La Cooperazione al cuore del Mediterraneo

MARITTIMO - IT FR - MARITIME

TOSCANA - LIGURIA - SARDEGNA - CORSE

La Coopération au coeur de la Méditerranée

VENTO e PORTI

La previsione del vento per la gestione e la sicurezza delle aree portuali

VENT et PORTS

La prévision du vent pour la gestion et la sécurité des zones portuaires



Autorità Portuale di Genova

Autorità portuale Livorno

DICAT Università di Genova

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

Autorità Portuale della Spezia

CCI

Programma cofinanziato con il Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale

Programma cofinancè par le Fonds Européen de DéveloppementRégional

Il Progetto

Il progetto “Vento e Porti” ha affrontato lo studio del vento con lo scopo di fornire la valutazione statistica e la previsione del vento atteso a medio (72 ore) e breve termine (entro un’ora e mezza) in tutte le zone dei 5 porti partner dell’alto Tirreno (Genova, Savona, La Spezia, Livorno, Bastia), in planimetria e fino a un’altezza significativa per le attività portuali.

Queste informazioni, fruibili tramite uno specifico sito Web Gis meteorologico in primo luogo da Autorità portuali e Capitanerie di Porto, possono permettere a enti e operatori portuali di meglio pianificare l’accessibilità al porto e le attività operative: più in particolare, di porre in essere tutte quelle azioni di prevenzione per definire le situazioni di rischio e le soluzioni più idonee nei diversi casi (accosto delle navi; carico e scarico merci; avvisi preventivi ai trasportatori).

“Vento e Porti” ha inteso portare nella portualità le acquisizioni scientifiche tra le più evolute nel campo dello studio del vento (Università di Genova - DICAT, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, Ambiente, Territorio; Dipartimento di Fisica; Meteo France) con l’intento di fornire un contributo di conoscenza per migliorare l’accessibilità, la prevenzione e la sicurezza, l’organizzazione delle attività nelle aree operative del porto, a terra e sullo specchio acqueo: zone esposte a venti molto forti che possono comportare situazioni di notevole rischio per l’integrità fisica di chi vi lavora, per la stabilità delle strutture, delle merci stoccate, e per le imbarcazioni in fase di entrata e di attracco in porto.

Le Projet

Le Projet “Vent et Ports” a abordé l'étude du vent dans le but de fournir une évaluation statistique et de prévision du vent à moyen terme (jusqu'à 72 heures) et à court terme (jusqu'à une heure et demie) dans tous les 5 ports partners du nord de la mer Tyrrhénienne (Gênes, Savone, La Spezia, Livourne, Bastia en Corse), dans le plan et jusqu'à une hauteur, significative pour les activités des ports.

Ces informations sont disponibles à travers l'accès à un site météorologique spécifique Web Gis avant tout par les Autorités portuaires et les Capitaineries de Port; ces informations peuvent permettre aux organismes et aux opérateurs portuaires de mieux planifier l'accessibilité au port et les activités opérationnelles: en particulier mettre en œuvre toutes les actions préventives pour la définition des situations de risque et les solutions les plus appropriées dans les différents cas (l'accostage des navires, le chargement et le déchargement des marchandises; les alertes aux transporteurs).

"Vent et ports" a permis de mettre à disposition des ports la connaissance scientifique la plus avancée dans l'étude du vent (Université de Gênes - DICAT, Département de Génie des Constructions, de l'Environnement et du Territoire; Département de Physique; Météo France) avec l'intention de fournir un apport de connaissances pour améliorer l'accessibilité au port, la prévention et la sécurité au travail, et l'organisation des activités dans les domaines opérationnels du port, sur terre et sur l'eau: les zones exposés à des vents forts qui peuvent conduire à des situations de menace importante pour l'intégrité physique de ceux qui travaillent, pour la stabilité des structures, des produits stockés, et pour les bateaux lors de l'entrée et à l’amarrage.

MARITTIMO - IT FR - MARITIME
TOSCANA - LIGURIA - SARDEGNA - CORSE

Progetto "Vento e Porti"

La previsione del vento per la gestione e la sicurezza delle aree portuali

Projet « Vent et Ports »

La prévision du vent pour la gestion et la sécurité des zones portuaires

rapporto finale / rapport final

Finito di stampare nel mese di giugno 2012
Fini d'imprimer en juin 2012

ISBN 978–88–901246–4–8

Realizzazione della pubblicazione / *Réalisation de la publication*

Questa pubblicazione costituisce il rapporto finale e uno dei prodotti conclusivi del Progetto "Vento e Porti — La previsione del vento per la gestione e la sicurezza delle aree portuali", attuato dalle Autorità Portuali di Genova (capofila), in partenariato con l'Autorità Portuale di Savona, l'Autorità Portuale della Spezia, l'Autorità Portuale di Livorno, l'Università degli Studi di Genova - DICAT nel ruolo di attuatore scientifico, e la Chambre de Commerce et d'Industrie de Bastia et de la Haute Corse.

Cette publication constitue le rapport final et un des produits conclusifs du Projet « Vent et Ports — La prévision du vent pour la gestion et la sécurité des zones portuaires », réalisé par les Autorités Portuaires de Gênes (chef de file), en partenariat avec l'Autorité Portuaire de Savone, l'Autorité Portuaire de La Spezia, l'Autorité Portuaire de Livourne, l'Université de Gênes - DICAT en tant qu'acteur scientifique, et la Chambre de Commerce et d'Industrie de Bastia et de la Haute-Corse.

Cura della pubblicazione / *Coordination de la publication*

Autorità Portuale di Genova:
Giuseppe Canepa, responsabile del Progetto / *responsable du Projet*
Mauro Bianchi, responsabile finanziario del Progetto / *responsable financier du Projet*

Finporto di Genova S.p.A. (coordinamento, bozze testi introduttivi, sviluppo grafico, consulenza grafica, segreteria / *coordination, ébauches textes introductifs, design et développement graphique, conseiller graphique, secrétariat*):
Pompeo Mazzeo, Rachele Gangale, Ileana Dolcino, Cristina Furnari

Autori del testo scientifico / *Auteurs du texte scientifique*

Parte I / *I^re partie*

Università degli Studi di Genova - DICAT:
Giovanni Solari
Maria Pia Repetto
Massimiliano Burlando

con la collaborazione di: / *avec la collaboration de :*
Patrizia de Gaetano, Marina Pizzo, Marco Tizzi

Rapporto di Météo-France / *Rapport de Météo-France*

Parte II / *II^e partie*

Jean-Pierre Rambaud
Jean-Paul Giorgetti
Erick Kügler

Il progetto ha beneficiato del contributo finanziario del FESR-FEDER, Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale, nell'ambito del Programma Operativo Italia/Francia "Marittimo" 2007–2013. Non è consentito in alcun modo utilizzare questo testo per scopi commerciali o di lucro. La riproduzione e la diffusione, anche di estratti, del testo può avvenire citando la fonte, e l'inserimento su CD-Rom oppure la pubblicazione su riviste commerciali può avvenire previa autorizzazione preventiva.

Le projet a bénéficié de la contribution financière du FEDER, Fonds Européen de Développement Régional, dans le cadre du Programme Opérationnel Italie/France « Maritime » 2007–2013. *Il est formellement interdit d'utiliser ce texte à des fins commerciales ou lucratives. La reproduction et la diffusion, même partielles, du texte est autorisée à condition de citer la source, et la copie sur CD-Rom et/ou la publication sur des revues commerciales requièrent une autorisation préalable.*

Realizzazione del Progetto

Coordinamento generale

Autorità Portuale di Genova, Capofila:
Giuseppe Canepa, responsabile del Progetto
Mauro Bianchi, responsabile finanziario del Progetto
Finporto di Genova S.p.A. (assistenza al coordinamento del progetto, segreteria organizzativa e amministrativa, realizzazione del sito `http://www.ventoeporti.net`):
Pompeo Mazzeo, Cristina Furnari, Patrizia Thea, Monica Fontanesi

Sviluppo scientifico e supervisione Coordinamento del WebGIS meteorologico

Università degli Studi di Genova - DICAT:
Giovanni Solari
Maria Pia Repetto
Massimiliano Burlando
con la collaborazione di:
Patrizia de Gaetano, Marina Pizzo, Marco Tizzi, Mattia Parodi
con la partecipazione di:
Météo-France (consulente scientifico per la C. C. I. de Bastia et de la Haute Corse):
Jean-Pierre Rambaud
Jean-Paul Giorgetti
Erick Kügler

Comitato di Pilotaggio del Progetto

Autorità Portuale di Genova (Ente capofila): *Giuseppe Canepa, Presidente; Mauro Bianchi; Giuseppe Di Luca*

Autorità Portuale di Livorno: *Giovanni Motta, membro effettivo; Fabio Ceccarini (in precedenza Livio Stefanelli); Lisa Oliviero (in precedenza Domenico Loreto)*

Università degli Studi di Genova - DICAT (Attuatore scientifico del progetto): *Giovanni Solari, membro effettivo; Maria Pia Repetto; Massimiliano Burlando (in precedenza Giuseppe Piccardo)*

Autorità Portuale di Savona: *Rossana Varna, membro effettivo (in precedenza Gianmario Moretti, poi Luca Odero), Federica Moretti, Paolo Canavese (in precedenza Furio Pallanca)*

Autorità Portuale della Spezia: *Lorenzo Montani, membro effettivo (in precedenza Giorgio Barletta), Lorenzo De Conca, Federica Montaresi*

Chambre de Commerce et d'Industrie de Bastia et de la Haute Corse: *Christophe Perfettini, membro effettivo, Pierre Torre, Marie-Madeleine Guidicelli*

Hanno inoltre collaborato

Autorità Portuale di Genova: Daniela Gallo (Direzione Amministrativa); Davide Sciutto, Giancarlo Curcio, Antonella DellaCasa Mongiardino, Carmina Latorraca (Direzione Tecnica); Giuseppe Di Luca, Marina Garavello, Marco Basile (Servizio Ambiente); Alessandra Busnelli, Anna Palmulli (Servizio Legale e Gare)
Università degli Studi di Genova - DICAT: Luigi Carassale, Luisa Carlotta Pagnini; Anna Maria Marzocchi, Anna Rizzo (Direzione Amministrativa)
Autorità Portuale di Savona: Simone Arecco, Daniele Prencipe (Settore Telematica), Marina Monti, Cristina De Gregori, Silvana Caviglia, Marina Lauricella (Settore Promozione e Comunicazione), Emanuela Barattero (Settore Amministrativo)
Autorità Portuale della Spezia: Franco Pomo (Dirig. Ing. Area Tecnico Operativa); Capitaneria di Porto Sez. La Spezia - MARITELE - MARIDIPART (Comando in Capo dell'Alto Tirreno)
C.C.I. de Bastia et de la Haute Corse: Marie Riolacci (Marketing & Communication); Berti Dominique; Ottaviani J. Marc (Servizio Informatico) ; Christelle Romanacce (Direzione Amministrativa)

Réalisation du Projet

Coordination générale

Autorità Portuale di Genova, Organisme chef de file :
Giuseppe Canepa, responsable du projet
Mauro Bianchi, responsable financier du projet
Finporto di Genova S.p.A (assistance à la coordination du projet, secrétariat pour l'organisation et l'administration, réalisation du site `http://www.ventoeporti.net`) : Pompeo Mazzeo, Cristina Furnari, Patrizia Thea, Monica Fontanesi

Développement scientifique et contrôle Coordination du WebGIS météorologique

Université de Gênes - DICAT :
Giovanni Solari
Maria Pia Repetto
Massimiliano Burlando
avec la collaboration de :
Patrizia de Gaetano, Marina Pizzo, Marco Tizzi, Mattia Parodi
avec la participation de :
Météo-France (conseiller scientifique pour la C. C. I. de Bastia et de la Haute-Corse) :
Jean-Pierre Rambaud
Jean-Paul Giorgetti
Erick Kügler

Comité de Pilotage du Projet

Autorité Portuaire de Gênes (Organisme chef de file) : *Giuseppe Canepa, Président ; Mauro Bianchi ; Giuseppe Di Luca*

Autorité Portuaire de Livourne : *Giovanni Motta, membre effectif ; Fabio Ceccarini (avant lui Livio Stefanelli) ; Lisa Oliviero (avant elle Domenico Loreto)*

Université de Gênes - DICAT (Acteur scientifique du projet) : *Giovanni Solari, membre effectif ; Maria Pia Repetto ; Massimiliano Burlando (avant lui Giuseppe Piccardo)*

Autorité Portuaire de Savone : *Rossana Varna, membre effectif (avant elle Gianmario Moretti, puis Luca Odero), Federica Moretti, Paolo Canavese (avant lui Furio Pallanca)*

Autorité Portuaire de La Spezia : *Lorenzo Montani, membre effectif (avant lui Giorgio Barletta), Lorenzo De Conca, Federica Montaresi*

Chambre de Commerce et d'Industrie de Bastia et de la Haute-Corse : *Christophe Perfettini, membre effectif, Pierre Torre, Marie-Madeleine Guidicelli*

Ont également collaboré

Autorité Portuaire de Gênes : Daniela Gallo (Direction Administrative) ; Davide Sciutto, Giancarlo Curcio, Antonella DellaCasa Mongiardino, Carmina Latorraca (Direction Technique) ; Giuseppe Di Luca, Marina Garavello, Marco Basile (Service Environnement) ; Alessandra Busnelli, Anna Palmulli (Service Juridique et Appels d'offres)
Université de Gênes - DICAT : Luigi Carassale, Luisa Carlotta Pagnini ; Anna Maria Marzocchi, Anna Rizzo (Direzione Amministrativa)
Autorité Portuaire de Savone : Simone Arecco, Daniele Prencipe (Settore Telematica), Marina Monti, Cristina De Gregori, Silvana Caviglia, Marina Lauricella (Settore Promozione e Comunicazione), Emanuela Barattero (Settore Amministrativo)
Autorité Portuaire de La Spezia : Franco Pomo (Dirig. Ing. Area Tecnico Operativa) ; Capitaneria di Porto Sez. La Spezia - MARITELE - MARIDIPART (Comando in Capo dell' Alto Tirreno)
C.C.I. de Bastia et de la Haute Corse : Marie Riolacci (Marketing & Communication) ; Berti Dominique ; Ottaviani J. Marc (Service informatique) ; Christelle Romanacce (Direction Administrative)

Prefazione

di
Luigi Merlo, Presidente dell'Autorità Portuale di Genova
Giuliano Gallanti, Presidente dell'Autorità Portuale di Livorno
Paolo Blondeaux, Direttore del DICAT — Università degli Studi di Genova
Cristoforo Canavese, Presidente dell'Autorità Portuale di Savona
Lorenzo Giovanni Forcieri, Presidente dell'Autorità Portuale della Spezia
Paul Trojani, Presidente della CCI di Bastia e Haute-Corse

Il progetto "Vento e Porti" è una rinnovata dimostrazione dei legami che, al di là della sola dimensione degli scambi, collegano i porti francesi e italiani del bacino dell'Alto Tirreno di Genova, Livorno, Savona, La Spezia e Bastia.

In questo quadro, è stata colta con interesse l'opportunità fornita dal Programma comunitario di cooperazione transfrontaliera Italia/Francia "Marittimo" 2007–2013 per realizzare un progetto che ricopre un ambito di intervento e di interesse di indubbio rilievo per le comunità portuali, ha consentito ai nostri porti di dotarsi di nuove stazioni anemometriche e di studiare un fenomeno meteorologico talvolta problematico per la sicurezza nel lavoro in porto e che ne può subordinare l'accessibilità dal mare e da terra.

Tutti i porti, a diversi gradi, subiscono l'impatto del vento, e quindi le informazioni preventive sul vento atteso potranno essere di ausilio agli enti e agli operatori per valutare in anticipo i rischi, per mettere in sicurezza le zone di lavoro più esposte o per lanciare avvisi preventivi anche con lo scopo di ridurre gli effetti sul traffico cittadino e ai varchi portuali.

Ma al di là della dimensione operativa, il valore aggiunto di "Vento e Porti" è quello di aver portato negli ambiti della portualità la ricerca avanzata nel campo dell'ingegneria del vento applicata e finalizzata a situazioni pratiche condivise con gli stakeholder: da questo punto di vista il progetto rappresenta un esempio virtuoso di network attivo e costruttivo sia fra i porti dell'Alto Tirreno sia fra questi e il mondo della scienza, il DICAT della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova — attuatore scientifico e partner del progetto — e Météo-France.

Questo patrimonio di esperienza ha costituito un primo, essenziale, contributo che necessita di un arco temporale ampio e statisticamente significativo per migliorare e consolidare l'affidabilità del sistema di previsione.

Siamo grati all'U.E., agli enti, alle imprese, alle compagnie, alle associazioni datoriali e sindacali e a tutti coloro che a vario titolo hanno contribuito e condiviso l'esperienza progettuale, con l'auspicio che questi temi possano ulteriormente svilupparsi e che "Vento e Porti" rappresenti un modello di riferimento per l'intera portualità.

Avant-propos

de
Luigi Merlo, Président de l'Autorité Portuaire de Gênes
Giuliano Gallanti, Président de l'Autorité Portuaire de Livourne
Paolo Blondeaux, Directeur du DICAT — Université de Gênes
Cristoforo Canavese, Président de l'Autorité Portuaire de Savone
Lorenzo Giovanni Forcieri, Président de l'Autorité Portuaire de La Spezia
Paul Trojani, Président de la C. C. I. de Bastia et de la Haute-Corse

Le projet « Vent et Ports » est une nouvelle démonstration des liens qui, au-delà de la simple dimension des échanges, relient les ports français et italiens du bassin de la haute mer Tyrrhénienne de Gênes, Livourne, Savone, La Spezia et Bastia.

C'est dans ce cadre qu'a été saisie avec intérêt l'opportunité, fournie par le Programme communautaire de coopération transfrontalière Italie/France « Maritime » 2007–2013, de réaliser un projet couvrant un domaine d'intervention et d'intérêt d'une importance incontestable pour les communautés portuaires. Cette opportunité a permis à nos ports de se doter de nouvelles stations anémométriques et d'étudier un phénomène météorologique parfois problématique pour la sécurité des activités portuaires et pour l'accessibilité maritime et terrestre aux ports.

Tous les ports subissent plus ou moins l'impact du vent, aussi les informations préventives sur le vent attendu pourront-elles aider les organismes et les opérateurs à évaluer à l'avance les risques afin d'assurer la sécurité des zones opérationnelles les plus exposées ou d'émettre des avis préventifs permettant également de réduire les effets sur la circulation en ville et aux entrées des ports.

Mais au-delà de la dimension opérationnelle, la valeur ajoutée du projet « Vent et Ports » est celle d'avoir introduit dans les systèmes portuaires la recherche avancée dans le domaine de l'ingénierie du vent appliquée et finalisée à des situations pratiques partagées avec les acteurs : de ce point de vue, le projet est un exemple vertueux de réseau actif et constructif aussi bien entre les ports de la haute mer Tyrrhénienne qu'entre ces mêmes ports et le monde scientifique, le DICAT de la Faculté d'Ingénierie de l'Université de Gênes — acteur scientifique et partenaire du projet — et Météo-France.

Ce bagage d'expérience a constitué une première contribution essentielle qui requiert une longue période de temps statistiquement significative pour améliorer et consolider la fiabilité du système de prévision.

Nous sommes reconnaissants envers l'U.E., les organismes, les entreprises, les compagnies, les associations patronales et syndicales et envers tous ceux qui, de différentes façons, ont collaboré et partagé cette expérience de projet dans l'espoir que ces thèmes pourront être améliorés et que le projet « Vent et Ports » pourra représenter un modèle de référence pour toute la structure portuaire.

Indice

Introduzione al progetto **5**
Gli obiettivi del progetto 5
Le caratteristiche innovative del progetto e la metodologia 6
I risultati ottenuti 7

I Sviluppo scientifico del progetto — Università di Genova 9

1 Introduzione **11**
1.1 Obiettivi e organizzazione del progetto 14
1.2 Monitoraggio del vento e banca dati 15
1.3 Simulazione numerica del vento 15
1.4 Mappe statistiche del vento 16
1.5 Previsioni del vento a medio termine 17
1.6 Previsioni del vento a breve termine 18
1.7 WebGIS meteorologico 18
1.8 Alcune prospettive 19

2 Monitoraggio del vento e banca dati **21**
2.1 Rete di monitoraggio e sistema di acquisizione 21
2.2 Trasmissione delle misure e banca dati 27
2.3 Controllo e validazione dei dati 33
2.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo 39

3 Simulazione numerica del vento **45**
3.1 Modelli numerici 45
3.1.1 Il codice WINDS 45
3.1.2 Il codice PWMCT 51
3.2 Simulazione e trasferimento della velocità media 54
3.2.1 Simulazione della velocità media 54
3.2.2 Coefficienti di trasferimento 56
3.2.3 Trasferimento della velocità media dalle stazioni storiche ai domini portuali 59
3.2.4 Trasferimento della velocità media dalla rete di monitoraggio ai domini portuali 63
3.3 Simulazione e trasferimento della turbolenza e della velocità di picco . 65
3.3.1 Simulazione della turbolenza 66
3.3.2 Trasferimento dell'intesità di turbolenza dalla rete di monitoraggio ai domini portuali 66
3.3.3 Velocità di picco 68

3.4 Validazione dei risultati 69
3.4.1 Trasferimento fra coppie di stazioni storiche 70
3.4.2 Trasferimento fra coppie di anemometri della rete di monitoraggio portuale 76
3.5 Prospettive e potenzialità di sviluppo 77

4 Mappe statistiche del vento **81**
4.1 Analisi statistica presso le stazioni anemometriche storiche 81
4.1.1 Basi dati storiche 82
4.1.2 Correzione delle basi dati 86
4.1.3 Analisi probabilistica dei valori correnti 89
4.1.4 Analisi probabilistica dei valori estremi 89
4.1.5 Correzione delle analisi probabilistiche 90
4.1.6 Analisi statistica comparativa 91
4.2 Analisi statistica presso le aree portuali 97
4.2.1 Porto di Savona–Vado 98
4.2.2 Porto di Genova 101
4.2.3 Porto della Spezia 101
4.2.4 Porto di Livorno 105
4.2.5 Porto di Bastia 105
4.2.6 Validazione 109
4.3 Prospettive e potenzialità di sviluppo 110

5 Previsioni del vento a medio termine **113**
5.1 Modelli per la catena previsionale 113
5.1.1 Global Forecast System 113
5.1.2 Il modello meteorologico WRF 114
5.1.3 Il modello WINDS 117
5.2 Struttura della catena modellistica 118
5.2.1 Procedura di realizzazione delle previsioni 118
5.2.2 Implementazione della catena previsionale 121
5.2.3 Base dati delle simulazioni dei modelli 123
5.3 Esempi di simulazioni 123
5.3.1 Evento dell'11 aprile 2012 124
5.3.2 Simulazione sulle aree portuali 127
5.4 Affidabilità dei modelli 131
5.5 Prospettive e potenzialità di sviluppo 137

6 Previsioni del vento a breve termine **139**
6.1 Algoritmo di previsione 139
6.1.1 Analisi dei dati anemometrici 140
6.1.2 Metodo di inferenza statistica 141
6.2 Funzionamento operativo 152
6.2.1 Previsione della velocità media 152
6.2.2 Previsione della velocità di picco 153
6.3 Affidabilità del modello di simulazione 157

6.3.1 Lettura delle simulazioni . . . 157
6.3.2 Errori della previsione . . . 160
6.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo . . . 165

7 WebGIS meteorologico 167
7.1 Interfaccia grafica del sito WebGIS . . . 167
7.1.1 Sezione *Statistica* . . . 170
7.1.2 Sezione *Monitoraggio* . . . 172
7.1.3 Sezione *Previsione a breve termine* . . . 174
7.1.4 Sezione *Previsione a medio termine* . . . 176
7.2 Sotfware . . . 177
7.2.1 Filtro di conversione dei dati . . . 178
7.2.2 Base dati geospaziale . . . 178
7.2.3 Map-server . . . 179
7.2.4 WebGis . . . 179
7.3 Hardware . . . 179
7.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo . . . 180

8 Conclusioni e prospettive 181

Bibliografia 187

II Contributo scientifico di Météo-France 189

9 Ruolo e azioni di Météo-France 191
9.1 Localizzazione della rete di monitoraggio per il Porto di Bastia. . . . 192
9.2 Capitalizzazione delle conoscenze scientifiche dei venti locali . . . 194
9.3 Ruoli e missioni di Météo-France nell'ambito del territorio della Corsica 194
9.4 Analisi di situazioni meteorologiche di episodi di vento forte . . . 194
9.5 Ruolo nelle riunioni del comitato di pilotaggio in loco . . . 195
9.6 Allegato . . . 196
9.6.1 Partecipanti di Météo-France al progetto "Vento e Porti" . . . 196
9.6.2 Documenti forniti da Météo-France per il progetto . . . 196
9.6.3 Documenti presentati da Météo-France nel corso del progetto 197

Introduzione al progetto

Gli obiettivi del progetto

"Vento e Porti" è un progetto di cooperazione transfrontaliera fra i porti dell'Alto Tirreno — i tre Porti di Genova, Savona e La Spezia in Liguria, il Porto di Livorno in Toscana e il Porto di Bastia in Corsica — che ha affrontato lo studio del vento nei porti avvalendosi delle acquisizioni, trentennali, nel campo dell'ingegneria del vento ad opera dell'attuatore scientifico e partner del progetto, il DICAT - Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, Ambiente, Territorio dell'Università di Genova in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e con Meteo France per la Corsica.

Il progetto è stato finanziato dal Programma Operativo europeo Italia/Francia "Marittimo" 2007–2013 (Liguria, Toscana, Sardegna, Corsica), ed è stato attuato con lo scopo di creare un sistema di monitoraggio del vento nei porti e di elaborare uno modello di calcolo per fornire ai diversi stakeholder delle comunità portuali informazioni, fondate scientificamente e rese accessibili agli interessati, riguardo alla valutazione statistica e, soprattutto, alla *previsione* del vento atteso nel medio (24–12 ore) e a breve termine (circa un'ora) in tutte le zone dei 5 porti partner.

Tali informazioni potranno essere fruibili in primo luogo dalle Autorità portuali e dalle Capitanerie di Porto, e sono disponibili per enti, servizi portuali (Piloti, Rimorchiatori, Ormeggiatori) e per tutti i diversi operatori. Esse possono permettere a ciascuno di definire con chiarezza le situazioni di rischio reale, e di valutarne le conseguenze per meglio pianificare le attività operative (la previsione a 12–24 ore) e l'accessibilità al porto dal mare e da terra; e, al contempo, sono di ausilio per prevenire tempestivamente situazioni emergenziali o di pericolo per l'incolumità fisica dei lavoratori: infatti, la previsione fino a 1 ora, di conferma dell'eventuale problematicità del vento atteso, consente a chi ne è preposto di porre in essere tutte quelle azioni di prevenzione per attuare le soluzioni idonee a mettere in sicurezza persone, mezzi, strutture e merce.

Il progetto "Vento e Porti" si propone, dunque, di contribuire a migliorare la sicurezza e l'accessibilità verso tutte le aree operative del porto: zone esposte a venti molto forti che possono comportare situazioni di notevole rischio per l'integrità fisica di chi lavora, per la solidità delle strutture, la stabilità dei mezzi, delle merci stoccate, e per le imbarcazioni in fase di attracco; e di consentire agli enti e ai soggetti preposti di disporre per tempo di informazioni impiegabili per trasmettere avvisi preventivi agli utilizzatori del porto, particolarmente ai trasportatori, anche con l'intento di meglio controllare e ridurre le conseguenze sul traffico cittadino.

Le caratteristiche innovative del progetto e la metodologia

"Vento e Porti" è il risultato di un percorso di forte cooperazione tra comunità portuali e scientifica, che si è sviluppato in 36 mesi su tre livelli: operativo, di ricerca applicata, di partecipazione e condivisione con le comunità portuali, affrontando il problema della previsione del vento attraverso l'elaborazione di un sistema integrato di simulazione numerica, monitoraggio, analisi statistica e implementazione di algoritmi di previsione a 1–3 giorni e a 0.5–1 ora, resi fruibili in tempo reale agli operatori e, come tali, integrabili in un sistema complessivo di gestione e sicurezza delle aree e di accessibilità al porto.

In tutto ciò si può rilevare l'aspetto inedito e il valore aggiunto di un progetto articolato, sia nello sviluppo sia nei risultati che prometteva di ottenere.

Dal punto di vista dell'approccio, è la prima volta che il difficile tema dell'influenza del vento nelle attività (realtà) portuali viene affrontato orientando e patrimonializzando verso il porto quelle acquisizioni scientifiche considerate fra le più avanzate e autorevoli (Università di Genova e Meteo France), e finora sperimentate e applicate in altri campi come le costruzioni, le infrastrutture, o l'alta velocità (Università di Genova - DICAT). Vale qui il caso di segnalare che "Vento e Porti" è stato ospitato nel 2011 dal Festival della Scienza di Genova.

Dal punto di vista metodologico, tutto lo svolgersi del progetto è stato caratterizzato dalla positiva interazione fra la partnership e dal costante coinvolgimento delle comunità portuali. Valgano le 10 riunioni del Comitato di Pilotaggio, le circa 50 fra riunioni e sopralluoghi tra il capofila e i partner, la costruzione e condivisione di un Protocollo d'Intesa fra i porti e il DICAT che impegna ciascuna Autorità Portuale — il partner corso ha fatto una convenzione analoga con Meteo France — a sostenere la manutenzione e la gestione del "sistema WebGIS meteorologico" nel periodo successivo alla scadenza progettuale, al fine di assicurare la funzionalità del web che restituisce dati e previsioni agli stakeholder.

Per quanto riguarda il network con le comunità portuali, sono stati utilizzati due "veicoli" di partecipazione: i Gruppi di Auditing locali e i Seminari Intermedi.

Il Gruppo di Auditing locale, costituito in ogni porto partner, è un tavolo di riunioni periodiche e di rete cooperante (network) di ciascuna comunità portuale per confrontarsi periodicamente con la rispettiva Autorità portuale e con l'attuatore scientifico DICAT, per approfondire gli sviluppi del progetto e ottimizzarne l'utilità.

Il Gruppo di Auditing è composto dai diversi attori istituzionali e socioeconomici locali preposti alle tematiche correlate al vento e alla sicurezza in porto: Enti (Autorità portuali, Capitanerie, Aziende Sanitarie Locali, Agenzie per l'Ambiente, Vigili del Fuoco, Piloti, Ormeggiatori, Rimorchiatori), Operatori (Imprese terminaliste, Confindustria), Sindacati e Compagnie portuali. Durante il progetto sono stati effettuati 14 incontri nei porti italiani (6 a Genova, 3 a Livorno, 3 alla Spezia, 2 a Savona) con oltre 200 presenze, l'ultimo dei quali è stato dedicato alla formazione per utilizzare il sistema WebGIS; mentre a Bastia, tutti i lunedì si svolge una "conferenza settimanale permanente" presso la Camera di Commercio con gli stakeholder del porto e in quella sede essi sono stati periodicamente informati sugli sviluppi di "Vento e Porti".

Infine, il progetto ha previsto lo svolgimento di un Seminario Intermedio in ognuno dei cinque porti partner a circa 2/3 del percorso progettuale, con lo scopo di informare le istituzioni e le comunità portuali territoriali sullo stato di avanzamento, sulle attività realizzate e quelle ancora da attuare, sugli eventuali punti critici, ma soprattutto per confrontarsi, per condividere gli obiettivi e per verificarne l'utilità percepita. Fra ottobre e dicembre 2011 i cinque Seminari Intermedi territoriali hanno coinvolto circa 170 stakeholder evidenziando ovunque un importante sostegno e condivisione del progetto.

I risultati ottenuti

Il sistema sviluppato nel progetto "Vento e Porti" persegue gli obiettivi posti inizialmente, fornendo alle comunità portuali una piattaforma integrata per la conoscenza del vento nelle aree di interesse, in termini di monitoraggio in tempo reale, previsione delle velocità attese e valutazione statistica della ventosità dei siti.

Ogni area portuale è stata dotata di una rete di anemometri sonici opportunamente distribuiti e di un sistema che ne trasferisce le acquisizioni a un centro operativo presso il DICAT: 5 stazioni di misura nel Porto di Livorno, 5 nel porto della Spezia, 6 nel Porto di Savona, 2 nel Porto di Genova e 5 nel Porto di Bastia.

Nel Porto di Genova sono in corso i lavori per l'installazione di 11 ulteriori stazioni già programmate dall'Autorità Portuale con la Capitaneria di Porto e il Corpo dei Piloti precedentemente a "Vento e Porti": tali stazioni, una volta installate, rafforzeranno in modo significativo il sistema di monitoraggio e il modello di previsione del vento creato con il progetto.

Le misure registrate in tempo reale costituiscono il punto di partenza per la previsione a *breve termine*, in grado di fornire una stima della velocità attesa nell'arco di 30–90 minuti. In parallelo, è stata resa operativa sull'area dell'Alto Tirreno una catena probabilistica meteorologica, a *medio termine*, in grado di prevedere velocità e direzione del vento su un arco temporale di 72 ore.

Un'attività particolarmente importante è la valutazione statistica del vento: per ogni porto sono stati raccolti i dati rilevati da qualunque stazione limitrofa che abbia misurato basi dati per molti anni. Da queste stazioni sono state estratte le informazioni statistiche sulla ventosità dei siti, in termini di valori correnti e valori estremi.

Sono stati, quindi, costruiti modelli e utilizzati algoritmi per trasferire questi dati, virtualmente, dal sito dell'anemometro dove è stata eseguita la misura a tutto il porto. A tal proposito, come pregevolmente descritto più avanti a cura del DICAT, i porti sono stati trasformati (*discretizzati*) in una "maglia planimetrica" e in una "griglia altimetrica", delimitando il perimetro dell'area portuale sia verso terra sia verso mare, e così per l'altezza di interesse.

Il porto appare, pertanto, una "griglia di punti" nella planimetria e in altimetria, e in ogni punto saranno disponibili in tempo reale le misure del vento, le previsioni a breve e a medio termine, e le valutazioni statistiche: una grande quantità di informazioni che potranno essere utili a sviluppare tematiche oltre il progetto stesso, ad esempio per valutare l'installazione di macchine eoliche, per le verifiche delle strutture e delle costruzioni, e per molto altro ancora.

La parte finale del progetto è stata dedicata alla realizzazione di un sistema che renda i risultati immediatamente fruibili agli enti e agli operatori delle aree portuali e, come tali, integrabili in un sistema complessivo di gestione dell'accessibilità e della sicurezza.

Tale sistema, sviluppato dal DICAT nell'ambito di "Vento e Porti" e denominato "WebGIS meteorologico", rappresenta un sistema innovativo e alla frontiera della ricerca, sia per quanto riguarda i contenuti sia per la modalità di fruizione.

Il WebGIS è suddiviso in sezioni pubbliche, contenenti informazioni generali visibili a tutti, e sezioni di pertinenza dei singoli porti, contenenti informazioni specifiche per gli stakeholder interessati.

Le singole Autorità Portuali gestiranno direttamente le autorizzazioni per accedere alla sezione di propria pertinenza, selettivamente e per tema, tramite accesso protetto degli utenti. Va comunque sottolineato che l'utilizzo dei dati del sistema WebGIS, forniti dal DICAT, e le eventuali decisioni correlate a tali informazioni — operative e di prevenzione della sicurezza — sono in capo alla responsabilità di ciascun beneficiario e utilizzatore delle stesse, nei limiti previsti dalle norme nell'ambito delle attività dallo stesso svolte.

La soluzione realizzata per la diffusione dei prodotti tramite il WebGIS garantirà l'operatività del sistema e la sua gestione oltre i limiti temporali del progetto. L'onere che ne deriva è stato preso in carico dalle Autorità Portuali partner del progetto in modo condiviso, a conferma della volontà degli enti di portare avanti un sistema innovativo e all'avanguardia per la gestione e la sicurezza delle aree portuali.

In conclusione, l'esperienza di "Vento e Porti", resa possibile grazie alla "visione" dell'U.E. e per le risorse concesse attraverso il Programma Operativo "Marittimo", ma anche per la qualità della cooperazione e di unità di intenti espressa dall'intera Partnership, costituisce un primo contributo scientifico e tecnico, essenziale se continua il cammino sui principali temi legati al vento nei porti (sicurezza - accessibilità - energia - ambiente), nell'impegno sia degli Enti sia delle Comunità portuali di proseguire lo sviluppo del progetto oltre la sua scadenza temporale.

Autorità Portuale di Genova (Ente capofila):
Giuseppe Canepa, coordinatore e responsabile del progetto
Mauro Bianchi, responsabile finanziario del progetto
Pompeo Mazzeo, Finporto di Genova, assistenza al coordinamento del progetto

I Responsabili di progetto Partner:
Giovanni Motta, Autorità Portuale di Livorno
Giovanni Solari, Università degli Studi di Genova - DICAT
Rossana Varna, Autorità Portuale di Savona
Lorenzo Montani, Autorità Portuale della Spezia
Pierre Torre, Camera di Commercio di Bastia

Parte I

Sviluppo scientifico del progetto Università di Genova

1 Introduzione

I porti hanno spesso un rapporto conflittuale con il vento. Affacciandosi sul mare, essi sono sferzati da venti più intensi di quelli che si attuano nelle zone più protette; nei casi non rari nei quali i porti siano cinti all'interno da rilievi montuosi, essi sono inoltre frequentemente soggetti a fenomeni d'incanalamento tali da creare regimi di vento profondamente diversi in funzione della direzione di provenienza, ancorché accomunati da relativa violenza e ricorsività. Questi elementi sono cruciali poiché i porti sono sede di svariate attività il cui svolgimento in sicurezza è condizionato in modo essenziale delle azioni e degli effetti del vento.

Emergono alcuni aspetti di notevole importanza. Le raffiche del vento, abbinate alle onde da queste generate, condizionano l'ingresso e l'attracco delle navi nei porti, giungendo anche a causare tragici epiloghi (Figure 1.1–1.3). Le strutture portuali, soprattutto le gru, gli scaricatori container, le torri faro e le turbine eoliche, particolarmente suscettibili ai cimenti dinamici indotti dal vento, subiscono frequenti gravi dissesti (Figure 1.4 e 1.5). I container impilati, in particolare quelli vuoti e quindi poco pesanti, sono spesso ribaltati dal vento (Figura 1.6).

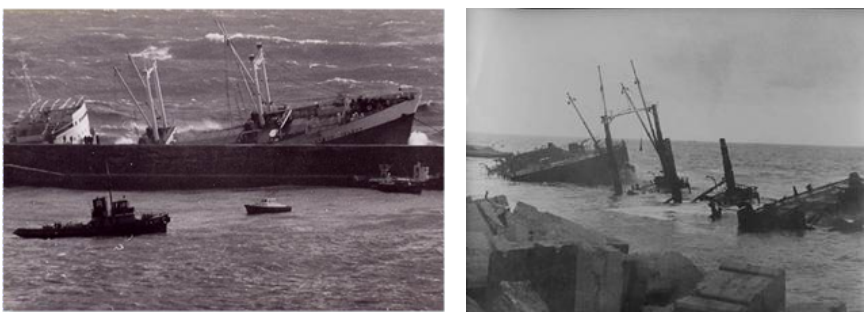


Figura 1.1: Naufragio della London Valour nel Porto di Genova il 9 aprile 1970.



Figura 1.2: Nave traghetto scagliata contro una banchina in Biscaglia nel 1987.



Figura 1.3: Incidente alla Nave Fantastic all'ingresso nel Porto di Genova il 30 ottobre 2008.



Figura 1.4: Collasso di torri faro e turbine eoliche in aree portuali.



Figura 1.5: Collasso di scaricatori container nel Porto di Genova il 31 agosto e il 14 settembre 1994.



Figura 1.6: Ribaltamento di container impilati in aree portuali.

Nei riguardi di tali situazioni è fondamentale stabilire procedure finalizzate a garantire la sicurezza dei lavoratori senza ricorrere a cessazioni di operatività indiscriminate ed eccessivamente frequenti. Da un lato esse sono economicamente insostenibili. Dall'altro, l'interruzione di un'attività portuale, o ancor peggio la chiusura di un porto, può giungere a causare situazioni di paralisi del traffico che si riflettono sulla vita cittadina dando luogo a violente reazioni della pubblica opinione (Figura 1.7).

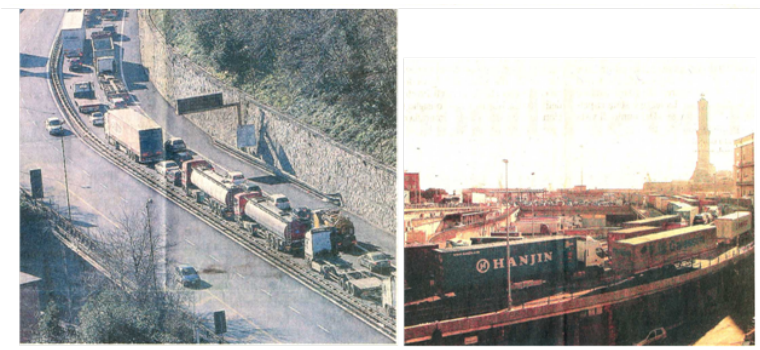


Figura 1.7: Dal Secolo XIX di giovedì 20 aprile 2007 — In primo piano — L'emergenza: "Basta paralisi in città" — File di Tir per lo stop dovuto al vento.

Il progetto "Vento e Porti — La previsione del vento per la gestione e la sicurezza delle aree portuali" affronta i problemi sopra illustrati nell'ambito di un partenariato costituito dalle Autorità Portuali di Genova (capofila), La Spezia, Livorno e Savona,

dalla Camera di Commercio di Bastia e dal Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio (DICAT) dell'Università degli Studi di Genova. DICAT è l'attuatore scientifico unico. Il rapporto sinergico fra il mondo accademico e la realtà portuale persegue il fine di trasferire e capitalizzare in questo settore le conoscenze scientifiche e tecnologiche alla frontiera e oltre lo stato dell'arte (Solari et al. 2012).

1.1 Obiettivi e organizzazione del progetto

Il progetto affronta lo studio del vento in termini generali, innovativi e al tempo stesso operativi, con la prospettiva di creare una rete di porti dotati di strumenti omogenei ed efficaci per valutare e prevedere il vento. Ciò comporta un ampio spettro di fini strategici, ricchi d'implicazioni e ricadute sociali ed economiche. Fra questi spiccano la pianificazione delle attività portuali nel breve, medio e lungo periodo, la messa in opera di azioni preventive volte a individuare e definire le situazioni di rischio e le soluzioni più idonee nei diversi casi, la tutela della sicurezza e dell'integrità fisica di chi lavora nei porti e contemporaneamente la garanzia di operatività nei momenti non critici (per esempio durante l'attracco delle navi, il carico e lo scarico di merci, l'emanazione di avvisi preventivi di vento intenso ai trasportatori, ai terminalisti e ai servizi tecnici portuali), l'incremento della sicurezza delle opere, delle merci, dei mezzi e più in generale dei beni allocati in ambito portuale. Tali obiettivi sono perseguiti tramite la creazione di un sistema integrato di modelli numerici, reti di monitoraggio e trasmissione dati, analisi statistiche e algoritmi di previsione del vento, resi fruibili in tempo reale tramite un sistema WebGIS portuale di concezione assolutamente innovativa.

La Figura 1.8 illustra lo schema generale con il quale è organizzato il progetto.

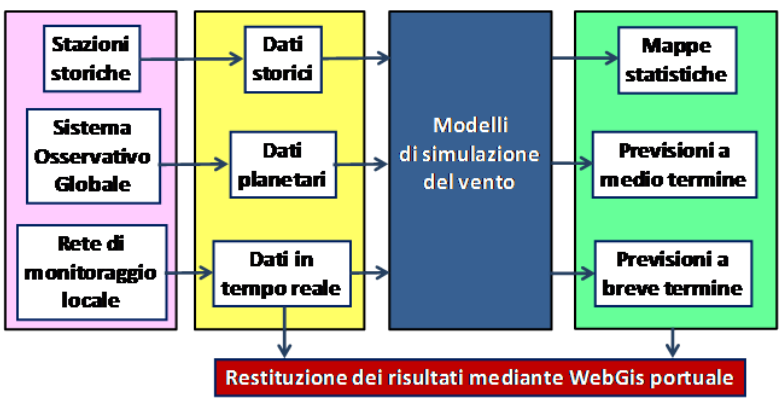


Figura 1.8: Schema generale del progetto.

Il punto di partenza di tutte le analisi è rappresentato dall'acquisizione sistematica delle misure del vento. Esse comprendono i dati storici registrati prevalentemente dalle stazioni dell'Aeronautica Militare (AM) e dell'Ente Nazionale di Assistenza al Volo (ENAV), i dati planetari raccolti e distribuiti attraverso il Sistema Osservativo

Globale (GOS) e i dati restituiti in tempo reale dai sensori della rete di monitoraggio portuale, la cui realizzazione costituisce il primo obiettivo del progetto (Paragrafo 1.2 e Capitolo 2). La simulazione numerica dei campi di vento (Paragrafo 1.3 e Capitolo 3) è l'anello centrale della catena mediante la quale i dati storici, planetari e in tempo reale sono usati per produrre, rispettivamente, le mappe statistiche (Paragrafo 1.4 e Capitolo 4) e le previsioni a medio (Paragrafo 1.5 e Capitolo 5) e a breve (Paragrafo 1.6 e Capitolo 6) termine del vento; esse costituiscono, nell'ordine, il secondo, il terzo e il quarto obiettivo del progetto. Il Paragrafo 1.7 e il Capitolo 7 illustrano il sistema WebGIS meteorologico appositamente implementato nell'ambito del progetto per renderne i risultati fruibili dalle Autorità Portuali. Il Paragrafo 1.8 discute alcune prospettive dello studi, rinviando al Capitolo 8 per le conclusioni e per un'esposizione più completa dei potenziali sviluppi futuri.

1.2 Monitoraggio del vento e banca dati

La realizzazione di una rete di monitoraggio locale del vento (Capitolo 2) in ogni porto coinvolto nel progetto fornisce alle Autorità Portuali misure autonome e continue. Le misure sono trasferite in tempo reale dai sensori ai centri operativi delle Autorità Portuali, e di qui alla centrale operativa del DICAT, dove le misure sono organizzate in banche dati e analizzate in modo sistematico per verificarne la correttezza e la rappresentatività. Le banche dati costituiscono un patrimonio delle Autorità Portuali che conserveranno memoria storica degli eventi eolici che si sono susseguiti dalla realizzazione della rete di monitoraggio. A ciò si aggiunga che i modelli di simulazione del vento descritti nel Capitolo 3 consentono di estrapolare i dati misurati localmente al reticolo spaziale dei punti con il quale è rappresentato ogni porto; in questo modo un insieme discreto di misure locali fornisce una rappresentazione esaustiva del vento in ogni zona portuale anche relativamente distante dagli anemometri.

Le misure eseguite dalle reti di monitoraggio locale sono il presupposto per realizzare il sistema di previsione a breve termine (Capitolo 6). Sono inoltre un anello centrale della catena di elaborazioni che conducono alle mappe statistiche del vento nei diversi porti (Capitolo 4). Con il passare del tempo l'accumulo dei dati misurati consentirà di aggiornare gli algoritmi di previsione e i modelli statistici per conseguire risultati sempre più precisi e affidabili. È in fase di studio un procedimento, detto di assimilazione dati, finalizzato a impiegare le misure in tempo reale per migliorare le previsioni a medio termine (Capitolo 5).

1.3 Simulazione numerica del vento

La simulazione numerica del vento (Capitolo 3) è l'anello centrale della catena mediante la quale i dati misurati dagli anemometri delle stazioni storiche, i dati planetari acquisiti dal Sistema di Osservazione Globale e i dati registrati dai sensori della rete di monitoraggio portuale (Capitolo 2) sono usati per produrre, rispettivamente, le mappe statistiche del vento (Capitolo 4) e le previsioni del vento a medio (Capitolo 5) e a breve (Capitolo 6) termine. Questi obiettivi sono conseguiti per mezzo di un'am-

pia gamma di modelli numerici impiegati per simulare la velocità del vento su terreni complessi, quali sono in generale i comprensori portuali.

Il codice WINDS è usato per simulare la velocità media e la direzione del vento nei porti e presso le stazioni anemometriche storiche. I risultati delle simulazioni sono elaborati per generare i cosiddetti coefficienti di trasferimento, vale a dire dei parametri per mezzo dei quali i dati storici e le misure della rete di monitoraggio locale sono trasportati nei punti dei domini computazionali dei porti. Tutti i procedimenti di trasformazione adottati sono sottoposti a controlli sistematici di validazione.

Il codice PWMCT è usato per simulare la turbolenza atmosferica, e in particolare la sua intensità nelle aree portuali. I risultati delle simulazioni sono elaborati per generare nuovi coefficienti di trasferimento mediante i quali le misure della turbolenza eseguite dalla rete di monitoraggio locale sono trasportate nei punti dei domini computazionali dei porti.

Le simulazioni della velocità media, dell'intensità della turbolenza e della direzione del vento sono poi rielaborate congiuntamente per simulare i campi della velocità di picco del vento.

1.4 Mappe statistiche del vento

La realizzazione di mappe statistiche del vento (Capitolo 4) nei porti è strumentale alla conoscenza della climatologia locale e alla pianificazione razionale di lungo termine di nuovi assetti portuali che tengano in conto la dislocazione più adatta delle attività suscettibili alle azioni e agli effetti del vento (Figura 1.9).

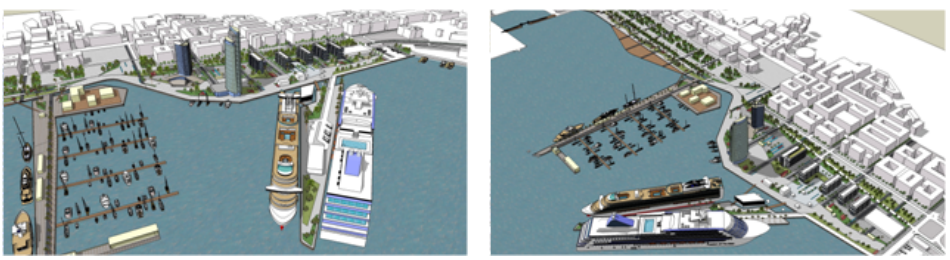


Figura 1.9: *Rendering* di un possibile sviluppo del Porto della Spezia.

Purtroppo, le misure dalle stazioni anemometriche portuali (Capitolo 2) saranno statisticamente rappresentative solo dopo alcuni anni di acquisizioni. Pertanto, al fine di analizzare la climatologia del vento nei porti, sono utilizzate le stazioni anemometriche preesistenti, prossime a ciascun comprensorio portuale e caratterizzate da lunghe serie storiche.

Le misure della velocità media e della direzione del vento acquisite da tali stazioni sono dapprima corrette e sottoposte ad analisi statistica, valutando le distribuzioni dei valori correnti ed estremi della velocità nei siti anemometrici. In seguito, applicando le tecniche di simulazione numerica descritte nel Capitolo 3, le serie storiche delle misure sono trasformate in serie storiche virtuali nei punti dei domini computazionali delle

aree portuali. Le serie storiche virtuali sono infine sottoposte a nuove analisi dalle quali sono ricavate le mappe statistiche del vento.

1.5 Previsioni del vento a medio termine

Il modello per le previsioni a medio termine (Capitolo 5) sviluppato nel presente progetto riguarda la velocità media e la direzione del vento, e copre un arco temporale fino a 3 giorni in avanti. Tale previsione è finalizzata a pianificare lo svolgimento delle attività portuali nell'immediato futuro, ponendo in atto le azioni possibili di prevenzione, individuando le situazioni di rischio e adottando le soluzioni più idonee per tutelare la sicurezza e l'integrità fisica dei lavoratori portuali e, contemporaneamente, per assicurare ai porti stessi una corretta operatività. Costituiscono tipici esempi delle potenzialità di questo prodotto le decisioni che possono essere prese nei riguardi dell'ingresso e dell'attracco delle navi nei porti (Figure 1.1 e 1.3), delle operazioni di movimentazione delle merci (Figura 1.10), dell'emissione di avvisi preventivi ai trasportatori (Figura 1.7), ai terminalisti (Figura 1.6) e ai servizi tecnici portuali.



Figura 1.10: Movimentazione di merci.

Il sistema di previsione a medio termine consiste in una catena modellistica i cui dati d'ingresso sono costituiti dalle misure planetarie rielaborate e distribuite attraverso il Global Forecast System (GFS). Tale catena di modelli è focalizzata sull'Alto Tirreno, e in particolare sulle aree portuali di Savona, Genova, La Spezia, Livorno e Bastia. Essa è realizzata mediante due modelli numerici usati in cascata: il primo, WRF, è un modello meteorologico che prevede il vento sull'Alto Tirreno con una risoluzione orizzontale fino a un massimo di circa 2 km; il secondo, WINDS, è un modello diagnostico (Capitolo 3) utilizzato per prevedere il vento nelle cinque aree portuali coinvolte nel progetto, con una risoluzione orizzontale fino a 80 m nei porti italiani e 50 m nel Porto di Bastia. La catena modellistica, che ha carattere operativo, permette di ottenere ogni giorno una previsione che si estende nel tempo fino a 3 giorni in avanti, ed è disponibile con un passo temporale orario. La griglia planimetrica usata garantisce una rappresentazione del vento con un livello di dettaglio notevolmente maggiore rispetto alle previsioni meteorologiche tradizionali.

1.6 Previsioni del vento a breve termine

Il modello per le previsioni a breve termine (Capitolo 6) sviluppato nel presente progetto riguarda la velocità media e di picco del vento, oltre alla sua direzione, e fornisce ogni 10 minuti una previsione che si estende su un intervallo temporale fino a 90 minuti oltre l'ultima misura. La previsione è finalizzata a emettere messaggi di allerta tali da porre in sicurezza i lavoratori portuali e tutelarne l'integrità fisica. Spesso, essa è troppo prossima al vento previsto per evitare il crollo di strutture (Figura 1.5) o il ribaltamento di container (Figura 1.6); è però sufficientemente in anticipo per allontanare le persone, evacuare le aree a rischio o sospendere le operazioni potenzialmente pericolose.

Il sistema di previsione a breve termine consiste in una catena di due modelli, specifici per ogni porto, i cui dati d'ingresso sono costituiti dalle misure anemometriche delle nuove reti locali di monitoraggio. Il primo modello, di tipo statistico, prevede il vento presso gli anemometri delle reti locali. Applicando i principi della probabilità condizionata, esso stima la velocità del vento futuro, in funzione della sua probabilità di non superamento, nota la misura del vento attuale, in tempo reale, e una serie abbastanza lunga di misure acquisite dagli anemometri delle reti portuali. Tale metodo incomincia a fornire risultati accettabili dopo circa un anno di acquisizioni; nel seguito, avendo a disposizione banche dati sempre più ricche, aumenta gradualmente la propria affidabilità. È quindi possibile emettere previsioni, ancorché in fase sperimentale, per i tre Porti di Savona, La Spezia e Livorno, che registrano il vento da oltre un anno. Per quanto concerne i Porti di Genova e Bastia, le misure sono tuttora insufficienti per questo scopo e il modello diverrà operativo dopo aver raggiunto un anno di misure. Il secondo modello applica le tecniche di simulazione numerica descritte nel Capitolo 3 per estrapolare la previsione a tutti i punti dei domini computazionali che caratterizzano i porti.

1.7 WebGIS meteorologico

Per rendere pienamente fruibile la quantità, la qualità e le potenzialità dei dati misurati, delle mappe statistiche e delle previsioni a medio e breve termine del vento, il progetto "Vento e Porti" ha sviluppato, come strumento di sintesi e di restituzione dei risultati, un ambiente GIS con interfaccia web-based per la consultazione dinamica dei parametri meteorologici (Capitolo 7). Tale strumento, assolutamente innovativo, si avvale di un algoritmo interattivo per mezzo del quale gli operatori autorizzati dalle Autorità Portuali possono visualizzare, oltre alle mappe statistiche, le misure anemometriche in tempo reale e le previsioni relative a diverse aree, quote altimetriche, orizzonti temporali e, per le previsioni a breve termine, probabilità di non superamento.

Per queste prerogative, il sistema WebGIS costituisce un'interfaccia tanto innovativa e complessa sotto l'aspetto della costruzione, quanto semplice e facilmente fruibile nei riguardi del suo utilizzo. Esso permette di dare piena attuazione degli obiettivi stabiliti dal progetto, secondo le regole che saranno stabilite dalle Autorità Portuali per quanto concerne le autorizzazioni agli accessi. Inoltre rappresenta la base

per l'aggiornamento dei dati archiviati e degli algoritmi elaborati, che potranno essere progressivamente estesi e ottimizzati oltre la scadenza del progetto.

1.8 Alcune prospettive

Il progetto "Vento e Porti" termina con la consapevolezza di avere attuato tutti gli obiettivi che si era prefisso in fase d'impostazione, e di aver realizzato un prodotto altamente qualificato, alla frontiera dello stato dell'arte, probabilmente unico al mondo. Grazie a questo progetto le Autorità Portuali di Genova, Savona, La Spezia, Livorno e Bastia sono dotate di una rete di monitoraggio anemometrico all'avanguardia, di modelli numerici che, partendo dalle misure, generano campi di vento su tutto il porto, e di un sistema WebGIS, assolutamente innovativo, mediante il quale gli operatori autorizzati possono visualizzare le mappe statistiche del vento e, in tempo reale, le misure anemometriche e le previsioni a medio e a breve termine (Capitolo 8).

Nel momento in cui il progetto finisce, nasce una nuova fase di attività finalizzata a dare continuità agli strumenti sviluppati e a migliorarne le prestazioni. Per sua natura, il sistema WebGIS richiede una gestione centralizzata tanto dell'attrezzatura hardware quanto del sistema software, e quindi la prosecuzione della collaborazione tra DICAT e le Autorità Portuali. Essa comporta la manutenzione ordinaria dei server locali e l'alloggiamento del server centrale in una Server Farm, l'ispezione e la manutenzione della rete di monitoraggio e del sistema di trasmissione delle misure ai server locali delle Autorità Portuali, la gestione della catena di previsione WRF–WINDS per le previsioni a medio termine, attraverso il controllo ordinario dei dati in ingresso e dell'operatività della procedura, l'aggiornamento del sistema di previsione a breve termine, calibrandone i parametri e migliorandone le prestazioni sulla base dei dati che saranno progressivamente acquisiti.

I risultati ottenuti sono tanto ampi e generali da trascendere l'obiettivo istituzionale della gestione e della sicurezza delle aree portuali. La conoscenza del vento costituisce una solida base per sviluppare l'attuale progetto, sfruttando la rete di monitoraggio locale per investigare più a fondo i fenomeni eolici a mesoscala, fra i quali i temporali e le trombe d'aria, per sviluppare o integrare i modelli di trasferimento del vento con tecniche di *Computational Fluid Dynamics* (CFD) o tramite prove in galleria del vento, per estendere le mappe statistiche alla ricorrenza del vento su periodi stagionali, diurni e notturni, per migliorare le previsioni a medio termine attraverso le misure delle reti di monitoraggio portuale, per estendere i dati impiegati con l'obiettivo di generare le previsioni a breve termine sfruttando i dati acquisiti dalle stazioni storiche. È il punto di partenza per realizzare nuovi modelli che tengano conto dell'interazione fra il vento e le onde, consentendo valutazioni affidabili dei rischi connessi all'ingresso e all'attracco delle navi nei porti (Figure 1.1–1.3). È l'elemento di partenza per sviluppare criteri di calcolo delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni portuali, più avanzati, sicuri e spesso più economici di quelli forniti dalle norme tecniche (Figure 1.4 e 1.5). Permette di valutare le azioni e gli effetti del vento sui container impilati, individuando disposizioni che minimizzino i rischi di ribaltamento (Figura 1.6). Fornisce gli strumenti per valutare il potenziale eolico dei porti e per scegliere su basi razionali le turbine più idonee a sfruttare l'energia disponibile (Figura 1.11). È propedeutica a nidificare nei

modelli del vento nuovi codici finalizzati a determinare la dispersione degli inquinanti (Figura 1.12) e delle polveri (Figura 1.13) in atmosfera.



(a) Porto di Rotterdam, Paesi Bassi **(b)** Porto di Copenhagen, Danimarca

Figura 1.11: Centrali eoliche in ambiente portuale.



Figura 1.12: Dispersione degli inquinanti in atmosfera.



Figura 1.13: Dispersione di polveri in atmosfera.

2 Monitoraggio del vento e banca dati

La realizzazione di una rete di monitoraggio del vento consente alle Autorità Portuali coinvolte nel progetto di avere misure autonome eseguite con continuità nei propri porti e disponibili in tempo reale. La creazione di una banca dati dove siano registrate tali misure è un patrimonio delle Autorità Portuali che conserveranno memoria storica degli eventi eolici che si sono susseguiti dalla realizzazione della rete di monitoraggio. I modelli di simulazione del vento descritti nel Capitolo 3 consentono di estendere i dati misurati localmente al reticolo spaziale dei punti con il quale è rappresentato ogni porto.

Le misure, dapprima in tempo reale, poi archiviate nella banca dati, sono il presupposto essenziale per realizzare il sistema di previsione a breve termine (Capitolo 6). Sono inoltre un anello molto importante della catena di elaborazioni che conducono alle mappe statistiche del vento (Capitolo 4). Con il passare del tempo l'accumulo dei dati misurati consentirà di aggiornare gli algoritmi di previsione e i modelli statistici per conseguire risultati sempre più precisi e affidabili. E' in fase di studio un procedimento, cosiddetto di assimilazione dei dati, finalizzato a impiegare le misure in tempo reale per migliorare le previsioni a medio termine (Capitolo 5).

Il Paragrafo 2.1 illustra la dislocazione della rete di monitoraggio e le proprietà del sistema di acquisizione dati. Il Paragrafo 2.2 descrive il processo di trasmissione e archiviazione delle misure del vento in una banca dati centralizzata. Il Paragrafo 2.3 presenta un confronto preliminare di controllo tra le misure registrate in ciascun porto. Il Paragrafo 2.4 discute le prospettive d'impiego delle misure acquisite dalla rete di monitoraggio e archiviate nella banca dati, nei riguardi di potenziali sviluppi futuri delle attività svolte durante il progetto "Vento e Porti".

2.1 Rete di monitoraggio e sistema di acquisizione

Ogni porto è dotato di una rete di anemometri e di un sistema di acquisizione centralizzato locale. Secondo quanto previsto dal progetto "Vento e Porti", sono stati installati 22 strumenti, di cui 5 a Bastia (Figura 2.1), 6 nel comprensorio di Savona e Vado Ligure (Figura 2.2), 2 a Genova (Figura 2.3), 4 alla Spezia (Figura 2.4) e 5 a Livorno (Figura 2.5). L'Autorità Portuale di Genova sta per mettere in opera 9 ulteriori anemometri indicati nella Figura 2.3 mediante pallini rossi.

Gli strumenti consistono di anemometri sonici di tipo biassiale e triassiale (Figura 2.6); i primi misurano le due componenti orizzontali della velocità; i secondi misurano inoltre la componente verticale. Tutti gli anemometri possiedono caratteristiche tecniche particolarmente adatte a un impiego in ambiente marino.

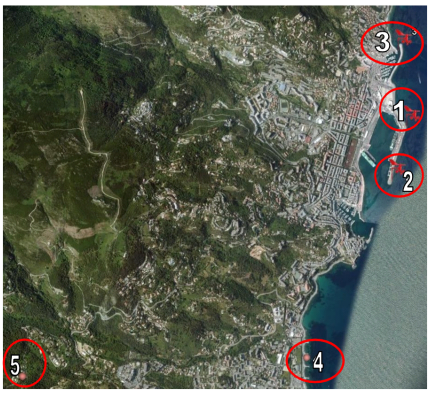


Figura 2.1: Anemometri installati nel Porto di Bastia.

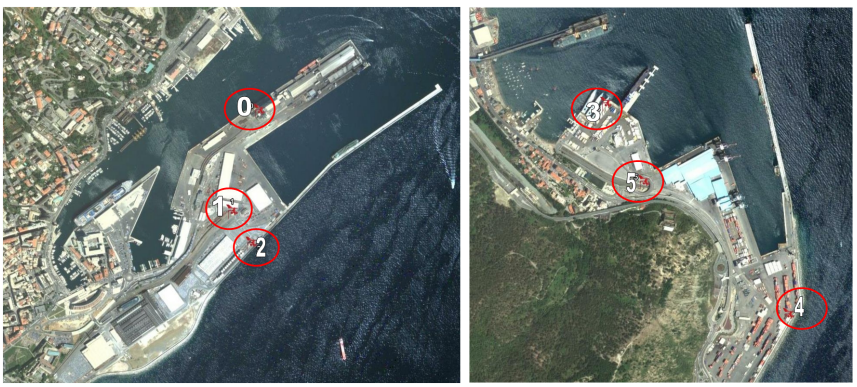


Figura 2.2: Anemometri installati nei Porti di Savona e di Vado Ligure.

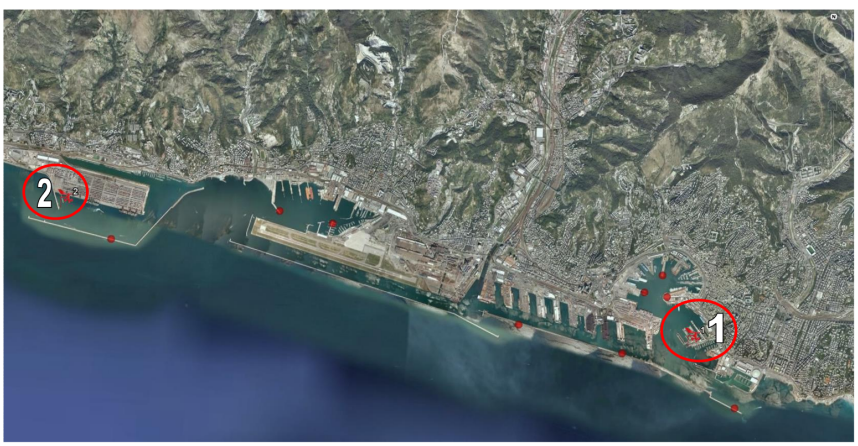


Figura 2.3: Anemometri nel Porto di Genova. I cerchi indicano gli anemometri la cui realizzazione è stata finanziata tramite il progetto "Vento e Porti". I pallini rossi indicano gli anemometri che saranno realizzati prossimamente dall'Autorità Portuale di Genova.



Figura 2.4: Anemometri installati nel porto della Spezia.



Figura 2.5: Anemometri installati nel Porto di Livorno.



Figura 2.6: Anemometri sonici biassiali (sinistra) e triassiali (destra).

La scelta dei siti dove sono installati gli anemometri è stata eseguita con l'obiettivo di distribuire gli strumenti in modo omogeneo in ogni area portuale (Figure 2.1–2.5). Inoltre è stato deciso di porre gli strumenti, per quanto fosse possibile, nelle posizioni più aperte ed esposte al vento, quindi lontane da ostacoli locali che potessero influenzare le registrazioni. In ogni caso gli anemometri sono posti a non meno di 10 m sul terreno.

Sotto questo punto di vista sono state escluse le zone maggiormente ostruite, ad esempio i piazzali dove sono accumulati i contenitori e le banchine dove attraccano le navi. Misure eseguite in queste zone sarebbero state rappresentative di un intorno molto ristretto dell'anemometro. Volendo invece impiegare tali misure come punto di partenza per la simulazione numerica dell'intero campo di vento nell'area portuale (Capitolo 3), gli anemometri sono stati prevalentemente montati alla sommità di torri d'illuminazione o di telecomunicazione (Figura 2.7–2.8), oppure sul tetto di edifici (Figura 2.9), avendo cura di sopraelevare lo strumento, tramite antenne, per non risentire degli effetti delle scie causate dallo stesso edificio o da altre costruzioni contigue.

Tutte le postazioni strumentali sono state oggetto di ripetuti sopraluoghi e controlli.

La Figura 2.10 illustra la ricostruzione del campo di vento nell'area portuale di Livorno, eseguita mediante il codice WINDS (Capitolo 3), partendo dalle misure degli anemometri in Figura 2.5.

I Porti di Genova, Savona, La Spezia e Livorno sono dotati di sensori ultrasonici



Figura 2.7: Alcune torri alla cui sommità sono stati posti gli anemometri.



Figura 2.8: Ubicazione dell'anemometro 4 (Figura 2.5) nel Porto di Livorno.

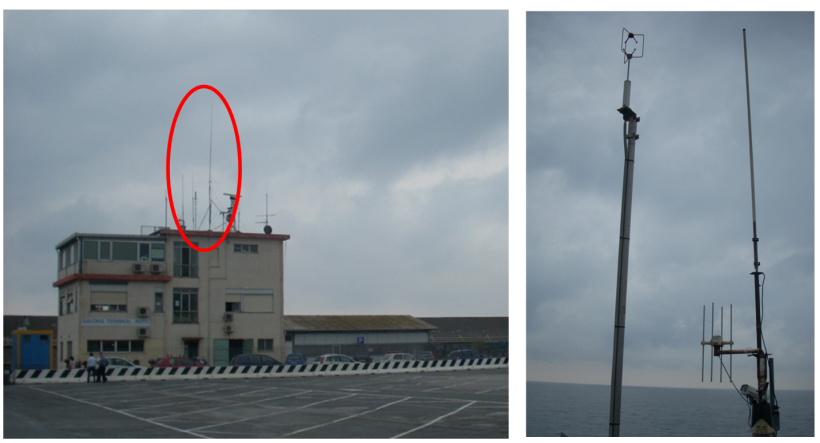


Figura 2.9: Porto di Savona: Palazzina dell'avvistatore (sinistra); anemometro sonico triassiale (destra).

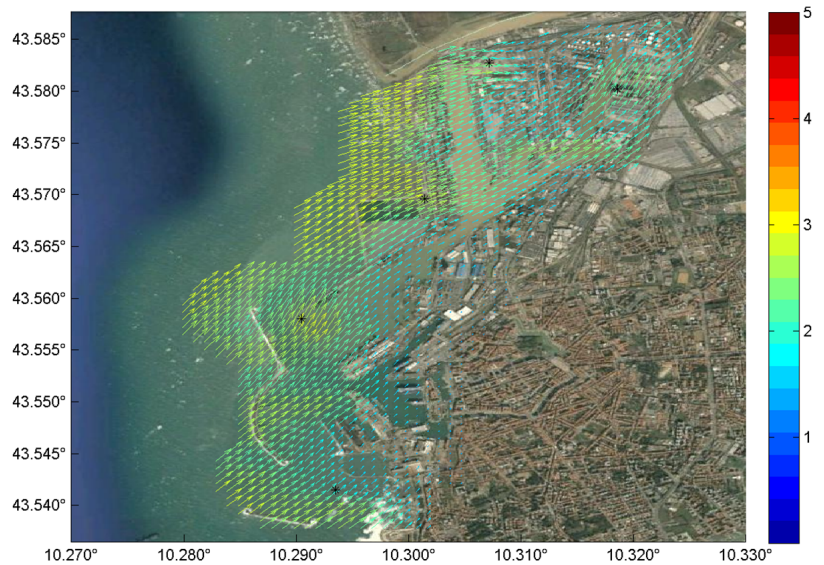


Figura 2.10: Velocità media del vento a 10 m di altezza nel Porto di Livorno.

Porto	*Strumento*	*Altezza* (m)	*Ubicazione*
Savona	0	84	Savona - Silos cereali
	1	33	Savona - Torre faro fascio binari
	2	18	Savona - Palazzina Avvisatore
	3	27	Vado - Terminal Traghetti Forship
	4	32	Vado - Torre faro Diga Terrapieno Sud
	5	42	Vado - Torre faro galleria ferroviara
Genova	1	61.4	Torre Piloti Molo Giano
	2	13.3	Voltri
La Spezia	1	15.5	Capitaneria di Porto
	2	13	Molo Garibaldi
	3	10	Porto Lotti
	4	11	Castellana
Livorno	1	20	Torre faro Colmata
	2	20	Torre faro Terminal
	3	20	Torre faro Vestrini
	4	20	Torre faro Benetti
	5	75	Grandi Molini
Bastia	1	10	Jetée
	2	10	Phare
	3	13	TOGA
	4	10	Déchetterie
	5	10	Plage de l'Arinella

Tabella 2.1: Caratteristiche principali degli anemometri della rete di monitoraggio portuale.

che rilevano la velocità del vento con una frequenza di campionamento $F = 10$ Hz; la risoluzione è $\Delta t = 1/F = 0.1$ m/s per l'intensità e $\Delta\alpha = 1°$ per la direzione del vento. Nel Porto di Bastia sono invece installati sensori con una frequenza di campionamento $F = 2$ Hz; la risoluzione è $\Delta t = 1/F = 0.5$ m/s per l'intensità e $\Delta\alpha = 1°$ per la direzione del vento. La Tabella 2.1 fornisce, per ogni strumento della rete di monitoraggio di ogni porto, il numero d'ordine, la quota sul terreno e l'ubicazione.

Presso ogni Autorità Portuale è installato un sistema centralizzato di acquisizione delle misure eseguite nel porto di competenza. Il sistema riceve i dati in tempo reale mediante connessione via cavo, wireless o GSM, a seconda degli anemometri e dei porti considerati. Il sistema permette di visualizzare da terminale remoto, in tempo reale, i valori istantanei della velocità e della direzione del vento (Figure 2.11–2.12). Elabora inoltre i parametri statistici essenziali delle misure su intervalli successivi di 10 minuti, nella fattispecie i valori medi e di picco della velocità del vento e la sua direzione prevalente.

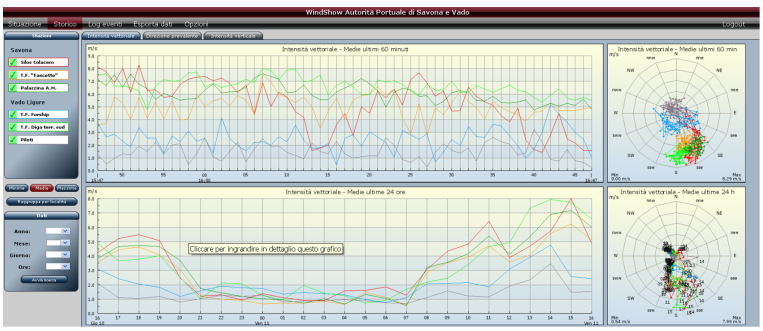


Figura 2.11: Visualizzazione di misure eseguite presso l'Autorità Portuale di Savona.

2.2 Trasmissione delle misure e banca dati

Ogni server locale presso le Autorità Portuali ritrasmette immediatamente i dati registrati al server centrale collocato presso il DICAT attraverso il protocollo di comunicazione TCP/IP (Figura 2.13). I dati, trasmessi ogni 10 minuti, in base a precise specifiche, sono elaborati e archiviati in una banca dati (Figura 2.14) comprendente una cartella per ogni porto. Ciascuna cartella comprende a sua volta due sottocartelle: una contiene i dati grezzi; l'altra contiene due file di parametri statistici, più dettagliati di quelli elaborati e archiviati presso i server delle Autorità Portuali; tali file sono riferiti a 2 intervalli di tempo T rispettivamente pari a 10 e a 1 minuto. La tempistica del processo di trasmissione è essenziale nei riguardi dell'elaborazione delle previsioni a breve termine (Capitolo 6). Per garantire la ridondanza dei dati e l'affidabilità del sistema, ogni giorno i dati grezzi e i file di statistica sono copiati in un altro server del DICAT.

I dati grezzi sono costituiti dalle componenti u_i e v_i della velocità orizzontale del vento registrata con passo temporale $\Delta t = T/N$, dove N è il numero dei dati acquisiti

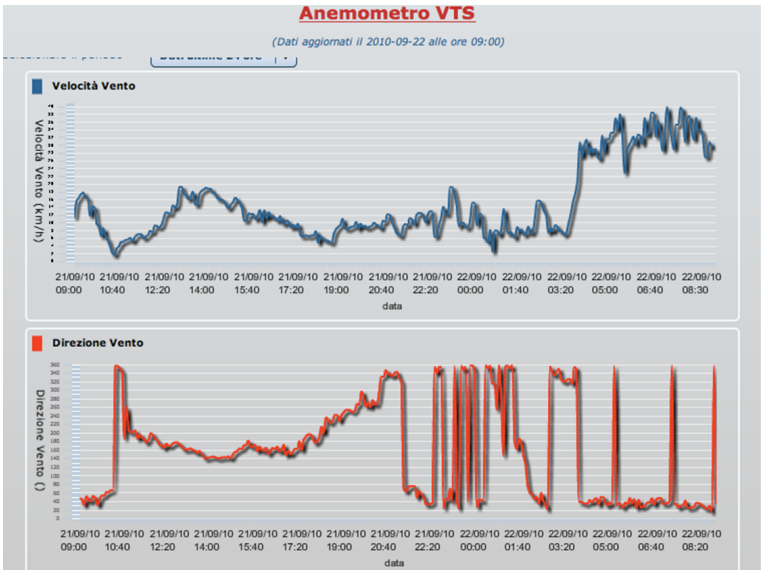


Figura 2.12: Visualizzazione di misure eseguite presso l'Autorità Portuale di Genova.

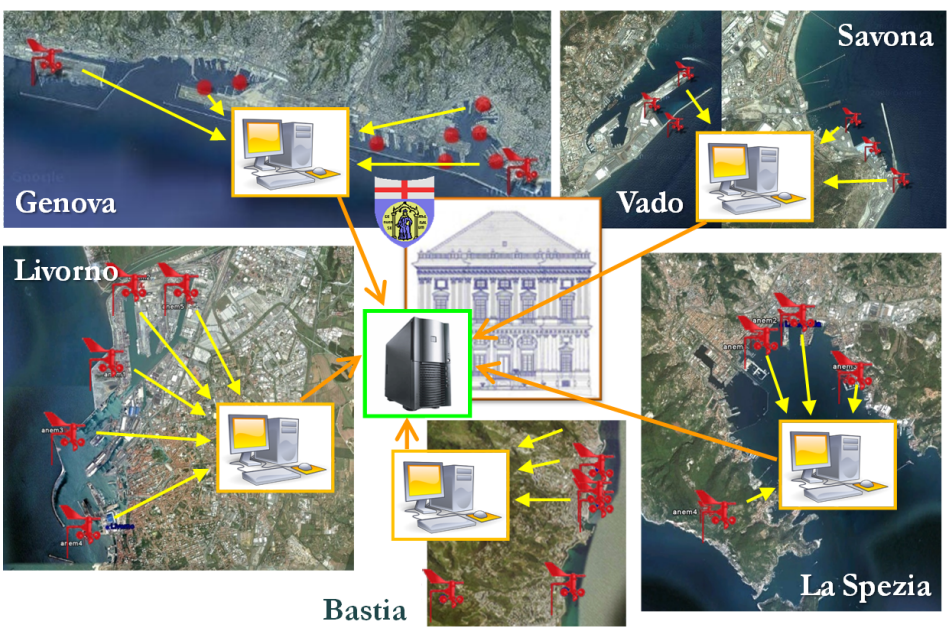


Figura 2.13: Schema della trasmissione dei dati dagli anemometri ai server locali delle Autorità Portuali, e di qui al server centrale del DICAT.

nell'intervallo temporale $T = 10$ minuti o 1 minuto e l'indice $i = 1, 2, \ldots, N$ specifica l'istante della misura $t_i = (i-1)\Delta t$ rispetto all'inizio dell'intervallo; u e v sono dirette

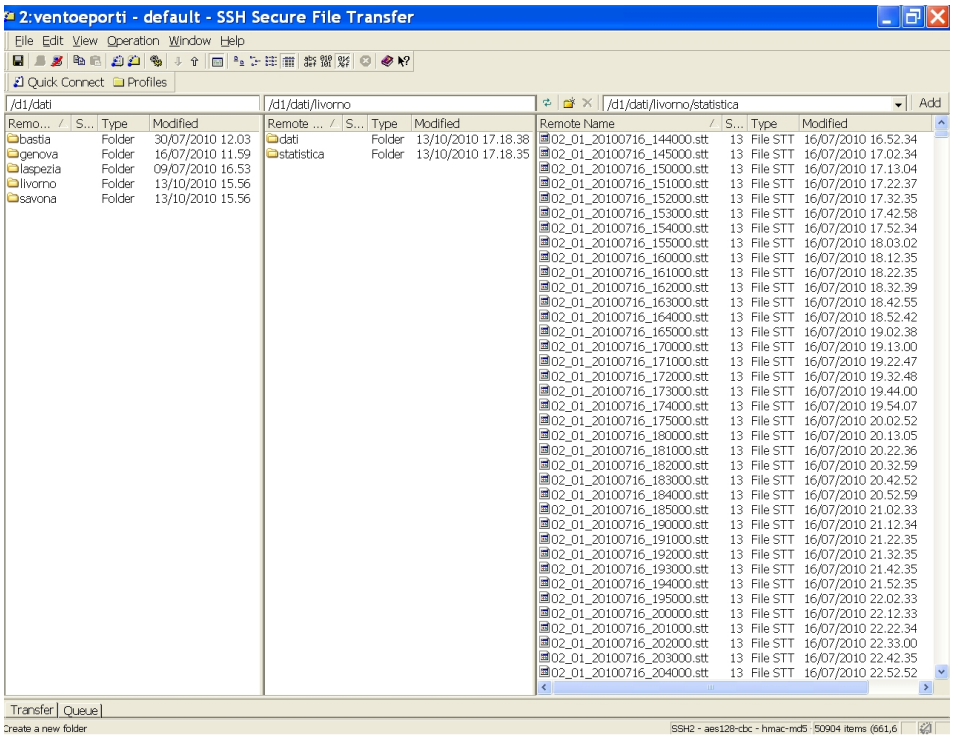


Figura 2.14: Immagine della struttura con la quale i dati ricevuti dai server locali sono organizzati e registrati presso il server centrale del DICAT.

secondo un sistema di assi cartesiani x e y orientati, rispettivamente, verso est e verso nord (Figura 2.15). Gli anemometri triassiali registrano inoltre la componente verticale w della velocità. I parametri statistici riferiti all'intervallo T comprendono la velocità media del vento $\bar{U}$, la direzione di provenienza α, la velocità massima U_{max}, il coefficiente di raffica G e l'intensità delle componenti longitudinali e trasversali della turbolenza I_u e I_v.

La velocità media e la direzione (espressa in gradi, positiva in senso orario e posta a 0 per vento proveniente da nord), la velocità massima e il coefficiente di raffica del vento sono forniti dalle relazioni:

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \tag{2.1a}$$

$$\alpha = 270^\circ - \text{arctg}\left(\frac{\bar{v}}{\bar{u}}\right) \tag{2.1b}$$

$$U_{\text{max}} = \max\left(\sqrt{u^2 + v^2}\right) \tag{2.2}$$

$$G = \frac{U_{\text{max}}}{\bar{U}} \tag{2.3}$$

dove $\bar{u}$ e $\bar{v}$ sono i valori medi di u e v:

$$\bar{u} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u_i \tag{2.4a}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i \tag{2.4b}$$

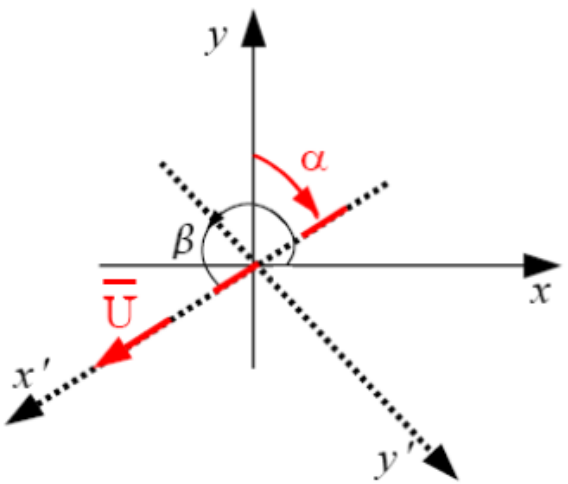


Figura 2.15: Sistemi di riferimento per le componenti delle velocità misurate dai sensori.

Si prenda adesso in esame un nuovo sistema di riferimento cartesiano (x', y') ruotato, in senso antiorario, di un angolo β rispetto al sistema (x, y) (Figura 2.15). Le due componenti della velocità orizzontale secondo gli assi ruotati x' e y' sono fornite dalle relazioni:

$$u' = u \cdot \cos\beta + v \cdot \sin\beta \tag{2.5a}$$

$$v' = -u \cdot \sin\beta + v \cdot \cos\beta \tag{2.5b}$$

Una rotazione del sistema di riferimento di un angolo $\beta = 270° - \alpha$ permette di allineare l'asse x' alla direzione della velocità media, come indicato in Figura 2.15. In tal caso, l'intensità delle componenti longitudinali e trasversali della turbolenza sono quindi riferite agli assi x' e y', rispettivamente, e fornite dalle relazioni:

$$I = I_{u'} = \frac{\sigma_{u'}}{\bar{u}} \tag{2.6a}$$

$$I_{v'} = \frac{\sigma_{v'}}{\bar{u}} \tag{2.6b}$$

dove $\sigma_{u'}$ e $\sigma_{v'}$ sono le deviazioni standard di u' e v':

$$\sigma_{u'} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(u'_i - \bar{U}\right)^2} \tag{2.7a}$$

$$\sigma_{v'} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i'^2} \tag{2.7b}$$

Sulla scorta di queste definizioni si procede secondo i 4 passi seguenti:

1) I dati grezzi sono controllati e archiviati, in forma automatica, secondo uno standard d'alta qualità. Ad ogni file di dati è inoltre associato un codice di affidabilità determinato dalla percentuale di dati validi presenti nel file. Le Figure 2.16–2.17 mostrano alcune storie della velocità campionata su diverse finestre temporali. La storia campionata sull'intervallo di 10 minuti (Figura 2.17) evidenzia il carattere di stazionarietà tipico degli eventi ciclonici a scala sinottica.

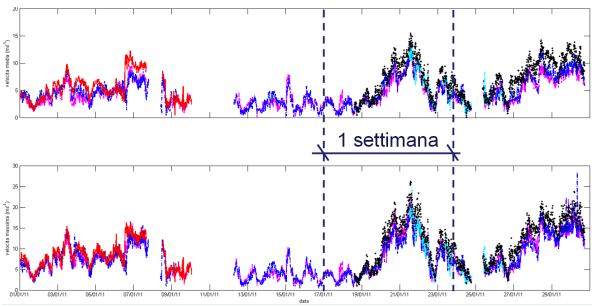


Figura 2.16: Registrazioni della velocità del vento nel Porto di Livorno, su una finestra temporale di alcune settimane.

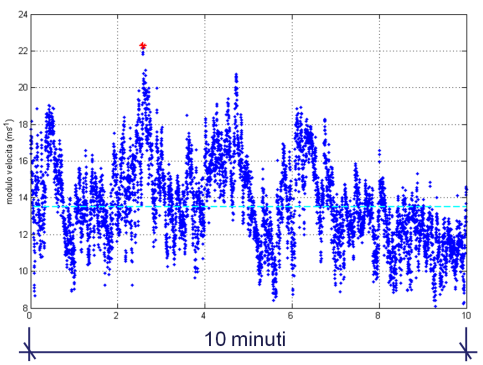


Figura 2.17: Registrazione della velocità del vento nel Porto della Spezia, su un intervallo di 10 minuti.

2) I dati grezzi sono elaborati per ricavare e archiviare le principali informazioni statistiche su intervalli di 10 minuti. Esse comprendono due blocchi di dati. Il primo contiene le informazioni elaborate presso i server delle Autorità Portuali, vale a dire i valori medi e di picco della velocità del vento e la sua direzione prevalente; tali informazioni sono rielaborate con nuovi procedimenti e poste a confronto con quelle già disponibili. Il secondo blocco contiene nuove informazioni statistiche riguardanti le componenti della turbolenza. Esse sono indispensabili per eseguire le previsioni a breve termine della velocità di picco del vento.

3) L'operazione illustrata al punto 2) è ripetuta per ricavare e archiviare le principali informazioni statistiche su intervalli di 1 minuto. La Figura 2.18 mostra una storia temporale della velocità del vento, corredata dei valori medi e di picco su intervalli rispettivamente di 10 e 1 minuto.

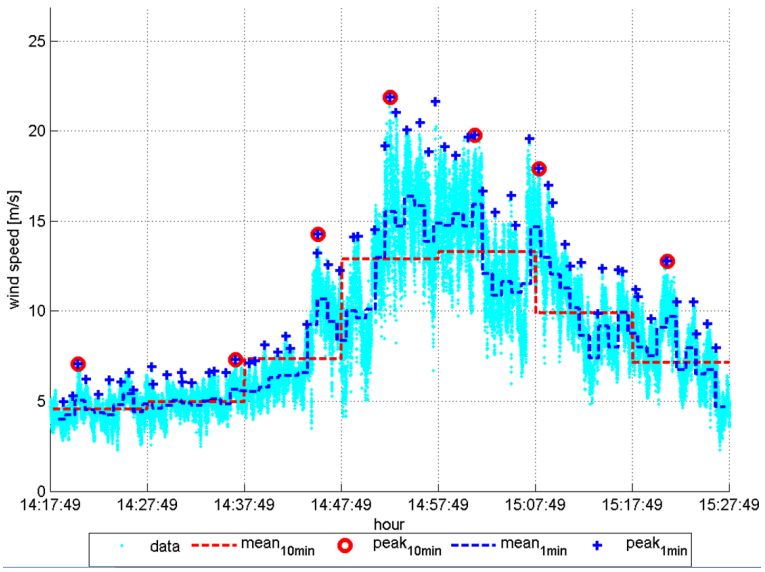


Figura 2.18: Velocità del vento registrata il 5 giugno 2011 nel Porto della Spezia.

4) Ogni giorno è prodotto e inviato alle Autorità Portuali un rapporto che fornisce, per ogni anemometro di competenza, la percentuale dei dati ricevuti dal server del DICAT. Ciò permette di monitorare continuamente l'efficienza del sistema di trasmissione dei dati (Figura 2.19). Nella fase di messa a punto del sistema tale operazione è stata fondamentale per apprezzare il progressivo miglioramento del sistema e quindi l'aumento dei dati trasmessi.

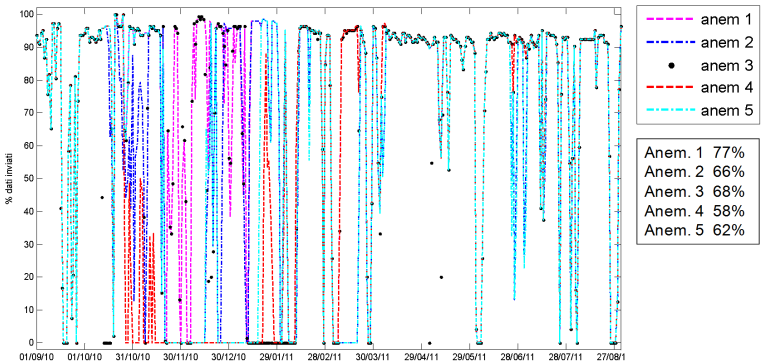


Figura 2.19: Percentuale dei dati trasmessi dal server del Porto di Livorno al DICAT, dal primo settembre 2010 al 27 agosto 2011.

2.3 Controllo e validazione dei dati

Nelle fasi finali del progetto, una volta acquisita una quantità di dati sufficientemente estesa, è stato svolto un confronto critico e sistematico tra le misure simultanee dei diversi strumenti nella stessa area portuale. Tale confronto ha escluso il Porto di Bastia, dove le misure acquisite e trasmesse a DICAT sono tuttora insufficienti. Le analisi hanno lo scopo di validare il buon funzionamento degli anemometri senza giungere a stime con valenza statistica; richiedendo periodi di misura più estesi, esse sono rinviate a valutazioni successive al progetto.

Il confronto è effettuato esaminando in ogni area portuale l'intensità e la direzione di provenienza del vento misurato. In particolare, partendo dalla velocità media del vento su dieci minuti, sono calcolate le medie mensili mobili dell'intensità e le rose dei venti di ogni anemometro. La media mensile mobile permette di seguire l'evoluzione delle misure in modo sintetico; le rose dei venti danno indicazioni sulla direzione di provenienza dei venti più frequenti.

La visualizzazione parallela di tali grandezze per ogni porto evidenzia la presenza d'eventuali errori sistematici nella misura del vento dovuti, ad esempio, a fenomeni di scia o di schermatura degli strumenti da parte di promontori, capi, edifici o parti di essi.

La Figura 2.20 riporta l'andamento delle medie mensili mobili della velocità media del vento nel Porto di Savona (Figura 2.2), da metà aprile 2011 a metà aprile 2012; nella figura sono inoltre riportate le quote sul livello del terreno dei sensori. La Figura 2.21 mostra le rose dei venti.

Come si può osservare in Figura 2.20, l'anemometro 0, contraddistinto dalla linea blu e ubicato sul silos cereali a 84 m sul livello del terreno, misura sistematicamente una velocità del vento inferiore rispetto agli altri due anemometri, ubicati a quote inferiori, cioè a 38 e 18 m sul livello del terreno. Poiché i tre anemometri nel Porto di Savona sono vicini gli uni agli altri, si presume che le velocità del vento non siano sostanzialmente differenti, se non in funzione della quota dei sensori. Inoltre, come mostrato in Figura 2.21, i venti più frequenti provengono da nord-nordovest per tutti

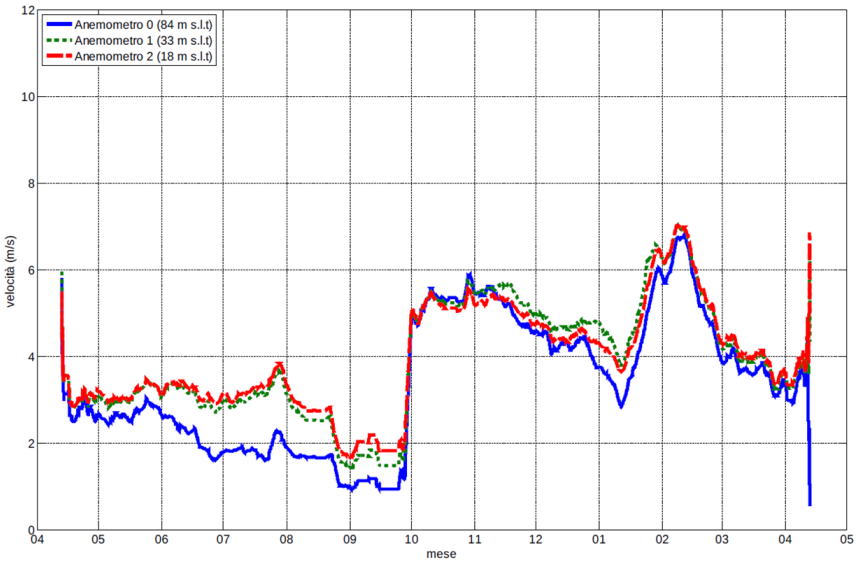


Figura 2.20: Medie mensili mobili della velocità del vento misurata dagli anemometri installati nel Porto di Savona.

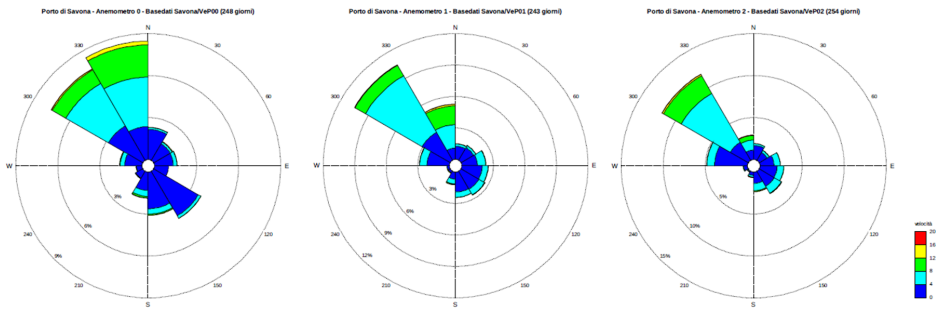


Figura 2.21: Rose del vento misurato dagli anemometri installati nel Porto di Savona.

gli strumenti. Per tali ragioni si ritiene che l'anemometro 0 sottostimi la velocità del vento per effetto della scia del silos. Ciò trova conferma nel fatto che la componente verticale della velocità misurata dall'anemometro 0 è molto elevata rispetto agli altri strumenti. Si pone quindi la necessità d'elevare tale strumento o di spostarlo in un sito più idoneo.

Per quanto riguarda i sensori installati nel Porto di Vado Ligure (Figura 2.2), la Figura 2.22 riporta gli andamenti delle medie mensili mobili della velocità del vento, misurate da metà aprile 2011 a metà aprile 2012. Gli strumenti sono posti a quote simili sul terreno; nonostante ciò l'anemometro 4, contraddistinto dalla linea tratteggiata verde, registra velocità del vento maggiori rispetto a quelle degli altri strumenti. Questa circostanza non può essere riconducibile alla differente rugosità del terreno dovuta alla posizione del sensore in prossimità della costa, con mare aperto in direzione est-sud;

infatti, analizzando le rose dei venti in Figura 2.23, i più frequenti provengono da ovest-nordovest. La differenza riscontrata è quindi attribuita agli effetti di schermatura e incanalamento del vento dovuti alla complessità dell'orografia della zona e in particolare al promontorio di Capo Vado a ridosso dell'area portuale.

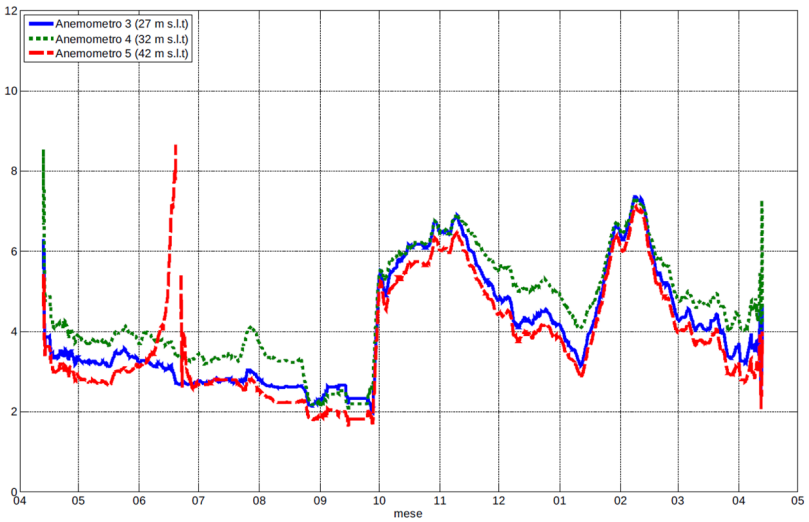


Figura 2.22: Medie mensili mobili della velocità del vento misurata dagli anemometri installati nel Porto di Vado Ligure.

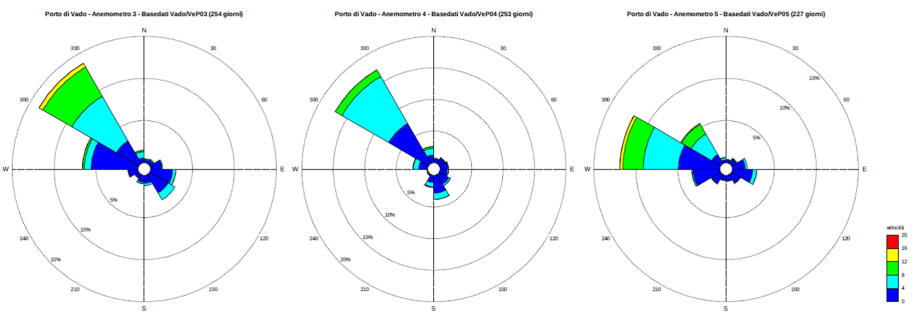


Figura 2.23: Rose del vento misurato dagli anemometri installati nel Porto di Vado Ligure.

Le misure riportate nelle Figure 2.20 e 2.22 evidenziano una notevole variazione annuale della velocità del vento, con un'intensificazione nei primi mesi del 2012. Tale tendenza potrà essere interpretata solo in futuro, con acquisizioni di maggiore durata. Il confronto tra le rilevazioni contemporanee effettuate a Savona e Vado Ligure mostra mediamente una maggiore ventosità del bacino di Vado Ligure, dovuta probabilmente alle condizioni orografiche e d'esposizione di questa zona.

La Figura 2.24 riporta gli andamenti delle medie mensili mobili della velocità del vento misurate dagli anemometri del Porto di Genova (Figura 2.3), da metà aprile

2011 a metà aprile 2012. A causa di malfunzionamenti del sistema, la registrazione è molto discontinua e le misure simultanee sono limitate un periodo di circa 5 mesi. La Figura 2.25 riporta le rose dei venti.

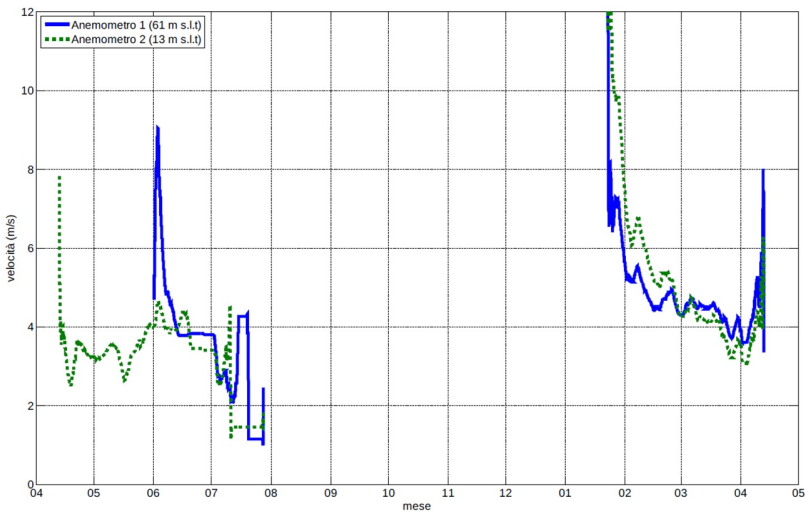


Figura 2.24: Medie mensili mobili della velocità del vento misurata dagli anemometri installati nel Porto di Genova.

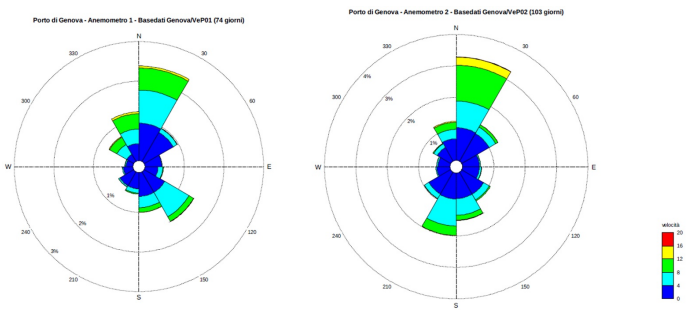


Figura 2.25: Rose del vento misurato dagli anemometri installati nel Porto di Genova.

L'anemometro 1, caratterizzato dalla linea continua blu e ubicato sulla Torre Piloti a 61 m sul livello del terreno, misura solo in alcuni periodi velocità del vento più elevate rispetto all'anemometro 2, sulla punta del molo di Voltri a 13 m sul livello del terreno. Le direzioni di provenienza del vento più frequenti, come mostrato dalla Figura 2.25, sono nord-est e sud-est per l'anemometro 1, nord-est e sud-ovest per l'anemometro 2. Il fatto che gli anemometri installati nel Porto di Genova siano molto distanti tra loro, unito alla scarsa disponibilità di dati continui, non permette un'analisi completa del funzionamento degli strumenti. Per avere indicazioni sulla validazione degli strumenti, sarà perciò necessario ripetere le analisi in futuro.

La Figura 2.26 riporta gli andamenti delle medie mensili mobili della velocità del vento misurate dagli anemometri del porto della Spezia (Figura 2.4) da metà aprile 2011 a metà aprile 2012. La Figura 2.27 riporta le rose dei venti.

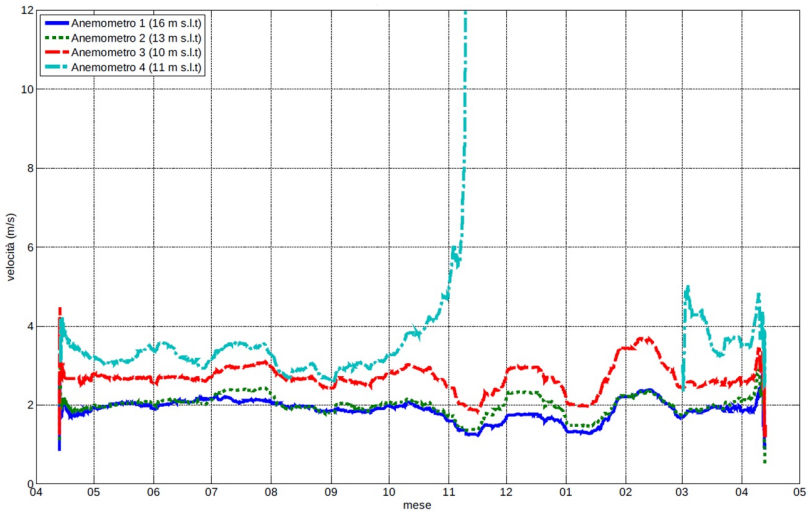


Figura 2.26: Medie mensili mobili della velocità del vento misurata dagli anemometri installati nel porto della Spezia.

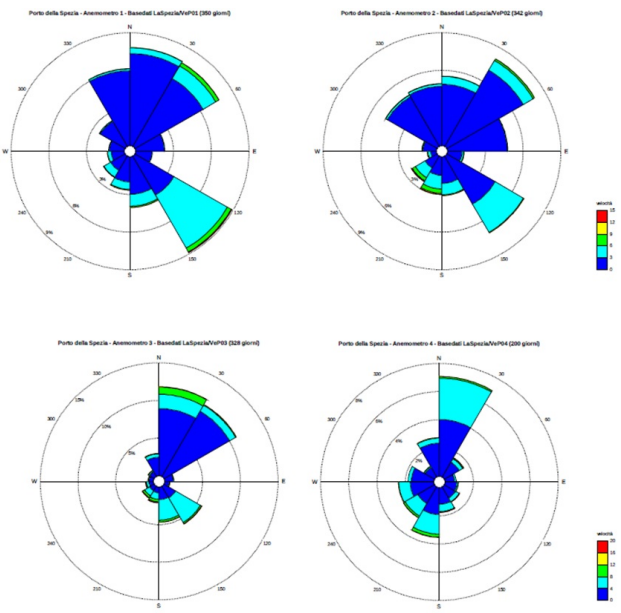


Figura 2.27: Rose del vento misurato dagli anemometri installati nel porto della Spezia.

I tre anemometri installati nel porto della Spezia hanno circa la stessa quota sul livello del terreno, compresa tra 10 e 16 m. Nonostante ciò, l'anemometro 3 misura velocità del vento mediamente maggiori di quelle acquisite dagli altri due. Ciò è ragionevole poiché esso è installato sulla punta di un molo del Porto Lotti, dove la rugosità del terreno è inferiore per la prossimità con il mare. Tale riscontro è indicativo di un corretto funzionamento degli strumenti.

Nel loro complesso i tre anemometri istallati nel porto misurano una velocità minore di quello posto alla sommità del promontorio a ovest della Spezia. Le rose dei venti nella Figura 2.27 evidenziano inoltre come tali strumenti siano schermati dai venti provenienti da sud sud-ovest, per la presenza dello stesso promontorio. Di ciò tengono conto i modelli numerici di trasferimento del vento descritti nel Capitolo 3.

Diversamente dal caso di Savona–Vado, le registrazioni provenienti dagli anemometri della Spezia non evidenziano significative variazioni stagionali.

La Figura 2.28 riporta gli andamenti delle medie mensili mobili della velocità del vento misurate dagli anemometri del Porto di Livorno (Figura 2.5), da metà aprile 2011 a metà aprile 2012. La Figura 2.29 riporta le rose dei venti.

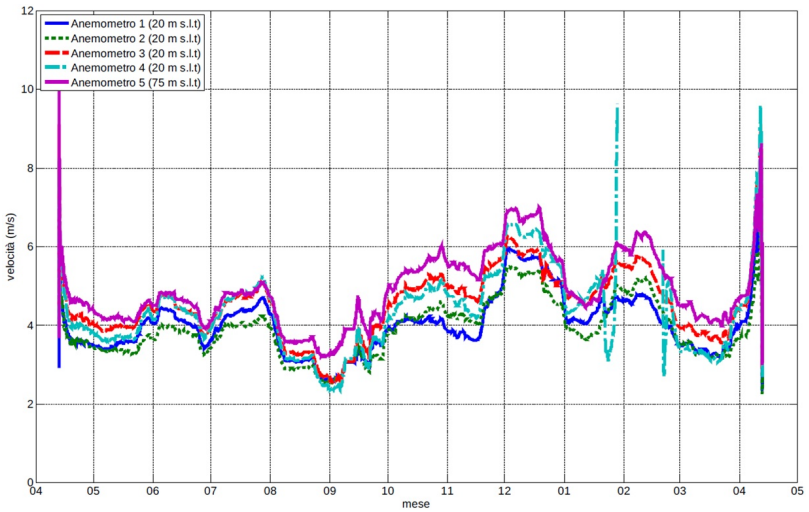


Figura 2.28: Medie mensili mobili della velocità del vento misurata dagli anemometri installati nel Porto di Livorno.

L'anemometro 5 ubicato sul silos Grandi Molini a 76 m sul livello del terreno e contraddistinto in figura dalla linea viola, misura, coerentemente con la differenza di quota, velocità del vento sempre maggiori rispetto a tutti gli altri anemometri ubicati tutti su torri faro a 20 m sul livello del terreno. Tra gli strumenti ubicati sulle torri faro, gli anemometri 3 e 4 misurano intensità del vento maggiori poiché sono ubicati 3 e 4, o in cima ai moli, mentre gli strumenti 1 e 2 sono installati all'interno dell'area portuale. Dall'analisi delle rose dei venti mostrate in Figura 2.29, si osserva come tutti gli anemometri registrino più frequentemente venti provenienti dalla direttrice est-ovest. Tali riscontri sono indicativi di un corretto funzionamento degli strumenti. Analogamente a quanto evidenziato nel caso del Porto di Savona–Vado, anche nella

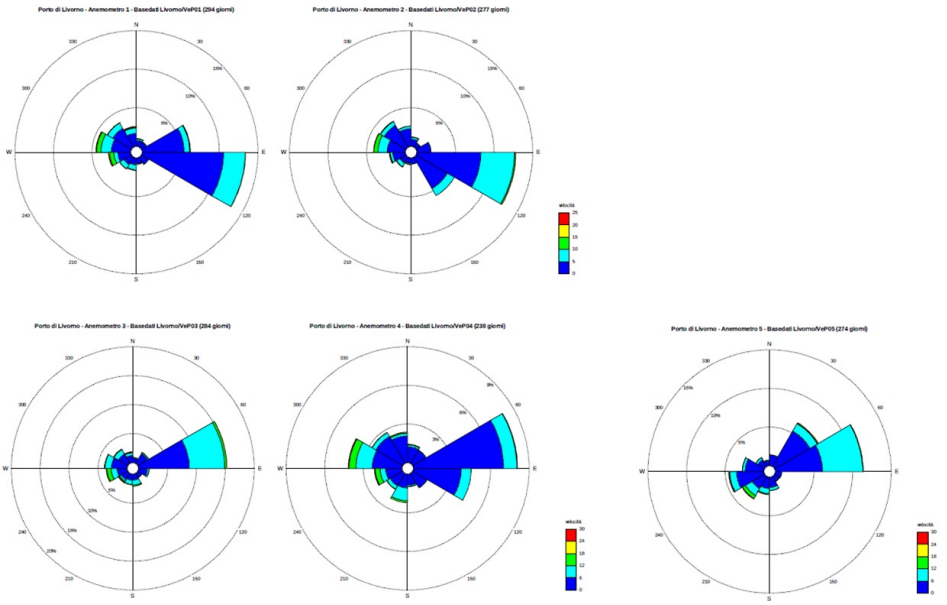


Figura 2.29: Rose del vento misurato dagli anemometri installati nel Porto di Livorno.

zona portuale di Livorno si evidenzia un incremento medio dell'intensità del vento nei primi mesi del 2012. Eventuali ricorsività stagionali potranno essere confermate solo in seguito ad acquisizioni di maggiore durata.

2.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo

Fra le varie prospettive e potenzialità di sviluppo offerte dalla realizzazione della rete anemometrica portuale, due meritano un'evidenza particolare: il potenziamento della rete e lo studio degli eventi eolici a mesoscala.

Il potenziamento della rete è un passaggio obbligato per proseguire il progetto elevando la qualità dei prodotti forniti ed estendendo il dominio indagato nella direzione del mare. Entrambi questi obiettivi possono essere perseguiti attraverso la messa in opera di sensori ispirati a tre proprietà:

1) fornire, oltre alla visione planimetrica dei campi di vento, anche i profili altimetrici della velocità;

2) acquisire misure fuori costa quali il moto ondoso, le correnti e lo stesso vento;

3) introdurre nel sistema dei sensori che possano monitorare l'atmosfera non limitandosi alla velocità del vento.

La misura dei profili altimetrici della velocità può essere attuata sia disponendo nuovi anemometri lungo le torri (adottando opportuni sbracci di lunghezza tale da evitare gli effetti di scia delle torri stesse), tutte strumentate alla sola sommità, sia

ricorrendo a strumenti di nuova generazione quali SoDAR (Sonic Detection And Ranging) e LiDAR (Light Detection And Ranging). Di particolare interesse è la possibilità d'istallare i LiDAR presso gli allineamenti verticali degli anemometri sonici: i LiDAR misurano con elevata precisione la velocità del vento fra 40 e 200 m di altezza sul suolo; gli anemometri, montati su torri di altezza compresa fra 10 e 30 m, completano la caratterizzazione del profilo verticale del vento, integrandosi perfettamente con i LiDAR. La misura del moto ondoso e del vento fuori costa può essere svolta tramite boe ondametriche; gli anemometri possono essere istallati tanto sulle boe quanto su antenne realizzate su piattaforme off-shore; gli stessi LiDAR, istallati lungo la costa, garantiscono un'ampia copertura sia verso terra sia vero mare. L'inserimento nella rete di monitoraggio di sensori per la misura del flusso termico, della temperatura e della pressione, fornisce uno spettro più ampio di dati tali da migliorare l'input dei modelli numerici.

L'insieme o anche una parte appropriata di questi nuovi strumenti permette di estendere i domini computazionali nella direzione del mare; ciò soddisfa il doppio obiettivo di ampliare i prodotti del progetto a uno specchio acqueo che ha enorme importanza per l'ingresso e l'attracco delle navi nei porti, e di migliorare sostanzialmente i modelli adottati nel presente progetto. In tali modelli, l'attrito esercitato sul vento dalla superficie marina è un dato del problema costante durante le simulazioni. Nella realtà l'attrito cresce quando il vento, provenendo dal mare, incrementa il moto ondoso. Il moto ondoso, a sua volta, determina un attrito superficiale che tende a frenare il vento. S'instaura quindi un fenomeno d'interazione fra vento e onde che, inserito nei modelli, ne aumenta sostanzialmente la qualità sia sul fronte terra su sul lato mare.

Per quanto invece concerne gli eventi eolici a mesoscala, è essenziale porre in rilievo i grandi limiti delle reti anemometriche classiche nei riguardi di questi fenomeni.

Le reti anemometriche gestite dall'Aeronautica Militare e dall'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo, ad esempio, comprendono stazioni distribuite omogeneamente sul territorio con una distanza indicativa nell'ordine di 50–100 km. Esse misurano la velocità media del vento su intervalli temporali di 10 minuti. Grazie a queste proprietà, tali reti sono indicate per acquisire gli eventi eolici a scala sinottica, in particolare i cicloni extra-tropicali, con dimensioni nell'ordine di 500 km (Figura 2.30), e con durate di almeno una giornata.

Invece, tali reti non possono individuare adeguatamente gli eventi eolici a mesoscala, in particolare le trombe d'aria o tornado (Figura 2.31), i venti frontali (Figura 2.32) e i downburst (Figura 2.33), con dimensioni comprese fra poche centinaia di metri e alcuni chilometri e con durate spesso inferiori al minuto.

Grazie a una maglia planimetrica fitta (Figure 2.2–2.3) e all'impiego di anemometri che misurano il vento con passo temporale compreso fra 0.1 e 0.5 s, la rete di monitoraggio realizzata dal presente progetto offre la possibilità, tuttora molto rara, di cogliere con efficacia anche i fenomeni a mesoscala.

A titolo di esempio, la Figura 2.34 mostra una registrazione di 10 minuti della velocità (a) e della direzione (b) del vento, chiaramente di tipo non stazionario, acquisita da un anemometro del Porto di Livorno nel corso di un evento temporalesco. La Figura 2.34(a) mostra che, nonostante il valore medio su 10 minuti sia piuttosto basso, meno di 7 m/s, il picco della velocità raggiunge circa 23 m/s. Il fenomeno di

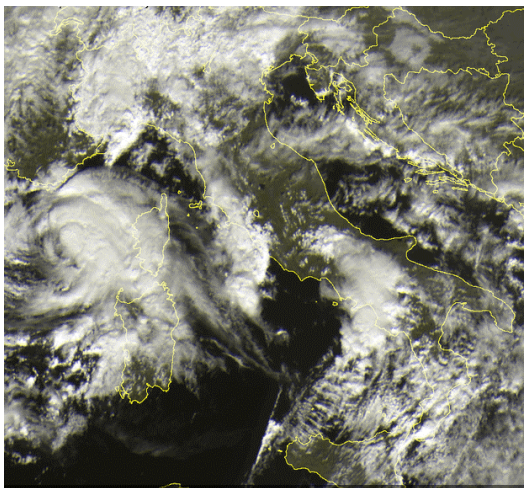


Figura 2.30: Immagine satellitare di una formazione ciclonica che interessa l'area dell'Alto Tirreno.



Figura 2.31: Tromba d'aria nel Porto della Spezia.

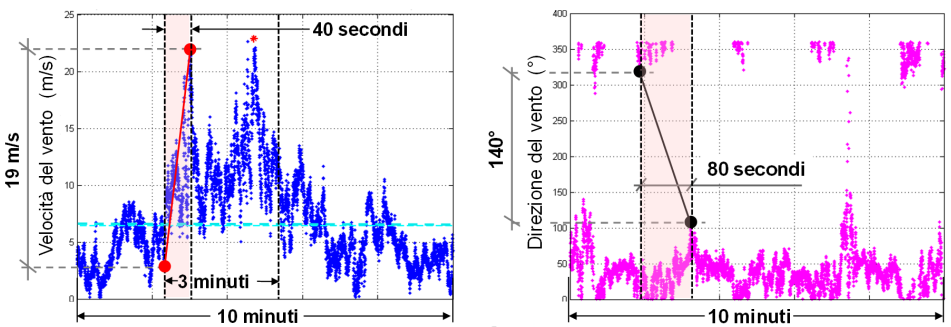


Figura 2.32: Superficie frontale.



Figura 2.33: Downburst.

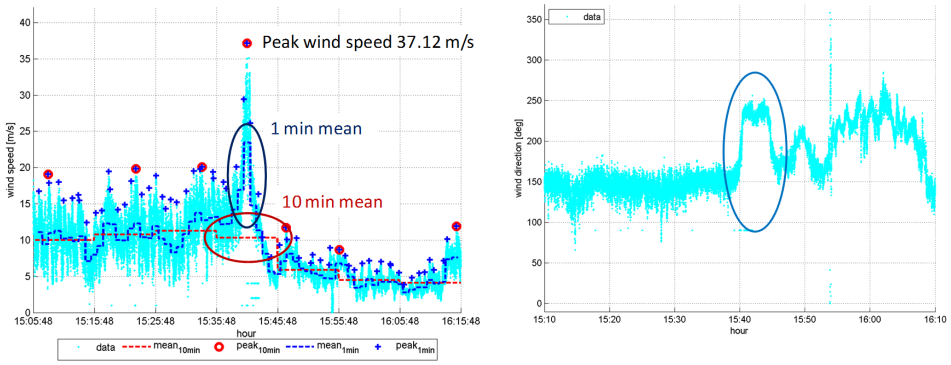
maggiore intensità si attua su un intervallo di circa 3 minuti; nel corso dei primi 40 s di questo intervallo, la velocità del vento manifesta una crescita di 19 m/s, pari a oltre 68 km/h. La Figura 2.34(b) mostra che, contemporaneamente, la direzione del vento ruota di circa 140°.



(a) Velocità **(b)** Direzione

Figura 2.34: Velocità (a) e direzione (b) misurate nel Porto di Livorno nel corso di un evento temporalesco.

La Figura 2.35 mostra il diagramma della velocità (e della direzione del vento registrate nel Porto della Spezia, dall'anemometro 3, fra le 15:05 e le 16:45 del 25 ottobre 2011. L'evento nel corso del quale si attua tale situazione è il più intenso fra quelli registrati dall'inizio delle misure nelle aree portuali e corrisponde all'alluvione che ha devastato la Valle del Vara e le Cinque Terre (Figura 2.36). Alle 15:40 circa il picco della velocità del vento raggiunge 37.12 m/s, pari a 134 km/h. La velocità media nei 10 minuti di vento più intenso è poco maggiore di 10 m/s (36 km/h); la velocità media nel minuto nel quale si verifica il picco è circa 23 m/s (83 km/h). Nel lasso di tempo in cui si realizza questo fenomeno la direzione del vento, inizialmente di 150° rispetto al nord, ruota istantaneamente di 90°, portandosi a circa 240°; ritorna circa quella iniziale dopo meno di 5 minuti.



(a) Velocità **(b)** Direzione

Figura 2.35: Velocità (a) e direzione (b) del vento registrate dall'anemometro 3 del Porto della Spezia, fra le 15:05 e le 16:45 del 25 ottobre 2011.



(a) Borghetto Vara **(b)** Monterosso

Figura 2.36: Danni causati dall'alluvione del 25 ottobre 2011 nella Provincia della Spezia.

Le valutazioni statistiche, le previsioni a medio termine e quelle a breve termine hanno come limite più rilevante l'estrema difficoltà di cogliere, in modo affidabile, fenomeni del tipo sopra descritto. Le analisi statistiche sono basate sulle velocità medie del vento su 10 minuti, acquisite dalle stazioni meteorologiche storiche (Capitolo 4). Le previsioni a medio termine (Capitolo 5) si avvalgono di modelli che hanno al loro interno la fisica dei fenomeni eolici di breve durata; tuttavia, partendo da misure planetarie del vento acquisite su intervalli di 10 minuti, non possono individuare i fenomeni di durata inferiore. Le previsioni a breve termine (Capitolo 6) sono basate sulle misure svolte con passo compreso fra 0.1 e 0.5 s dagli strumenti della rete di monitoraggio portuale; peraltro, anche tali previsioni sono svolte su intervalli temporali di 10 minuti, quindi troppo lunghi per riconoscere eventi che si attuano su una scala dei tempi inferiori al minuto.

La ricerca scientifica sta compiendo grandi progressi finalizzati a superare queste

limitazioni. I dati registrati nei porti dell'Alto Tirreno contengono tutti gli elementi utili a perseguire operativamente e con fiducia tali ricerche.

3 Simulazione numerica del vento

La simulazione numerica dei campi di vento è l'anello centrale della catena (Figura 1.8) mediante la quale i dati misurati prevalentemente dagli anemometri nelle stazioni storiche dell'Aeronautica Militare (AM) e dell'Ente Nazionale di Assistenza al Volo (ENAV), i dati planetari acquisiti dal Sistema di Osservazione Globale e i dati registrati dai sensori della rete di monitoraggio portuale (Capitolo 2) sono usati per produrre, rispettivamente, le mappe statistiche del vento (Capitolo 4) e le previsioni del vento a medio (Capitolo 5) e a breve (Capitolo 6) termine.

Questi obiettivi sono conseguiti per mezzo di un'ampia gamma di modelli numerici, primi fra tutti i programmi di calcolo WINDS e PWMCT, impiegati per simulare la velocità del vento su terreni complessi (Paragrafo 3.1). Il Paragrafo 3.2 descrive i domini computazionali usati per simulare la velocità media e la direzione del vento, prevalentemente mediante WINDS; illustra inoltre i metodi per mezzo dei quali, applicando i risultati di tali simulazioni, è possibile trasferire i dati misurati dagli anemometri delle stazioni storiche e della rete di monitoraggio portuale ai punti dei domini computazionali implementati per la rappresentazione dei porti. Il Paragrafo 3.3 descrive i domini computazionali usati per simulare la turbolenza atmosferica, prevalentemente mediante PWMCT; illustra inoltre i metodi per mezzo dei quali, nota la velocità media del vento misurato o previsto (a breve termine) e la turbolenza atmosferica simulata, è possibile ricostruire i campi della velocità di picco del vento nei porti. Il Paragrafo 3.4 descrive le analisi svolte per verificare l'affidabilità e la precisione delle simulazioni numeriche. Il Paragrafo 3.5 discute le prospettive e le potenzialità di sviluppo degli studi descritti nel presente capitolo.

3.1 Modelli numerici

La realizzazione del progetto "Vento e Porti" ha richiesto l'impiego e la messa a punto di numerosi modelli numerici. La simulazione dei campi di vento oggetto del presente capitolo è svolta, in prevalenza, per mezzo dei codici WINDS (Paragrafo 3.1.1) e PWMCT (Paragrafo 3.1.2).

3.1.1 Il codice WINDS

WINDS (Wind Interpolation by Non-Divergent Schemes) è un modello numerico diagnostico, cioè invariante nel tempo, realizzato presso il Dipartimento di Fisica (DIFI) dell'Università degli Studi di Genova (Burlando, Georgieva e Ratto 2007; Burlando et al. 2007). Tale modello, a conservazione di massa, è impiegato per simulare campi tridimensionali della velocità media e della direzione del vento su terreni complessi.

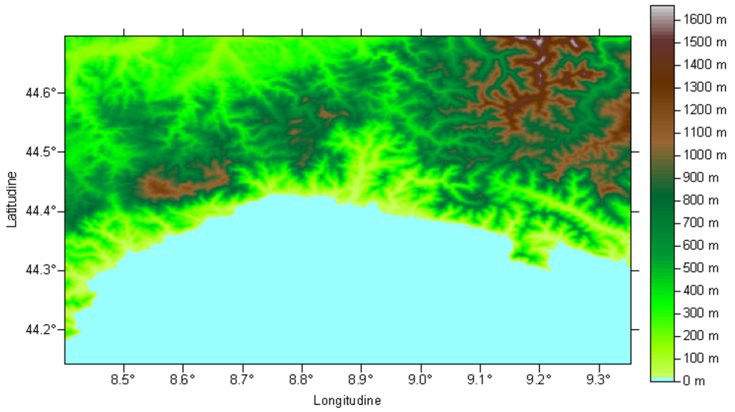


Figura 3.1: Orografia del terreno nella macroarea del Porto di Genova.

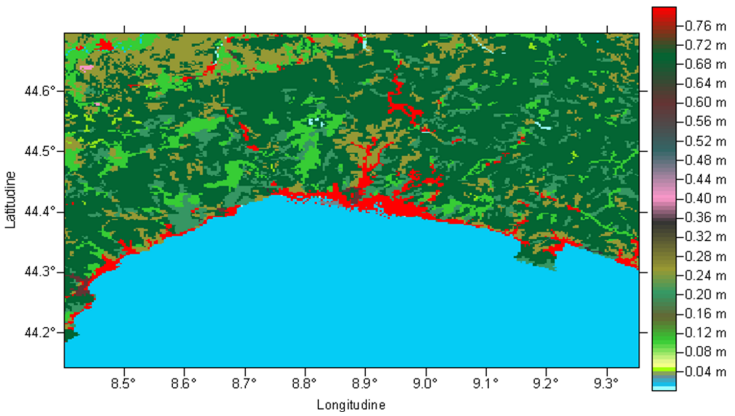


Figura 3.2: Lunghezza di rugosità del terreno nella macroarea del Porto di Genova.

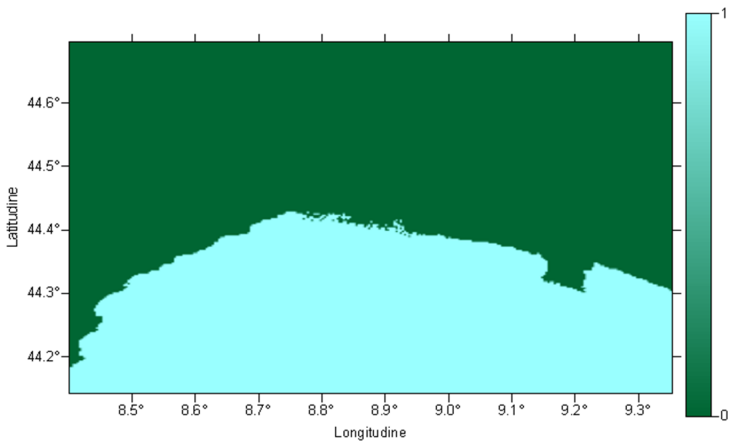


Figura 3.3: Maschera terra-mare del terreno nella macroarea del Porto di Genova.

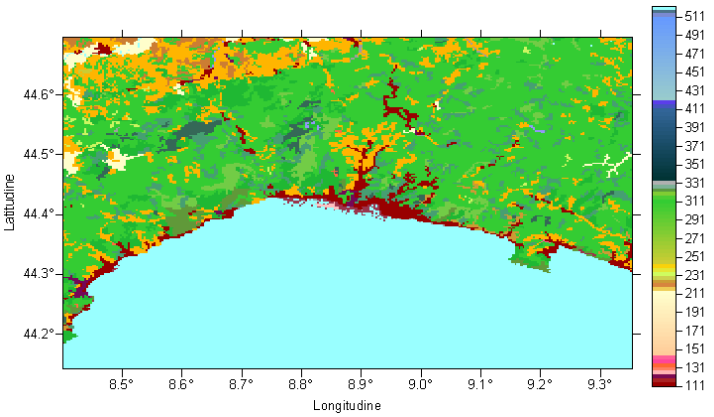


Figura 3.4: Copertura del terreno nella macroarea del Porto di Genova.

L'uso del programma richiede due tipi d'informazioni: la descrizione delle proprietà del territorio che influenzano il vento nello strato limite atmosferico e le caratteristiche meteorologiche dello scenario di vento che s'intende simulare. Le figure riportate nel seguito di questo paragrafo si riferiscono all'area del Porto di Genova.

La descrizione delle proprietà del territorio richiede quattro gruppi d'informazioni: l'orografia (Figura 3.1), assegnata mediante le quote del suolo sul livello del mare; la scabrezza, cioè la grandezza che esprime la resistenza offerta al vento dalle asperità del terreno (ad esempio la vegetazione e le costruzioni), definita dalla lunghezza di rugosità (Figura 3.2); il displacement level, vale a dire la quota della sommità degli ostacoli compatti e diffusi (per esempio i tetti delle costruzioni nei centri urbani o alla chioma della vegetazione boschiva); e la maschera terra-mare, che identifica la linea di costa (Figura 3.3). L'assegnazione della lunghezza di rugosità richiede a sua volta la conoscenza della copertura del suolo (Figura 3.4), espressa mediante la sua destinazione d'uso, e opportune matrici di conversione che associno a ogni tipo di copertura la lunghezza di rugosità. Il displacement level è stato assunto nullo ovunque. Le rappresentazioni illustrate nelle Figure 3.1–3.4 corrispondono a un'estensione territoriale di circa 76–62 km.

La descrizione delle caratteristiche meteorologiche dello scenario di vento che s'intende simulare richiede due gruppi d'informazioni: i dati anemologici di partenza, rappresentati ad esempio dalla velocità media e dalla direzione del vento alla sommità dello strato limite atmosferico, oppure misurati o previsti presso un sensore, o ancora simulati da un modello meteorologico prognostico, cioè evolvente nel tempo; e la stratificazione termica degli strati bassi dell'atmosfera, descritta dalla lunghezza di Obukhov e assegnata attraverso classi opportune di stabilità.

Il procedimento sopra descritto è inizialmente applicato su un dominio sufficientemente ampio da comprendere tutti gli elementi di orografia e di scabrezza in grado d'influenzare il campo di vento nel sito che si vuole esaminare; per questo motivo tale dominio riguarda un'area molto vasta, detta macroarea, simulata mediante una griglia di risoluzione relativamente rada (Figure 3.1–3.4). A valle di questa prima simulazione si applica una procedura di zoom, o nidificazione, che permette di focalizzare l'atten-

Tipologia di terreno	*Codice CLC200*	z_0 (m)
Mari e oceani	523	dip. da V
Lagune	521	0.0005
Bacini d'acqua	512	
Estuari	522	0.003
Corsi d'acqua, canali e idrovie	511	
Spiaggia, dune, sabbie	331	
Aeroporti	124	0.03
Paludi salate	421	0.04
Prati stabili	231	
Saline	422	0.05
Aree percorse da incendi	334	0.10
Aree con vegetazione rada	333	
Aree a pascolo maturale e praterie d'alta quota	321	
Sistemi colturali e particellari permanenti	242	
Colture annuali associate e colture permanenti	241	
Seminativi in aree non irrigue	211	
Paludi interne	411	0.15
Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	332	
Seminativi in aree irrigue	212	
Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione	324	0.20
Aree a vegetazione sclerofilia	323	
Brughiere e cespuglieti	322	
Aree estrattive	131	
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie, con spazi natutali	243	0.25
Uliveti	223	
Vigneti	221	
Discariche	132	
Cantieri	133	0.35
Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	122	
Aree agroforestali	244	0.40
Frutteti e frutti minori	222	
Aree verdi urbane	141	0.50
Aree sportive e ricreative	142	
Aree industriali e commerciali	121	0.60
Boschi misti	313	0.70
Boschi di conifere	312	
Boschi di latifoglie	311	
Tessuto urbano discontinuo	112	0.80
Tessuto urbano continuo	111	
Aree portuali	123	

Tabella 3.1: Matrice di conversione che associa ai diversi tipi di copertura una lunghezza di rugosità.

zione su una o più aree ristrette, dette microaree, rappresentate mediante una griglia di risoluzione più fitta (Figura 3.5). Analogamente alla macroarea, anche la rappresentazione delle microaree richiede la definizione dell'orografia (Figura 3.6), della lunghezza di rugosità (Figura 3.7) e della copertura del terreno (Figura 3.8).

L'analisi delle microaree utilizza, come campo di vento iniziale, quello simulato sulla macroarea. Nelle microaree è preservata la conservazione della massa.

La Figura 3.9 illustra due campi della velocità media e della direzione del vento forniti da WINDS, rispettivamente, sulla macroarea e sulla microarea del Porto di Genova. Le frecce indicano la direzione del vento e, tramite la loro lunghezza, la sua intensità; i colori corrispondono alla quota del terreno sul livello del mare. Le figure pongono in luce il rafforzamento della velocità media del vento sul mare, a causa della scabrezza ridotta, e sui rilievi, a causa dell'accelerazione del vento sui pendii; mostrano inoltre gli effetti d'incanalamento del vento attraverso le valli.



Figura 3.5: Macroarea e microarea del Porto di Genova.

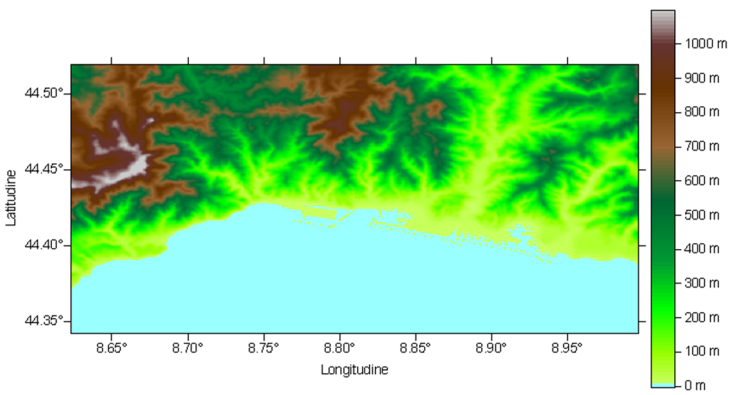


Figura 3.6: Orografia del terreno nella microarea del Porto di Genova.

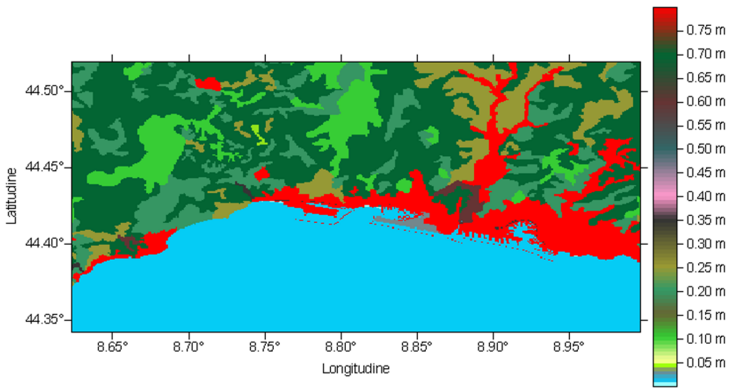


Figura 3.7: Lunghezza di rugosità del terreno nella microarea del Porto di Genova.

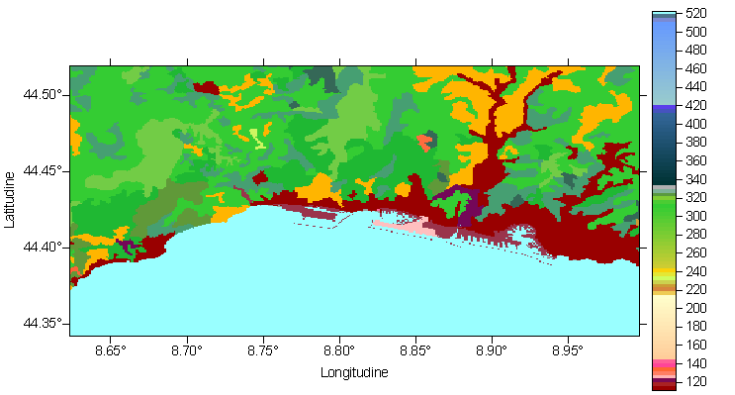
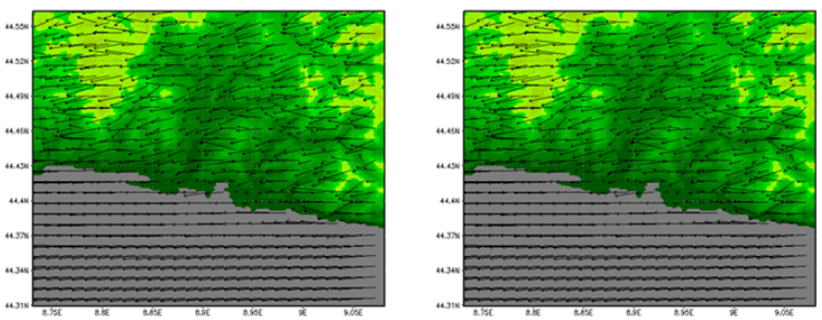


Figura 3.8: Copertura del terreno nella microarea del Porto di Genova.



(a) **(b)**

Figura 3.9: Simulazione della velocità media e della direzione del vento a 10 m di altezza, nella microarea del Porto di Genova; alla sommità dello strato limite atmosferico la direzione del vento è pari a 90°(a) e a 180°(b).

3.1.2 Il codice PWMCT

PWMCT (Parametric Wind Model in Complex Terrain) è un modello numerico diagnostico messo a punto presso il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio (DICAT) dell'Università degli Studi di Genova. Tale modello, impiegato per simulare campi di vento tridimensionali su terreno complesso, applica un procedimento e fornisce risultati sotto molti punti di vista complementari a quelli di WINDS. Le figure riportate nel seguito di questo paragrafo si riferiscono all'area del Porto della Spezia.

La simulazione dei campi di vento avviene in due passi.

Al primo passo il programma determina un campo di vento iniziale su terreno idealmente piatto. Tale passo richiede due tipi d'informazioni: la descrizione delle caratteristiche del territorio che influenzano il vento nello strato limite atmosferico e i dati anemologici di partenza.

La descrizione del territorio richiede a sua volta due tipi di dati: la lunghezza di rugosità e il displacement level. La lunghezza di rugosità è assegnata su macroaree con estensione di circa 50 km nell'intorno del porto esaminato (Figura 3.10). All'interno di ogni macroarea sono nidificate una o più microaree con l'obiettivo di simulare con maggiore dettaglio le zone su cui sono focalizzate le analisi; esse possiedono un'estensione di circa 10 km nell'intorno del sito oggetto di studio (Figura 3.11). Anche in questo caso il displacement level è stato assunto nullo ovunque.

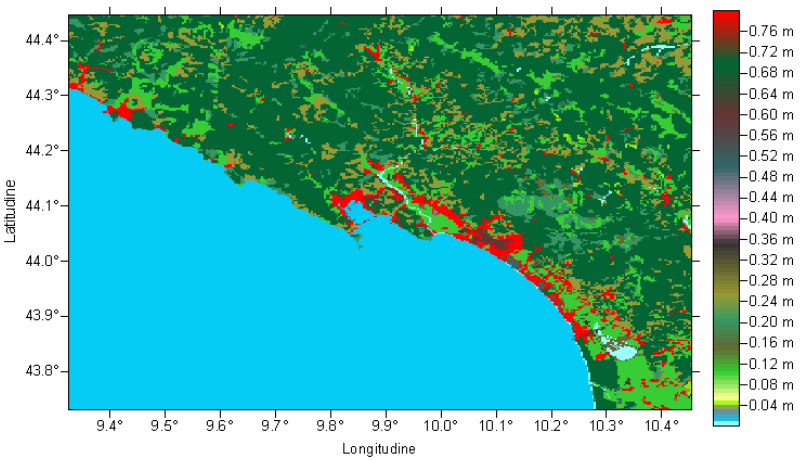


Figura 3.10: Lunghezza di rugosità del terreno nella macroarea del Porto della Spezia.

La descrizione delle proprietà meteorologiche del vento che s'intende simulare è affidata alla sola velocità di riferimento — cioè la velocità media del vento a 10 m di altezza sul suolo, su un terreno piatto e uniforme, con rari ostacoli isolati — e alla sua direzione. La stratificazione termica degli strati bassi dell'atmosfera è assunta neutrale.

Sulla scorta di questi due tipi d'informazioni PWMCT ricostruisce, per ogni punto del dominio computazionale di risoluzione e per una gamma di direzioni del vento, la

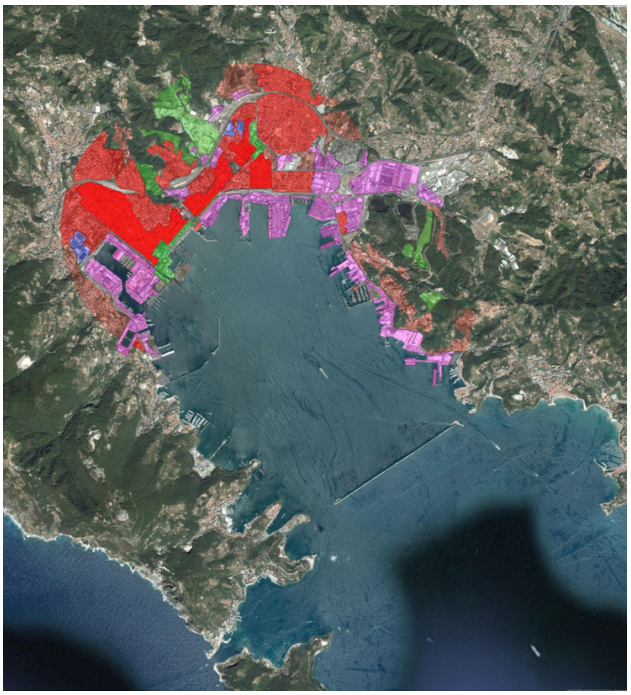


Figura 3.11: Lunghezza di rugosità del terreno nella microarea del Porto della Spezia.

velocità media del vento, le tre componenti dell'intensità della turbolenza e i valori di picco della velocità su un opportuno intervallo di media. L'intensità della turbolenza fornisce una misura del rimescolamento del vento causato dalla scabrezza del suolo; tende quindi ad aumentare in prossimità dal terreno. I modelli impiegati sono basati sui metodi sviluppati da ESDU (1993; 1995), da Solari e Piccardo (2001) e da Solari (1993).

Al secondo passo, il campo di vento iniziale è variato per tenere conto dell'orografia del terreno attraverso il rapporto fra la velocità media del vento sul terreno effettivo e su quello piatto, entrambi simulati considerando la scabrezza effettiva. Tale rapporto è ricavato per mezzo di WINDS che funge pertanto, in questo caso, da pre-processore di PWMCT. L'intensità della turbolenza è valutata assumendo che la deviazione standard delle fluttuazioni del vento sia invariante rispetto a quella simulata su terreno piatto.

Il codice PWMCT possiede numerose proprietà complementari al codice WINDS. Permettendo di simulare al continuo la scabrezza del suolo nell'area d'interesse, il suo uso come post-processore di WINDS ne raffina le stime locali della velocità media del vento. Soprattutto e diversamente da WINDS, come già osservato, PWMCT fornisce una rappresentazione della turbolenza e della velocità di picco del vento.

La Figura 3.12 mostra una simulazione della velocità media del vento su una sezione del promontorio prospiciente La Spezia. La freccia indica la direzione del vento. La scala colorata fornisce i valori del rapporto fra la velocità media del vento effettivo e quella che si avrebbe su un terreno idealmente piatto. Si nota che al piede del

promontorio il vento è frenato dall'ostacolo incipiente mentre accelera alla sommità del rilievo dando luogo, a stretto contatto con il terreno, a un aumento dell'intensità che raggiunge un fattore d'ordine 3.

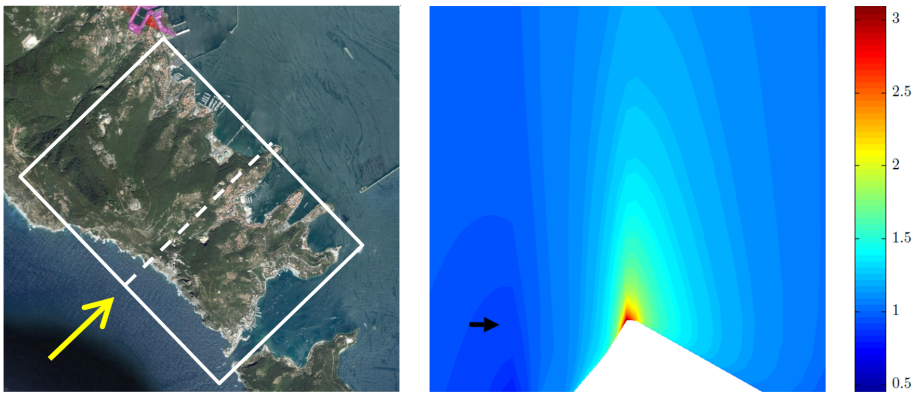


Figura 3.12: Simulazione della velocità media del vento sul promontorio prospiciente La Spezia: (a) direzione del vento e sezione del promontorio; (b) rapporto fra la velocità media del vento effettivo e del vento ideale su terreno piatto.

La Figura 3.13 illustra alcuni campi della componente longitudinale dell'intensità della turbolenza, chiamata nel seguito più semplicemente intensità della turbolenza. Quando il vento proviene da 125°, quindi sostanzialmente da mare, l'intensità della turbolenza tende ad aumentare nella sola zona dello specchio di mare parzialmente schermata dalla linea di costa; quando il vento proviene da 245°, quindi da terra, la turbolenza è molto elevata a ridosso della costa e conserva un'elevata intensità per un'ampia fascia di mare.

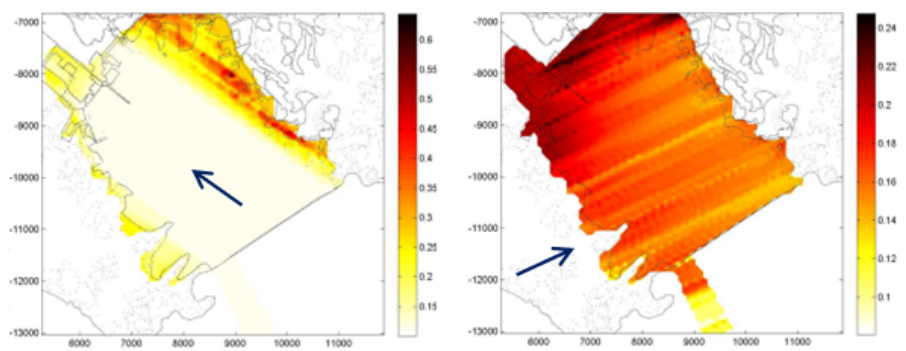


Figura 3.13: Simulazione dell'intensità della turbolenza a 20 m di altezza, nell'area portuale della Spezia; la direzione del vento è pari a 125° (a) e a 245° (b).

3.2 Simulazione e trasferimento della velocità media

La simulazione della velocità media del vento nelle aree portuali avviene in tre fasi. Nella prima fase (Paragrafo 3.2.1), partendo da dati opportuni, sono generati campi della velocità media e della direzione del vento da cui sono estratti i valori associati alle stazioni storiche, al dominio portuale e agli anemometri della rete di monitoraggio locale; sulla scorta di tali estrazioni sono determinati i cosiddetti coefficienti di trasferimento (Paragrafo 3.2.2). Nella seconda fase (Paragrafo 3.2.3), i dati misurati dalle stazioni anemometriche storiche sono trasferiti al dominio portuale per eseguire l'analisi statistica (Capitolo 4). Nella terza fase (Paragrafo 3.2.4), i dati misurati dagli anemometri della rete di monitoraggio locale sono trasferiti al dominio portuale per eseguire le previsioni a breve termine (Capitolo 6).

3.2.1 Simulazione della velocità media

Con l'obiettivo di svolgere l'analisi statistica e la previsione del vento nelle aree portuali, sono stati implementati i modelli numerici di 5 macrodomini, o macroaree, corrispondenti a ciascuna delle 5 aree portuali oggetto di studio (Figura 3.14). Ogni macroarea è contraddistinta da un'estensione tale da includere i principali elementi topografici che possano influenzare la climatologia del vento nell'area portuale e presso le stazioni anemometriche storiche. La risoluzione planimetrica del dominio computazionale è pari a circa 270 m. La risoluzione altimetrica implica 13 livelli, con quote variabili fra 5 e 5000 m, le cui distanze si riducono al crescere della vicinanza con il terreno.

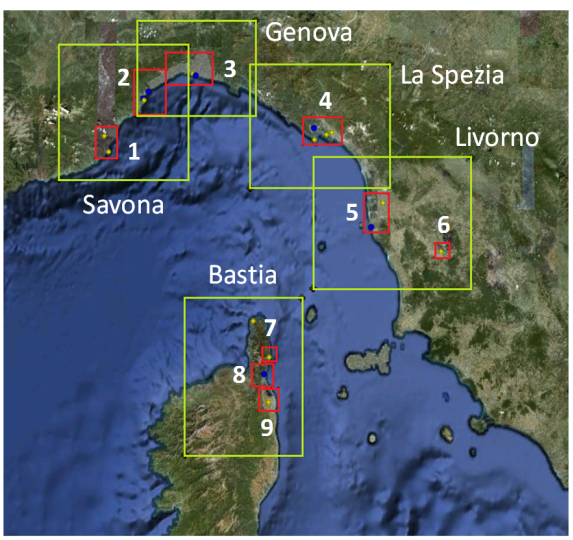


Figura 3.14: Macroaree e microaree su cui è simulata la velocità media del vento con WINDS.

macroarea	ΔX (m)	ΔY (m)	*microarea*	ΔX (m)	ΔY (m)	*stazione anemometrica*	*longitudine* (°N)	*latitudine* (°N)	*quota* (m)	*base* (m)	*palo* (m)	*codice OMM*
Savona	266	278	1 Anemometri	80	80	Capo Mele	8.170062	43.958012	220	6	10	16153
						Albenga/Villanova	8.122809	44.045354	49	10	2	16122
			2 Porti	81	80	Capo Vado	8.448559	44.257228	200	0	20	-
						Capo Vado	8.449440	44.258030	170	0	10	-
Genova	265	278	4 Porto	80	80	Genova/Sestri Ponente	8.843153	44.415208	3	0	10	16120
						Genova/Sestri Ponente	8.822960	44.417548	3	0	10	16120
						Genova/Sestri Ponente	8.851453	44.409190	3	0	10	16120
La Spezia	266	278	4 Porto	80	80	Isola di Palmaria	9.840923	44.041827	192	2	10	16129
						Monte Rocchetta	9.938420	44.071290	360	0	10	-
						Sarzana/Luni	9.982296	44.083857	9	0	10	16125
Livorno	269	278	5 Porto	80	80	Pisa/San Giusto	10.394110	43.681040	1	0	10	16158
			6 Volterra	80	80	Volterra	10.859842	43.402147	524	31	6	16164
Bastia	273	278	-	-	-	Cap Corse	9.359275	43.003642	104	0	10	07785
						Cap Corse	9.358280	43.005388	104	12	6	07785
			7 Cap Sagro	50	50	Cap Sagro	9.488183	42.797863	111	0	6	07791
			8 Aeroporto	50	50	Bastia/Poretta	9.485892	42.541027	10	0	10	07790

Tabella 3.2: Proprietà delle macroaree e delle microaree impiegate per le simulazioni con WINDS.

All'interno di ciascuna macroarea sono state nidificate 9 microaree per simulare con maggiore dettaglio le zone portuali e i siti dove sono ubicate le stazioni anemometriche storiche. Ciascuna microarea è contraddistinta da un'estensione tale da includere i principali elementi topografici che possano influenzare la simulazione del vento nel porto e/o presso le stazioni anemometriche storiche. La risoluzione planimetrica del dominio computazionale è compresa fra circa 50 o 80 m. La risoluzione altimetrica è la stessa adottata per le macroaree. La Tabella 3.2 identifica le corrispondenze tra le macroaree e le microaree specificando, per ogni microarea, la presenza delle stazioni anemometriche storiche; fornisce inoltre le risoluzioni planimetriche proprie di ciascun dominio computazionale.

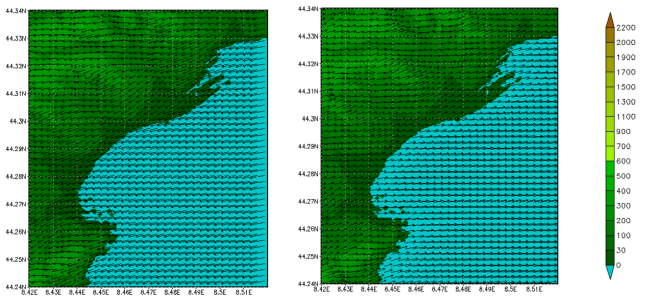
Ogni dominio computazionale è schematizzato mediante tre modelli digitali: il primo riguarda la topografia del terreno acquisita dagli Istituti Geografici competenti, secondo i diversi casi, per l'Italia e per la Francia; il secondo riguarda la copertura del suolo ed è dedotto dai risultati del progetto europeo Corine (Bossard, Feranec e Otahel 2000); il terzo riguarda la maschera terra-mare. I vari tipi di copertura sono trasformati in una mappa digitale delle lunghezze di rugosità per mezzo della matrice di conversione mostrata nella Tabella 3.1. I dettagli delle zone più rilevanti sono controllati e corretti manualmente mediante l'uso d'immagini satellitari.

Per ogni dominio computazionale le simulazioni numeriche della velocità media e della direzione del vento sono eseguite per mezzo del codice WINDS (Paragrafo 3.1.1). Se ritenuto opportuno, l'intorno delle zone più rilevanti è esaminato con maggiore dettaglio nidificando PWMCT (Paragrafo 3.1.2) all'interno di WINDS. Per ogni dominio sono svolte 36 simulazioni, corrispondenti a 36 direzioni di provenienza del vento alla sommità dello strato limite atmosferico ($\alpha_g = 5°, 15°, 25°, \ldots, 355°$ rispetto al nord), attribuendo alla velocità media del vento l'intensità $\bar{U}_g = 30$ m/s. Le analisi sono svolte assumendo la stratificazione termica dell'atmosfera neutrale, com'è tipico dei venti intensi ai quali è rivolto il progetto "Vento e Porti". Le Figure 3.15–3.17 illustrano alcune simulazioni nelle microaree corrispondenti ai Porti di Savona, Livorno e Bastia.

Dalle simulazioni di ciascuna microarea corrispondente a una stazione anemometrica storica è estratta la velocità media e la direzione del vento nel punto ove è posto il sensore. Analogamente, dalle simulazioni di ciascuna microarea corrispondente a un comprensorio portuale, sono estratte le velocità medie e le direzioni del vento nei punti della porzione del dominio computazionale d'interesse per le Autorità Portuali coinvolte nel progetto; inoltre sono estratte le velocità medie e le direzioni del vento nei punti in cui sono ubicati i sensori della rete di monitoraggio portuale. La Figura 3.18 mostra i reticoli planimetrici selezionati per i vari porti; i livelli altimetrici ai quali sono eseguite le estrazioni sono gli stessi impiegati per le macroaree e per le microaree, limitatamente alle altezze non superiori a 150 m.

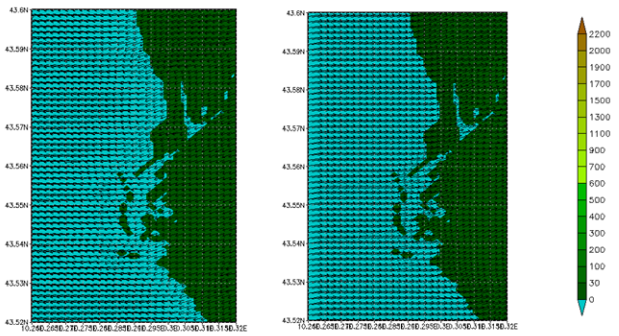
3.2.2 Coefficienti di trasferimento

La conoscenza della velocità media e della direzione del vento nei punti di estrazione di ogni dominio portuale (Paragrafo 3.2.1) permette di ricavare i coefficienti di trasferimento della velocità media del vento, cioè quei parametri adimensionali mediante i quali la velocità media del vento in un punto del dominio può essere simulata



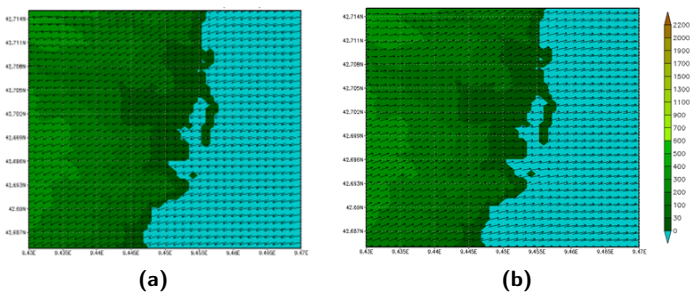
(a) **(b)**

Figura 3.15: Simulazione della velocità media e della direzione del vento a 10 m di altezza, nella microarea dei Porti di Savona e di Vado Ligure; alla sommità dello strato limite atmosferico la direzione del vento è pari a 95° (a) e a 275° (b).



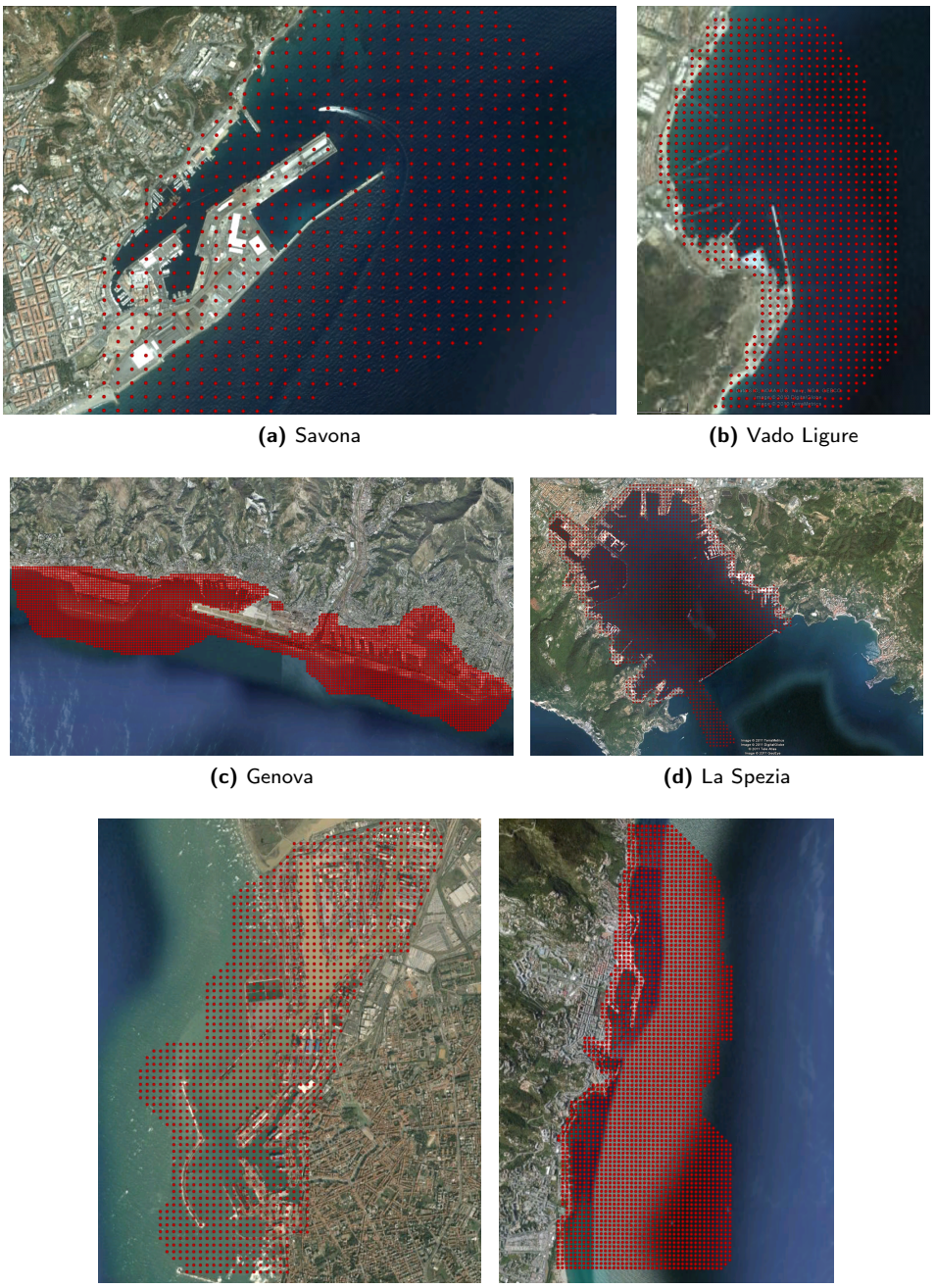
(a) **(b)**

Figura 3.16: Simulazione della velocità media e della direzione del vento a 10 m di altezza, nella microarea del Porto di Livorno; alla sommità dello strato limite atmosferico la direzione del vento è pari a 95° (a) e a 275° (b).



(a) **(b)**

Figura 3.17: Simulazione della velocità media e della direzione del vento a 10 m di altezza, nella microarea del Porto di Bastia; alla sommità dello strato limite atmosferico la direzione del vento è pari a 90° (a) e a 180° (b).



(a) Savona **(b)** Vado Ligure

(c) Genova **(d)** La Spezia

(e) Livorno **(f)** Bastia

Figura 3.18: Reticoli planimetrici del dominio computazionale dei porti di Savona (a), Vado Ligure (b), Genova (c), La Spezia (d), Livorno (e) e Bastia (f).

in funzione della velocità media del vento in un altro punto dello stesso dominio, in particolare presso un anemometro storico o della rete di monitoraggio portuale. Tali parametri sono forniti dalle relazioni (Burlando et al. 2010; Freda e Solari 2010):

$$k^u_{jg}(\alpha_g) = \frac{\bar{u}_j(\alpha_g)}{\bar{u}_g(\alpha_g)} \qquad j = p, s, a \tag{3.1a}$$

$$k^v_{jg}(\alpha_g) = \frac{\bar{v}_j(\alpha_g)}{\bar{v}_g(\alpha_g)} \tag{3.1b}$$

dove $\bar{u}_j$ e $\bar{v}_j$ sono le componenti della velocità media del vento $\bar{\boldsymbol{U}}_j$, rispettivamente secondo gli assi x (diretto verso est) e y (diretto verso nord) (Figura 2.15); il pedice $j = g, p, s, a$ indica il punto cui è riferita la velocità, ovvero alla sommità dello strato limite atmosferico g, nei punti p del dominio portuale ($p = 1, 2, \ldots, P$), presso le stazioni storiche s ($s = 1, 2, \ldots, S$) di pertinenza del dominio considerato e in corrispondenza degli anemometri a della rete di monitoraggio del porto esaminato ($a = 1, 2, \ldots, A$); α_g è la direzione di provenienza del vento alla sommità dello strato limite atmosferico. Sulla scorta di tali definizioni risulta:

$$\bar{U}_j = \sqrt{\bar{u}_j^2 + \bar{v}_j^2} \qquad j = p, s, a \tag{3.2a}$$

$$\alpha_j = 270^\circ - \text{arctg}\left(\frac{\bar{v}_j}{\bar{u}_j}\right) \tag{3.2b}$$

Numerose simulazioni numeriche hanno mostrato, com'era atteso, che i coefficienti di trasferimento definiti dalle Eqq. (3.1) sono sostanzialmente invarianti rispetto a $\bar{U}_g$, purché $\bar{U}_g$ sia sufficientemente elevato. Pertanto, essi possono essere applicati a qualunque valore di velocità d'interesse per il presente progetto.

3.2.3 Trasferimento della velocità media dalle stazioni storiche ai domini portuali

L'analisi statistica del vento, illustrata nel Capitolo 4, si fonda sulle basi dati della velocità media e della direzione del vento registrati dalle stazioni anemometriche storiche. Si prenda in esame una generica stazione s associata a un dominio portuale ($s = 1, 2, \ldots S$). Siano $\bar{u}_s$ e $\bar{v}_s$ le componenti secondo x e y di un valore generico della velocità media del vento registrata dalla stazione s. Sia p un punto generico del dominio portuale ($p = 1, 2, \ldots, P$). Applicando le Eqq. (3.1) è possibile ricostruire, per ogni punto p del dominio, una base dati virtuale ottenuta trasformando nel punto p le registrazioni eseguite dalla stazione storica s. Si ottiene:

$$\bar{u}_p(\alpha_g) = \bar{u}_s(\alpha_g) \cdot \frac{k^u_{pg}(\alpha_g)}{k^u_{sg}(\alpha_g)} = \bar{u}_s(\alpha_g) \cdot k^u_{ps}(\alpha_g) \qquad \begin{matrix} p = 1, 2, \ldots, P \\ s = 1, 2, \ldots, S \end{matrix} \tag{3.3a}$$

$$\bar{v}_p(\alpha_g) = \bar{v}_s(\alpha_g) \cdot \frac{k^v_{pg}(\alpha_g)}{k^v_{sg}(\alpha_g)} = \bar{v}_s(\alpha_g) \cdot k^v_{ps}(\alpha_g) \tag{3.3b}$$

dove:

$$k^u_{ps}(\alpha_g) = \frac{k^u_{pg}(\alpha_g)}{k^u_{sg}(\alpha_g)} \qquad p = 1, 2, \ldots, P \qquad s = 1, 2, \ldots, S \tag{3.4a}$$

$$k^v_{ps}(\alpha_g) = \frac{k^v_{pg}(\alpha_g)}{k^v_{sg}(\alpha_g)} \tag{3.4b}$$

I valori di $\bar{U}_p$ e α_p sono forniti dalle Eqq. (3.2) per $j = p$.

In realtà, in funzione dei casi trattati, la valutazione dei coefficienti di trasferimento può richiedere l'uso di procedimenti non convenzionali di correzione o di affinamento. Il presente progetto se n'è avvalso in almeno due casi.

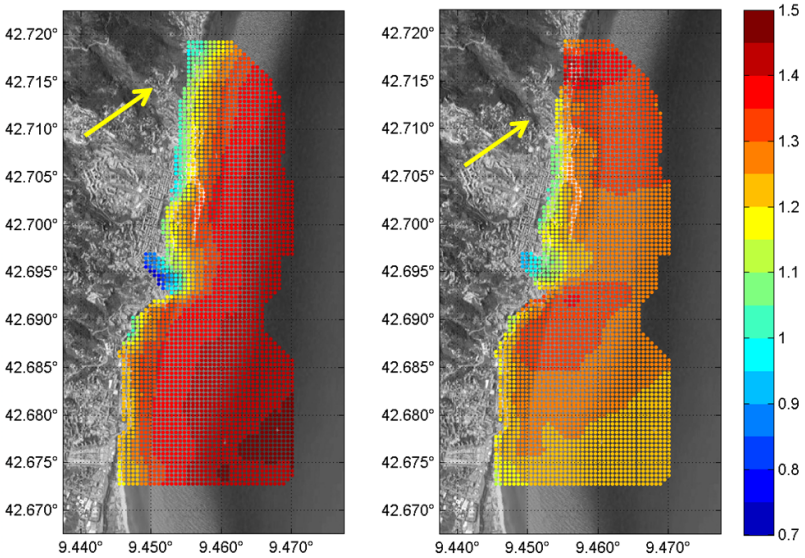
Il primo caso riguarda il riscontro di anomalie nei risultati prodotti. La situazione più tipica si verifica nell'area portuale di Savona, dove il trasferimento delle misure dalle stazioni storiche dell'Aeroporto di Albenga e di Capo Mele (Paragrafo 3.2.1), e le successive elaborazioni statistiche (Capitolo 4), ha dato luogo ad anomalie interpretate come carenze dei modelli numerici nei riguardi di settori di provenienza del vento corrispondenti a condizioni orografiche locali eccessivamente complesse. Di fronte a questo problema si è deciso di non impiegare i dati delle due stazioni sopra citate, affidandosi al trasferimento delle misure dalle stazioni di Capo Vado, meno ricche di dati ma più vicine al comprensorio portuale. Anche in questo caso, tuttavia, la complessità orografica del promontorio di Vado ha prodotto anomalie di trasferimento confermate dall'esame comparativo dei risultati ottenuti con le misure degli anemometri della rete di monitoraggio locale. I coefficienti di trasferimento prodotti dalla simulazione numerica sono stati quindi corretti per mezzo delle misure.

Il secondo caso riguarda le anomalie riscontrate a causa dell'evoluzione temporale delle condizioni relative alle stazioni anemometriche storiche. Le due situazioni più palesi riguardano le stazioni di Genova e di Firenze. Nel corso degli anni, l'anemometro della stazione di Genova/Sestri Ponente è stato ripetutamente spostato. A ridosso della stazione di Firenze/Peretola è stata realizzata un'area industriale che, creando un brusco incremento della scabrezza associata a un ampio settore di provenienza del vento, ha modificato profondamente le registrazioni. In entrambe queste situazioni sono state ricavate più serie di coefficienti di trasferimento, ciascuna corrispondente a periodi di acquisizione omogenei. La base dati simulata è stata quindi dedotta applicando tali coefficienti al periodo corrispondente.

La Figura 3.19 mostra i coefficienti di trasferimento dalla stazione anemometrica storica di Bastia/Poretta, per $\alpha_g = 235°$, ai punti del dominio del Porto di Bastia posti alla quota di 10 m. I rilievi montuosi settentrionali schermano il vento riducendone l'intensità che tende ad aumentare sul mare di fronte al Porto di Bastia.

In termini puramente ideali, partendo dalle misure simultanee dei diversi anemometri delle stazioni storiche corrispondenti allo stesso dominio portuale, la velocità media e la direzione del vento simulate dovrebbero essere le stesse in ogni punto del dominio. Poiché le incertezze in gioco rendono questo irrealistico, è necessario determinare, in ogni punto del dominio, valori univoci della velocità media e della direzione del vento.

Questo risultato è conseguito implementando un procedimento innovativo. Esso consiste nell'esecuzione di una media ponderale dei valori della velocità media e della direzione del vento corrispondente, in ogni punto p del dominio computazionale, ai



(a) k^u_{ps} **(b)** k^v_{ps}

Figura 3.19: Coefficienti di trasferimento k^u_{ps} (a) e k^v_{ps} (b) dall'anemometro della stazione storica di Bastia/Poretta ai punti del dominio del Porto di Bastia alla quota di 10 m, per $\alpha_g = 238°$.

valori misurati presso le diverse stazioni anemometriche storiche s. Si ottiene:

$$\bar{u}_p(\alpha_g) = \frac{\sum_{s=1}^{S} \bar{u}^s_p(\alpha_g) \cdot \gamma^s_p}{\sum_{s=1}^{S} \gamma^s_p} = \frac{\sum_{s=1}^{S} \bar{u}_s(\alpha_g) \cdot k^u_{ps}(\alpha_g) \cdot \gamma^s_p}{\sum_{s=1}^{S} \gamma^s_p} \qquad (3.5a)$$

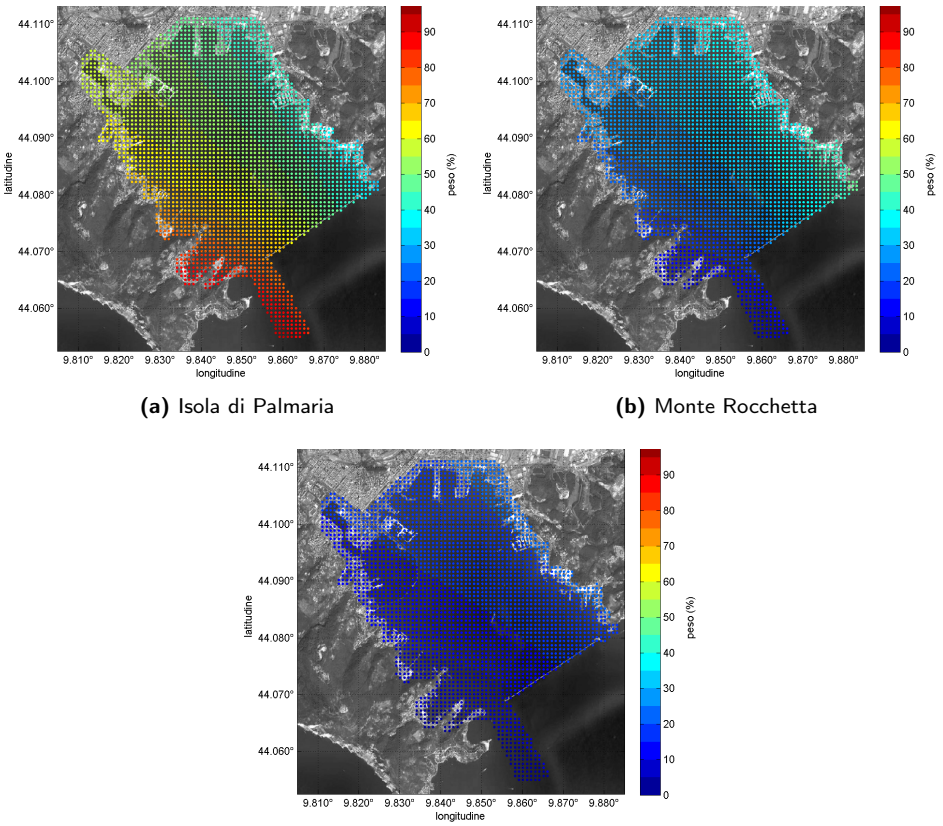
$$p = 1, 2, \ldots, P$$

$$\bar{v}_p(\alpha_g) = \frac{\sum_{s=1}^{S} \bar{v}^s_p(\alpha_g) \cdot \gamma^s_p}{\sum_{s=1}^{S} \gamma^s_p} = \frac{\sum_{s=1}^{S} \bar{v}_s(\alpha_g) \cdot k^v_{ps}(\alpha_g) \cdot \gamma^s_p}{\sum_{s=1}^{S} \gamma^s_p} \qquad (3.5b)$$

dove γ^s_p è un coefficiente ponderale, minore o uguale di 1, che esprime il peso relativo fra i dati associati alle diverse stazioni storiche s ($s = 1, 2, \ldots, S$) rispetto al punto p ($p = 1, 2, \ldots, P$) del dominio. Tale coefficiente dipende dalla distanza della stazione s dal punto p e dalla qualità e quantità delle misure. La definizione dei coefficienti ponderali contiene un margine non trascurabile di discrezionalità.

Il ricorso alle medie ponderali è chiaramente non necessario per il Porto di Genova, dove i coefficienti di trasferimento sono determinati partendo da un'unica stazione storica.

La Figura 3.20 mostra i coefficienti ponderali attribuiti alle stazioni storiche dell'Isola di Palmaria (a), di Monte Rocchetta (b) e di Sarzana/Luni (c) nei riguardi del Porto della Spezia. In virtù della distanza, la stazione di Palmaria ha un peso maggiore per i punti del dominio sul lato ovest del bacino, la stazione di Monte Rocchetta ha un peso maggiore per i punti del dominio sul lato est, la stazione di Sarzana è sempre meno influente. Il numero dei dati disponibili conferisce alla stazione di Monte Rocchetta un peso ulteriormente accentuato; disponendo di misure continue (144 misure giornaliere) essa fornisce complessivamente un numero maggiore di dati.



(a) Isola di Palmaria

(b) Monte Rocchetta

(c) Sarzana/Luni

Figura 3.20: Coefficienti ponderali delle stazioni storiche dell'Isola di Palmaria (a), di Monte Rocchetta (b) e di Sarzana/Luni (c) nei riguardi del Porto della Spezia.

Applicando i procedimenti descritti nel Capitolo 4 è quindi possibile svolgere, per ogni punto del dominio computazionale dell'area portuale considerata, l'analisi statistica della velocità media e della direzione del vento.

L'analisi probabilistica dei valori correnti ed estremi, illustrata nel Capitolo 4, usa i coefficienti ponderali secondo due procedimenti diversi. Per l'analisi dei valori correnti, tali coefficienti sono impiegati per simulare in ogni punto dell'area portuale una base

dati virtuale poi sottoposta ad analisi statistica. Nel caso dei valori estremi, l'analisi statistica è svolta sulle singole basi dati trasferite nei punti dell'area portuale dalle diverse stazioni di pertinenza; le medie ponderali sono poi applicate ai risultati di tali analisi.

3.2.4 Trasferimento della velocità media dalla rete di monitoraggio ai domini portuali

Le previsioni a breve termine, illustrate nel Capitolo 6, si fondano sulle misure della velocità media e della direzione del vento svolte dagli anemometri delle reti di monitoraggio portuali, trasferite al server centrale del DICAT in tempo reale. Si prenda in esame un generico anemometro a dell'area portuale esaminata ($a = 1, 2, \ldots, A$). Siano $\bar{u}_a$ e $\bar{v}_a$ le componenti secondo x e y di un valore generico della velocità media del vento misurata o prevista presso l'anemometro a. Sia p un punto generico del dominio portuale ($p = 1, 2, \ldots, P$). Applicando le Eqq. (3.1) è possibile ricostruire, per ogni punto p del dominio, una base dati virtuale ottenuta trasformando nel punto p le registrazioni eseguite dall'anemometro a delle rete di monitoraggio portuale. Si ottiene:

$$\bar{u}_p(\alpha_g) = \bar{u}_a(\alpha_g) \cdot \frac{k^u_{pg}(\alpha_g)}{k^u_{ag}(\alpha_g)} = \bar{u}_a(\alpha_g) \cdot k^u_{pa}(\alpha_g) \qquad p = 1, 2, \ldots, P \qquad a = 1, 2, \ldots, A \tag{3.6a}$$

$$\bar{v}_p(\alpha_g) = \bar{v}_a(\alpha_g) \cdot \frac{k^v_{pg}(\alpha_g)}{k^v_{ag}(\alpha_g)} = \bar{v}_a(\alpha_g) \cdot k^v_{pa}(\alpha_g) \tag{3.6b}$$

dove:

$$k^u_{pa}(\alpha_g) = \frac{k^u_{pg}(\alpha_g)}{k^u_{ag}(\alpha_g)} \qquad p = 1, 2, \ldots, P \qquad a = 1, 2, \ldots, A \tag{3.7a}$$

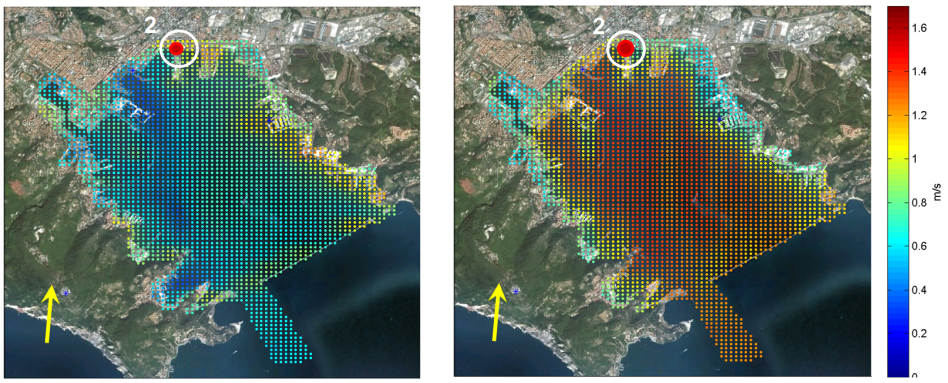
$$k^v_{pa}(\alpha_g) = \frac{k^v_{pg}(\alpha_g)}{k^v_{ag}(\alpha_g)} \tag{3.7b}$$

Anche in questo caso i valori di $\bar{U}_p$ e α_p sono forniti dalle Eqq. (3.2) per $j = p$.

La Figura 3.21 mostra i coefficienti di trasferimento dal sensore 2 della rete di monitoraggio locale del Porto della Spezia, per $\alpha_g = 185°$, ai punti del dominio computazionale alla quota di 10 m. I rilievi orografici sul lato settentrionale schermano la componente u della velocità proveniente da ovest anche sullo specchio di mare di fronte al porto; per contro, la componente v della velocità proveniente da sud, quindi meno schermata, è notevolmente più intensa su tutta la baia.

Analogamente al trasferimento dalle stazioni storiche al dominio computazionale portuale, in termini puramente ideali, partendo dai dati associati a ogni anemometro della rete di monitoraggio locale, la velocità media e la direzione del vento dei valori misurati o previsti dovrebbero essere le stesse in ogni punto del dominio dell'area portuale considerata. Poiché le incertezze in gioco rendono questo irrealistico, è quindi necessario determinare, per ogni punto del dominio analizzato, valori univoci della velocità media e della direzione del vento.

Anche in questo caso tale risultato è conseguito eseguendo una media ponderale dei valori della velocità media e della direzione del vento corrispondente, per ogni



(a) k^u_{pa} **(b)** k^v_{pa}

Figura 3.21: Coefficienti di trasferimento k^u_{pa} (a) e k^v_{pa} (b) dall'anemometro 2 del Porto della Spezia ai punti del dominio computazionale a 10 m di altezza, per $\alpha_g = 185°$.

punto p del dominio, ai valori misurati o previsti partendo dai dati associati a ogni sensore. In particolare si ottiene:

$$\bar{u}_p(\alpha_g) = \frac{\sum_{a=1}^{A} \bar{u}^a_p(\alpha_g) \cdot \gamma^a_p}{\sum_{a=1}^{A} \gamma^a_p} = \frac{\sum_{a=1}^{A} \bar{u}_a(\alpha_g) \cdot k^u_{pa}(\alpha_g) \cdot \gamma^a_p}{\sum_{a=1}^{A} \gamma^a_p} \qquad (3.8a)$$

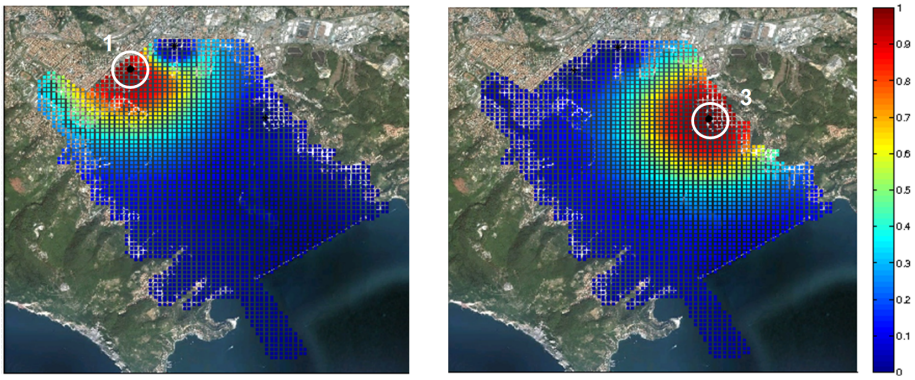
$$p = 1, 2, \ldots, P$$

$$\bar{v}_p(\alpha_g) = \frac{\sum_{a=1}^{A} \bar{v}^a_p(\alpha_g) \cdot \gamma^a_p}{\sum_{a=1}^{A} \gamma^a_p} = \frac{\sum_{a=1}^{A} \bar{v}_a(\alpha_g) \cdot k^v_{pa}(\alpha_g) \cdot \gamma^a_p}{\sum_{a=1}^{A} \gamma^a_p} \qquad (3.8b)$$

dove γ^a_p è un coefficiente ponderale, minore o uguale di 1, che esprime il peso relativo fra i dati associati ai diversi anemometri a ($a = 1, 2, \ldots, A$) rispetto al punto p ($p = 1, 2, \ldots, P$) del dominio. Tale coefficiente dipende da due parametri: la distanza dell'anemometro a dal punto p e la qualità del dato di partenza presso il sensore (Paragrafo 2.2); $\gamma^a_p = 0$ corrisponde al caso in cui l'anemometro non fornisca alcun dato, ad esempio per un momentaneo non funzionamento.

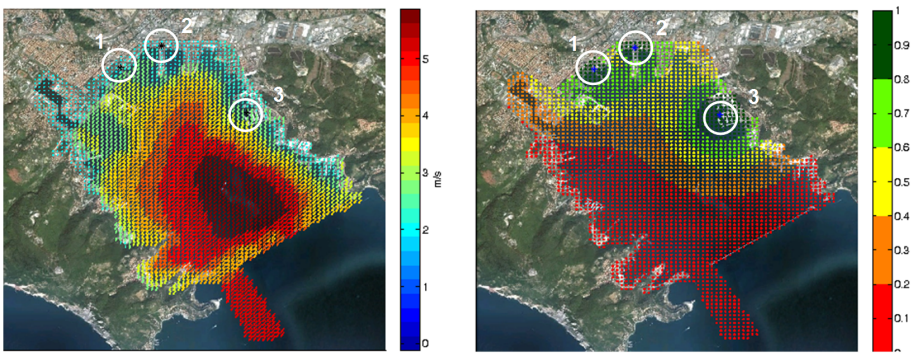
La Figura 3.22 mostra i coefficienti ponderali degli anemometri 1 e 3 della rete di monitoraggio locale del Porto della Spezia, avendo assunto i dati presso tali anemometri di pari affidabilità.

La Figura 3.23 mostra una ricostruzione del campo della velocità media del vento nel Porto della Spezia il 20 marzo 2011, a 10 m di altezza, e un indicatore del livello di affidabilità di tale campo nei punti del dominio. La velocità media del vento è massima al centro della baia, dove è minima la scabrezza; l'affidabilità delle stime è massima in prossimità degli anemometri, dove la velocità è misurata anziché simulata.



(a) Anemometro 1 **(b)** Anemometro 3

Figura 3.22: Coefficienti di ponderali degli anemometri 1 (a) e 3 (b) del Porto della Spezia.



(a) Campo di vento **(b)** Affidabilità

Figura 3.23: Ricostruzione del campo di vento nel Porto della Spezia il 20 marzo 2011, a 10 m di altezza (a) e corrispondente livello di affidabilità del campo simulato (b).

Applicando i procedimenti descritti nel Capitolo 6 è quindi possibile ricostruire, partendo dai dati associati a ogni sensore e per ogni punto del dominio computazionale dell'area portuale considerata, la velocità media e la direzione del vento corrispondenti ai valori misurati o previsti.

3.3 Simulazione e trasferimento della turbolenza e della velocità di picco

Diversamente dall'analisi statistica e dalla previsione a medio termine, la previsione a breve termine (Capitolo 6) è svolta nei riguardi della velocità del vento sia media

sia di picco. L'impiego dei modelli numerici per la ricostruzione della velocità media e della direzione misurata e prevista nel dominio computazionale delle aree portuali è illustrato nel Paragrafo 3.4. Questo paragrafo illustra i procedimenti adottati per simulare l'intensità della turbolenza atmosferica e la velocità di picco del vento, applicando il codice PWFCT come post-processore di WINDS.

3.3.1 Simulazione della turbolenza

Con l'obiettivo di simulare la turbolenza atmosferica, sono stati implementati i modelli numerici di 5 macroaree associate alle 5 aree portuali oggetto dello studio. Ogni macroarea ha un'estensione di circa 50 km nell'intorno dell'area portuale. La lunghezza di rugosità delle macroaree è determinata trasformando il modello digitale della copertura del suolo dedotto dai risultati del progetto europeo Corine (Bossard, Feranec e Otahel 2000) mediante la matrice di conversione riportata nella Tabella 3.1.

All'interno di ciascuna macroarea è nidificata una microarea per simulare con maggiore dettaglio le zone portuali. Ogni microarea ha un'estensione di circa 10 km nell'intorno dell'area portuale. Limitatamente al comprensorio portuale di Savona, sono state implementate due microaree corrispondenti al Porto di Savona e di Vado Ligure. Per conseguire risultati più precisi, la lunghezza di rugosità delle microaree è determinata mediante immagini satellitari e corrette manualmente. Gli effetti della topografia del terreno sono apprezzati come descritto nel Paragrafo 3.2.

Per ciascun dominio computazionale sono svolte simulazioni numeriche della velocità media del vento e della turbolenza atmosferica, attribuendo alla velocità media di riferimento un'intensità alla sommità dello strato limite atmosferico, e 36 direzioni di provenienza ($\alpha_r = 5°, 15°, 25°, \ldots, 355°$ rispetto al nord). Anche in questo caso le analisi sono svolte assumendo la stratificazione termica dell'atmosfera neutrale, com'è tipico dei venti intensi.

Dalle simulazioni di ciascuna microarea, e per ogni direzione α_r di provenienza del vento, sono estratte le intensità I della turbolenza corrispondenti alle porzioni del dominio d'interesse per le Autorità Portuali; inoltre, sono estratti i valori I nei punti in cui sono ubicati i sensori della rete di monitoraggio.

3.3.2 Trasferimento dell'intesità di turbolenza dalla rete di monitoraggio ai domini portuali

Una volta determinata l'intensità della turbolenza nei punti di estrazione, da tali valori sono dedotti, per ogni direzione α_r di provenienza del vento, nuovi coefficienti di trasferimento definiti dalla relazione:

$$\lambda_{pa}(\alpha_r) = \frac{I_p(\alpha_r)}{I_a(\alpha_r)} \qquad \begin{matrix} p = 1, 2, \ldots, P \\ a = 1, 2, \ldots, A \end{matrix} \tag{3.9}$$

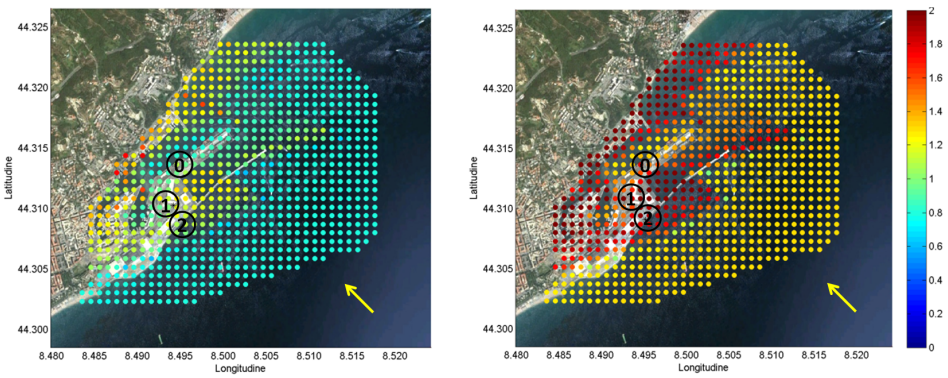
dove I_p e I_a sono i valori simulati dell'intensità della turbolenza corrispondenti, rispettivamente, al punto p del dominio portuale ($p = 1, 2, \ldots, P$) e all'anemometro a della rete locale di monitoraggio ($a = 1, 2, \ldots, A$).

Anche in questo caso tutte le analisi sono ripetute per diversi valori della velocità del vento di riferimento $\bar{U}_r$. Tali analisi dimostrano, com'era atteso, che i coefficienti

di trasferimento definiti dall'Eq. (3.9) sono sostanzialmente invarianti rispetto a $\bar{U}_r$, quindi possono essere applicati a qualunque valore della velocità, purché sufficientemente elevata. In questo modo si ottiene l'intensità della turbolenza in tutti i punti p del dominio computazionale, in funzione dell'intensità della turbolenza misurata o prevista presso il sensore a della rete di monitoraggio locale:

$$I_p(\alpha_g) = I_a(\alpha_g) \cdot \lambda_{pa}(\alpha_g) \qquad \begin{matrix} p = 1, 2, \ldots, P \\ a = 1, 2, \ldots, A \end{matrix} \tag{3.10}$$

La Figura 3.24 mostra i coefficienti di trasferimento dell'intensità di turbolenza dagli anemometri 1 e 2 della rete di monitoraggio del Porto di Savona, al dominio computazionale, alla quota di 10 m, con vento proveniente da 135°. Poiché l'anemometro 2 è esposto direttamente al vento da mare, esso misura un livello di turbolenza minore dell'anemometro 1 più interno al porto; quindi causa un coefficiente di trasferimento maggiore.



(a) Anemometro 1 **(b)** Anemometro 2

Figura 3.24: Coefficienti di trasferimento dell'intensità di turbolenza dagli anemometri 1 (a) e 2 (b) della rete di monitoraggio al Porto di Savona, a quota 10 m, con vento proveniente da 135°.

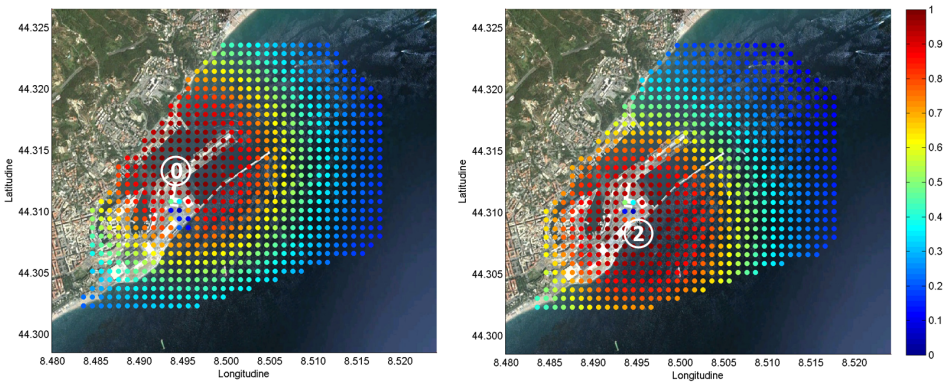
Analogamente a quanto osservato in precedenza, partendo dai dati associati a ogni anemometro, l'intensità della turbolenza misurata o prevista dovrebbe essere la stessa per ogni punto del dominio computazionale dell'area portuale considerata. Poiché le incertezze in gioco rendono questo irrealistico, è necessario determinare, per ogni punto del dominio analizzato, valori univoci dell'intensità della turbolenza. Questo risultato è conseguito, come nei Paragrafi 3.2.3 e 3.2.4, eseguendo una media ponderale dei valori I, in ogni punto p del dominio computazionale, partendo dai dati associati a

ogni anemometro. Si ottiene:

$$I_p(\alpha_g) = \frac{\sum_{a=1}^{A} I_p^a(\alpha_g) \cdot \eta_p^a}{\sum_{a=1}^{A} \eta_p^a} = \frac{\sum_{a=1}^{A} I_a(\alpha_g) \cdot \lambda_{pa}(\alpha_g) \cdot \eta_p^a}{\sum_{a=1}^{A} \eta_p^a} \qquad p = 1, 2, \ldots, P \quad (3.11)$$

dove η_p^a è un coefficiente ponderale, minore o uguale di 1, che esprime il peso relativo dei dati associati ai diversi anemometri a ($a = 1, 2, \ldots, A$) rispetto al punto p ($p = 1, 2, \ldots, P$) del dominio. Tale coefficiente dipende da due parametri: la distanza dell'anemometro a dal punto p e la qualità del dato di partenza presso l'anemometro (Paragrafo 2.2).

La Figura 3.25 mostra i coefficienti ponderali attribuiti ai sensori 0 e 2 della rete di monitoraggio locale del Porto di Savona, avendo assunto i dati presso i due anemometri di pari affidabilità. La vicinanza fra gli anemometri rende tali coefficienti molto simili fra loro.



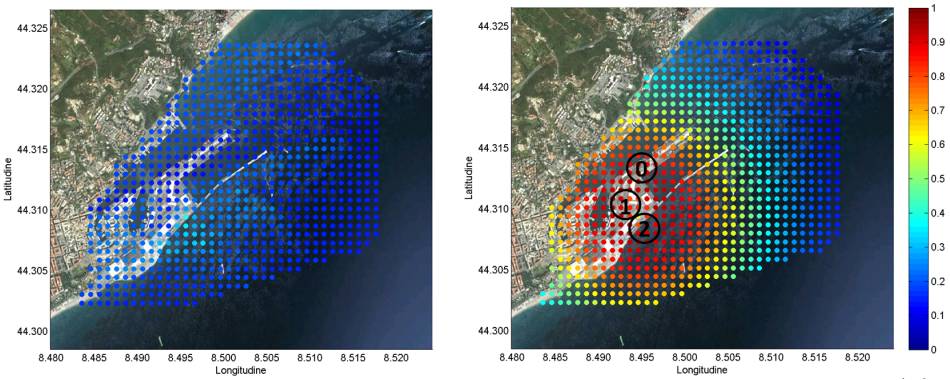
(a) Anemometro 0 **(b)** Anemometro 2

Figura 3.25: Coefficienti ponderali dell'intensità di turbolenza degli anemometri 0 (a) e 2 (b) della rete di monitoraggio al Porto di Savona, a quota 10 m, con vento proveniente da 135°.

La Figura 3.26 mostra la ricostruzione del campo dell'intensità della turbolenza nel Porto di Savona a 10 m di quota e un indicatore di affidabilità di tale campo nei singoli punti. Entrambe queste grandezze sono valutate in corrispondenza delle misure svolte il 2 febbraio 2011, alle ore 8, dai 6 anemometri del comprensorio portuale di Savona e di Vado Ligure. L'intensità della turbolenza si affievolisce sul mare mentre l'affidabilità cresce nell'intorno dei 3 anemometri.

3.3.3 Velocità di picco

Nota la velocità media misurata o prevista (Paragrafo 3.2.4) e l'intensità della turbolenza (Paragrafo 3.3.2) in ogni punto p del dominio computazionale, la velocità



(a) Intensità di turbolenza **(b)** Affidabilità

Figura 3.26: (a) Ricostruzione del campo dell'intensità della turbolenza nel Porto di Savona, a 10 m di quota, il 2 febbraio 2011 alle ore 8; (b) indicatore di affidabilità di tale campo nei singoli punti.

di picco del vento è fornita dalla relazione:

$$\hat{v}_p(\alpha_p) = \bar{v}_p(\alpha_p) \cdot [1 + g_p(\alpha_p) \cdot I_p(\alpha_p)] \qquad p = 1, 2, \ldots, P \tag{3.12}$$

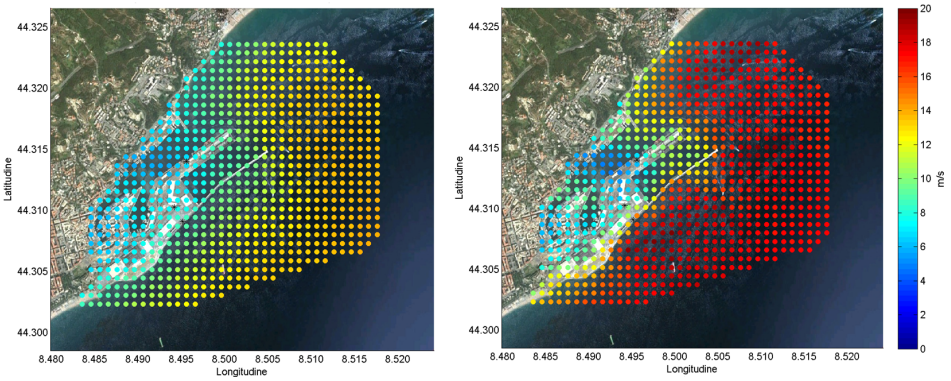
dove α_p è la direzione del vento nel punto p; g_p è il coefficiente di picco della velocità del vento (Solari 1993), espresso in funzione della velocità media del vento e della durata del picco τ; tale grandezza è assunta pari a 3 s.

La Figura 3.27 mostra i risultati di una previsione a breve termine (Capitolo 6) della velocità media e di picco del vento nel Porto di Savona, a 10 m di altezza, il 28 febbraio 2011. I valori della velocità di picco sono indicativamente 1.5 volte i valori medi. L'incremento è maggiore all'interno del porto piuttosto che sullo specchio d'acqua prospiciente, a causa della maggiore scabrezza che induce un livello più alto di turbolenza.

3.4 Validazione dei risultati

Il trasferimento delle misure della velocità del vento da un punto a un altro di una medesima macroarea portuale, eseguito nei Paragrafi 3.2 e 3.3 mediante l'introduzione di opportuni coefficienti di trasformazione, è un punto essenziale dei procedimenti sviluppati per attuare il presente progetto. E' quindi molto importante verificare il grado di affidabilità della tecnica di trasferimento adottata.

Nel progetto "Vento e Porti" tale tecnica è applicata per trasferire le misure del vento dalle stazioni storiche s, o dagli anemometri a della rete di monitoraggio locale, a un generico punto p dell'area portuale. In questa fase, però, è impossibile esprimere un giudizio sull'affidabilità del trasferimento eseguito. Tale affidabilità può essere valutata per contro trasferendo le misure del vento in altri punti, della stessa macroarea, dove siano disponibili misure contemporanee a quelle di partenza. Ciò è possibile tanto



(a) Velocità media **(b)** Velocità di picco

Figura 3.27: Velocità media (a) e di picco (b) previste nel Porto di Savona, a 10 m di altezza, il 28 febbraio 2011, con 30 minuti di anticipo.

eseguendo un trasferimento di dati fra coppie di stazioni storiche (Paragrafo 3.4.1), quanto fra coppie di sensori della stessa rete di monitoraggio (Paragrafo 3.4.2).

3.4.1 Trasferimento fra coppie di stazioni storiche

A titolo d'esempio, si prendano in esame le stazioni storiche di Palmaria e Sarzana nella macroarea della Spezia (Figura 3.28). Esse distano tra loro circa 12 km.

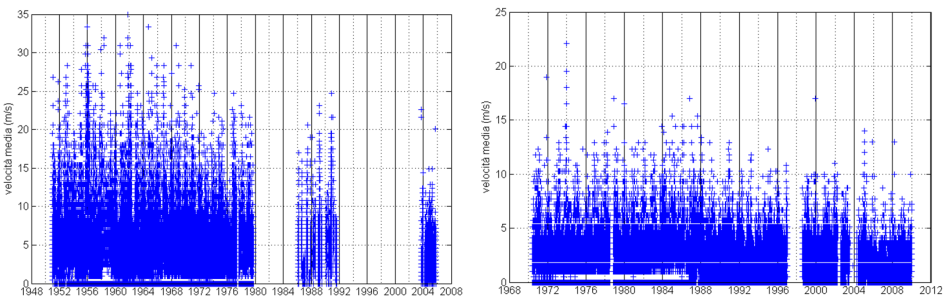
La Figura 3.29 mostra le velocità media del vento misurate dalle due stazioni nel corso degli anni. La Figura 3.30 pone a confronto i dati misurati simultaneamente dalle due stazioni, nel periodo compreso fra il 1970 e il 2010. E' immediato notare che l'intensità del vento registrato a Palmaria, in posizione più esposta, è maggiore di quella misurata a Sarzana, in una conca più protetta.

Gli schemi (a) e (b) nella Figura 3.31 corrispondono, rispettivamente, a misure della velocità media e della direzione del vento. Le ascisse e le ordinate riportano le misure svolte, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria. Le linee colorate rappresentano le frequenze congiunte delle misure eseguite nelle due stazioni; la scala cromatica indica la frequenza degli accadimenti, vale a dire il numero di volte in cui si attua una coppia di valori simultanei nelle due stazioni. Le forme piene corrispondono alle frequenze congiunte simulate da WINDS. Le linee tratteggiate indicano le bisettrici dei diagrammi. Se le due stazioni misurassero sempre, simultaneamente, la stessa velocità media e la stessa direzione del vento, tutte le coppie di misure si collocherebbero sulle bisettrici. Non solo ciò non accade, ma la dispersione delle misure è molto grande e spesso incoerente con le simulazioni.

Peraltro si noti che i due diagrammi nella Figura 3.31 comprendono tutte le misure eseguite presso le due stazioni, quindi anche i dati associati alle velocità dei venti meno intensi. Tali venti hanno caratteristiche prevalentemente locali e sono quindi non correlati. Conseguentemente è necessario escluderli dalle analisi, imponendo una soglia inferiore alle velocità. Le Figura 3.32, 3.33 e 3.34 ripetono il confronto illustrato



Figura 3.28: Posizione geografica delle stazioni storiche di Palmaria e Sarzana rispetto al Porto della Spezia.



(a) Isola di Palmaria **(b)** Sarzana/Luni

Figura 3.29: Velocità media del vento misurato dalle stazioni storiche di Palmaria (a) e Sarzana (b).

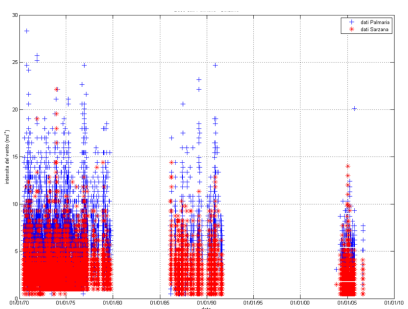
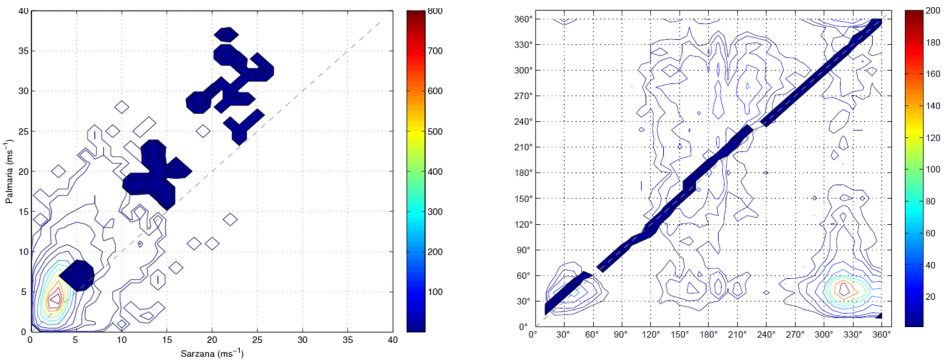


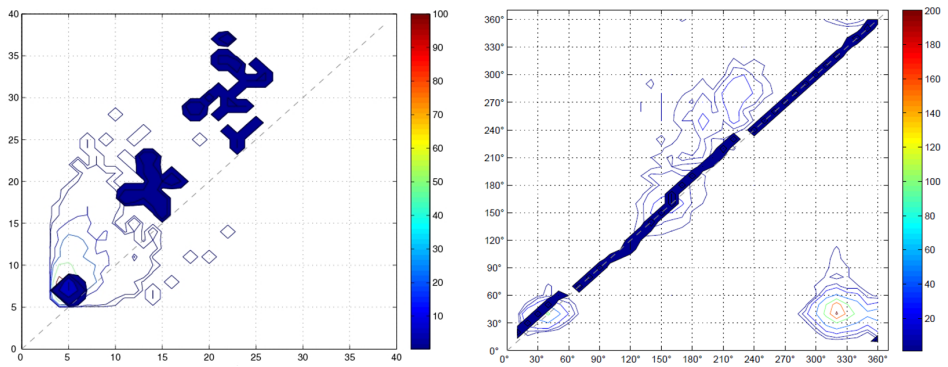
Figura 3.30: Velocità media del vento misurato simultaneamente dalle stazioni storiche di Palmaria e Sarzana.

nella Figura 3.31, escludendo le misure delle velocità medie del vento minori di 3 e 5, di 5 e 7, e di 7 e 9 m/s, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria. Si osservi che, escludendo velocità medie del vento progressivamente maggiori, la dispersione delle misure diminuisce mentre migliora l'accordo con le simulazioni eseguite tramite WINDS. Ciò testimonia una buona affidabilità dei procedimenti applicati nei riguardi dei venti intensi oggetto del presente progetto.



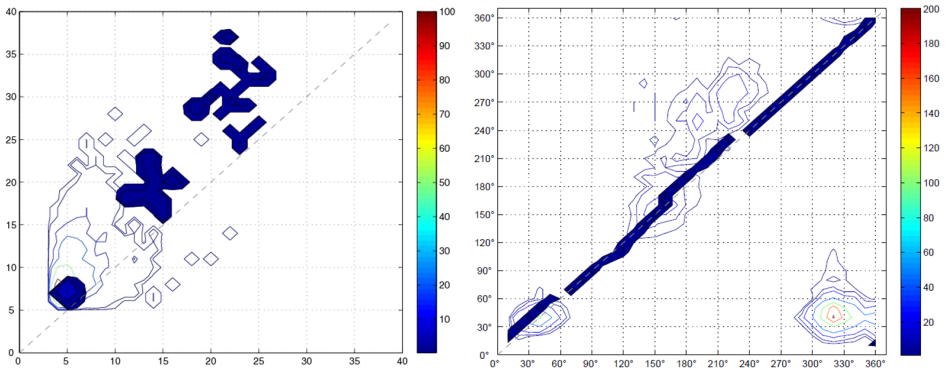
(a) Velocità media **(b)** Direzione

Figura 3.31: Misure simultanee della velocità media (a) e della direzione (b) del vento eseguite a Sarzana (in ascissa) e a Palmaria (in ordinata). Le linee colorate indicano le frequenze congiunte delle misure; le forme piene corrispondono alle frequenze congiunte simulate da WINDS.



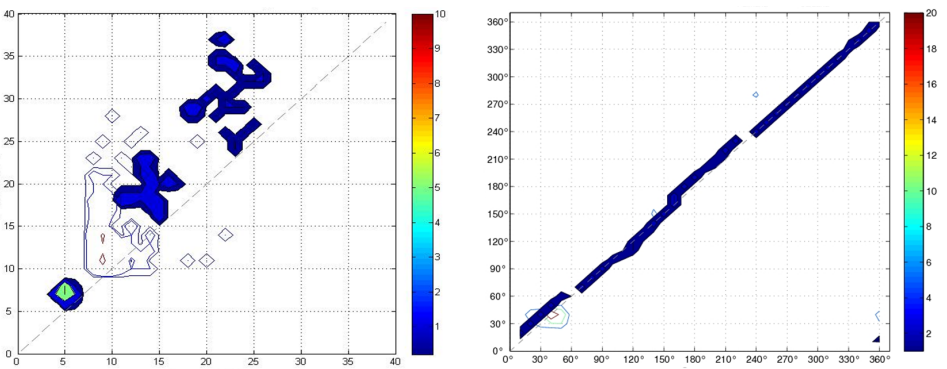
(a) Velocità media **(b)** Direzione

Figura 3.32: Misure simultanee della velocità media (a) e della direzione (b) del vento eseguite a Sarzana (in ascissa) e a Palmaria (in ordinata), escludendo le misure, rispettivamente, delle velocità medie del vento minori di 3 e 5 m/s. Le linee colorate indicano le frequenze congiunte delle misure; le forme piene corrispondono alle frequenze congiunte simulate da WINDS.



(a) Velocità media **(b)** Direzione

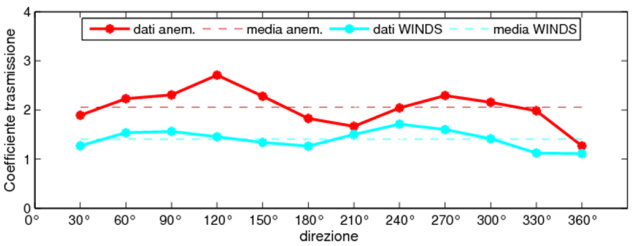
Figura 3.33: Misure simultanee della velocità media (a) e della direzione (b) del vento eseguite a Sarzana (in ascissa) e a Palmaria (in ordinata), escludendo le misure, rispettivamente, delle velocità medie del vento minori di 5 e 7 m/s. Le linee colorate indicano le frequenze congiunte delle misure; le forme piene corrispondono alle frequenze congiunte simulate da WINDS.



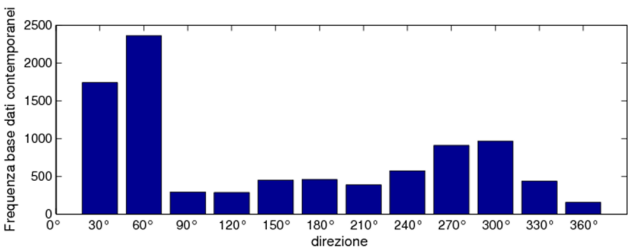
(a) Velocità media **(b)** Direzione

Figura 3.34: Misure simultanee della velocità media (a) e della direzione (b) del vento eseguite a Sarzana (in ascissa) e a Palmaria (in ordinata), escludendo le misure, rispettivamente, delle velocità medie del vento minori di 7 e 9 m/s. Le linee colorate indicano le frequenze congiunte delle misure; le forme piene corrispondono alle frequenze congiunte simulate da WINDS.

Va peraltro notato che un confronto più accurato richiede uno studio direzionale del vento. I risultati di tali analisi sono illustrati nelle Figure 3.35–3.38. Analogamente alle precedenti figure, la Figura 3.35 riporta l'intera base dati; le Figure 3.36, 3.37 e 3.38 escludono le misure delle velocità medie del vento minori di 3 e 5 m/s, di 5 e 7 m/s e di 7 e 9 m/s, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria. In ciascuna figura

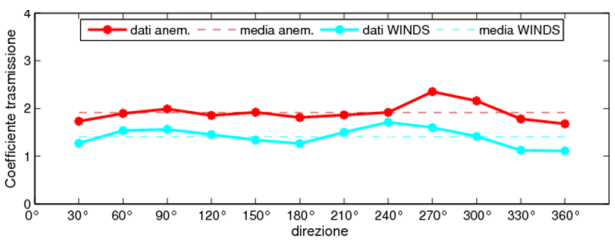


(a)

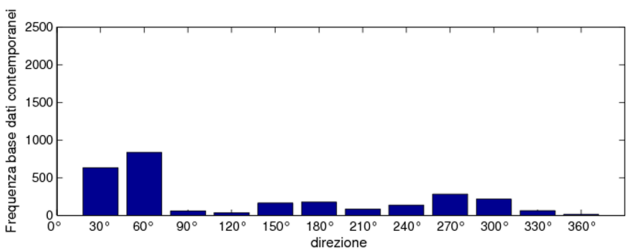


(b)

Figura 3.35: (a) Confronto fra i coefficienti di trasferimento ricavati dalle misure e simulati da WINDS; (b) istogramma della frequenza direzionale del coefficiente di trasferimento calcolato partendo dai dati misurati.

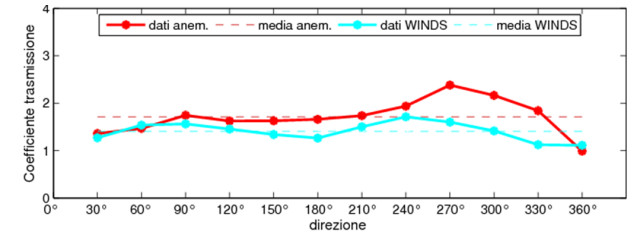


(a)

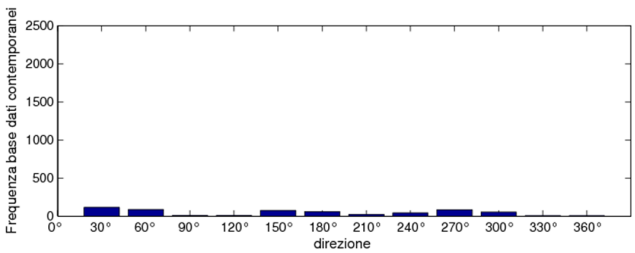


(b)

Figura 3.36: Confronto fra i coefficienti di trasferimento ricavati dalle misure e simulati da WINDS; (b) istogramma della frequenza direzionale del coefficiente di trasferimento calcolato partendo dai dati misurati. Sono escluse le misure delle velocità medie del vento minori di 3 e 5 m/s, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria.

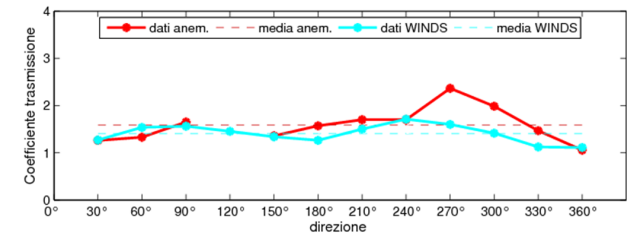


(a)

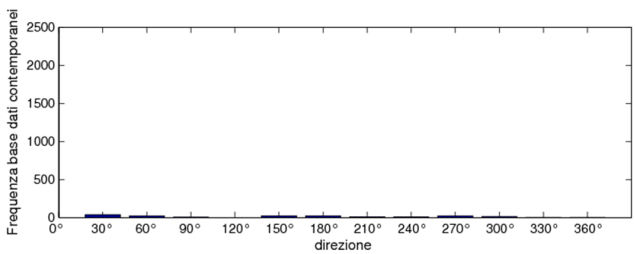


(b)

Figura 3.37: (a) Confronto fra i coefficienti di trasferimento ricavati dalle misure e simulati da WINDS; (b) istogramma della frequenza direzionale del coefficiente di trasferimento calcolato partendo dai dati misurati. Sono escluse le misure delle velocità medie del vento minori di 5 e 7 m/s, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria.



(a)



(b)

Figura 3.38: (a) Confronto fra i coefficienti di trasferimento ricavati dalle misure e simulati da WINDS; (b) istogramma della frequenza direzionale del coefficiente di trasferimento calcolato partendo dai dati misurati. Sono escluse le misure delle velocità medie del vento minori di 7 e 9 m/s, rispettivamente, a Sarzana e a Palmaria.

lo schema (a) pone a confronto i coefficienti di trasferimento ricavati dalle misure con quelli simulati da WINDS; lo schema (b) fornisce l'istogramma della frequenza direzionale del coefficiente di trasferimento calcolato partendo dai dati misurati; in entrambi i casi l'ascissa riporta la direzione di provenienza del vento.

Come già evidenziato nello studio adirezionale, il confronto è tanto migliore quanto più le analisi riguardano i valori elevati della velocità. E' peraltro necessario porre in rilievo che, quanto più è alta la velocità del vento, tanto minori sono i dati disponibili per il confronto.

3.4.2 Trasferimento fra coppie di anemometri della rete di monitoraggio portuale

Analogamente al confronto precedente, a titolo di esempio, si prendano in esame le misure eseguite dagli anemometri della rete di monitoraggio locale del Porto di Livorno (Figura 3.39).



Figura 3.39: Posizione degli anemometri della rete di monitoraggio locale del Porto di Livorno.

La Figura 3.40(a) riporta in ascissa la velocità media del vento misurata dall'anemometro 5; per ogni valore misurato, l'ordinata riporta il valore medio trasferito dalla misura simultanea dell'anemometro 2 all'anemometro 5. Usando lo stesso principio, la Figura 3.40(b) riporta in ascissa la velocità media del vento misurato dall'anemometro 3 nello stesso periodo; per ogni valore misurato l'ordinata riporta il valore medio trasferito dalla misura simultanea dell'anemometro 1 all'anemometro 3. Se tutte le coppie dei valori misurati e trasferiti fossero sulle bisettrici, WINDS opererebbe in modo esatto. Per quanto ciò non accada, tali coppie sono distribuite in un intorno ristretto della diagonale, ponendo in luce l'elevata affidabilità del trasferimento. Ciò è in larga parte dovuto alla vicinanza degli anemometri (diversamente dal caso del confronto fra le stazioni storiche). Si noti inoltre che le misure eseguite dalle reti di monitoraggio locale sono tuttora assai limitate, quindi povere dei valori intensi della

velocità media del vento, per il quale si attende un incremento di precisione. Se ne deduce che la qualità effettiva del trasferimento possa essere ancora maggiore di quella evidenziata nella Figura 3.40.

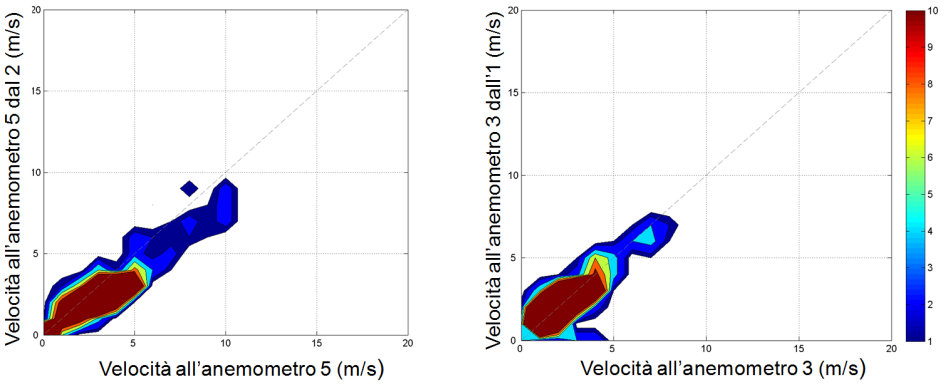
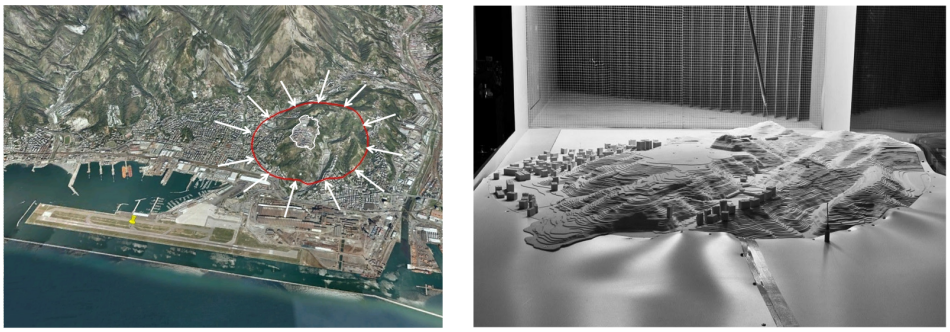


Figura 3.40: (a) Confronto fra la velocità media del vento misurato dall'anemometro 5 e trasferito allo stesso anemometro dall'anemometro 2; (b) confronto fra la velocità media del vento misurato dall'anemometro 3 e trasferito allo stesso anemometro dall'anemometro 1.

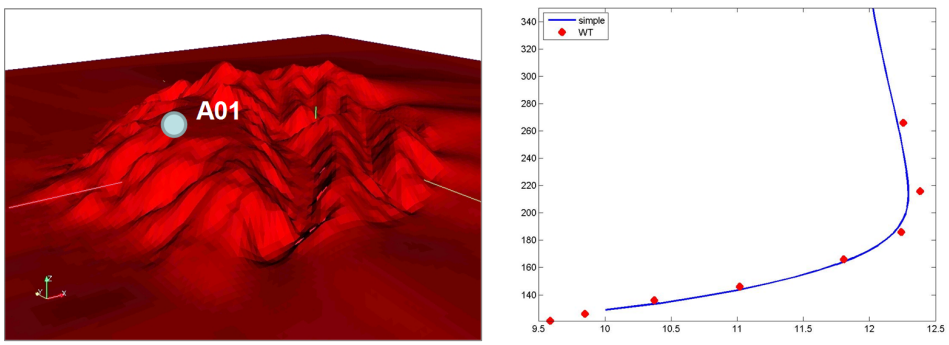
3.5 Prospettive e potenzialità di sviluppo

I codici numerici impiegati per trasferire i dati del vento dalle stazioni storiche o della rete di monitoraggio al dominio computazionale delle aree portuali, descritti nel presente capitolo, appartengono alla classe dei modelli a conservazione di massa (WINDS) e parametrici (PWMCT). Questa scelta deriva dalla relativa semplicità d'uso di tali modelli e dalla conseguente possibilità di farne un uso sistematico e ripetuto. L'evoluzione delle conoscenze e delle tecnologie rende oggi sempre più operativi strumenti che in passato erano incomparabili, con i modelli usati, in termini di prestazioni, costi, ripetibilità e affidabilità. Fra questi spiccano le prove in galleria del vento, basate su modelli fisici in scala ridotta, e i codici CFD (Computational Fluid Dynamics) che simulano i campi di vento risolvendo le equazioni non lineari di Navier Stokes. A titolo di esempio la Figura 3.41 mostra un modello in galleria del vento della Collina di Erzelli prospiciente al Porto di Genova (Carassale et al. 2011). La Figura 3.42 pone a confronto i risultati di simulazioni numeriche svolte mediante il codice CFD OPENFOAM con quelli forniti da prove su un modello topografico in scala 1:1000, eseguite presso la galleria del vento della Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova; l'accordo è molto buono e incoraggiante per applicazioni di elevato dettaglio e affidabilità. In entrambi i casi il codice WINDS è usato per imporre le condizioni del vento al contorno dei due modelli locali sopra descritti (Figura 3.43).



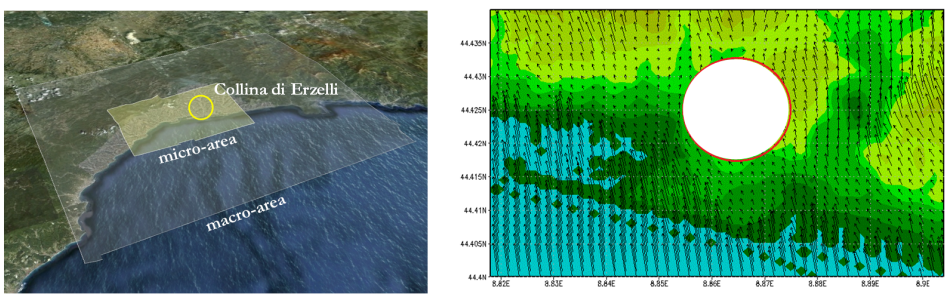
(a) **(b)**

Figura 3.41: Collina di Erzelli prospiciente il Porto di Genova (a) e sua modellazione in galleria del vento (b).



(a) **(b)**

Figura 3.42: (a) modellazione della Collina di Erzelli; (b) confronto fra i profili della velocità media del vento simulata con OPENFOAM e misurati in galleria del vento.



(a) **(b)**

Figura 3.43: (a) Macroarea e microarea del comprensorio del Porto di Genova; (b) simulazione della velocità media del vento con WINDS e condizioni al contorno per i modelli locali della Collina di Erzelli.

Il secondo aspetto degno di nota e con rilevanti potenzialità di sviluppo riguarda la propagazione delle incertezze e degli errori di modello. I modelli utilizzati per il presente progetto, così come quelli avanzati sopra citati, per quanto possano essere precisi, comportano varie fonti di incertezze legate alla consistenza dei modelli, alla scelta dei parametri e all'intrinseca complessità dei problemi. Di tale aspetto è possibile tenere conto per mezzo di metodi analitici e di simulazioni numeriche che rappresentino tanto le incertezze dei parametri quanto gli errori di modello mediante distribuzioni di probabilità che, propagandosi attraverso la catena modellistica, giungano a esprimerne i risultati in forma probabilistica anziché deterministica. Ciò riconduce il problema alla sua corretta natura e favorisce un utilizzo più robusto dell'analisi probabilistica descritta nel Capitolo 4.

In particolare, il confronto sistematico fra i risultati dei modelli numerici o fisici e le misure svolte dagli anemometri della rete di monitoraggio portuale fornisce gli strumenti per implementare distribuzioni di probabilità degli errori e delle incertezze alla frontiera dello stato dell'arte. Sotto questo punto di vista, le considerazioni svolte in questo capitolo nei riguardi della precisione delle trasformazioni in funzione della distanza dagli strumenti, dell'intensità del vento, dell'affidabilità dei dati e delle condizioni atmosferiche potrebbero essere inquadrate in un modello matematico in grado di fare compiere a tali analisi un salto di qualità tanto tecnico quanto scientifico.

4 Mappe statistiche del vento

La realizzazione delle mappe statistiche ha un ruolo essenziale per la conoscenza generale della climatologia del vento nelle aree portuali e per la pianificazione di lungo termine delle loro attività.

I dati misurati dalle stazioni anemometriche installate nei porti saranno statisticamente significative solo dopo alcuni anni di acquisizioni. Pertanto, al fine di ottenere informazioni sulla climatologia del vento delle aree portuali, è stato selezionato un insieme di stazioni anemometriche preesistenti, prossime alle aree di ciascun porto e caratterizzate da lunghe serie storiche.

Le serie storiche della velocità media e della direzione del vento sono state inizialmente corrette e sottoposte ad analisi statistica, allo scopo di determinare le distribuzioni dei valori correnti ed estremi della velocità nei siti anemometrici (Paragrafo 4.1). In seguito, utilizzando le tecniche di simulazione numerica descritte nel Capitolo 3, le serie storiche effettive sono trasformate in serie storiche virtuali in tutti i punti dei domini computazionali che caratterizzano le aree dei porti coinvolti nel progetto. Le serie storiche virtuali sono infine sottoposte a nuove analisi dalle quali sono ricavate le mappe statistiche nei domini spaziali di ogni porto (Paragrafo 4.2). Il Paragrafo 4.3 discute alcune prospettive e potenzialità di sviluppo.

4.1 Analisi statistica presso le stazioni anemometriche storiche

L'analisi statistica del vento presso le stazioni anemometriche storiche è propedeutica all'analisi statistica del vento bei porti. Questa fase è fondamentale poiché filtra le stazioni e le basi dati dalle quali trarranno origine le mappe statistiche portuali. Per questo procede con rigore in tre fasi. Nella prima fase (Paragrafo 4.1.1) sono scelte le stazioni anemometriche storiche le cui basi dati sono sottoposte nel seguito alle analisi statistiche. Nella seconda fase tali basi dati sono trattate una per volta secondo un procedimento in 4 passi. Innanzitutto le basi dati prescelte sono accuratamente studiate e corrette (Paragrafo 4.1.2). Poi sono valutate le distribuzioni dei valori correnti (Paragrafo 4.1.3) ed estremi (Paragrafo 4.1.4). Le distribuzioni dei valori estremi sono infine corrette per tenere conto dei dati mancanti (Paragrafo 4.1.5). Nella terza e ultima fase (Paragrafo 4.1.6) i risultati dello studio delle singole basi dati sono esaminati comparativamente e, se necessario, sottoposti a nuove valutazioni. In questo modo si perviene ai risultati finali utilizzati nel Paragrafo 4.2 per eseguire l'analisi statistica del vento nelle aree portuali.

4.1.1 Basi dati storiche

Il termine "storico" allude alla presenza di misure su archi temporali di alcuni decenni, un intervallo indispensabile per eseguire analisi statistiche affidabili dei valori estremi. Con questo obiettivo sono considerate basi dati con oltre 40 anni di misure. In alcuni casi, come controllo, sono altresì esaminate basi dati con un decennio di misure. Complessivamente sono stati acquisite 16 basi dati storiche, ciascuna comprendente registrazioni di velocità media e direzione e, in molti casi, pressione e temperatura. La Figura 4.1 riporta la collocazione geografica delle stazioni anemometriche (in rosso) e la loro corrispondenza all'area portuale interessata (in blu).

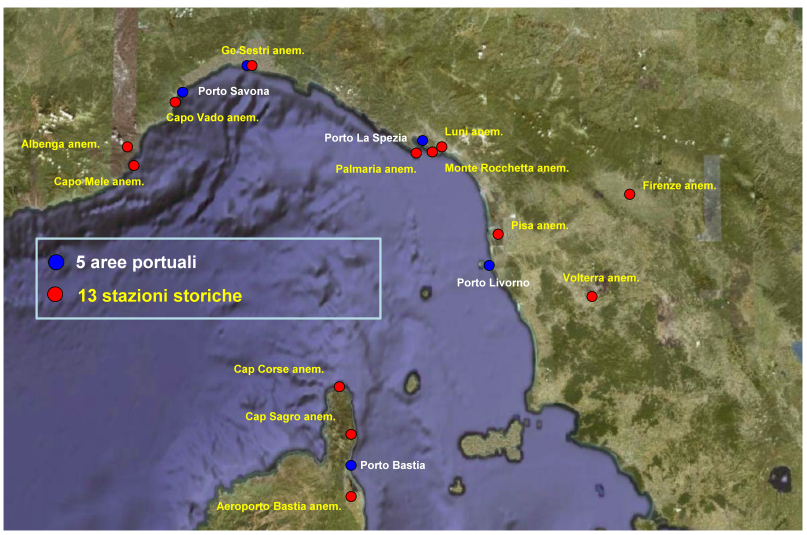


Figura 4.1: Collocazione degli anemometri storici rispetto alle aree portuali.

La Tabella 4.1 sintetizza i dati salienti relativi alle basi dati analizzate. Per alcune stazioni sono indicate più basi dati qualora l'anemometro sia stato spostato in diverse posizioni nel corso degli anni considerati (come per Genova/Sestri Ponente) o siano disponibili basi dati con modalità di archiviazione dei dati differenti (ad esempio di tipo SYNOP e METAR).

Le caratteristiche delle basi dati sono molto disomogenee. Innanzitutto, l'ubicazione degli strumenti è molto variabile nelle diverse stazioni. Gli anemometri di Albenga/Villanova, Genova/Sestri Ponente, Sarzana/Luni, Pisa/San Giusto, Firenze/Peretola e Bastia/Poretta sono posti in aree aeroportuali, caratterizzate generalmente da rugosità molto ridotte e orografia pianeggiante (Figura 4.2), almeno nell'intorno dello strumento; gli anemometri di Capo Mele, Capo Vado, Isola di Palmaria, Monte Rocchetta, Cap Corse e Cap Sagro sono posti in prossimità della cima di promontori, in posizione orograficamente complessa, installati su antenne o su torri montate su edifici isolati (Figura 4.3); la stazione di Volterra è immersa in un centro abitato, in zona orograficamente complessa, sulla torre di un edificio (Figura 4.4).

stazione anemometrica	macroarea	bacino	comune	prov.	regione	stato	longitudine (°N)	latitudine (°E)	quota (m)	base palo (m)	codice gestore	codice OMM	ente gestore	misure/ giorno	anni misura	primo anno	ultimo anno	unità misura
Capo Mele	Savona	Merula	Andora	SV	Liguria	Italia	8.170062	43.958012	220	6 10	153	16153	AM/SYNOP	8	31	1964	1996	kn
Capo Mele	Savona	Merula	Andora	SV	Liguria	Italia	8.170062	43.958012	220	6 10	153	16153	AM/METAR	24	13	1998	2010	m/s
Albenga/Villanova	Savona	Centa	Villanova d'Albenga	SV	Liguria	Italia	8.122809	44.045354	49	10 2	122	16122	ENAV/SYNOP	8	40	1951	1990	kn
Capo Vado	Savona	Quiliano	Vado Ligure	SV	Liguria	Italia	8.448559	44.257228	200	0 20	VAD1		ENEL	48	10	1986	1995	m/s
Capo Vado	Savona	Quiliano	Vado Ligure	SV	Liguria	Italia	8.448559	44.257228	200	0 20	VAD1		ENEL	24	2	1996	1997	m/s
Capo Vado	Savona	Quiliano	Vado Ligure	SV	Liguria	Italia	8.449440	44.258030	170	0 10	VADO		OMIRL	144	4	2006	2009	m/s
Genova/Sestri Ponente	Genova	Polcevera	Genova	GE	Liguria	Italia	8.843153	44.415208	3	0 10	120	16120	ENAV/SYNOP	8	3	1963	1965	kn
Genova/Sestri Ponente	Genova	Polcevera	Genova	GE	Liguria	Italia	8.822960	44.417548	3	0 10	120	16120	ENAV/SYNOP	8	26	1966	1991	kn
Genova/Sestri Ponente	Genova	Polcevera	Genova	GE	Liguria	Italia	8.851453	44.409190	3	0 10	120	16120	ENAV/SYNOP	8	16	1991	2007	kn
Genova/Sestri Ponente	Genova	Polcevera	Genova	GE	Liguria	Italia	8.851453	44.409190	3	0 10	120	16120	ENAV/METAR	48	10	1998	2007	m/s
Isola di Palmaria	La Spezia	Isola di Palmaria	Porto Venere	SP	Liguria	Italia	9.841092	44.041639	192	2 10	129	16129	AM/SYNOP	8	35	1951	1991	kn
Isola di Palmaria	La Spezia	Isola di Palmaria	Porto Venere	SP	Liguria	Italia	9.841092	44.041639	192	2 10	129	16129	AM/SYNOP	8	4	2003	2006	m/s
Monte Rocchetta	La Spezia	Magra	Lerici	SP	Liguria	Italia	9.938420	44.071290	360	0 10	MROC		OMIRL	144	8	2002	2009	m/s
Sarzana/Luni	La Spezia	Magra	Ortonovo	SP	Liguria	Italia	9.982296	44.083857	9	0 10	125	16125	AM/SYNOP	8	27	1970	1996	kn
Sarzana/Luni	La Spezia	Magra	Ortonovo	SP	Liguria	Italia	9.982296	44.083857	9	0 10	125	16125	AM/METAR	24	13	1998	2010	m/s
Pisa/San Giusto	Livorno	Arno	Pisa	PI	Toscana	Italia	10.394110	43.681040	1	0 10	158	16158	AM/SYNOP	8	41	1951	1991	kn
Pisa/San Giusto	Livorno	Arno	Pisa	PI	Toscana	Italia	10.394110	43.681040	1	0 10	158	16158	AM/SYNOP	8	12	1998	2009	m/s
Volterra	Livorno	Era/Cecina	Volterra	PI	Toscana	Italia	10.859842	43.402147	524	31 6	164	16164	AM/SYNOP	8	38	1961	1998	kn
Volterra	Livorno	Era/Cecina	Volterra	PI	Toscana	Italia	10.859842	43.402147	524	31 6	164	16164	AM/SYNOP	8	3	1998	2006	m/s
Volterra	Livorno	Era/Cecina	Volterra	PI	Toscana	Italia	10.859842	43.402147	524	31 6	164	16164	AM/METAR	24	14	1985	1998	kn
Firenze/Peretola	Livorno	Arno	Firenze	FI	Toscana	Italia	11.204669	43.812452	38	0 10	170	16170	ENAV/SYNOP	8	57	1951	2008	kn
Firenze/Peretola	Livorno	Arno	Firenze	FI	Toscana	Italia	11.204669	43.812452	38	0 10	170	16170	ENAV/SYNOP	8	12	1998	2009	m/s
Cap Corse	Bastia	Granaggiolo	Ersa	2B	Corsica	Francia	9.359275	43.003642	104	0 10	20107001	07785	METEOFRANCE	8	41	1960	2000	m/s
Cap Corse	Bastia	Granaggiolo	Ersa	2B	Corsica	Francia	9.359275	43.003642	104	0 10	20107001	07785	METEOFRANCE	24	3	2001	2003	m/s
Cap Corse	Bastia	Granaggiolo	Ersa	2B	Corsica	Francia	9.358280	43.005388	104	12 6	20107001	07785	METEOFRANCE	24	7	2003	2009	m/s
Cap Sagro	Bastia	Sfundarone	Sisco	2B	Corsica	Francia	9.488183	42.797863	111	0 6	20281001	07791	METEOFRANCE	8	19	1980	1998	m/s
Bastia/Poretta	Bastia	Golo	Lucciana	2B	Corsica	Francia	9.485892	42.541027	10	0 10	20148001	07790	METEOFRANCE	8	32	1960	1991	m/s
Bastia/Poretta	Bastia	Golo	Lucciana	2B	Corsica	Francia	9.485892	42.541027	10	0 10	20148001	07790	METEOFRANCE	24	18	1992	2009	m/s

Tabella 4.1: Principali caratteristiche delle stazioni anemometriche storiche coinvolte nel progetto "Vento e Porti" e delle relative basi dati.



Figura 4.2: Esempio di stazioni anemometriche storiche poste in aeroporti: a) Pisa/San Giusto; b) Bastia/Poretta.



Figura 4.3: Esempi di stazioni anemometriche storiche poste su promontorio: a) Cap Sagro; b) Capo Vado.



Figura 4.4: Stazione anemometrica di Volterra posta in centro abitato.

Tutte le stazioni registrano valori della velocità media e della direzione prevalente del vento su periodi di 10 minuti. Sono invece disomogenee le modalità di archivio dei dati. La maggior parte delle stazioni, gestite dall'Aeronautica Militare, dall'ENAV e da MeteoFrance, definite SYNOP, registrano un valore di velocità media e direzione ogni 3 ore (8 misure giornaliere). Alcune stazioni, o alcuni intervalli temporali delle stazioni precedenti, definite METAR, registrano in generale un valore di velocità media e direzione ogni ora (24 misure giornaliere) e in un caso ogni mezz'ora (48 misure giornaliere). Anche una stazione gestita dall'ENEL fornisce una registrazione semioraria (48 misure al giorno). Infine, due stazioni gestite dall'Osservatorio Meteo-Idrologico della Regione Liguria (OMIRL) registrano misure continue (144 valori al giorno). La frequenza di acquisizione dei dati influenza l'interpretazione dei dati registrati e il risultato delle analisi statistiche. La Figura 4.5 pone in evidenza il ruolo della frequenza di campionamento dei dati presenti nelle basi dati SYNOP, METAR o continue.

Esiste inoltre una certa discontinuità nell'archiviazione dei dati, sia all'interno delle singole basi dati sia tra le diverse stazioni. Tutte le stazioni analizzate, sebbene in misura diversa, presentano intervalli di tempo in cui non è presente la registrazione; essi variano da alcune ore fino a svariati mesi o addirittura anni (Figura 4.6).

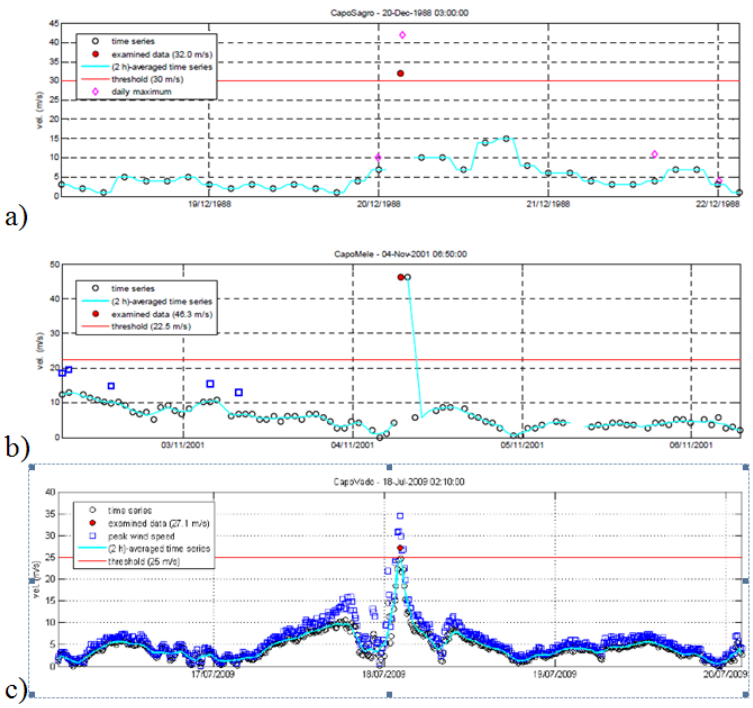


Figura 4.5: Esempio di un evento estremo presente in una base dati SYNOP (a), METAR (b) o continua (c).

Inoltre, anche dove la registrazione appare continua, possono presentarsi discontinuità di registrazione dei dati in alcune ore del giorno. A titolo di esempio, la Figura 4.7

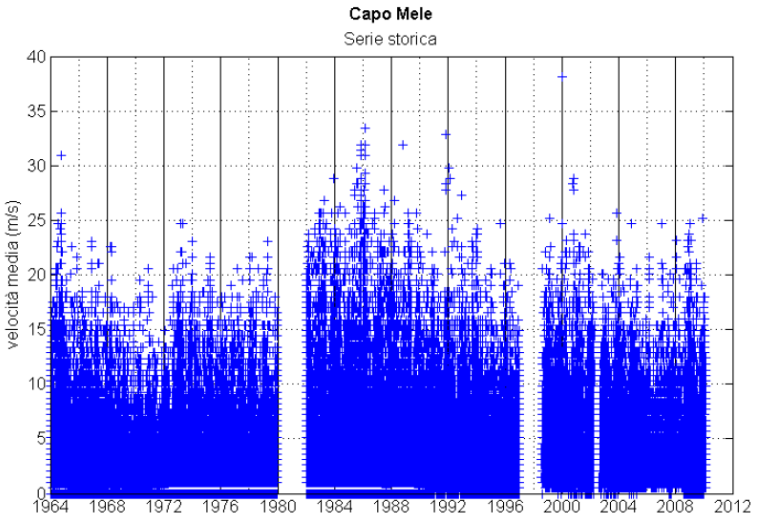


Figura 4.6: Panoramica della serie storica delle misure registrate alla stazione di Capo Mele.

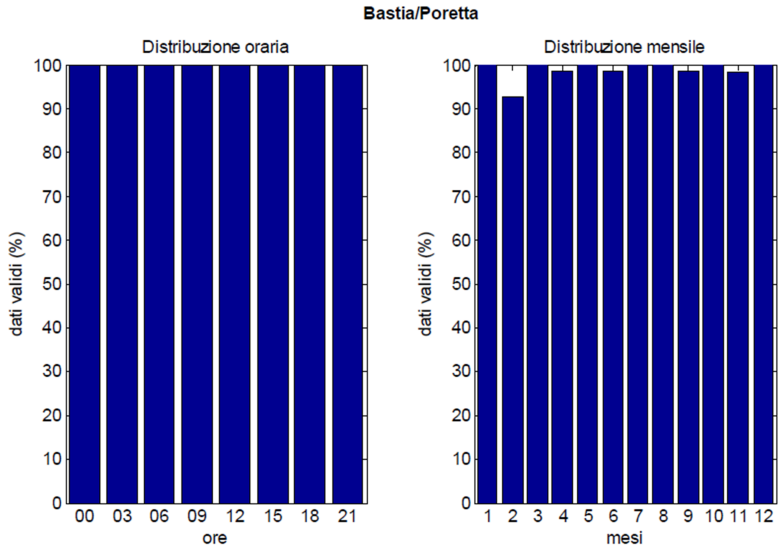
mostra la percentuali di dati validi in corrispondenza delle ore del giorno e dei mesi dell'anno, per le stazioni di Bastia/Poretta 4.7a e Volterra (METAR) 4.7b. Nel primo caso, i dati sono completi, nei confronti della registrazione sia giornaliera sia annuale; viceversa, nel secondo caso, esiste una tendenza sistematica a non registrare i dati corrispondenti alle ore notturne, fatto che rende la base dati incompleta.

4.1.2 Correzione delle basi dati

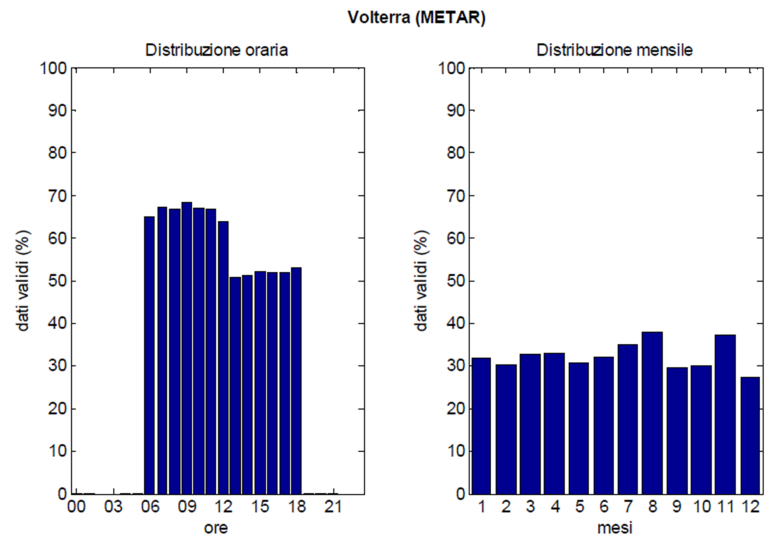
Le basi dati iniziali contengono, in linea di principio, errori riconducibili a diverse categorie quali misure effettuate in condizioni di malfunzionamento strumentale, misure esterne all'intervallo di lettura, registrazione di eventi estranei al problema trattato, quali, ad esempio, misure aeroportuali concomitanti con operazioni di atterraggio o di decollo di velivoli, perdita di dati per arresto strumentale causato da eventi naturali (trombe d'aria, fenomeni d'urto, fulminazioni) o da interventi di operatori (manutenzioni, sostituzioni o trasferimenti dell'anemometro, proibitive condizioni atmosferiche), errori insorti nel trasferimento dei dati, eccetera.

Al fine di pervenire a una base dati corretta, è stata implementata una procedura per il controllo e l'eventuale eliminazione o correzione dei dati errati. Dapprima è eseguito un controllo preliminare allo scopo di eliminare tutti i dati fisicamente errati, quali velocità negative o direzioni fuori dall'intervallo di misura o corrispondenti a calme di vento. Il successivo passaggio dalle basi dati iniziali alle basi dati corrette comporta differenti interventi a seconda dell'entità dei dati in questione.

L'intervento sui dati corrispondenti alle velocità minori della soglia inferiore di lettura anemometrica è significativo nell'analisi delle distribuzioni di probabilità delle



(a)



(b)

Figura 4.7: Distribuzione oraria (a sinistra) e mensile (a destra) delle misure valide presso la stazione di Bastia/Poretta 4.7a e Volterra (METAR) 4.7b.

popolazioni globali dei dati. Nel presente studio sono considerate inverosimili e quindi eliminate le calme di vento superiori a 15 giorni continuativi. Tale scelta è giustificata dal fatto che, in molti casi, l'assenza di misura è registrata con una velocità nulla,

anziché con un codice di errore.

L'intervento sui dati corrispondenti al corpo centrale delle misure della velocità è generalmente ininfluente sui risultati dell'analisi statistica e come tale non necessario.

L'intervento sui dati corrispondenti alle velocità più elevate costituisce un elemento fondamentale nello studio dei venti estremi e si articola in due fasi.

Inizialmente sono individuati i valori potenzialmente sbagliati. L'operazione comporta la selezione preliminare dei dati che saranno impiegati nell'analisi statistica dei massimi. Questi dati sono posti a confronto con i dati immediatamente anteriori e posteriori (ad esempio nell'arco di una o più giornate) e, qualora disponibili, con quelli di altri strumenti posizionati in prossimità della stazione in esame (ad esempio i dati SYNOP e METAR di una medesima stazione) e con le velocità di picco registrate nel medesimo periodo. Sono considerati corretti i dati omogenei con tali misure, mentre sono considerati potenzialmente sbagliati e detti singolari quelli avulsi da regolari tendenze.

I valori singolari sono eliminati o accettati sulla base di un ulteriore confronto con gli altri parametri meteorologici disponibili nello stesso intervallo temporale, quali, per esempio, la direzione del vento o la pressione al suolo. La presenza di un improvviso e duraturo salto della direzione del vento in corrispondenza del dato singolare o di una rilevante caduta di pressione precedente a esso possono preludere l'arrivo di una perturbazione e giustificare il dato singolare (Lagomarsino, Piccardo e Solari 1992), che in tale caso è accettato. Questa fase può essere approfondita acquisendo le immagini satellitari della giornata relativa al dato singolare e controllando l'effettiva presenza di eventi compatibili con il dato registrato; nel caso che tali immagini non siano disponibili, la ricerca può essere rivolta a notizie di cronaca recanti informazioni sull'eventuale registrazione di fenomeni estremi. Il dato singolare è giudicato errato e quindi rimosso se non risulta possibile attribuirne il valore a una perturbazione. La Figura 4.8 fornisce l'esempio di un dato singolare rimosso dalla base dati di Volterra.

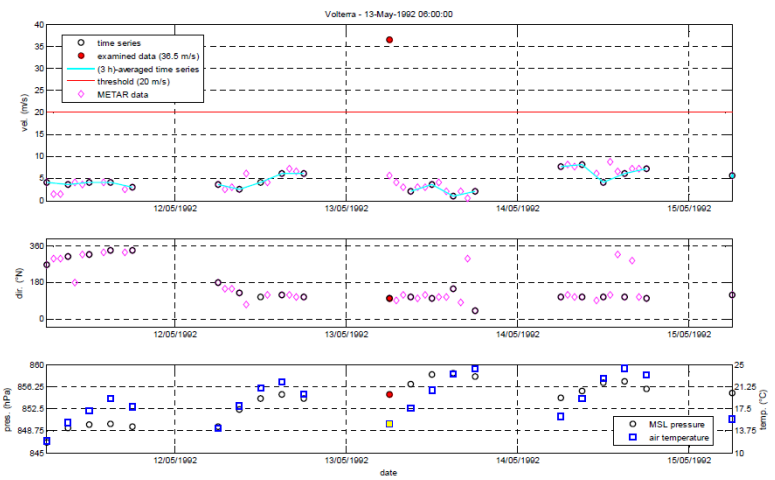


Figura 4.8: Esempio di dato rimosso dalla base dati (in rosso).

Un'attenzione supplementare va dedicata alle basi dati sottoposte all'analisi d'estremo. Siccome gli eventi temporaleschi di breve durata devono essere esclusi dall'analisi probabilistica del massimo annuale per essere analizzati separatamente, anche i dati singolari potenzialmente riconducibili a tali eventi sono rimossi dalla base dati. Inoltre, sempre ai fini delle analisi d'estremo e per valutare il massimo annuale su periodi di misure il più possibile omogenei, sono rimossi tutti gli anni contenenti meno di un mese di misure valide.

L'operazione d'identificazione dei dati errati o degli eventi temporaleschi è molto difficoltosa se svolta su basi dati con registrazioni orarie o triorarie. In questo caso le analisi probabilistiche sono ripetute più volte su ogni base dati per valutare la sensibilità dei risultati alla presenza o meno di dati considerati di dubbia validità.

4.1.3 Analisi probabilistica dei valori correnti

La climatologia del vento in un sito è caratterizzata in primo luogo mediante l'analisi probabilistica dei valori correnti della velocità media del vento. Tale analisi quantifica la ricorsività delle intensità e delle direzioni del vento, fornendo un quadro di informazioni molto utili per la pianificazione delle attività portuali e, in prospettiva, per la gestione energetica della fonte eolica e per la dispersione degli inquinanti in atmosfera.

La distribuzione dei valori correnti della velocità media del vento in ogni stazione storica è analizzata e regredita utilizzando il modello di Weibull ibrido (Lagomarsino, Piccardo e Solari 1992; Solari 1996). La funzione di distribuzione adirezionale è data dalla relazione:

$$F_V(v) = 1 - A\mathrm{e}^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} \tag{4.1}$$

dove K e C sono, rispettivamente, i parametri di forma e di scala della distribuzione di Weibull dei valori non nulli della base dati; A è la probabilità di occorrenza dei valori non nulli.

In alternativa, utilizzando la forma direzionale del modello di Weibull ibrido, la funzione di distribuzione è data da:

$$F_V(v) = 1 - \sum_{j=1}^{S} a_j \mathrm{e}^{-\left(\frac{v}{c_j}\right)^{k_j}} \tag{4.2}$$

dove S è il numero dei settori considerati k_j, c_j e a_j sono i parametri del modello riferiti al j-esimo settore; le lettere minuscole hanno lo stesso significato, riferito alla j-esima base dati settoriale, della lettera maiuscola corrispondente nel modello adirezionale. Nel presente studio, la distribuzione direzionale è ottenuta impiegando 12 settori di ampiezza 30°; la direzione 0° corrisponde al vento proveniente da nord.

4.1.4 Analisi probabilistica dei valori estremi

Uno degli aspetti fondamentali del progetto "Vento e Porti" riguarda la valutazione della sicurezza delle aree portuali nelle giornate di vento intenso. In questo contesto, l'analisi statistica delle velocità estreme ha un ruolo fondamentale. La comunità scientifica non ha ancora raggiunto un accordo sulla distribuzione d'estremo che meglio si

adatta a regredire i valori misurati. Studi recenti su diversi modelli applicati a basi dati sintetiche di lungo periodo (Torrielli, Repetto e Solari 2011, 2012) suggeriscono l'uso dell'analisi di Processo (Lagomarsino, Piccardo e Solari 1992). Applicando questo modello la funzione di distribuzione del massimo annuale è data dall'espressione:

$$F_{\mathrm{M}}(v) = \mathrm{e}^{-\lambda f_V(v)} \tag{4.3}$$

dove $f_V(v)$ è la funzione di densità di probabilità dei valori correnti, $\lambda f_V(v)$ è il numero medio degli attraversamenti della soglia v, λ è il parametro del modello, stimato enumerando i superamenti di soglia.

4.1.5 Correzione delle analisi probabilistiche

Come evidenziato in precedenza, le basi dati iniziali possono essere affette da vari generi di incompletezza, legati principalmente a dati mancanti e a registrazioni discontinue. L'incompletezza dei dati è generalmente ininfluente nei riguardi della distribuzione di probabilità dei valori correnti, purché i dati mancanti siano distribuiti in modo casuale. Per contro, qualsiasi genere di incompletezza della base dati comporta una sottostima sistematica della distribuzione di estremo. Questo implica la necessità di correggere il risultato dell'analisi, tenendo conto di tale sorgente d'errore.

L'Analisi di Processo si presta particolarmente bene alla correzione della distribuzione d'estremo per tener conto dei dati mancanti. Considerando l' Eq. (4.3), assumendo che f_V non sia affetta da errori, e ipotizzando che λ sia indipendente da f_V, l'effetto dei dati mancanti può essere considerato sostituendo la stima originale di λ con il nuovo parametro:

$$\tilde{\lambda} = \frac{N_{\mathrm{t}}}{N_{\mathrm{v}}}\lambda \tag{4.4}$$

dove N_{t} è il numero totale di dati in una base dati ideale non affetta da dati mancanti e N_{v} è il numero di dati presente nella base dati.

La correzione della distribuzione d'estremo per tener conto delle misure discontinue, ad esempio causate da registrazioni di velocità mediate su un intervallo T ma effettuate ogni nT, con $n > 1$, può essere operata esprimendo la distribuzione d'estremo nella forma:

$$\tilde{V}_M(R) = C_{M,N}(R)\ V_N(R) \tag{4.5}$$

dove $V_{\mathrm{N}}(R)$ è la velocità media associata a un tempo di ritorno R stimata a partire dalla base dati originale (dotata di N misure al giorno); $C_{M,N}$ è un fattore correttivo ottenuto esaminando diverse registrazioni non affette da discontinuità di acquisizione. L'interesse è rivolto al fattore correttivo necessario per passare da misure sinottiche ($N = 8$) a misure al continuo ($M = 144$). Una stima dell'entità delle correzioni evidenzia un aumento medio delle velocità estreme di circa il 7% per le stazioni liguri e corse, del 13% per l'area campano-laziale e del 15% per le stazioni padane. A titolo di esempio, la Figura 4.9 riporta i fattori correttivi da applicare alle velocità medie triorarie associate a 100 anni di tempo di ritorno per ottenere i corrispondenti valori per una base dati continua (ovvero, dotata di 144 misure giornaliere). La mappa cromatica

è realizzata interpolando in forma bilineare i valori dei fattori ottenuti nei pressi delle stazione anemometriche considerate. Si possono identificare tre regioni associate a valori crescenti dei coefficienti correttivi: il bacino del Mar Ligure, il bacino del Mar Tirreno e il bacino della Val Padana.

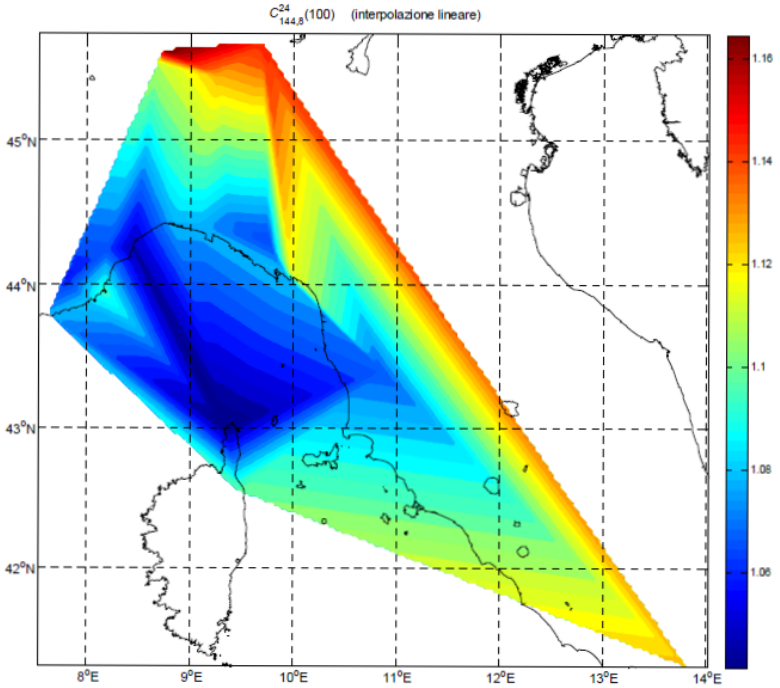


Figura 4.9: Mappa dei coefficienti correttivi da applicare alle velocità medie associate a 100 anni di tempo di ritorno e stimate a partire da una base dati sinottica per ottenere i corrispondenti valori per una base dati continua. La mappa è realizzata con un'interpolazione bilineare dei valori ottenuti nelle stazioni anemometriche considerate.

4.1.6 Analisi statistica comparativa

Le analisi descritte nei precedenti paragrafi sono applicate a tutte le basi dati storiche selezionate.

Per il Porto di Savona–Vado sono analizzate due basi dati storiche sinottiche (Capo Mele e Albenga/Villanova), una base dati intermedia semioraria (Capo Vado (ENEL)) e una base dati recente con misure continue (Capo Vado). Le due stazioni di Capo Vado, per quanto attive per soli 12 e 4 anni, rispettivamente, sono inserite quale strumento di controllo; infatti, da un lato le stazioni storiche sono notevolmente lontane dall'area in questione, dall'altro le due stazioni di Capo Vado sono immediatamente a ridosso del bacino portuale. A questo si aggiunga che la base dati di Albenga presenta alcuni problemi di affidabilità per l'elevato numero di dati mancanti.

Per il Porto di Genova le analisi sono svolte in relazione a una base dati storica sinottica (Genova/Sestri Ponente). I risultati sono confrontati con quelli ottenuti analizzando una base dati recente con misure semiorarie quale controllo (Genova/Sestri Ponente (METAR)).

Per il porto della Spezia sono analizzate due basi dati storiche sinottiche (Isola di Palmaria e Sarzana/Luni) e una base dati recente con misure continue (Monte Rocchetta). La stazione di Monte Rocchetta, attiva da 8 anni, è analizzate per la sua posizione baricentrica rispetto alle due stazioni storiche e quale controllo, soprattutto a causa della minore affidabilità delle basi dati sinottiche spezzine. Infatti, da un lato è incerta la collocazione del palo anemometrico di Palmaria, dall'altro la base dati di Sarzana/Luni è affetta da un elevato numero di dati mancanti.

Per il Porto di Livorno sono presenti tre basi dati storiche sinottiche (Pisa/San Giusto, Volterra e Firenze/Peretola) e una base dati storica con misure orarie (Volterra (METAR)). Nel caso della macroarea livornese il maggior problema è costituito dalla distanza delle stazioni di Volterra e Firenze dal bacino portuale. Per contro, in questo caso, le basi dati disponibili sono tra le più complete, omogenee e prolungate nel tempo. In particolare, la basi dati di Pisa/San Giusto costituisce un ottimo strumento per lo studio del Porto di Livorno.

Per il Porto di Bastia sono analizzate tre basi dati storiche sinottiche (Cap Corse, Cap Sagro e Bastia/Poretta). Esse sono le più complete tra quelle considerate, ma presentano alcuni problemi di omogeneità dei dati e di attendibilità di alcune statistiche. Ciò riguarda in particolare sia l'analisi dei valori correnti sia l'analisi d'estremo relative alla stazione di Cap Sagro. La base dati di Bastia/Poretta rappresenta lo strumento migliore per lo studio del Porto di Bastia, sia per la vicinanza al bacino portuale sia per la massima completezza e per l'estensione temporale che la caratterizzano.

Un aspetto rilevante è costituito dall'entità dei dati mancanti. Sotto la soglia del 10% si trovano meno della metà delle basi dati considerate (Bastia/Poretta, Pisa/San Giusto, Monte Rocchetta, Genova/Sestri Ponente, Cap Sagro, Capo Mele e Cap Corse), mentre più del 30% dei dati risulta assente per le stazioni di Albenga/Villanova, Volterra, Genova/Sestri Ponente (METAR), Sarzana/Luni e Volterra (METAR) (in ordine crescente di incompletezza).

I risultati delle analisi probabilistiche sono riassunti in Tabella 4.2. Relativamente all'analisi dei valori correnti, sono riportati i valori di velocità media, deviazione standard e i parametri della distribuzione; relativamente all'analisi di estremo, sono elencate le stime della velocità corrispondente a determinati tempi di ritorno, ottenute dall'analisi di processo e corrette secondo le procedure indicate nei paragrafi precedenti. Le stime relative a Cap Sagro non sono ritenute attendibili e sono qui riportate solo per completezza.

Per quanto riguarda l'analisi dei valori correnti di velocità media, essi sono fortemente influenzati dall'ubicazione della stazione. Si possono distinguere due gruppi di stazioni: quelle collocate sulla sommità di rilevi (come i promontori di Capo Mele e Capo Vado, l'Isola di Palmaria, il Monte Rocchetta, la Torre del Palazzo Pretorio di Volterra e i promontori di Cap Corse e Cap Sagro) presentano generalmente velocità medie elevate; quelle collocate all'interno di aree aeroportuali (Albenga/Villanova, Genova/Sestri Ponente, Sarzana/Luni, Pisa/San Giusto, Firenze/Peretola e Bastia/Poretta) presentano generalmente velocità più contenute.

stazione anemometrica	*analisi dei valori correnti*					*analisi d'estremo*										
	$\langle U \rangle$	σ_U	A	K	C	$V(R)$ (m/s)										
	(m/s)	(m/s)	(%)		(m/s)	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	5000	10000
Capo Mele	4.79	3.98	87.6	1.28	5.35	30.5	33.5	35.4	37.3	39.6	41.3	43.0	45.2	46.8	50.6	52.1
Albenga/Villanova	2.39	3.16	54.1	1.33	4.29	22.2	24.3	25.7	27.0	28.7	29.9	31.1	32.7	33.8	36.4	37.6
Capo Vado (ENEL)	6.66	5.43	97.3	1.47	7.09	31.3	34.0	35.8	37.4	39.5	41.0	42.5	44.4	45.9	49.1	50.4
Capo Vado	6.03	4.66	99.3	1.39	6.23	28.8	31.6	33.5	35.2	37.4	39.0	40.5	42.5	44.1	47.5	48.9
Genova/Sestri Ponente	4.01	3.02	84.3	1.67	4.73	18.6	19.9	20.8	21.5	22.5	23.2	23.9	24.8	25.5	26.9	27.6
Genova/Sestri Ponente (METAR)	4.50	2.50	99.0	1.65	4.44	18.7	19.9	20.7	21.4	22.3	23.0	23.7	24.5	25.1	26.5	27.1
Isola di Palmaria	5.37	3.60	93.2	1.31	5.61	31.2	34.1	35.9	37.7	39.9	41.5	43.1	45.2	46.8	50.3	51.8
Monte Rocchetta	3.33	2.59	98.0	1.22	3.18	19.2	21.2	22.5	23.7	25.3	26.5	27.6	29.1	30.2	32.7	33.8
Sarzana/Luni	2.41	1.90	79.1	1.04	2.05	18.7	20.7	22.0	23.3	24.9	26.1	27.3	29.0	30.2	33.0	34.2
Pisa/San Giusto	2.38	2.55	65.1	1.30	3.32	17.9	19.7	20.8	21.9	23.2	24.2	25.2	26.5	27.5	29.6	30.6
Volterra	4.25	3.60	81.2	1.48	5.19	23.9	25.8	27.1	28.2	29.7	30.8	31.8	33.2	34.2	36.5	37.4
Volterra (METAR)	4.10	2.99	90.3	1.42	4.39	23.1	24.9	26.0	27.1	28.4	29.4	30.4	31.6	32.6	34.7	35.6
Firenze/Peretola	1.64	2.31	48.8	1.20	2.95	18.0	19.9	21.2	22.4	23.9	25.1	26.2	27.6	28.7	31.2	32.3
Cap Corse	7.17	5.52	91.4	1.46	8.14	34.9	38.2	40.3	42.2	44.7	46.5	48.2	50.5	52.2	56.0	57.6
Cap Sagro	4.96	4.45	92.1	0.98	4.61	41.3	46.9	50.7	54.3	58.9	62.4	65.9	70.5	74.0	82.0	85.5
Bastia/Poretta	3.33	2.14	93.6	1.06	2.63	21.4	23.9	25.5	27.0	29.0	30.5	32.0	34.0	35.4	38.8	40.3

Tabella 4.2: Sintesi delle analisi probabilistiche delle stazioni anemometriche storiche coinvolte nel progetto "Vento e Porti".

Il parametro di forma K della distribuzione è sempre superiore a 1. Inoltre, in ciascuna macroarea i valori di K di ogni stazione sono piuttosto vicini, ad eccezione dei casi di Sarzana e Cap Corse. Il parametro di scala C è invece in linea con quanto osservato rispetto ai valori dell'intensità della velocità media a seconda della collocazione dello strumento: nel caso di collocazione sulla sommità di un rilievo si riscontrano valori generalmente superiori a 5 m/s, mentre in area aeroportuale i valori sono inferiori a 5 m/s.

Le velocità medie massime annuali sono generalmente elevate. Considerando, ad esempio, le stime con tempo di ritorno di 100 anni, i valori minimi sono osservati per Genova/Sestri Ponente (circa 23 m/s), quelli massimi per Cap Corse (oltre 46 m/s). Rispetto a questi valori le basi dati possono essere suddivise in tre gruppi: i siti ordinari, generalmente in aree pianeggianti presso aeroporti, dove la velocità associata a 100 anni di tempo di ritorno si attesta intorno a 25 m/s; i siti esposti, collocati su rilievi di tipo collinare, dove tale velocità si attesta su valori intermedi, intorno a 30 m/s; i siti collocati sulla sommità di promontori o di isole e quindi quasi totalmente circondati dal mare, dove la velocità a 100 anni di tempo di ritorno raggiunge valori molto elevati, intorno a 40 m/s. Questa catalogazione è meno significativa nel caso delle stazioni corse, a causa della loro collocazione su un territorio insulare; per esempio alla stazione di Bastia/Poretta sono associate velocità tipiche di un sito esposto, benché lo strumento sia posizionato in un sito ordinario. Per quanto concerne il controllo offerto dalle basi dati METAR rispetto alle basi dati SYNOP della medesima stazione, le analisi per Genova/Sestri Ponente sono quasi coincidenti, mentre nel caso di Volterra si osserva un leggero scostamento delle stime ottenute.

Le analisi direzionali sono riportate nei diagrammi nelle Figure 4.10–4.14,relative alle diverse macroaree. In linea del tutto teorica, è normale attendersi differenze tra i risultati delle diverse stazioni, legati alla diversa ubicazione degli strumenti. Tali differenze dovrebbero essere corrette dalle successive fasi di trasformazione dei dati, basate sulla modellazione numerica dei campi di vento nelle aree analizzate (Capitolo 3). Se i modelli impiegati riuscissero a descrivere in maniera completa e fedele tutte le proprietà del vento, i risultati della trasformazione in un punto dell'area geografica, a partire da ogni stazione analizzata, dovrebbero convergere. Nei casi analizzati non sempre questo avviene; ciò può essere dovuto a diversi fattori, legati per esempio alla rappresentazione numerica della rugosità del terreno e di talune asperità orografiche, alla trasformazione subita nel tempo dall'area circostante lo strumento, a informazioni non accurate sul posizionamento dello strumento, oltre ovviamente alle approssimazioni introdotte dal modello. Molti di questi fattori son tenuti in debito conto intervenendo con opportune correzioni laddove sia stata riscontrata la presenza di anomalie. Nel caso in cui anche le correzioni non abbiano permesso di eliminare le anomalie riscontrate, le stime sono segnalate come scarsamente attendibili per descrivere la climatologia dell'area portuale in esame.

Più nel dettaglio, sono giudicate poco attendibili le stime relative alle basi dati savonesi di Capo Mele e Albenga/Villanova; i risultati hanno infatti messo in luce che queste stazioni sono ubicate in posizioni con caratteristiche climatologiche probabilmente differenti da quelle dell'area portuale savonese. La base dati di Capo Vado è invece ritenuta affidabile per la descrizione della climatologia del porto, anche se la trasformazione dei dati dalla stazione storica ai punti del porto non utilizza le tecniche

di simulazione numerica descritte nel Capitolo 3, bensì coefficienti di trasformazione empirici ricavati utilizzando i dati registrati nell'ambito del monitoraggio portuale (Capitolo 2).

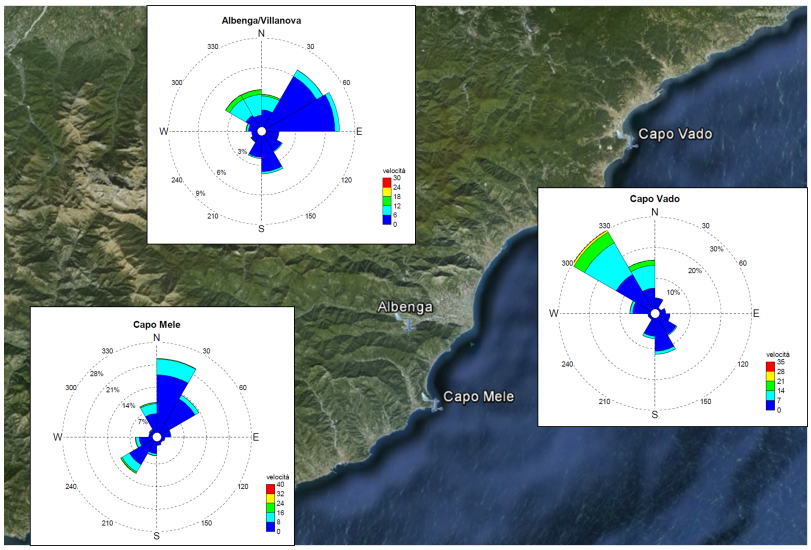


Figura 4.10: Distribuzione di probabilità della provenienza del vento per le stazioni storiche della macroarea di Savona–Vado.

Nel caso del Porto di Genova, la presenza di un'unica base dati storica posta all'interno dell'area portuale rende le stime probabilistiche particolarmente semplici e robuste.

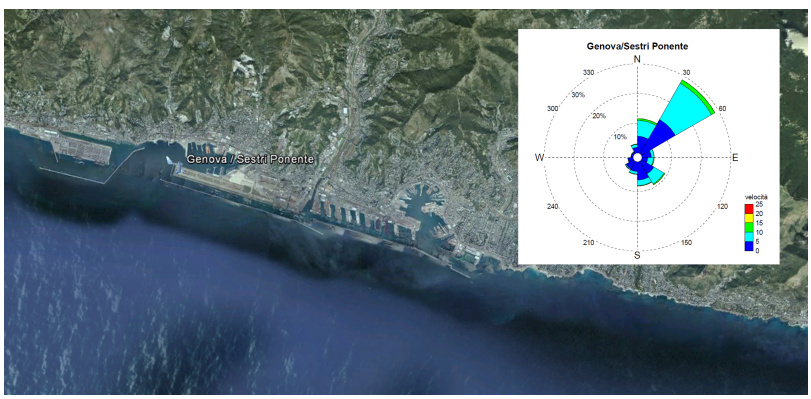


Figura 4.11: Distribuzione di probabilità della provenienza del vento per le stazioni storiche della macroarea di Genova.

Le stazioni storiche riferite alle aree di portuali di La Spezia e Livorno possono essere considerate tutte attendibili per la loro caratterizzazione climatologica. In questi

casi, infatti, le diverse caratterizzazioni locali possono essere corrette mediante le trasformazioni numeriche in modo soddisfacente. Pertanto, nella successiva fase di costruzione delle mappe statistiche dei porti, sono utilizzate le informazioni provenienti da tutte le stazioni analizzate, opportunamente pesate con funzioni peso dipendenti dalla distanza tra la stazione e il porto considerato.

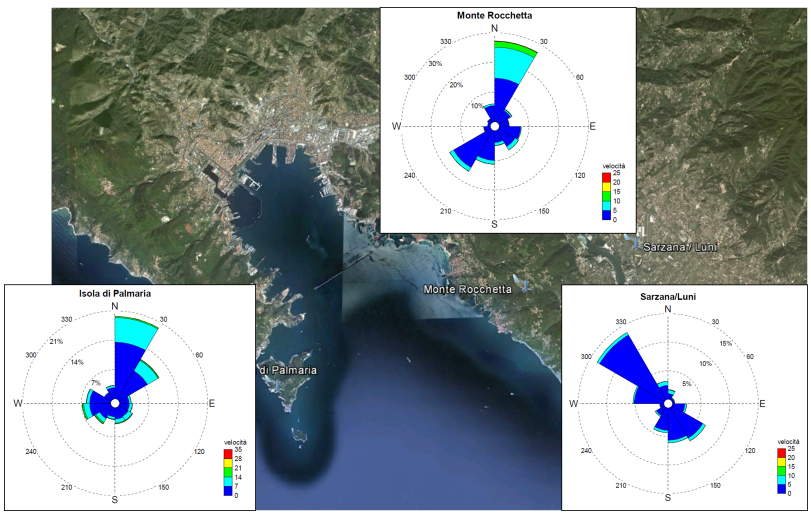


Figura 4.12: Distribuzione di probabilità della provenienza del vento per le stazioni storiche della macroarea della Spezia.

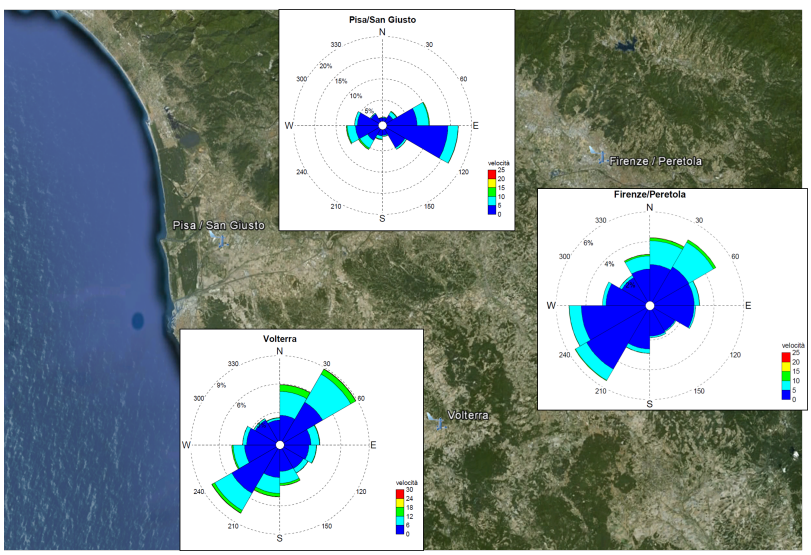


Figura 4.13: Distribuzione di probabilità della provenienza del vento per le stazioni storiche della macroarea di Livorno.

Infine, per il Porto di Bastia, sono giudicate non attendibili le stime relative alla base dati di Cap Sagro e Cap Corse. Per la prima, come già notato, si ottengono valori eccessivamente elevati, non compatibili con fenomeni eolici reali. Nel caso di Cap Corse, l'estrema complessità orografica del promontorio, da un lato rende la climatologia locale non rappresentativa dell'area portuale di Bastia, dall'altro non permette di intervenire efficacemente con i modelli numerici utilizzati per la trasformazione dei dati. Pertanto, la caratterizzazione statistica dell'area è stata affidata unicamente alle informazioni relative alla base dati di Bastia/Poretta.

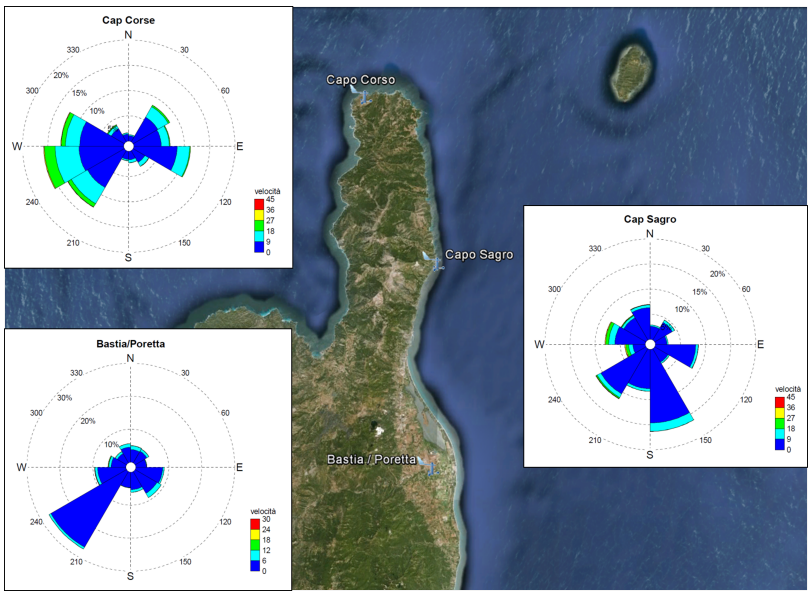


Figura 4.14: Distribuzione di probabilità della provenienza del vento per le stazioni storiche della macroarea di Bastia.

4.2 Analisi statistica presso le aree portuali

L'elaborazione delle distribuzioni di probabilità dei valori della velocità media del vento misurati dalle stazioni anemometriche storiche (Paragrafo 4.1) è strumentale all'analisi statistica del vento nei porti. Essa procede in tre fasi. Nella prima, le basi dati toriche sono trasformate in basi dati virtuali della velocità media e della direzione del vento, nei punti dei domini computazionali di tutti i porti (Paragrafo 3.2.3). Nella seconda fase i risultati della prima sono analizzati statisticamente e sintetizzati nelle eoliche di ogni porto (Paragrafi 4.2.1–4.2.5). Nella terza e ultima fase è condotta una validazione preliminare dei risultati (Paragrafo 4.2.6).

Le operazioni di trasferimento e di analisi statistica dei dati sono eseguite per ogni punto della griglia orizzontale di tutti i domini delle aree portuali, per 10 livelli sopra il terreno (2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100, 150 m), ottenendo mappe sintetiche delle

grandezze statistiche più rilevanti. Coerentemente con i domini utilizzati, ogni punto della mappa dista 80 m da quelli adiacenti (50 m nel Porto di Bastia).

Le figure seguenti riportano alcuni risultati delle analisi probabilistiche dei valori correnti ed estremi per tutte le aree portuali considerate. In particolare, per ogni area portuale, sono riportale le mappe della velocità media annua del vento alle quote di 10 e 50 m sul livello del terreno, la rosa dei venti in tre punti del porto e le mappe della velocità estrema con periodo di ritorno di 50 anni alle quote di 10 e 50 m sul terreno.

L'analisi visiva delle mappe statistiche fornisce una rappresentazione qualitativa della ventosità nelle aree portuali. Il sito WebGIS descritto nel Capitolo 7 permette anche una consultazione quantitativa di tali dati.

4.2.1 Porto di Savona–Vado

Le Figure 4.15 e 4.17 riportano la mappa della velocità media annuale nel Porto di Savona–Vado, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Le mappe evidenziano gli effetti dell'orografia e della rugosità, che tende a ridurre la velocità del vento nei pressi della costa, e un incremento di velocità verso il mare aperto. Si nota una velocità mediamente più elevata nell'area di Vado Ligure, in corrispondenza del promontorio di Capo Vado. La conformazione topografica in questa zona crea effetti di incremento notevoli, che permangono anche a quote elevate rispetto al terreno.

Le Figure 4.16 e 4.18 illustrano le rose del vento in tre punti delle aree portuali a 10 m sul terreno. I venti prevalenti provengono dai settori di N-NO e S-SE. Nonostante la ridotta estensione, l'area del Porto di Vado evidenzia una non trascurabile rotazione delle direzioni prevalenti, che tendono a disporsi sulla direttrice N-S nel piazzale a sud del promontorio.

Le Figure 4.19 e 4.20 riportano le mappa di velocità media con 50 anni di periodo di ritorno nei Porti di Savona e Vado, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Permangono le caratteristiche legate alla rugosità e all'orografia già commentate nei confronti della velocità media annuale. Alla quota di 10 m le banchine

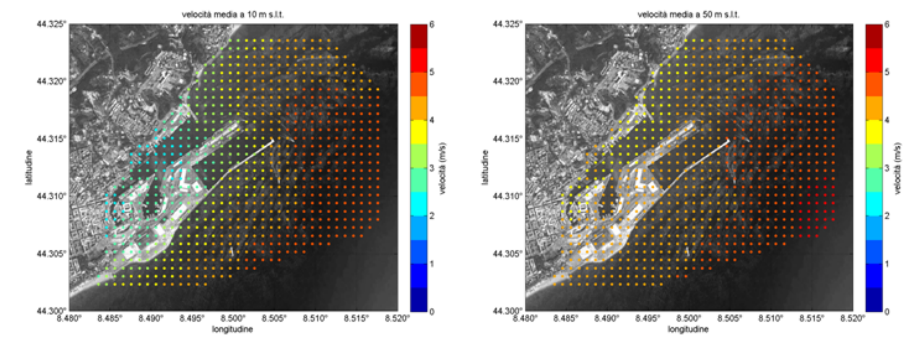


Figura 4.15: Velocità media annua nel Porto di Savona, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

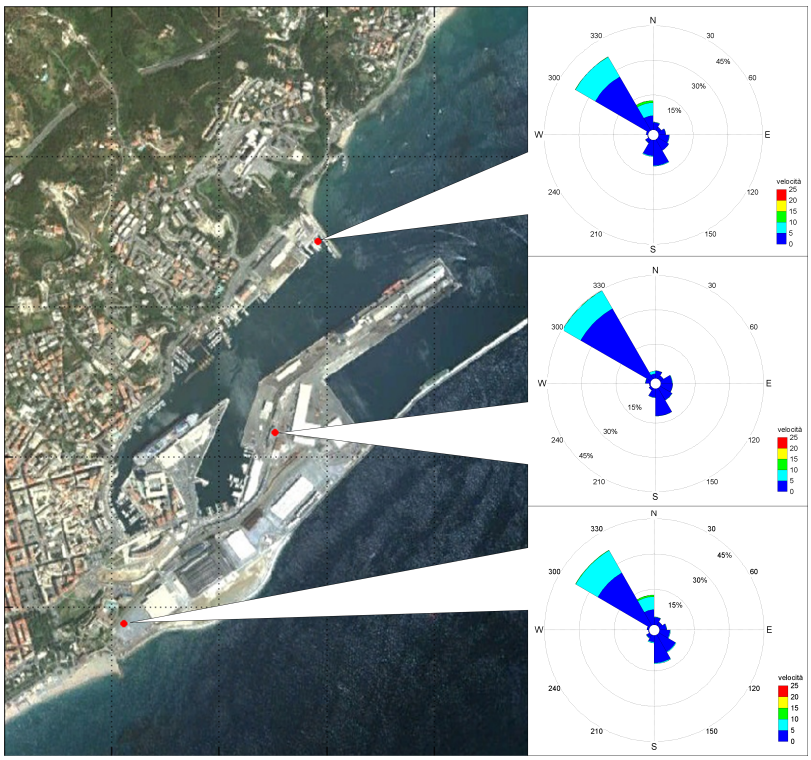


Figura 4.16: Rosa dei venti nel Porto di Savona, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

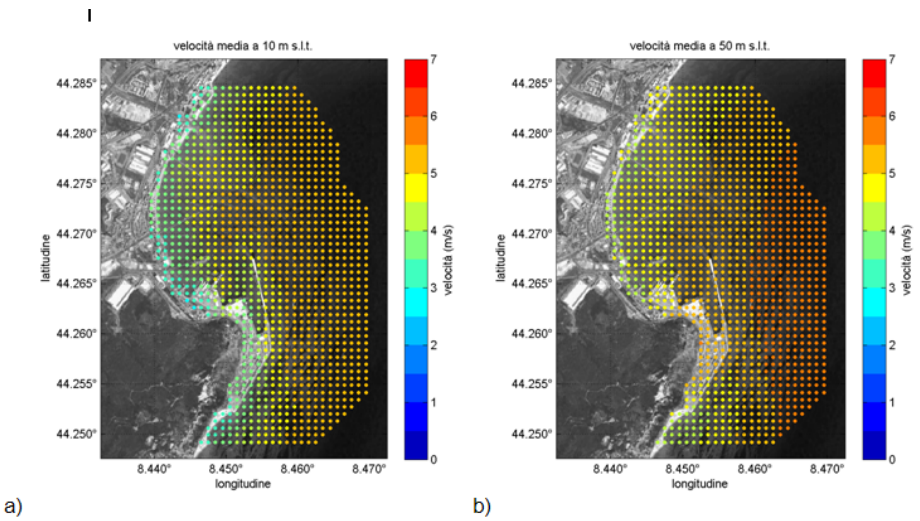


Figura 4.17: Velocità media annua nel Porto di Vado alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

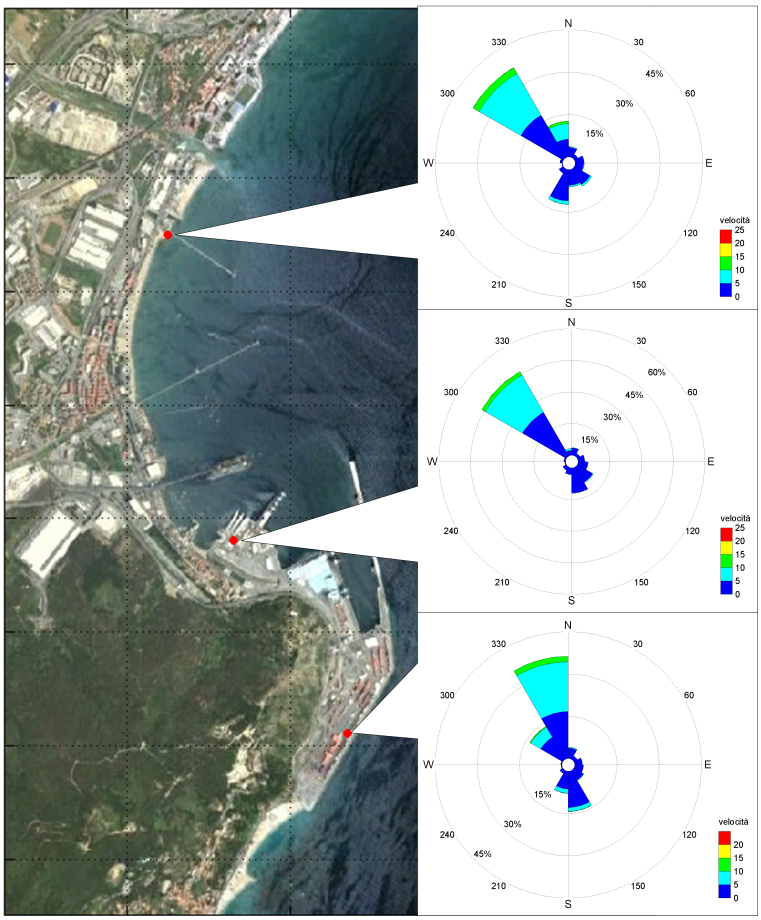


Figura 4.18: Rosa dei venti nel Porto di Vado, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

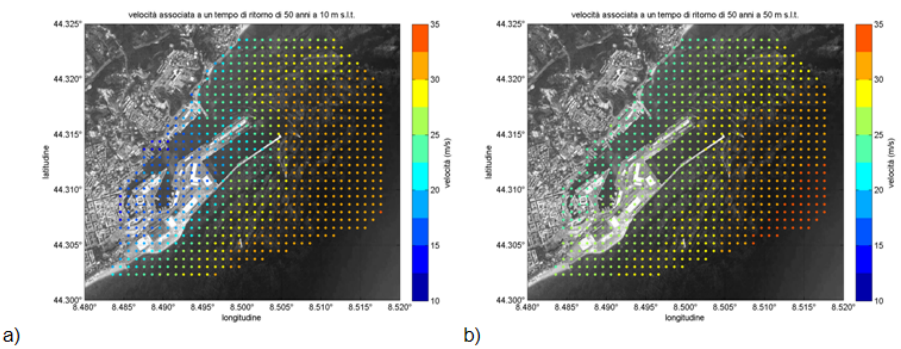


Figura 4.19: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Savona, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

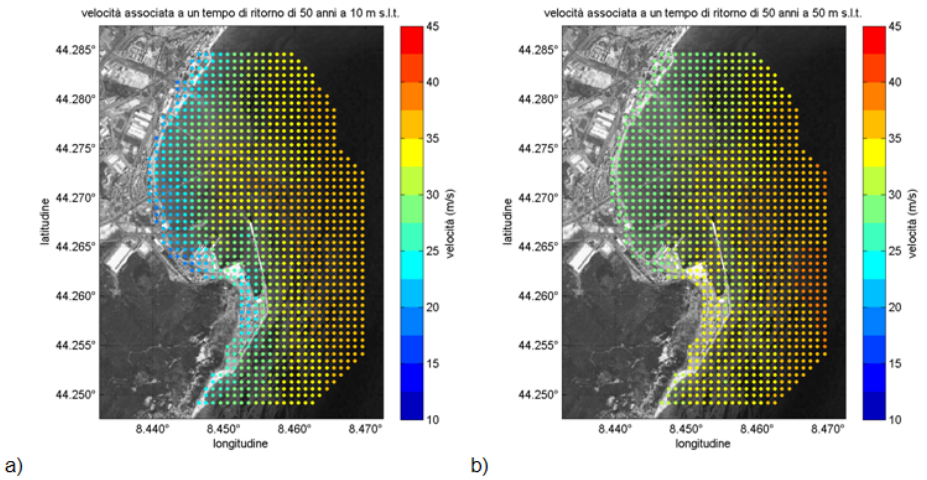


Figura 4.20: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Vado alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

portuali sono interessate da velocità estreme intorno a 22 m/s nel bacino di Savona, superiori a 25 m/s nel Porto di Vado.

4.2.2 Porto di Genova

La Figura 4.21 riporta la mappa della velocità media annuale nel Porto di Genova, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Anche in questo caso, le mappe evidenziano gli effetti dell'orografia e della rugosità, che tendono a ridurre la velocità del vento nei pressi della costa, e un incremento della velocità verso il mare aperto. Si nota una velocità mediamente più elevata nelle zone di Voltri e all'imbocco delle valli principali. Al crescere della quota il flusso del vento tende a risentire meno della rugosità della superficie; tuttavia continua a essere rilevante l'effetto orografico di incremento del vento nelle due zone evidenziate.

La Figura 4.22 illustra le rose del vento in tre punti del porto alla quota di 10 m sul terreno. Le direzioni prevalenti sono i settori di N-NE e S-SE, con una certa variabilità nei diversi punti dell'area portuale, verosimilmente dovuta alla sua grande estensione.

La Figura 4.23 riporta la mappa della velocità media con 50 anni di periodo di ritorno nel Porto di Genova, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Permangono le caratteristiche legate alla rugosità e all'orografia già commentate nei confronti della velocità media annuale. Alla quota di 10 m le banchine portuali sono interessate da velocità estreme comprese tra 20 e 25 m/s.

4.2.3 Porto della Spezia

La Figura 4.24 riporta la mappa della velocità media annuale nel Porto della Spezia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. L'effetto orografico nel

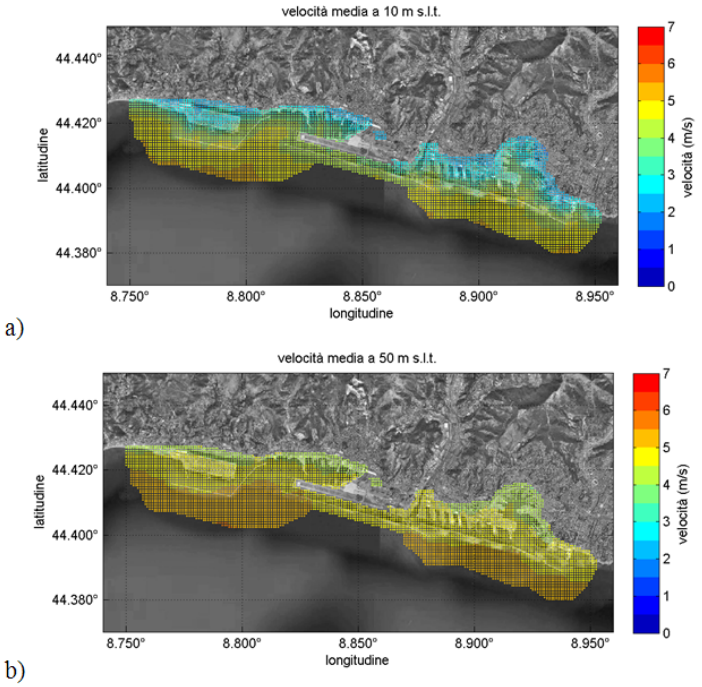


Figura 4.21: Velocità media annua nel Porto di Genova, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

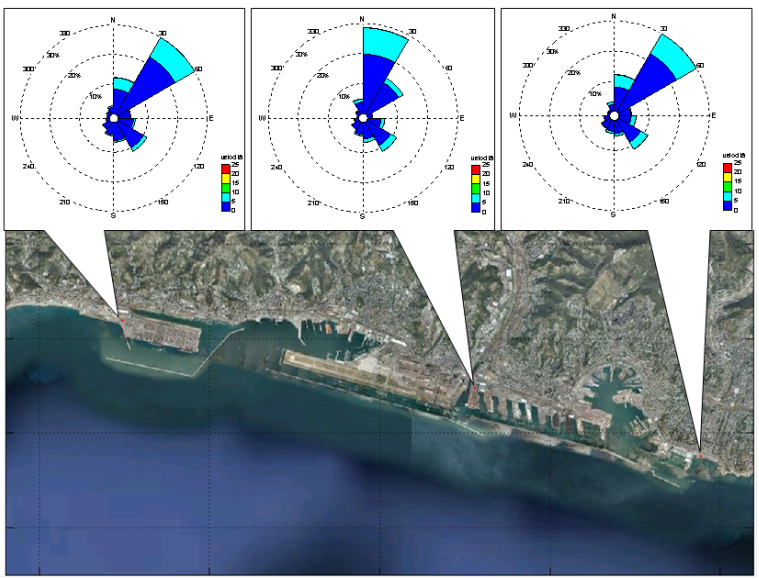


Figura 4.22: Rosa dei venti nel Porto di Genova, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

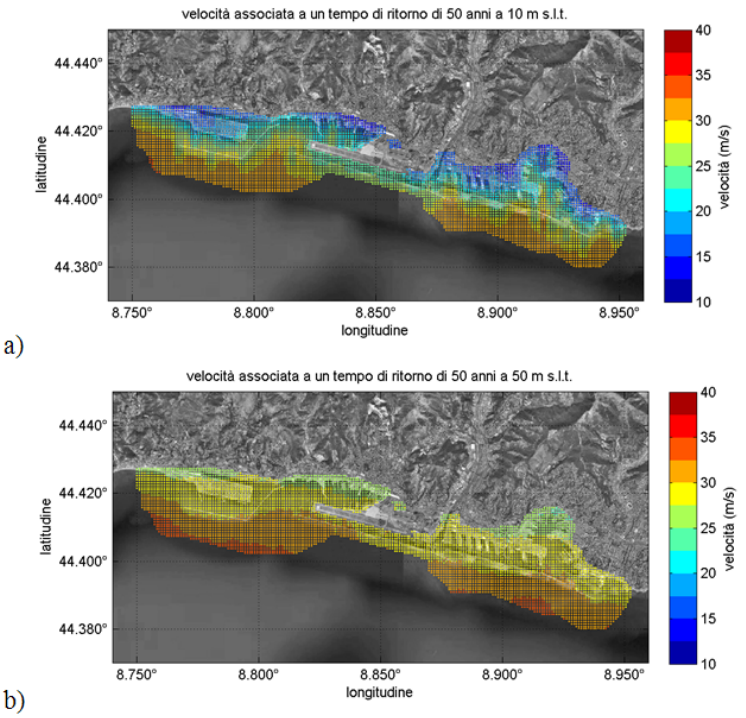


Figura 4.23: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Genova, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

bacino della Spezia ha un effetto molto marcato e protegge la zona portuale in misura rilevante. Si ha quindi una velocità maggiore nella parte centrale del bacino e minore nei pressi della costa. Le banchine maggiormente ventose sono quelle poste nella zona centrale del bacino e in prossimità dell'imboccatura lato ovest. Al crescere della quota si attenuano gli effetti legati alla rugosità superficiale, mentre permane l'effetto schermante legato alla conformazione orografica del bacino.

La Figura 4.25 illustra le rose del vento in tre punti del porto alla quota di 10 m sul livello del terreno. Le direzioni prevalenti sono i settori di N e S. Le variazioni tra i diversi punti del bacino si concentrano prevalentemente nei settori meridionali.

La Figura 4.26 riporta le mappe della velocità massima associata a un periodo di ritorno di 50 anni nel Porto della Spezia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Le velocità estreme confermano le tendenze orografiche già commentate. Alla quota di 10 m le banchine sul ramo est tendono ad avere velocità estreme intorno a 20 m/s, mentre in alcune zone nella parte centrale e nel ramo ovest del porto si possono superare 25 m/s.

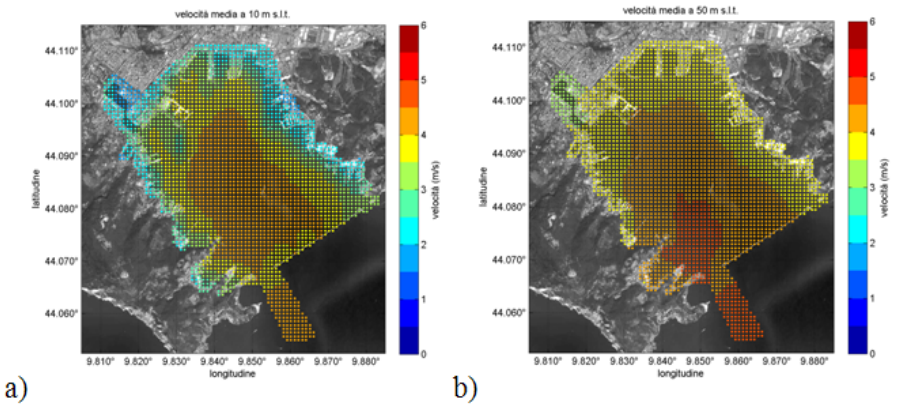


Figura 4.24: Velocità media annua nel Porto della Spezia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

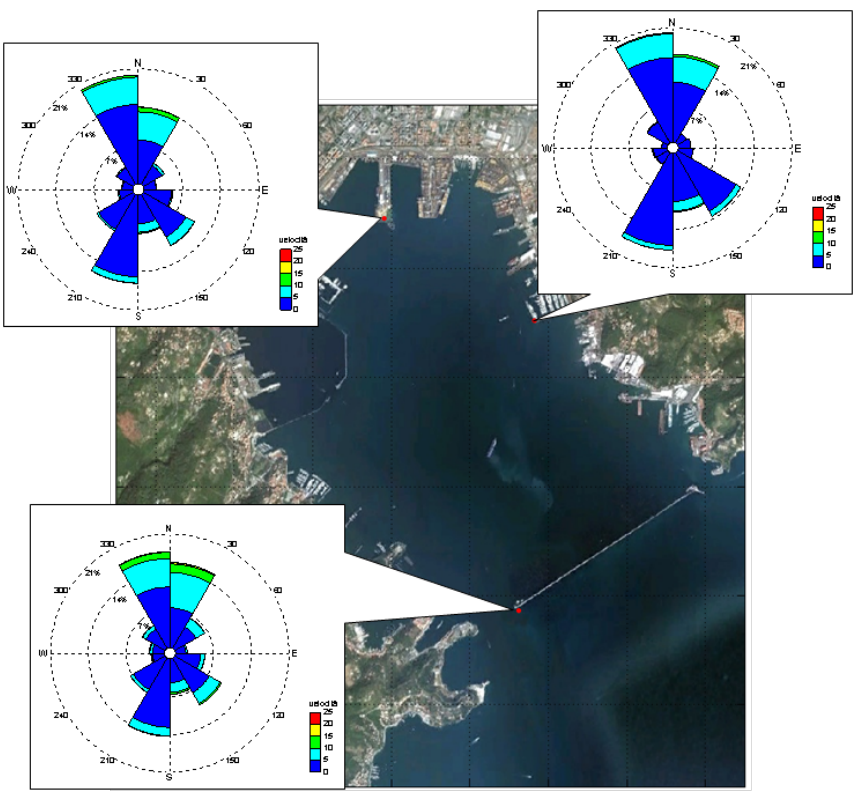


Figura 4.25: Rosa dei venti nel Porto della Spezia, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

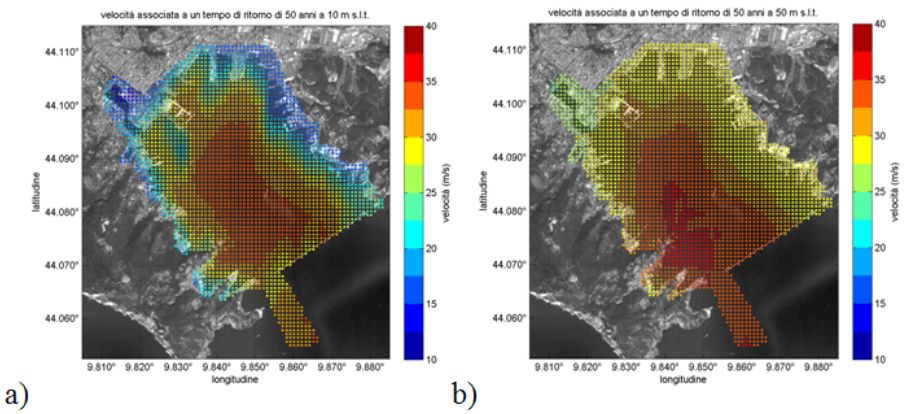


Figura 4.26: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto della Spezia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

4.2.4 Porto di Livorno

La Figura 4.27 riporta la mappa della velocità media annuale nel Porto di Livorno, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Diversamente dagli altri porti analizzati, Livorno si trova in una zona pianeggiante, priva di effetti orografici rilevanti. La diversa ventosità nelle zone portuali è principalmente legata alla distribuzione di rugosità rispetto alle direzioni prevalenti del vento. La mappa alla quota di 10 m evidenzia una maggiore ventosità in corrispondenza della zona che va dalla vasca di colmata e attraversa le sponde ovest ed est della Darsena Toscana. La differenza, tuttavia, tende ad attenuarsi al crescere della quota, poiché negli strati più alti il flusso del vento risente meno della rugosità della superficie.

La Figura 4.28 riporta le rose del vento in tre punti dell'area portuale alla quota di 10 m sul livello del terreno. Si evidenzia che il Porto di Livorno è prevalentemente soggetto a venti da E e da SO. Si nota anche una lieve rotazione delle direzioni prevalenti nelle zone a sud del Porto.

La Figura 4.29 riporta le mappe della velocità massima associata a un periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Livorno, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Le velocità estreme sulle banchine si mantengono a livelli inferiori rispetto a quelle degli altri porti considerati, presentando alla quota di 10 m valori compresi tra 20 e 22 m/s in quasi tutti i punti, fatta eccezione per la zona della vasca di colmata.

4.2.5 Porto di Bastia

La Figura 4.30 riporta la mappa della velocità media annuale nel Porto di Bastia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Gli effetti orografici e di rugosità danno luogo a due fasce omogenee di valori, relative alla costa e al mare aperto. Tale caratteristica è legata alla conformazione orografica del territorio e permane alle diverse quote analizzate.

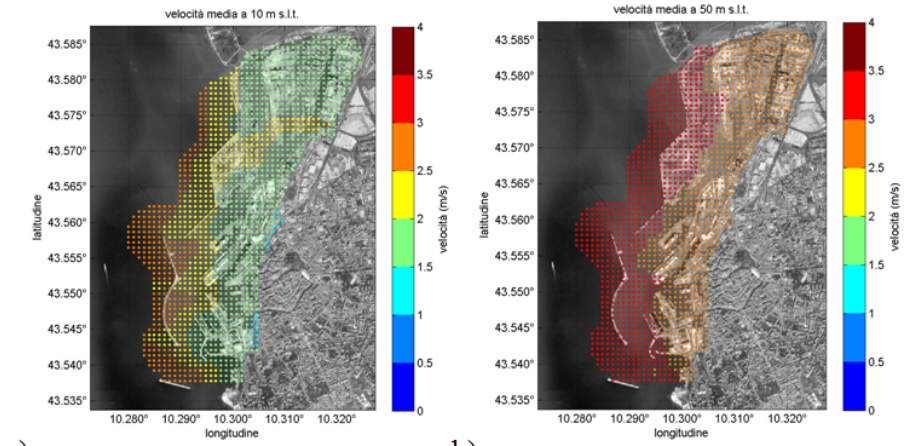


Figura 4.27: Velocità media annua nel Porto di Livorno, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

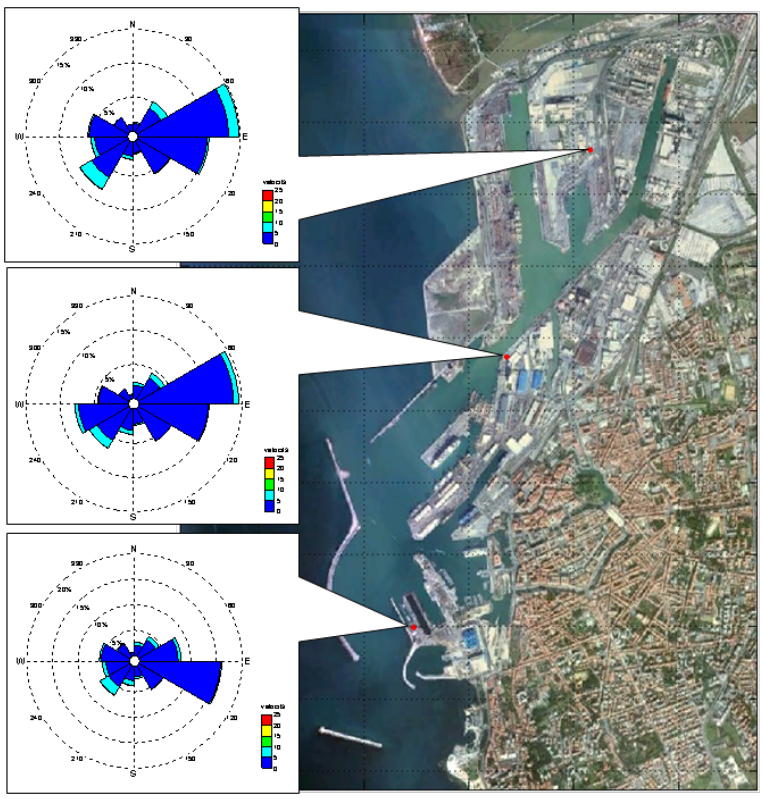


Figura 4.28: Rosa dei venti nel Porto di Livorno, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

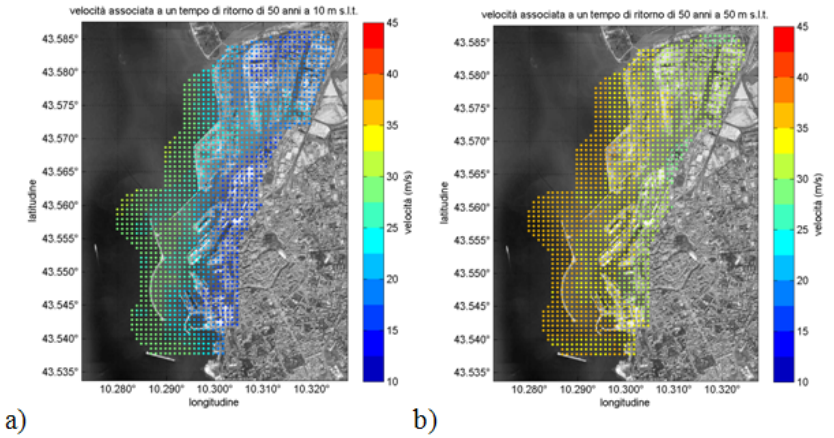


Figura 4.29: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Livorno, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

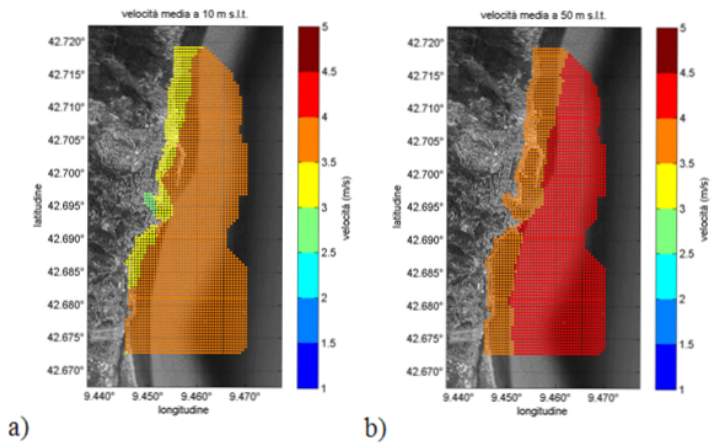


Figura 4.30: Velocità media annua nel Porto di Bastia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

La Figura 4.31 riporta le rose del vento in tre punti dell'area portuale alla quota di 10 m sul livello del terreno. In quest'area prevale nettamente la direzione di provenienza da SO, con poche variazioni nei diversi punti del porto, vista anche la piccola estensione dell'area.

La Figura 4.32 riporta le mappe della velocità massima associata a un periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Bastia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno. Rispetto alle mappe di velocità media, la gradazione di valori è maggiore, ma avviene sempre per fasce parallele alla linea di costa. I valori che caratterizzano le banchine portuali sono maggiori rispetto a quelli ottenuti negli altri porti, assestandosi,

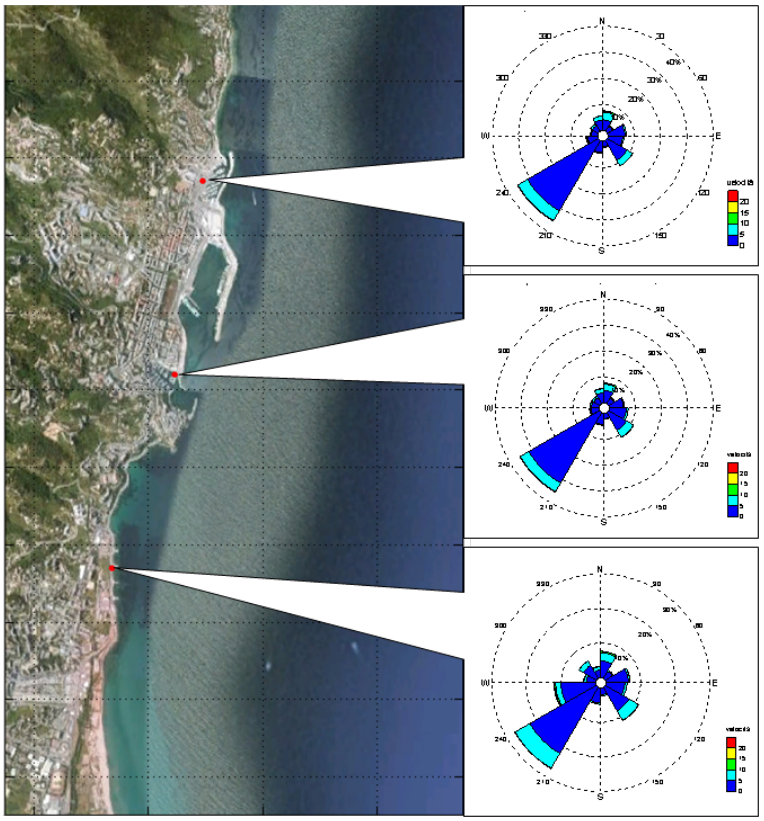


Figura 4.31: Rosa dei venti nel Porto di Bastia, in tre differenti punti griglia alla quota di 10 m sul livello del terreno.

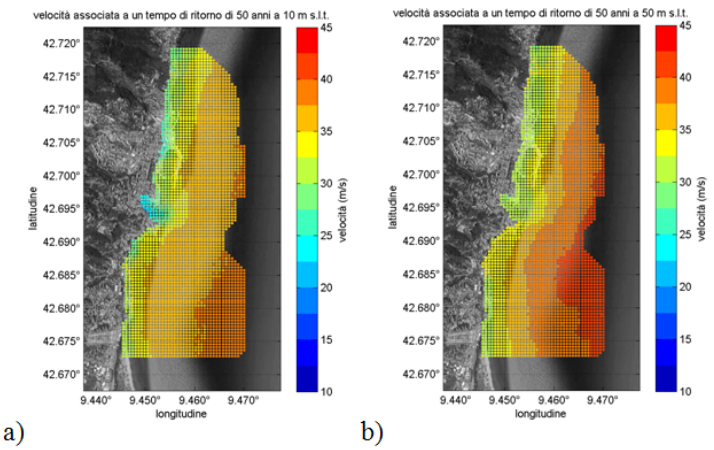


Figura 4.32: Velocità massima associata a periodo di ritorno di 50 anni nel Porto di Bastia, alla quota di 10 m (a) e 50 m (b) sul livello del terreno.

alla quota di 10 m, intorno a 30 m/s.

4.2.6 Validazione

L'affidabilità delle stime statistiche ottenute dipende principalmente da tre fattori: l'affidabilità degli strumenti e delle basi dati delle stazioni storiche di partenza, l'attendibilità dei metodi di simulazione e trasformazione numerica della velocità media e della direzione del vento dalle stazioni storiche ai porti e, dove è attuata, la precisione dell'operazione di media pesata tra diverse stazioni storiche di partenza. Per quanto concerne il primo fattore, sono adottate tutte le strategie possibili di validazione (Paragrafo 4.1.2). Nei riguardi del secondo fattore sono eseguiti controlli basati sul trasferimento incrociato dei dati di diverse stazioni storiche (Paragrafo 3.4.1). Il terzo fattore è studiato ponendo a confronto le distribuzioni dei dati misurati dagli anemometri della rete portuale con quelle dei dati stimati, nello stesso punto, mediante trasferimento dagli anemometri delle stazioni storiche. Poiché il sistema di monitoraggio portuale (Capitolo 2) non ha ancora fornito dati sufficienti alla caratterizzazione probabilistica completa del campo di vento, né in termini di valori correnti né tantomeno in termini di estremi, tale confronto va inteso come puramente preliminare e limitato alle rose dei venti. In taluni casi l'esito del confronto conduce a correzioni locali delle stime statistiche.

A titolo di esempio, la Figura 4.33 riporta la coppia di rose dei venti relative all'anemometro 1 del Porto di Livorno, ottenute dalle stime delle stazioni storiche considerate (a) e dai dati misurati dall'anemometro portuale (b); analogamente la Figura 4.34 riporta la corrispondente coppia di rose dei venti relative all'anemometro 4 del Porto di Vado. I diagrammi mostrano una tendenza analoga, pur evidenziando alcune differenze imputabili sia ai difetti di modellazione sia alla scarsità dei dati disponibili; negli esempi considerati sono disponibili, rispettivamente, 294 e 253 giorni di registrazioni. La ripetizione di tali confronti consentirà un affinamento sempre maggiore dei modelli di trasferimento e stime statistiche sempre più affidabili.

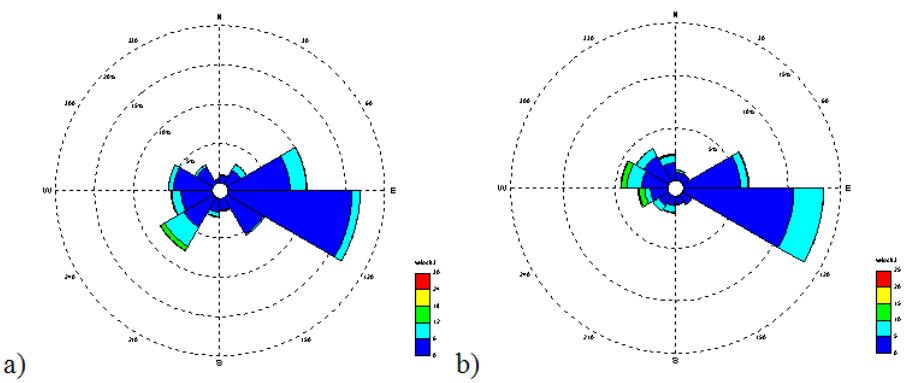


Figura 4.33: Rosa dei venti in corrispondenza dell'anemometro 1 nell'area portuale di Livorno, ottenuta dalle stime delle stazioni storiche (a) e dai dati misurati dall'anemometro portuale (registrazione di 294 giorni) (b).

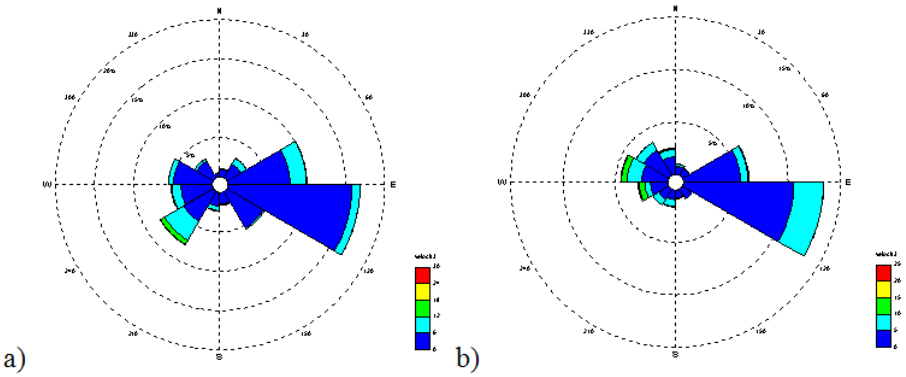


Figura 4.34: Rosa dei venti in corrispondenza dell'anemometro 4 nell'area portuale di Vado, ottenuta dalle stime delle stazioni storiche (a) e dai dati misurati dall'anemometro portuale (registrazione di 253 giorni) (b).

4.3 Prospettive e potenzialità di sviluppo

Coerentemente con gli obiettivi del progetto, le mappe statistiche del vento rivestono notevole importanza per la gestione e la pianificazione delle aree portuali. Offrono inoltre varie prospettive e potenzialità di sviluppo volte al loro impiego per sviluppare settori inesplorati dal presente progetto. Fra questi spiccano le azioni e gli effetti del vento sulle costruzioni e sui container impilati, il potenziale energetico eolico e la dispersione in atmosfera di sostanze inquinanti o polverose.

La disponibilità di modelli dettagliati dei campi di vento associati alla probabilità di occorrenza dei venti estremi è un elemento essenziale per sviluppare criteri razionali di calcolo delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni portuali, in primo luogo le gru, gli scaricatori, le torri faro e le turbine eoliche.

Le norme tecniche esprimono la velocità del vento di progetto attraverso due famiglie di grandezze associate, rispettivamente alla ventosità territoriale a grande scala e alle caratteristiche locali del sito esaminato. La ventosità territoriale a grande scala è quantificata dalla velocità di riferimento del vento, cioè la velocità media del vento su 10 minuti, a 10 m di altezza sul suolo, su un terreno pianeggiante e omogeneo con lunghezza di rugosità $z_0 = 0.05$ m, e con periodo di ritorno $R = 50$ anni. Le caratteristiche locali del sito esaminato sono definite attraverso la scabrezza e la topografia del terreno. Partendo da tali elementi, le norme ricostruiscono profili della velocità media del vento, dell'intensità della turbolenza e della velocità di picco ispirati a modelli di calcolo semplificati.

Peraltro le stesse norme tecniche raccomandano, ove sia possibile, di superare tali valutazioni di prima approssimazione mediante specifiche indagini statistiche e modelli di calcolo dettagliati che tengano conto della direzione di provenienza del vento e della rugosità e topografia del terreno che circonda la costruzione in un raggio adeguato. I modelli numerici e le mappe statistiche sviluppate nel presente progetto rappresentano un esempio tanto tipico quanto avanzato di ciò che le norme raccomandano di fare. Essi possono evitare l'adozione di velocità del vento eccessivamente elevate, riducendo

i costi di realizzazione, ed evidenziare per contro le situazioni che richiedono maggiore prudenza, garantendo quindi la sicurezza necessaria. Possono inoltre fornire indicazioni di grande utilità per minimizzare il rischio di ribaltamento dei container impilati, soprattutto di quelli più leggeri, posti a quote elevate e in siti esposti.

A titolo di esempio, la Figura 4.35 riporta il rapporto fra i valori della velocità media del vento a 10 m di altezza sul terreno e con 50 anni di periodo di ritorno, ricavati dalle analisi descritte in questo capitolo e forniti dalla norma tecnica vigente. I valori minori di 1 corrispondono a stime normative a favore di sicurezza, quelli maggiori di 1 indicano la necessità d'incrementare le stime di norma. La Figura 4.35a, riferita al Porto di Livorno, evidenzia come la norma sovrastimi sistematicamente la velocità del vento, almeno del 10%; ricordando che le azioni di progetto sulle costruzioni sono proporzionali al quadrato della velocità, l'uso dei risultati ottenuti consente un risparmio notevole, in termini economici, sulle opere da realizzare. Questa tendenza è contraddetta nel Porto di Vado (Figura 4.35b), dove la norma fornisce, in alcune aree ai piedi del promontorio, valori insufficienti a garantire la sicurezza delle costruzioni.

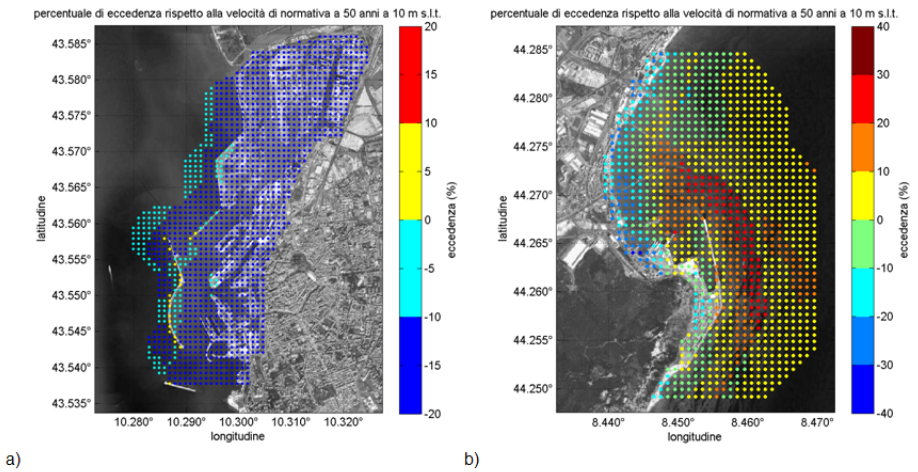


Figura 4.35: Eccedenza rispetto ai valori attuali di normativa della velocità massima associata a un periodo di ritorno di 50 anni, alla quota di 10 m sul livello del terreno, nei Porti di Livorno (a) e di Vado (b).

In maniera duale, la disponibilità di modelli dettagliati dei campi di vento associati alla probabilità di occorrenza dei venti correnti è un elemento essenziale per sviluppare criteri razionali di scelta delle turbine e dei siti più idonei a sfruttare il potenziale eolico delle aree portuali. Questo tema, è sempre più attuale per la realizzazione di parchi eolici on-shore e off-shore che garantiscano, ad esempio, l'elettrificazione delle banchine e uno sviluppo più sostenibile dei porti e delle città che li ospitano. L'opportunità di utilizzare le aree portuali per l'installazione di centrali eoliche è oggi un obiettivo strategico, al quale fanno ricorso numerosi porti di ogni parte del mondo, per trasformare un fenomeno meteorologico da cui è necessario proteggersi, in una risorsa insostituibile di energia rinnovabile.

Poiché la potenza producibile è una funzione della velocità media al cubo, nota la distribuzione della velocità media in un punto e le caratteristiche della turbina eolica da utilizzare, in particolare il suo rendimento è possibile pervenire a una stima dell'energia prodotta in ogni punto, ottimizzando la posizione delle turbine e l'altezza del rotore. A titolo di esempio, la Figura 4.36 mostra una mappa della produzione energetica annua nel Porto di Genova, ottenuta ipotizzando un generatore eolico di potenza nominale 850 kW, con rotore posto a quota 50 m sul livello del terreno.

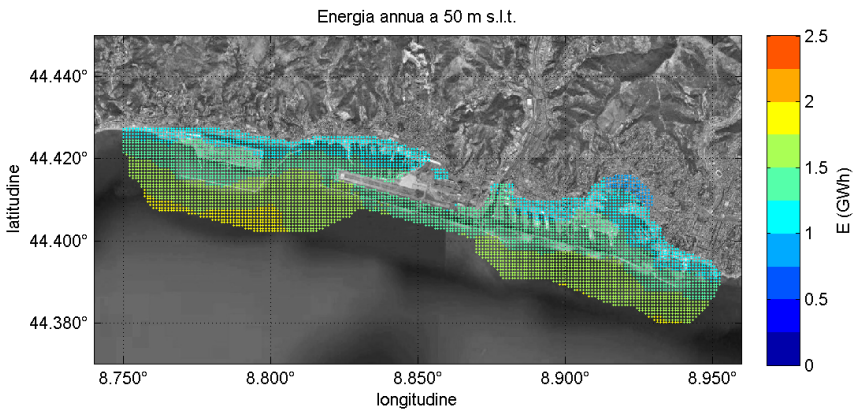


Figura 4.36: Mappa della produzione potenziale di energia annua nel Porto di Genova utilizzando un generatore eolico di potenza nominale 850 kW e rotore a quota 50 m sul livello del terreno.

La realizzazione di modelli dettagliati dei campi di vento è lo strumento basilare per nidificare al loro interno nuovi codici numerici finalizzati a determinare la dispersione degli inquinanti e delle polveri in atmosfera. Inserita in un ambito probabilistico, questa catena modellistica è in grado di identificare la distribuzione di probabilità di ricaduta e dell'accumulo di sostanze inquinanti e polverose nelle aree portuali e nelle città che le ospitano. Inserita in un ambito previsionale, la stessa catena fornisce gli strumenti per anticipare le zone dove, in funzione dei venti attesi, tali concentrazioni saranno più intense e quindi nocive.

5 Previsioni del vento a medio termine

Il sistema di previsione a medio termine del vento sviluppato nell'ambito del progetto "Vento e Porti" consiste in una catena modellistica per la previsione delle condizioni di ventosità nella zona dell'Alto Tirreno ed in particolare nelle aree portuali di Savona, Genova, La Spezia, Livorno e Bastia.

Tale catena modellistica è realizzata mediante l'utilizzo di due modelli matematici: un primo modello meteorologico (WRF) per la previsione del vento sull'Alto Tirreno con una risoluzione orizzontale fino a circa 2 km e un secondo modello (WINDS), utilizzato in cascata al precedente, per la previsione del vento sulle cinque aree portuali con risoluzione orizzontale fino a 80 m nei porti italiani e 50 m nel Porto di Bastia.

Questa catena modellistica, che ha carattere operativo, permette di ottenere ogni giorno una previsione che si estende nel tempo fino a 3 giorni in avanti ed è disponibile con un passo temporale orario. Tale previsione è finalizzata a pianificare lo svolgimento delle attività portuali nell'immediato futuro, individuando le potenziali situazioni di rischio con un anticipo sufficiente a porre in atto azioni di prevenzione e di tutela della sicurezza ed integrità fisica di tutti i soggetti che si trovano nelle aree portuali.

5.1 Modelli per la catena previsionale

Il sistema di previsione a medio termine del vento implementato nell'ambito del progetto "Vento e Porti" si basa su dati meteorologici acquisiti a scala planetaria attraverso il Global Telecommunication System della World Meteorological Organisation (WMO). Tali dati sono utilizzati dal sistema americano denominato Global Forecast System (Paragrafo 5.1.1), che a sua volta fornisce attraverso internet i dati con cui inizializzare i due modelli numerici che costituiscono la catena operativa vera e propria del sistema previsionale del vento sulle aree portuali. I due modelli operativi sono il modello meteorologico WRF (Paragrafo 5.1.2) ed il modello diagnostico WINDS (Paragrafi 3.1.1 e 5.1.3). Questi tre elementi costitutivi del sistema di previsione sono descritti nel seguito.

5.1.1 Global Forecast System

Il Global Forecast System (GFS) è un sistema numerico di previsione del tempo su scala globale, gestito dal National Weather Service del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), che fornisce previsioni meteorologiche su tutta la terra, quattro volte al giorno (alle 00, 06, 12 e 18 UTC[1]), fino a 16 giorni in avanti.

[1]Il Tempo Coordinato Universale (in inglese Coordinated Universal Time, UTC) è il fuso orario di riferimento da cui sono calcolati tutti gli altri fusi orari del mondo. Esso è derivato, e pressoché

Il passo temporale della previsione è di 3 ore, mentre quello spaziale orizzontale è pari a 0.5 gradi in longitudine e latitudine (circa 50 km alle medie latitudini) nei primi 8 giorni di previsione e a 2.5 gradi nei successivi 8 giorni.

Il GFS è in realtá costituito da alcuni sottosistemi: il Global Data Assimilation System (GDAS), il Global Spectral Model (GSM), il Global Ensemble Forecast System ed altri sistemi di rappresentazione grafica delle previsioni e di valutazione delle performance del GFS. Il GDAS, in particolare, si occupa di generare la condizione iniziale da cui far partire la previsione del modello previsionale a scala globale GSM. Tale condizione iniziale consiste in una "fotografia" dello stato dell'atmosfera, riferita ad un preciso istante temporale prefissato (00, 06, 12, 18 UTC), realizzata a partire da misure meteorologiche e da precedenti previsioni del modello GSM attraverso un processo noto come assimilazione dati.

Le misure meteorologiche utilizzate per generare le condizioni iniziali del GSM sono effettuate in modo sparso su tutta la superficie terrestre attraverso stazioni al suolo e misure in mare registrate da boe galleggianti o navi, e in atmosfera mediante radiosondaggi, misure da aereo, satelliti, etc. Questa enorme mole di dati è condivisa a livello globale attraverso un accordo internazionale noto come World Weather Watch Programme, promosso dalla World Meteorological Organisation ed entrato in vigore nel 1963. Del World Weather Watch Programme fanno parte il Global Observing System (Figura 5.1), che consiste in un sistema standardizzato di misurazione dello stato dell'atmosfera costituito fisicamente da una rete internazionale di stazioni di rilevamento a supporto delle diverse attività della WMO tra cui le misure utilizzate per l'assimilazione dati nei modelli meteorologici, ed il Global Telecommunication System (Figura 5.2), che consiste nella rete fisica di connessioni gestite a livello nazionale dai servizi meteorologici nazionali dei paesi membri della WMO e a livello sovranazionale da organizzazioni internazionali come il European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) o la European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) per garantire il trasferimento e lo scambio dei dati meteorologici in maniera rapida ed efficiente.

A partire dalla condizione iniziale ottenuta mediante l'assimilazione dati, il modello GSM produce la previsione meteorologica a 16 giorni. Questa previsione fornisce a sua volta le condizioni iniziali ed al contorno per inizializzare modelli meteorologici a scala regionale. Tali modelli meteorologici sono anche denominati modelli ad area limitata per indicare che operano su domini di simulazione ridotti rispetto alla scala globale. La Figura 5.3 mostra schematicamente la struttura geometrica di un modello a scala globale e di un modello meteorologico ad area limitata nidificato all'interno di quello a scala globale.

Le condizioni iniziali del GFS sono rese disponibili gratuitamente attraverso internet collegandosi ad appositi server del NOAA o di altri istituti di ricerca statunitensi.

5.1.2 Il modello meteorologico WRF

La scelta del modello meteorologico utilizzato nella catena modellistica per la previsione a medio termine del vento è ricaduta sul modello denominato Weather Research

coincidente, dall'orario di Greenwich e per questo talvolta ancora chiamato Greenwich Mean Time (GMT).

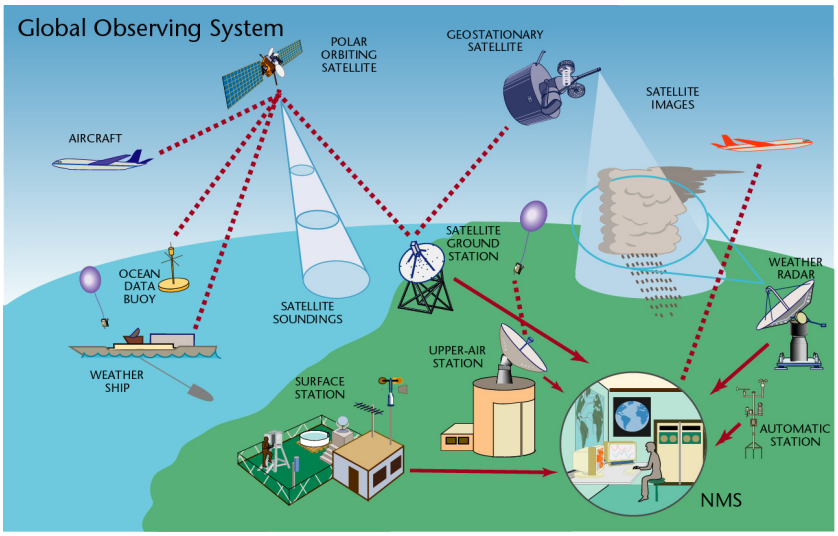


Figura 5.1: Rappresentazione schematica del Global Telecommunication System: i dati meteorologici raccolti mediante diversi sitemi di misura dello stato dell'atmosfera sono raccolti localmente e trasferiti ai rispettivi servizi meteorologici nazionali (immagine tratta dal sito `http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html`).

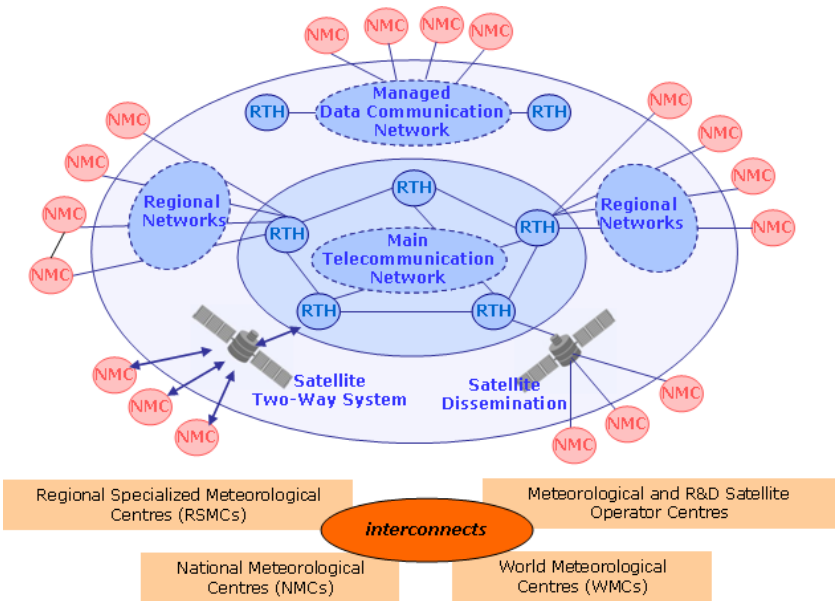


Figura 5.2: Rappresentazione schematica del Global Telecommunication System: un insieme di satelliti per telecomunicazione e connessioni fisiche regionali costituiscono la Main Telecommunication Network attraverso la quale avviene lo scambio dei dati meteorologici raccolti dai servizi meteorologici nazionali (immagine tratta dal sito `http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/GTS/index_en.html`).

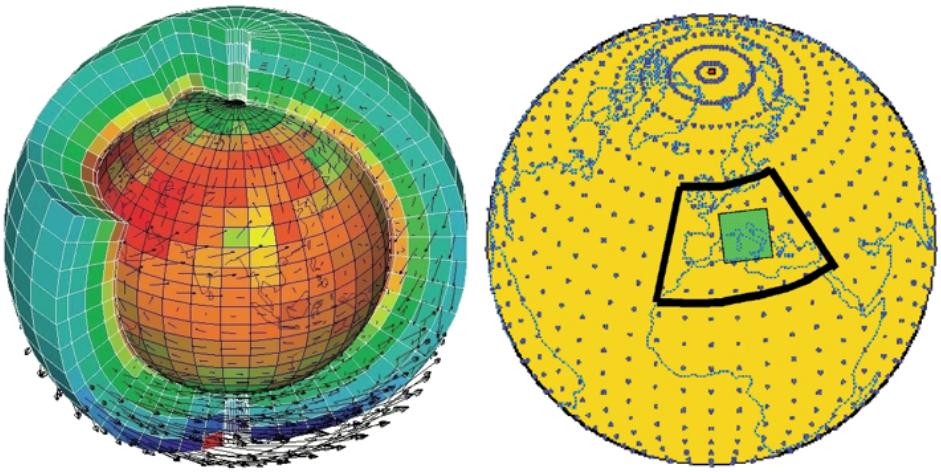


Figura 5.3: Un esempio di discretizzazione geometrica tridimensionale di un modello meteorologico a scala globale (sinistra) e la nidificazione di un modello meteorologico ad area limitata con due livelli di zoom rispettivamente centrati sul Mediterraneo e sull'Italia (destra).

and Forecast (WRF), sviluppato attraverso una collaborazione tra numerosi enti scientifici americani (National Center for Atmospheric Research's (NCAR); Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM); Division, National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA); National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e Earth System Research Laboratory (ESRL); Department of Defense's Air ForceWeather Agency (AFWA) e Naval Research Laboratory (NRL); Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS) dell'Università dell'Oklahoma; Federal Aviation Administration (FAA)). Il modello WRF è un modello numerico per la previsione del tempo atmosferico progettato per applicazioni sia di ricerca sia operative. Esso è mantenuto e supportato come un community model, per facilitarne l'utilizzo a livello internazionale per ricerca, operatività e insegnamento. È uno strumento versatile in grado di operare su un ampio spettro di scale spaziali e temporali che vanno dalle decine di metri fino alle migliaia di chilometri.

La Figura 5.4 riporta schematicamente il funzionamento del modello. Per far partire il modello occorre una serie di informazioni relative sia allo stato dell'atmosfera (gridded data) sia alle caratteristiche della porzione di superficie terrestre da simulare, come l'orografia o la tipologia di uso del suolo (terrestrial data).

Queste informazioni sono elaborate da un sistema di pre-processing (WRF Preprocessing System, WPS) che converte i formati dei file, filtra le informazioni e interpola i dati necessari al modello WRF su una opportuna griglia tridimensionale all'interno del dominio di simulazione. A partire da questi dati il modello meteorologico calcola la previsione secondo le modalità, in termini di orizzonte e passo temporale della previsione, definite dall'utente. Come già detto, nel caso presente la previsione è calcolata con un orizzonte temporale pari a 3 giorni ed un passo temporale pari

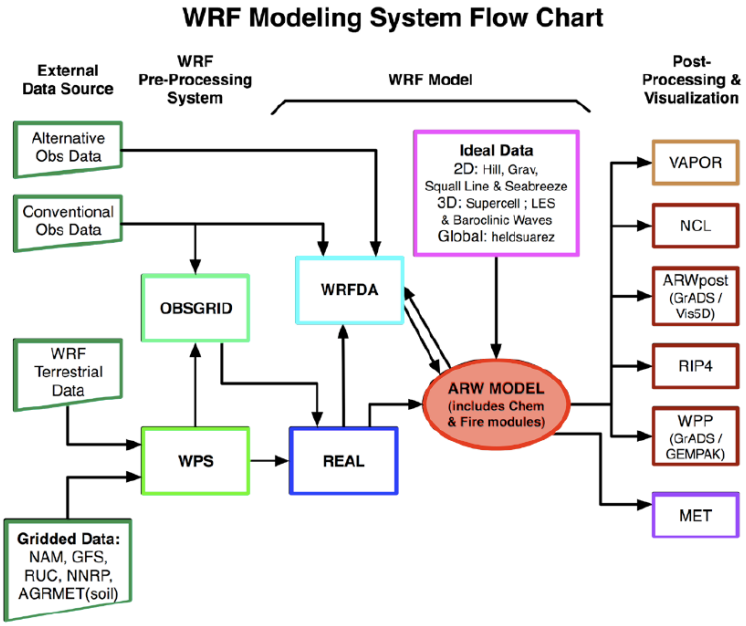


Figura 5.4: Diagramma di flusso relativo al funzionamento del modello WRF (da WRF-ARW Version 3 Modelling System User's Guide, 2011).

ad 1 ora. Una volta eseguita la previsione, i risultati numerici prodotti dal modello sono ulteriormente rielaborati per calcolare alcune variabili derivate e per convertire opportunamente i formati di uscita dei file (WRF post-processing, WPP).

5.1.3 Il modello WINDS

Il secondo modello matematico utilizzato nella catena modellistica previsionale per la simulazione a medio termine del vento è il modello a conservazione di massa WINDS. Nell'ambito di tale catena previsionale il modello WINDS è utilizzato per eseguire il cosiddetto *downscaling* dei campi di vento ad alta risoluzione sulle aree portuali. Tale modello è già stato utilizzato, nell'ambito del progetto "Vento e Porti", per simulare i campi di vento nelle aree portuali di Savona, Genova, La Spezia, Livorno e Bastia. Nel Paragrafo 3.1.1 il modello è descritto dettagliatamente sia per quanto riguarda gli input necessari ad eseguire le simulazioni, sia dal punto di vista procedurale, cosicché si rimanda a tale sezione per gli aspetti relativi alla sua implementazione operativa.

Nel caso presente la principale differenza rispetto al lavoro descritto nel Capitolo 3 riguarda le modalità di inizializzazione di WINDS. Originariamente i codici a conservazione di massa erano applicati per diagnosticare lo stato dinamico dell'atmosfera a partire da osservazioni del vento prese, in un determinato istante, in punti discreti nello spazio. Oggigiorno, una pratica comune per costruire il campo di vento iniziale necessario al modello diagnostico in assenza di, o in aggiunta a, misure di campo, con-

siste nell'uso sistematico delle uscite a più bassa risoluzione dei modelli di previsione meteorologica (si veda, ad esempio, Chandrasekar et al. 2003; Furunoa et al. 2004). All'interno della presente catena modellistica operativa, WINDS è nidificato a valle del modello meteorologico WRF e da questo prende i campi di vento come condizione iniziale (campo di *first-guess*) per ottenere i campi di vento finali mass-consistent ad alta risoluzione sulle aree portuali. Con questo tipo di inizializzazione il modello WINDS è in grado di tenere in considerazione anche condizioni di vento locale dovute ad effetti termici quali brezze, venti di caduta, formazione di termiche, etc. purché queste siano presenti nel campo di vento prodotto dal modello meteorologico.

5.2 Struttura della catena modellistica

La catena modellistica costituita dai modelli WRF e WINDS permette di ottenere una previsione deterministica del vento a medio termine, cioè su un orizzonte temporale di alcuni giorni. La procedura che porta all'elaborazione delle previsioni si realizza mediante 3 corse del modello meteorologico WRF e 2 corse del modello WINDS a risoluzione spaziale via via crescente su domini computazionali sempre più ridotti. In questo modo, è possibile focalizzare l'attenzione sulle aree portuali, risolte con grande dettaglio, pur tenendo in considerazione le forzanti meteorologiche a grande scala.

5.2.1 Procedura di realizzazione delle previsioni

La procedura attraverso la quale sono realizzate le previsioni del vento a medio termine può essere schematizzata come segue[2]:

1) ogni giorno, il modello meteorologico WRF, inizializzato con i dati del modello GFS, produce il forecast[3] dello stato dell'atmosfera a partire dalle ore 00 UTC fino a +72 h di previsione (3 giorni) con passo temporale pari a 1 h, su un dominio geografico comprendente tutto il Mar Mediterraneo ad una risoluzione spaziale di circa 20 km sia in longitudine che in latitudine (si veda la Figura 5.5);

2) un primo nesting del modello WRF produce il forecast dello stato dell'atmosfera sull'orizzonte temporale 00 UTC +72 h con passo 1 h, su un dominio geografico corrispondente a tutta l'Italia (Corsica compresa) con una risoluzione spaziale di circa 6.7 km sia in longitudine sia in latitudine (si veda la Figura 5.6);

3) un secondo nesting del modello WRF produce il forecast dello stato dell'atmosfera sull'orizzonte temporale 00 UTC +72 h con passo 1 h, su un dominio geografico corrispondente all'Alto Tirreno, con una risoluzione spaziale di circa 2.2 km sia in longitudine che in latitudine (si veda la Figura 5.7);

4) il modello WINDS produce il forecast dei campi di vento sull'orizzonte temporale 00 UTC +72 h con passo 1 h, sulle 5 macroaree delle aree portuali con risoluzione di circa 230 m (si veda il Capitolo 3) (si veda la Figura 5.8);

[2] Il processo di "nidificazione" di un modello meteorologico a più alta risoluzione in una porzione del dominio di simulazione di un modello a risoluzione più bassa viene comunemente indicato con il termine inglese *nesting*.

[3] Il termine inglese *forecast*, usato comunemente in meteorologia, significa "previsione".

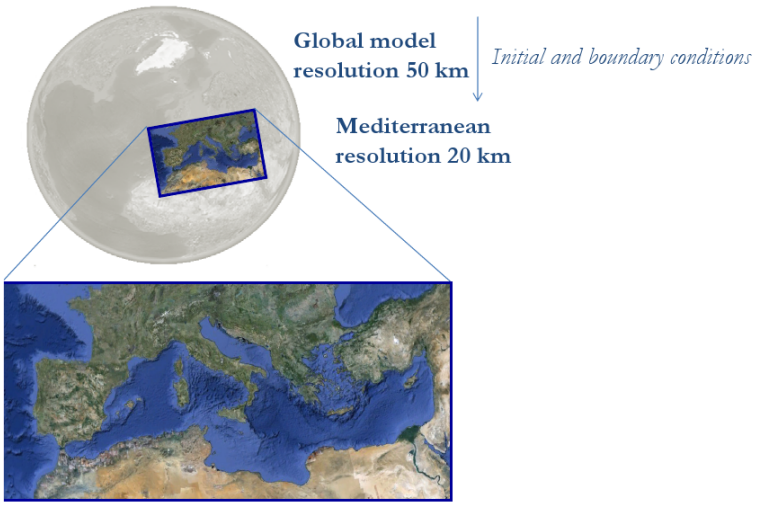


Figura 5.5: Rappresentazione del primo dominio di simulazione del modello meteorologico WRF, comprendente tutto il Mar Mediterraneo. Tale dominio prende le condizioni iniziali e al contorno dal modello globale GFS.

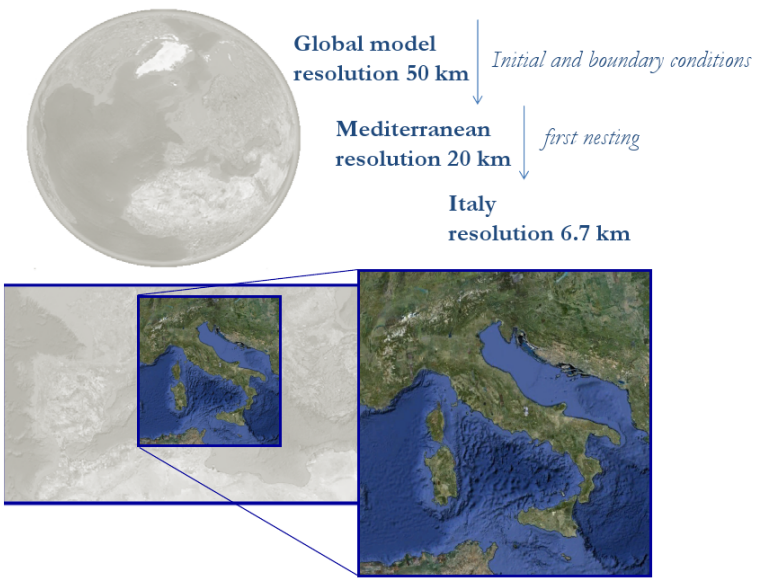


Figura 5.6: Rappresentazione del secondo dominio di simulazione del modello meteorologico WRF, comprendente tutta l'Italia e la Corsica. Tale dominio prende le condizioni iniziali e al contorno dal primo dominio di simulazione di WRF.

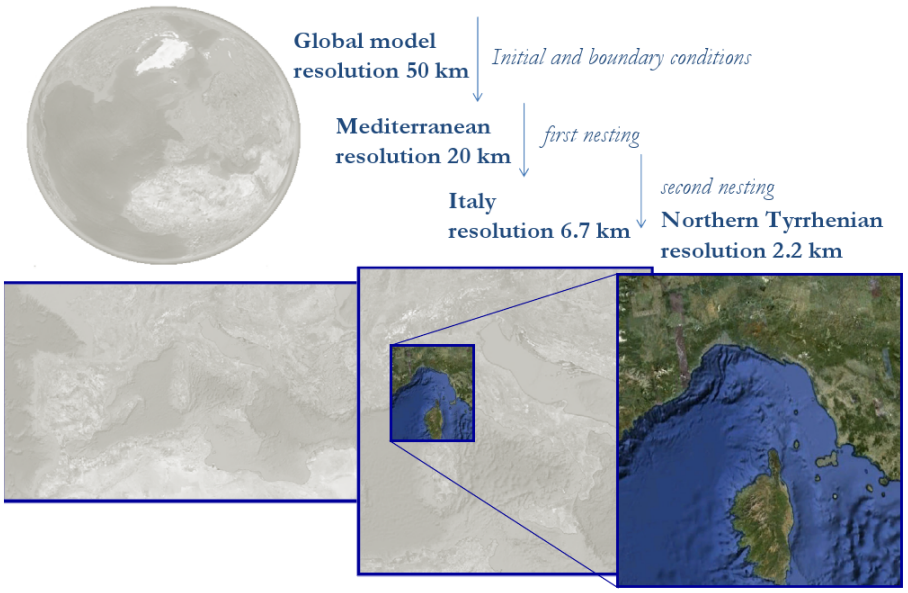


Figura 5.7: Rappresentazione del terzo dominio di simulazione del modello meteorologico WRF, comprendente l'Alto Tirreno. Tale dominio prende le condizioni iniziali e al contorno dal secondo dominio di simulazione di WRF.

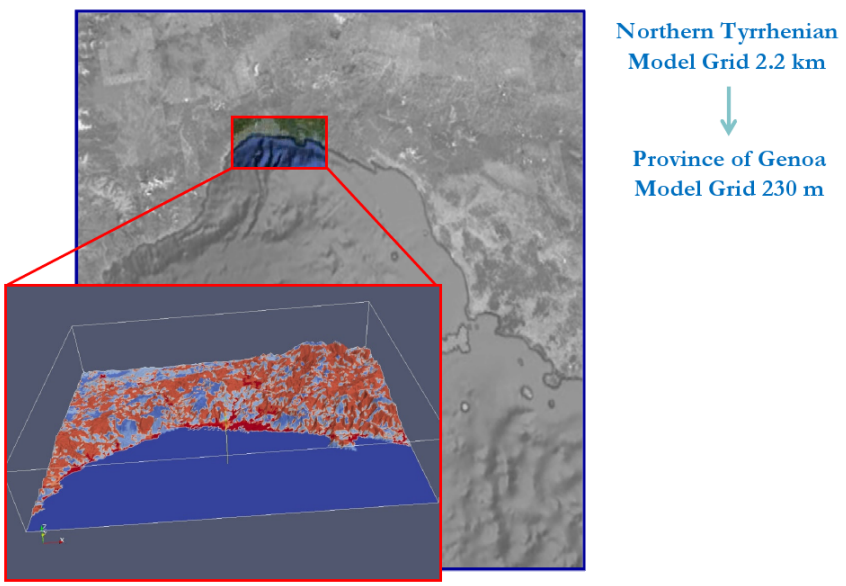


Figura 5.8: Rappresentazione del primo dominio di simulazione del modello WINDS sull'area di Genova, coincidente con la macroarea. Tale dominio prende le condizioni iniziali e al contorno dal terzo dominio di simulazione di WRF.

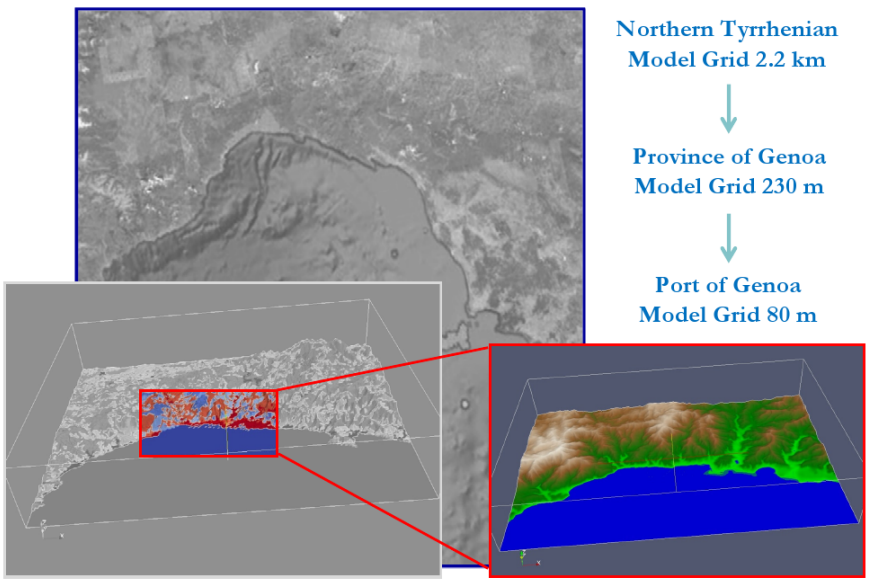


Figura 5.9: Rappresentazione del secondo dominio di simulazione del modello WINDS sull'area di Genova, coincidente con la microarea. Tale dominio prende le condizioni iniziali e al contorno dal secondo dominio di simulazione di WINDS.

5) uno zoom del modello WINDS produce il forecast dei campi di vento sull'orizzonte temporale 00 UTC +72 h con passo 1 h, sulle 5 microaree delle aree portuali con risoluzione di circa 80 m per i porti italiani e 50 m per Bastia (si veda il Capitolo 3) (si veda la Figura 5.9).

La Tabella 5.1 riassume le caratteristiche principali dei modelli utilizzati nella catena operativa, riportando, a titolo di esempio, i due domini di simulazione di WINDS utilizzati sull'area del Porto di Genova. I domini di simulazione di WINDS sono differenti per ogni porto considerato. Per una descrizione delle macroaree e delle microaree implementate sui cinque porti si veda il Capitolo 3.

5.2.2 Implementazione della catena previsionale

L'implementazione della catena operativa costituita dal modello meteorologico WRF, compresi i suoi due livelli di nesting, e dal modello WINDS, compreso lo zoom a più alta risoluzione sulle aree portuali, è iniziata, presso il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Genova, nei primi mesi del 2011. La catena previsionale è attiva su una macchina da calcolo dotata di 8 processori situata presso il DICAT e collegata ad internet attraverso la intranet del dipartimento. Il modello WRF, che è sviluppato per poter essere eseguito in modalità parallela mediante il protocollo MPICH2, è in grado di sfruttare pienamente le capacità computazionali della suddetta macchina da calcolo. Il modello WINDS invece, che non

Previsione			
	Inizio	Fine	Passo (h)
WRF 20	00 UTC	+72 h	1
WRF 7	00 UTC	+72 h	1
WRF 2	00 UTC	+72 h	1
WINDS 240	00 UTC	+72 h	1
WINDS 80	00 UTC	+72 h	1

Dominio di simulazione			
	Longitudine (°)	Latitudine (°)	Risoluzione (km)
Mediterraneo	-12.31 - 38.05	27.92 - 49.46	20
Italia	4.63 - 20.41	35.76 - 48.59	6.7
Alto Tirreno	7.17 - 11.19	41.45 - 45.27	2.2
Macroaree	-	-	0.24
Microaree	-	-	0.08*

* Si noti che la risoluzione spaziale nel caso del Porto di Bastia è pari a 0.05 km (50 m).

Tabella 5.1: Riepilogo delle caratteristiche principali, in termini di orizzonte temporale e dominio spaziale di simulazione, dei modelli numerici previsionali utilizzati nella catena operativa delle previsioni del vento a medio termine. Gli estremi dei domini di simulazione delle macroaree e microaree non sono indicati in quanto dipendono dal porto considerato.

possiede capacità di calcolo parallelo, può comunque essere eseguito su un processore dedicato per ogni porto e quindi girare contemporaneamente sui cinque porti.

Ogni giorno, alle ore 22 locali (ora italiana) la procedura che controlla la catena operativa previsionale esegue un download automatico dal server statunitense `http://nomads.ncep.noaa.gov/` delle condizioni iniziali del GFS. Successivamente, alle ore 00 locali, una seconda procedura avvia la catena operativa. La previsione del modello meteorologico WRF richiede circa 12 ore di tempo macchina a cui si aggiungono circa 3 ore per le previsioni del modello WINDS. La Figura 5.10 schematizza la procedura di avvio della catena operativa e la modalità di esecuzione delle simulazioni. In pratica, il sistema di previsione a medio termine del vento calcola la previsione delle condizioni di ventosità presso ognuno dei cinque porti del progetto per tre volte per ogni singolo giorno: la prima volta con 2 giorni di anticipo come previsione da +49 a +72 ore (banda azzurra in Figura 5.10), la seconda volta con un giorno di anticipo come previsione da +25 a +48 ore (banda lilla), la terza volta in tempo quasi reale come previsione da +1 a +24 ore (banda viola). Questa metodologia permette all'utente di rendersi conto di un possibile evento intenso e potenzialmente pericoloso con un preavviso di quasi 3 giorni, e di controllare se tale previsione sia confermata nei giorni successivi, in modo da poter mettere in atto in tempo utile eventuali procedure di pre-allerta o quanto necessario ad affrontare la situazione. Si noti inoltre che il sistema di previsione a medio termine del vento così congegnato risulta complementare al sistema di previsione a breve termine del vento, che servirà a monitorare l'evento intenso previsto durante le sue varie fasi e a seguirne l'evoluzione in tempo reale.

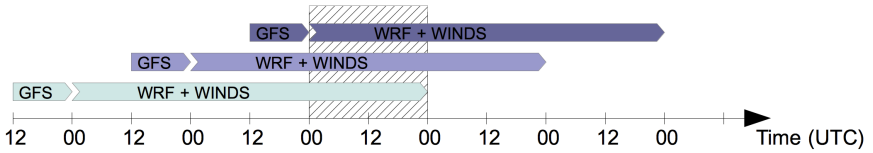


Figura 5.10: Rappresentazione schematica della procedura di lancio della catena operativa previsionale dei campi di vento a medio termine: le condizioni iniziali del GFS corrispondenti alle 12 UTC vengono utilizzate per inizializzare il modello meteorologico WRF (ed in cascata anche WINDS) che elabora la previsione del vento a partire dalle 00 UTC successive fino a +72 h (3 giorni). Il diagramma mostra anche la parziale sovrapposizione (area tratteggiata) che si viene a creare ogni giorno tra la previsione più aggiornata (viola) e le previsioni del giorno precedente (lilla) e di due giorni prima (azzurro).

5.2.3 Base dati delle simulazioni dei modelli

Le corse dei modelli WRF e WINDS producono ogni giorno circa 5 e 30 GB di dati in formato binario, rispettivamente. Dal 1 agosto 2011 parte di questi dati è archiviata insieme alle condizioni iniziali del modello GFS in un'apposita base dati sulla macchina da calcolo. In particolare, il mantenimento in locale di un anno di dati del solo modello meteorologico richiede uno spazio disco dedicato pari a circa 2 TB. L'archiviazione delle simulazioni del modello WINDS richiederebbe invece quasi 11 TB di dati all'anno, inoltre tali simulazioni possono essere ripetute con tempi di calcolo ragionevoli avendo a disposizione le simulazioni del modello meteorologico. Per questi motivi le simulazioni del modello WINDS non sono attualmente archiviate nella suddetta base dati.

5.3 Esempi di simulazioni

Nella presente sezione sono mostrati, a titolo di esempio, alcuni campi di vento simulati mediante il sistema di previsione a medio termine nelle cinque aree portuali di Genova, Savona e Vado Ligure, La Spezia, Livorno e Bastia. Tali campi di vento sono relativi ad un singolo caso studio di un evento meteorologico di particolare rilevanza nell'ambito delle finalità del progetto, verificatosi nell'arco temporale compreso nella base dati delle previsioni dei modelli WRF e WINDS.

Per la descrizione dell'evento meteorologico scelto, sono state utilizzate: l'analisi tecnica meteorologica del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, le mappe meteorologiche[4] prodotte dal Centro Funzionale Meteoidrologico di Protezione Civile

[4]A differenza della catena modellistica del CFMI–PC, che permette di analizzare tutte le variabili atmosferiche di maggiore interesse per la previsione del tempo meteorologico ed è specificamente finalizzata alla previsione degli eventi alluvionali, e in generale delle catene modellistiche utilizzate per finalità analoghe a quelle del CFMI–PC, la catena meteorologica sviluppata nel contesto del progetto "Vento e Porti" ha come principale finalità la previsione ad alta risoluzione del vento e per questo

(CFMI–PC) della Regione Liguria e immagini satellitari.

5.3.1 Evento dell'11 aprile 2012

Nella mattinata dell'11 aprile 2012 si è verificato sull'Alto Tirreno un evento meteorologico caratterizzato da venti di libeccio particolarmente intensi, determinato dalla formazione di una area di convergenza al suolo che ha dato origine a temporali locali anche intensi sull'area compresa tra le Cinque Terre e la Lunigiana. In particolare, intorno alle 9:20 ora locale si è manifestato sul Golfo della Spezia un evento temporalesco di particolare intensità che ha causato la caduta di alcuni container impilati nella zona del Molo Fornelli.

Il quadro sinottico del 10 aprile vedeva un flusso in quota fortemente meridiano sull'Europa centrale e sull'area Egea a causa di due profonde saccature che richiamavano aria fredda polare verso le latitudini mediterranee (Figura 5.11).

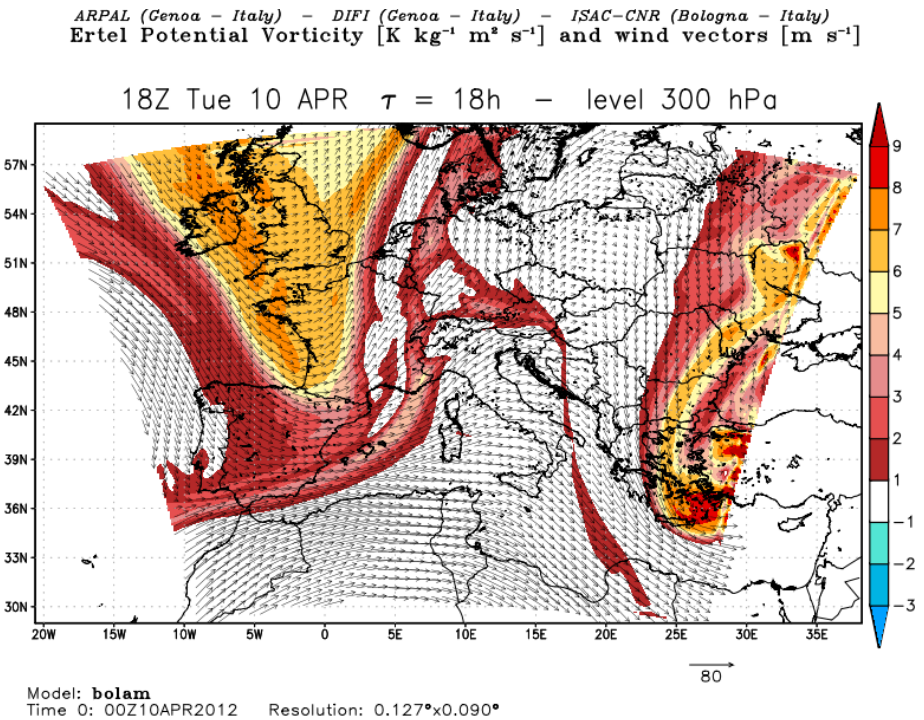


Figura 5.11: Campo di vorticitá potenziale (shaded contour) e del vento (vettori) sulla superficie geopotenziale a 300 hPa sull'Europa e sul Mediterraneo previsto per le ore 18 UTC del 10 aprile 2012. Le due aree di elevata vorticità individuano le due profonde saccature che richiamano aria fredda polare verso i bacini del Mediterraneo occidentale ed orientale (immagine prodotta dal Centro Funzionale Meteoidrologico di Protezione Civile della Regione Liguria).

motivo è stata interfacciata con il modello WINDS che permette di ottenere risoluzioni orizzontali attualmente ancora non raggiungibili con i soli modelli meteorologici.

Nella notte tra 10 e 11 aprile il sistema frontale associato alla saccatura che insisteva sull'Europa centrale si è spostata gradualmente dalle isole britanniche verso l'Italia, con una irruzione di aria fredda che a partire dalle regioni nord occidentali tendeva ad interessare gradualmente, durante l'arco della giornata dell'11 aprile, l'intera penisola. Inizialmente, il fronte caldo associato a questa nuova perturbazione atlantica proveniente da nordovest ha causato, nella notte tra 10 e 11 aprile un graduale aumento della nuvolosità sulle regioni settentrionali, con precipitazioni diffuse a partire dal settore occidentale, in estensione a quello orientale con precipitazioni anche a carattere nevoso. Dopo il passaggio del fronte caldo, nella prima mattinata dell'11 aprile, è sopraggiunto sull'Italia il fronte freddo, accompagnato da venti sostenuti, che ha portato sulle regioni settentrionali e su tutto il settore tirrenico marcate condizioni di instabilità e precipitazioni a prevalente carattere temporalesco. In particolare, verso le ore 7 UTC, corrispondente alle 9 ora locale, la zona dell'Alto Tirreno tra la Liguria e la Toscana è raggiunta da una linea di convergenza pre-frontale, chiaramente visibile nell'immagine satellitare riportata in Figura 5.12 come una linea più densa di nubi e caratterizzata da maggiore riflettività che si estende in direzione meridiana a partire dalla Sardegna e soprattutto dai crinali della Corsica fino alle Alpi nordoccidentali, che ha determinato su queste regioni consistenti valori di precipitazione cumulata ed un intensificarsi del flusso dai quadranti meridionali.

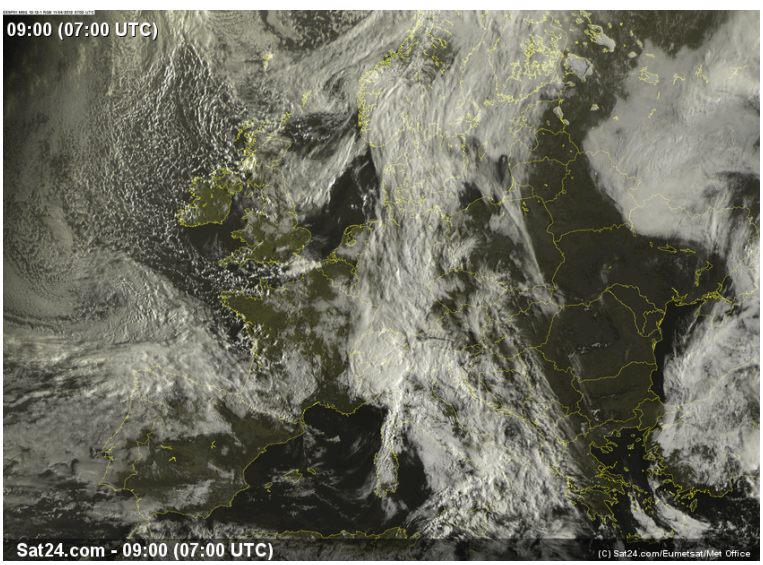


Figura 5.12: Immagine satellitare nel visibile della nuvolosità sull'Europa relativa alle ore 7 UTC (corrispondente alle 9 ora locale italiana) dell'11 aprile 2012. Si noti la spessa linea di nubi che si estende dalla Corsica fino alle Alpi nordoccidentali.

Tale zona di convergenza è stata anche correttamente prevista, in termini temporali e spaziali, sia dalla catena modellistica del CFMI–PC, come dimostra la mappa dei venti al suolo riportata in Figura 5.13, sia dal modello meteorologico utilizzato nella catena previsionale del progetto "Vento e Porti", mostrato in Figura 5.14. Quest'ulti-

ma immagine mostra una linea di convergenza del vento al suolo che si sviluppa sul Mar Tirreno tra Livorno e La Spezia, quasi esattamente in corrispondenza della linea nuvolosa rilevata nell'immagine satellitare in Figura 5.12. Pur trattandosi nel primo caso di dati simulati e nel secondo di osservazioni dirette delle condizioni atmosferiche, quest'ultime rilevate successivamente e indipendentemente dalle simulazioni del modello meteorologico, i due dati mostrano un notevole grado di accordo, sia dal punto di vista della localizzazione spaziale dell'evento sia per quanto riguarda l'ora in cui l'evento si è verificato. Tale accordo, che risulta particolarmente buono in questo specifico caso, non rappresenta comunque un'eccezione, poiché la qualità delle previsioni meteorologiche che si può raggiungere con i moderni sistemi di previsione consente di ottenere elevati livelli di affidabilità nella maggior parte delle situazioni. I risultati dell'analisi sistematica dell'affidabilità del sistema di previsione a medio termine del vento, per quanto riguarda sia il modello meteorologico WRF sia il modello WINDS, è riportata nel successivo Paragrafo 5.4.

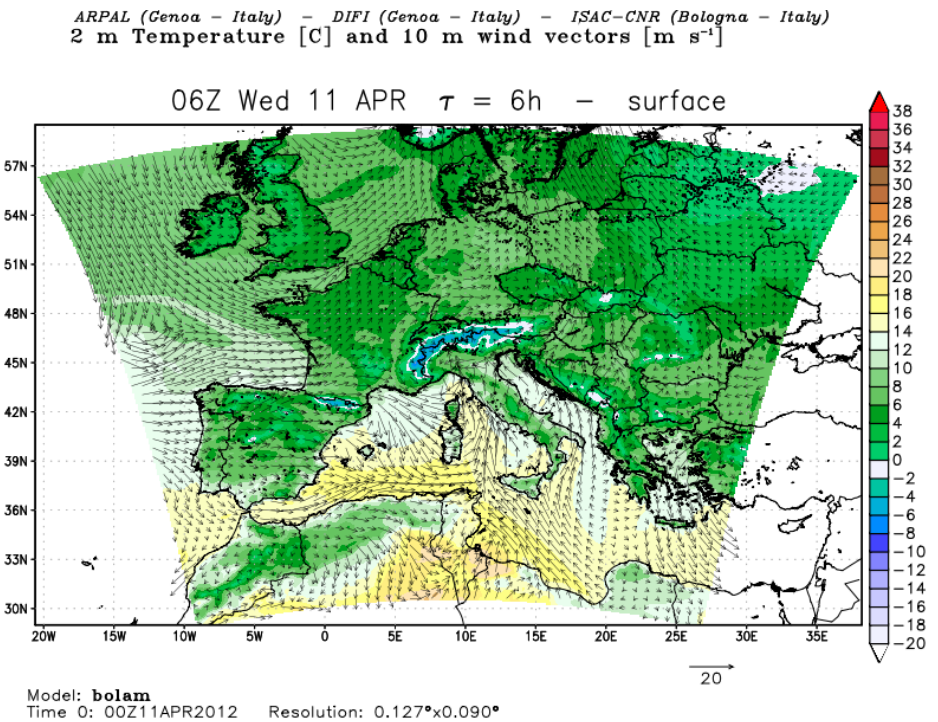


Figura 5.13: Campo di temperatura a 2 m dal suolo (shaded contour) e del vento a 10 m dal suolo (vettori) sull'Europa e sul Mediterraneo previsto per le ore 6 UTC dell'11 aprile 2012. Si noti l'intensificarsi del vento lungo una direttrice sud-nord sull'Alto Tirreno tra la Corsica e la Liguria orientale (immagine prodotta dal Centro Funzionale Meteoidrologico di Protezione Civile della Regione Liguria).

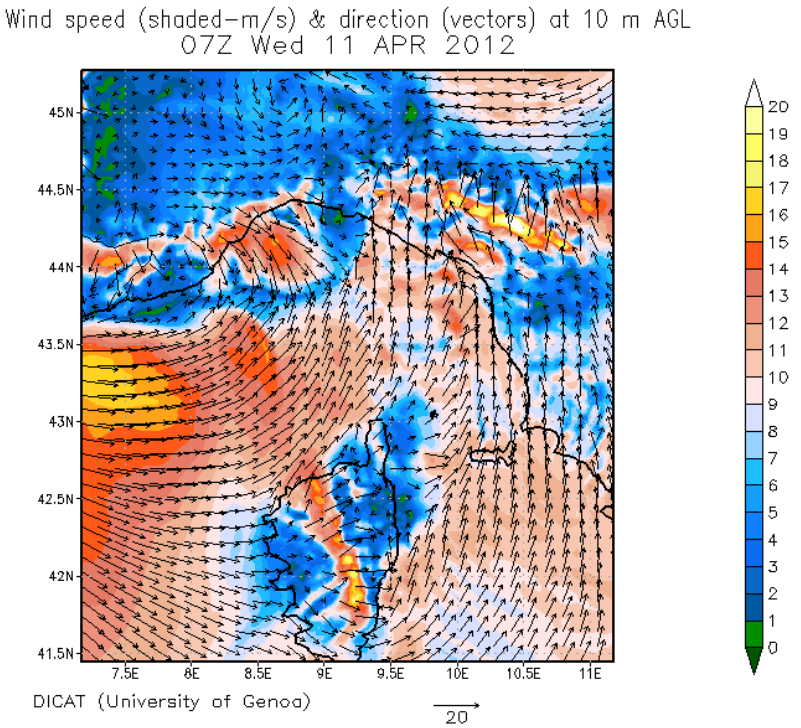


Figura 5.14: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sull'Alto Tirreno per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012. Si noti la linea di convergenza del vento che si sviluppa sul Mar Tirreno tra Livorno e La Spezia.

5.3.2 Simulazione sulle aree portuali

A scala di bacino dell'Alto Tirreno, la situazione anemologica prevista dal modello WINDS sulle microaree portuali per la mattina dell'11 aprile 2012 era caratterizzata da venti di tramontana sui Porti di Savona (Figura 5.15) e Genova (Figura 5.16), di scirocco alla Spezia (Figura 5.17) e Livorno (Figura 5.18), e da condizioni di calma di vento su Bastia (Figura 5.19). Anche questa rotazione dei venti di quasi 180 gradi, dai quadranti settentrionali sul Mar Ligure occidentale ai quadranti meridionali sul Mar Ligure orientale, risulta concorde con l'avvicinamento di un fronte freddo, come descritto in precedenza. La bassa intensità del vento a Bastia è invece dovuta all'effetto di schermatura causato dai rilievi montuosi sopravento alla città, dove sono infatti previsti venti fino a quasi 15 m/s.

Il confronto tra la previsione del modello meteorologico WRF sull'Alto Tirreno (Figura 5.14) alla risoluzione orizzontale di 2.2 km (Tabella 5.1) e le previsioni del modello WINDS sulle microaree portuali (Figure 5.15–5.19) a 80 m di risoluzione (50 m nel caso di Bastia) mette in luce alcune caratteristiche peculiari della catena operativa del sistema di previsione a medio termine del vento messo a punto nell'ambito del presente progetto rispetto alle catene meteorologiche convenzionalmente utilizzate

presso i centri per la previsione del tempo.

Le simulazioni del modello WINDS sono guidate dal modello meteorologico che ha il compito di fornirgli le condizioni dello stato dell'atmosfera previste ad un certo istante temporale: la rotazione del vento nelle cinque aree portuali descritta sopra mostra un esempio di come l'informazione relativa ad un evento meteorologico a scala sinottica che possa essere simulato soltanto mediante un modello meteorologico, ad esempio l'approssimarsi alla nostra penisola di un fronte freddo e la sua interazione con i rilievi alpini, sia utilizzata come forzante principale dei campi di vento che si manifestano ad una scala spaziale molto più locale.

D'altra parte, le caratteristiche di dettaglio del campo di vento simulato sulle aree portuali sono invece frutto dell'utilizzo del modello WINDS e della sua capacità di descrivere con grande accuratezza la corretta posizione della linea di costa, i rilievi orografici e le diverse tipologie di utilizzo del suolo che risultano invece piuttosto approssimati nel modello meteorologico. Ad esempio sulla terra il vento mostra un'alternanza di intensità che ricalca i principali crinali e le valli interposte tra essi. Questa elevata disomogeneità spaziale si perde quasi completamente in mare aperto, dove la superficie ritorna ad essere piatta e permane soltanto l'effetto della forzante a più grande scala guidata dal modello meteorologico, mentre sotto costa le principali differenze sono dovute agli effetti schermanti o di incanalamento dell'orografia rispetto alla direzione di provenienza del vento.

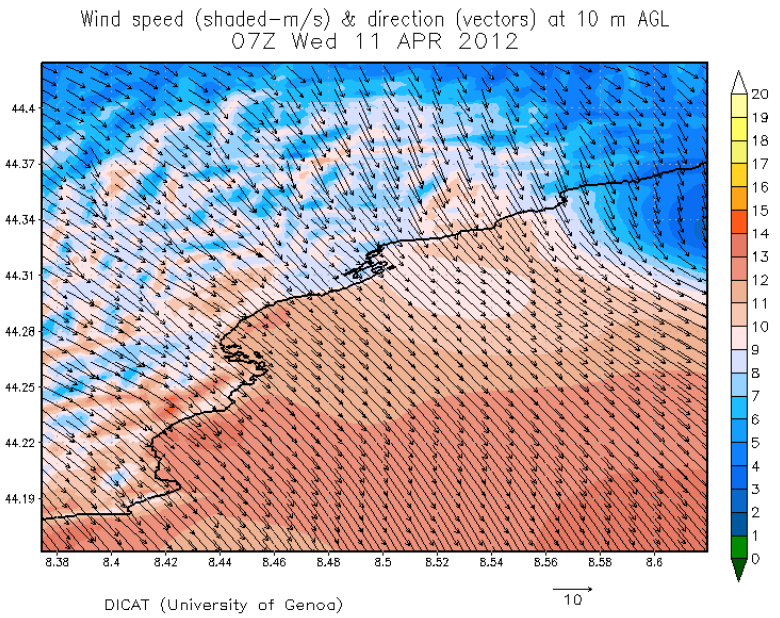


Figura 5.15: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sul Porto di Savona per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012.

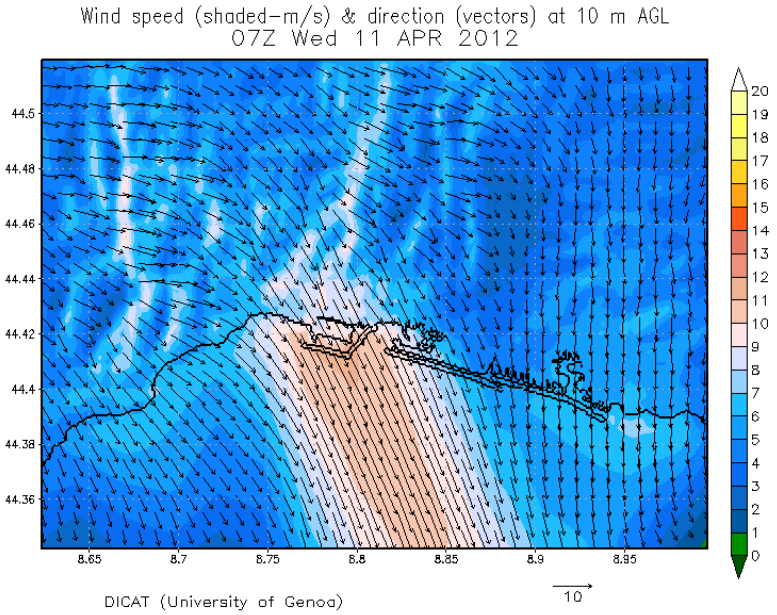


Figura 5.16: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sul Porto di Genova per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012.

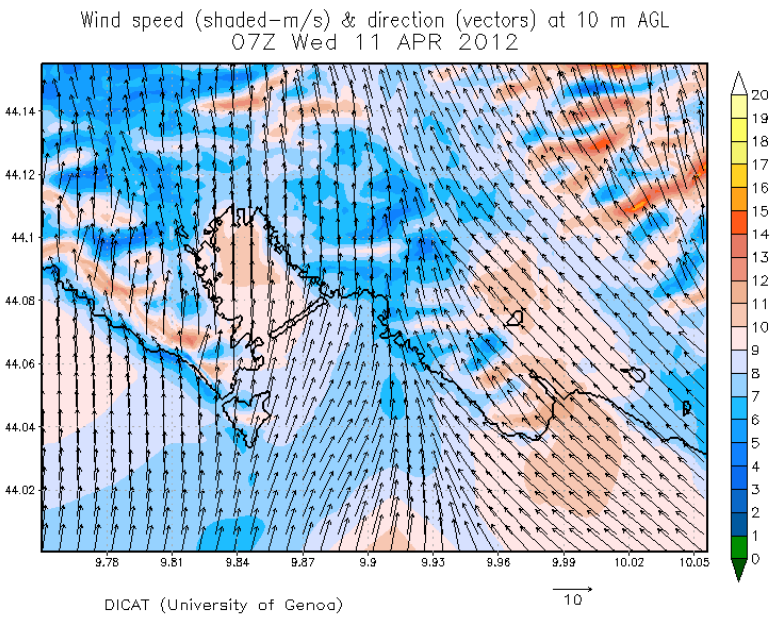


Figura 5.17: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sul Porto della Spezia per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012.

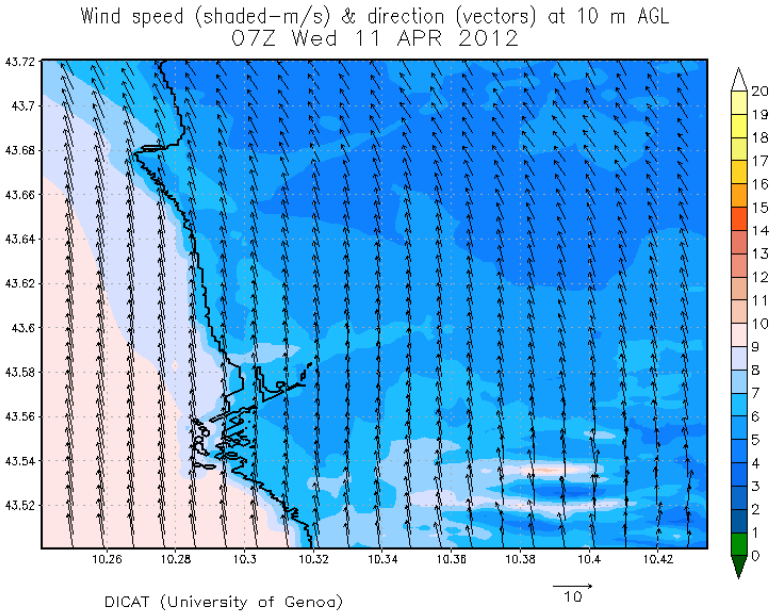


Figura 5.18: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sul Porto di Livorno per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012.

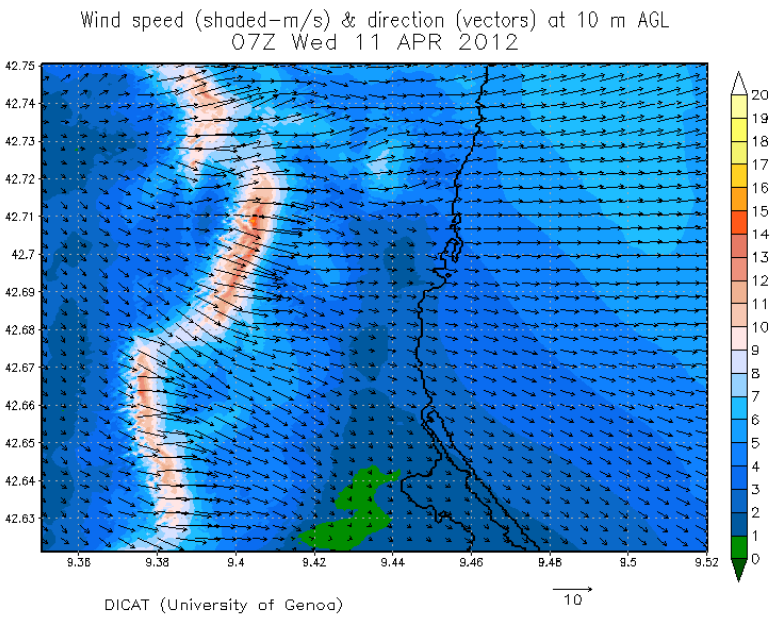


Figura 5.19: Intensità (shaded contour) e direzione del vento a 10 m dal suolo (vettori) previsto sul Porto di Bastia per le ore 7 UTC dell'11 aprile 2012.

5.4 Affidabilità dei modelli

Salvo casi patologici o situazioni di predicibilità estremamente bassa dell'atmosfera, le previsioni dei modelli meteorologici sono in grado oggigiorno di predire con una ragionevole accuratezza il tempo meteorologico in un intervallo temporale di alcuni giorni. Tipicamente, un orizzonte previsionale pari a tre giorni è considerato come il limite oltre il quale l'accuratezza della previsione tende a ridursi rapidamente e quindi richiede particolare attenzione per la sua corretta interpretazione. D'altra parte, anche le primissime ore di previsione sono spesso considerate non particolarmente attendibili perché il modello meteorologico richiede un certo tempo per "digerire" correttamente le condizioni iniziali imposte dal modello a circolazione globale (Paragrafo 5.1.1) e sviluppare nel proprio dominio di calcolo quei processi fisici che non potevano essere risolti dal modello a scala spaziale più grande. Tenendo conto di questo duplice aspetto della previsione, l'affidabilità dei modelli cresce rapidamente nelle prime ore di previsione, per poi diminuire gradualmente dal secondo o dal terzo giorno.

Occorre inoltre precisare cosa si intenda con il termine affidabilità per quanto riguarda i modelli di simulazione a medio termine del vento, in relazione soprattutto alle modalità di utilizzo e di fruizione dei dati previsionali. Per quanto infatti questi modelli siano in grado di seguire l'evolversi nel tempo dei fenomeni meteorologici e di descrivere come questi fenomeni condizionino i campi di vento localmente sulle aree portuali, è ovviamente poco realistico aspettarsi che le previsioni riescano ad essere esattamente in fase con quanto accade nella realtà. In altre parole, se da un lato è sicuramente ragionevole aspettarsi che i modelli riescano a prevedere in termini qualitativi l'arrivo di un evento intenso, come nell'esempio descritto nel Paragrafo 5.3, dall'altro lato non si può pretendere che la precisione temporale e spaziale con cui il modello prevede l'evento sia dell'ordine rispettivamente dei minuti e delle centinaia di metri, soprattutto all'aumentare dell'orizzonte temporale della previsione.

Ad esempio, guardando la Figura 5.17 con attenzione, si può notare che alle ore 7 UTC dell'11 aprile 2012 la zona di convergenza del vento al suolo era prevista dai modelli all'altezza di Lerici. Tale linea di convergenza è probabilmente associata ad un'area attiva di formazione di nubi temporalesche che si sta lentamente spostando verso il Golfo della Spezia. Tipicamente, l'evoluzione di una nube temporalesca prevede una prima fase di crescita della nube ed una successiva fase matura associata a precipitazioni intense e, sovente, a forti venti di caduta caratterizzati da elevata turbolenza e quindi raffiche di vento con intensità anche molto superiori rispetto ai valori medi. In effetti, le misure registrate in questa stessa giornata presso i quattro anemometri della Spezia, riportate in Figura 5.20, mostrano due fasi di vento più intenso dalle 1 UTC fino alle 7:30 UTC e da poco prima le 12 UTC fino a poco dopo 17 UTC, durante le quali le velocità medie (linee rosse) hanno raggiunto o superato i 10 m/s e i 5 m/s, rispettivamente. In particolare, intorno alle 7:20 UTC, tutti i quattro anemometri hanno registrato contemporaneamente un brusco aumento delle velocità medie e al contempo valori di raffica superiori a 30 m/s in tre stazioni su quattro. L'episodio relativo alla caduta dei container nella zona del Molo Fornelli è stato probabilmente causato proprio da queste raffiche straordinariamente intense.

La Figura 5.21 mostra i valori dell'intensità del vento previsti in corrispondenza dei quattro anemometri della Spezia mediante il sistema di previsione a medio termine del

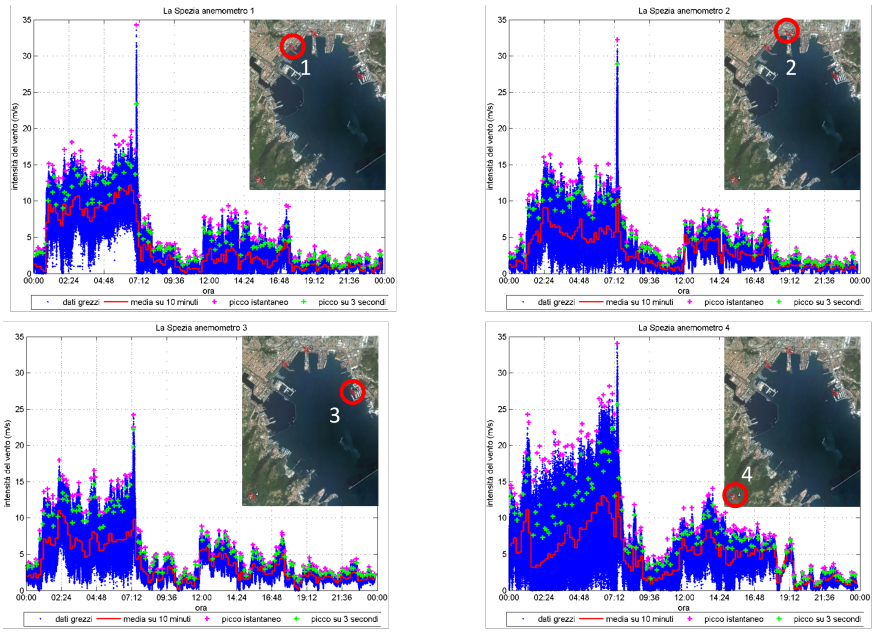


Figura 5.20: Misure anemometriche registrate presso i quattro anemometri della Spezia durante la giornata dell'11 aprile 2012.

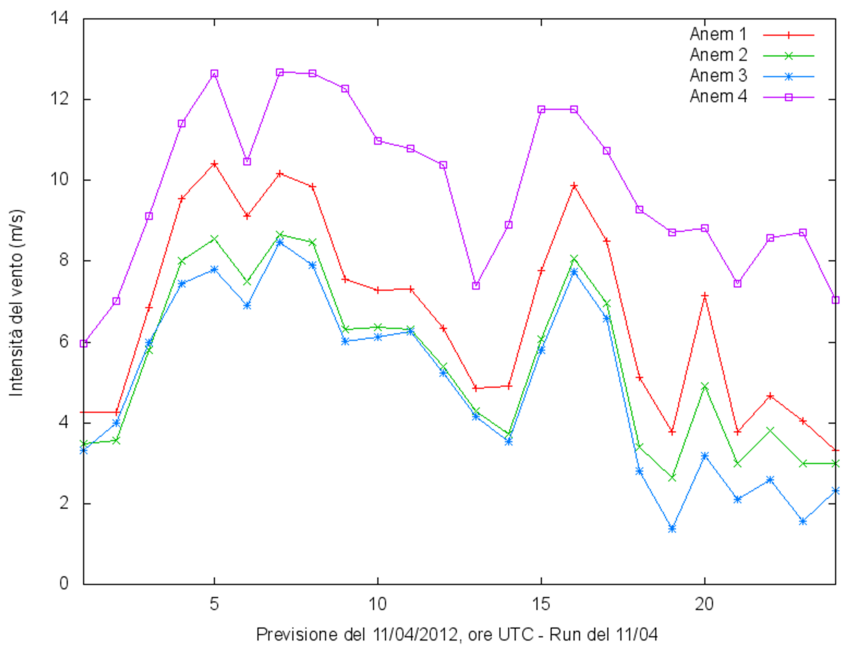


Figura 5.21: Valori dell'intensità del vento simulati presso i quattro anemometri della Spezia durante la giornata dell'11 aprile 2012.

vento del progetto. L'immagine dimostra come, per la giornata dell'11 aprile 2012, i modelli prevedano effettivamente due fasi distinte di vento più intenso, presenti anche in Figura 5.20, in corrispondenza dei due massimi tra le 4 e le 8 UTC e poi tra le 14 e le 17 UTC. Per quanto riguarda il primo evento, in particolare, i valori medi previsti dai modelli sono anche quantitativamente in accordo con le misure, mentre durante il secondo evento i valori previsti per gli anemometri 1 e 4 risultano sovrastimati rispetto alle misure. Dal confronto tra quanto previsto dai modelli e le misure anemometriche risulta quindi che, in questa particolare situazione meteorologica, i modelli siano stati in grado di prevedere con una buona approssimazione, sia qualitativa sia quantitativa, l'evoluzione dei campi di vento medi sull'area portuale della Spezia.

Bisogna considerare che la risoluzione temporale dei modelli, pari a 1 ora, è molto inferiore rispetto a quella delle misure, pari a 10 minuti in termini di valor medio, e quindi sicuramente non in grado di fornire un'analisi di pari dettaglio. Inoltre, pur trattandosi in entrambi i casi di velocità medie, nel caso delle misure i valori medi sono puntuali e riferiti alla specifica posizione dell'anemometro mentre per i modelli le velocità medie sono rappresentative di un'area di dimensioni pari alla risoluzione effettiva del modello, cioè 80×80 m^2 nel caso della Spezia. Anche per questi motivi non ci si può aspettare che la previsione a medio termine fornisca un'informazione precisa in termini di valori assoluti previsti, ma che vada utilizzata, in termini qualitativi, per comprendere il possibile andamento del vento durante il periodo di previsione e, in termini quantitativi, per avere un'informazione sull'ordine di grandezza dei futuri eventi meteorologici.

Per avere una migliore comprensione dell'affidabilità delle previsioni a medio termine del vento occorre tenere conto, durante l'interpretazione della previsione, dell'ordine di grandezza, sia temporale sia spaziale, delle incertezze medie del modello. Tali incertezze, analizzate attraverso il confronto, avvenuto a posteriori, tra le previsioni eseguite nel passato e le misure successivamente registrate, sono in genere differenti per ogni singola area portuale e, all'interno delle aree portuali, possono essere in parte diverse anche per ogni singolo anemometro.

A titolo di esempio la Figura 5.22 riporta gli andamenti delle misure (linee nere) registrate presso l'anemometro 2 del Porto di Livorno nel mese di Dicembre 2011 insieme alle previsioni dei modelli WRF sull'Alto Tirreno (linea fucsia) e WINDS sulla macroarea (simboli verdi) e sulla microarea (linea blu). I tre diagrammi si riferiscono, dall'alto verso il basso, alle previsioni effettuate con uno, due e tre giorni di anticipo. La previsione con tre giorni di anticipo (figura più in basso) non riconosce l'evento del giorno 8 dicembre, per il quale sono previste intensità inferiori a 5 m/s in contrasto a registrazioni dell'anemometro superiori a 10 m/s. Tale stima migliora decisamente nella previsione con due giorni di anticipo ed è fedelmente riprodotta nella previsione con un giorno di anticipo. Questo comportamento mette in luce che, come già discusso all'inizio del presente paragrafo, la previsione a medio termine del vento tende ad essere maggiormente affidabile tanto più ci si avvicina al verificarsi dell'evento meteorologico stesso. Gli altri due eventi intensi registrati nello stesso mese a Livorno, verificatisi intorno al 5 e al 17 dicembre, sono invece correttamente previsti già con tre giorni di anticipo.

La Figura 5.23 mostra la previsione della direzione di provenienza del vento registrata sempre nel mese di dicembre presso l'anemometro 2 di Livorno. Analogamente

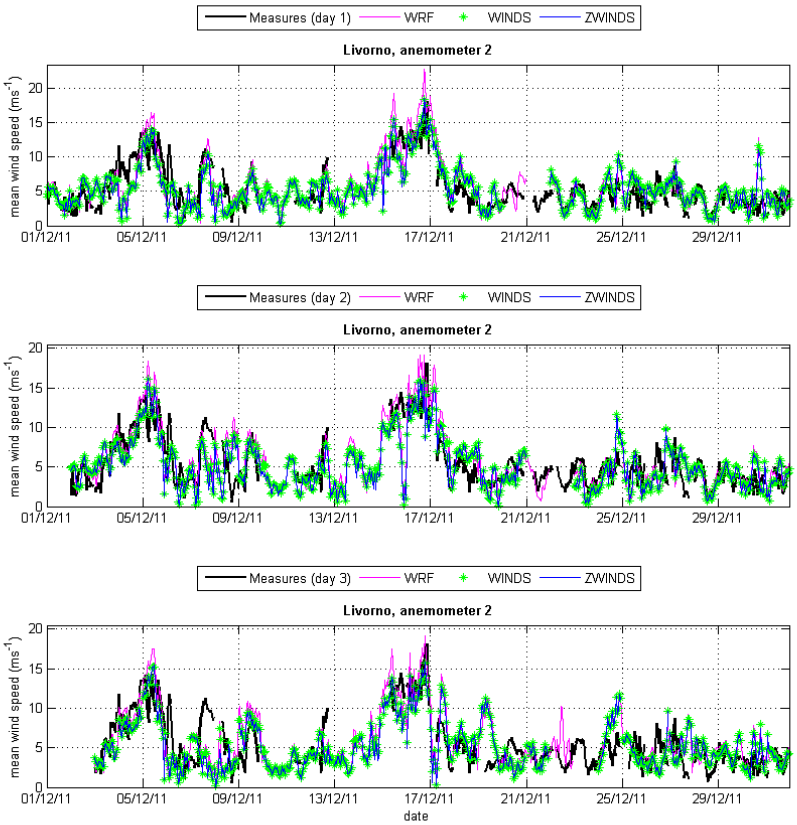


Figura 5.22: Valori dell'intensità del vento misurati e simulati presso l'anemometro 2 del Porto di Livorno durante il mese di dicembre 2011.

al caso dell'intensità del vento, anche in questo caso i modelli seguono piuttosto fedelmente l'andamento della direzione con una variabilità mediamente contenuta entro 45°, ad eccezione di alcuni eventi, come quello del 6 dicembre, in cui la direzione registrata all'anemometro è circa da ovest mentre i modelli prevedono una direzione da est, anticipando la situazione meteorologica che si sarebbe avuta il giorno successivo 7 dicembre.

La Figura 5.24 riporta un secondo esempio relativo alla previsione dell'intensità media del vento presso l'anemometro 3 del Porto di Savona. La mancanza delle previsioni nel periodo dal 5 al 9 aprile causata da una interruzione dell'operatività della catena modellistica per un intervento di manutenzione, così come la mancanza di dati anemometrici dal 20 al 24 aprile. In questo secondo esempio è ancora più evidente la diminuzione dell'affidabilità della previsione dei modelli con due o tre giorni di anticipo rispetto alla previsione del giorno prima. Quest'ultima coglie infatti fedelmente tutti gli eventi più intensi, che risultano spesso mal descritti o addirittura non identificati

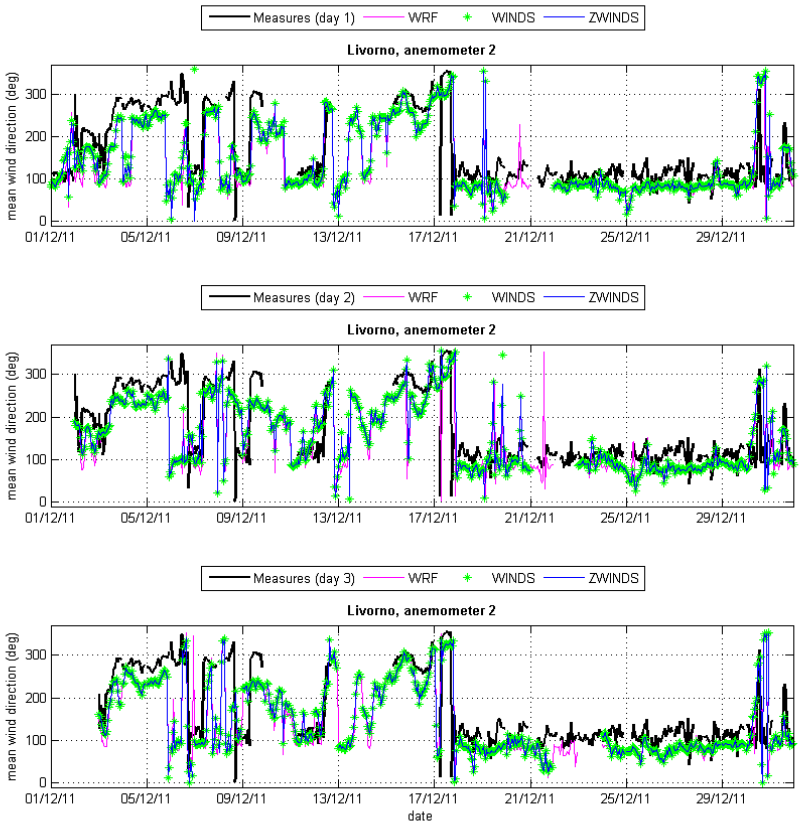


Figura 5.23: Valori della direzione di provenienza del vento misurati e simulati presso l'anemometro 2 del Porto di Livorno durante il mese di dicembre 2011.

nelle altre previsioni come nel caso del picco del giorno 11 aprile.

Inoltre, anche nel caso della previsione del giorno prima, l'intensità media del vento prevista dai modelli risulta spesso sovrastimata. Purtroppo una sovrastima sistematica si registra anche per gli altri anemometri del Porto di Savona e in qualche misura in tutti i porti considerati. Tale effetto, seppur preferibile ad una sottostima o alla totale mancanza di allerta nel caso di un sistema di previsione realizzato per finalità di preallarme rispetto ad eventi potenzialmente pericolosi per l'incolumità di chi opera all'interno delle aree portuali, costituisce comunque un elemento di disturbo per chiunque usufruirà di questo strumento di previsione. La causa della sovrastima dell'intensità del vento, nel caso in cui non sia imputabile ad una errata previsione in termini spaziali o temporali dei fenomeni atmosferici previsti dal modello meteorologico, può essere dovuta a numerosi fattori che riguardano sia i modelli di simulazione, WINDS in particolare, sia la modalità di confronto del dato simulato con la misura. Nel caso in cui l'errore sia legato ad imperfezioni nella capacità dei modelli a descrivere

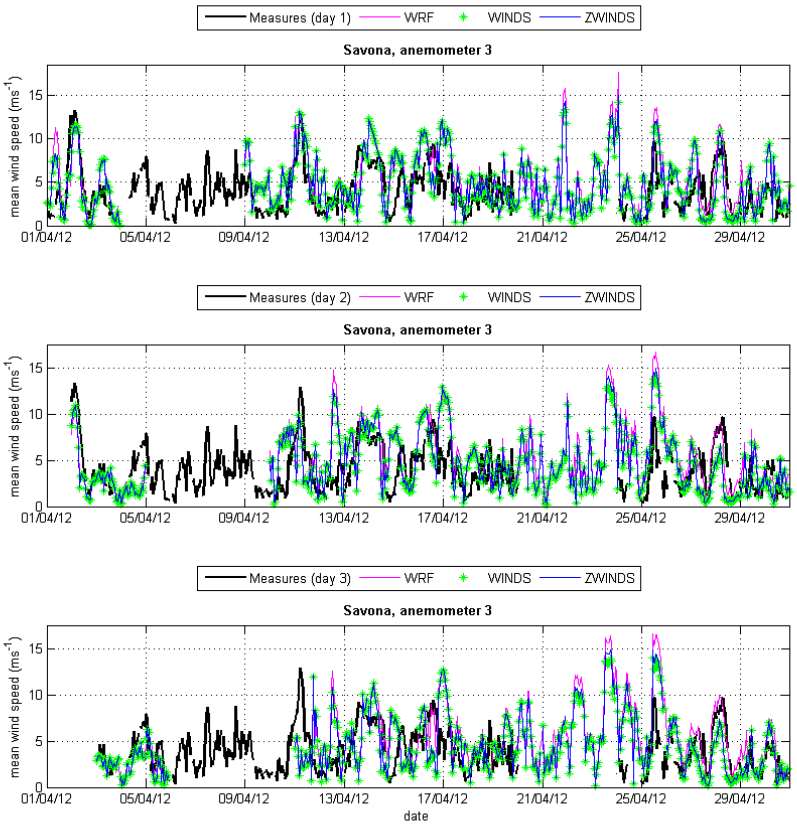


Figura 5.24: Valori dell'intensità del vento misurati e simulati presso l'anemometro 3 del Porto di Savona durante il mese di aprile 2012.

correttamente la geometria portuale, occorrerà intervenire correggendo tali imperfezioni attraverso un aggiornamento dei campi di orografia, della maschera terra-mare e della lunghezza di rugosità del terreno utilizzati dai modelli stessi. Non è infrequente, tuttavia, che il disaccordo tra simulazioni e misure possa essere dovuto ad un errore nelle coordinate geografiche della stazione anemometrica o nella posizione del sensore anemometrico rispetto alla sua quota sul terreno e sul livello del mare, soprattutto se si presenta nel caso di una singola stazione. Al fine di ridurre eventuali sovrastime o sottostime sistematiche occorrerà quindi, alla luce delle considerazioni esposte e a valle di una accurata analisi degli errori basata possibilmente su più anni, riconsiderare tutti i suddetti elementi per individuare le criticità del sistema di previsione e renderlo maggiormente affidabile.

Per riassumere in un unico indice l'affidabilità del sistema previsionale del vento a medio termine si può analizzare il coefficiente di correlazione lineare dell'intensità del vento prevista dai modelli con quella misurata dagli strumenti. Tale coefficiente, che

assume valori da un minimo di 0 ad un massimo di 1 a seconda del grado di correlazione tra i dati, indica quanto un modello riesca a seguire nel tempo l'andamento delle misure e quindi traduce in un singolo numero quella che visivamente è la tendenza a sovrapporsi delle diverse linee rappresentate nelle Figure 5.22 e 5.24. La Tabella 5.2 riporta, a titolo di esempio, i valori del coefficiente di correlazione minimo e massimo calcolato tra tutti gli anemometri in ogni singolo porto, in relazione ai due modelli di simulazione WRF sull'Alto Tirreno e WINDS sulla microarea, per la previsione con un giorno di anticipo. In genere, i valori calcolati per la previsione con due o tre giorni di anticipo sono di poco differenti da quelli riportati in tabella. Si noti che, per una catena previsionale meteorologica a medio termine, valori superiori a 0.5 possono essere considerati pienamente soddisfacenti.

Modello	Genova		Livorno	
WRF	0.53 (1)	0.72 (2)	0.68 (1)	0.74 (4)
WINDS	0.45 (1)	0.68 (2)	0.60 (1)	0.68 (4)
	Savona		La Spezia	
WRF	0.67 (2)	0.75 (3)	0.48 (4)	0.59 (3)
WINDS	0.64 (2)	0.71 (5)	0.48 (2)	0.57 (3)

Tabella 5.2: Valore del coefficiente di correlazione minimo e massimo calcolato in ogni porto (tra parentesi il codice dell'anemometro al quale il valore si riferisce) per la previsione con un giorno di anticipo.

5.5 Prospettive e potenzialità di sviluppo

Il sistema di previsione a medio termine implementato nell'ambito del presente progetto rappresenta lo stato dell'arte dal punto di vista degli strumenti previsionali del tempo meteorologico e di simulazione dei campi di vento ad alta risoluzione in contesti antropizzati complessi. Esistono comunque, nell'attuale sistema, ulteriori margini di miglioramento legati all'implementazione di nuovi strumenti di calcolo e tecnologie finalizzate all'ottimizzazione di specifici aspetti della previsione operativa.

Un aspetto importante riguarderebbe il potenziamento della rete di monitoraggio del vento nelle aree portuali (Paragrafo 2.4), integrando la strumentazione già esistente con nuovi punti di misura, con sensori in grado di rilevare altri parametri meteorologici in aggiunta alla direzione ed intensità del vento, e soprattutto con l'acquisizione di tecnologie in grado di misurare il profilo verticale della velocità del vento in modo da estendere a quote maggiori l'informazione attualmente disponibile quasi esclusivamente in prossimità del suolo. Queste nuove misure, oltre a quelle già disponibili, potrebbero essere utilizzate per rendere più realistiche le condizioni iniziali del GFS che vengono utilizzate dal modello meteorologico WRF come punto di partenza della propria previsione, aumentandone quindi considerevolmente l'affidabilità in particolare nel primo giorno di simulazione. Si tratterebbe infatti di eseguire una sorta di assimilazione dati a scala locale per fare in modo che il modello meteorologico possa iniziare la previsione da una conoscenza molto più dettagliata dei campi di vento nelle aree portuali.

Un altro aspetto di notevole rilevanza che potrebbe essere considerato riguarda l'implementazione di un modello di simulazione del moto ondoso interfacciato ai modelli di simulazione dei campi di vento. Nell'attuale configurazione dei modelli WRF e WINDS, l'attrito del vento con la superficie marina viene mantenuto costante durante le simulazioni. Nella realtà invece l'attrito cresce quando il vento proveniente dal mare determina un aumento del moto ondoso. A sua volta, l'aumento dell'attrito superficiale tende a frenare il vento che quindi risulta proporzionalmente minore rispetto a quello che si avrebbe con mare piatto. La conseguenza di questo effetto potrebbe essere una sovrastima sistematica dell'intensità del vento nelle aree marine e costiere causato dalla sottostima dell'attrito con la superficie marina. L'accoppiamento dei modelli di simulazione del vento con un modello di simulazione del moto ondoso potrebbe quindi ridurre l'eventuale sovrastima e rendere la previsione più affidabile.

6 Previsioni del vento a breve termine

Il sistema di previsione a breve termine del vento messo a punto nell'ambito del progetto "Vento e Porti" consiste in una serie di algoritmi sviluppati per ottenere la previsione delle condizioni di ventosità nelle aree portuali di Savona, Genova, La Spezia, Livorno e Bastia, con un orizzonte temporale fino ad un massimo di 90 minuti.

L'approccio adottato per realizzare il sistema previsionale a breve termine consiste nell'utilizzo di metodi probabilistici che si basano sul concetto di probabilità condizionata, cioè sulla possibilità di predire la velocità del vento nel futuro una volta che sia nota la velocità all'istante presente. Questi metodi probabilistici necessitano di una fase iniziale di calibrazione basata su serie temporali di misure del vento acquisite in continuo per almeno un anno. Durante la fase operativa, invece, la procedura di elaborazione della previsione richiede l'acquisizione in tempo reale delle misure anemometriche registrate dalle reti di monitoraggio del vento installate nelle aree portuali.

Il sistema previsionale così realizzato permette di ottenere ogni dieci minuti una nuova stima della velocità del vento corrispondente a tre diversi orizzonti temporali di previsione pari a 30, 60 e 90 minuti sulle aree portuali e fino ad una quota di 100 metri sul livello del terreno. I valori previsti corrispondono a una probabilità di non superamento pari a 90%, 95% e 99%. Le previsioni sono finalizzate a emettere messaggi di allerta tali da porre in sicurezza i lavoratori e, in generale, tutelare l'integrità fisica di tutte le persone che si trovano nelle aree portuali. In generale, infatti, l'anticipo dell'allerta potrebbe non essere sufficiente ad evitare i danni alle cose, ma può essere determinante per allontanare le persone, evacuare le aree a rischio o sospendere tutte le operazioni potenzialmente pericolose.

6.1 Algoritmo di previsione

L'implementazione del modello di previsione a breve termine del vento è basata principalmente sull'analisi dei dati delle stazioni anemometriche che costituiscono le reti di monitoraggio del vento installate presso i cinque Porti di Bastia, Genova, Livorno, Savona e La Spezia nell'ambito del presente progetto (si veda il Capitolo 2). In particolare, il modello di previsione si basa su un metodo probabilistico che permette di prevedere un evento futuro a partire dagli ultimi valori di velocità del vento misurati presso i suddetti anemometri. Il modello scelto per questo scopo consiste in un algoritmo che valuta quale sia la probabilità che in un certo arco temporale si abbia un determinato valore di intensità e direzione del vento, dato un valore misurato di velocità del vento al tempo presente. La probabilità stimata dall'algoritmo prende il nome di probabilità condizionata, in quanto il valore atteso del vento (previsione) risulterà dipendente (condizionato) dal valore della velocità del vento al tempo presente.

Questa tipologia di algoritmi di previsione prevede una fase di calibrazione a partire delle registrazioni eseguite dai singoli anemometri durante un arco temporale pari ad almeno un anno, al fine di tenere conto della normale variabilità del vento durante le diverse stagioni. Per svariati motivi quali ad esempio guasti di varia natura o nuove installazioni, non tutti gli anemometri hanno effettuato registrazioni per un anno completo alla data del 31 marzo 2012: in questo caso le corrispondenti previsioni hanno un minore grado di affidabilità e devono essere considerate come ancora in fase di verifica ed aggiornamento. Per questo motivo gli esempi riportati nel seguito fanno riferimento principalmente ai tre Porti di Livorno, Savona e La Spezia, che sono stati i primi ad avere installato le reti anemometriche presso le proprie aree di competenza e ad aver iniziato con sufficiente regolarità l'acquisizione delle misure dopo la normale fase di prova e ottimizzazione del proprio sistema di monitoraggio. In generale è comunque opportuno ricalibrare gli algoritmi del modello di previsione a breve termine del vento ogni nuovo anno di misure al fine di renderli maggiormente realistici ed affidabili. Anzi, uno dei pregi maggiori di questo modello è la sua predisposizione a migliorare con il passare del tempo.

Come detto, il modello probabilistico scelto per il sistema di previsione a breve termine del vento viene calibrato attraverso le misure acquisite dagli anemometri, che servono in particolare per ottenere la stima dei parametri delle distribuzioni di velocità attese del vento condizionate alle velocità pregresse. Questi parametri sono infatti ottenuti analizzando le basi dati delle misure della velocità del vento registrate dagli anemometri delle reti di monitoraggio. Alla fine del procedimento di calibrazione, il modello permette di prevedere la velocità del vento corrispondente ad una assegnata probabilità di non superamento, per differenti orizzonti temporali: in altri termini, esso consente di calcolare quale sarà la massima velocità attesa in un certo arco temporale, ad esempio 30 minuti, con una certa probabilità che questa non venga superata, ad esempio il 90%.

Gli orizzonti previsionali presi in considerazione sono risultati pari a 30, 60 e 90 minuti. Orizzonti temporali inferiori a 30 minuti sono giudicati troppo brevi per poter intervenire tempestivamente sulla gestione delle diverse attività nelle aree portuali, mentre orizzonti temporali superiori a 90 minuti risultano troppo poco affidabili. I valori di probabilità di non superamento sono fissati pari a 90%, 95% e 99%.

6.1.1 Analisi dei dati anemometrici

Una base dati costituita da 144 misure giornaliere di velocità media del vento (1 dato ogni 10 minuti) raccolte su un periodo temporale di circa un anno può essere considerata sufficiente per sviluppare le procedure inferenziali[1] atte a stabilire le proprietà statistiche del vento necessarie a calibrare il modello previsionale a breve termine.

L'approccio scelto per il modello previsionale soffre, dal punto di vista teorico, di due problemi:

[1] L'inferenza statistica è il procedimento per cui si ricostruiscono le caratteristiche statistiche di una popolazione di dati dall'osservazione di una parte di essa, detta campione della popolazione, selezionata solitamente mediante un esperimento casuale (aleatorio). Nel caso presente l'inferenza consiste nella stima delle proprietà statistiche del vento attraverso uno o più anni di dati acquisiti con gli anemometri delle reti di monitoraggio.

1) il numero di dati osservati diminuisce per le velocità più elevate, in quanto gli eventi più intensi sono anche i più rari;

2) il valore massimo della velocità del vento registrato in uno specifico sito nell'arco temporale di acquisizione delle misure non corrisponde al valore massimo che si possa verificare in quello stesso luogo, poiché esiste sempre la possibilità che si verifichi prima o poi un evento di intensità superiore.

La criticità di entrambi questi aspetti dipende dalla lunghezza del periodo di misura, poiché all'aumentare di tale periodo da un lato aumenterà anche il numero di eventi intensi presi in considerazione e dall'altro lato sarà meno probabile che si verifichi un nuovo evento estremo superiore a quelli finora registrati.

Le Tabelle 6.1, 6.2 e 6.3 riportano, per gli anemometri di La Spezia, Savona e Livorno, le percentuali dei valori della velocità media del vento suddivisi per intervalli incrementali pari a 1 m/s. Il periodo di misura a cui queste tabelle si riferiscono va dal 1 febbraio 2011 al 31 gennaio 2012. Si noti ad esempio che per tutti gli anemometri della Spezia il 99% dei valori registrati è inferiore a 9 m/s, per Savona a 13 m/s e per Livorno a 14 m/s, nonostante le velocità massime attese stimate mediante le analisi statistiche illustrate nel Capitolo 4 siano anche notevolmente superiori. Analogamente a queste tabelle, le Figure 6.1, 6.2 e 6.3 mostrano le distribuzioni di frequenza dell'intensità del vento per gli anemometri dei Porti di La Spezia, Savona e Livorno, rispettivamente.

Si osservi in particolare come la percentuale di realizzazioni di fenomeni intensi o estremi sia statisticamente quasi irrilevante rispetto al corpo delle distribuzioni: questo significa che gli eventi estremi sono, come è ovvio aspettarsi, molto rari, ragion per cui la calibrazione del modello previsionale risulta critica proprio per le velocità più intense. Per sviluppare un algoritmo che sia in grado di prevedere le velocità future anche per velocità non ancora registrate presso una stazione anemometrica è stato necessario estrapolare il modello previsionale in modo da renderlo operativo con qualunque regime di vento. Per ridurre questa criticità e rendere maggiormente affidabile il modello occorre ripetere la calibrazione via via che le serie temporali a disposizione si allungano.

6.1.2 Metodo di inferenza statistica

Il metodo sviluppato per stimare i parametri che determinano la probabilità condizionata del vento può essere schematizzato in una serie di passaggi successivi descritti nel seguito.

1) La serie temporale delle intensità e direzioni del vento disponibile per ogni stazione anemometrica è analizzata per individuare eventuali dati mancanti o errati nelle registrazioni; ciò è fondamentale per escludere tali dati dall'analisi successiva ed evitare erronee associazioni tra velocità attuali e velocità future.

2) È generata una seconda serie temporale contenente tutti i dati della serie originale compresi in un intervallo di cui gli istanti iniziale e finale siano sfasati dell'orizzonte temporale di previsione scelto. La serie temporale è quindi sdoppiata, generando la serie delle intensità e delle direzioni attuali e la serie delle intensità e delle direzioni future. Le due serie sono poi confrontate indipendentemente per le intensità e per le direzioni del vento.

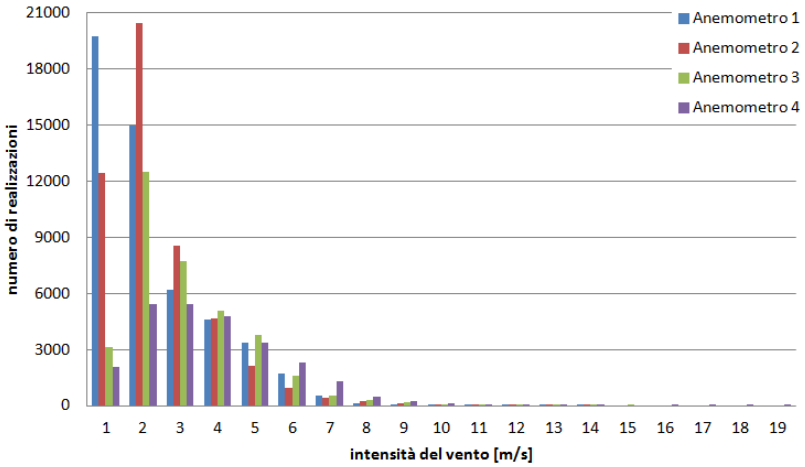


Figura 6.1: Distribuzione di frequenza delle intensità del vento registrate presso le stazioni anemometriche nel porto della Spezia.

Anemometro		1	2	3	4
N° misure		51381	50104	34969	25609
$V \leqslant$(m/s)	1	38.37	24.82	8.96	8.09
	2	67.53	65.65	44.71	29.33
	3	79.61	82.74	66.86	50.49
	4	88.60	91.99	81.31	69.19
	5	95.17	96.17	92.12	82.22
	6	98.48	98.05	96.65	91.12
	7	99.48	98.90	98.22	96.15
	8	99.77	99.44	99.12	98.09
	9	99.90	99.73	99.58	99.04
	10	99.93	99.88	99.81	99.49
	11	99.96	99.95	99.91	99.69
	12	99.97	99.98	99.95	99.82
	13	99.99	100.00	99.98	99.91
	14	100.00	100.00	100.00	99.95
	15			100.00	99.95
	16				99.96
	17				99.97
	18				99.98
	19				99.99
	20				100.00

Tabella 6.1: Distribuzioni cumulate percentuali dei valori di velocità media del vento registrati presso gli anemometri nel porto della Spezia.

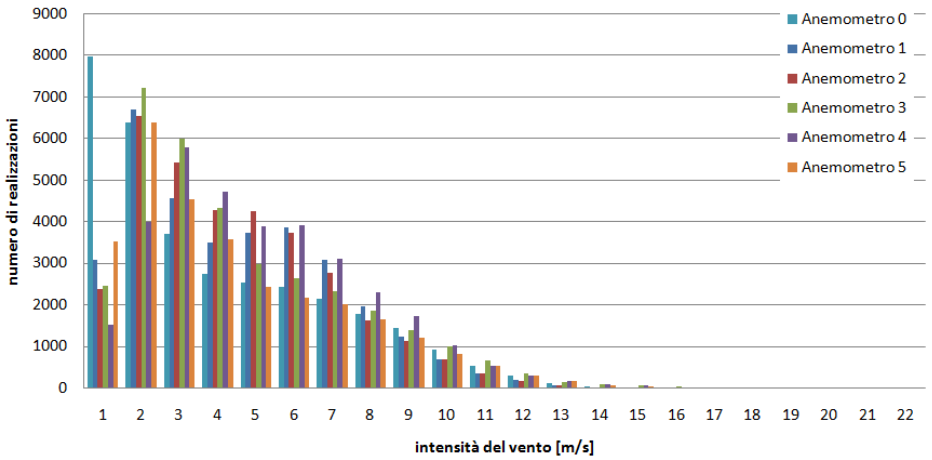


Figura 6.2: Distribuzione di frequenza delle intensità del vento registrate presso le stazioni anemometriche nel Porto di Savona.

Anemometro		0	1	2	3	4	5
N° misure		33109	33069	33410	33466	33184	29452
$V \leqslant$(m/s)	1	24.05	9.31	7.11	7.31	4.61	11.98
	2	43.36	29.58	26.72	28.84	16.65	33.62
	3	54.54	43.39	42.92	46.73	34.08	49.04
	4	62.85	53.95	55.74	59.63	48.31	61.21
	5	70.55	65.26	68.44	68.50	60.03	69.43
	6	77.86	76.97	79.58	76.36	71.85	76.84
	7	84.34	86.31	87.88	83.35	81.20	83.72
	8	89.74	92.25	92.76	88.88	88.19	89.33
	9	94.09	96.00	96.13	93.06	93.35	93.42
	10	96.91	98.12	98.17	96.02	96.45	96.16
	11	98.54	99.21	99.21	97.97	98.07	97.96
	12	99.46	99.76	99.74	99.01	98.93	99.01
	13	99.81	99.93	99.94	99.44	99.45	99.58
	14	99.95	99.98	99.97	99.73	99.70	99.81
	15	99.99	99.98	99.98	99.90	99.88	99.93
	16	100.00	99.99	99.98	99.99	99.93	100.00
	17	100.00	99.99	99.98	100.00	99.96	
	18	100.00	100.00	99.99		99.96	
	19		100.00	100.00		99.97	
	20					99.98	
	21					100.00	

Tabella 6.2: Distribuzioni cumulate percentuali dei valori di velocità media del vento registrati presso gli anemometri nel Porto di Savona.

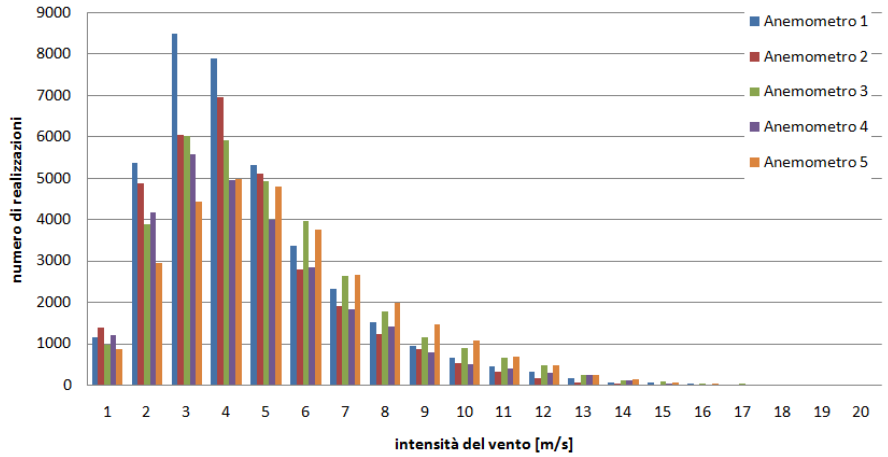


Figura 6.3: Distribuzione di frequenza delle intensità del vento registrate presso le stazioni anemometriche nel Porto di Livorno.

Anemometro		1	2	3	4	5
N° misure		38164	32302	33843	28423	30702
$V \leqslant$(m/s)	1	3.06	4.33	2.87	4.24	2.79
	2	17.15	19.42	14.36	18.90	12.40
	3	39.37	38.10	32.16	38.56	26.84
	4	60.03	59.61	49.64	56.00	43.09
	5	73.97	75.42	64.19	70.00	58.73
	6	82.78	84.10	75.89	80.04	70.98
	7	88.89	90.05	83.73	86.49	79.64
	8	92.84	93.86	89.01	91.48	86.13
	9	95.32	96.56	92.41	94.28	90.88
	10	97.08	98.22	95.08	96.03	94.38
	11	98.24	99.20	97.05	97.42	96.63
	12	99.05	99.69	98.48	98.50	98.19
	13	99.48	99.90	99.19	99.39	98.97
	14	99.67	99.99	99.54	99.78	99.44
	15	99.81	100.00	99.81	99.93	99.66
	16	99.89		99.92	99.99	99.82
	17	99.94		99.99	100.00	99.88
	18	100.00		100.00		99.95
	19	100.00				99.98
	20					100.00

Tabella 6.3: Distribuzioni cumulate percentuali dei valori di velocità media del vento registrati presso gli anemometri nel Porto di Livorno.

3) Le serie della direzione di provenienza del vento futura e della direzione di provenienza del vento attuale sono analizzate per determinare se esista una relazione funzionale che le leghi e che possa essere utilizzata nel modello previsionale. In realtà, come era già noto sulla base di studi pregressi (Freda e Solari 2009), è stato verificato per tutti gli anemometri che, nel caso di venti intensi, la direzione del vento tende a non cambiare nel breve termine.

   La Figura 6.4 mostra la differenza tra la direzione futura e la direzione attuale del vento (asse delle ordinate) in funzione della sua intensità attuale (asse delle ascisse), nel caso dell'anemometro 4 del Porto di Livorno. Tale differenza, che rappresenta quanto può cambiare la direzione del vento in un determinato intervallo di tempo, è calcolata per i tre orizzonti temporali di previsione pari a 30 (immagine in alto), 60 (immagine al centro) e 90 minuti (immagine in basso). La figura dimostra che la direzione del vento può cambiare anche molto per intensità del vento basse, mentre tende a rimanere costante per intensità più elevate. In altre parole, mentre per i normali regimi di vento la direzione può variare anche notevolmente nell'arco di 30 minuti o più, durante un evento intenso o estremo la direzione del vento rimane solitamente costante anche per più di 90 minuti.

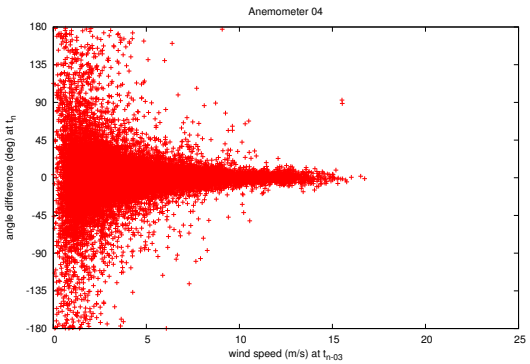
   Questo risultato permette di semplificare notevolmente il modello previsionale del vento a breve termine, escludendo dalla previsione la direzione del vento e quindi assumendo che questa grandezza rimanga costante nel tempo. Tale semplificazione comporta che la previsione della direzione del vento sia relativamente poco affidabile per basse intensità del vento e tanto più affidabile quanto più l'intensità aumenta. In questo modo il modello previsionale a breve termine risulta sia maggiormente affidabile proprio nel caso degli eventi meteorologici più critici sia molto efficiente dal punto di vista dei tempi di calcolo. Quest'ultima condizione, in particolare, è di notevole importanza in quanto la procedura di previsione del vento a breve termine deve essere utilizzata per finalità operative ed è lanciata con continuità ogni 10 minuti.

4) Le serie dell'intensità futura del vento e dell'intensità attuale del vento sono analizzate per determinare la relazione funzionale che le lega e che sarà utilizzata nel modello previsionale. Dal punto di vista teorico, una relazione funzionale idonea a valutare la probabilità condizionata dell'intensità futura in funzione dell'intensità attuale è costituita dalla distribuzione di Weibull (Weibull 1957) a tre parametri:

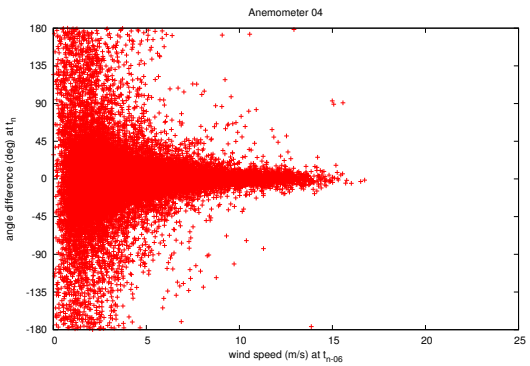
$$f_V(V) = \frac{f}{s}\left(\frac{V - x_0}{s}\right)^{f-1} \mathrm{e}^{-\left(\frac{V-x_0}{s}\right)^f} \qquad V > 0 \tag{6.1}$$

   dove x_0 è il parametro di posizione, s il parametro di scala ed f il parametro di forma. Questa assunzione è stata verificata per le serie temporali dell'intensità del vento misurate dagli anemometri presi in esame.

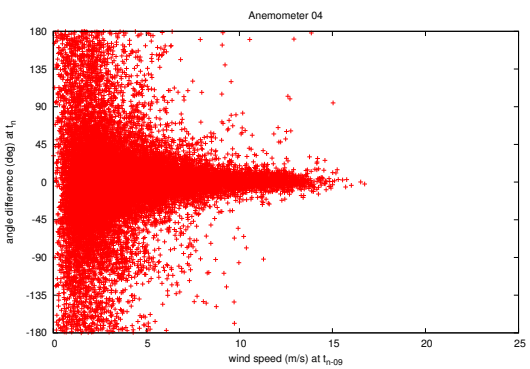
   A titolo di esempio, la Figura 6.5 mostra le distribuzioni di probabilità della serie dell'intensità futura del vento in funzione dell'intensità attuale del vento, per l'anemometro 1 del Porto di Livorno e su un orizzonte temporale di previsione



(a) Orizzonte temporale: 30 minuti



(b) Orizzonte temporale: 60 minuti



(c) Orizzonte temporale: 90 minuti

Figura 6.4: Variazione della direzione di provenienza del vento per tre diversi intervalli temporali, in funzione dell'intensità del vento attuale, per l'anemometro 4 del Porto di Livorno.

pari a 30 minuti. Le distribuzioni, discretizzate con un passo di 1 m/s, risultano consistenti con la forma della distribuzione di Weibull, soprattutto per valori medio-alti della velocità V, anche poiché per questi regimi di vento è disponibile un elevato numero di osservazioni. La regolarità tende a diminuire invece all'aumentare di V a causa del limitato numero di osservazioni disponibili per i regimi di vento corrispondenti ai casi più intensi.

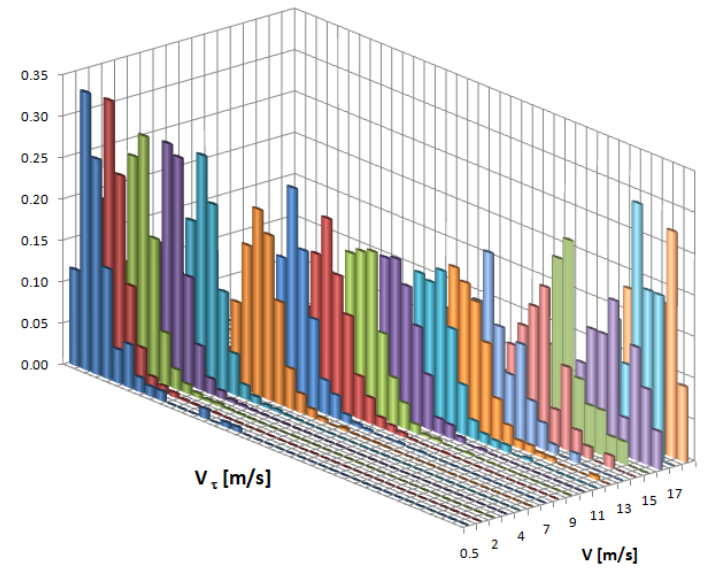


Figura 6.5: Distribuzioni di probabilità condizionata dell'intensità del vento futuro, V_τ, in funzione dell'intensità del vento attuale, V, analizzate per i dati dell'anemometro 1 del Porto di Livorno e corrispondenti ad un orizzonte temporale di previsione pari a 30 minuti.

5) Il passo successivo consiste nel determinare i parametri della funzione analitica scelta per modellare le probabilità condizionate (Eq. (6.1)). La funzione di Weibull scelta dipende da tre parametri, i quali devono essere determinati per ognuna delle distribuzioni mostrate in Figura 6.5 relative all'anemometro 1 del Porto di Livorno e analogamente per tutte le distribuzioni relative agli altri anemometri di Livorno, Savona e La Spezia. Inoltre, poiché le distribuzioni cambiano in funzione dell'orizzonte temporale di previsione scelto, occorre determinare questi stessi parametri anche nel caso in cui l'orizzonte temporale sia pari a 60 e 90 minuti.

   Come esempio, la Figura 6.6 mostra le funzioni di Weibull determinate a partire dalle distribuzioni di probabilità condizionata delle intensità del vento futuro per un range di valori di intensità del vento attuale compreso tra 5 m/s e 8 m/s, nel caso dell'anemometro 3 del Porto di Savona e per un orizzonte temporale di previsione pari a 30 minuti.

6) Una volta ottenuti i parametri delle funzioni di Weibull per un insieme discreto di valori dell'intensità del vento attuale (ad esempio $V = 5, 6, 7, 8$ m/s, come mostrato in Figura 6.6), occorre trovare delle funzioni di regressione (*fit*) che permettano di ricavare i tre parametri x_0, s e f per qualsiasi valore di V. Questo passo è necessario anche per estrapolare i valori dei tre parametri nel caso in cui si presenti un valore di intensità del vento attuale superiore a quelli finora registrati e quindi garantire l'operatività del sistema previsionale per qualunque nuova registrazione. La stima delle funzioni dei tre parametri è basata su una espressione lineare per il parametro di posizione x_0 e quello di scala s, mentre per il parametro di forma f è necessario considerare un'espressione più complessa.

   La Figura 6.7 riporta i fit dei parametri di posizione, di scala e di forma calcolati per l'anemometro 0 del Porto di Savona e per l'orizzonte temporale pari a 30 minuti. Si noti che, in base alla Tabella 6.2, i valori massimi dell'intensità del vento misurati presso questo anemometro arrivano a 18 m/s, mentre i valori dei parametri della funzione di Weibull da cui sono calcolati i fit arrivano a 11 m/s. Il motivo di questa differenza è legato al fatto che la stima dei valori dei tre parametri risulta affidabile soltanto se si hanno a disposizione un certo numero di misure nel dominio considerato: quando si analizzano i dati nel dominio delle intensità più elevate, le misure disponibili non sono sufficienti per ottenere valori realistici dei tre parametri.

Il risultato finale dell'algoritmo di previsione del vento a breve termine è schematizzato in Figura 6.8. In questa figura, che si riferisce agli anemometri del Porto di Livorno e all'orizzonte temporale di previsione pari a 90 minuti, è mostrato il valore dell'intensità del vento previsto (asse delle ordinate) in funzione dell'intensità attuale (asse delle ascisse). Dal punto di vista fisico, i grafici rappresentano le distribuzioni delle probabilità condizionate dell'intensità del vento futuro in forma cumulata e continua, in funzione dell'intensità del vento attuale.

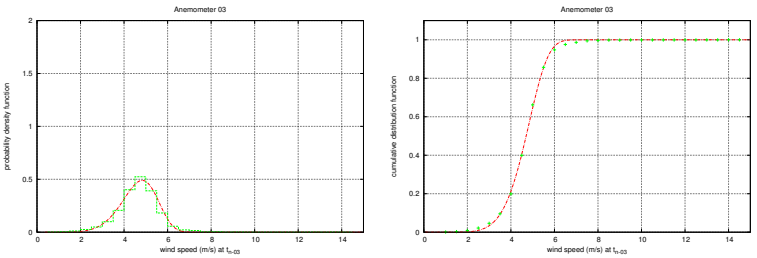
La lettura del grafico comporta tre passaggi:

- si parte da un valore misurato di intensità del vento attuale che corrisponde ad un punto sull'asse delle ascisse del grafico relativo all'anemometro cui la misura si riferisce;

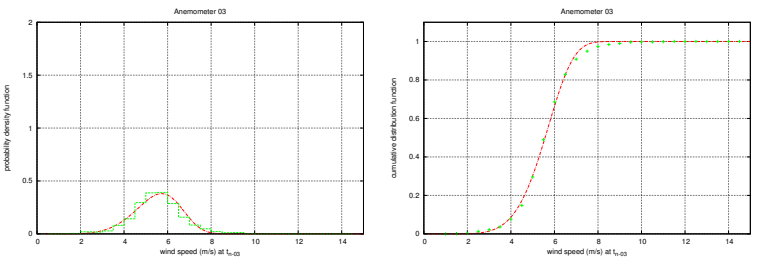
- si decide la probabilità di non superamento (un valore tra 0 e 1), che rappresenta la soglia di affidabilità richiesta alla previsione (si veda il Paragrafo 6.1);

- dal punto sulle ascisse che corrisponde al valore di intensità del vento attuale si sale in verticale sul diagramma fino a raggiungere il colore che rappresenta la probabilità di non superamento scelta, da cui si procede verso sinistra fino a leggere il valore cercato dell'intensità del vento previsto.

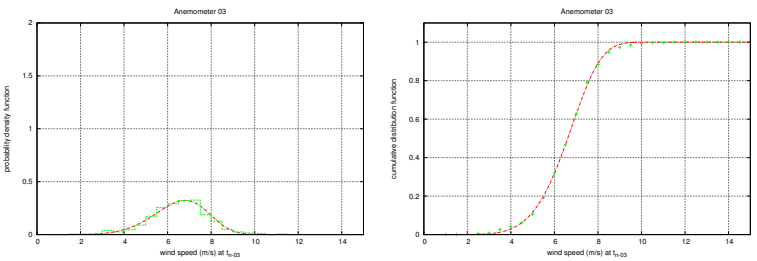
L'utilizzo di questi diagrammi come descritto sopra è ripetuto in maniera automatica dal calcolatore ogni volta che una nuova misura è resa disponibile dal sistema di acquisizione dati (si veda il Capitolo 2).



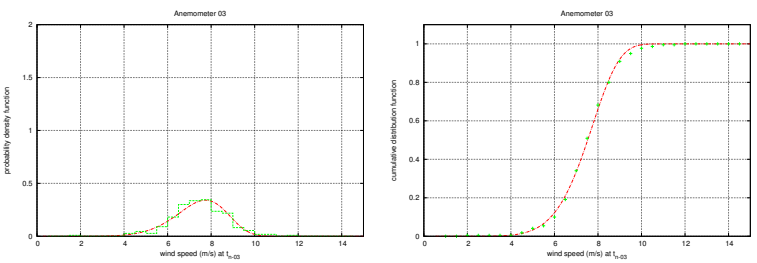
(a) Intensità del vento attuale pari a 5 m/s



(b) Intensità del vento attuale pari a 6 m/s

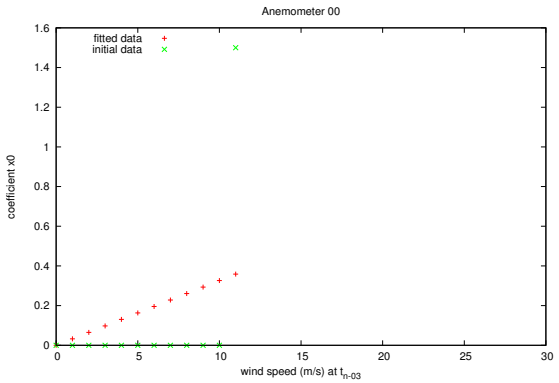


(c) Intensità del vento attuale pari a 7 m/s

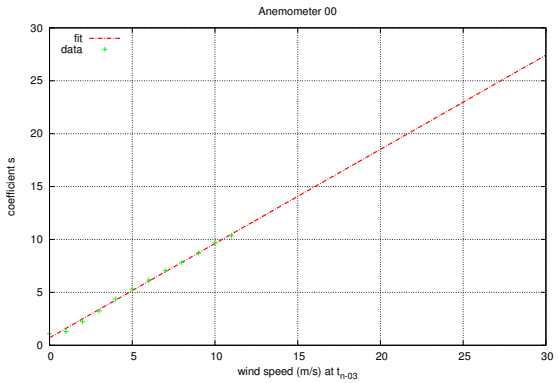


(d) Intensità del vento attuale pari a 8 m/s

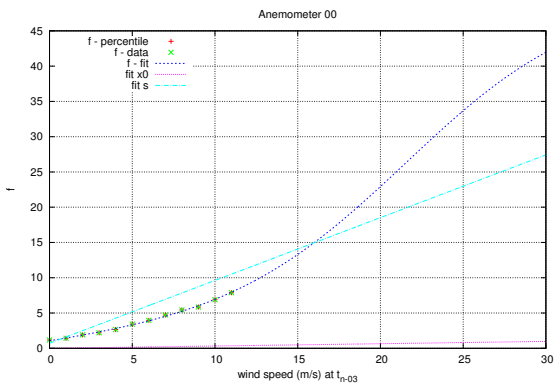
Figura 6.6: Distribuzioni di probabilità condizionata delle intensità del vento futuro (linee verdi nei diagrammi a sinistra) e corrispondenti distribuzioni cumulate (linee verdi nei diagrammi a destra) insieme alle funzioni di Weibull (linea rossa) per le seguenti intensità del vento attuale: (a) 5 m/s, (b) 6 m/s, (c) 7 m/s, (d) 8 m/s. I dati si riferiscono all'anemometro 3 di Savona e all'orizzonte temporale di 30 minuti.



(a) Parametro di posizione

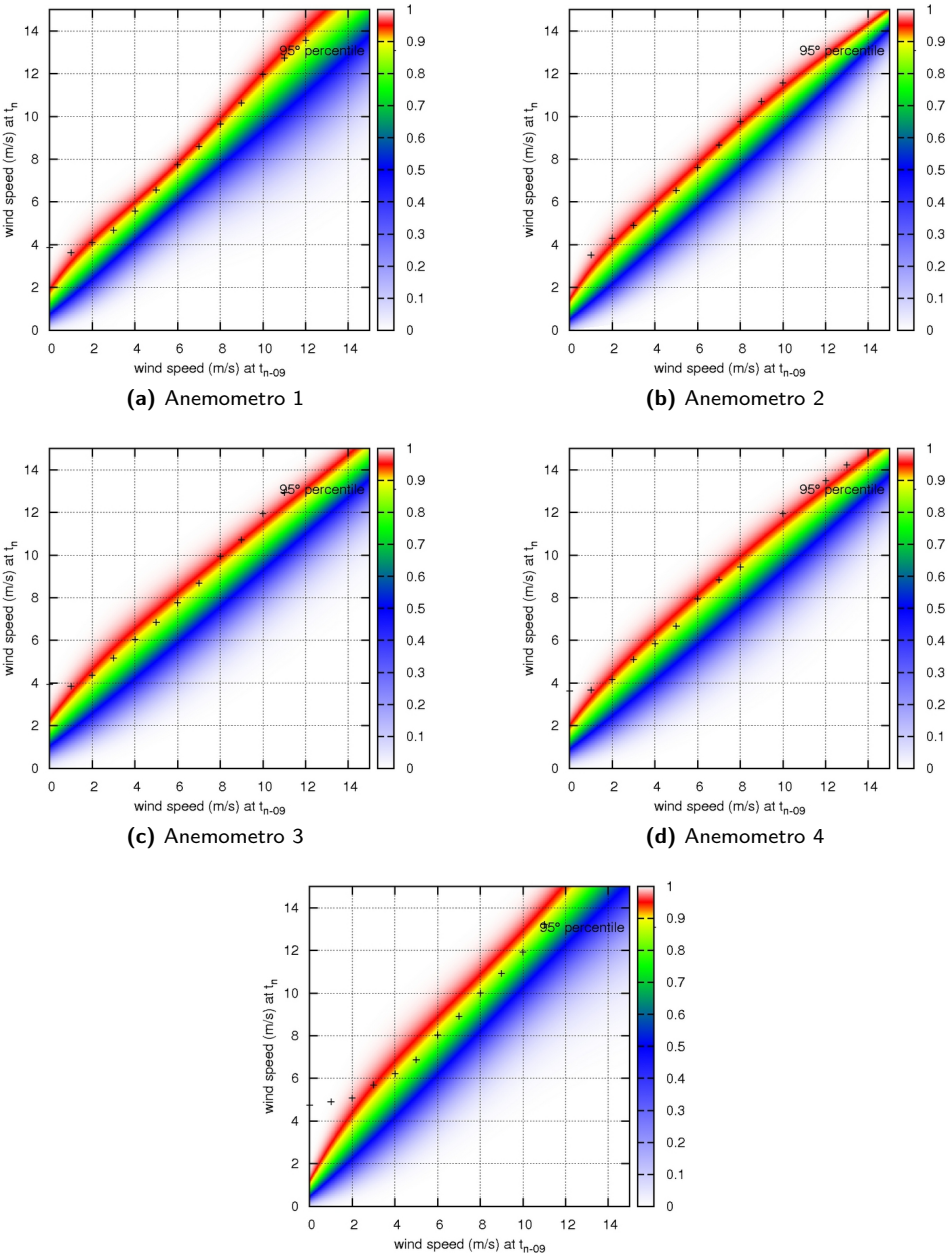


(b) Parametro di scala



(c) Parametro di forma

Figura 6.7: Fit dei tre parametri della funzione di Weibull calcolati per l'anemometro 0 di Savona e per l'orizzonte temporale di previsione pari a 30 minuti.



(a) Anemometro 1

(b) Anemometro 2

(c) Anemometro 3

(d) Anemometro 4

(e) Anemometro 5

Figura 6.8: Distribuzione di probabilità condizionata dell'intensità del vento futuro in funzione dell'intensità del vento attuale per gli anemometri del Porto di Livorno e relative ad un orizzonte temporale di previsione pari a 90 minuti. Nelle immagini sono indicati (+) anche i valori corrispondenti alla probabilità di non superamento pari al 95% ottenuta direttamente dalle misure.

6.2 Funzionamento operativo

Il funzionamento del sistema di previsione del vento a breve termine è basato sull'utilizzo di due procedure:

1) il calcolo della velocità media del vento futuro relativamente a tre orizzonti temporali di previsione (30, 60 e 90 minuti) e a tre probabilità di non superamento (90%, 95% e 99%), come descritto nel Paragrafo 6.1;

2) il calcolo della velocità di picco (descritto nel Paragrafo 3.3.3) del vento futuro relativamente agli stessi tre orizzonti temporali di previsione e alle stesse tre probabilità di non superamento utilizzate per la previsione della velocità media.

In entrambe le procedure la grandezza prevista, velocità media (Paragrafo 6.2.1) o velocità di picco (Paragrafo 6.2.2), è calcolata dapprima in corrispondenza della posizione degli anemometri portuali e successivamente interpolata o estrapolata in tutti i punti delle griglie di calcolo sulle aree portuali, mediante la procedura descritta nel Paragrafo 3.2.4.

6.2.1 Previsione della velocità media

La procedura per il calcolo della velocità media futura nei punti degli anemometri a partire dai valori attuali avviene secondo le modalità descritte nel Paragrafo 6.1.2, utilizzando le distribuzioni di probabilità condizionata (si veda come esempio la Figura 6.8), calcolate per tutti gli anemometri e per ogni orizzonte temporale di previsione. Alcuni esempi di campi di vento previsti nelle aree portuali di Livorno, Savona e La Spezia sono riportati nelle Figure 6.9–6.11.

La Figura 6.9 (a sinistra) riporta un esempio di previsione della velocità media del vento a 10 m sul livello del terreno (s.l.t.) per i tre diversi orizzonti temporali sul Porto della Spezia. L'istante mostrato è relativo allo stesso evento temporalesco già analizzato nei Paragrafo 5.3, verificatosi l'11 aprile 2012; la previsione è valida per le 7:30 UTC (corrispondenti alle 9:30 ora locale). Si noti che i campi di vento mostrati in figura sono stati ottenuti con 30, 60 e 90 minuti di anticipo, cioè sarebbero stati disponibili rispettivamente alle ore 7:00, 6:30 e 6:00 UTC.

Analoghi esempi sono mostrati in Figura 6.10 e 6.11 (a sinistra) per quanto riguarda i Porti di Livorno e Savona. Nel caso di Livorno è riportato un esempio relativo all'evento meteorologico del 16 dicembre 2011, durante il quale forti venti di libeccio tra la Liguria di levante e la Toscana hanno causato una violenta mareggiata con raffiche fino a 20 m/s e stato del mare agitato. Nel caso di Savona e Vado Ligure invece è mostrato l'evento del 28 febbraio 2011, caratterizzato da vento forte da sudest sul Tirreno e a nord della Corsica.

Per quanto riguarda quest'ultimo esempio è interessante notare che il campo di velocità media previsto con 60 minuti di anticipo è caratterizzato da intensità del vento leggermente minori rispetto a quanto previsto sia con 30 sia con 90 minuti di anticipo. Questo comportamento dipende dal fatto che la misura dell'intensità del vento registrata 30 e 90 minuti prima delle 9:00 UTC era maggiore rispetto alla misura registrata 60 minuti prima, o in altri termini che nell'ora e mezza precedente

le 9:00 UTC il vento ha avuto un andamento altalenante. L'algoritmo di calcolo della velocità media non ha memoria di quanto accade negli istanti precedenti all'istante di previsione, ma utilizza soltanto l'ultimo valore misurato dagli anemometri, pertanto la procedura di previsione non è in grado di capire quale sia la tendenza del vento prima dell'ultima misura e di seguirne la tendenza (si veda al riguardo il Paragrafo 6.4).

6.2.2 Previsione della velocità di picco

La procedura per il calcolo della velocità di picco futura nei punti degli anemometri prevede l'utilizzo del valore della velocità media futura prevista e del valore dell'intensità di turbolenza attuale.

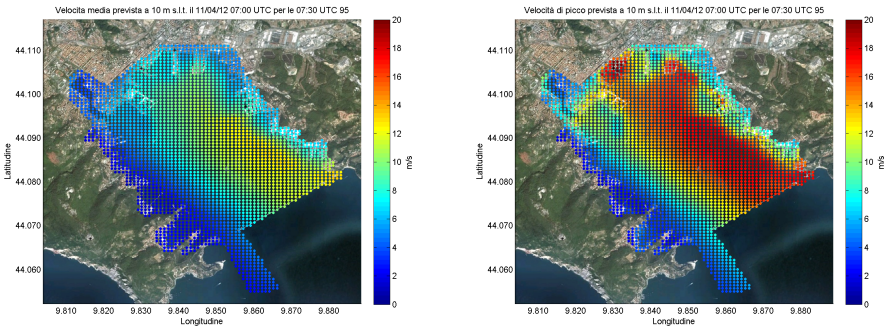
In particolare, dapprima è calcolata la velocità media futura come descritto nella sezione precedente; successivamente è calcolata la velocità di picco futura come prodotto tra la velocità media futura ed il coefficiente di raffica, applicando l'Eq. (3.12). Questo coefficiente dipende dall'intensità di turbolenza (definita dall'Eq. (2.6)), un parametro che descrive il livello di turbolenza dell'aria e determina l'entità della raffica rispetto alla velocità media attesa (Paragrafi 2.2 e 3.3). L'intensità di turbolenza è calcolata a partire dalle misure attuali registrate dagli anemometri e campionate con una frequenza di 10 Hz ed è assunta costante durante tutto l'orizzonte temporale di previsione.

Alcuni esempi di tale procedimento sono mostrati nelle immagini a destra delle Figure 6.9, 6.10 e 6.11, dove, analogamente a quanto già visto per la previsione della velocità media, sono indicate le velocità di picco previste a 10 m s.l.t. per i tre diversi orizzonti temporali sui Porti di La Spezia, Livorno e Savona–Vado, rispettivamente. Gli istanti di previsione sono gli stessi di quelli dei corrispondenti campi di velocità media.

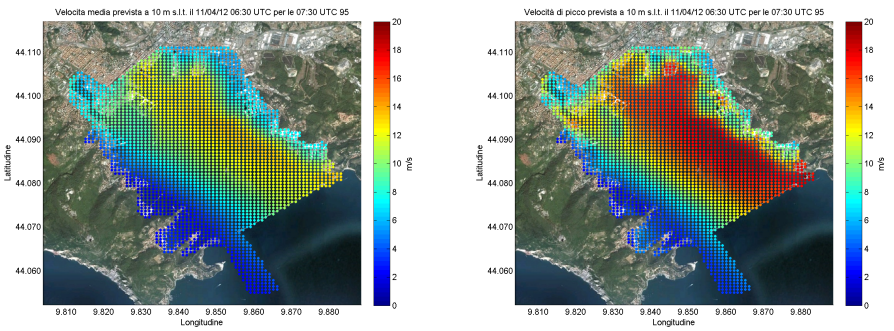
I modelli utilizzati per calcolare la velocità di picco del vento in funzione della velocità media e dell'intensità della turbolenza riferiti a un intervallo temporale di 10 minuti sono calibrati su eventi ciclonici a scala sinottica (Paragrafo 3.3). Durante gli eventi temporaleschi a mesoscala (Paragrafo 2.4), la velocità media del vento e l'intensità della turbolenza riferiti a 10 minuti perdono significato per il carattere non stazionario di tale evento. Pertanto, in questa circostanza, tanto il valore medio misurato quanto quello di picco stimato non sono rappresentativi.

Il valore di picco misurato, per contro, è quanto realmente accade nel punto dello strumento che lo registra. Sfortunatamente, a causa delle caratteristiche locali dell'evento che lo produce e della sua rapidità di evoluzione, il valore di picco della velocità non si presta a essere elaborato per ricostruire il campo di vento nel suo intorno, né tanto meno per prevederne l'evoluzione. Pertanto esso è inutilizzabile per la previsione a breve termine.

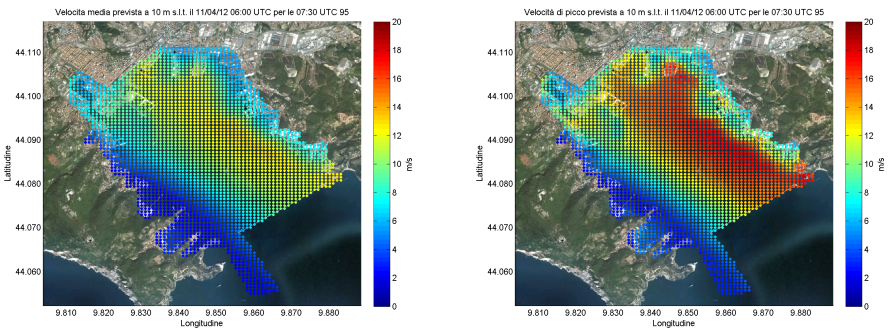
Come già osservato nel Paragrafo 2.4, le nuove reti di monitoraggio portuale offrono uno strumento d'avanguardia per approfondire un argomento oggetto di ricerche scientifiche in molte parti del mondo, purtroppo tuttora allo stato embrionale.



(a) Orizzonte temporale: 30 minuti

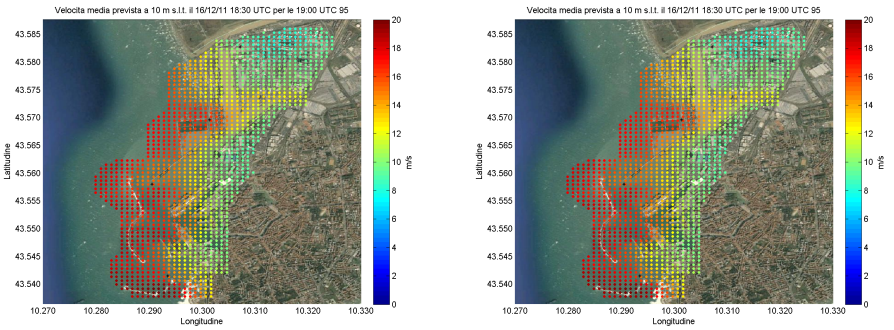


(b) Orizzonte temporale: 60 minuti

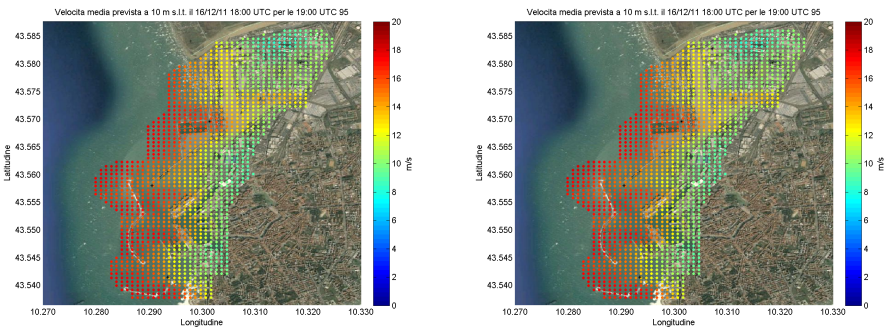


(c) Orizzonte temporale: 90 minuti

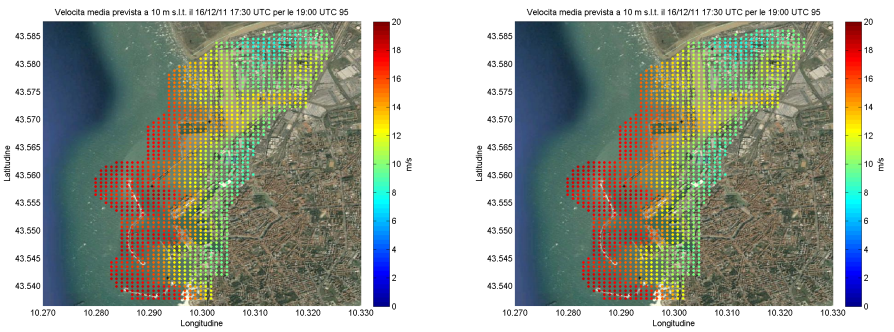
Figura 6.9: Previsione della velocità media (a sinistra) e della velocità di picco (a destra) nel Porto della Spezia per il giorno 11 aprile 2012 alle ore 7:30 UTC, realizzata con tre diversi orizzonti temporali di previsione pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso), e relativa ad un valore di probabilità di non superamento pari al 95%.



(a) Orizzonte temporale: 30 minuti

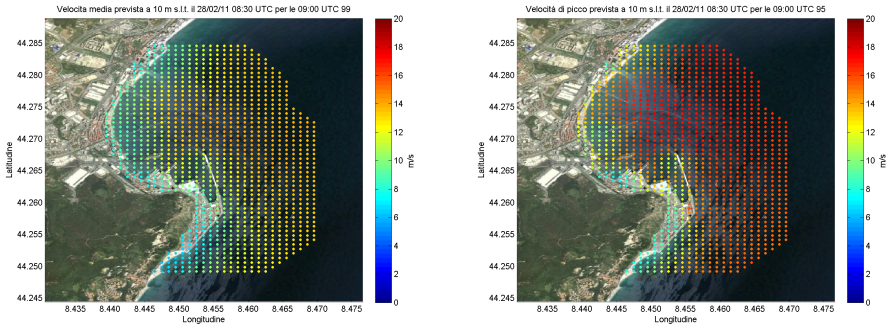


(b) Orizzonte temporale: 60 minuti

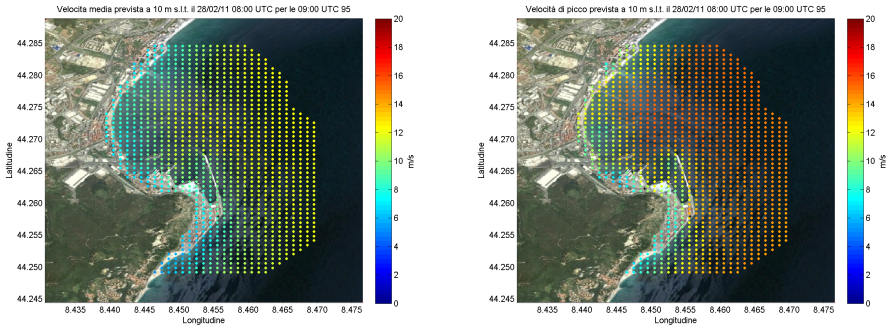


(c) Orizzonte temporale: 90 minuti

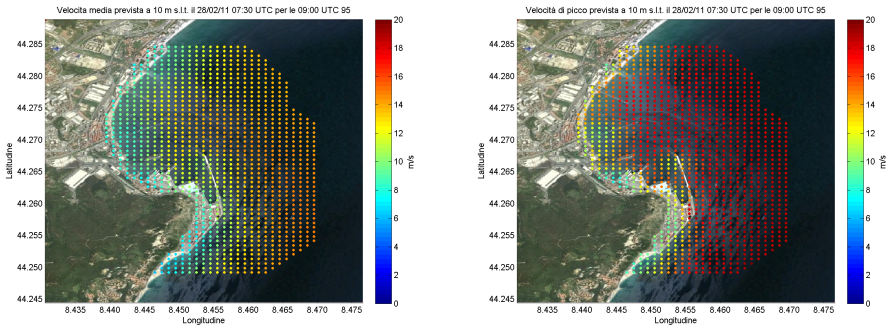
Figura 6.10: Previsione della velocità media (a sinistra) e della velocità di picco (a destra) nel Porto di Livorno per il giorno 16 dicembre 2011 alle ore 19:00 UTC, realizzata con tre diversi orizzonti temporali di previsione pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso), e relativa ad un valore di probabilità di non superamento pari al 95%.



(a) Orizzonte temporale: 30 minuti



(b) Orizzonte temporale: 60 minuti



(c) Orizzonte temporale: 90 minuti

Figura 6.11: Previsione della velocità media (a sinistra) e della velocità di picco (a destra) nel Porto di Vado Ligure per il giorno 28 febbraio 2011 alle ore 9:00 UTC, realizzata con tre diversi orizzonti temporali di previsione pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso), e relativa ad un valore di probabilità di non superamento pari al 95%.

6.3 Affidabilità del modello di simulazione

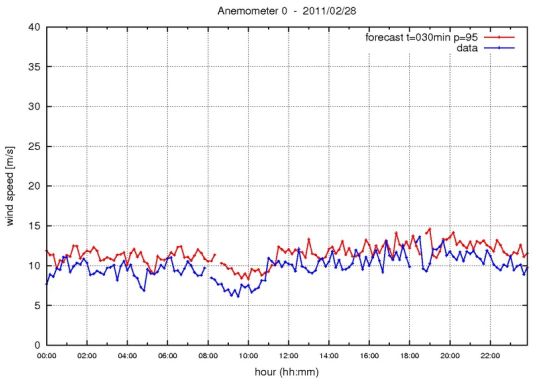
Il sistema di previsione del vento a breve termine nasce con la finalità di realizzare un sistema di pre-allerta che permetta la messa in sicurezza di persone e possibilmente di cose all'interno delle aree portuali in caso di condizioni meteorologiche caratterizzate da venti particolarmente intensi. In quest'ottica, è importante fare una serie di considerazioni sul sistema di previsione a breve termine e sulla tipologia di previsione prodotta in modo da consentire all'utente finale una corretta interpretazione del dato previsto, in particolare analizzando le situazioni più critiche per il sistema e per le incertezze associate alla previsione.

6.3.1 Lettura delle simulazioni

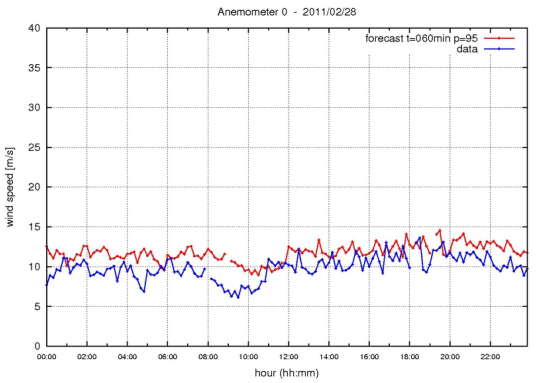
Innanzitutto occorre evidenziare quali siano le principali differenze tra le previsioni che si riferiscono a orizzonti previsionali crescenti. Partendo da un valore di velocità del vento misurato presso un anemometro, è possibile utilizzare le corrispondenti distribuzioni di probabilità condizionata dell'intensità del vento (come ad esempio quelle mostrate in Figura 6.8) per calcolare la previsione con i tre orizzonti temporali scelti, pari a 30, 60 e 90 minuti, fissato un valore di probabilità di non superamento. Il risultato è quello di ottenere, per un singolo valore di partenza, tre valori di previsione. Un esempio di questa procedura è riportato in Figura 6.12, che mostra per una stessa serie di valori di velocità del vento misurati il 28 febbraio 2011 dall'anemometro 0 del Porto di Savona i corrispondenti valori previsti con i tre diversi orizzonti temporali e probabilità di non superamento pari al 95%.

Le tre serie temporali delle previsioni (linee rosse) seguono un andamento molto simile alla serie temporale delle misure (linea blu). Rispetto alla serie misurata, le serie previste sono spostate verso destra di un valore pari all'orizzonte temporale corrispondente e verso l'alto di un valore che dipende dalla probabilità di non superamento scelta, in questo caso 95%. Lo spostamento verso destra delle serie all'aumentare dell'orizzonte temporale di previsione costituisce un comportamento intrinseco alla procedura di calcolo della previsione, il cui effetto comporta una capacità ridotta della previsione a seguire l'andamento delle misure. Il ritardo tra la previsione e le misure è tuttavia in parte compensato dalla forma delle distribuzioni di probabilità condizionata del vento che all'aumentare dell'orizzonte temporale tendono generalmente, a causa della maggiore incertezza della previsione, a produrre, a parità di probabilità di non superamento, valori più elevati della velocità del vento, e quindi a favore di sicurezza. Lo spostamento verso l'alto delle serie previste rispetto alle misure garantisce invece un margine di sicurezza nella previsione che sarà tanto maggiore quanto più alta è fissata la soglia di probabilità di non superamento. A parità di orizzonte temporale, infatti, probabilità di non superamento più elevate tenderanno a generare intensità del vento previsto sempre maggiori.

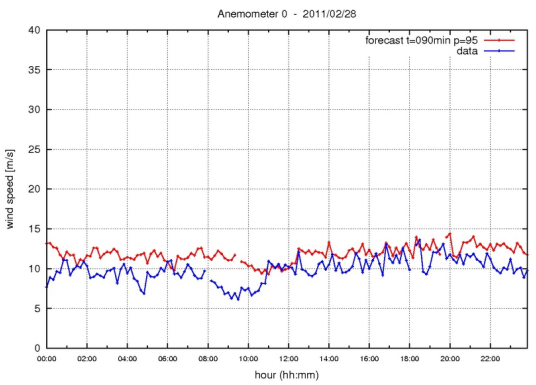
La successiva Figura 6.13 analizza, a titolo di esempio, un caso reale verificatosi il 25 ottobre 2011 presso il Porto della Spezia, in occasione del quale l'intensità del vento misurata dall'anemometro 1 ha subito in poche ore un repentino aumento da circa 2 m/s fino a più di 13 m/s. Inoltre, durante la fase più intensa dell'evento, dalle 8:00 alle 16:00 UTC, la velocità ha subito diverse oscillazioni dell'ordine di 4–5 m/s. In



(a) Orizzonte previsionale: 30 min

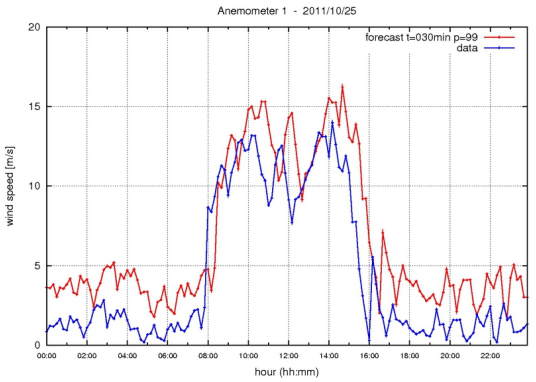


(b) Orizzonte previsionale: 60 min

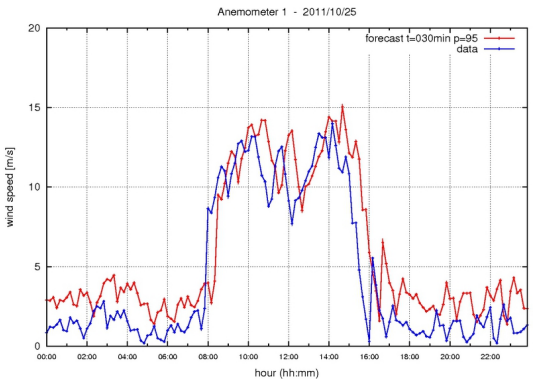


(c) Orizzonte previsionale: 90 min

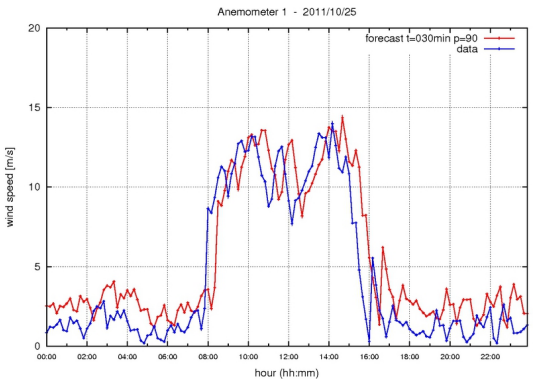
Figura 6.12: Misure dell'intensità media del vento (linee blu) relative all'anemometro 0 del Porto di Savona per il giorno 28 febbraio 2011 e previsioni (linee rosse) con orizzonte temporale pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 (in basso) minuti corrispondenti ad una probabilità di non superamento pari al 95%.



(a) Probabilità di non superamento: 99%



(b) Probabilità di non superamento: 95%



(c) Probabilità di non superamento: 90%

Figura 6.13: Misure dell'intensità media del vento (linee blu) relative all'anemometro 1 del Porto della Spezia per il giorno 25 ottobre 2011 e previsioni (linee rosse) con probabilità di non superamento pari al 99% (in alto), 95% (al centro) e 90% (in basso) corrispondenti ad un orizzonte temporale pari a 30 minuti.

questa particolare situazione la previsione corrispondente ad una scelta della probabilità di non superamento pari al 90% (immagine in basso) è caratterizzata da una serie di istanti, ad esempio intorno alle 11:30 UTC e dalle 12:30 alle 14:00 UTC, durante i quali l'intensità del vento è sottostimata rispetto alle misure. Al contrario, scegliendo un valore della probabilità di non superamento pari al 99%, la previsione rimane sempre, ad eccezione della rampa iniziale dell'evento, al di sopra delle misure e quindi a favore di sicurezza. Per valori dell'orizzonte temporale di previsione maggiori di 30 minuti (non mostrati in figura), ad esempio 60 o 90 minuti, l'ulteriore spostamento verso destra della previsione (linea rossa) rispetto alla serie delle misure (linea blu) tende a far aumentare il ritardo con cui il modello previsionale a breve termine riesce a seguire la rampa iniziale del vento, ed occorre quindi, a maggior ragione, utilizzare le soglie di probabilità di non superamento superiori.

6.3.2 Errori della previsione

Il funzionamento generale del sistema di previsione a breve termine del vento è analizzato statisticamente attraverso il confronto sistematico tra le previsioni, ottenute con tre orizzonti temporali e tre probabilità di non superamento, e le misure dell'intensità del vento relative al periodo di 1 anno, dal 1 febbraio 2011 al 31 gennaio 2012. Le analisi sono ripetute per tutti gli anemometri dei tre Porti di Livorno, Savona e La Spezia, di cui si riportano alcuni esempi nelle Figure 6.14, 6.15 e 6.16.

Tali figure mostrano l'errore relativo, espresso in termini percentuali, tra le velocità del vento misurate, V_m, e quelle previste, V_p, per l'anemometro 3 del Porto di Livorno, l'anemometro 0 del Porto di Savona e l'anemometro 2 del Porto della Spezia, rispettivamente. In ogni singola immagine sono riportati i valori dell'errore relativo corrispondente alle tre probabilità di non superamento pari al 90%, 95% e 99%.

L'errore relativo della previsione è definito attraverso l'espressione:

$$\varepsilon = 100 \times \frac{V_m - V_p}{V_m} \tag{6.2}$$

Esso permette di valutare in quali casi la previsione abbia sovrastimato o sottostimato l'intensità del vento a seconda del segno assunto da ε: nel caso in cui il vento previsto sia risultato superiore a quello poi misurato ε assume valori negativi, mentre nel caso in cui il vento previsto sia risultato minore di quello misurato ε assume valori positivi. Poiché la previsione del vento a breve termine è la soglia superiore della velocità non superata con una probabilità del 90%, 95% o 99% a seconda dei casi, si può ritenere che tale previsione sia corretta tutte le volte che il valore dell'errore relativo risulta negativo.

Specialmente nei casi di eventi moderati o intensi, valori troppo negativi dell'errore relativo potrebbero generare situazioni di allerta che risulterebbero in realtà soltanto dei falsi allarmi. Infatti, i valori molto negativi dell'errore relativo corrispondono a quelle situazioni in cui le intensità previste risultano anche due o tre volte maggiori rispetto ai valori che si sono effettivamente realizzati: in caso di eventi meteorologici moderati, e quindi non particolarmente rischiosi, prevedere una intensità del vento doppia potrebbe significare oltrepassare la soglia di allerta generando una situazione di falso allarme.

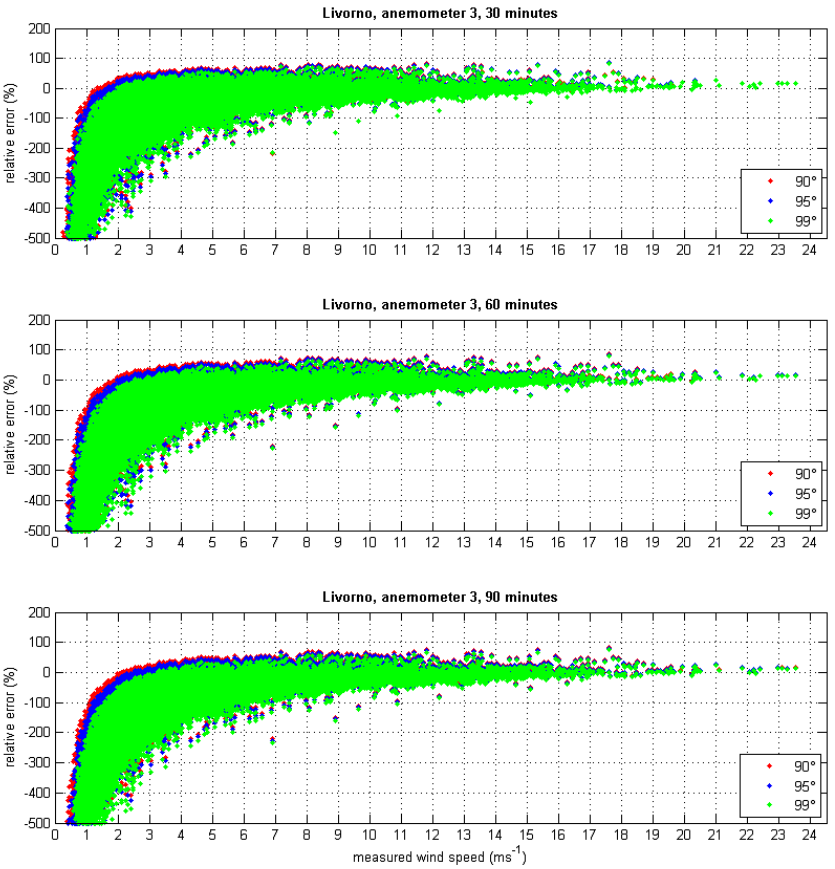


Figura 6.14: Errore relativo percentuale tra le misure dell'intensità media del vento e le corrispondenti previsioni prodotte con orizzonte temporale pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso) per l'anemometro 3 del Porto di Livorno.

Al contrario, quando l'errore relativo è maggiore di zero il sistema previsionale opera a sfavore di sicurezza in quanto l'intensità prevista è inferiore a quella che si è verificata.

Le Figure 6.14–6.16 mostrano che per bassi valori dell'intensità del vento (asse delle ascisse) l'errore relativo è generalmente molto minore di zero. Nel dominio delle basse intensità del vento, valori anche molto negativi non rappresentano comunque un problema di falso allarme poiché i valori previsti, pur essendo molto superiori a quelli attuali, non costituiscono una reale situazione di rischio e non oltrepassano le soglie di allerta. All'aumentare della velocità del vento gli errori relativi si riducono progressivamente e per le situazioni più intense tendono gradualmente a zero. Questo significa, da una parte, che nelle situazioni di maggior rischio la probabilità che si generi un falso allarme è molto bassa, e dall'altra parte, che più l'evento meteorologico

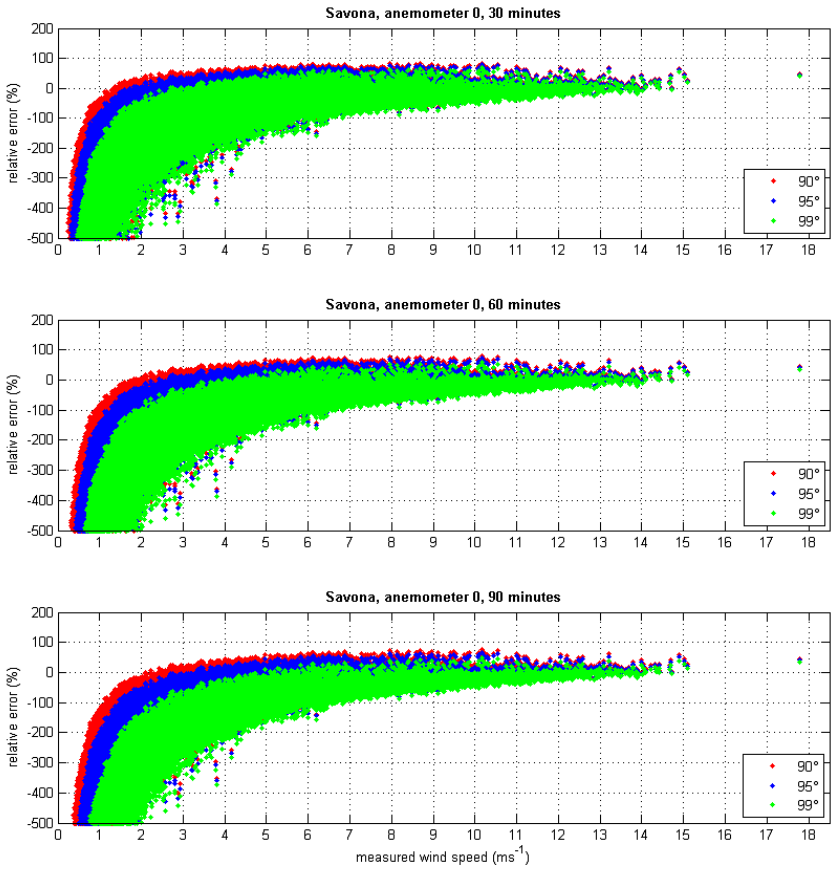


Figura 6.15: Errore relativo percentuale tra le misure dell'intensità media del vento e le corrispondenti previsioni prodotte con orizzonte temporale pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso) per l'anemometro 0 del Porto di Savona.

è intenso minore è l'eventuale sottostima della previsione.

In ogni caso rimane la possibilità, tipica di qualunque algoritmo previsionale, che si verifichi un evento eccezionale, mai accaduto in precedenza, nei confronti del quale il sistema previsionale a breve termine elabori una previsione non affidabile, frutto di un'estrapolazione dei dati utilizzati in fase di calibrazione e delle incertezze proprie di ogni evento atmosferico.

La Tabella 6.4 riporta i valori dell'errore relativo medio calcolato su intervalli crescenti della velocità del vento per i tre anemometri mostrati nelle precedenti Figure 6.14–6.16 e per tutti gli orizzonti temporali e le probabilità di non superamento (valori di H e P in tabella). Prendendo come esempio il caso dell'anemometro 3 del Porto di Livorno (tabella in alto), scegliendo il valore di probabilità di non superamento pari a 90% (prima colonna) e il valore dell'orizzonte temporale pari a 30 minuti

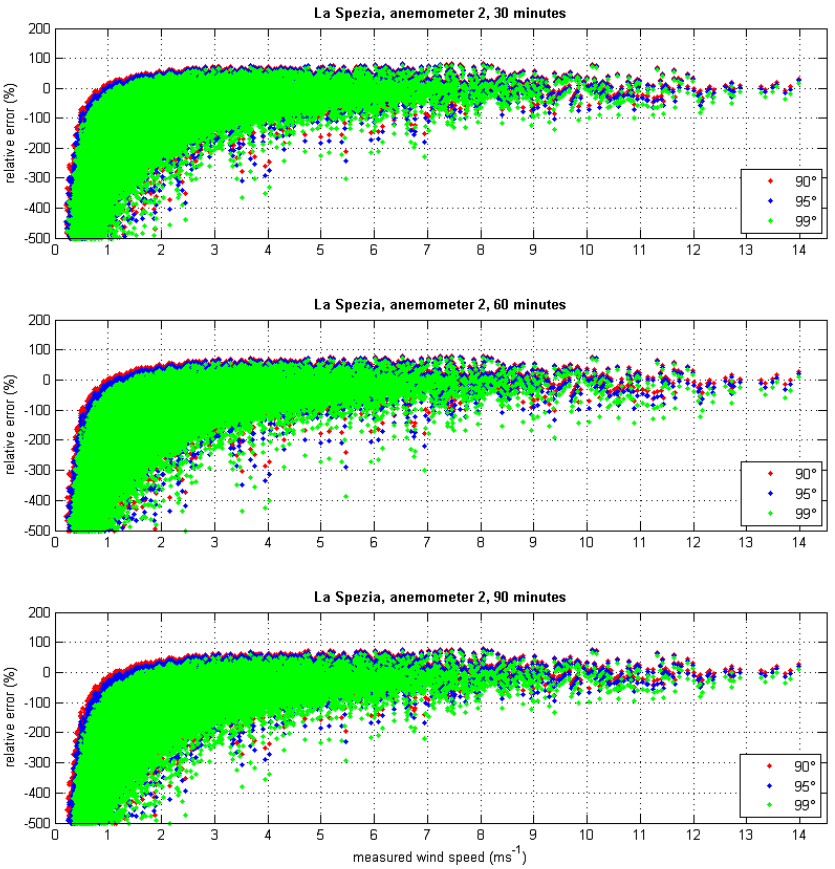


Figura 6.16: Errore relativo percentuale tra le misure dell'intensità media del vento e le corrispondenti previsioni prodotte con orizzonte temporale pari a 30 (in alto), 60 (al centro) e 90 minuti (in basso) per l'anemometro 2 del Porto della Spezia.

(seconda colonna), la Tabella 6.4 indica che per intensità del vento superiori a 8 m/s l'errore relativo medio è pari a -3%, mentre per intensità maggiori di 10 e 12 m/s l'errore si riduce a -1% e circa 0% rispettivamente.

L'errore relativo medio decresce all'aumentare dell'intensità del vento per qualunque coppia di valori della probabilità di non superamento e dell'orizzonte temporale. Tale comportamento è dovuto al fatto che, nei casi di velocità del vento più elevate, il sistema previsionale da un lato tende a ridurre l'errore tra la previsione e le misure e dall'altro distribuisce tale errore in modo casuale intorno allo zero, come si può notare dalla forma sempre più affusolata e simmetrica rispetto allo zero che assumono i grafici delle Figure 6.14–6.16 per le intensità maggiori. Questo dimostra che l'affidabilità dell'algoritmo utilizzato per calcolare le previsione del vento a breve termine aumenta soprattutto per gli eventi meteorologici più intensi, e quindi proprio nelle situazioni di

P	H	Livorno, anemometro 3		
		$V \geqslant 8$ (m/s)	$V \geqslant 10$ (m/s)	$V \geqslant 12$ (m/s)
90%	30	-3	-1	0
	60	-5	-1	0
	90	-6	-1	0
95%	30	-4	-1	0
	60	-7	-2	-1
	90	-11	-2	-1
99%	30	-7	-2	-1
	60	-14	-3	-1
	90	-25	-6	-1
		Savona, anemometro 0		
		$V \geqslant 8$ (m/s)	$V \geqslant 10$ (m/s)	$V \geqslant 12$ (m/s)
90%	30	-8	-2	0
	60	-11	-3	0
	90	-13	-3	0
95%	30	-12	-4	-1
	60	-20	-5	-1
	90	-27	-7	-1
99%	30	-23	-7	-1
	60	-61	-17	-3
	90	-113	-31	-4
		La Spezia, anemometro 2		
		$V \geqslant 6$ (m/s)	$V \geqslant 8$ (m/s)	$V \geqslant 10$ (m/s)
90%	30	-3	-1	0
	60	-3	-1	0
	90	-4	-1	0
95%	30	-4	-1	0
	60	-5	-2	-1
	90	-7	-2	-1
99%	30	-8	-2	-1
	60	-12	-3	-2
	90	-17	-4	-2

Tabella 6.4: Valori dell'errore relativo medio relativi all'anemometro 3 del Porto di Livorno (in alto), all'anemometro 0 del Porto di Savona (al centro) e all'anemometro 2 del Porto della Spezia, calcolati per tutte le combinazioni di probabilità di non superamento e orizzonte temporale della previsione, in funzione dell'aumento dell'intensità del vento misurato.

maggior rischio.

La Tabella 6.4 mostra inoltre che il sistema previsionale produce valori maggiormente cautelativi all'aumentare della probabilità di non superamento. L'errore relativo medio tende infatti, a parità di orizzonte temporale, a diventare via via più negativo tanto maggiore è la probabilità di non superamento: sempre nel caso di Livorno, sce-

gliendo ad esempio $H = 30$ minuti e $V \geqslant 8$ m/s, ε vale -3%, -4% e -7% per valori di P pari a 90%, 95% e 99%, rispettivamente.

6.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo

Il sistema previsionale a breve termine del vento implementato nell'ambito del presente progetto rappresenta l'anello di congiunzione tra l'acquisizione di misure locali della ventosità, registrate dalle reti anemometriche di monitoraggio dei cinque Porti di Bastia, Genova, Livorno, Savona e La Spezia, e la possibilità di estendere nel tempo e nello spazio tali misure per creare un sistema di allerta riguardo alle azioni del vento tale da operare in sicurezza all'interno delle aree portuali.

L'operatività del sistema dipende dalla capacità di acquisire misure anemometriche in tempo reale, in particolare utilizzando strumenti ad alta precisione che consentono di ottenere stime sia della velocità media sia della velocità di picco. Da questo punto di vista, l'utilizzo di un maggior numero di punti di misura, attraverso l'installazione di nuovi anemometri sonici o di strumenti in grado di misurare la velocità del vento lungo profili verticali (SoDAR o LiDAR, Paragrafo 2.4), aumenterebbe ulteriormente l'affidabilità della previsione in quanto diminuirebbe il peso dell'interpolazione operata dai modelli numerici per trasferire le informazioni dagli anemometri alle griglie computazionali portuali.

Il sistema previsionale è calibrato utilizzando le misure anemometriche acquisite per un anno dagli stessi strumenti che vengono utilizzati durante la fase operativa, ma può e dovrebbe essere tarato nuovamente dopo ogni anno di attività per aumentarne l'afidabilità soprattutto rispetto alle situazioni di vento più intenso. Da questo punto di vista, l'attuale sistema previsionale rappresenta in realtà un punto di partenza che potrà essere migliorato attraverso una serie di successivi aggiornamenti negli anni a venire.

Un'interessante possibilità è quella di un potenziamento delle basi dati delle misure anemometriche mediante nuove serie di dati virtuali ottenuti trasferendo le misure delle stazioni storiche ai porti. L'impiego del metodo Monte Carlo consentirebbe di prolungare tali serie su periodi temporali di molte migliaia di anni, aumentando considerevolmente l'affidabilità del sistema previsionale.

L'algoritmo attualmente implementato nel sistema, basato sul concetto di probabilità condizionata, cioè sulla possibilità di predire la velocità del vento nel futuro una volta che sia nota la velocità all'istante presente, restituisce una previsione di tipo probabilistico. L'impostazione probabilistica del sistema previsionale costituisce la scelta più corretta per un sistema finalizzato alla sicurezza, ma potrebbe essere ampliata impiegando algoritmi destinati alla previsione del vento atteso e del valore del vento più probabile, ad esempio mediante reti neurali, filtri di Kalman o metodi autoregressivi come i modelli ARMA. Questo permetterebbe anche di estendere notevolmente gli ambiti applicativi del presente sistema verso usi differenti, quali, ad esempio, la previsione dell'energia producibile dal vento mediante l'installazione di turbine eoliche, che necessita proprio di valori del vento atteso.

7 WebGIS meteorologico

Come descritto nei Capitoli precedenti, il progetto "Vento e Porti" ha prodotto una quantità enorme d'informazioni. Le mappe statistiche del vento costituiscono un patrimonio acquisito dalle Autorità Portuali per la pianificazione di lungo periodo, la progettazione delle opere civili, lo sfruttamento del potenziale energetico eolico e lo studio della dispersione delle sostanze inquinanti e polverose in atmosfera. Le misure eseguite dalla rete anemometrica di monitoraggio portuale e le previsioni a breve e medio termine sono aggiornate in tempo reale e rappresentano uno strumento a elevato contenuto tecnologico a disposizione degli operatori portuali per la gestione quotidiana delle attività e della sicurezza.

Per rendere pienamente disponibile queste informazioni, è stato realizzato un ambiente GIS con interfaccia web-based, assolutamente innovativo, per la consultazione dinamica dei risultati prodotti dal progetto. In particolare è stato sviluppato un algoritmo interattivo attraverso il quale gli operatori autorizzati dalle Autorità Portuali possono visualizzare in tempo reale tali informazioni, selezionando le zone portuali e i livelli altimetrici d'interesse. Per le previsioni a medio e a breve termine è inoltre possibile scegliere l'intervallo e l'orizzonte temporale delle restituzioni. Nel caso delle mappe statistiche, è infine possibile selezionare la probabilità d'occorrenza dei valori correnti o estremi della velocità del vento di cui si chiede la restituzione.

Il WebGIS è un'interfaccia tanto innovativa e complessa dal punto di vista della realizzazione, quanto semplice e fruibile sotto l'aspetto del suo utilizzo. Esso permette di dare piena attuazione agli obiettivi del progetto consentendo, da un lato, l'accesso diretto a una messe di dati senza precedenti, con la regia delle Autorità Portuali che regolano le autorizzazioni agli accessi, dall'altro, il controllo e l'aggiornamento continuo degli algoritmi elaborati, organizzati in modo tale da essere regolarmente aggiornati, oltre la fine del progetto, dall'attuatore scientifico.

7.1 Interfaccia grafica del sito WebGIS

Al momento della stesura del presente capitolo, il sito internet è in fase di completamento. Si riportano quindi i criteri generali che ne ispirano la realizzazione e alcuni esempi applicativi che rispecchiano l'attuale avanzamento dell'implementazione. Per la visione dell'interfaccia finale del sito, si rimanda al link:

`http://www.ventoeporti.webgis.it`.

L'interfaccia grafica prevede un menù principale composto da 8 pagine, di cui 2 generali e pubbliche (*Home page* e *Alto Tirreno*) e 6 dedicate a ciascuno dei bacini dei porti Partner del progetto (*Genova*, *Livorno*, *Bastia*, *Savona* e *Vado Ligure*, *La Spezia*) (Figura 7.1). Inoltre, sulla parte destra dello schermo è presente la sezione *Login*, mediante la quale è possibile accedere ai contenuti abilitati e gestire alcune impostazioni del profilo utente registrato.



Figura 7.1: Home Page del sito WebGIS.

La *Home Page* prevede una mappa interattiva dell'Alto Tirreno, in cui sono evidenziati i Porti coinvolti nel progetto. Per ciascun porto, è visualizzato il monitoraggio di uno degli anemometri portuali, rappresentativo della ventosità istantanea nel porto. Una volta effettuato il login, cliccando sul punto rappresentativo del porto, gli utenti possono accedere direttamente alla sezione *Monitoraggio*.

La pagina *Alto Tirreno* riporta la previsione a medio termine elaborata appunto sull'area dell'Alto Tirreno con una risoluzione di 2.2 km (Capitolo 5). La mappa visualizzata corrisponde a un passo intermedio del procedimento di previsione del vento a medio termine sulle aree portuali. Tale prodotto possiede un suo proprio interesse, poiché consente, da un lato, di visualizzare la situazione meteorologica generale riguardante l'area, dall'altro, di avere informazioni, sebbene a carattere previsionale, sul campo di vento nelle aree marine antistante i porti (Figura 7.2).

La pagina di *Login*, evidenziata in una finestra a destra della *Home Page*, permette di regolare gli accessi alle restanti parti del sito. La gestione delle informazioni prodotte dal progetto rappresenta un punto delicato e molto dibattuto: da un lato, i risultati ottenuti sono un patrimonio pubblico in quanto finanziati dall'Unione Europea; dall'altro, molti risultati sono tuttora in una fase sperimentale e richiedono un periodo adeguato per essere considerati completamente affidabili; sotto questo punto di vista può essere utile, almeno nella prima fase di utilizzo del sito, adottare un approccio prudente nella diffusione dei dati prodotti. Per tali ragioni, sono previste tre diverse tipologie di utente: l'amministratore del sistema, lo sviluppatore e l'utente standard.

L'amministratore del sistema, tipicamente rappresentato dall'Autorità Portuale competente, può accedere a ogni sezione del sistema, può creare nuovi utenti e ne

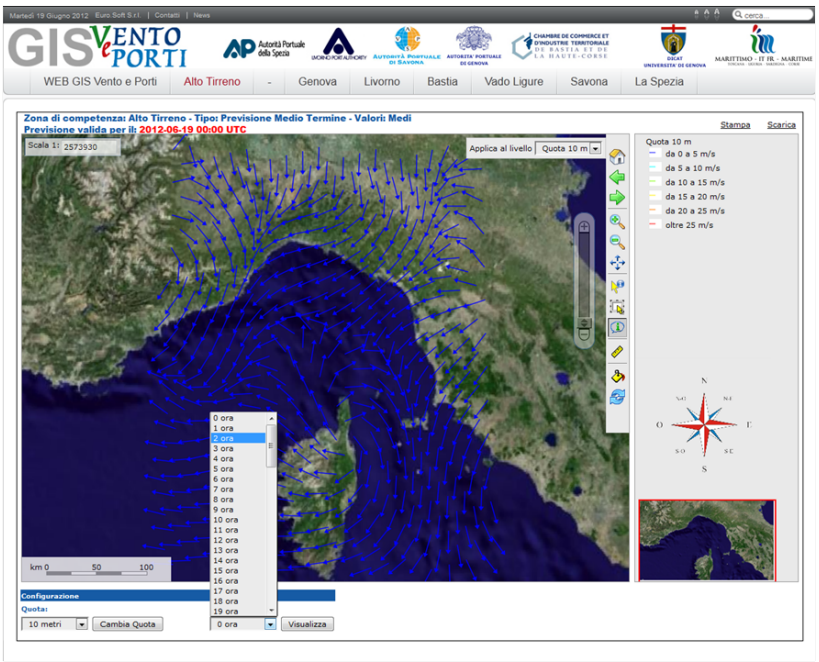


Figura 7.2: Pagina relativa alle previsioni a medio termine sull'Alto Tirreno del sito WebGIS.

può gestire le autorizzazioni all'uso totale o parziale del sito. Lo sviluppatore può accedere a ogni sezione del sistema, ma non può creare o gestire gli accessi. L'utente standard può accedere soltanto alle sezioni comuni e a quelle relative al proprio gruppo di appartenenza, regolate dalla competente Autorità Portuale. In particolare, sulla base del proprio gruppo di appartenenza, l'utente può avere l'autorizzazione a visualizzare le informazioni relative al proprio porto, ma non può visualizzare le informazioni relative alle previsione a medio e a breve termine delle altre aree portuali, fatti salvi successivi accordi interportuali.

Una volta effettuato il *login*, l'utente ha la possibilità di personalizzare il proprio profilo, scegliendo diversi parametri per la navigazione del sito, quali la lingua e il fuso orario (Figura 7.3).

Le restanti 6 pagine, relative ciascuna a un'area portuale, sono a loro volta suddivise in 4 sezioni, nelle quali sono strutturati tutti i prodotti del progetto relativi al porto selezionato. Le sezioni, presentate attraverso un menù a tendina (Figura 7.1), prevedono le seguenti possibilità:

- Statistica
- Monitoraggio
- Previsione a breve termine
- Previsione a medio termine

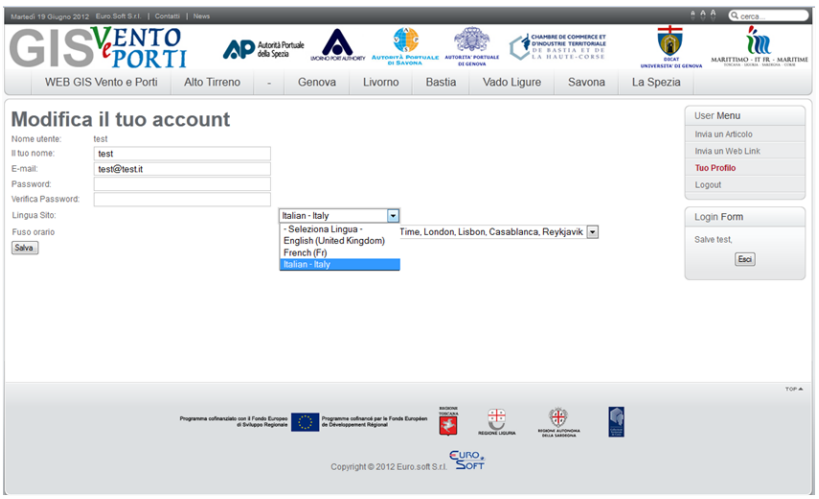


Figura 7.3: Pagina di impostazione del profilo utente.

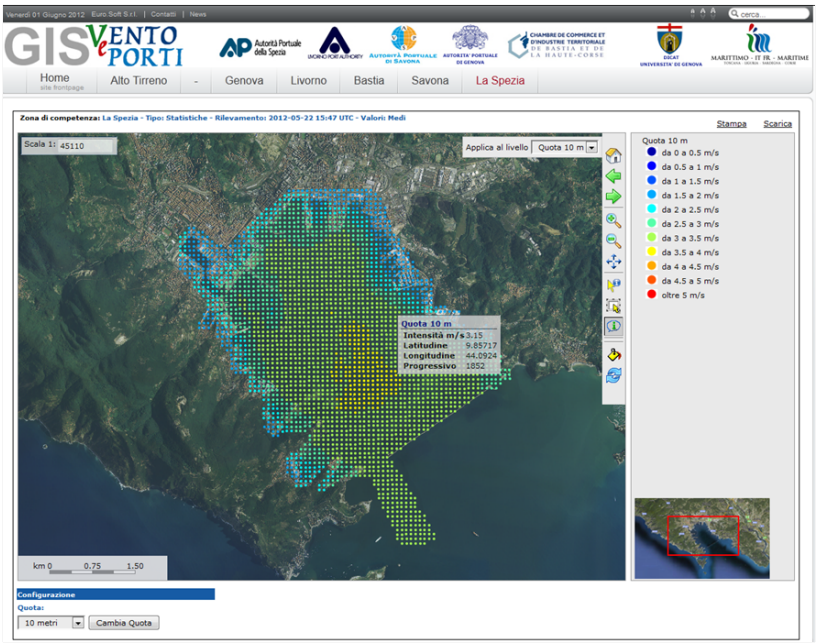
La visualizzazione dei contenuti delle diverse sezioni è descritta in dettaglio nel seguito.

7.1.1 Sezione *Statistica*

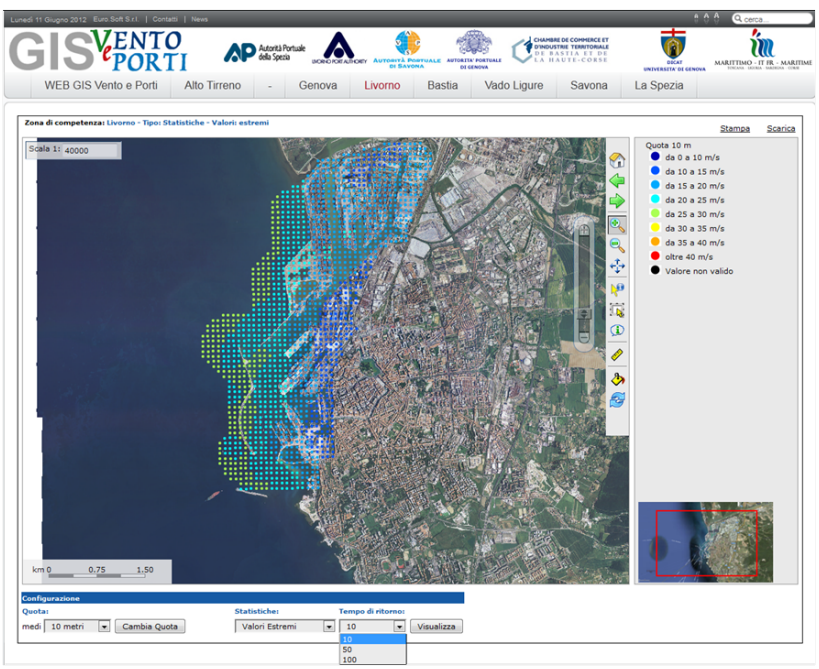
La pagina relativa alla statistica di lungo periodo riporta una selezione delle mappe statistiche delle aree portuali descritte nel Capitolo 4. La pagina si apre con un tematismo geografico di base centrato sull'area portuale prescelta. A questo sfondo sono sovrapposte le mappe del campo di vento corrispondenti alla statistica richiesta. La Figura 7.4 riporta un esempio relativo alla mappa dei valori medi annuali a quota 10 m nel Porto della Spezia. Lo schema della finestra è comune a tutte le sezioni e prevede una parte centrale principale con la visualizzazione della mappa o del prodotto richiesto, una parte a destra di legenda e una parte sottostante di configurazione.

L'area centrale principale riporta, in una banda superiore, il titolo del prodotto visualizzato, comprendente i riferimenti principali dei dati. Sono inoltre riportati i bottoni di stampa (su file o stampante) e di download dei prodotti selezionati. A destra dell'area principale sono incolonnate una serie di icone, mediante le quali avviene la navigazione; esse comprendono le varie operazioni di zoom, di selezione, di richiesta informazioni e di aggiornamento della mappa visualizzata. In particolare, le icone di richiesta d'informazioni permettono, una volta selezionate, di accedere ai dettagli numerici del prodotto, in ogni punto della mappa, mediante tabella (per selezioni multiple) o mediante pop-up (per selezioni singole). In alto a sinistra è inoltre riportata una finestra di definizione della scala della mappa, che può essere impostata alternativamente mediante zoom o mediante impostazione diretta.

L'area a destra della finestra principale riporta generalmente la legenda che permette di associare ai colori della mappa una banda di valori di velocità media, espressi nell'unità di misura impostata dall'utente. In basso è anche riportata un'anteprima



(a) Valori medi



(b) Valori estremi

Figura 7.4: Esempio di due pagine della sezione *Statistica* per il Porto della Spezia.

dell'area geografica complessiva per permettere all'utente un migliore orientamento nel bacino portuale.

L'area sottostante alla finestra principale riporta i menù a tendina di configurazione, mediante i quali l'utente può scegliere il prodotto da visualizzare e la quota rispetto al terreno della mappa desiderata. Rispetto alla totalità dei prodotti sviluppati dal progetto, il sito WebGIS ne riporta un sottoinsieme. La scelta effettuata privilegia, da un lato, la chiarezza del sito anche nei confronti del personale non tecnico, dall'altro, la relativa snellezza e rapidità del software.

Per la sezione *Statistica* sono visualizzabili le mappe a quota 10 m, 20 m, 50 m e 100 m sul livello del terreno. I prodotti selezionabili comprendono le mappe di velocità media annuale e le mappe dei valori massimi della velocità media del vento corrispondenti ai periodi di ritorno di 10, 50 e 100 anni. Mediante un'apposita icona sono inoltre visualizzabili su pop-up le rose del vento per tutti i punti del grigliato.

7.1.2 Sezione *Monitoraggio*

La sezione relativa al monitoraggio riveste un interesse di grande importanza per tutti gli attori portuali, poiché permette di consultare via Web in tempo reale le misure anemometriche. I dati riportati non sono frutto di modellistica né di algoritmi previsionali; pertanto costituiscono un dato affidabile e certo. I dati misurati sono descritti in dettaglio nel Capitolo 2.

La pagina si apre con un tematismo geografico di base centrato sull'area portuale prescelta, a cui si sovrappone la visualizzazione delle misure anemometriche mediante frecce colorate posizionate in corrispondenza dei punti planimetrici identificativi degli anemometri portuali. Il colore, la lunghezza e l'orientamento della freccia rappresentano la velocità media del vento e la direzione prevalente riferita ai 10 minuti precedenti. La pagina si aggiorna automaticamente ogni 10 minuti, visualizzando la nuova misura. Anche in questo caso, l'area a destra della pagina principale riporta la legenda; non è invece presente l'area sottostante di configurazione, poiché in questo caso non sono visualizzabili prodotti diversi.

Mediante l'icona di selezione, cliccando sulla freccia in corrispondenza di ogni anemometro, sono visualizzabili due tipi di informazioni: il dettaglio numerico della lettura anemometrica visualizzata e lo storico misurato dall'anemometro nelle precedenti 24 ore. La prima informazione è visualizzata mediante una tabella in cui sono riportati i valori numerici di velocità media, direzione di provenienza e velocità massima del vento negli ultimi 10 minuti, le coordinate geografiche e la quota dello strumento (Figura 7.5). L'informazione relativa allo storico è visualizzata mediante un diagramma che riporta in ascissa l'istante della misura, in ordinata i valori misurati dallo strumento selezionato rappresentati sia in scala numerica sia in scala Beaufort delle intensità del vento (Figura 7.6). La possibilità di visualizzare dati storici all'interno del WebGIS ha lo scopo di permettere una valutazione qualitativa della tendenza delle registrazioni nell'arco della giornata. Le Autorità Portuali hanno a disposizione l'intera base dati misurata dagli anemometri dal momento dell'installazione.

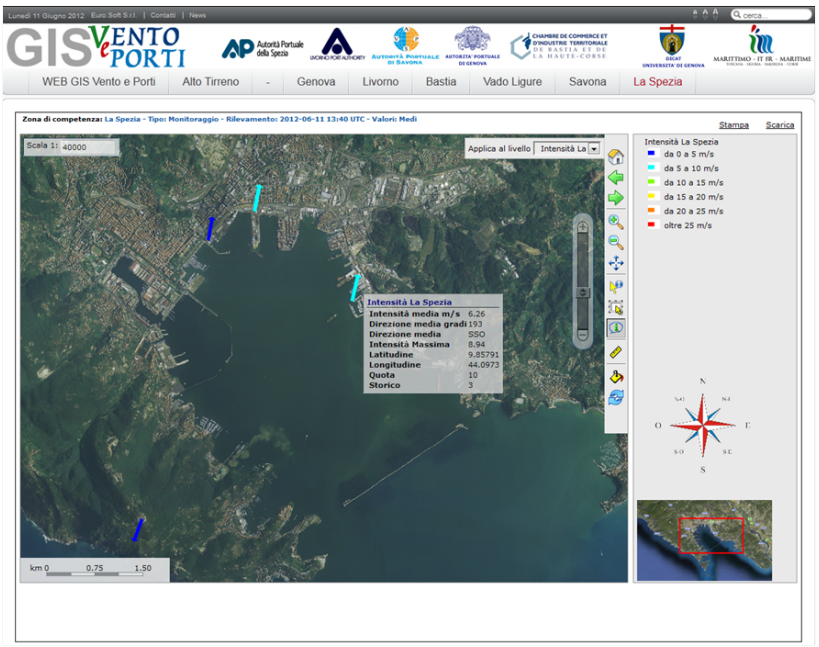


Figura 7.5: Esempio di pagina della sezione *Monitoraggio* per il Porto della Spezia.

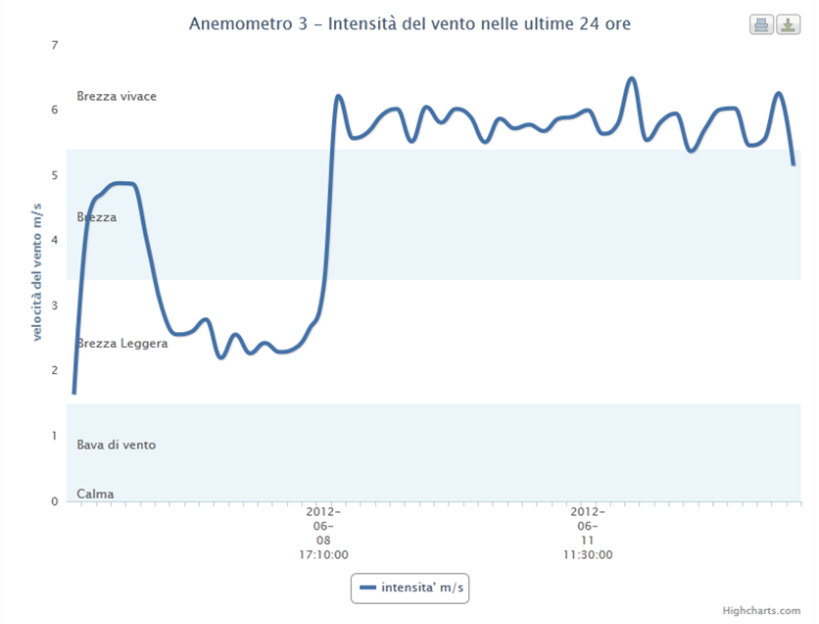


Figura 7.6: Esempio di diagramma dei dati misurati dall'anemometro della Spezia nelle 24 ore precedenti alla misura visualizzata.

7.1.3 Sezione *Previsione a breve termine*

La sezione relativa alla previsione a breve termine riporta le elaborazioni numeriche e previsionali che, a partire dalle registrazioni anemometriche portuali, permettono di ricostruire il campo di vento istantaneo e previsto in un arco temporale in avanti sino a 90 minuti dalla registrazione. A differenza della sezione *Monitoraggio*, in questa pagina i dati misurati sono rielaborati sulla base di algoritmi numerici e previsionali; pertanto i risultati visualizzati sono affetti da incertezze, dovute sia all'aleatorietà del fenomeno eolico sia alle approssimazioni introdotte dagli algoritmi.

Gli algoritmi di trasformazione dei dati dagli anemometri ai punti della griglia portuale sono descritti nel Capitolo 3. Gli algoritmi statistici per la previsione a breve termine sono descritti nel Capitolo 6.

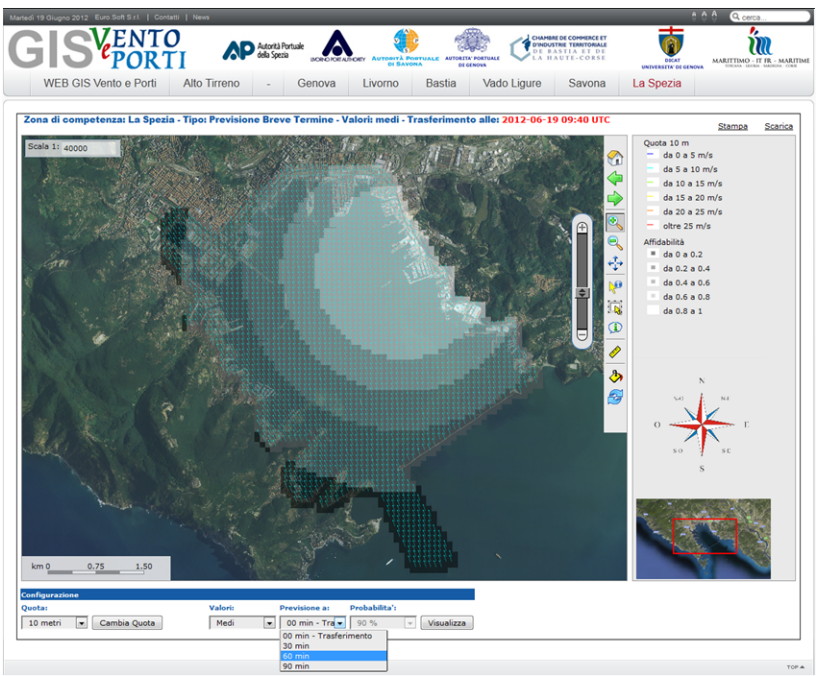


Figura 7.7: Esempio di mappa delle velocità trasferite a tutti i punti del reticolo dell'area della Spezia a partire dalle misure degli anemometri portuali.

La pagina si apre con un tematismo geografico centrato sull'area portuale di competenza dell'utente. A questo tematismo di sfondo sono sovrapposte le mappe dei campi di vento corrispondenti al prodotto selezionato. La Figura 7.7 riporta un esempio relativo ai valori medi del vento a quota 10 m nel Porto della Spezia. Tramite le impostazioni di configurazione nella parte bassa della pagina, sono visualizzabili le mappe a quota 10 m, 20 m, 50 m e 100 m sul livello del terreno. I prodotti selezionabili comprendono le mappe della velocità media e di picco, corrispondenti alle previsioni su quattro diversi orizzonti temporali, rispettivamente 0, 30, 60 e 90 minuti rispetto alla lettura anemometrica, e a tre diversi livelli di probabilità, rispettivamente 90%, 95% e

99% di probabilità di non superamento del dato visualizzato. Gli intervalli temporali forniti hanno diversa valenza. L'intervallo temporale di 0 minuti corrisponde, in realtà, alla mappa del vento misurato dagli anemometri, fornito dalla sezione *Monitoraggio*, trasferito a tutti i punti della griglia portuale alla quota desiderata mediante gli algoritmi di trasformazione numerica elaborati nel progetto. In questo caso la mappa visualizzata non è propriamente una 'previsione', ma piuttosto un'estrapolazione numerica del dato misurato. L'approssimazione, rispetto al dato misurato, risiede nel livello di affidabilità degli algoritmi numerici di trasformazione. Come già evidenziato nel Capitolo 3, tali modelli approssimano gli ostacoli presenti sulla superficie terrestre come una rugosità equivalente del suolo e non tengono conto di ostacoli locali e/o transitori, quali la presenza di navi e lo stoccaggio di contenitori.

Le mappe corrispondenti a intervalli temporali maggiori di 0 minuti corrispondono a effettive previsioni. In questo caso le approssimazioni coinvolte sommano le incertezze legate ai modelli numerici di trasferimento e agli algoritmi statistici di previsione. Al fine di evidenziare l'incertezza intrinseca nelle valutazioni, le mappe sono caratterizzate da fasce di colore grigio, la cui intensità corrisponde a una minore affidabilità della previsione visualizzata, secondo una scala riportata nella legenda a destra della mappa.

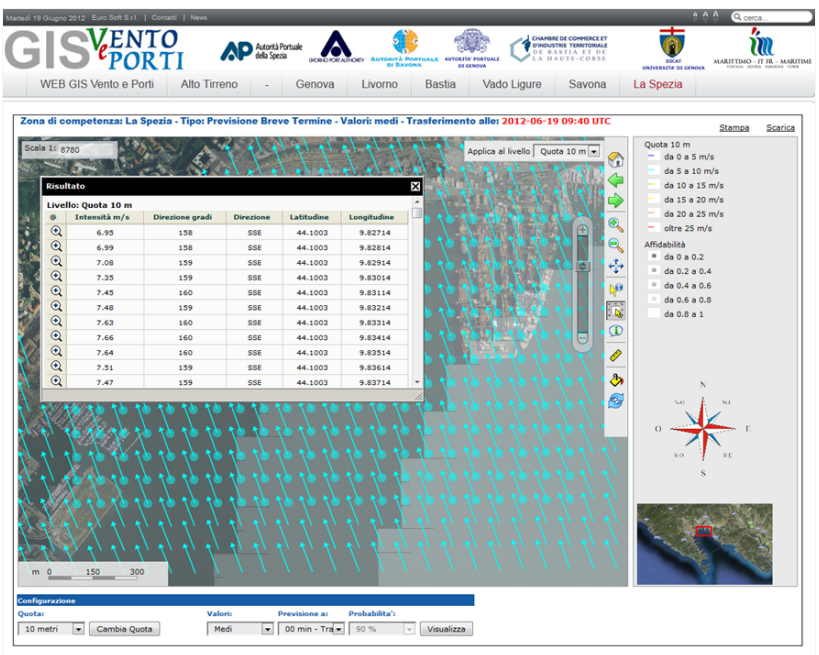


Figura 7.8: Esempio di tabella dati corrispondente a una selezione multipla nella sezione *Previsione a breve termine*.

L'utente ha la possibilità di richiamare, mediante passaggio del mouse in un qualunque punto della cartina, una finestra tipo pop-up contenente l'intensità e la direzione del vento in quel punto, corrispondente alle impostazioni di previsione riferite alla mappa visualizzata. È inoltre possibile ottenere i valori in tabelle, selezionando un'area con

l'opportuno comando, come descritto in precedenza. La Figura 7.7 riporta un esempio di mappa delle velocità trasferite a tutti i punti del reticolo dell'area della Spezia a partire dalle misure degli anemometri portuali. Tale mappa corrisponde all'impostazione della previsione a 0 minuti (area di Configurazione in basso). La Figura 7.8 riporta un esempio della tabella di dati scaricabile da una mappa previsionale mediante selezione multipla di punti. La tabella riporta, in particolare, i dati geografici per l'identificazione del punto e i valori di velocità e direzione previsti.

7.1.4 Sezione *Previsione a medio termine*

La sezione relativa alla previsione a medio termine riporta le elaborazioni previsionali che, a partire da un modello meteorologico terrestre globale, permettono di ricostruire il campo di vento previsto in un arco temporale di 72 ore successive all'elaborazione. La previsione è operativa 1 volta al giorno e produce campi di vento con cadenza oraria. Gli algoritmi e i modelli per la previsione a medio termine sono descritti nel Capitolo 5. A differenza della sezione relativa alla previsione a breve termine, i risultati visualizzati in questa sezione non hanno nessi diretti con le misure anemometriche portuali, ma sono una conseguenza di modelli numerici inizializzati mediante misure a scala planetaria. L'attendibilità della previsione dipende quindi dall'intrinseca aleatorietà dell'evoluzione meteorologica dell'atmosfera e dalle approssimazioni coinvolte nella modellistica operativa utilizzata.

La pagina si apre con un tematismo geografico centrato sull'area portuale di competenza dell'utente. A questo tematismo di sfondo sono sovrapposte le mappe dei campi di vento corrispondenti al prodotto selezionato. Le immagini del campo di vento previsto sono rappresentate mediante vettori e sono navigabili in funzione della quota sul livello del terreno e dell'ora della previsione, in modo analogo a quanto avviene nella sezione di previsione a breve termine. Le mappe visualizzate non sono limitate alle griglie rappresentative dei porti, ma abbracciano aree più estese, corrispondenti alle microaree portuali descritte nel Capitolo 3. La Figura 7.9 riporta un esempio di mappa delle velocità previste nell'area della Spezia. Tale mappa corrisponde all'impostazione della previsione a 1 ora (area *Configurazione* in basso).

Analogamente a quanto già descritto per la sezione relativa alla previsione a breve termine, l'utente ha la possibilità di richiamare, mediante passaggio del mouse in un qualunque punto della cartina, una finestra tipo pop-up contenente la velocità media e la direzione di provenienza del vento in quel punto, corrispondenti alle impostazioni di previsione riferite alla mappa visualizzata. Accanto alla tabella è visualizzato un grafico che rappresenta l'evoluzione nel tempo della previsione del vento nel punto selezionato. In particolare, il diagramma riporta in ascissa il tempo e in ordinata le velocità medie su 10 minuti previste per il punto selezionato, sia in scala numerica sia in scala Beaufort delle intensità del vento.Tale visualizzazione permette all'utente una valutazione qualitativa della tendenza della previsione nell'arco di due-tre giorni. È inoltre possibile ottenere i valori in tabelle, selezionando un'area con l'opportuno comando, come descritto in precedenza.

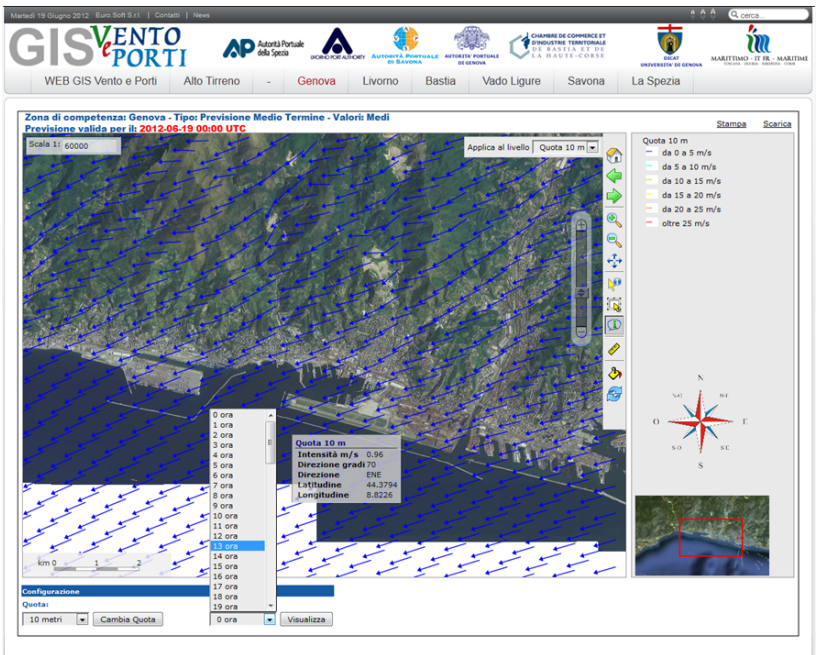


Figura 7.9: Esempio di mappa delle velocità previste sull'area della Spezia nella sezione *Previsione a medio termine*.

7.2 Sotfware

La realizzazione del sistema descritto ha richiesto l'implementazione di un software ad hoc assai complesso, per la quantità dei dati gestiti, la diversa provenienza degli input in tempo reale da visualizzare e la qualità della visualizzazione richiesta. L'intera architettura è sviluppata con software open-source di certificata diffusione. Questa scelta consente, da un lato, di essere svincolati da eventuali licenze d'uso, dall'altra, di avere il supporto di un'adeguata comunità di sviluppatori. Inoltre, la scelta effettuata consente di aggiornare e ampliare il software liberamente in futuro.

Il software open-source sviluppato è compatibile con piattaforma sia Linux sia Windows, lasciando un'ulteriore flessibilità di scelta nell'uso futuro del sistema.

La Figura 7.10 riporta uno schema dell'architettura del sistema proposto.

I primi due blocchi, indicati con INPUT e PREVISIONE, rappresentano lo schema di acquisizione centralizzato, attualmente ospitato in DICAT, dei dati di input anemologico, provenienti rispettivamente dalle Autorità Portuali e dal NOAA, e di elaborazione delle previsioni meteorologiche a breve e medio termine.

Il blocco successivo, indicato con WEBGIS, rappresenta lo schema del sistema di resa finale. Il sistema risiede fisicamente sul server centralizzato e contiene al suo interno alcuni sottosistemi, brevemente descritti nel seguito.

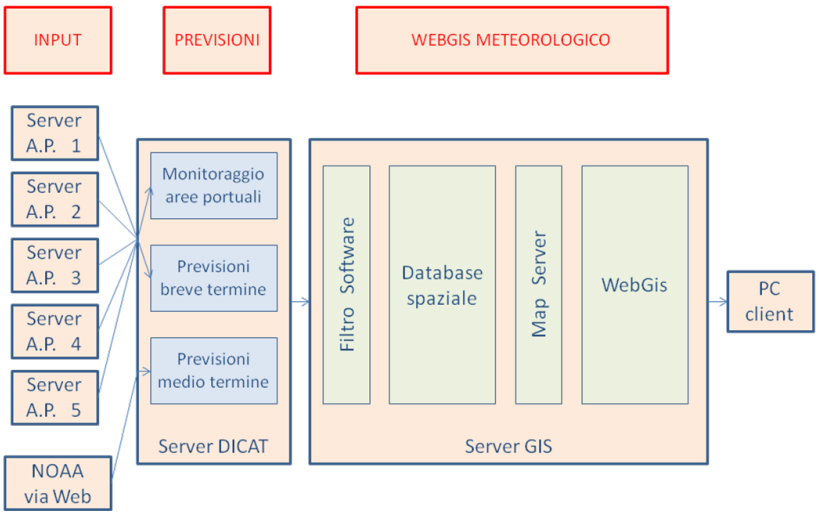


Figura 7.10: Schema dell'architettura del sistema di resa finale proposto.

7.2.1 Filtro di conversione dei dati

Il filtro di conversione dati consiste in tutte le procedure software lato server necessarie per l'acquisizione, la conversione e il trasferimento dei dati nella base dati spaziale. Il sistema, infatti, riceve dati di diverse categorie, a cadenze temporali differenti e in formati nativi diversi, e deve elaborarli opportunamente per trasferirli alla base dati spaziale. I dati si distinguono in quattro categorie: i dati statistici, sono inseriti inizialmente nella base dati e saranno aggiornati con cadenza circa annuale; i valori delle misure anemometriche e i dati delle previsioni a breve termine sono inviati al sistema ogni dieci minuti; i dati delle previsioni a medio termine sono inviati al sistema ogni giorno.

Le procedure software del filtro di conversione dati sono sviluppate in ambiente C# con tecnologia .NET.

7.2.2 Base dati geospaziale

La base dati geospaziale risiede sul server ed è destinato a contenere le informazioni necessarie a costruire le rese finali georeferenziate. Esse comprendono:

- il modello digitale del terreno delle varie aree portuali;
- la localizzazione degli anemometri;
- la localizzazione dei punti di griglia delle aree portuali;
- i dati statistici della velocità del vento;
- i dati misurati della velocità del vento;
- le previsioni a medio termine per l'Alto Tirreno e per le aree portuali;

- le previsioni a breve termine per le aree portuali.

Come specificato in precedenza, alcuni di questi dati vengono inseriti una tantum, altri verranno aggiornati quotidianamente, con la possibilità di mantenerne un registro storico.

La realizzazione della base dati spaziale è ottenuta utilizzando l'accoppiata PostgreSQL/PostGis.

PostgreSQL è uno dei più diffusi database relazionali open-source attualmente disponibili, realizzato dall'Università di Berkeley, California. Tecnicamente, esso supporta nativamente l'orientazione a oggetti risultando particolarmente adatto ad applicazioni di tipo WebGIS.

PostGis è un'estensione spaziale per il Database Managment System PostgreSQL, sviluppato dalla Refraction Research. Esso fornisce i tipi di dati specificati negli standard dell'Open Geospatial Consortium e, nella versione più recente, garantisce funzionalità quali l'interfaccia utente, il supporto di base di tipologia, la convalida di dati, la trasformazione di coordinate, e altro.

7.2.3 Map-server

MapServer, sviluppato a metà degli anni 1990 all'Università del Minnesota e disponibile con licenza open-source, rappresenta lo strato di software che risiede sul server e gestisce il dialogo tra il Web server e la base dati. Tale applicazione ha il ruolo chiave di restituire i dati corretti all'utente, in base alla richiesta eseguita dall'utente stesso utilizzando un URL via browser. Le immagini prodotte da questa applicazione sono basate su grafica vettoriale o raster, in grado di gestire immagini scalabili dimensionalmente senza perdita di risoluzione.

7.2.4 WebGis

WebGis è il vero e proprio front-end a disposizione dell'utente per consultare i dati climatologici e previsionali. Tale strumento è richiamato direttamente attraverso il browser Internet (Internet Explorer, Google Chrome, Mozilla Firefox o Safari), e permette la consultazione dei dati attraverso una serie di pagine Web interattive. Nella soluzione open-source utilizzata, WebGis è implementato utilizzando l'accoppiata MapServer–p.mapper; p.mapper è un front-end user friendly che si interfaccia al motore di rendering MapServer. Il software attualmente disponibile è il risultato di diversi progetti open-source sviluppati da enti e gruppi di ricerca differenti; la versione attuale è in grado di sfruttare al meglio le potenzialità di MapServer attraverso un layout pulito ed estremamente intuitivo.

7.3 Hardware

La soluzione proposta prevede l'installazione di un unico server per gestire tutti gli utenti di tutte le Autorità Portuali. Questo approccio ha il vantaggio di centralizzare l'intera area dati su un'unica macchina e di minimizzare l'attività legata alla manutenzione e all'aggiornamento della stessa. Tuttavia esso necessita di una macchina ad

alte prestazioni e ad alta affidabilità, con un'adeguata banda disponibile per permettere l'accesso multiutente e di conseguenza per poter sopportare download simultanei di dati. Il server centrale è quindi il cuore del sistema di resa finale e richiede una particolare attenzione nella gestione ordinaria e straordinaria del sistema hardware stesso, del sistema di alimentazione elettrica e della connettività Internet. La soluzione definita dal progetto prevede che il server sia ospitato in zona pubblica in una Server Farm, in cui questi aspetti siano garantiti e costantemente monitorati dal gestore, assicurando un elevato grado di sicurezza del sistema e riducendo le tempistiche d'intervento in caso di problemi. La soluzione descritta garantisce pertanto l'operatività del sistema e la sua gestione ottimizzata oltre i limiti temporali del progetto. L'onere economico che deriva dalla soluzione prevista è preso in carico dalle Autorità Portuali partner del progetto, a conferma della volontà degli enti coinvolti di portare avanti un sistema innovativo e all'avanguardia per la gestione e la sicurezza delle aree portuali.

7.4 Prospettive e potenzialità di sviluppo

Il sistema WebGIS meteorologico messo a punto per il progetto "Vento e Porti" rappresenta una soluzione assolutamente innovativa e alla frontiera della ricerca, sia per quanto riguarda i contenuti sia per quanto riguarda la modalità di fruizione. Esso consente di accedere ai prodotti del progetto via Web, a chiunque, ovunque, attraverso un browser standard (Autorità Portuali, Terminalisti, Capitanerie, Piloti, Diportisti, utenti privati, ecc.). Una tale diffusione dei prodotti del progetto garantisce non solo di traguardare gli obiettivi primari del progetto stesso nei confronti dei principali utilizzatori portuali, ma anche di diffondere una cultura avanzata in campo meteorologico a qualsiasi utente privato.

La concezione dell'architettura e la scelta di utilizzare software open-source rendono il sistema idoneo a incorporare successive revisioni dei prodotti visualizzabili, legate all'estensione delle basi dati delle misure disponibili presso le Autorità Portuali. Inoltre, in futuro sarà possibile incorporare nel sistema ulteriori prodotti, quali il monitoraggio e la previsione delle correnti, del moto ondoso e della diffusione di inquinanti, sovrapponendo ulteriori livelli consultabili a quelli esistenti.

Da questo punto di vista il sistema rappresenta una piattaforma condivisa e aperta, che lascia spazio a un'ulteriore crescita del progetto.

8 Conclusioni e prospettive

Il progetto "Vento e Porti" attua tutti gli obiettivi che si era prefissato nella fase d'impostazione, realizzando un prodotto altamente qualificato, alla frontiera dello stato dell'arte, probabilmente unico al mondo. Grazie al rapporto sinergico fra il mondo accademico e gli operatori portuali nella loro più ampia accezione, le Autorità Portuali di Genova, Savona, La Spezia, Livorno e Bastia sono oggi dotate di una rete di monitoraggio anemometrico d'avanguardia, di modelli numerici che simulano i porti con grande dettaglio, e di un sistema WebGIS, assolutamente innovativo, mediante il quale gli operatori autorizzati possono visualizzare le mappe statistiche del vento e, in tempo reale, le misure anemometriche e le previsioni a medio e a breve termine.

La rete di monitoraggio locale del vento realizzata in ogni porto coinvolto nel progetto fornisce alle Autorità Portuali misure autonome e continue che, passando attraverso i propri centri operativi, giungono alla centrale operativa del DICAT dove sono organizzate in banche dati e analizzate in modo sistematico per verificarne la correttezza e la rappresentatività. Le misure eseguite dalle reti di monitoraggio locale sono il presupposto per realizzare il sistema di previsione a breve termine e un notevole supporto alla realizzazione delle mappe statistiche. Con il passare del tempo, l'accumulo dei dati misurati consentirà inoltre di aggiornare gli algoritmi sviluppati per conseguire risultati sempre più precisi e affidabili.

I modelli di simulazione numerica del vento sono l'anello centrale della catena mediante la quale le misure anemometriche delle stazioni storiche, i dati planetari acquisiti dal Sistema Osservativo Globale e i dati registrati dai sensori della rete di monitoraggio portuale sono usati per produrre, rispettivamente, le mappe statistiche del vento e le previsioni del vento a medio e a breve termine. A ciò si aggiunga che i modelli di simulazione consentono di estrapolare i dati misurati localmente al reticolo spaziale dei punti con il quale è rappresentato ogni porto; in questo modo un insieme discreto di misure locali fornisce una rappresentazione esaustiva del vento in ogni zona portuale anche relativamente distante dagli anemometri.

Le mappe statistiche del vento nei porti sono strumentali alla conoscenza della climatologia locale e alla pianificazione razionale di lungo termine di nuovi assetti portuali che tengano conto della dislocazione più adatta delle attività suscettibili alle azioni e agli effetti del vento.

Le previsioni a medio termine riguardano la velocità media e la direzione del vento, e permettono di ottenere ogni giorno una previsione che si estende fino a 3 giorni in avanti, con un passo orario. Tali previsioni sono finalizzate a pianificare lo svolgimento delle attività portuali nell'immediato futuro, ponendo in atto le azioni possibili di prevenzione, individuando le situazioni di rischio e adottando le soluzioni più idonee per tutelare la sicurezza dei lavoratori portuali e, contemporaneamente, per assicurare ai porti stessi una corretta operatività.

Le previsioni a breve termine riguardano la velocità media e di picco del vento, oltre alla sua direzione, e forniscono una previsione che si estende fino a 90 minuti in

avanti, con un passo di 10 minuti. La previsione è finalizzata a emettere messaggi di allerta per tutelare l'integrità fisica di chi opera nei porti.

Il sistema WebGIS meteorologico rende fruibile la quantità, la qualità e le potenzialità dei dati misurati, dei modelli numerici, delle mappe statistiche e delle previsioni a medio e breve termine, rappresentando lo strumento di sintesi e di restituzione dei risultati. Tale strumento, assolutamente innovativo, si avvale di un algoritmo interattivo per mezzo del quale gli operatori autorizzati dalle Autorità Portuali possono visualizzare, oltre alle mappe statistiche, le misure anemometriche e le previsioni in tempo reale.

La conclusione del progetto "Vento e Porti" pone in primo piano la necessità di dare continuità agli strumenti sviluppati e, possibilmente, di migliorarne le prestazioni. Il sistema WebGIS richiede una gestione centralizzata dell'attrezzatura hardware e del sistema software, quindi la prosecuzione della collaborazione tra DICAT e le Autorità Portuali. Essa comporta la manutenzione ordinaria dei server locali e l'alloggiamento del server centrale in una Server Farm, l'ispezione e la manutenzione della rete di monitoraggio e del sistema di trasmissione delle misure, la gestione della catena modellistica per le previsioni a medio termine e, se possibile, l'aggiornamento del sistema di previsione a breve termine sfruttando i nuovi dati che saranno progressivamente acquisiti.

I risultati ottenuti sono tanto ampi e generali da trascendere l'obiettivo istituzionale della gestione e della sicurezza delle aree portuali. Essi aprono nuovi scenari rivolti, da un lato, al potenziamento degli strumenti esistenti, dall'altro, al loro impiego per sviluppare settori inesplorati dal presente progetto.

Fra gli scenari rivolti al potenziamento degli strumenti esistenti, quelli più promettenti riguardano l'ampliamento della rete di monitoraggio, l'evoluzione dei modelli numerici, il perfezionamento delle mappe statistiche e delle previsioni a medio e a breve termine.

Il potenziamento della rete di monitoraggio locale è un obiettivo prioritario per la prosecuzione del progetto. Esso può attuarsi in due direzioni complementari. Da un lato può sanare gli aspetti più deboli della rete esistente attraverso la messa in opera di nuovi anemometri disposti sulla verticale dei preesistenti per fornire il profilo altimetrico del vento, l'inserimento nella rete di nuovi sensori volti a misurare il flusso termico, la temperatura e la pressione, arricchendo i parametri impiegati per inizializzare i modelli numerici. Dall'altro è molto attraente l'idea di potenziare la rete strumentale nella direzione dello specchio acqueo prospiciente le aree portuali; ciò garantirebbe gli elementi essenziali per sviluppare e implementare nuovi modelli d'interazione fra il vento e le onde, creando poi mappe statistiche e previsioni orientate alla fascia di mare di maggiore interesse nei riguardi dell'avvicinamento delle navi ai porti. L'integrazione dei modelli sul fronte mare migliorerebbe altresì le prestazioni dei modelli esistenti.

I modelli numerici usati nel presente progetto sono ispirati a un giusto equilibrio fra la necessaria precisione e la semplicità d'uso. Tuttavia, l'evoluzione delle conoscenze e delle tecnologie rende oggi sempre più operativi strumenti, come le prove in galleria del vento e i codici CFD, meritevoli di approfondirne le potenzialità nei riguardi di un uso ripetitivo. Un altro aspetto degno di nota riguarda la consistenza dei modelli, la scelta dei parametri e l'intrinseca complessità dei problemi trattati. Di tale aspetto è possibile tenere conto per mezzo di metodi analitici e di simulazioni numeriche che

rappresentano la propagazione delle incertezze dei parametri e degli errori di modello. Ciò riconduce il problema alla sua corretta natura, inquadrando la precisione delle simulazioni e delle trasformazioni in un quadro probabilistico di elevata qualità tecnico-scientifica.

Le analisi statistiche sviluppate sinora sono rivolte a periodi annuali. Tuttavia, com'è noto, il vento possiede variazioni di tipo ciclico che coinvolgono periodi di ricorrenza stagionali, mensili, diurni e persino di poche ore. Altrettanto il vento manifesta prerogative marcate di variabilità direzionale di notevole interesse per molteplici applicazioni. Volendo perfezionare le mappe è quindi attraente l'idea di suddividere le basi dati complessive in sottobasi dati omogenee e di qui ricavare valutazioni statistiche associate a periodi dell'anno e a direzioni di provenienza del vento. È anche importante osservare che le analisi statistiche svolte sono basate prevalentemente su dati storici provenienti da stazioni limitrofe ai porti. Con il passare del tempo la rete di monitoraggio locale fornirà dati sufficienti a migliorare sostanzialmente tali valutazioni su base strettamente locale.

Le previsioni a medio termine sono basate sui dati planetari rielaborati e distribuiti dal Global Forecast System e sulla catena modellistica WRF–WINDS che focalizza la previsione sulle aree portuali. In questo processo non sono impiegate le misure eseguite dalle reti di monitoraggio locale. Il loro coinvolgimento nel modello previsionale, cosiddetto di assimilazione dati, è uno temi maggiormente studiati e dibattuti in ambito scientifico. I progressi in questo campo sono tali da rendere realisticamente possibile tenere conto delle misure locali, conferendo alle previsioni a medio termine una robustezza incomparabile con quella realizzata nel presente progetto.

Anche le previsioni a breve termine sono passibili di grandi evoluzioni legate in parte all'impiego di dati sempre più ricchi ed estesi, in parte all'implementazione e alla validazione di modelli avanzati quali i metodi ARMA e i filtri di Kalman. In tale ambito è particolarmente attraente l'idea di perseverare nell'uso delle tecniche ispirate alla probabilità condizionata, potenziando i dati misurati mediante nuovi dati virtuali trasferiti nei porti dalle stazioni storiche. L'uso del metodo Monte Carlo consente di prolungare tali trasformazioni su periodi temporali di molte migliaia di anni, assicurando un avanzamento senza precedenti.

Fra gli scenari rivolti all'impiego degli strumenti disponibili per sviluppare settori inesplorati dal presente progetto spiccano le potenzialità dei risultati ottenuti nei riguardi dell'interazione fra il vento e le onde, dell'analisi delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni e sui container impilati, del potenziale energetico eolico, della dispersione in atmosfera di sostanze inquinanti o polverose, della catalogazione dei fenomeni eolici a mesoscala.

La realizzazione di nuovi modelli in grado di cogliere l'interazione fra il vento e le onde si colloca all'interfaccia fra il potenziamento degli strumenti esistenti e lo sviluppo dei nuovi. Nei modelli adottati nel presente progetto, l'attrito esercitato sul vento dalla superficie marina è un dato del problema costante durante le simulazioni. Nella realtà l'attrito cresce quando il vento, provenendo dal mare, determina un aumento del moto ondoso. Il moto ondoso, a sua volta, crea un attrito superficiale che tende a frenare il vento. S'instaura quindi un fenomeno d'interazione fra il vento e le onde che, se inserito nei modelli, ne aumenterebbe sostanzialmente la qualità. Ciò consentirebbe inoltre valutazioni accurate dei rischi connessi all'ingresso e all'attracco delle navi nei

porti nelle giornate di vento intenso.

La disponibilità di modelli dettagliati dei campi di vento associati alla probabilità di occorrenza dei venti estremi è un elemento essenziale per sviluppare criteri razionali di calcolo delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni portuali, in primo luogo le gru, gli scaricatori, le torri faro e le turbine eoliche. Le norme tecniche raccomandano l'impiego di tali modelli e forniscono, in mancanza di questi (come accade abitualmente), rappresentazioni semplificate e convenzionali del vento di progetto. Superare questa consuetudine evita costi di realizzazione spesso eccessivi e ingiustificati, evidenziando le situazioni che richiedono maggiore prudenza. Una di queste è rappresentata dalle azioni e dagli effetti del vento sui container impilati; una conoscenza migliore del vento permettere di definire disposizioni che minimizzino i rischi di ribaltamento.

In maniera duale, la disponibilità di modelli dettagliati dei campi di vento associati alla probabilità di occorrenza dei venti frequenti è un elemento essenziale per sviluppare criteri razionali di scelta delle turbine e dei siti più idonei a sfruttare il potenziale eolico delle aree portuali. Questo tema è sempre più attuale per la realizzazione di parchi eolici on-shore e off-shore che garantiscano, ad esempio, l'elettrificazione delle banchine e uno sviluppo più sostenibile dei porti e delle città che li ospitano. Utilizzare le aree portuali per l'installazione di centrali eoliche consente inoltre di trasformare un fenomeno fisico da cui è necessario proteggersi, in una risorsa insostituibile di energia rinnovabile.

La realizzazione di modelli dettagliati dei campi di vento è lo strumento basilare per nidificare al loro interno nuovi codici numerici finalizzati a determinare la dispersione degli inquinanti e delle polveri in atmosfera. Inserita in un ambito probabilistico, questa catena modellistica è in grado di identificare le aree dove sono maggiori la ricaduta e l'accumulo di sostanze inquinanti e polverose. Posta invece in un dominio previsionale, la stessa catena fornisce gli strumenti per anticipare le zone dove, in funzione dei venti attesi, tali concentrazioni saranno più intense e quindi nocive.

Un altro tema di grande importanza e innovazione è lo studio dei fenomeni eolici a mesoscala, in particolare i temporali e le trombe d'aria. Le stazioni anemometriche storiche sono distribuite sul territorio a una distanza di circa 50-100 km, e misurano la velocità media del vento su intervalli di 10 minuti; sono quindi indicate per rilevare eventi ciclonici con dimensioni nell'ordine di 500 km e durata di alcune ore. Per contro non possono individuare gli eventi a mesoscala, cioè con estensione compresa fra poche centinaia di metri e alcuni chilometri, e con durata spesso inferiore a un minuto. La nuova rete di monitoraggio portuale supera queste limitazioni garantendo una copertura del territorio con una maglia planimetrica nell'ordine del chilometro e con un passo d'acquisizione temporale fra 0.1 e 0.5 s. Consente quindi di creare banche date selettive e catalogare i diversi fenomeni eolici con la prospettiva di approfondirne la conoscenza.

A valle di tutte queste possibili evoluzioni, la concezione dell'architettura e la scelta di utilizzare programmi open-source rendono il sistema WebGIS in funzione nei porti predisposto a recepire naturalmente tanto nuovi dati quanto nuovi strumenti e prodotti.

L'implementazione di strumenti e prodotti di reale utilità per i porti ha costituito l'occasione e lo spunto, da parte del DICAT, per sviluppare ricerche alla frontiera dello

stato dell'arte. Tali ricerche, di per sé già foriere di risultati scientifici innovativi, pongono le basi per nuovi studi ai quali il DICAT dedicherà molti dei suoi sforzi futuri.

Bibliografia

Bossard, M., J. Feranec e J. Otahel (2000). *Corine land cover technical guide - Addendum 2000*. EEA Technical Report 40. Copenhagen: European Environment Agency.

Burlando, M., E. Georgieva e C. F. Ratto (2007). "Parameterization of the planetary boundary layer for diagnostic wind models." In: *Boundary Layer Meteorology* 125(3), pp. 389–397.

Burlando, M., L. Carassale, E. Georgieva, C. F. Ratto e G. Solari (2007). "A simple and efficient procedure for the numerical simulation of wind fields in complex terrain." In: *Boundary Layer Meteorology* 125(3), pp. 417–439.

Burlando, M., A. Freda, C. F. Ratto e G. Solari (2010). "A pilot study of the wind speed along the Rome-Naples HS/HC railway line. Part 1 — Numerical modelling and wind simulations." In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98, pp. 392–403.

Carassale, L., A. Freda, L. Pitto, M. P. Repetto e G. Solari (2011). "The wind effect on the new Erzelli Technology District." In: *C.D. Proceedings, 13th International Conference on Wind Engineering*.

Chandrasekar, A., C.R. Philbrick, R. Clark, B. Doddridge e P. Georgopoulos (2003). "Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models." In: *Atmospheric Environment* 37, pp. 3267–3276.

Engineering Sciences Data Unit (1993). *Mean wind speeds over hills and other topography*. ESDU Item 91043. London, U.K.: ESDU.

— (1995). *Computer program for wind speeds and turbulence properties: flat or hill sites in terrain with roughness changes*. Rapp. tecn. 92032. London, U.K.: ESDU Item.

Freda, A. e G. Solari (2009). "A conditional model for the short-term probabilistic assessment of severe wind phenomena". In: *CD Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering*.

— (2010). "A pilot study of the wind speed along the Rome-Naples HS/HC railway line. Part 2 — Probabilistic analyses and methodology assessment." In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98, pp. 404–416.

Furunoa, A., H. Teradaa, M. Chinoa e H. Yamazawab (2004). "Experimental verification for real-time environmental emergency response system: WSPEEDI by European tracer experiment." In: *Atmospheric Environment* 38, pp. 6989–6998.

Lagomarsino, S., G. Piccardo e G. Solari (1992). "Statistical analysis of high return period wind speeds." In: *J. Wind Engng. Ind. Aerod.* 41.

Solari, G. (1993). "Gust buffeting. I: peak wind velocity and equivalent pressure." In: *Journal of Structural Engineering, ASCE* 119 (2), pp. 365–382.

— (1996). "Wind speed statistics". In: *Modelling of atmospheric flow fields*.

Solari, G. e G. Piccardo (2001). "Probabilistic 3-D turbulence modelling for gust buffeting of structures." In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 16 (1), pp. 73–86.

Solari, G., M.P. Repetto, M. Burlando, P. De Gaetano, M. Pizzo, M. Tizzi e M. Parodi (2012). "The wind forecast for safety management of port areas." In: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104-106, pp. 266–277.

Torrielli, A., M.P. Repetto e G. Solari (2011). "Long-term simulation of the mean wind speed." In: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99, pp. 1139–1150.

— (2012). "Extreme wind speeds from long-term synthetic records." In: *submitted to J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*

Weibull, W. (1957). "A statistical distribution of wide applicability." In: *Journal of Applied Mechanics* 18, pp. 293–297.

Parte II

Contributo scientifico di Météo-France

9 Ruolo e azioni di Météo-France

A Météo-France, in particolare alla sua entità rappresentata dal centro meteorologico dipartimentale dell'Alta Corsica, è stata affidata la responsabilità dell'organismo CCI2B per rispondere a una serie di problematiche meteorologiche che rientravano in un progetto europeo denominato "Vento e Porti", cofinanziato dal fondo europeo di sviluppo regionale a partire da un programma di cooperazione transfrontaliera Italia/Francia 2007–2013 che comprende i seguenti partner: l'Autorità Portuale di Genova, l'Autorità Portuale di Savona, l'Autorità Portuale di La Spezia, l'Autorità Portuale di Livorno, il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Genova e la Camera di Commercio e dell'Industria di Bastia e dell'Alta Corsica.

Il progetto "Vento e Porti" ha avuto come oggetto la pianificazione di una rete di misure anemometriche per contribuire a migliorare le previsioni meteorologiche utili alla sicurezza delle persone, dei mezzi e delle infrastrutture nelle aree operative del porto sia a livello di dominio marittimo di prossimità che a terra.

Météo-France, cdm2b, è stata quindi scelta come partner tecnico in considerazione delle relazioni professionali esistenti da diversi anni con la DDTM (Capitaneria del porto commerciale) per formulare risposte nell'ambito dei diversi settori indicati di seguito:

- la partecipazione alla ricerca di siti adatti per pianificare impianti anemometrici di qualità per rispondere agli obiettivi dichiarati dal progetto, senza trascurare la prospettiva del futuro porto di Bastia nell'area denominata la Carbonite.

- la capitalizzazione delle conoscenze scientifiche nell'ambito dello studio dei venti locali sulle strutture portuali e in prossimità delle stesse considerando l'orografia estremamente complessa attorno al sito e attraverso la fornitura di database esistenti su un lungo periodo per contribuire a migliorare il modello di simulazione del campo di vento.

- il contributo scientifico alla comunicazione sui ruoli e le missioni di Météo-France nell'ambito del territorio corso per quanto riguarda la sicurezza di persone e mezzi.

- il contributo scientifico per l'analisi di situazioni meteorologiche che metta in rilievo episodi di vento forte che influiscono in modo rilevante sulla delicata gestione delle entrate e uscite di navi nel Porto di Bastia.

- l'impegno di una presenza alle riunioni del comitato dei piloti in loco per rispondere alle diverse questioni tecniche sulla valutazione dei siti.

9.1 Localizzazione della rete di monitoraggio per il Porto di Bastia.

A seguito delle riunioni tecniche del 27 giugno 2008 e del 23 luglio 2009, Météo-France ha contribuito alla redazione di un rapporto di studio sulle velocità del vento nella regione di Bastia, che mette in risalto la climatologia locale di questo parametro fortemente influenzato dall'orografia locale e dalla prossimità del dominio marittimo. Questo rapporto redatto il 4/8/2009 avrebbe consentito, da un lato, di identificare le diverse velocità di uno stato medio del vento sulla vasta regione di Bastia e, dall'altro, di mettere in rilievo l'inadeguatezza delle misure del vento sul sito portuale a causa di una rete carente nella località di Bastia. Per rispondere alle problematiche poste nell'ambito della gestione portuale era necessario conoscere esattamente il flusso e il letto sia del vento non perturbato dal conglomerato urbano sia di quello cosiddetto perturbato.

Il rapporto ha messo in evidenza che i punti delle misure anemometriche operative per una gestione ottimale dovevano rispondere all'esigenza di un'adeguata misura fisica su tutto il perimetro dell'area portuale, ma anche agli assi di arrivo e partenza delle navi e che era tassativo ottenere misure efficaci per comprendere il limite dei flussi dei venti forti sia nell'ambito del perimetro attuale che in quello di una futura installazione a sud della città.

L'obiettivo previsto di questi punti di misurazione è quello di fornire:

- indicazioni sulla qualità di osservazione all'avvicinarsi delle navi e durante tutta la fase delle operazioni di attracco, sbarco o imbarco e partenza.

- indicazioni convalidate sulla qualità per il miglioramento delle previsioni meteorologiche in loco.

- indicazioni sui valori numerici che costituiscono una base di valutazione per consentire in futuro una climatologia di riferimento di interesse estremamente importante per l'attività portuale.

Per rispondere a tutte queste finalità, il rapporto si conclude con la proposta di sei punti per l'esecuzione delle misure, tre dei quali si troverebbero sul sito portuale e tre sul territorio di prossimità rappresentato nelle immagini di seguito.

I punti sul perimetro portuale rispondono alle esigenze di entrata nel porto, di manovra di rotazione e di attracco. Dei punti esterni, uno è finalizzato alla valutazione dei venti forti che attraversano il rilievo adiacente e l'altro alla valutazione di un limite sud in relazione all'ambito del progetto di un porto futuro.

Il progetto non terrà conto del punto nord in altitudine considerando gli aspetti finanziari che limitano i costi di investimento e il probabile duplicato della misura presente presso il semaforo di Cap Sagro.

Ogni sito proposto è stato oggetto di una visita tecnica preliminare ai fini di una valutazione che determini le caratteristiche delle misure anemometriche imposte dalla gestione di una rete accreditata.

9.1 Localizzazione della rete di monitoraggio per il Porto di Bastia.

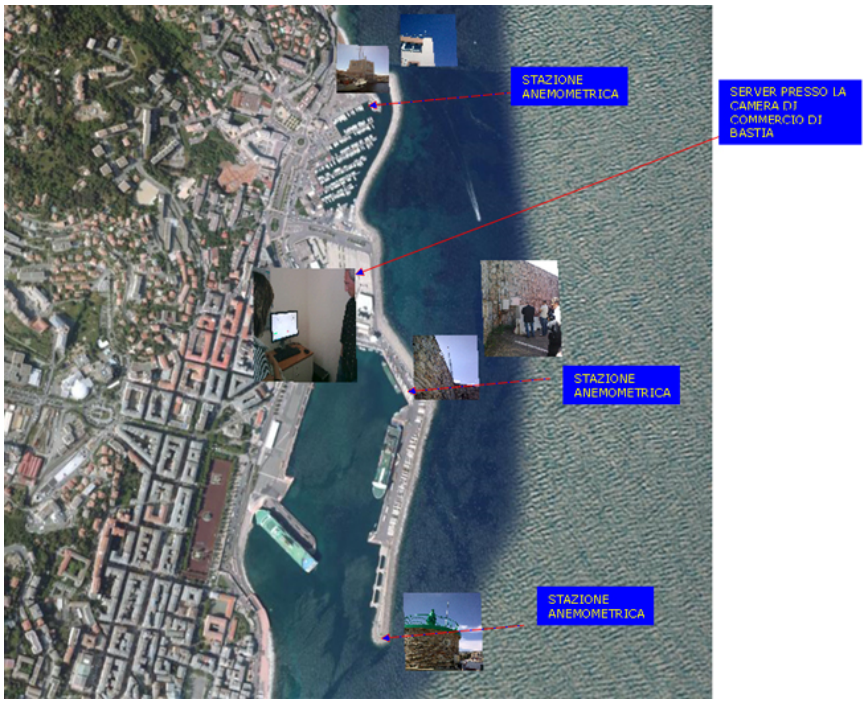


Figura 9.1

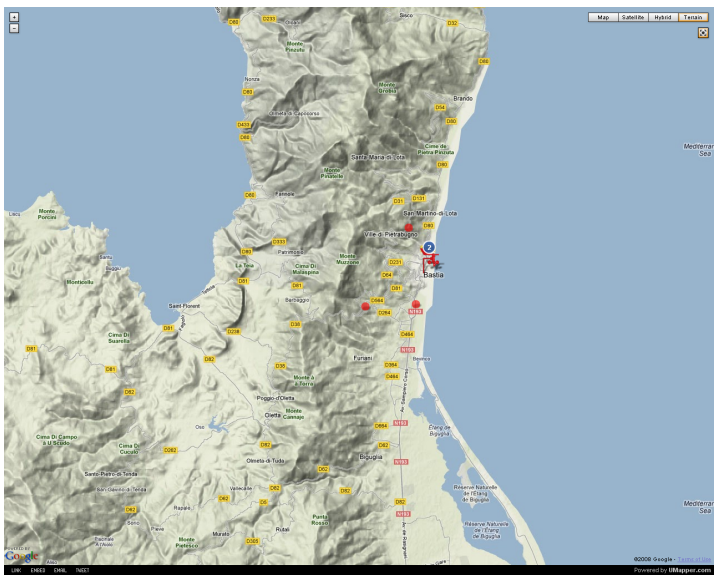


Figura 9.2

9.2 Capitalizzazione delle conoscenze scientifiche dei venti locali

Météo-France ha fornito agli organismi progettuali le statistiche disponibili presso i punti di misurazione esistenti in prossimità del sito portuale. In particolare, ciò comporta i seguenti vantaggi:

- la messa a disposizione delle rose dei venti medi, delle rose dei venti istantanei e di tabelle sulla frequenza di ripartizione del vento (intensità/direzione), di tabelle sulla frequenza di ripartizione vento/stato del mare dei due punti di misurazione Bastia-Aeroporto e Cap Sagro a nord.
- La messa a disposizione di una serie di dati con frequenza trioraria delle misure di vento medio dei siti considerati nella zona di attività.

La presenza di Météo-France alle riunioni dei comitati dei piloti ha facilitato il processo decisionale dei responsabili grazie a queste conoscenze sull'utilità e la finalità del progetto.

9.3 Ruoli e missioni di Météo-France nell'ambito del territorio della Corsica

Nel corso della riunione del comitato dei piloti del 15 aprile 2010, Météo-France ha presentato in PowerPoint le missioni istituzionali che è tenuta ad assicurare a livello di persone e di mezzi nonché le sue responsabilità in merito al settore marittimo al largo della zona costiera.

Questa presentazione approvata dal delegato dipartimentale di meteorologia in Alta Corsica aveva l'obiettivo di illustrare all'insieme dei partner del progetto la relazione esistente in Francia tra il servizio Météo-France e i responsabili della sicurezza delle popolazioni. D'altra parte, si sono rivelate altresì interessanti la presentazione ai diversi partner dell'organizzazione delle previsioni meteorologiche sia a livello nazionale che a quello locale e la descrizione delle interconnessioni con le istituzioni come quelle con i servizi pubblici.

9.4 Analisi di situazioni meteorologiche di episodi di vento forte

Il 13 dicembre 2011, nel corso della riunione del comitato dei piloti a Bastia, Météo-France ha presentato una recente situazione di episodio di vento forte precisando anche le misure complete dell'insieme dei punti recentemente installati. Questa analisi retrospettiva di un episodio duraturo di vento forte sulla regione di Bastia, effettuata dal 4 all'8 dicembre 2011 avrebbe permesso di catalogare la durata e l'intensità del fenomeno ma soprattutto avrebbe consentito di apportare i primi elementi conclusivi e le prospettive utili alla valutazione della rete di misure così costituita.

Di fatto, è stato osservato che le misure nel loro insieme individuavano con accortezza e in modo adeguato i flussi che interessano tutta la zona qualificando nel contempo le differenze complementari di ciascun punto e, soprattutto, avrebbero permesso di perfezionare lo spazio interessato dal flusso di vento in cui le intensità erano più marcate.

Nel tempo, con l'accumulo di dati continuativi così localizzati, tali misure consentiranno di perfezionare le previsioni in loco e, quindi, di migliorare quantitativamente e qualitativamente le allerte associate a questi fenomeni per essere più obiettivi e più pertinenti nei confronti degli utenti e dei responsabili della gestione del porto commerciale di Bastia.

9.5 Ruolo nelle riunioni del comitato di pilotaggio in loco

Météo-France, scelta come partner tecnico, è tenuta ad assistere l'organismo CCI2B in occasione delle diverse riunioni del comitato tecnico che si tengono a Bastia per seguire lo svolgimento delle diverse fasi tecniche del progetto ma anche per rispondere alle aspettative dei partner e per offrire risposte tecniche sull'insieme del sistema con l'obiettivo finale di migliorare i risultati e il funzionamento di questo sistema innovativo e completo creato dal progetto, probabilmente uno dei primi così completi nella Francia metropolitana.

Infatti, nel corso di queste riunioni, Météo-France ha sottolineato l'importanza che i dati osservati sul sito siano al tempo stesso affidabili, leggibili in tempo reale, che siano dati di qualità a livello di misura fisica per poter consentire una corretta valutazione dei fenomeni ventosi di cui sia possibile conoscere tutte le conseguenze sulle infrastrutture ma anche sullo stato del mare.

Météo-France ha altresì segnalato che era importante procedere a un adeguato monitoraggio della manutenzione affinché le installazioni della rete di misure e dei sistemi informatici associati funzionino in modo permanente per garantire un'informazione affidabile nonché una regolare alimentazione dei modelli di previsione che integrano l'osservazione in loco.

In conclusione, il risultato finale del progetto stabilisce che ogni stazione di misura osservi continuamente la direzione e la velocità del vento alla frequenza di 500 millisecondi; che le cinque stazioni siano collegate a un server locale che concentra i dati e ne assicura la trasmissione con la frequenza di un invio ogni tre minuti verso il server centrale ospitato presso l'Università di Genova (DICAT) da un lato e che i dati possano essere consultati anche dai previsori dipartimentali di Météo-France, dall'altro.

A partire dall'installazione di questa rete di misure, in collaborazione con la capitaneria del porto commerciale e con Météo-France, è stata sviluppata un'applicazione Web di previsioni dei fenomeni meteorologici per la gestione del porto. Questo strumento online consente oggi di disporre su un arco di tempo compreso tra 1h e G+1 delle previsioni del vento, dell'onda lunga, della temperatura, ecc. e include un processo di allerta in caso di fenomeni pericolosi.

Il progetto "Vento e Porti" avrà quindi consentito di dotare la comunità portuale di nuovi strumenti di supporto alle decisioni segnando quindi una nuova tappa nella coerenza della modalità di gestione portuale e del miglioramento del livello di servizio che deve essere prestato agli utenti.



Figura 9.3: Il faro all'ingresso del Porto di Bastia con il palo anemometrico (foto © eric.kügler@meteo.fr).

9.6 Allegato

9.6.1 Partecipanti di Météo-France al progetto "Vento e Porti"

- Jean-Pierre Rambaud, delegato dipartimentale della meteorologia per l'Alta Corsica
- Jean-Paul Giorgetti, Ingegnere commerciale responsabile per la Corsica
- Erick Kügler, Capotecnico responsabile della manutenzione in Alta Corsica.

9.6.2 Documenti forniti da Météo-France per il progetto

- Rapporto di studio per la ricerca di siti appropriati alla misura del vento.
- Rapporto sulla climatologia delle velocità del vento nella regione di Bastia.
- Rose dei venti di Bastia-Aeroporto, di Cap Sagro e di Cap Corse.
- File di dati non elaborati con frequenza trioraria delle direzioni e delle intensità del vento misurate a Bastia-Aeroporto e a Cap Sagro sulla serie più lunga armonizzata.

- Tabelle mensili e annuali di ripartizione in termini di frequenza delle intensità del vento in funzione delle direzioni.
- Tabelle mensili e annuali di ripartizione in termini di frequenza del vento medio e dello stato del mare.

9.6.3 Documenti presentati da Météo-France nel corso del progetto

- Presentazione in PowerPoint sulle missioni di Météo-France
  Le nostre missioni al servizio dello Stato, del pubblico e dell'economia / Tecnologie all'avanguardia per l'osservazione, la modellazione e la previsione: modelli sempre più precisi / Partner regionali, nazionali e internazionali di primo piano / Un'organizzazione al servizio della nostra strategia.
- Presentazione in PowerPoint sui modelli numerici di previsione
  Sistema Arome per la simulazione di mesoscala
- Presentazione in PowerPoint su una situazione di vento forte con sollecitazioni sul Porto di Bastia.
  Analisi della situazione dal 4 all'8 dicembre 2011

ISBN 978-88-901246-4-8

Partner / Partenaires du projet:

- Autorità Portuale di Genova, Capofila / Chef de file
- Autorità Portuale di Livorno
- Università di Genova – DICAT (Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio), Attuatore scientifico / Acteur scientifique
- Autorità Portuale di Savona
- Autorità Portuale della Spezia
- Chambre de Commerce et d'Industrie de Bastia et de la Haute-Corse

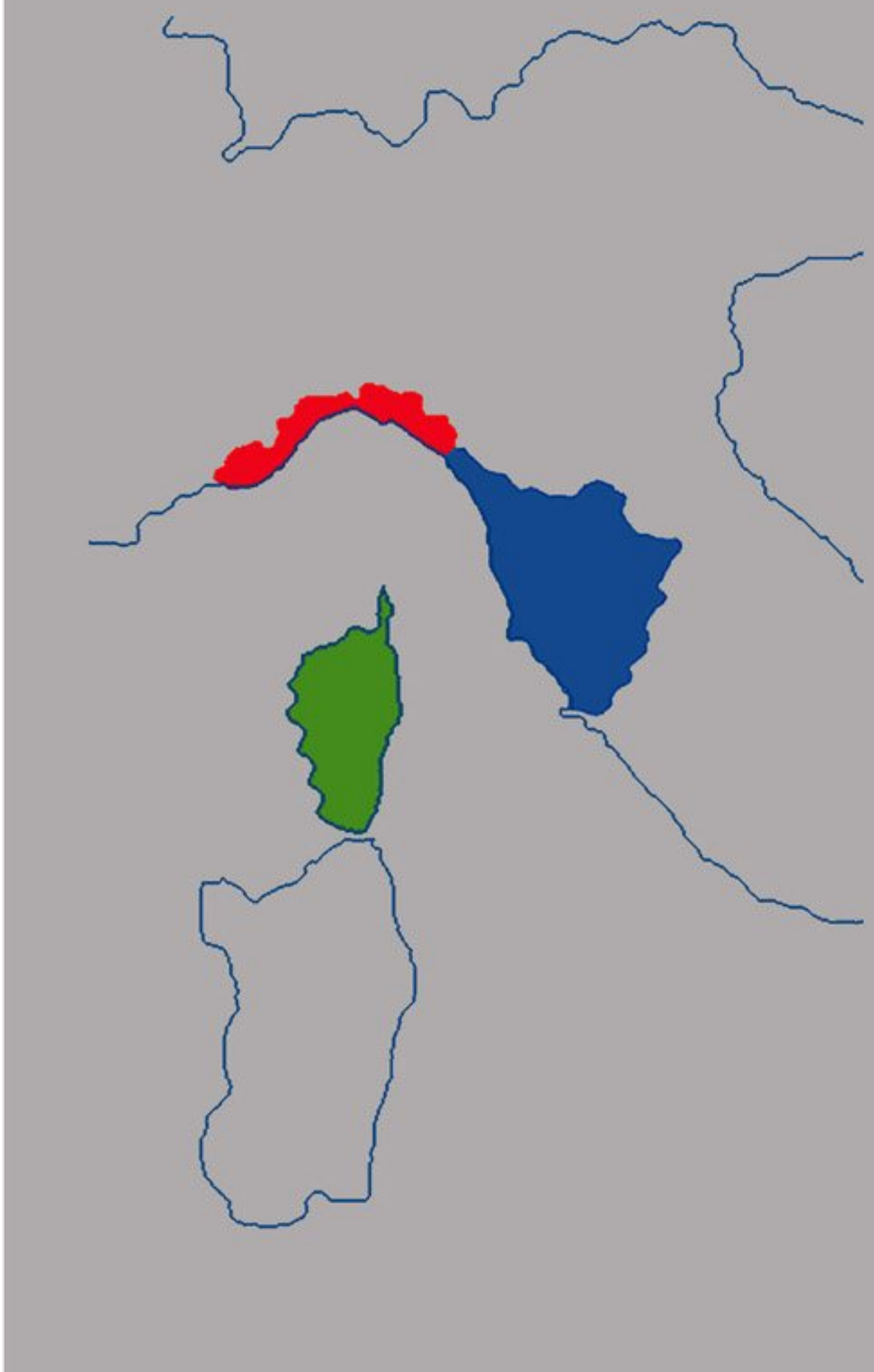
Durata del progetto / Temps du projet:

36 mesi / mois (01 07 2009 - 30 06 2012)

Finanziamento / Financement du projet:

Programma di cooperazione transfrontaliera Italia/Francia "Marittimo" 2007 – 2013 (Liguria, Toscana, Sardegna, Corsica) / Programme de coopération transfrontaliere Italie/France "Maritime" 2007 – 2013 (Ligurie, Toscane, Sardaigne, Corse)

www.maritimeit-fr.net



www.ventoeporti.net

REGIONE TOSCANA

REGIONE LIGURIA

REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

Collectivité Territoriale de CORSE

Cullettività Territuriale di CORSICA