seconda criticità, confermata in (Oldrini et al., 2019), è intrinseca all’approccio modellistico del modello alla microscala, per la prima potrebbero esserci dei margini di miglioramento senza stravolgimenti della catena modellistica: sebbene la risoluzione orizzontale della configurazione operativa di WRF (2 km) non sia ideale per rappresentare un evento di Bora alla microscala in terreno complesso, modulato da processi di interazione con l’orografia (onde di gravità orografiche e turbolenza), i test effettuati in (Gallai et al., 2025) con una configurazione sperimentale di WRF, dotata di un numero maggiore di livelli verticali e di parametrizzazioni SSO (*Subgride-Scale Orography*) mirate proprio a migliorare la rappresentazione dei bilanci di quantità di moto, risolvono il problema della sovrastima dell’intensità dei venti sul Carso, suggerendo che tale configurazione possa migliorare preliminarmente la descrizione degli eventi di Bora anche senza un aumento della risoluzione orizzontale.

L’evento di Bora è iniziato alle prime ore notturne del 26 marzo 2026, con l’incursione di un LLJ (*Low Level Jet*) di aria fredda da nord-est in un moto precedentemente meridionale, interessando prima i bassi strati e poi gli strati intermedi, con picchi di velocità che si sono verificati qualche ora dopo l’inizio dell’evento (v. Sezione 4.2). Dai dati LIDAR sembra che in mattinata il LLJ abbia assunto una temporanea configurazione a “doppio naso”, legata all’interazione tra moto medio e onde di gravità, mentre dal primo pomeriggio abbia conosciuto una rotazione verso i settori settentrionali e un’appiattimento del gradiente verticale di velocità, dovuto probabilmente al rimescolamento turbolento: questi processi non vengono colti adeguatamente dalla simulazione WRF, che anticipa di 3 h l’inizio dell’evento, con un LLJ sempre a “naso singolo” che permane anche durante la seconda parte della giornata, sebbene dal primo pomeriggio si alzi di quota; la rotazione pomeridiana, inoltre, viene sovrastimata dalla simulazione nel 1° km, in particolare nei primi 500 m, in cui vengono interessati anche i settori nord-occidentali, rendendo la simulazione Micro-SWIFT non confrontabile con l’evento reale dopo le 13 UTC.

Di riflesso, le serie temporali simulate di velocità orizzontale e direzione nelle posizioni degli anemometri sono confrontabili solamente fino alle 13 UTC (v. Sezione 4.3). Il miglior accordo si ottiene agli anemometri dell’eliporto, esposti maggiormente al moto indisturbato, sia in velocità che in direzione, mentre sulle torri dell’ospedale, dove gli effetti di resistenza aerodinamica sono amplificati dalla più alta velocità del moto indisturbato in quota, si registra una netta sottostima della direzione da nord e, soprattutto, una netta sovrastima della velocità. Alla sovrastima della velocità sulle torri contribuisce sicuramente l’impossibilità di rappresentare la *rooftop zone* degli edifici a causa della risoluzione della configurazione della simulazione Micro-SWIFT (v. Sezione 3.2). Per lo stesso motivo, a cui si aggiungono le limitazioni del modello di chiusura della turbolenza del *solver* prognostico, l’energia cinetica turbolenta viene sottostimata di vari ordini di grandezza nelle posizioni degli anemometri.

Il confronto con le simulazioni *benchmark* CFD RANS, con profili imposti all’*inlet* del dominio alla microscala analitici (LOG) oppure interpolati da una simulazione WRF (WRF-U e WRF-UW), viene effettuato attraverso profili medi adimensionali

considerando le ore particolarmente rappresentative del pieno sviluppo dell'evento. Per effettuare un confronto quantitativo sarebbe necessario disporre di simulazioni di riferimento anche per il caso studio del 26 marzo 2026, motivo per cui in questo lavoro ci si è limitati a considerazioni qualitative. In tutte le posizioni del confronto, per la velocità orizzontale si registra un miglior accordo con le simulazioni *benchmark* informate da WRF rispetto alla simulazione *benchmark* LOG, coerentemente con la presenza di un LLJ e quindi di una velocità maggiore nei bassi strati. L'energia cinetica turbolenta, invece, risulta sottostimata, principalmente perchè non viene informata dalla simulazione WRF. La sottostima è maggiore sottovento alla valle, suggerendo che in parte è dovuta alle limitazioni del modello algebrico di chiusura della turbolenza del *solver* prognostico di Micro-SWIFT: non essendo basato sulla risoluzione di equazioni di bilancio dell'energia cinetica turbolenta, non può tenere conto direttamente dei contributi di trasporto, compreso il trasporto dovuto al flusso medio. Per lo stesso motivo, il campo di energia cinetica turbolenta in prossimità degli ostacoli non può essere ritenuto affidabile (Oldrini et al., 2019), nonostante si formino qualitativamente le stesse zone di stagnazione, di ricircolo e di accelerazione del moto medio attorno alle strutture dell'Ospedale di Cattinara. A parità di geometria, le minor intensità coinvolte nell'evento del 26 marzo 2026 rispetto al caso studio del febbraio 2012 tendono a ridurre le estensioni delle scie e delle zone di ricircolo nella simulazione Micro-SWIFT rispetto alle simulazioni *benchmark*.

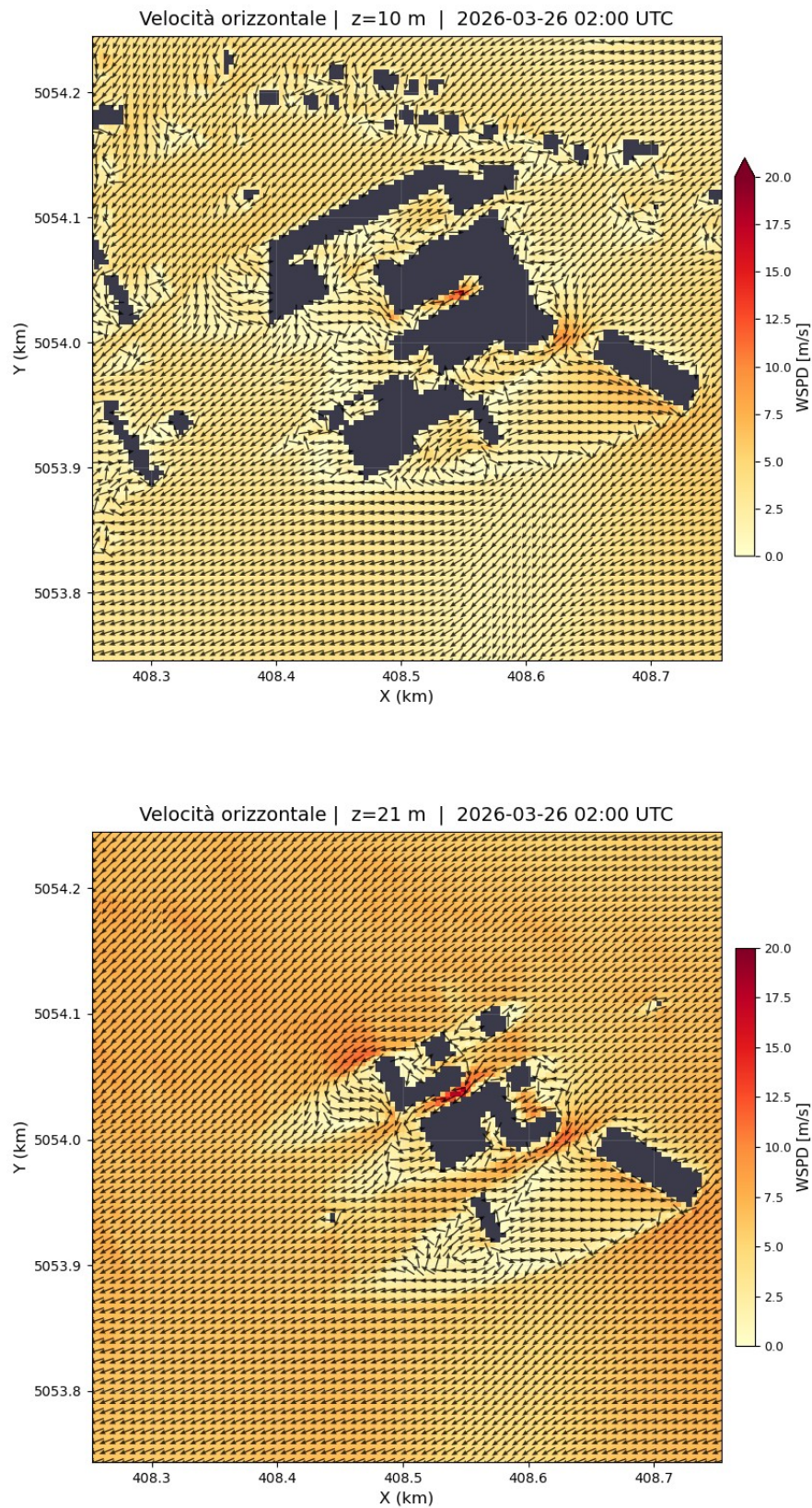


Figura 4.15: Mappe del campo di velocità orizzontale simulato ai livelli $z^* = 10$ m (circa al 10% dell'altezza dell'edificio, pannello in alto) e $z^* = 21$ m (circa al 20% dell'altezza dell'edificio, pannello in basso) attorno all'Ospedale di Cattinara alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

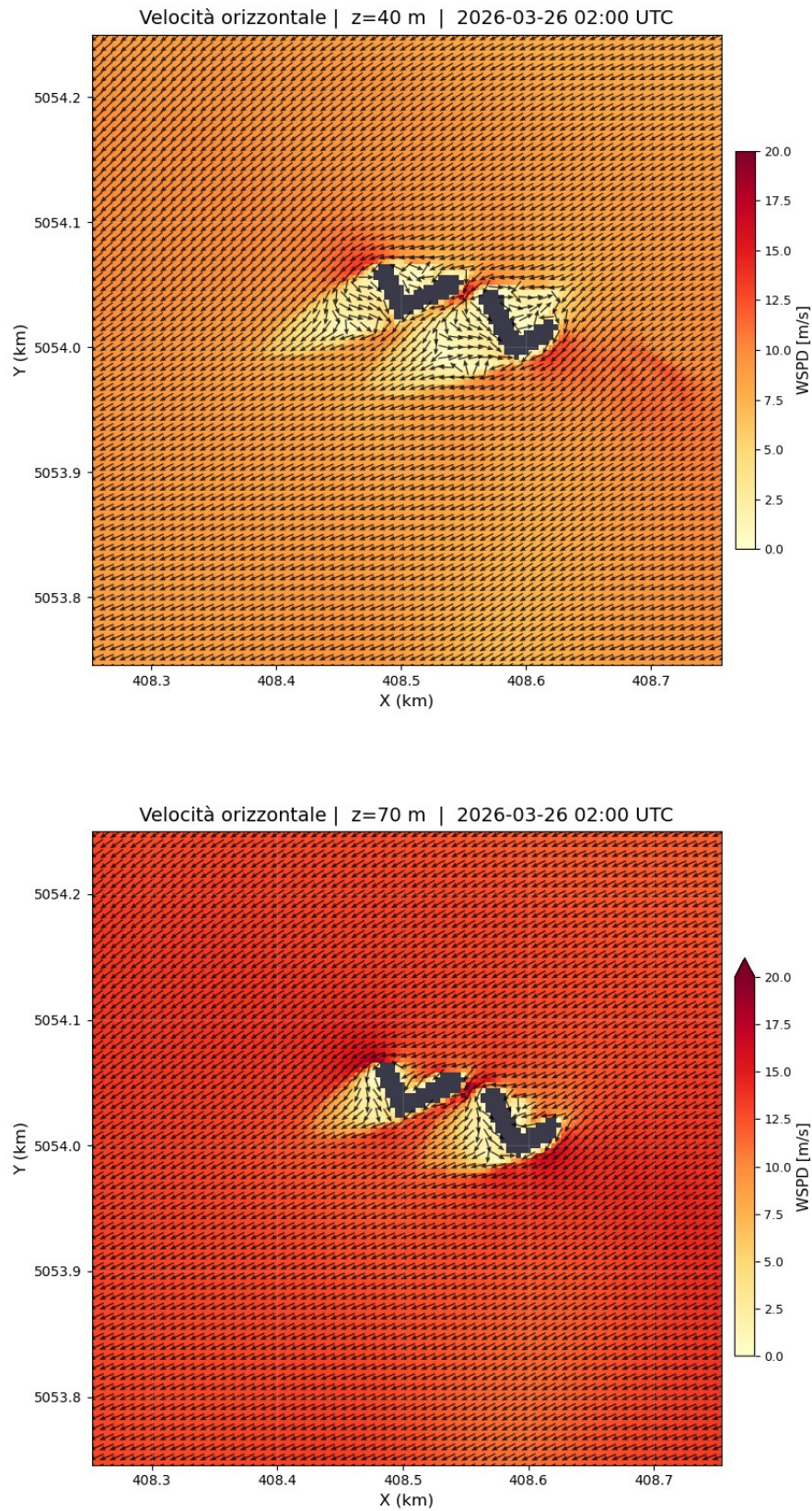


Figura 4.16: Mappe del campo di velocità orizzontale simulato ai livelli rispettivamente $z^* = 40$ m (circa al 50% dell'altezza dell'edificio, pannello in alto) e $z^* = 70$ m (circa al 80% dell'altezza dell'edificio, pannello in basso) attorno all'Ospedale di Cattinara alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.

Conclusioni

La contestualizzazione climatologica della Bora a Trieste, limitata agli eventi persistenti che si sono sviluppati su uno o più giorni, ha mostrato che la maggior parte degli eventi persistenti a Trieste (circa 4/5 dei giorni) sono ascrivibili equamente alla Bora ciclonica continentale (che conta i casi più intensi e duraturi), tipicamente invernale e di inizio primavera, e alla Bora ciclonica marittima, presente tutto l'anno ma maggiormente in autunno e in inverno. Entrambe sono caratterizzate da una ciclogenese sul Tirreno, nel primo caso abbinata a un moto retrogrado di aria continentale, nel secondo a una goccia fredda di aria atlantica. La Bora anticiclonica (circa 1/5 dei giorni), invece, è caratterizzata dallo scorrimento retrogrado di una goccia fredda continentale tra l'anticiclone scandinavo e l'anticiclone africano, generando eventi generalmente più corti, e risulta tipicamente tardo-estiva e di inizio autunno, benchè presente anche in inverno.

Nel corso di questo primo quarto di secolo, si è registrato un calo di poco più del 20% degli eventi di Bora persistenti a Trieste dovuto a una riduzione della Bora ciclonica continentale, con un abbassamento delle mediane di intensità media e raffica nell'ultimo lustro rispetto al decennio precedente, caratterizzato da eventi particolarmente intensi: la riduzione dell'attività ciclonica potrebbe continuare col procedere del secolo, affiancato da un aumento dell'attività anticiclonica ([Vozila et al., 2021](#)). Un potenziale miglioramento dell'analisi può risiedere nell'affinamento dei criteri di identificazione degli eventi di Bora: in particolare, dati storici da radiosondaggio presso l'entroterra costiero e l'entroterra continentale consentirebbero di distinguere la Bora, di origine dinamica, dal Borino, di origine termica ([Jeromel et al., 2009](#)), dando modo di estendere l'analisi anche agli eventi di Bora meno persistenti. L'interazione tra la Bora e le brezze locali e la variabilità diurna dell'intensità della Bora rimangono temi di ricerca aperti. L'evento del 26 marzo 2026, su cui è stato effettuato il test, è un evento di Bora ciclonica marittima che ha superato la mediana di intensità media degli eventi di Bora persistente a Trieste individuati in questo quarto di secolo.

Il test sulla catena modellistica ha mostrato una buona rappresentatività nella descrizione del vento superficiale in termini di bias e correlazione finquando l'evoluzione dell'evento simulata è simile a quella osservata, ossia fino alle 13 UTC. La deviazione dell'evoluzione simulata rispetto all'evoluzione reale dopo le 13 UTC costituisce la criticità maggiore che è emersa dal test. Nonostante la significatività del confronto andrebbe verificata su altri casi studio di Bora, si ritiene sufficientemente indicativa delle maggiori criticità che la catena modellistica presenta in queste condizioni e delle possibili modifiche per migliorarne le prestazioni. Presso la posizione

del LIDAR, fino alle 13 UTC si registra una sovrastima della velocità orizzontale di circa 2 m/s sullo sviluppo verticale del dominio della simulazione, una sottostima della direzione da nord di circa 17° e una sottostima in valore assoluto della velocità verticale di circa 3 m/s (non informata dalla simulazione WRF). I bias sulla velocità orizzontale e sulla direzione sono già presenti nei dati di input ottenuti attraverso la simulazione WRF (la sovrastima della velocità orizzontale è addirittura pari a 5 m/s prima della procedura di *downscaling*): l'utilizzo di una configurazione di WRF con un maggior numero di livelli verticali e con parametrizzazioni SSO (*Subgrid-Scale Orography*), mirate al miglioramento della rappresentazione delle onde di gravità orografiche e della turbolenza, di conseguenza dei bilanci di quantità di moto, consente di risolvere il problema della sovrastima dell'intensità dei venti sul Carso (Gallai et al., 2025), suggerendo un primo possibile passo per il miglioramento della rappresentazione dell'evoluzione degli eventi di Bora già a partire dai dati di input nel caso non sia possibile aumentare la risoluzione orizzontale della simulazione. Tuttavia, l'aumento della risoluzione orizzontale, come sottolineato in (Solbakken et al., 2021), porterebbe probabilmente a un miglioramento della capacità di cogliere gli effetti del terreno grazie alla migliore rappresentazione dell'orografia. All'assenza di bias sistematici della velocità orizzontale presso gli anemometri posizionati all'eliporto, si contrappone una sovrastima di oltre 10 m/s presso gli anemometri posizionati sulle torri, dove gli effetti di resistenza aerodinamica dovuti alla *rooftop zone*, non costruita da Micro-SWIFT nella procedura di *downscaling* della catena modellistica, sono amplificati dalla più alta velocità del moto indisturbato in quota.

Dal confronto qualitativo con le simulazioni *benchmark* emerge la necessità del *downscaling* dalla mesoscala per rappresentare il LLJ che caratterizza la Bora, sottolineando la priorità di informare la simulazione alla microscala con dati di input accurati. Nei primi 200 m AGL, il profilo di velocità orizzontale (adimensionale) tende a una sovrastima della velocità sottovento agli ostacoli orografici e agli edifici durante lo sviluppo dell'evento, tuttavia per attribuirne la causa all'approccio modellistico di Micro-SWIFT servirebbe un confronto a parità di caso studio. Nel caso questa caratteristica sistematica fosse confermata, spiegherebbe in parte la sovrastima presso gli anemometri posizionati sulle torri dell'ospedale. Attorno all'Ospedale di Cattinara si formano qualitativamente le stesse zone di stagnazione, ricircolo e accelerazione delle simulazioni *benchmark*. L'energia cinetica turbolenta (non informata dalla simulazione WRF) risulta sottostimata fino a un ordine di grandezza, soprattutto sottovento all'altopiano e alla valle, mentre attorno agli edifici l'andamento non è rappresentativo (Oldrini et al., 2019) a causa dei limiti dati dal modello algebrico di chiusura della turbolenza del *solver* prognostico di Micro-SWIFT. Informare anche l'energia cinetica turbolenta dalla simulazione WRF rappresenta un ulteriore miglioramento potenzialmente significativo alla catena modellistica. Allo stato attuale, l'apparato modellistico testato non può essere utilizzato per la valutazione degli impatti locali degli eventi di Bora.

Appendice A

Appendice

A.1 Classificazione in *Weather Types*



Appendice

A Classificazione dei tipi di tempo

Per stratificare la verifica delle previsioni dei modelli meteorologici in base alla configurazione sinottica di scala europea, abbiamo applicato un metodo di classificazione per l'individuazione dei "tipi di tempo" (*weather types*). La classificazione è basata su trent'anni di dati giornalieri, tratti dalle rianalisi globali realizzate da NCEP [17, 18], accessibili con il pacchetto R RNCEP [19]. Sono state usate come variabili giornaliere esplicative la pressione al livello del mare, l'altezza della superficie di geopotenziale a 500 hPa, la temperatura dell'aria vicino al suolo. Il dominio di studio include gran parte del Mediterraneo e dell'Europa, esclusa la Scandinavia.

Innanzitutto, l'analisi delle componenti principali mostra che le prime 6 componenti spiegano l'85% della varianza. Per ciascuna delle 10958 giornate sono calcolati i pesi di ciascuna delle sei componenti, dopo una rotazione VARIMAX che riequilibra la varianza tra le componenti. Su questi coefficienti è applicata una *cluster analysis* con il metodo descritto da [20]. Sono così individuati undici cluster, corrispondenti a undici *weather types*. L'analisi è stata realizzata con il pacchetto R *synoptReg* [21].

Osservando le caratteristiche atmosferiche medie (fig.1.10) delle undici configurazioni sinottiche così individuate se ne può ricavare un'utile descrizione, con particolare attenzione alle conseguenze locali per il FVG:

1. depressione mediterranea e anticiclone delle Azzorre esteso a nord delle Alpi, con afflusso di aria molto fredda da nord-est sulla regione nei bassi strati (Bora forte e duratura);
2. traslazione verso est della depressione mediterranea, espansione in area alpina dell'anticiclone delle Azzorre con aria mite sotto la spinta delle correnti zonali;
3. depressione atlantica che si approfondisce verso il Mediterraneo occidentale, aria calda e umida africana sul ramo ascendente della saccatura investe l'Italia, cenni di *blocking* atmosferico (alta pressione sui Balcani), Scirocco;
4. correnti zonali sull'Europa centrale, a curvatura anticiclonica a sud delle Alpi con aria molto mite;
5. espansione classica dell'anticiclone delle Azzorre sull'Europa centro-occidentale, con infiltrazioni più fresche da nord-ovest sul fianco orientale verso la regione;
6. flusso zonale interessa l'Europa centrale e alpina, tendenza alle ciclogenesi sottovento alle Alpi, venti settentrionali sostenuti sull'arco alpino;
7. anticiclone russo-siberiano sull'Europa orientale, masse d'aria fredda da nordest interessano direttamente i Balcani, marginalmente l'Italia nordorientale;
8. prevalentemente invernale, profonda ciclogenesi sulla penisola italiana a seguito dell'ingresso di una saccatura atlantica nel Mediterraneo alimentata da masse d'aria polare o artica marittima;
9. in inverno, anticiclone africano sull'Italia con aria molto mite;
10. assomiglia a 8, ma prevalentemente estiva, con anomalia termica positiva che dai Balcani si estende a sud allo Ionio e a nord a Polonia e Baltico;
11. come 9, anticiclone africano sull'Italia con aria molto mite, ma estivo.

weather types based on mslp, z500, Tair
period: 1991–2020

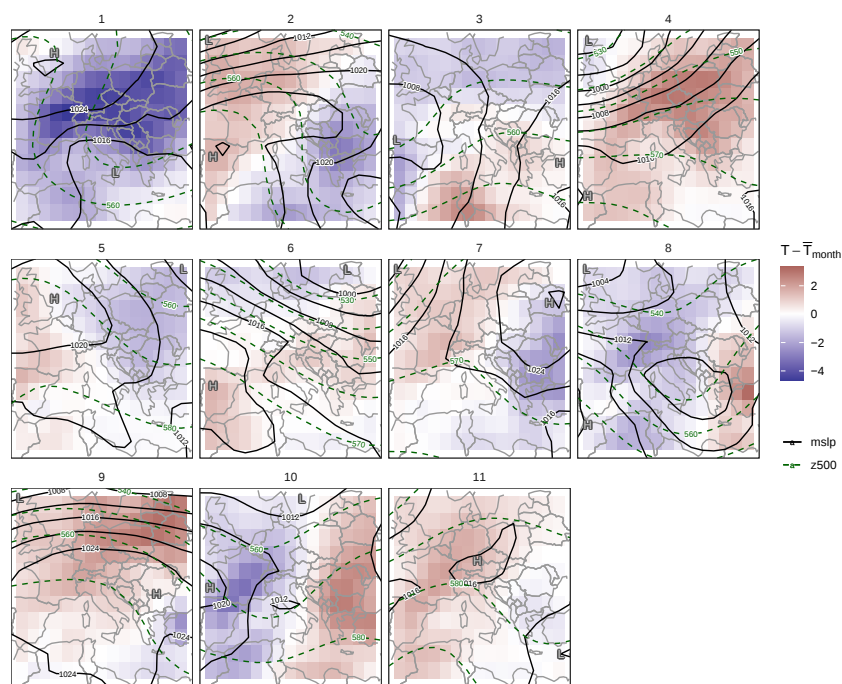


Figura 110: Medie del trentennio 1991–2020 per ciascuno degli undici *weather types* delle variabili pressione al livello del mare, altezza del geopotenziale a 500 hPa, anomalia (rispetto alle medie mensili) di temperatura atmosferica vicino alla superficie.

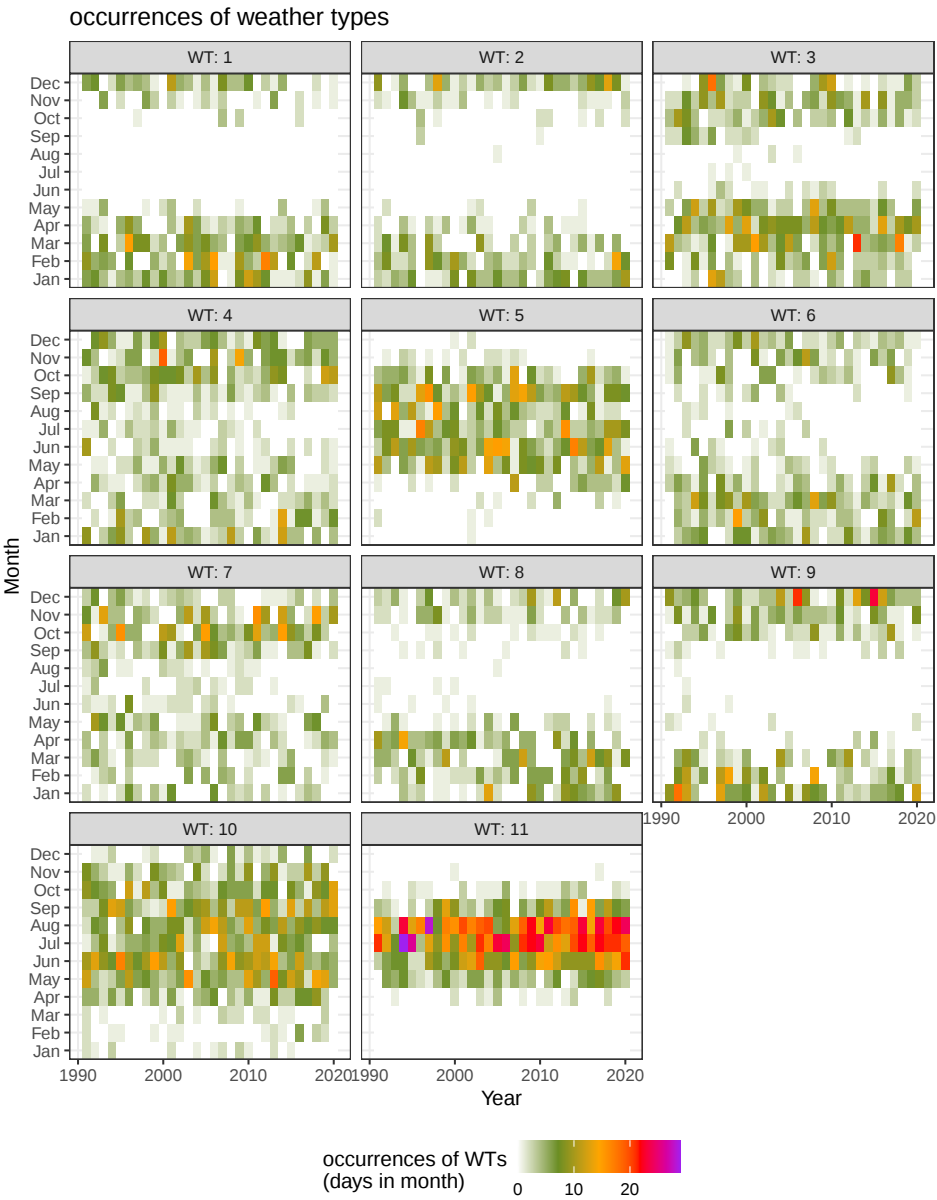


Figura 111: Occorrenze mensili nel trentennio 1991–2020 per ciascuno degli undici *weather types*.

Figura A.1: Estratti dal report tecnico interno di ARPA FVG (Bonafè et al., 2022) ([20]=(Esteban et al., 2005) e [21]=(Lemus-Canovas et al., 2019)).

A.2 Scala Beaufort della forza del vento

Scala Beaufort della forza del vento

Valore Scala Beaufort	Termine descrittivo	Velocità media del vento			Effetti sulla terra	Altezza media delle onde (m)	Effetti sul mare
		nodi (KT)	m/s	Km/h			
0	Calma	< 1	0-0.2	<1	Calma; il fumo sale verticalmente.	-	Il mare è uno specchio.
1	Bava di vento	1-3	0.3-1.5	1-5	La direzione del vento è segnalata dal movimento del fumo, ma non dalle maniche a vento.	0.1	Leggere increspature dell'acqua.
2	Brezza leggera	4-6	1.6-3.3	6-11	Si sente il vento sul viso e le foglie frusciano; le maniche a vento si muovono.	0.2	Onde piccole, ma evidenti.
3	Brezza tesa	7-10	3.4-5.4	12-19	Le foglie e i ramoscelli più piccoli sono in costante movimento; il vento fa sventolare bandiere di piccole dimensioni.	0.6	Piccole onde, creste che cominciano a infrangersi.
4	Vento moderato	11-16	5.5-7.9	20-28	Si sollevano polvere e pezzi di carta; si muovono i rami piccoli degli alberi.	1	Piccole onde, che diventano più lunghe.
5	Vento teso	17-21	8-10.7	29-38	Gli arbusti con foglie iniziano a ondeggiare; le acque interne s'increspano.	2	Onde moderate allungate, con possibilità di spruzzi.
6	Vento fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	Si muovono anche i rami grossi; gli ombrelli si usano con difficoltà.	3	Si formano marosi con creste di schiuma bianca.
7	Vento forte	28-33	13.9-17.1	50-61	Gli alberi iniziano a ondeggiare; si cammina con difficoltà contro vento.	4	Le onde s'ingrossano, la schiuma comincia a "sfilacciarsi" in scie.
8	Burrasca moderata	34-40	17.2-20.7	62-74	Si staccano rami dagli alberi; generalmente è impossibile camminare contro vento.	5.5	Marosi di altezza media; le creste si rompono e formano spruzzi vorticosi.
9	Burrasca forte	41-47	20.8-24.4	75-88	Possono verificarsi leggeri danni strutturali agli edifici (caduta di tegole o di coperchi dei camini).	7	Grosse ondate, con dense scie di schiuma e spruzzi, riducono la visibilità.
10	Burrasca fortissima	48-55	24.5-28.4	89-102	(Raro nell'entroterra) Alberi sradicati e considerevoli danni agli abitati.	9	Enormi ondate, con lunghe creste a pennacchio; il mare ha un aspetto biancastro.
11	Fortunale	56-63	28.5-32.6	103-117	(Rarissimo nell'entroterra) Vasti danni strutturali.	11.5	Onde enormi che possono nascondere navi di media stazza; il mare è coperto da banchi di schiuma e la visibilità è ridotta.
12	Uragano	>63	>32.7	>118	Danni ingenti ed estesi alle strutture.	14	Onde altissime; schiuma e spruzzi riducono molto la visibilità e il mare è tutto bianco.

Figura A.2: Tabella di classificazione del vento secondo la scala Beaufort (tratta da nautica.it, ultima consultazione: 13 aprile 2026).

A.3 Distribuzioni in intensità nei giorni di Bora

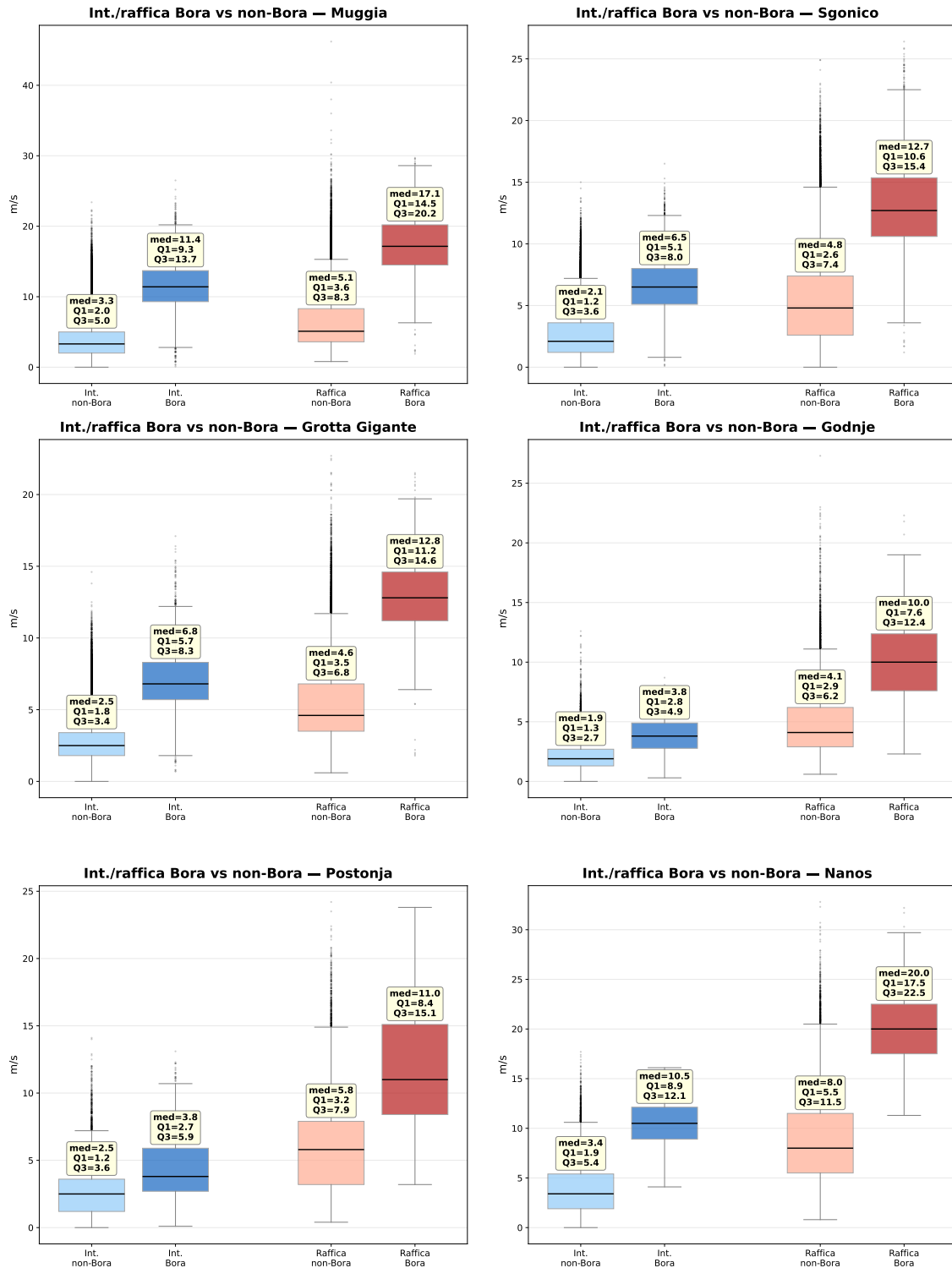


Figura A.3: Distribuzione delle ore nei giorni non di Bora (colori più spenti) e nei giorni di Bora (colori più accesi) in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) per varie stazioni meteorologiche. I baffi rappresentano il 1° e il 99° interquartile.

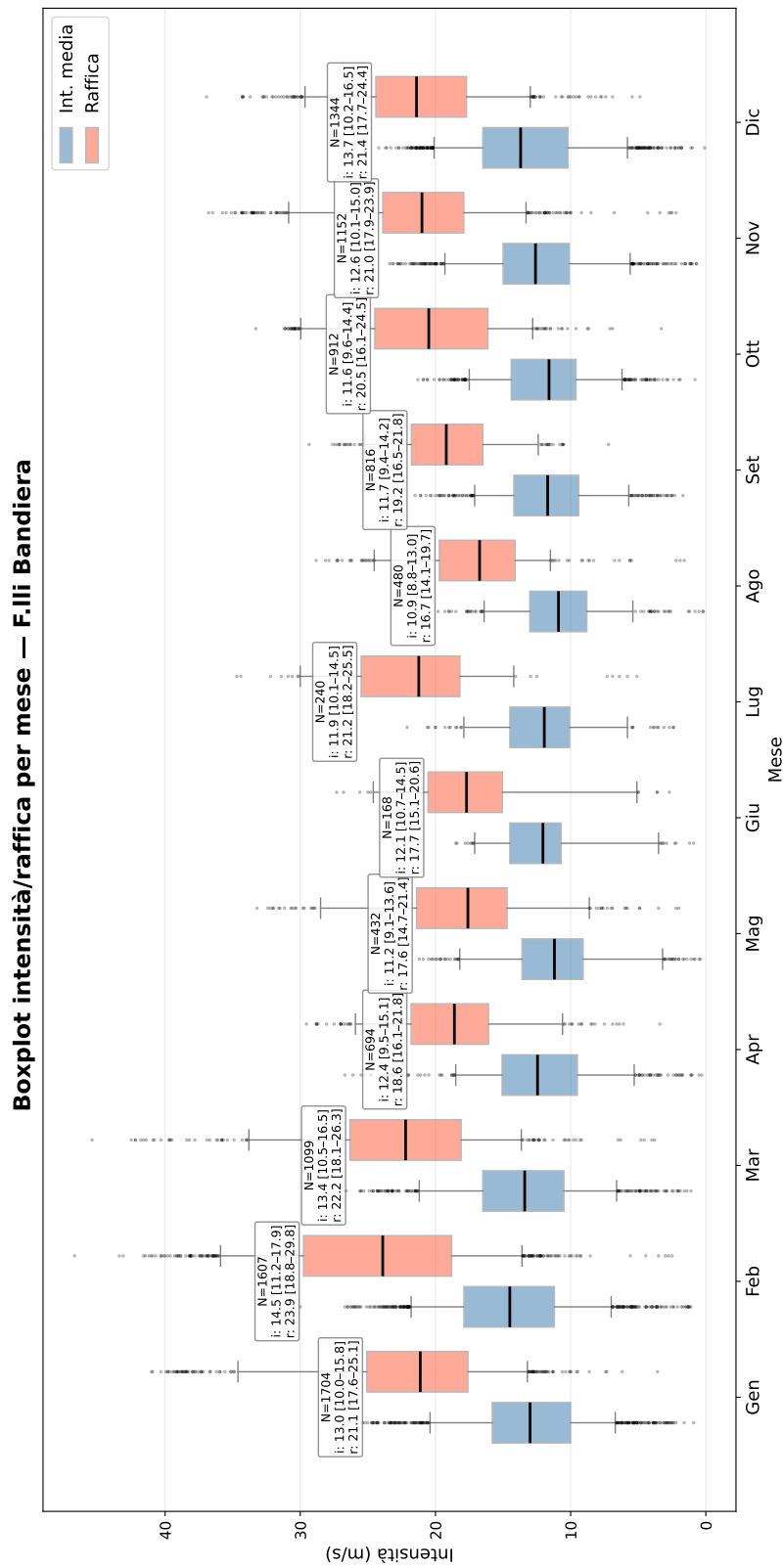


Figura A.4: Distribuzioni mensili delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

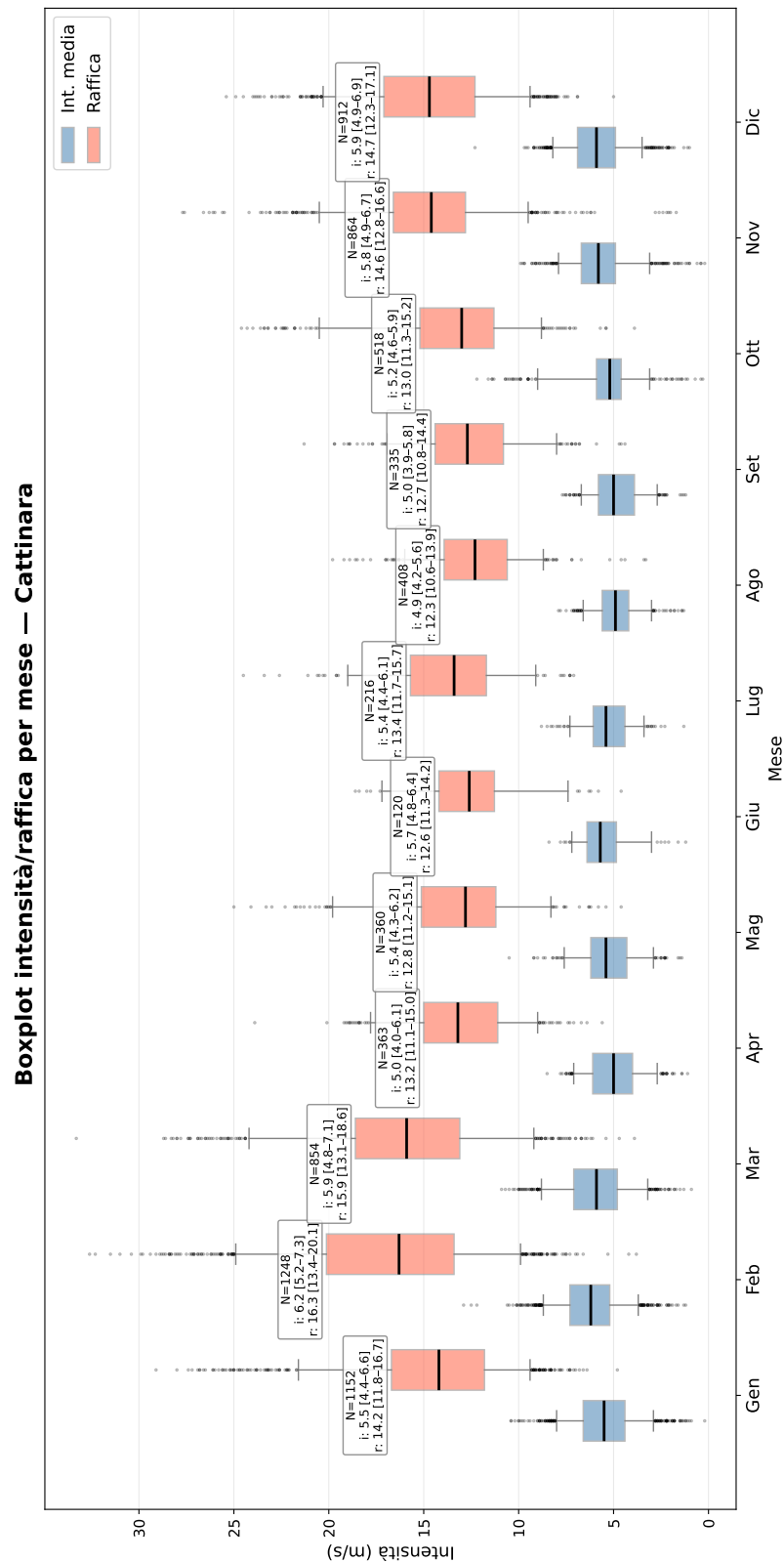


Figura A.5: Distribuzioni mensili delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

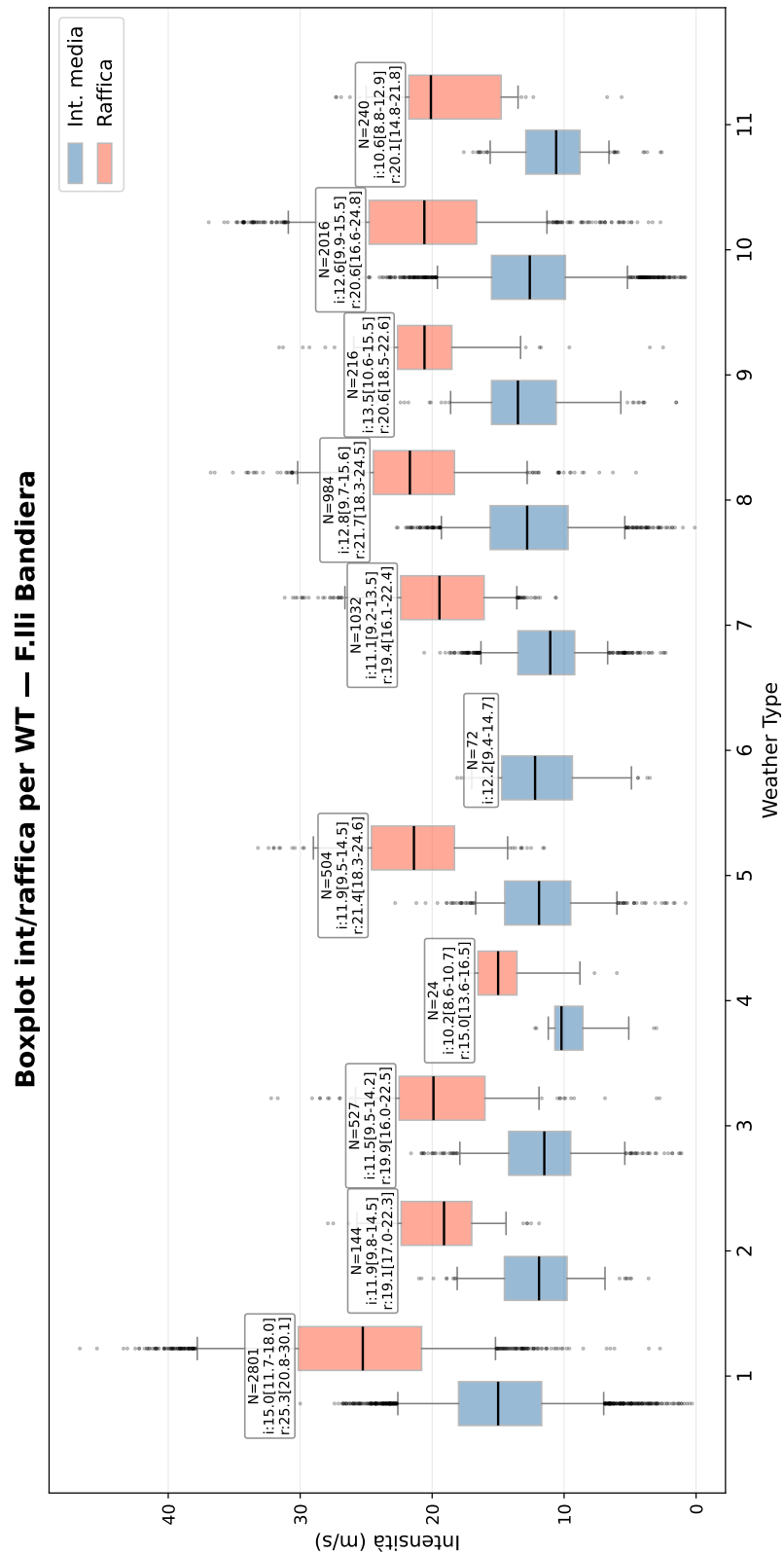


Figura A.6: Distribuzioni per WT delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

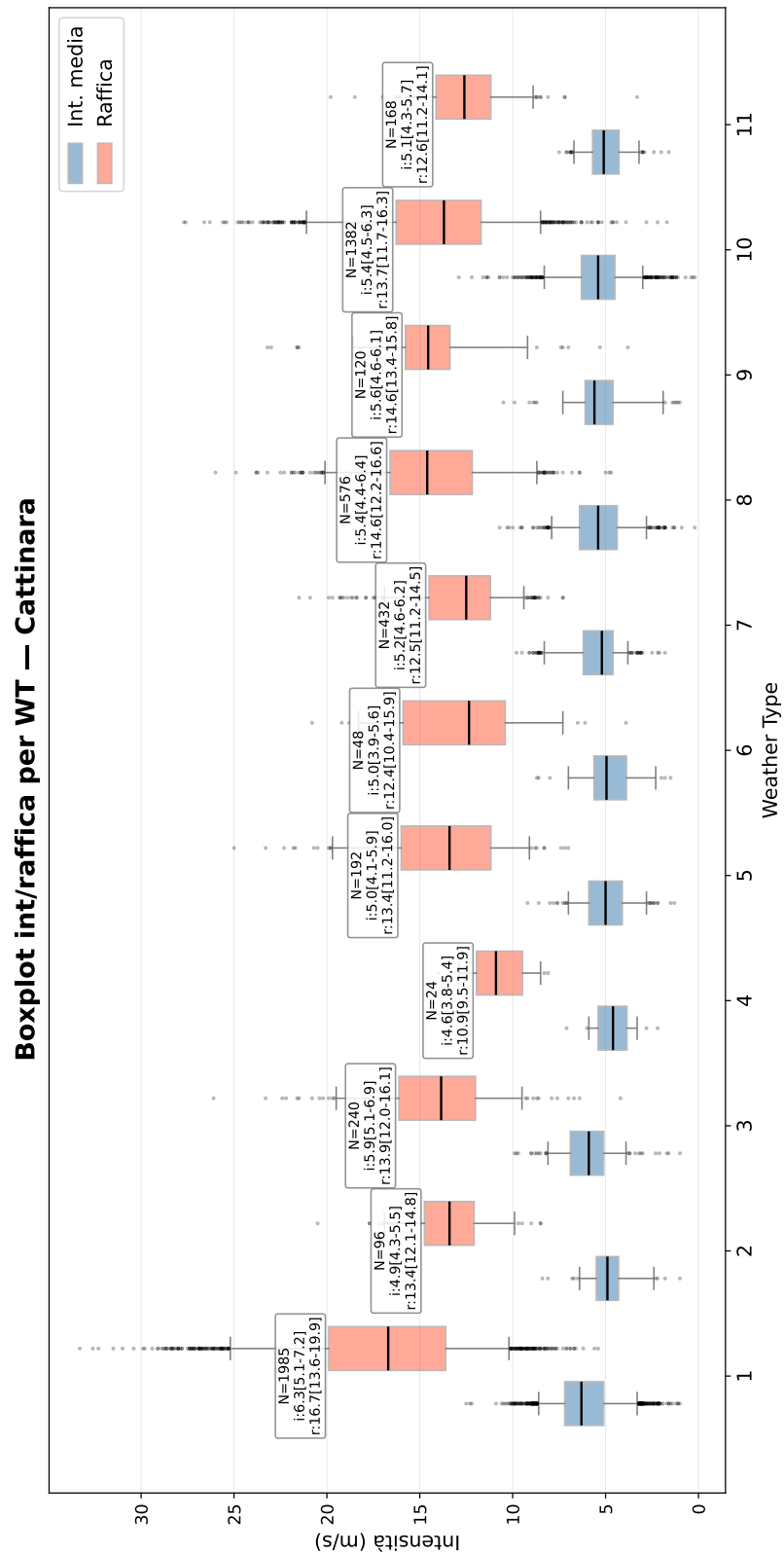


Figura A.7: Distribuzioni per WT delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

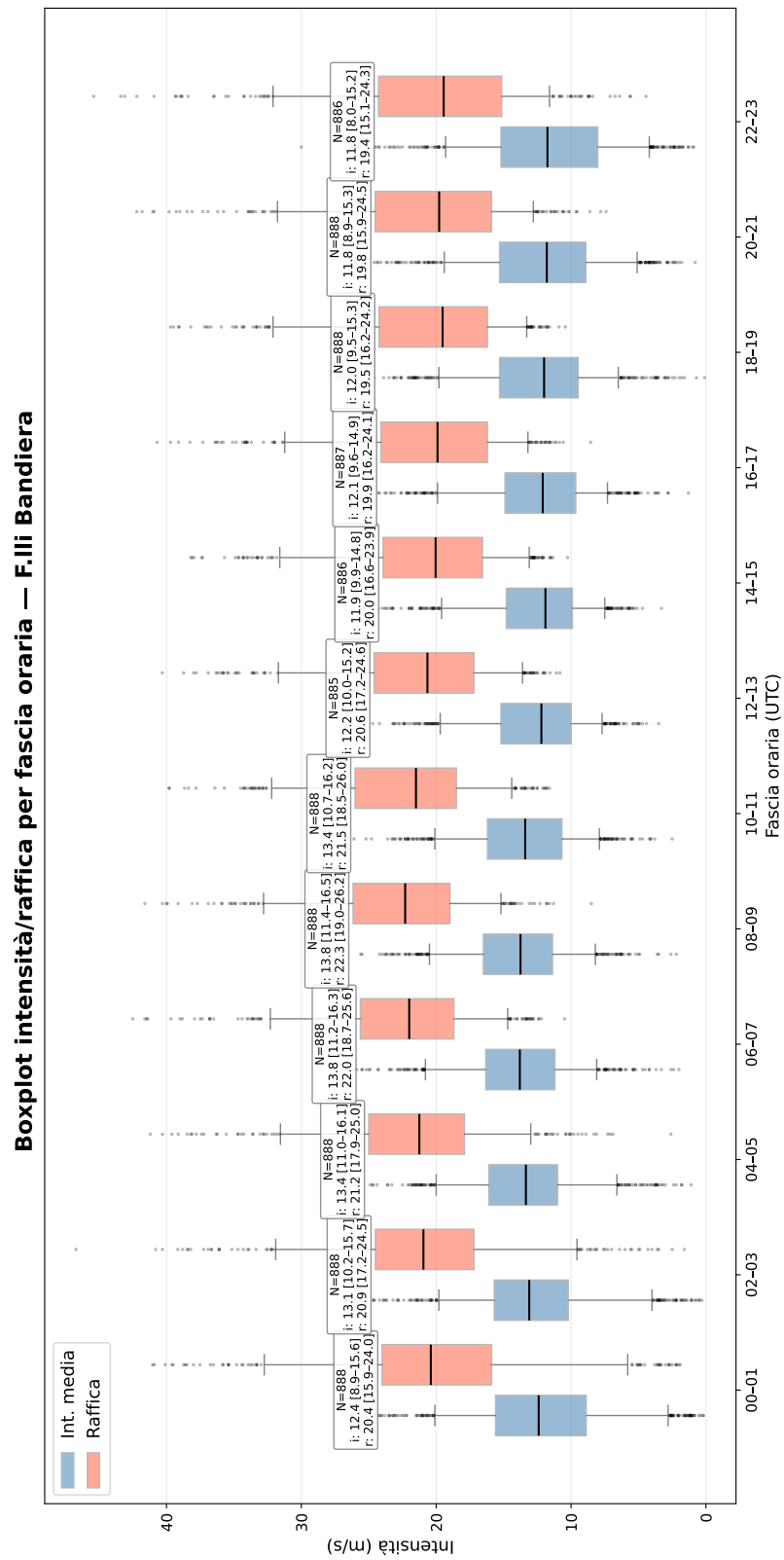


Figura A.8: Distribuzioni per fascia oraria delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.Ili Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

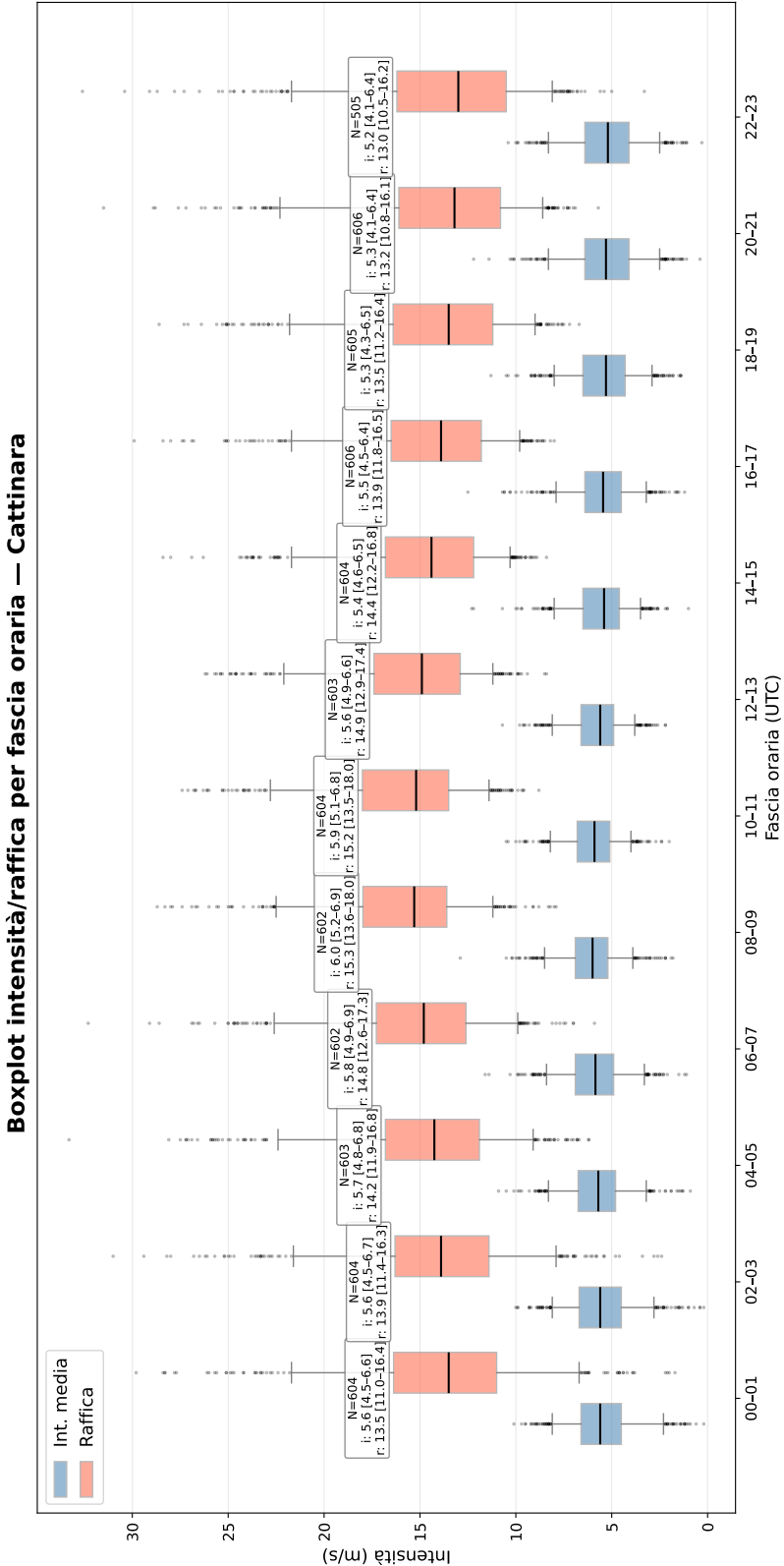


Figura A.9: Distribuzioni per fascia oraria delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.

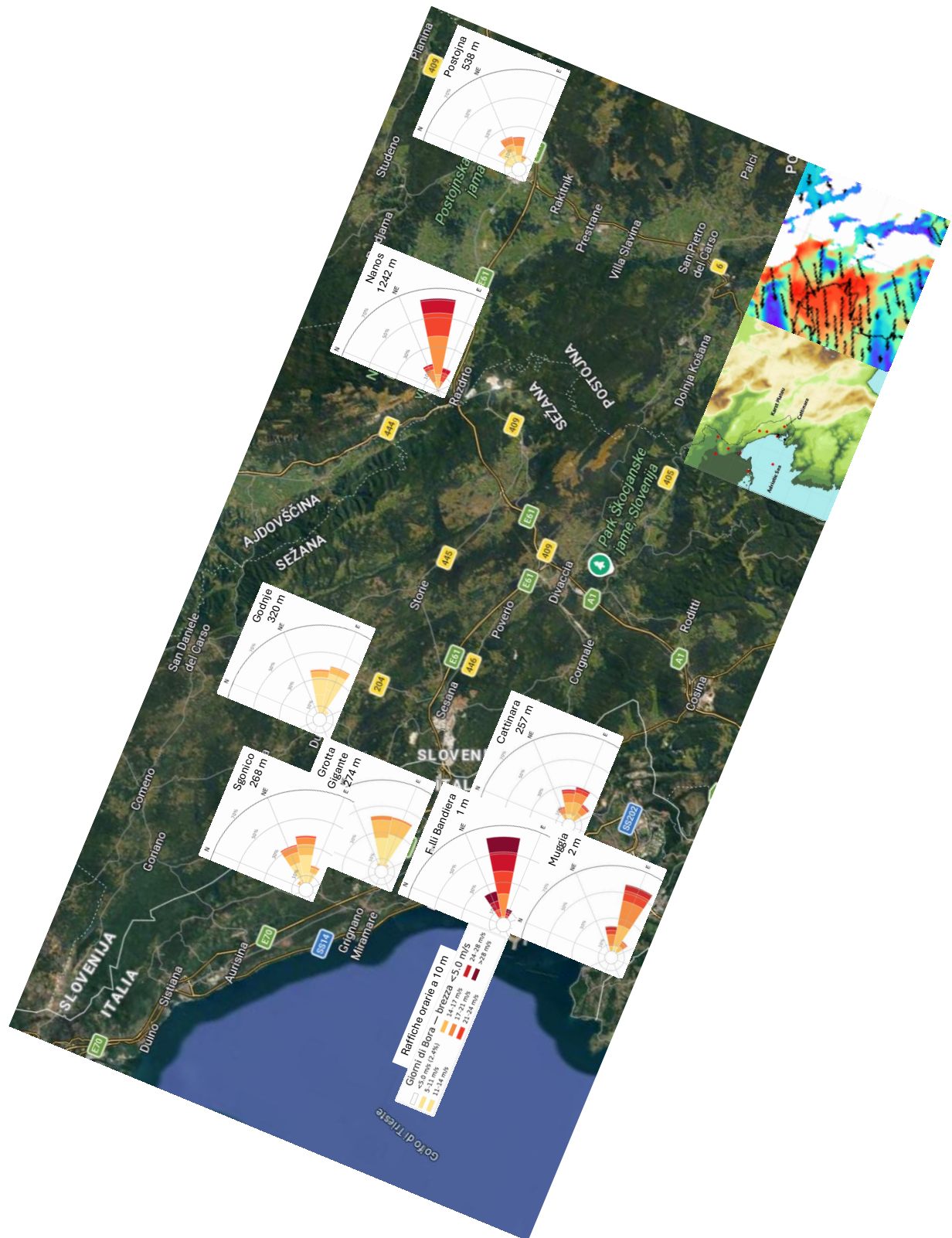


Figura A.10: Mappa del territorio carsico (tratta da maps.google.com), con sovrapposte rose dei venti delle raffiche orarie nei giorni di Bora (selezionati attraverso i dati del molo F.lli Bandiera) per tutte le stazioni prese in considerazione e dettagli dell'orografia del territorio e del campo di vento presentato in Figura ?? (tratti da (Cintolesi et al., 2024)). La mappa è ruotata di 67.5° (allineando il centro del settore nord-est/est con la verticale).

Elenco delle tabelle

2.1	In ordine di altitudine, stazioni meteorologiche in territorio carsico usate per l'analisi statistica con sintesi dei periodi di disponibilità dei dati di intensità media (i) e raffica (r), concessi dall'agenzia regionale ARPA FVG (ognuno dei mesi compresi nella lista contiene almeno 15 giorni con 12 ore di dati della variabile a cui si riferisce). In questi mesi, i dati mancanti costituiscono sempre percentuali inferiori al 2.1% (velocità e direzioni congiunte mancanti delle raffiche a Sgonico), che al molo F.lli Bandiera diventano inferiori allo 0.5%. La scala di rappresentatività sinottica va da 0 a 10.	18
2.2	Statistica generale di ore, giorni ed eventi di Bora persistenti individuati tramite i dati della stazione molo F.lli Bandiera con le seguenti soglie: direzione 20°-110°, intensità media oraria > 8 m/s, ore di Bora al giorno > 18 h. In asterisco i valori che dipendono dalla soglia delle 18 ore.	24
2.3	Giorni ed eventi di Bora divisi per <i>Weather Type</i> , stagione e quinquennio. Agli eventi è stato associato il WT più presente o, a parità di giorni, quello che si è manifestato prima. La classificazione dei giorni per <i>Weather Type</i> è disponibile solamente fino al 2020, non coprendo l'ultimo lustro (87 giorni e 54 eventi); inoltre, negli ultimi sei mesi del 2019 e del 2020 non sono disponibili dati per il molo F.lli Bandiera, contribuendo a una sottostima della statistica nel lustro 2016-2020. In asterisco i valori che si ritengono per questo motivo sottostimati.	28
2.4	Lista degli eventi di Bora persistenti più rappresentativi del venticinquennio 2001-2025. I dati di intensità e raffica sono relativi al molo F.lli Bandiera.	37
2.5	Giorni ed eventi di Bora divisi per <i>Bora Type</i> , stagione e quinquennio. Nell'ultimo lustro (v. Figura 2.10 e Tabella 2.3) è confermata la generale riduzione dei giorni e degli eventi di Bora (87 giorni e 54 eventi) da inizio secolo, accompagnata da una riduzione in intensità. In asterisco i valori che si ritengono sottostimati per la mancanza di dati negli ultimi mesi del 2019 e del 2020.	43
3.1	In ordine di altitudine, anemometri ultrasonici triassiali della campagna sperimentale di Cattinara posizionati all'interno del dominio della simulazione alla microscala.	59

- 3.2 Diagnostica per interquantili (in termini di *Mean Absolute Deviation*, *Root Mean Square Error*, *Correlation Index*) dei fit VADtrad 2D e VADtrad 3D sulla scansione PPI del LIDAR di settore angolare 10° - 120° , distanze radiali considerate 500-1000 m e con elevazione 15° (distanza orizzontale $\simeq 483$ - 966 m a parità di quota assoluta e $\simeq 129$ - 258 m di differenza di quota assoluta). La statistica delle MAD, relative alle variabili ricavate, è calcolata sulle scansioni, mentre quella degli RMSE e CI, relative alla velocità radiale misurata, è calcolata sui *gate* e sulle scansioni. L'aumento delle MAD per VADtrad 3D, specie per le velocità orizzontali e per la coda alta della distribuzione delle MAD relative alla direzione, è dovuta a valori non fisici delle velocità verticali causati da *overfitting* (una MAD mediana di 4.2 m/s relativa alla velocità verticale è irrealistica, ricordando che la MAD rappresenta la variabilità sui 500-1000 m di una singola scansione a elevazione 15°). 61
- 4.1 Diagnostica in termini di bias, *Root Mean Square Error*, *Normalized Standard Deviation* (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), *Correlation Index*, delle prestazioni della simulazione WRF nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima (prime righe, 00-11 UTC) e la seconda parte (ultime righe, 12-23 UTC) dell'evento di Bora del 26 marzo per il 1° e 2° chilometro AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). In asterisco gli indici calcolati su dati con una copertura temporale pari o inferiore al 50%. 70
- 4.2 Diagnostica in termini di bias, *Root Mean Square Error*, *Normalized Standard Deviation* (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), *Correlation Index*, delle prestazioni della simulazione WRF e Micro-SWIFT (con dati di input della simulazione WRF) nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (00-11 UTC) per i primi 500 m AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). Il confronto è limitato alla prima parte dell'evento per carenza di osservazioni. 70

4.3	Diagnostica in termini di bias, <i>Root Mean Square Error</i> , <i>Normalized Standard Deviation</i> (deviazione standard dei dati simulati normalizzata con la deviazione standard delle osservazioni), <i>Correlation Index</i> , delle prestazioni della simulazione WRF nella stima dei profili di velocità orizzontale, direzione e velocità verticale nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante le prime 6 h (prime tre righe) e le seconde 6 h (ultime tre righe) dell'evento di Bora del 26 marzo per il 1° chilometro AGL (nella prima colonna intervalli tipici di variabilità). Gli indici tendono a migliorare considerando un <i>lag</i> di 3 h tra dati osservati e dati simulati, suggerendo che la simulazione anticipa di 3 h l'inizio dell'evento di Bora.	71
-----	--	----

Elenco delle figure

- 2.1 Distribuzione delle ore per intensità media oraria e direzione al molo F.lli Bandiera. Da sinistra a destra si distinguono il picco della Bora ($\simeq 60^\circ$), il picco della brezza di monte ($\simeq 90^\circ$), il picco dello Scirocco ($\simeq 120^\circ$) e il picco della brezza di mare ($\simeq 300^\circ$). In blu le soglie di direzione e intensità per l'ora di Bora. 25
- 2.2 Logaritmo della distribuzione delle ore in intensità media appartenenti al settore angolare 20° - 110° al molo F.lli Bandiera con *fit* lineare a tratti (con i pendenze $1/\lambda_i$) per la coda alle alte velocità ($\propto -v^\delta$ nel caso Weibull puro, v. Equazione 2.1). In rosso le ore che vengono classificate di Bora secondo la soglia degli 8 m/s ($\simeq$ soglia verde coincidente con vento teso), in blu le ore che vengono filtrate. Secondo la soglia dei 17 m/s ($\simeq$ soglia gialla coincidente con burrasca moderata) la Bora viene considerata intensa. 25
- 2.3 Distribuzione dei giorni per numero di ore di Bora nel giorno al molo F.lli Bandiera. In arancione i giorni che vengono classificati di Bora secondo la soglia delle 18 h, in azzurro i giorni che vengono filtrati. 26
- 2.4 Distribuzione delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria al molo F.lli Bandiera. Il *fit* con la densità di Weibull a due parametri mostra un buon accordo visivo nonostante la semplicità del filtro. 26
- 2.5 Distribuzioni delle ore di Bora per ora del giorno al molo F.lli Bandiera. In arancione i giorni che vengono classificati di Bora, in azzurro i giorni che vengono filtrati. 27
- 2.6 In alto: distribuzione mensile di giorni (in blu) ed eventi (in viola) di Bora. In basso: distribuzione dei giorni di Bora per mese e *Weather Type* (v. Sezione A.1) 29
- 2.7 In alto: distribuzione dei giorni di Bora per *Weather Type* (v. Sezione A.1). Le percentuali ai piedi delle barre rappresentano le occorrenze relative dei giorni di Bora per quel *Weather Type* e l'altezza delle porzioni colorate delle barre è proporzionale al numero di giorni sopra soglia d'intensità media giornaliera: in blu, verde e giallo rispettivamente condizioni di vento teso, fresco e forte, in arancione e in rosso di burrasca moderata e forte, secondo la scala Beaufort (v. Sezione A.2). In basso: distribuzione degli eventi di Bora persistenti per durata. L'altezza delle porzioni colorate delle barre è proporzionale al numero di giorni con uno specifico *Weather Type*. 30

2.8	Distribuzioni stagionali delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni.	31
2.9	Distribuzioni per fascia oraria delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni.	32
2.10	Distribuzioni quinquennali delle ore dei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. Le linee verticali indicano le mediane delle distribuzioni. Il pannello in basso a destra mostra le distribuzioni per tutto il venticinquennio. Non sono disponibili dati di direzione delle raffiche prima di novembre 2010.	33
2.11	Distribuzione delle ore nei giorni non di Bora (colori più spenti) e nei giorni di Bora (colori più accesi) in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera (in alto) e Cattinara (in basso). I baffi rappresentano il 1° e il 99° interquantile.	35
2.12	Distribuzione angolare e in intensità delle raffiche massime giornaliere nei giorni di Bora al molo F.lli Bandiera (in alto) e a Cattinara (in basso). In blu valori relativi a vento forte, in verde, giallo e arancione rispettivamente a burrasca moderata, forte e fortissima, in rosso a fortunale, secondo la scala Beaufort (v. Sezione A.2). Sono presenti meno dati per il molo a causa della mancanza di dati di direzione delle raffiche prima di novembre 2010.	36
2.13	Da sinistra a destra: mappe di geopotenziale a 500hPa durante lo svolgimento dell'evento e temperatura a 850 hPa a 48 h dall'inizio dell'evento (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) dell'evento del febbraio 2012 (WT1). Il cerchio rosso indica il nord Adriatico mentre i cerchi blu individuano le posizioni delle strutture sinottiche secondo la rappresentazione standard del <i>Weather Type</i>	38
2.14	Mappe di geopotenziale a 500hPa (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) rappresentative degli eventi elencati in Tabella 2.4 con sovrapposte rappresentazioni grafiche dei WT dominanti dell'evento (v. Sezione A.1). Nella stessa riga eventi con configurazioni sinottiche simili, in ordine: incursione di aria continentale (il pannello isolato di marzo 2004 è assimilabile alla riga successiva), di aria artica marittima, anticiclone scandinavo. Nella stessa colonna eventi con diversa orientazione generale del ponte di Voejkov, in ordine: più meridionale o più zonale (che per l'anticiclone scandinavo nell'ultima riga si traducono rispettivamente in più zonale o con sviluppo nord-ovest/sud-est). La croce azzurra nel pannello relativo a marzo 2004 indica un caso isolato in cui ci sono condizioni opposte in quella zona rispetto alla rappresentazione grafica canonica del WT9.	39

- 2.15 Mappe di temperatura a 850hPa (tratte da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) a 48 h dall'inizio degli eventi elencati in Tabella 2.4 con sovrapposte rappresentazioni grafiche dei WT dominanti dell'evento (v. Sezione A.1). Nella stessa riga eventi con configurazioni sinottiche simili, in ordine: incursione di aria continentale (il pannello isolato di marzo 2004 è assimilabile alla riga successiva), *cut-off low* di aria artica marittima, anticiclone scandinavo. A differenza della prima e della terza riga, nella seconda è presente una corrente a getto zonale coerente sul nord Atlantico che favorisce l'incursione di aria artica marittima. 40
- 3.1 Rappresentazione dei domini di *downscaling* dinamico interno alla simulazione WRF, tratta da (CRMA ARPA FVG, 2018): il dominio continentale ha una risoluzione di 50 km, il dominio nazionale di 10 km, il dominio regionale di 2 km. 46
- 3.2 Sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di pressione interpolato sulla griglia della simulazione Micro-SWIFT, anch'essa formata da livelli verticali *terrain-following*. Gli ostacoli sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale: nel grafico la Bora soffia da destra a sinistra. 46
- 3.3 Confronto tra la la rappresentazione dell'orografia all'interno di Micro-SWIFT (in alto, risoluzione 4 m) e la rappresentazione dell'orografia all'interno di WRF (in basso, risoluzione 2 km): il dislivello graduale di oltre 300 m nell'orografia di Micro-SWIFT viene sottostimato come un unico salto tra 266 m s.l.m. e 156 m s.l.m all'interno di WRF. La linea rossa rappresenta la proiezione della sezione verticale passante per la Torre Chirurgica dell'ospedale di Cattinara (punto rosso) orientata in direzione di provenienza indicativa della Bora (65°N). Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2$ m) sono rappresentati in grigio scuro. La linea nera nell'orografia di WRF corrisponde all'isolinea dei 266 m s.l.m. mentre i punti in blu rappresentano i profili utilizzati per l'interpolazione sulla griglia del dominio di Micro-SWIFT (riquadro rosso). Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84. 47
- 3.4 Mappa delle zone di influenza degli edifici a $z^* = 10$ m: in grigio la *unperturbed zone*, in blu la *rooftop recirculation zone* (non presente in queste simulazioni), in azzurro la *skimming zone*, in verde la *displacement zone*, in ocra la *cavity zone* e in rosa la *wake zone*, in grigio scuro gli edifici. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84. 52

3.5	Sezione verticale identificata in Figura 3.3 delle zone di influenza degli edifici nei pressi dell'ospedale di Cattinara: in grigio la <i>unperturbed zone</i> , in blu la <i>rooftop recirculation zone</i> (non presente in queste simulazioni), in azzurro la <i>skimming zone</i> , in verde la <i>displacement zone</i> , in ocra la <i>cavity zone</i> e in rosa la <i>wake zone</i> , in grigio scuro gli edifici e il livello del terreno. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale.	52
3.6	Mappa dell'orografia con le posizioni degli anemometri (triangoli in bianco). A causa della risoluzione orizzontale di 4 m, nella simulazione l'anemometro posizionato al primo livello dell'eliporto risulta sovrapposto a quello posizionato al secondo livello nonostante nella realtà siano sfasati orizzontalmente di 1.5 m. Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2$ m) sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.	60
3.7	Diagrammi Hovmöller <i>range vs</i> tempo di velocità orizzontale e direzione del vento relativi alle distanze radiali 500-1000 m della sezione PPI del LIDAR con elevazione 15° (distanza orizzontale $\simeq 483$ -966 m a parità di quota assoluta e $\simeq 129$ -258 m di differenza di quota assoluta), ottenuti tramite algoritmo VADtrad 2D. Dati ogni $\simeq 27$ minuti. In nero dati assenti o con meno dell'80% degli angoli azimutali sopravvissuti al controllo di qualità.	63
3.8	Lista degli eventi di Bora persistenti individuati nel periodo gennaio-marzo 2026, in ordine cronologico. I dati di intensità e raffica sono relativi al molo F.lli Bandiera. Le serie temporali rappresentano l'intensità media oraria al molo F.lli Bandiera nei periodi gennaio-marzo (a sinistra) e del caso studio, ossia il 26 marzo (a destra).	64
3.9	Mappa di geopotenziale a 500hPa (tratta da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) rappresentativa dell'evento del 26 marzo 2026 (Bora ciclonica marittima).	65
3.10	Mappa di temperatura a 850hPa (tratta da wetterzentrale.de su rianalisi CFS, ultima consultazione 16 maggio 2026) a 48 h dall'inizio dell'evento del 26 marzo 2026 (Bora ciclonica marittima).	65
4.1	Andamento del residuo nel corso delle iterazioni dell'algoritmo di risoluzione del <i>solver</i> prognostico di Micro-SWIFT per le 24 ore di simulazione relative al 26 marzo 2026.	67
4.2	Da sinistra a destra: confronto dei profili simulati WRF di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la sera del 25 marzo (18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, <i>International Standard Atmosphere</i>).	72

- 4.3 In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati WRF di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 00-05 UTC, seconda riga 06-11 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* notturno del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta). 73
- 4.4 In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la prima parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 00-05 UTC, seconda riga 06-11 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* mattutino del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta). 74
- 4.5 In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la seconda parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 12-17 UTC, seconda riga 18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* pomeridiano del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta). 75

- 4.6 In alto, da sinistra a destra: confronto dei profili simulati Micro-SWIFT di velocità orizzontale, direzione, velocità verticale e temperatura (dato orario, linee) con i profili osservati (dato mediato sulle mezz'ore precedente e successiva, triangoli) nella posizione del LIDAR della campagna sperimentale durante la seconda parte dell'evento di Bora del 26 marzo (prima riga 12-17 UTC, seconda riga 18-23 UTC). Le linee tratteggiate nel pannello della temperatura indicano gradienti di 9.8 K/km (adiabaticità secca) e di 6.5 K/km (adiabaticità umida ISA, *International Standard Atmosphere*). In basso: velocità radiale misurata da uno *scan* serale del LIDAR con sezione trasversale di elevazione 15°, settore angolare 20°-110°N, *range* massimo di 3 km (circa 2.9 km in orizzontale e 0.78 km di differenza di quota assoluta). 76
- 4.7 In alto, seconda colonna: stime dell'intensità media della turbolenza TI osservata e simulata nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale per l'evento di Bora del 26 marzo. L'errore statistico su TI è propagato dall'errore statistico su TI^2 . In alto, terza e quarta colonna: risultati dei *fit* tramite leggi di potenza mostrati in Figura 4.7. In basso: *scatterplot* sul piano energia cinetica turbolenta vs energia cinetica media dei dati osservati e simulati nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale per l'evento di Bora del 26 marzo con *fit* lineare in scala log-log. 78
- 4.8 Confronto delle serie temporali simulate (dato orario, linee) e osservate (dato mediato su mezz'ora, punti) di intensità orizzontale (blu) e direzione (in rosso) del vento nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale (dall'alto in basso in ordine di altitudine) durante l'evento di Bora del 26 marzo. 79
- 4.9 Confronto delle serie temporali simulate (dato orario, linee) e osservate (dato mediato su mezz'ora, punti) dell'energia cinetica turbolenta nelle posizioni degli anemometri della campagna sperimentale (dall'alto in basso in ordine di altitudine) durante l'evento di Bora del 26 marzo. 80
- 4.10 Mappa dell'orografia con le posizioni in cui viene effettuato il confronto tra i profili verticali della simulazione Micro-SWIFT e delle simulazioni CFD di (punti rossi collegati da sezioni verticali tratteggiate). Gli ostacoli al primo livello verticale della simulazione Micro-SWIFT ($z^* = 2$ m) sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84. 83
- 4.11 Da sinistra a destra: confronto dei profili di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta simulati attraverso Micro-SWIFT (in nero la media tra le ore 02-13 UTC e in grigio la fascia del 25°-75° percentile) con i profili simulati attraverso CFD (in arancione simulazione con profilo di vento logaritmico imposto all'entrata del dominio) nelle posizioni *inlet* e *valley*. I profili sono adimensionalizzati attraverso $U_{\text{ref}}^{\text{SWIFT}} = 7.6$ m/s e $U_{\text{ref}}^{\text{CFD}} = 13.7$ m/s calcolati alla posizione *inlet* più vicino a 10 m AGL delle rispettive simulazioni. Quote s.l.m.: *inlet* = 347.7 m, *point3* = 230.5 m; 85

4.12	Da sinistra a destra: confronto dei profili di velocità orizzontale ed energia cinetica turbolenta simulati attraverso Micro-SWIFT (in nero la media tra le ore 02-13 UTC e in grigio la fascia del 25°-75° percentile) con i profili simulati attraverso CFD (in arancione, blu e verde rispettivamente la simulazione con profilo di vento logaritmico, interpolato dai profili di velocità orizzontale di WRF e anche verticale di WRF imposti all'entrata del dominio) nelle posizioni relative alla prima (prima riga), seconda (seconda riga) e terza sezione (terza riga). I profili sono adimensionalizzati attraverso $U_{\text{ref}}^{\text{SWIFT}} = 7.6 \text{ m/s}$ e $U_{\text{ref}}^{\text{CFD}} = 13.7 \text{ m/s}$ calcolati alla posizione <i>inlet</i> più vicino a 10 m AGL delle rispettive simulazioni. Quote s.l.m.: <i>point1</i> = 204.4 m, <i>point3</i> = 247.6 m; <i>hospital</i> = 252.6 m, <i>downwind</i> = 237.7 m; <i>point2</i> = 215.6 m, <i>point4</i> = 158.6 m.	86
4.13	In alto: mappa del campo di velocità orizzontale al livello $z^* = 10 \text{ m}$ su tutto il dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84. In basso: sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di energia cinetica turbolenta per tutta la lunghezza del dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale.	87
4.14	In basso: sezione verticale identificata in Figura 3.3 del campo di velocità orizzontale per tutta la lunghezza del dominio della simulazione alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro e il terreno in marrone. In ascissa la distanza dal punto di intersezione tra il bordo ovest del dominio e la sezione verticale. In alto e in centro: <i>zoom</i> sulle zone di ricircolo rispettivamente in scia all'Ospedale di Cattinara e presso la zona di risalita della valle.	88
4.15	Mappe del campo di velocità orizzontale simulato ai livelli $z^* = 10 \text{ m}$ (circa al 10% dell'altezza dell'edificio, pannello in alto) e $z^* = 21 \text{ m}$ (circa al 20% dell'altezza dell'edificio, pannello in basso) attorno all'Ospedale di Cattinara alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.	93
4.16	Mappe del campo di velocità orizzontale simulato ai livelli rispettivamente $z^* = 40 \text{ m}$ (circa al 50% dell'altezza dell'edificio, pannello in alto) e $z^* = 70 \text{ m}$ (circa al 80% dell'altezza dell'edificio, pannello in basso) attorno all'Ospedale di Cattinara alle 02 UTC del 26 marzo. Gli edifici sono rappresentati in grigio scuro. Le coordinate sono espresse nel sistema di proiezione UTM33 WGS 84.	94
A.1	Estratti dal report tecnico interno di ARPA FVG (Bonafè et al., 2022) ([20]=(Esteban et al., 2005) e [21]=(Lemus-Canovas et al., 2019)).	100
A.2	Tabella di classificazione del vento secondo la scala Beaufort (tratta da nautica.it, ultima consultazione: 13 aprile 2026).	101

A.3	Distribuzione delle ore nei giorni non di Bora (colori più spenti) e nei giorni di Bora (colori più accesi) in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) per varie stazioni meteorologiche. I baffi rappresentano il 1° e il 99° interquantile.	102
A.4	Distribuzioni mensili delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	103
A.5	Distribuzioni mensili delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	104
A.6	Distribuzioni per WT delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	105
A.7	Distribuzioni per WT delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	106
A.8	Distribuzioni per fascia oraria delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) al molo F.lli Bandiera. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	107
A.9	Distribuzioni per fascia oraria delle ore nei giorni di Bora in intensità media oraria (blu) e raffica (rosso) a Cattinara. I baffi rappresentano il 5° e il 95° interquantile.	108
A.10	Mappa del territorio carsico (tratta da maps.google.com), con sovrapposte rose dei venti delle raffiche orarie nei giorni di Bora (selezionati attraverso i dati del molo F.lli Bandiera) per tutte le stazioni prese in considerazione e dettagli dell'orografia del territorio e del campo di vento presentato in Figura ?? (tratti da (Cintolesi et al., 2024)). La mappa è ruotata di 67.5° (allineando il centro del settore nord-est/est con la verticale).	109

Bibliografia

- Al Oqaily D. et al. (2025). *Evaluating WRF Multiscale Wind Simulations in Complex Terrain: Insights From the Perdigão Field Campaign*. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 130(15), e2025JD044055.
- Ampatzidis P. et al. (2026). *Downscaling Extreme Winds to the Building Scale for Resilient Critical Infrastructure*. Preprint sottoposto a Urbane Climate.
- ARIA Technologies (2019). *General Design Manual: SWIFT Wind Field Model*. ARIA Report, Boulogne Billancourt, Francia.
- ARPA FVG (2026). *Gennaio 2026*. Meteo FVG Report, Palmanova, Italia.
- ARPA FVG (2026). *Marzo 2026*. Meteo FVG Report, Palmanova, Italia.
- Avila M. et al. (2022). *Microscale simulations of extreme events in complex terrain driven by mesoscale budget components*. Journal of Physics: Conference Series, 2265(2), 022021.
- Baidar S. et al. (2023). *Using optimal estimation to retrieve winds from velocity-azimuth display (VAD) scans by a Doppler lidar*. Atmospheric Measurement Techniques, 16(15).
- Bervida M. et al. (2021). *Bora flow characteristics in a complex valley environment*. Remote Sensing, 13(21), 4363.
- Bilal M. et al. (2016). *Wind over complex terrain—Microscale modelling with two types of mesoscale winds at Nygardsfjell*. Renewable Energy, 99, 647–653.
- Bin Y. et al. (2023). *Large Eddy Simulation of Separated Flows on Unconventionally Coarse Grids*. Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME, 146(9), 091501.
- Bonafè G. et al. (2022). *Le catene modellistiche meteorologica e di qualità dell'aria: verifica, diagnostica, sviluppo*. ARPA FVG, Relazione tecnica aprile 2022.
- Brogno L. et al. (2021). *Driving mechanisms of double-nosed low-level jets during MATERHORN experiment*. Journal of the Atmospheric Sciences, 78(12).
- Browning K. A., Wexler R. (1967). *The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 7, 105–113.

- Camuffo D. (1990). *Acidic precipitation research in Italy, Acidic precipitation monograph*. Advances in Environmental Science, 5, 229–265.
- Cao Y. et al. (2023). *Large-eddy simulation of separated turbulent flows over a three-dimensional hill using WRF and OpenFOAM*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 236, 105357.
- Carvalho D. et al. (2012). *A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy*. Environmental Modelling and Software, 33, 23–34.
- Castorrini A. et al. (2021). *Increasing spatial resolution of wind resource prediction using NWP and RANS simulation*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 210, 104499.
- Cesini D., Morelli S., Parmiggiani F. (2004). *Analysis of an intense bora event in the Adriatic area*. Natural Hazards and Earth System Science, 4, 323–337.
- Che Y. et al. (2022). *A multi-scale model for day-ahead wind speed forecasting: A case study of the Houhoku wind farm, Japan*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52, 101995.
- Cintolesi C. et al. (2024). *Model of high wind loading on a high-rise building*. RISKADAPT project D3.5.
- CRMA ARPA FVG (2018). *Downscaling di analisi meteorologiche ad alta risoluzione sul dominio Alpe Adria*. Report n. 001, Palmanova, Italia.
- Davolio S. et al. (2015). *Exceptional Bora outbreak in winter 2012: validation and analysis of high-resolution atmospheric model simulations in the northern Adriatic Area*. Dynamics of Atmospheres and Oceans 71, 1–20.
- Dong X. et al. (2021). *Validation and sensitivity study of Micro-SWIFT SPRAY against wind tunnel experiments for small-scale air dispersion modeling between mountains and dense building at a nuclear power plant site*. Progress in Nuclear Energy, 142, 104007.
- Dorman C. E. et al. (2007). *February 2003 marine atmospheric conditions and the bora over the northern Adriatic*. Journal of Geophysical Research Oceans, 112(3), C03S03.
- Duran P., Meißner C., Casso P. (2020). *A new meso-microscale coupled modelling framework for wind resource assessment: A validation study*. Renewable Energy, 160, pp. 538–554.
- Esteban P. et al. (2005). *Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees*. International Journal of Climatology, 25(3), 319–329.
- Fernando H. J. S. (2010). *Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain*. Annual Review of Fluid Mechanics, 42, 365–389.

- Gallai I. et al. (2025). *Configurazione e risultati di una corsa sperimentale WRF con parametrizzazioni SSO*. ARPA FVG, Relazione tecnica giugno 2025.
- Giani P., Crippa P. (2024). *On the Sensitivity of Large-Eddy Simulations of the Atmospheric Boundary Layer Coupled with Realistic Large-Scale Dynamics*. Monthly Weather Review, 152(2), pp. 1057–1075.
- Goc C. A. et al. (2021). *Large eddy simulation of aircraft at affordable cost: a milestone in computational fluid dynamics*. Flow, 1, E14.
- Golem P. et al. (2023). *The effect of orography on bora wind turbulence*. Boundary-Layer Meteorology, 187(1-2), 193–212.
- Grisogono B., Belušić D. (2009). *A review of recent advances in understanding the meso and microscale properties of the severe Bora wind*. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography 61, 1–16.
- Horvath K., Bajić A., Ivatek-Šahdan S. (2011). *Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50(8), 1676–1691.
- Huang M. et al. (2024). *Multi-scale simulation of typhoon wind field at building scale utilizing mesoscale model with nested large eddy simulation*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 249, 105733.
- Jeromel M., et al. (2009). *Weibull distribution of bora and sirocco winds in the northern Adriatic Sea*. Geofizika, 26(1), pp. 85–100.
- Jurčec V. (1980). *On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia*. Pure and Applied Geophysics Pageoph, 119(3), 640–657.
- Jurčec V. (1988). *The Adriatic frontal bora type*. Croatian Meteorological Journal, 119(3), 640–657.
- Kaimal J. C., Finnigan J. J., (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement*. Oxford University Press.
- Klemp J., Durran D. (1987). *Numerical modelling of bora winds*. Meteorology and Atmospheric Physics 36, 215–227.
- Larsén X. G., Mann J. (2009). *Extreme winds from the NCEP/NCAR reanalysis data*. Wind Energy, 12(6), 556–573.
- Lemus-Canovas M. et al. (2019). *An R package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data*. Environmental Modelling & Software, 118, 114–119.
- Letzgus P. et al. (2020). *Microscale CFD Simulations of a Wind Energy Test Site in the Swabian Alps with Mesoscale Based Inflow Data*. Journal of Physics Conference Series, 1618(6), 062021.

- Li Z. et al. (2026). *Downscaled simulation approach for near-field nuclear facility pollutant atmospheric transport and dispersion using a coupled WRF-CFD downscaling model framework*. Journal of Environmental Radioactivity, 292, 107864.
- Liu J. et al. (2025). *A downscaling framework with WRF-UCM and LES/RANS models for urban microclimate simulation strategy: Validation through both measurement and mechanism model*. Building and Environment, 269, 112361.
- Louis J.F. (1979). *A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere*. Boundary Layer Meteorology, 17, 187-202.
- Louis J.F., Tiedtke M., Geleyn J.F. (1982). *A short history of the PBL parameterization at ECMWF*. Proceedings, ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization Reading, UK, 59-80.
- Ma Y. et al. (2024). *Research on short-term prediction methods for small-scale three-dimensional wind fields*. Applied Sciences, 14(5), 1871.
- Makjanić B. (1970). *On the diurnal variation of the Bora wind speed*. Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, 349, 33-92.
- Mana M. et al. (2020). *Day-ahead wind power forecast through high-resolution meso-scale model: Local computational fluid dynamics versus artificial neural network downscaling*. Journal of Solar Energy Engineering, 142(3), 034502.
- Menke R. et al. (2020) *Multi-lidar wind resource mapping in complex terrain*. Wind Energy Science, 5(3).
- Moussiopoulos N. (1998). *A refined Diagnostic Wind Model*. Institut für Technische Thermodynamik, Universität Karlsruhe.
- Muggeo V. M. R. (2003). *Estimating regression models with unknown break-points*. Statistics in Medicine, 22(19), 3055-3071.
- Mughal M. O. et al. (2017). *Wind modelling, validation and sensitivity study using Weather Research and Forecasting model in complex terrain*. Environmental Modelling and Software, 90, 107-125.
- Mughal M. O. et al. (2018). *Forecasting and verification of winds in an East African complex terrain using coupled mesoscale and micro-scale models*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 176, pp. 13-20.
- Olauson J. (2018). *ERA5: the new champion of wind power modelling?*. Renewable Energy, 126, 322-331.
- Oldrini O., Armand P. (2019). *Validation and Sensitivity Study of the PMSS Modelling System for Puff Releases in the Joint Urban 2003 Field Experiment*. Boundary Layer Meteorology, 171(3).
- Petkovsek Z. (1987). *Main bora gusts—a model explanation*. Geofizika, 4, 41-50.

- Pope S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Pullen J. et al. (2007). *Bora event variability and the role of air-sea feedback*. Journal of Geophysical Research Oceans, 112(3), C03S18.
- Ramon J. et al. (2019). *What global reanalysis best represents near-surface winds?*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145(724), 3236–3251.
- Ratto C. F., Festa R., Romeo C. (1994). *Mass-consistent models for wind fields over complex terrain: The state of the art*. Environmental Software, 9, 247–268.
- Ricci A. et al. (2022). *Static downscaling of mesoscale wind conditions into an urban canopy layer by a CFD microscale model*. Building and Environment, 225, 109626.
- Salameh T. et al. (2010). *Statistical downscaling of near-surface wind over complex terrain in southern France*. Meteorology and Atmospheric Physics, 107(3-4), 123–137.
- Schiavini C. (2026). *Atmospheric pollutant dispersion on industrial sites: concentration fluctuations in complex geometry terrains*. Tesi di dottorato, École Centrale de Lyon & Politecnico di Torino.
- Šoljan V. et al. (2018). *Micro-scale properties of different bora types*. Atmosphere, 9(3), 116.
- Smith R. B. (1985). *On Severe Downslope Winds*. Journal Atmospheric Sciences, 42, 2597–2603.
- Song S., De Graaf D. B., Eaton J. K. (2000) *Experimental study of a separating, reattaching, and redeveloping flow over a smoothly contoured ramp*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 21, 512–519.
- Soares P. M. M. et al. (2019). *Process-based evaluation of the VALUE perfect predictor experiment of statistical downscaling methods*. International Journal of Climatology, 39(9), 3868–3893.
- Solbakken K., Birkelund Y., Samuelsen E. M. (2021). *Evaluation of surface wind using WRF in complex terrain: Atmospheric input data and grid spacing*. Environmental Modelling and Software, 145, 105182.
- Uchida T., Li G. (2018). *Comparison of RANS and LES in the Prediction of Airflow Field over Steep Complex Terrain*. Open Journal of Fluid Dynamics, 8, 286–307.
- Večenaj Ž., Belušić D., Grisogono, B. (2010). *Characteristics of the winter-time Alpine bora-type flow*. Boundary-Layer Meteorology, 137(3), 427–446.
- Večenaj Ž., Malečić B., Grisogono B. (2021). *Estimation of turbulent triplet covariances for bora flows*. Fluids, 6(12), 452.
- Belušić Vozila A. et al. (2019). *Wind over the Adriatic region in CORDEX climate change scenarios*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(1), 110–130.

- Belušić Vozila A. et al. (2021). *A weather-type classification and its application to near-surface wind climate change projections over the adriatic region*. Atmosphere, 12(8), 948.
- Weibull W. (1951). *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*. Journal of Applied Mechanics, 18, 293-297.
- Xiao X. et al. (2026). *Study on wind prediction over coastal complex terrain with a refined weather research and forecasting-computational fluid dynamics model*. Physics of Fluids, 38(1), 016612.
- Wieringa J. (1992). *Updating the Davenport roughness classification*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, 357-368.
- Yamada T., Koike K. (2011). *Downscaling mesoscale meteorological models for computational wind engineering applications*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99(4), 199-216.