

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”

in consorzio con
SECONDA UNIVERSITÀ DI NAPOLI
UNIVERSITÀ “PARTHENOPE” NAPOLI
in convenzione con
ISTITUTO PER L’AMBIENTE MARINO COSTIERO – C.N.R.
STAZIONE ZOOLOGICA “ANTON DOHRN”

Dottorato in Scienze ed Ingegneria del Mare
XX ciclo

Tesi di Dottorato

Titolo

**Misure di correnti superficiali nel Golfo di Napoli
eseguite con radar costiero**

Candidato: Dott. Milena Menna

Tutor: Prof. Enrico Zambianchi

Il Coordinatore del Dottorato: Prof. Bruno D’Argenio

ANNO 2007

Indice

INTRODUZIONE.....	1
-------------------	---

Capitolo 1 : **Area di studio: Il Golfo di Napoli**

Introduzione.....	3
1.1 BACKGROUND OCEANOGRAFICO.....	5
1.1.1 Struttura idrologica del Golfo di Napoli.....	6
1.1.2 Correntometria e dinamica nel Golfo di Napoli.....	7
1.1.3 Studi modellistica nel Golfo di Napoli.....	10
1.2 L'ATTUALE RETE DI MONITORAGGIO	13

Capitolo 2 : **HF RADAR**

Introduzione.....	18
2.1 HF radar: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	18
2.2 IL SISTEMA INSTALLATO NEL GOLFO DI NAPOLI.....	23

Capitolo 3 : **Dati utilizzati**

Introduzione.....	29
3.1 PRIME OSSERVAZIONI.....	31

Capitolo 4 : **Analisi dei venti nel Golfo di Napoli**

Introduzione.....	38
4.1 L'AREA DEL GOLFO di NAPOLI E I SITI DI OSSERVAZIONE.....	38
4.2 ANALISI STATISTICHE.....	40

4.3	ANALISI INTERANNUALE.....	43
4.4	VARIABILITA' STAGIONALE DEI VENTI.....	47

Capitolo 5 : **Dinamica superficiale delle correnti**

	Introduzione.....	61
5.1	CASI STUDIO.....	64
5.1.1	Venti dal quadrante NE.....	64
5.1.2	Venti dal quadrante SW.....	89
5.1.3	Regime di brezza.....	97
5.2	CIRCOLAZIONE GUIDATA DALLE CORRENTI ESTERNE AL BACINO COSTIERO.....	110
5.3	PROCESSI DI TRASPORTO.....	120

Capitolo 6 : **Analisi spettrale rotatoria**

	Introduzione.....	127
6.1	SPETTRO ROTATORIO DELLE COMPONENTI.....	128
6.2	ANALISI ROTATORIA PER UNA COPPIA DI SERIE TEMPORALI.....	129
6.3	ANALISI SPETTRALE ROTATORIA DEI VETTORI CORRENTE E VENTO.....	132
6.4	DINAMICA AD ALTA FREQUENZA.....	157
6.5	DINAMICA A BASSA FREQUENZA.....	158

	Conclusioni.....	171
--	-------------------------	------------

	Appendice A.....	174
--	-------------------------	------------

	Bibliografia.....	192
--	--------------------------	------------

Introduzione

L'oceano costiero è un sistema collocato al boundary tra la terra e l'oceano profondo. Questo ambiente è caratterizzato da linee di costa intricate, da una complessa batimetria e da una serie di processi chimico - biologici che coesistono e sono legati alla complicata dinamica delle correnti. In aggiunta, la fascia marina costiera rappresenta una zona altamente vulnerabile le cui modificazioni hanno rilevanti implicazioni sia di tipo ambientale che, direttamente o indirettamente, di tipo economico e sociale. Per questi motivi essa rappresenta una grande sfida per gli stakeholder che hanno la necessità di capire e prevedere le sue caratteristiche e le sue dinamiche.

In particolare, le aree costiere che maggiormente suscitano interesse negli ultimi anni sono quelle prospicienti ai grandi centri urbani poiché rappresentano una risorsa dal punto di vista economico e, allo stesso tempo, sono le più stressate dal punto di vista ambientale a causa dell'elevato carico di inquinamento.

Il monitoraggio di un'area costiera, al fine di una corretta gestione ambientale, non può prescindere dalla conoscenza del movimento delle masse d'acqua; allo stesso tempo, lo studio di tale dinamica è particolarmente complicato in quanto negli ambienti costieri venti, onde e correnti interagiscono e variano su scale spaziali molto piccole rispetto a quelle tipiche dell'oceano profondo. Ne risulta che la circolazione delle acque costiere è dipendente da numerosi meccanismi fisici che possono interagire in maniera diversa da caso a caso, e che spesso sono poco conosciuti per la difficoltà di misurarli accuratamente e con la necessaria risoluzione spaziale e temporale.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è appunto quello di approfondire e analizzare i meccanismi di circolazione superficiale in un'area costiera fortemente urbanizzata: il Golfo di Napoli (Tirreno meridionale). La costa napoletana rappresenta un'area di forte interesse turistico ma è un ambiente estremamente vulnerabile a causa della presenza di numerosi siti industriali localizzati lungo la costa, di scarichi fluviali altamente inquinanti e dello sversamento di reflui urbani non opportunamente trattati.

Per tenere sotto controllo lo ' stato di salute ' del Golfo, il Dipartimento di Scienze per l'Ambiente (DiSAM) dell'Università Parthenope di Napoli, ha realizzato un Sistema Integrato di Monitoraggio Ambientale, costituito da varie tipologie di strumenti che effettuano misurazioni a mare ed in atmosfera. Questa rete di monitoraggio prevede, in aggiunta a centraline meteorologiche, ancoraggi correntometrici e multistrumentati,

mareografi, un ondometro, la rilevazione delle correnti superficiali attraverso un sistema di radar ad alta frequenza (HF radar), gestito dal DiSAM per conto dell' AMRA scarl (Centro di Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale).

Il sistema radar fornisce mappe di correnti relative al primo metro d'acqua, con una copertura consistente di tutta l'area centrale del Golfo e delle principali bocche e canali. I primi periodi di dati con buona copertura spaziale e temporale, acquisiti attraverso tale strumentazione, sono stati messi in relazione con i campi di vento ottenuti da una rete di stazioni meteorologiche (vento locale) e con dati diagnostici prodotti da un modello di circolazione generale dell'atmosfera (vento a scala di bacino). L'obiettivo è studiare l'influenza del forzante locale sulla formazione ed evoluzione delle strutture dinamiche superficiali del Golfo, ed isolare e riconoscere situazioni in cui all'azione del vento si sovrappone quella di altri tipi di forzanti.

I risultati hanno permesso di riconoscere quattro scenari tipici di circolazione a breve termine nel Golfo di Napoli, di cui 3 direttamente legati all'azione del vento (situazione con venti da NE, da SW e brezze) ed uno legato ad un intenso flusso tirrenico che penetra nel Golfo attraverso la Bocca Piccola. Le mappe di correnti CODAR, relative a tali situazioni, sono state usate come input di un modello di trasporto per valutare i tempi di residenza di sostanze inquinanti nelle aree immediatamente sottocosta del litorale cittadino, e gli scambi tra queste aree e le regioni centrali del Golfo.

Capitolo 1: Area di studio: Il Golfo di Napoli

INTRODUZIONE

Il Golfo di Napoli è un'ampia insenatura localizzata sulla piattaforma continentale sud orientale del Mar Tirreno, lungo le coste della Campania. Caratterizzato da una profondità media di circa 170 m e da un'area di circa 870 km², il Golfo è delimitato a nord dalle isole di Ischia e Procida e dai Campi Flegrei, e a sud dall'isola di Capri e dalla Penisola Sorrentina (Figura 1.1).

La comunicazione tra le acque interne e quelle esterne del Mar Tirreno avviene attraverso due principali aperture: la Bocca Grande, che separa le isole di Ischia e Capri, e la Bocca Piccola, localizzata tra Capri e la punta della Penisola Sorrentina (Punta Campanella).

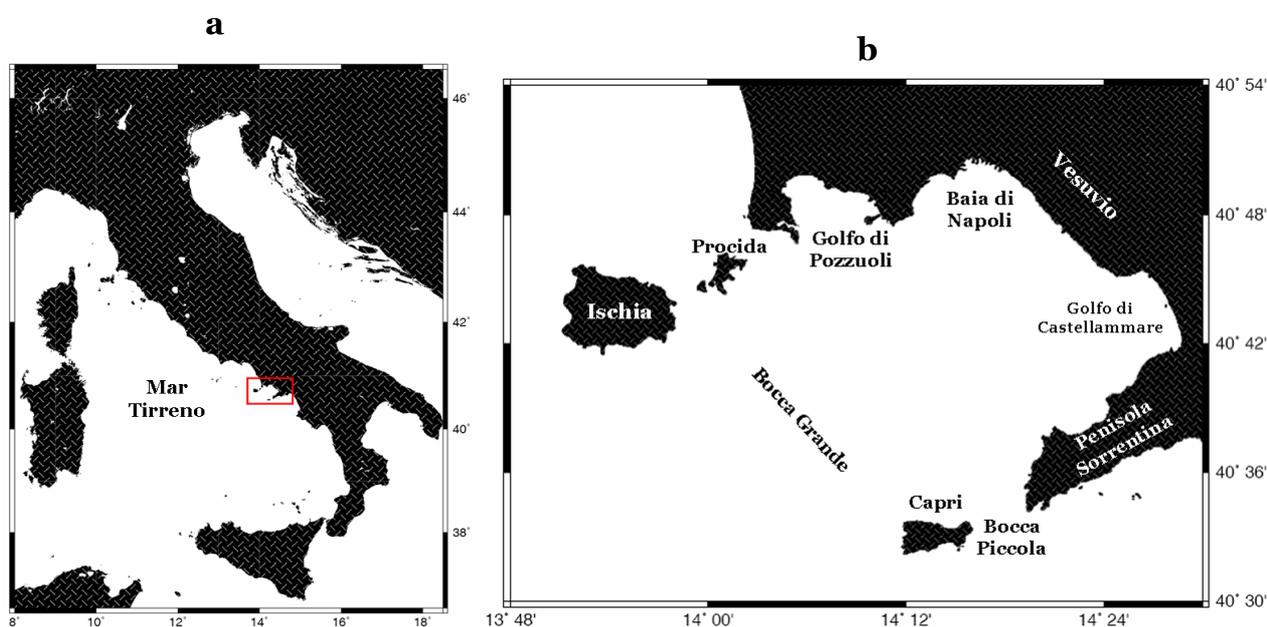


Figura 1.1 – a) Golfo di Napoli (rettangolo). b) Sottoaree, canali e bocche interne al Golfo di Napoli.

I canali tra Procida e la terraferma (Canale di Procida) e tra Ischia e Procida (Canale di Ischia) hanno rispettivamente soglie di 14 e 12 m. La Bocca Piccola rappresenta il

collegamento tra il Golfo di Napoli e quello di Salerno, attraverso una soglia di 74 m; alla Bocca Grande, invece, si raggiungono anche profondità di 600 e 800 m in corrispondenza dei canyon Magnaghi e Dohrn.

La scarpata continentale del Golfo di Napoli è caratterizzata, quindi, dalla presenza di due canyon. Il canyon Magnaghi si sviluppa a partire dal margine della piattaforma settentrionale, in corrispondenza dell'area vulcanica tra Capo Miseno (estremità occidentale del Golfo di Pozzuoli) ed Ischia, e scorre dapprima perpendicolarmente e poi parallelamente alle isole di Procida e di Ischia. Il canyon di Dohrn è invece localizzato nella regione centrale del bacino, si estende nella Bocca Grande per poi biforcarsi e risalire verso costa. I due canyon partono dal margine esterno della piattaforma continentale ad una profondità di circa 150 m, e degradano in corrispondenza della Bocca Grande fino agli oltre 1000 m di profondità della piana abissale (POR CAMPANIA 2002-2006). Nella regione compresa tra i due canyon è localizzato un banco con profondità di circa 150 m che prende il nome di Banco o Secca delle Vedove.

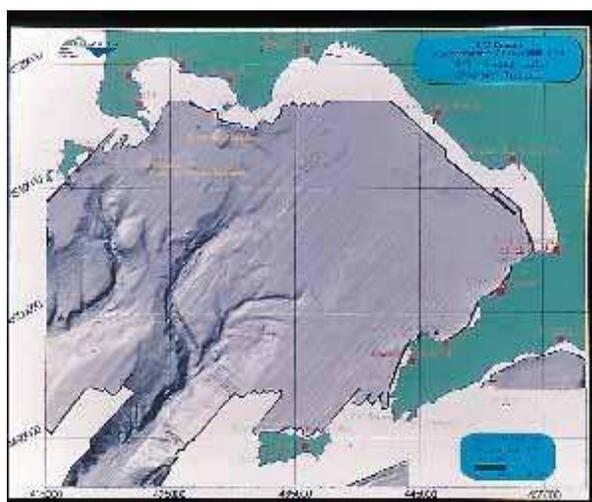


Figura 1.2 – Visione a rilievo della topografia del fondo marino del Golfo di Napoli, ricavata dal trattamento di dati "multibeam" Elak MK2, acquisiti dall'IAMC-CNR Sezione di Napoli. Si noti la morfologia di dettaglio di due importanti incisioni, il Canyon Dohrn (destra) e il Canyon Magnaghi (sinistra) che drenano la piattaforma continentale a sud del Golfo di Pozzuoli.

Dal punto di vista morfologico il Golfo può essere suddiviso in due settori: quello sud-orientale, in parte di natura carbonatica (Penisola Sorrentina e l' isola di Capri) e in parte di natura alluvionale (piana fangosa del fiume Sarno), e quello nord-occidentale, di natura vulcanica (Campi Flegrei, isole di Ischia e Procida) caratterizzato da secche e banchi sommersi, oltre che dalla presenza dei canyon sottomarini.

Anche la morfologia della costa che circonda il Golfo appare estremamente complicata: l'estremità settentrionale è caratterizzata dalla complessa morfologia craterica dei Campi Flegrei che si estendono attorno al Golfo di Pozzuoli (rilievi vulcanici del Preappennino); la parte centrale, dove si estende la città di Napoli, è dominata dall'imponente cono vulcanico del Vesuvio; la sezione meridionale, in corrispondenza della Penisola Sorrentina, è sovrastata dalla dorsale calcarea dei Monti Lattari, un sistema montuoso che fa parte degli Appennini.

La carta batimetria del Golfo è mostrata in Figura 1.3.

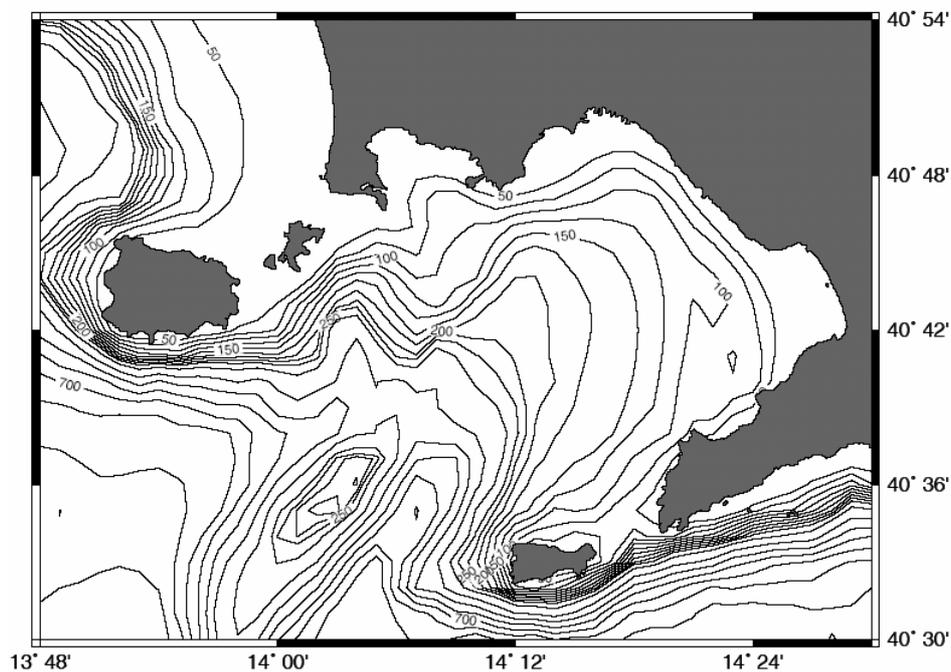


Figura 1.3 – Batimetria del golfo di Napoli.

1.1 BACKGROUND OCEANOGRAFICO

La storia delle conoscenze oceanografiche nel Golfo di Napoli inizia nel 1953, anno in cui F. Wendicke riportò i primi dati ideologici del Golfo acquisiti nei mesi estivi.

Nel 1957-58, in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale, W. Hapgood eseguì una serie di rilievi mensili di T, S, O₂, pH e fosforo totale in sei punti diversi del bacino.

Al 1959 risalgono i primi profili verticali di corrente ad opera di Kraus e Duing, che realizzarono anche rilievi su 28 stazioni ideologiche; nel 1962 Duing effettuò due mesi di misure correntometriche nel Canale di Ischia e nella Bocca Piccola.

Nel 1966-67 l'Istituto di Meteorologia ed Oceanografia dell'Istituto Universitario Navale di Napoli (oggi Università 'Parthenope'), eseguì sotto costa misure

correntometriche con traccianti intorno all'isola di Ischia e Forio d' Ischia, che fornirono dati per circa un anno. (De Maio et al., 1973).

Le prime misure correntometriche eseguite anche in punti interni al Golfo, in aggiunta a quelle lungo i canali e nell'area costiera, sono del 1973. In seguito, tra gli anni 70' e 80' sono state condotte una serie di campagne oceanografiche e installate delle stazioni correntometriche fisse, allo scopo di acquisire quante più informazioni sull'idrologia e la dinamica del Golfo.

Per molti anni, i risultati delle campagne suddette sono state le uniche conoscenze oceanografiche relative alla dinamica del Golfo. In tempi più recenti (2000-2005) sono stati condotti numerosi studi modellistici (Gravili et al., 2001; Grieco et al., 2005; Mattia, 2007) che hanno chiarito e approfondito aspetti relativi alla circolazione superficiale del Golfo ed ai processi di trasporto ad essa collegati, e collezionati una serie di dati correntometrici ed idrologici (ad es. Roselli et al., 2007) in aree di particolare interesse scientifico, economico e sociale del bacino.

1.1.1 Struttura idrologica del Golfo di Napoli

Il Golfo di Napoli è caratterizzato dalla presenza di due masse d'acqua principali, tipiche del Tirreno centro meridionale (De Maio et al., 1979). La prima è acqua di provenienza atlantica, Atlantic Water (AW), che, modificata lungo il suo percorso, raggiunge la profondità di 50-100 m, con salinità pari a 37.5‰ e temperatura che segue l'andamento stagionale, diminuendo con la profondità. Nei mesi invernali, a causa del completo rimescolamento della colonna d'acqua, la temperatura assume un valore costante pari a circa 14°C.

Il secondo tipo di massa d'acqua presente nel Golfo è di origine levantina, Levantine Intermediate Water (LIW), e si trova nel Tirreno localizzata ad una profondità di 400-500 m; nel Golfo si riscontra la sua presenza nelle stazioni più profonde in prossimità della Bocca Grande. I valori che caratterizzano tale massa d'acqua nel Golfo di Napoli sono :

$$T = 14.2^{\circ}\text{C} ; S = 38.65\text{‰} ; \sigma_t = 29.0 \text{ kg/m}^3 \text{ (De Maio et al., 1979).}$$

E' possibile riscontrare la presenza di altri tipi di masse d'acqua in relazione all'andamento stagionale. In inverno, la colonna d'acqua è omogenea sotto i 150 m di profondità ed ha $T = 14^{\circ}\text{C}$ e $S = 38\text{‰}$. Il risultato del mescolamento invernale costituisce un tipo di acqua, la Tyrrhenian Intermediate Water (TIW). A causa del riscaldamento estivo la TIW si ritrova a una profondità di circa 75 m, e diviene Tyrrhenian Surface Water (TSW), con valori di T ed S pari a di 26°C e 38‰ rispettivamente. Il nucleo della TIW risiede tra i 75 e 100 m fino a tardo autunno,

quando viene inglobata dalla nuova produzione di TIW. (Carrada *et al.*, 1979). Infine, è presente una massa d'acqua simile alla TSW, che a causa delle immissioni nel Golfo delle acque dolci provenienti dai fiumi Sarno e Volturno e degli scarichi urbani e industriali risulta essere meno salata e più calda (Carrada *et al.*, 1979).

In particolare si nota la presenza di due lingue a bassa salinità che si protendono dalle foci dei due fiumi sopra citati.

In presenza di correnti dirette verso NW, le lingue di acqua meno salina, una in prossimità del Sarno e l'altra dell'area urbana di Napoli, vengono trasportate verso il largo a causa dell'azione combinata della topografia del sito, della struttura e della variabilità delle correnti (De Maio *et al.*, 1979). Una situazione con venti da SW provoca una concentrazione delle acque meno saline lungo la zona costiera, dovuta alla convergenza delle correnti verso le coste interne.

Stagionalmente l'idrologia del Golfo è caratterizzata da una stratificazione nei mesi estivi, con conseguente formazione del termoclino e uno strato superficiale omogeneo di 20 – 30 m. Nei mesi invernali, invece, è presente un forte rimescolamento lungo tutta la colonna d'acqua, che presenta un valore costante di temperatura anche fino a 40 m e di salinità fino a 120 m.

1.1.2 Correntometria e dinamica nel Golfo di Napoli

Un primo schema di circolazione realizzato attraverso misure correntometriche nella regione interna del Golfo e traiettorie di traccianti (Moretti *et al.*, 1977) è relativo ad una situazione stabile di venti da NE (Figura 1.4); quello che si osserva è una corrente che si allontana dalla costa in direzione SW davanti a Torre del Greco (zona di convergenza) a cui sono associate due zone di divergenza nelle aree prospicienti Napoli e Torre Annunziata. Questo andamento del flusso è attribuito all'effetto del Vesuvio che ripara la parte centrale del Golfo dai venti provenienti da NE. Tali venti trovano facile sbocco sul mare lungo la pianura del Sarno, così lo stress superficiale è notevole sulle acque antistanti le coste tra Castellammare e Torre Annunziata dove si nota una certa divergenza proprio a causa dell'allontanamento delle acque dalla costa.

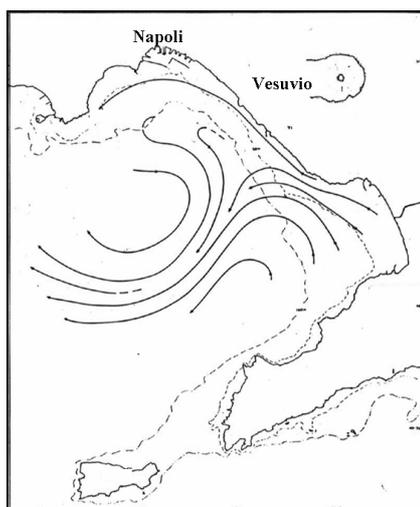


Figura 1.4 – Schema di circolazione superficiale con venti da NE (Moretti et al.,1977).

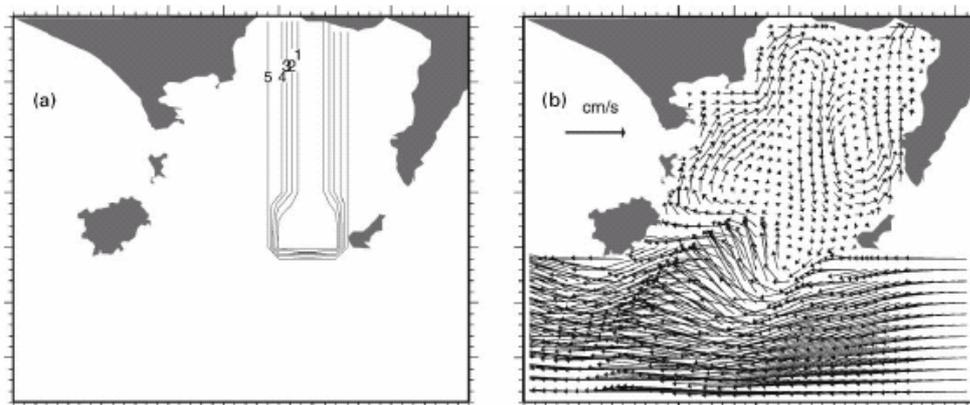


Figura 1.5 – a) Limiti della regione considerata schermata dalla presenza del Vesuvio; l'area esterna è forzata con venti di 5 m/s diretti da N-NE, l'area interna è forzata con venti con ampiezza sinusoidale. b) Campo risultante delle correnti guidate dal vento.

Più a nord il vento trova via libera tra il versante NW del Vesuvio e le colline del Vomero, formando dinanzi a Napoli una corrente costiera che dirige verso Capo Posillipo e che con la parte più a largo alimenta il bordo nord della lingua centrale. Il vento risulta essere il principale forzante della circolazione superficiale nel Golfo di Napoli, generando correnti anche di un ordine di grandezza superiore rispetto alla circolazione media del bacino.

In un lavoro di Gravili et al. (2001) questo stesso schema è stato riprodotto utilizzando un modello di circolazione barotropica forzato con venti non uniformi

allo scopo di riprodurre l'effetto schermante del Vesuvio (Figura 1.5a). La simulazione (Figura 1.5b) evidenzia la presenza di un'area di convergenza localizzata al centro del Golfo accompagnata da un gyre ciclonico in prossimità della Penisola Sorrentina e da un gyre anticiclonico in prossimità della Bocca Grande.

Tra il 1977 e il 1981 si hanno una serie di misure correntometriche effettuate su 11 punti fissi sostanzialmente localizzati lungo la costa, nelle due bocche principali e nei Canali di Ischia e Procida. Un'analisi spettrale delle serie temporali ottenute (De Maio et al., 1981) ha mostrato che la struttura delle correnti nel Golfo si può dividere in: movimenti con periodo inferiore alle 24 ore, caratterizzati a largo da una componente molto marcata intorno alla frequenza inerziale (17-18 ore) e sottocosta dall'influenza delle brezze; movimenti con periodo superiore alle 24 ore (correnti sub inerziali o correnti residue) che variano molto lentamente con un periodo tipico di una settimana o meno. Le correnti residue posseggono una certa stabilità e consentono il trasporto d'acqua anche su distanze notevoli.

Nello stesso lavoro (De Maio et al. 1981,1982) si definiscono altri due schemi tipici della circolazione superficiale che dipendono principalmente dalla circolazione presente nel bacino tirrenico. In particolare, quando il flusso tirrenico è diretto verso nord-ovest (situazione settentrionale Figura 1.6) la corrente penetra in maniera più o meno uniforme nel Golfo di Napoli dove si forma una circolazione antioraria; nel Golfo di Castellammare si osserva una circolazione secondaria con andamento orario. Quando il flusso tirrenico è diretto verso sud (situazione meridionale Figura 1.7) la parte esterna alle Isole di Ischia e Capri è sede di un moto medio in direzione sud-est, che interessa in modo saltuario il Canale di Ischia e la Bocca Piccola; la parte interna del bacino resta isolata e sembra risentire molto poco della situazione al largo. Quello che si osserva è un vortice ciclonico nella parte centrale del bacino e due vortici anticiclonici, di dimensioni ridotte, situati nello specchio d'acqua antistante la città di Napoli e nel Golfo di Castellammare. Nel caso della circolazione settentrionale il periodo di ricambio delle acque costiere interne al Golfo è stimato intorno ai 4-5 giorni; nel caso della circolazione meridionale esso sembra molto maggiore.

1.1.3 Studi modellistica nel Golfo di Napoli

L'applicazione di modelli fisici nel Golfo di Napoli nasce allo scopo di studiare un sistema costiero complesso e altamente variabile nella sua interezza.

Le caratteristiche dinamiche barotropiche del Golfo di Napoli (Gravili et al., 2001), ottenute forzando il modello di circolazione più a grande scala del Tirreno con venti idealizzati, confermano i risultati dei dati sperimentali (De Maio et al., 1981).

Aspetti della circolazione barotropica stagionale nel Golfo di Napoli sono stati studiati da Gioco et al. (2005) attraverso l'applicazione del Princeton Ocean Model (POM); il modello è stato forzato dallo stress del vento mediato mensilmente e da correnti che si muovono lungo il boundary aperto del modello. Tutti i pattern di circolazione (Figura 1.8) mostrano una stretta dipendenza dalla batimetria del fondale e dallo stress del vento: a gennaio (Figura 1.8a), con la corrente tirrenica diretta verso NW, si crea un gyre ciclonico nel Golfo di Pozzuoli ed un gyre anticiclonico nel golfo di Castellammare; ad Aprile (Figura 1.8b), le correnti tendono a seguire la batimetria interna al Golfo; a luglio (Figura 1.8c), vi è una situazione di transizione, la corrente tirrenica è poco intensa e le correnti interne al Golfo si muovono lungo la costa; ad ottobre (Figura 1.8d), si crea una zona di convergenza interna al Golfo con un gyre anticiclonico localizzato davanti al Golfo di Pozzuoli, e un gyre ciclonico nel Golfo di Castellammare.

Un'applicazione del POM in condizioni molto simili a quelle appena descritte, ha permesso di ottenere dei campi di velocità superficiale per ogni mese dell'anno (Mattia, 2007) e di utilizzarli per lo studio di processi di trasporto e dispersione di inquinanti.



Figura 1.6 – Situazione settentrionale. Flusso tipico delle correnti residue dedotte da registrazioni correntometriche e vettori progressivi sui punti correntometrici.



Figura 1.7 – Situazione meridionale. Flusso tipico delle correnti residue dedotte da registrazioni correntometriche e vettori progressivi sui punti correntometrici.

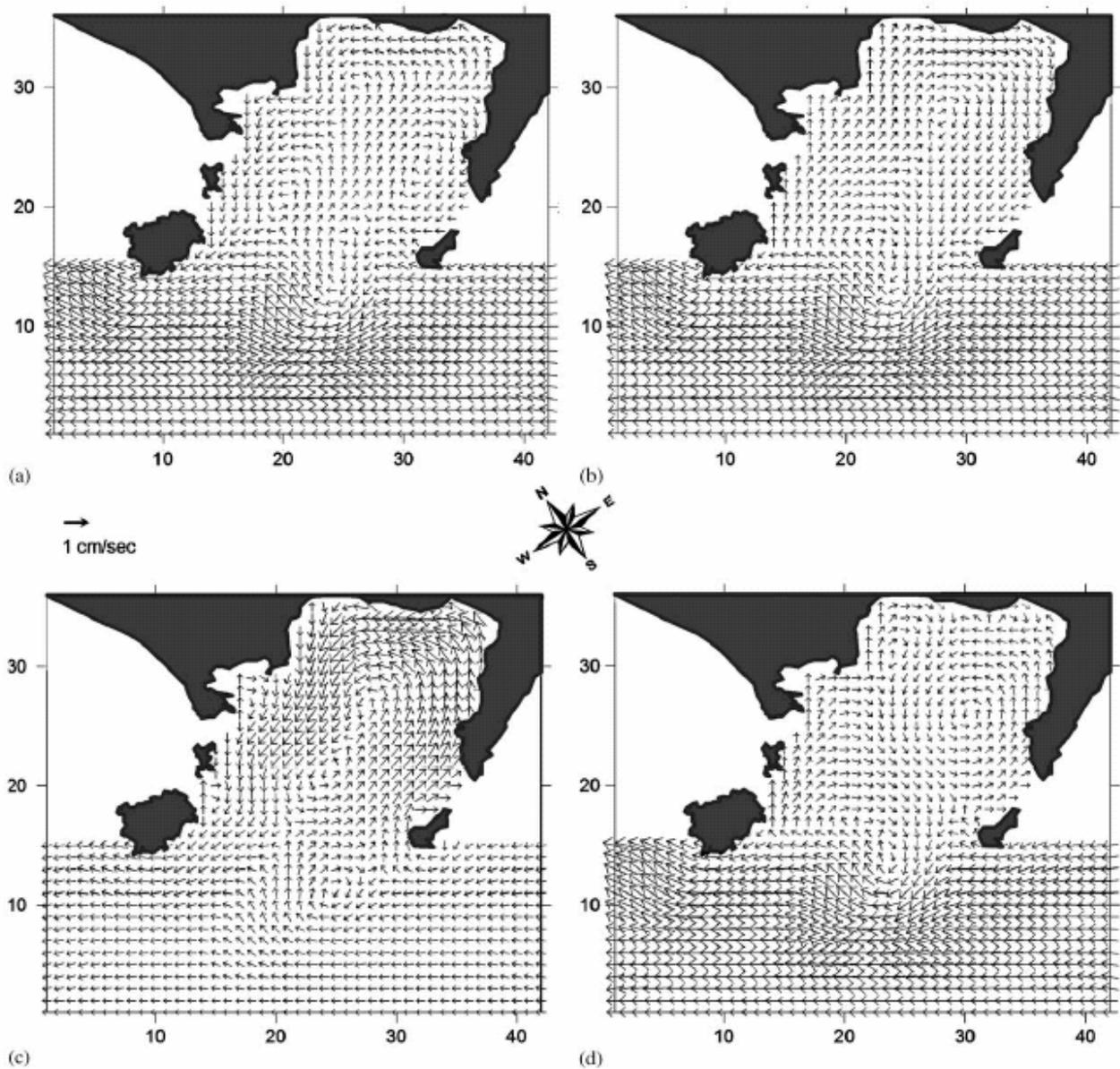


Figura 1.8 – Pattern medi della circolazione stagionale nel Golfo di Napoli ottenuti dal POM usando uno stress del vento variabile mensilmente e una corrente costante di 1 cm/s che entra nel dominio da destra: gennaio (a), aprile (b), luglio (c), ottobre (d) .

1.2 L'ATTUALE RETE DI MONITORAGGIO



Figura 1.9 – La rete di monitoraggio DiSAM nel Golfo di Napoli.

La necessità di misure che forniscano dati utili sul movimento delle acque nel Golfo di Napoli deriva, oltre che da fini puramente scientifici, anche dalle esigenze di gestione dell'ambiente marino costiero, nonché dalla necessità di risolvere problematiche connesse all'inquinamento delle acque del bacino.

In particolare, il Golfo di Napoli è interessato da notevoli fenomeni di degrado che, specialmente nella fascia costiera, danneggiano l'economia e l'ambiente. L'intensa pressione, dovuta ad attività agricole, industriali e all'elevata densità demografica hanno provocato un deterioramento generale dell'ambiente marino ed hanno accentuato problemi come l'erosione costiera, la diffusione di batteri patogeni, lo sversamento di sostanze tossiche, e così via. La scarsa attenzione verso le problematiche ambientali ha condotto ad un preoccupante degrado dell'ecosistema soprattutto delle aree costiere. (Ribera d' Alcalà et al., 1989).

I processi suscettibili di generare situazioni di rischio coprono un ampio intervallo di scale temporali, dalle ore o giorni degli eventi meteo-marini o degli incidenti che possono causare inquinamento, fino alle scale pluriennali, legate a processi pressoché irreversibili come quelli delle fluttuazioni climatiche o dell'attività antropica.

Per acquisire nel tempo una conoscenza approfondita delle caratteristiche fisiche e dinamiche dell'area del Golfo, indispensabile per prevenire e gestire eventuali situazioni di rischio, il Dipartimento di Scienze per l'Ambiente (DiSAM) dell'Università Parthenope di

Napoli, ha realizzato un Sistema integrato di monitoraggio ambientale (Figura 1.9). Il sistema è costituito da una serie di strumenti che effettuano misurazioni a mare ed in atmosfera.

1. Stazioni mareografiche. Le due stazioni mareografiche sono ubicate in un punto interno al Golfo, lungo la costa della Penisola Sorrentina (Piano di Sorrento), ed in un punto esterno al Golfo (Porto di Ischia).

Un esempio dell'andamento mareale registrato nel Golfo è rappresentato in Figura 1.10 insieme all'andamento della pressione atmosferica nello stesso periodo. Dall'analisi dei dati registrati su vari anni si è potuta riscontrare un'alta coerenza tra gli andamenti del livello del mare (SL) di Ischia e di Sorrento, con una caratteristica diminuzione del valore in corrispondenza di frequenze prossime all'inerziale (Buonocore et al., 2006); evidentemente la superficie del mare in un punto più interno al Golfo reagisce diversamente alle oscillazioni inerziali rispetto ad un punto esterno.

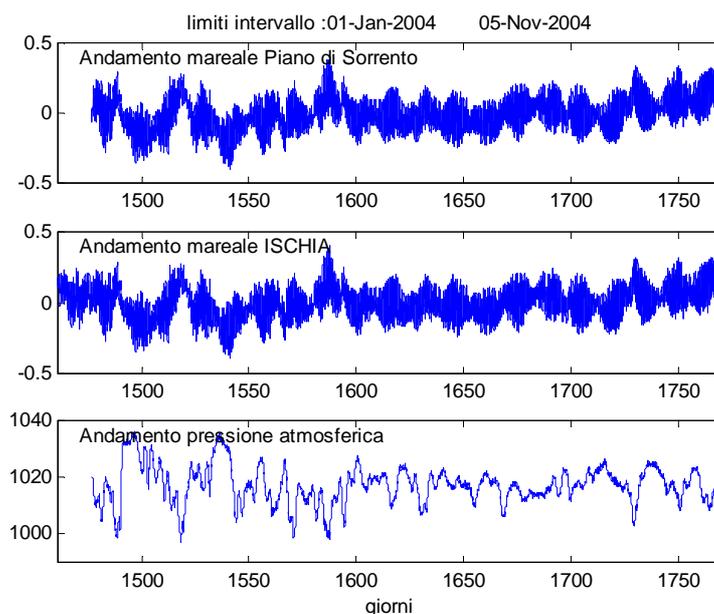


Figura 1.10 – Andamenti mareali delle stazioni di Sorrento ed Ischia e andamento della pressione atmosferica nell'anno 2004.

L'analisi dei dati mareografici acquisiti nel periodo 2002-2005, mostra un andamento del livello medio mare (lmm) che si mantiene pressoché costante, presentando escursioni tra il valore minimo e massimo dell'ordine degli 80 cm (Tabella 1). Tale valore rappresenta il doppio del contributo imputabile alle variazioni mareali. La pressione atmosferica, a cui è imputabile il maggior contributo residuo, mostra una forte correlazione con il SL (Tabella

2). I coefficienti di correlazione raggiungono valori di correlazione più alti nei periodi invernali rispetto a quelli estivi (Buonocore et al., 2006).

Tabella 1. Valori medi annuali, massimi, minimi ed escursione annuale del SL per le due stazioni della rete DiSAM confrontati con i dati registrati presso la stazione mareografica di Napoli APAT.

	SORRENTO				ISCHIA				NAPOLI (APAT)			
	minimo annuale (m)	massimo annuale (m)	delta annuale (m)	media annuale (m)	minimo annuale (m)	massimo annuale (m)	delta annuale (m)	media annuale (m)	minimo annuale (m)	massimo annuale (m)	delta annuale (m)	media annuale (m)
2002	4,5	5,18	0,67	4,81	-0,95	-0,28	0,66	-0,64	-0,44	0,28	0,72	-0,09
2003	4,48	5,2	0,72	4,78	-0,98	-0,27	0,7	-0,67	-0,43	0,28	0,71	-0,13
2004	4,37	5,18	0,81	4,77	-1,07	-0,28	0,79	-0,69	-0,55	0,25	0,8	-0,16
2005	4,32	5,15	0,83	4,8	-1,15	-0,31	0,85	-0,68	-0,61	0,22	0,83	0,14

Tabella 2. Correlazione tra SL e pressione atmosferica per le stazioni di Sorrento ed Ischia negli anni 2002-2005.

	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
2002												
P.Sorrento			0,74	0,72	0,9	0,6	0,69	0,53	0,73	0,65	0,77	
Ischia			0,76	0,7	0,9	0,57	0,6	0,56	0,74	0,55	0,74	
2003												
P.Sorrento			0,61	0,17	0,32	0,87	0,45	0,82	0,86	0,76	0,63	
Ischia			0,62	0,19	0,28	0,82	0,3	0,85	0,89	0,76	0,66	
2004												
P.Sorrento		0,85	0,9	0,71	0,65	0,67	0,47	0,65	0,76	0,7		
Ischia		0,85	0,91	0,73	0,66	0,7	0,37	0,65	0,76	0,72		
2005												
P.Sorrento				0,82	0,75	0,36		0	0,58	0,49	0,86	0,79
Ischia				0,83	0,76	0,48		0,09	0,56	0,52	0,83	0,8

2. Stazioni meteorologiche. Le stazioni meteorologiche, disposte in quattro diversi punti del Golfo (Napoli, Ischia, Penisola Sorrentina, Licola) registrano dati di umidità, pressione, temperatura dell'aria e intensità del vento. Le informazioni ottenute sono molto utili al fine di approfondire la dinamica delle correnti superficiali nel Golfo, fortemente condizionate dalle variazioni del forzante meteorologico. I dati provenienti da due delle stazioni meteorologiche DiSAM sono state utilizzati in questo lavoro di tesi per ricostruire i campi di vento dominanti nel Golfo di Napoli (Capitolo 3) e per correlare le serie temporali del vento con quelle di corrente misurate dal CODAR (Capitolo 4).

3. SODAR. Il SODAR (Sound Detection and Ranging) è una apparecchiatura che permette di studiare le caratteristiche microclimatiche dei bassi strati dell'atmosfera. Il sistema di misura si basa sull'emissione in atmosfera di una serie di impulsi acustici che

vengono diffusi dalle disomogeneità termiche, rappresentate dalle masse di aria in movimento. La frazione di segnale che viene retrodiffusa torna al sensore con una frequenza che differisce dalla frequenza del segnale emesso, dato che la riflessione è stata causata da superfici in moto. Dalla misura della frequenza Doppler, cioè dalla frequenza dell'eco, si ottiene la velocità del vento, o meglio, la componente della velocità del vento lungo la direzione di propagazione del pacchetto acustico alle varie quote.

I parametri misurati sono: quota di rilevazione, intensità dell'eco, velocità orizzontale, direzione del vento, velocità verticale, deviazione standard su velocità e direzione ed altezza di rimescolamento.

4. Stazione ondametria. La boa ondametria Datawell Waverider è ancorata al largo di Massa Lubrense su un fondale di 55 m (14°19.24 E; 40°37.01 N) e fornisce la misura dell'altezza, del periodo e della direzione dell'onda. La misura si basa sul principio secondo cui la boa, seguendo il movimento della superficie dell'acqua, può determinare i parametri caratteristici dell'onda dalla misura dell'accelerazione verticale della boa stessa (Buonocore et al., 2003). Tale misura viene trasmessa alla stazione ricevente che provvede alla conversione A/D ed alla registrazione.

5. Mooring. La catena correntometrica localizzata alla Bocca Piccola (14°18' E; 40°34' N), all'interno dell' Area Marina Protetta di Punta Campanella, permette di registrare l'andamento delle correnti in un punto di collegamento cruciale tra la circolazione tirrenica e quella interna al Golfo. I dati analizzati (Roselli, 2003; Petrillo, 2006) mostrano la corrente prevalentemente in uscita dalla Bocca Piccola. Le analisi spettrali evidenziano la presenza di oscillazioni inerziali e quasi inerziali come conseguenza del passaggio di perturbazioni nell'area del Golfo (Petrillo, 2006; Roselli, 2007); i moti a bassa frequenza più importanti hanno periodo variabile tra 2 e 5 giorni (Petrillo, 2006).

6. Boa meteo-oceanografica. La boa meteo – oceanografica è localizzata al centro della rada di Mergellina (14°14' E ; 40°49' N); l'unità sensoristica è composta da una parte emersa, comprendente sensori meteorologici, ed una sommersa comprendente quelli oceanografici. La parte meteorologica è composta dai sensori di velocità del vento, temperatura, umidità relativa e pressione dell'aria. La parte sommersa è invece composta da due correntometri Doppler posizionati a 1 e 18 metri di profondità, tre sensori di temperatura posti a 1, 3 e 18 metri di profondità e due sensori riferiti rispettivamente alla conducibilità e all'ossigeno disciolto, posti su di un disco alla profondità di 3 metri.

Dalle serie temporali di dati meteorologici e correntometrici misurati risulta che, su scala annuale, il vento nell'area di Mergellina proviene principalmente da N-NE e da S-SW. Le correnti associate a queste condizioni di vento presentano sempre flussi uscenti dalla

rada, nel primo caso in direzione SW e nel secondo caso in direzione NE (Peluso, 2004; De Alteris et al., 2004).

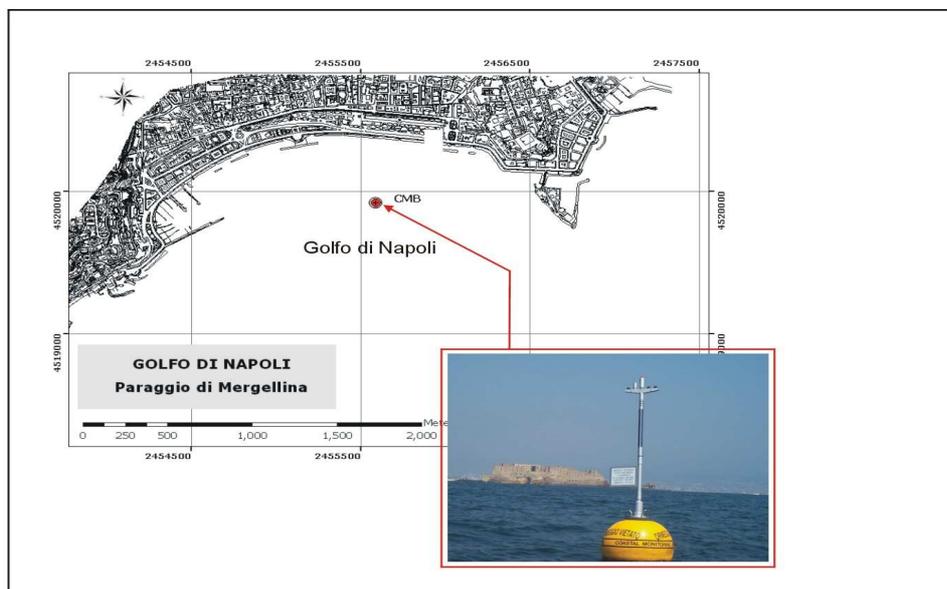


Figura 1.11 – Boa meteo-oceanografica localizzata a Mergellina.

7. Sistema CODAR. Il radar costiero ad alta frequenza fornisce immagini delle correnti superficiali del Golfo di Napoli, con cadenza temporale oraria e con una elevata risoluzione spaziale. L'elaborazione dei dati forniti da questo strumento rappresenta la parte più cospicua del presente lavoro di tesi. Le specifiche tecniche ed i dettagli riguardanti il sistema installato nel Golfo di Napoli sono riportati nel Capitolo 2.

Capitolo 2 : HF RADAR

INTRODUZIONE

La storia dell'applicazione alla correntometria superficiale dei radar in HF è ormai quasi quarantennale, ma negli ultimi dieci anni il numero di sistemi installati nel mondo ha conosciuto un sensibile incremento. L'origine dell'utilizzazione di simili apparecchiature per la misura delle correnti costiere è quasi casuale: nati per scopi militari (principalmente per la sorveglianza dello spazio aereo), questi strumenti ebbero vita assai difficile non solo per i costi di esercizio, al tempo elevatissimi, ma anche per la diffusa presenza di rumore di fondo estremamente invadente, dovuto proprio alla riflessione del segnale da parte delle onde marine (le antenne erano poste in riva al mare per ragioni strategiche). La svolta avvenne quando fu ribaltata la prospettiva, e si iniziò a considerare quanto proveniva dalla superficie del mare, piuttosto che come rumore, come il vero segnale di interesse.

I progressi della tecnologia negli ultimi decenni hanno consentito un notevolissimo ridimensionamento delle antenne (quelle del radar installato negli anni '70 da Donald Barrik su San Clemente Island, in California, occupavano una superficie di 500 metri quadri, mentre i sistemi attuali possono utilizzare antenne simili a quelle che usano i radioamatori, facilmente spostabili) e un'estrema semplificazione dell'elettronica e del software necessari per decodificare il segnale (Buonocore et al., 2005).

L'uso di questa tecnologia ha reso possibile l'osservazione simultanea di ampie regioni dell'oceano costiero, sopperendo a gran parte delle limitazioni legate all'uso della strumentazione tradizionale.

2.3 HF radar: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

I radar ad alta frequenza sono strumenti di telerilevamento utilizzati in campo oceanografico per misurare le correnti marine superficiali in ambienti costieri.

La dinamica delle acque costiere e la circolazione risultante sono dipendenti da molti meccanismi fisici ed interazioni che non possono essere compresi bene se non sono campionati con la necessaria risoluzione temporale e spaziale. Le tecniche di misura

convenzionali sono limitate all'osservazione nel tempo di un singolo punto (misure euleriane, danno un'informazione regolare nel tempo, ma limitata all'immediato intorno della posizione di misura) oppure alla ricostruzione della velocità lungo la traiettoria di strumenti derivanti che simulino le particelle di fluido (misure lagrangiane, danno informazioni distribuite all'interno della zona di interesse, ma la misura in posizioni diverse viene effettuata in tempi differenti).

In altre parole, le misure euleriane mancano di sinotticità spaziale, mentre quelle lagrangiane di regolarità temporale. A queste limitazioni è possibile ovviare, almeno in parte, con misure telerilevate, ossia effettuate da strumenti che si trovino ad una certa distanza dai punti di misura (generalmente montati su satelliti o su aerei), e che quindi siano in grado di inquadrare un'area di mare di una certa ampiezza con regolarità temporale. In questo ambito particolarmente interessanti risultano le potenzialità dei radar costieri in HF: si tratta di strumenti non installati su velivoli ma sulla costa, che misurano le correnti marine nel primo metro d'acqua su grigliati con risoluzioni che vanno da qualche chilometro a poche centinaia di metri e con una cadenza temporale oraria (Buonocore et al., 2005).

Il termine "radar" nasce come acronimo di Radio Detection And Ranging, e definisce un dispositivo che trasmette un segnale a radiofrequenza (tipicamente nell'intervallo delle microonde) verso un bersaglio che ne rileva l'eco riflessa; dal tempo impiegato dal segnale riflesso a raggiungere l'antenna è possibile calcolare la distanza del bersaglio. In un radar costiero il bersaglio è rappresentato dalle onde di gravità che si propagano sulla superficie del bacino costiero.

La riflessione o backscatter di energia elettromagnetica da parte della superficie del mare produce uno spettro di energia a livello del ricevitore. Molti strumenti, ed il radar tra questi, sfruttano un fenomeno di risonanza conosciuto come Bragg scattering (Figura 2.1); si tratta di una 'riflessione coerente' da parte della superficie del mare della radiazione trasmessa dallo strumento che avviene quando la lunghezza d'onda è esattamente la metà di quella dell'onda trasmessa dallo strumento. Questa 'riflessione coerente' si manifesta con un evidente picco nello spettro di riflessione (Crombie, 1955).

Lo spettro di riflessione contiene due evidenti picchi (picchi del primo ordine) prodotti dalla presenza delle onde di Bragg (Figura 2.2); il picco centrale corrisponde al segnale trasmesso. Poiché le onde non sono mai stazionarie, ma viaggiano radialmente avvicinandosi ed allontanandosi dal radar, il segnale riflesso ritorna ad una frequenza differente da quella trasmessa. In particolare, la frequenza aumenta per i treni d'onda in avvicinamento e diminuisce per quelli in allontanamento.

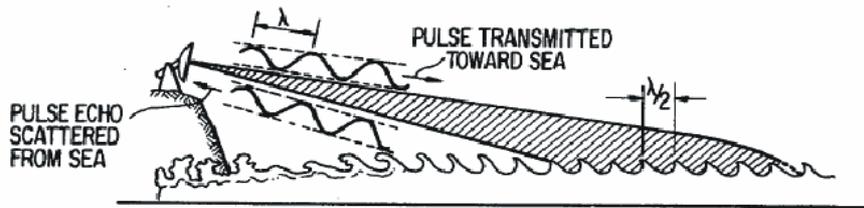


Figura 2.1 – Risonanza di Bragg da parte della superficie del mare (da Barrick et al., 1977).

La presenza della corrente genera uno spostamento Doppler addizionale (Paduan & Rosenfeld, 1996). Lo shift di frequenza dovuto alle onde di Bragg è noto, quindi ogni shift addizionale è attribuito al campo di correnti (Paduan & Graber, 1997).

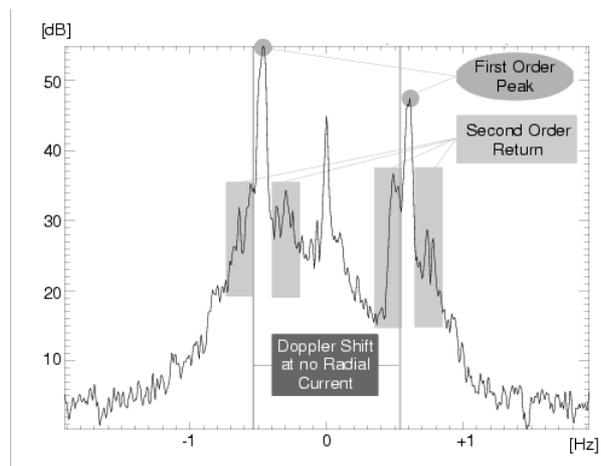


Figura 2.2 – Spettro di riflessione prodotto dalla superficie del mare.

La variazione di frequenza Δf è valutata dallo strumento e utilizzata per determinare la velocità radiale della corrente:

$$\Delta f = \frac{2v_r}{\lambda}$$

dove v_r è la componente radiale della velocità e λ è la lunghezza d'onda del segnale trasmesso.

Poiché un singolo sito radar è capace di determinare solo la componente radiale del flusso in avvicinamento o in allontanamento dalla stazione trasmittente, c'è bisogno di almeno due componenti radiali della velocità da due stazioni distinte per ottenere il vettore somma che fornisce la corrente superficiale totale (Figura 2.3).

Le correnti misurate dai radar in HF sono limitate ad uno strato assolutamente superficiale; poiché l'impulso radar è riflesso dalle onde oceaniche, la corrente derivante

rappresenta un integrale sulla profondità che è proporzionale alla lunghezza d'onda del radar (Paduan & Graber, 1997). Stewart and Joy (1974) affermano che tale profondità è $\sim d = \lambda/8\pi$.

Dallo spettro di riflessione di un radar ad alta frequenza è possibile trarre informazioni sulle onde e sul vento. La tecnica per studiare le onde è discussa da Wyatt (1997) e da Graber e Heron (1997), mentre il metodo per estrarre la direzione del vento è discussa da Fernandez et al. (1997). Sinteticamente, le informazioni sulle onde sono ottenute implementando un modello di riflessione di onde superficiali con i picchi del secondo ordine osservati dallo spettro in Figura 2.2. I picchi del secondo ordine sono causati dalla riflessione da parte delle onde a tutte le frequenze e non solo alla frequenza di Bragg. La direzione del vento è invece correlata al risultato del rapporto tra picco di Bragg in avvicinamento e quello in allontanamento rispetto alla stazione ricetrasmittente.

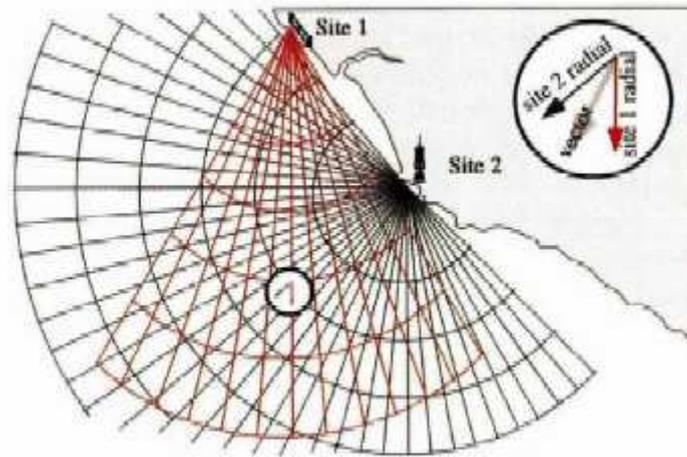


Figura 2.3 – Sovrapposizione di due campi radiali (Sito 1 e Sito 2) e stima del vettore totale.
(Paduan & Graber, 1997)

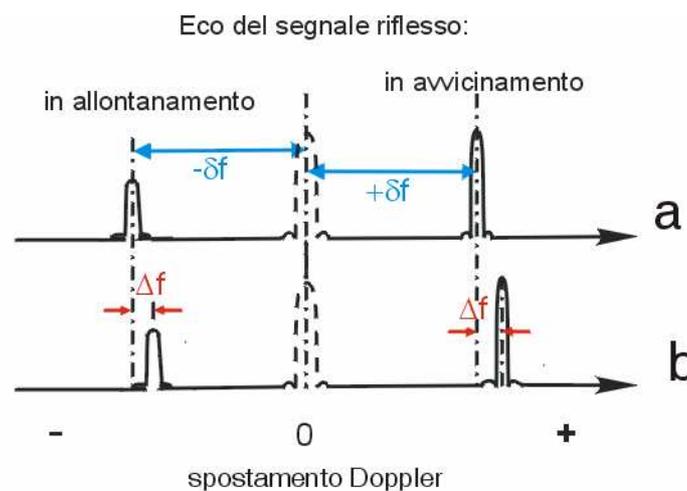


Figura 2.4 – Effetto Doppler dovuto alla propagazione delle onde e correnti superficiali. a) Spettro di riflessione nel caso in cui le onde sono stazionarie. b) Spostamento Doppler Δf dovuto alla presenza di una corrente superficiale in avvicinamento alla stazione ricetrasmittente.

2.4 IL SISTEMA INSTALLATO NEL GOLFO DI NAPOLI

La strumentazione utilizzata nel Golfo di Napoli è costituita da un sistema di SeaSonde prodotto dalla Codar Ocean Sensor; il CODAR (Coastal Ocean Dynamics Application

Radar) è un radar ad alta frequenza utilizzato per mappare le correnti superficiali in tempo reale. Le caratteristiche tecniche di un sistema SeaSonde sono riassunte in Tabella 1.

Il network è composto da due o più unità remote (Figura 2.5a) che misurano le componenti radiali delle correnti superficiali nell'area d'esame, e da una unità centrale, che provvede alla composizione dei vettori e alla produzione delle relative mappe. Nel caso del Golfo di Napoli, l'unità centrale si trova presso il Dipartimento di Scienze per l'Ambiente dell'Università Parthenope (Figura 2.6b), mentre le due antenne che compongono il sistema sono state installate a Portici e a Massa Lubrense (Figura 2.6c, d); entrambi i siti remoti comunicano con l'unità centrale tramite la rete internet.

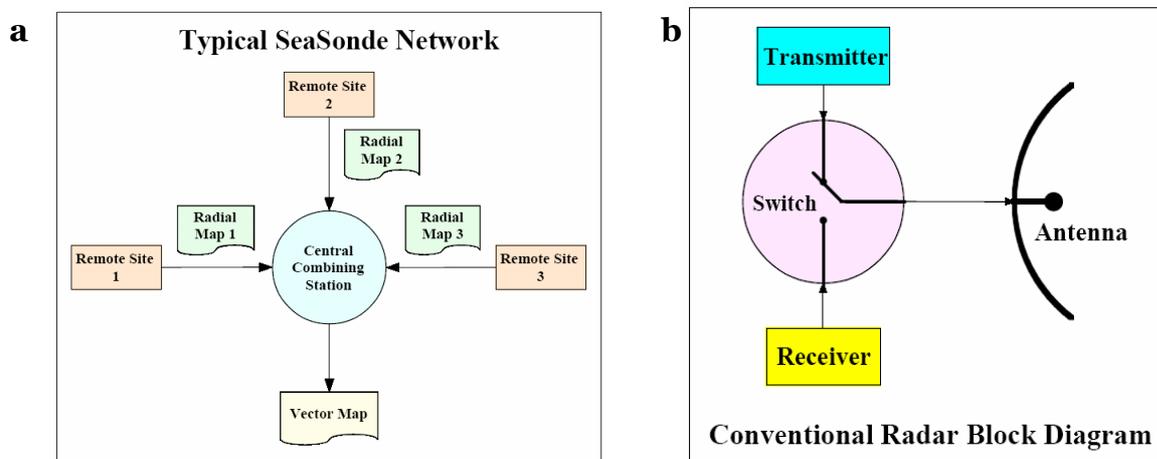


Figura 2.5 – a) Tipico sistema radar costituito da diversi siti remoti e un sito centrale che raccoglie i radiali e crea i campi di velocità totale. b) Attrezzatura di ogni sito remoto.

Ogni sito remoto è costituito da un'antenna (Figura 2.5b), in grado sia di trasmettere che di ricevere il segnale, e da una piccola infrastruttura per il ricovero dell'attrezzatura elettronica e che contiene un computer Macintosh, utilizzato per il trattamento del segnale entrante, un trasmettitore ed un ricevitore.

La frequenza del segnale trasmesso da ogni antenna è di 25 Mhz corrispondente ad una lunghezza d'onda (λ) di 12 m (vede onde marine con λ pari a 6 m), la portata è di 30 Km e la risoluzione di 1250 m; la distanza tra le due antenne è di circa 20 Km.

La scelta dei siti si è rivelata un'operazione non semplice in quanto esistono una serie di condizioni da soddisfare:

- le antenne devono essere installate in prossimità dell'acqua, per evitare perdite di potenza nel percorso su terra;
- la visibilità della zona di mare di interesse deve essere libera da impedimenti;
- poiché la trasmissione non è direzionale, l'area intorno alle antenne a 360° deve essere priva di ostacoli (in particolare metallici) che rischierebbero di causare distorsioni del segnale; per le stesse ragioni anche la presenza di una parete rocciosa alle spalle dell'antenna è da evitare, in quanto potrebbe provocare effetti di riflessione spuria.

La Figura 2.6a mostra la collocazione dei due siti remoti nonché la copertura del sistema installato nel Golfo di Napoli. E' possibile notare che la regione ad est della congiungente tra le due stazioni è priva di copertura; lungo la linea di base i due radar misurano quasi la stessa componente della velocità quindi non è possibile ottenere un vettore velocità totale. In genere i due radiali devono avere un angolo compreso tra 30° e 150° per poter calcolare il vettore corrente. Utilizzando tecniche di interpolazione, lo strumento è in grado di estrapolare l'andamento del campo di correnti anche nel Golfo di Castellammare.

La copertura prodotta da ogni singola antenna è rappresentata nelle Figure 2.7 e 2.8. Esse mostrano lo spettro di densità dei dati in un giorno; il massimo della densità è pari a 24, cioè una misura per ogni ora, ed è rappresentata dalle aree di colore più scuro, mentre quelle di colore chiaro corrispondono ad una minore densità dei dati.

Un esempio di mappa di correnti prodotta dal CODAR è rappresentata in Figura 2.8.

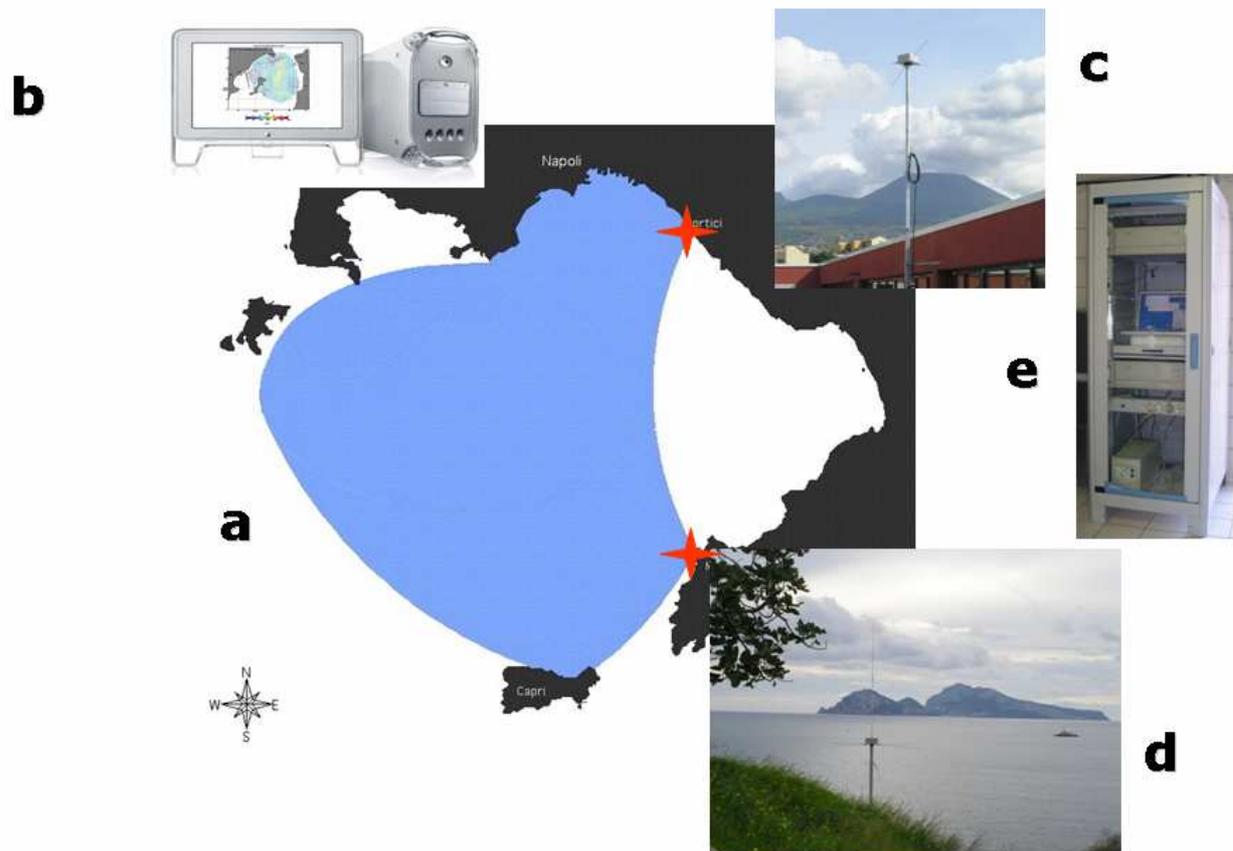


Figura 2.6 – a) Copertura CODAR nel Golfo di Napoli. b) Stazione master per l’acquisizione dei dati. c) Antenna ricetrasmittente installata nel sito di Portici. d) Antenna ricetrasmittente installata nel sito di Massa Lubrense. e) Rack contenente l’attrezzatura elettronica.

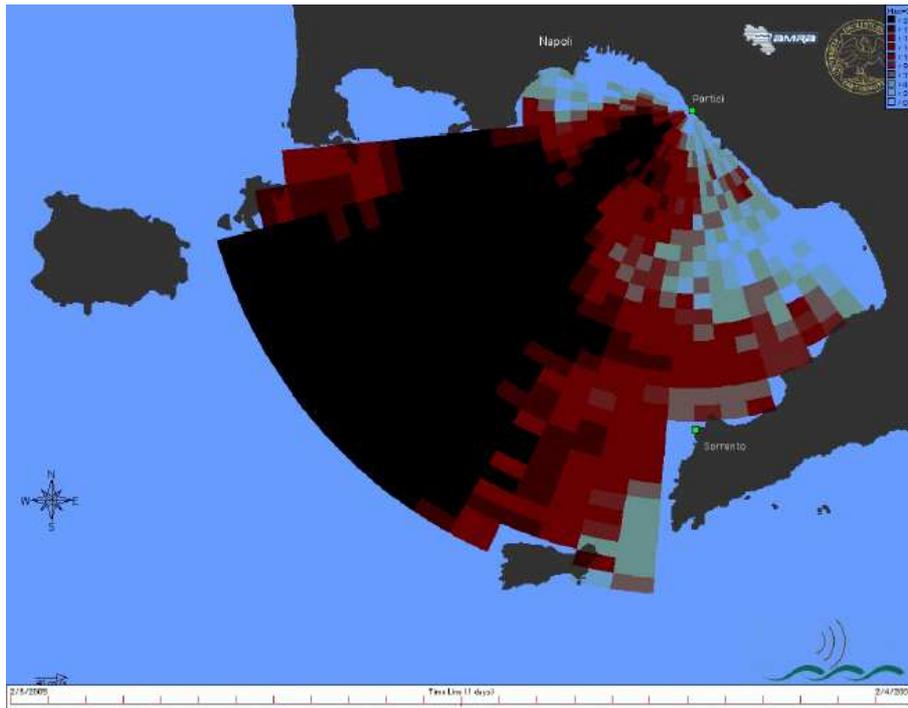


Figura 2.7 – Copertura del CODAR installato nel sito di Portici.

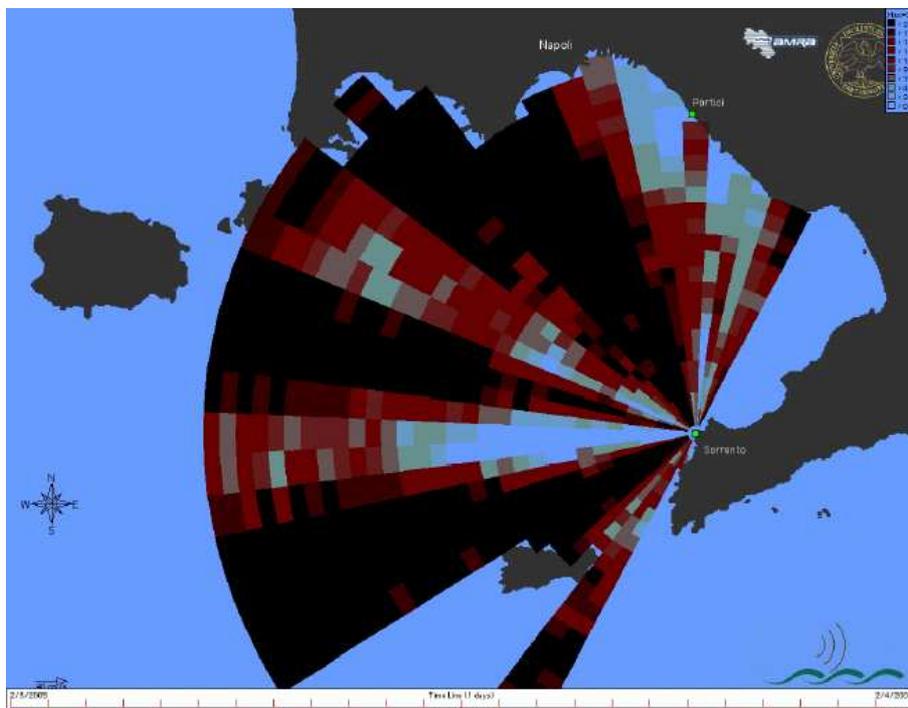


Figura 2.7 – Copertura del CODAR installato nel sito di Massa Lubrense.

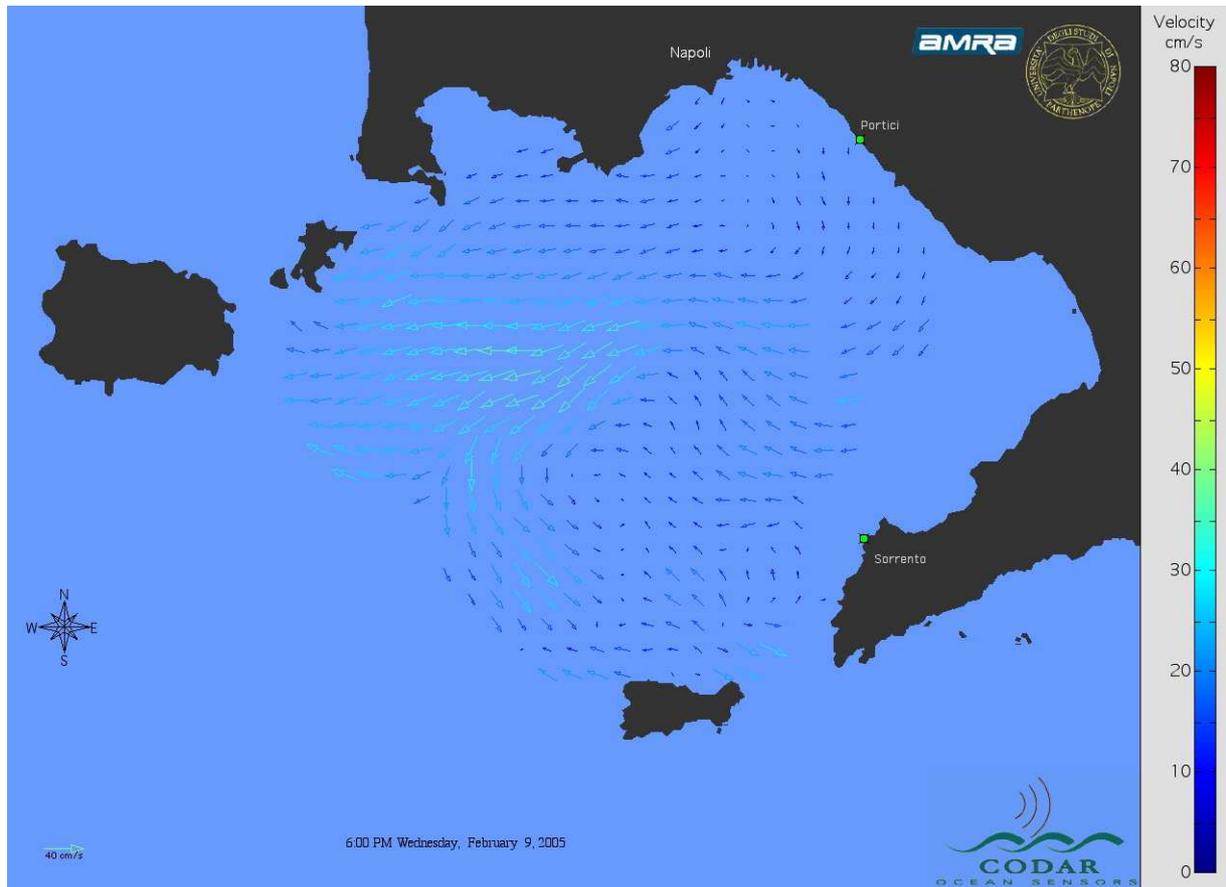


Figura 2.8 – Esempio di campo di velocità totale prodotto dal CODAR.

Tabella 1.

<p>SeaSonde System Specification</p> <p>Output Radiated Power: 80 watts peak, 40 watts average</p> <p>Operating Frequency Range: one of either 24-27 MHz or 40-44 MHz.</p> <p>Modulation Format: Pulsed Swept Frequency, Pulse Width: 120-240 μs</p> <p>Pulse Repetition Frequency: 4- 8 kHz Duty Factor: 50% Sweep Width: 150- 500 kHz (typical)</p> <p>Sweep Repetition Frequency: 4 Hz Total</p> <p>Radiated Signal Bandwidth: (at - 20 dB level) 160 - 510 kHz</p> <p>Polarization: vertical</p> <p>Transmit/Receive Antenna: SSRA 100-TR</p> <p>Design: passive vertical momopole, two crossed loops in two preamplifiers</p> <p>Transmitter: SSTX 100-TR</p> <p>Output RF Power Level: 100 watts peak</p> <p>Input RF Drive Level: 0 dBm</p> <p>Receiver: SSRX 100-TR</p> <p>Maximum In-band Input Level: +13 dBm (no damage)</p> <p>Impedance: 50 ohm</p> <p>Sensitivity: (noise level) -160 dBm in 1 Hz BW</p> <p>Output Surface Current Specifications</p> <p>Surface Currents: Maps of surface current vectors created from data taken at two radar sites 10-20km apart.</p> <p>Map Displays: color monitor screen, laser-quality hardcopy, archived ASCII vector files</p> <p>Map Spatial Resolution: (vectors on square grid) 500 x 500 m typical spacing</p> <p>Map Area Coverage: 20 -30 km alongshore x 15- 20 km offshore</p> <p>Map Temporal Interval: hourly; currents averaged over one hour typically</p> <p>Map Vector Accuracies: (rms; typical for normal environmental speed: < 7 cm/s conditions, i.e., noise/interference, siting, sea state), direction: < 10 deg. Note: Wave and wind outputs are not available in this band.</p> <p>Data Communications:</p> <p>Automatic modem transfer of current and wave data products supported by software for dial-up lines and ethernet connections (recommended).</p>
--

Capitolo 3 : Dati Utilizzati

INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi è stato realizzato utilizzando dati di correnti superficiali ottenuti dal sistema radar ad alta frequenza (CODAR), l'intensità locale del vento, registrata da alcune stazioni meteorologiche localizzate lungo le coste del Golfo, e dati di vento a scala di bacino prodotti da un modello di circolazione atmosferica (ECMWF).

La localizzazione delle diverse sorgenti di dati è rappresentata in Figura 3.1 : in nero le stazioni meteorologiche ed il punto di griglia ECMWF, in rosso i due siti remoti del sistema CODAR, in blu punti della alla griglia CODAR di cui si sono usate le serie temporali, in varie fasi del lavoro, per ottenere confronti e correlazioni con le serie temporali del vento.

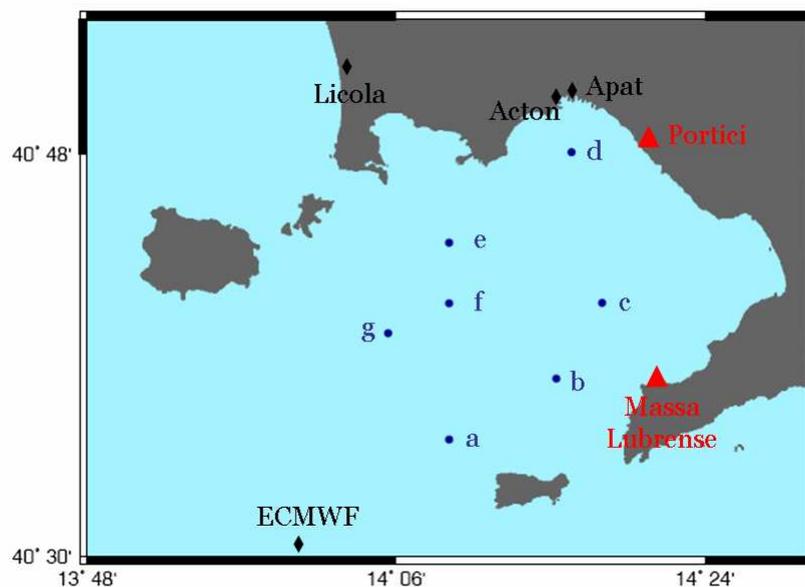


Figura 3.1 – Area di studio. Localizzazione dei siti radar (▲); localizzazione delle stazioni meteorologiche e del punto di griglia ECMWF (♦); punti di griglia CODAR utilizzati per l'analisi delle serie temporali (●).

I periodi presi in esame per ogni data set sono rappresentate in Figura 3.2.

In una prima fase del lavoro si sono caratterizzati i regimi di vento prevalenti nel Golfo di Napoli attraverso l'analisi di serie temporali di 5 anni (2002-2006) che includono misure puntuali (Apat, Acton e Licola in Figura 3.1) e a scala di bacino (dati da modello; ECMWF in Figura 3.1) (Capitolo 4).

Conoscendo i pattern di vento più ricorrenti è stato possibile andare a ricercare queste caratteristiche dominanti nei dati meteorologici che si sovrappongono con i periodi di dati radar disponibili (Capitolo 5). I campi di velocità totale CODAR dotati di una buona copertura spaziale e temporale sono limitati a pochi mesi e non permettono di avere informazioni sulla variabilità stagionale delle correnti. Il sistema è andato incontro ad una serie di problemi tecnici di varia natura, tutti riconducibili al sito di Massa Lubrense, che in sostanza ha funzionato a singhiozzo e ha fornito per lunghi periodi radiali inutilizzabili caratterizzati da coperture troppo modeste dell'area in esame.

Nonostante questa limitazione, dall'analisi dei dati disponibili emergono molti aspetti interessanti della circolazione a breve termine nel Golfo di Napoli.

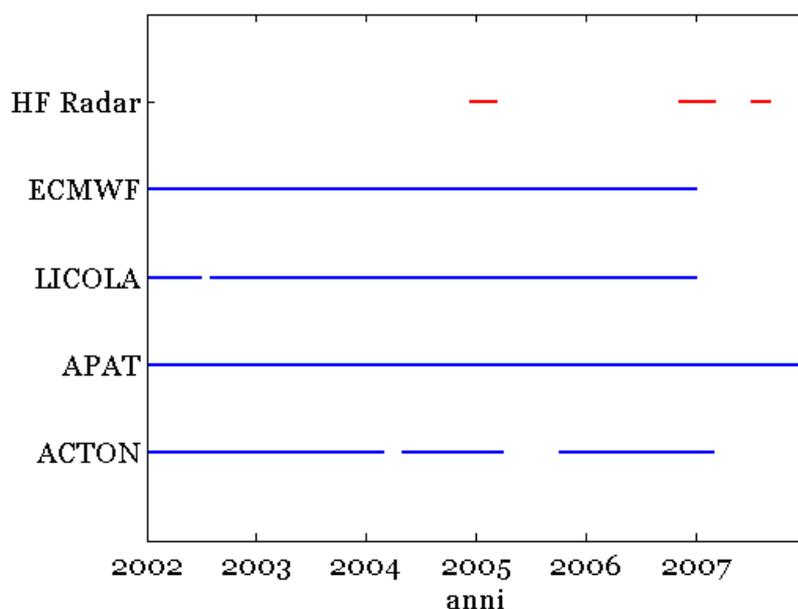


Figura 3.2 – Periodi analizzati per ogni sorgente di dati.

3.2 PRIME OSSERVAZIONI

Tutti i periodi di dati CODAR disponibili sono rappresentati nelle Figure 3.3 - 3.8. Le serie temporali di dati corrente, nei punti in Figura 3.1, riprodotte tramite diagrammi a stick, sono messe a confronto con il vento registrato da una delle stazioni interne al Golfo.

Le correnti evidenziano una forte variabilità sia spaziale che temporale, ma un andamento in direzione generalmente concorde con quello del vento locale.

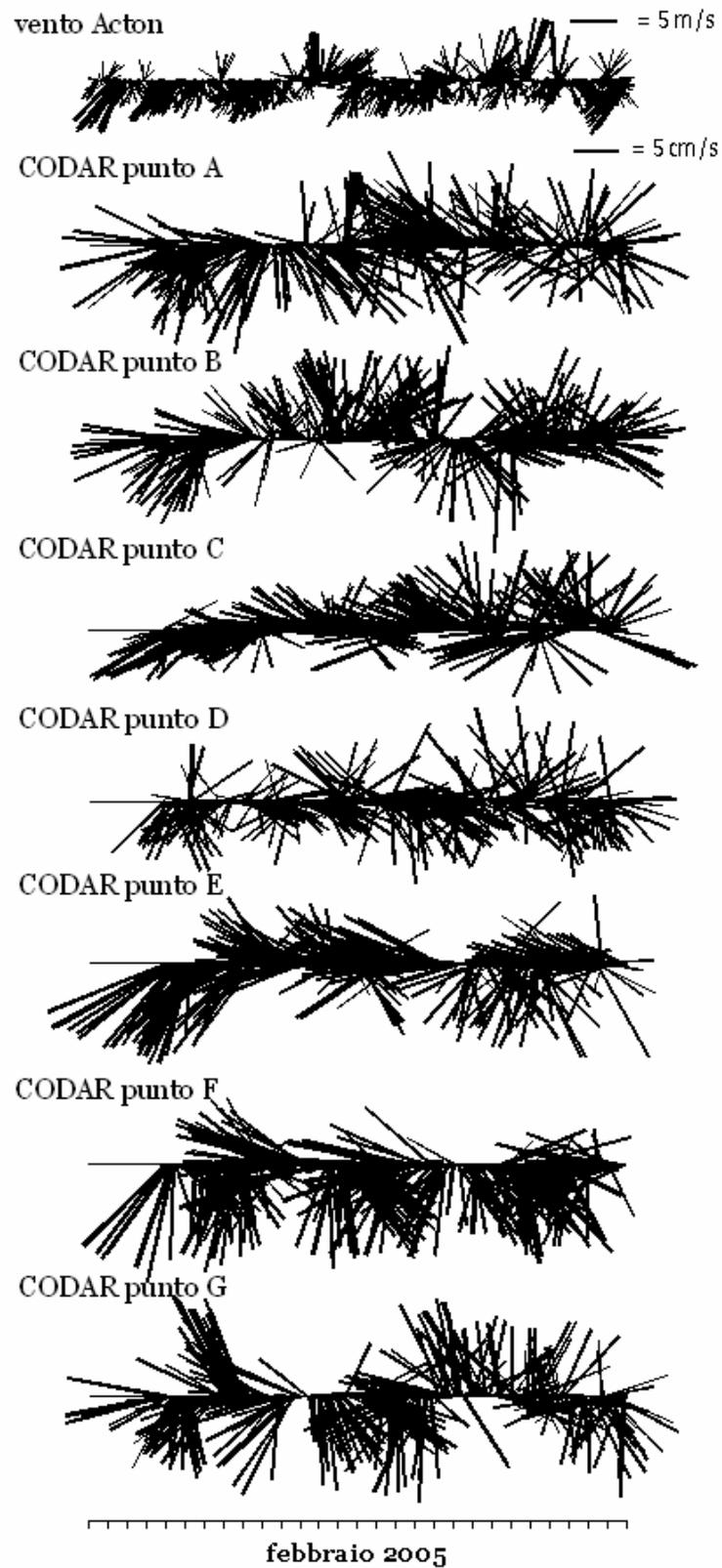


Figura 3.3 – Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Acton e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di febbraio 2005.

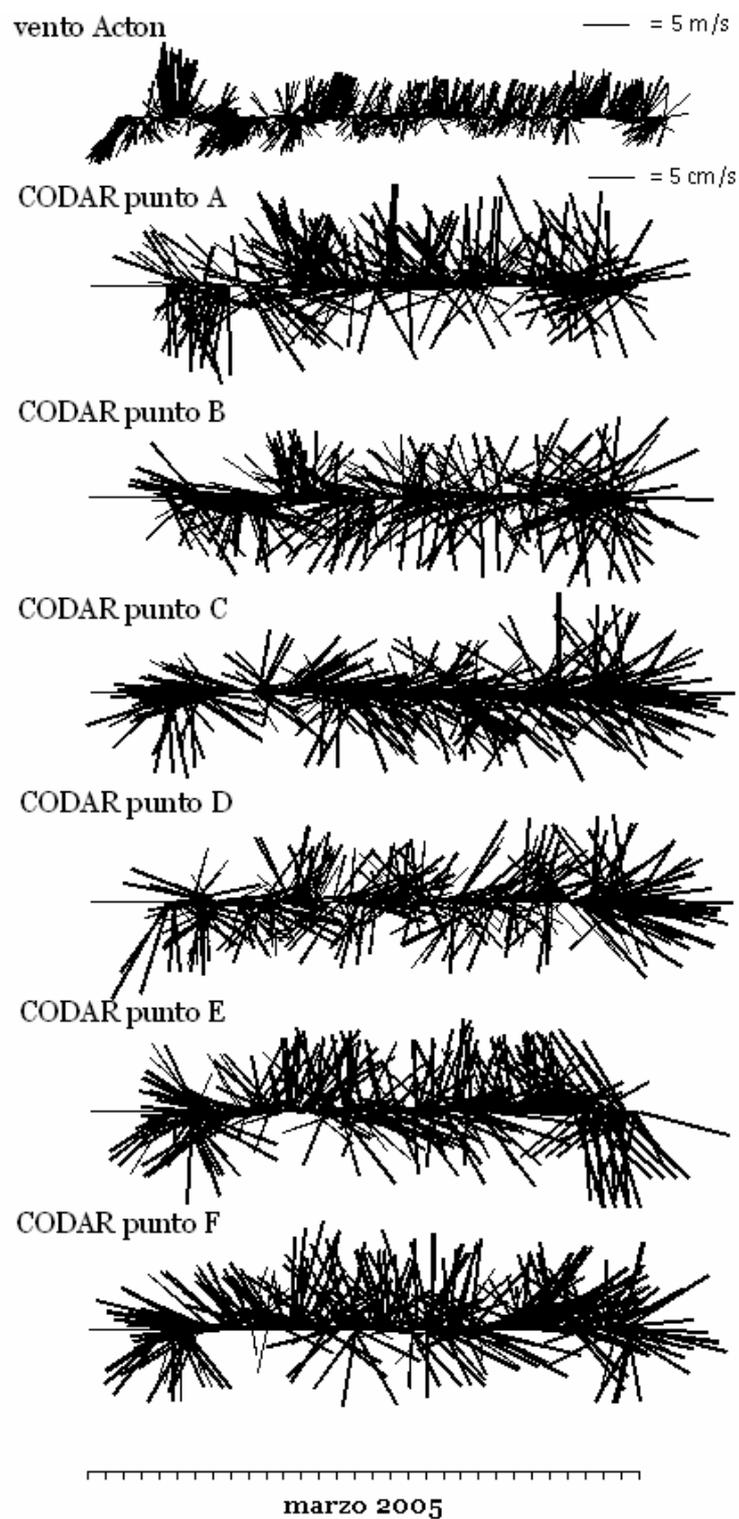


Figura 3.4 – Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Acton e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di marzo 2005.

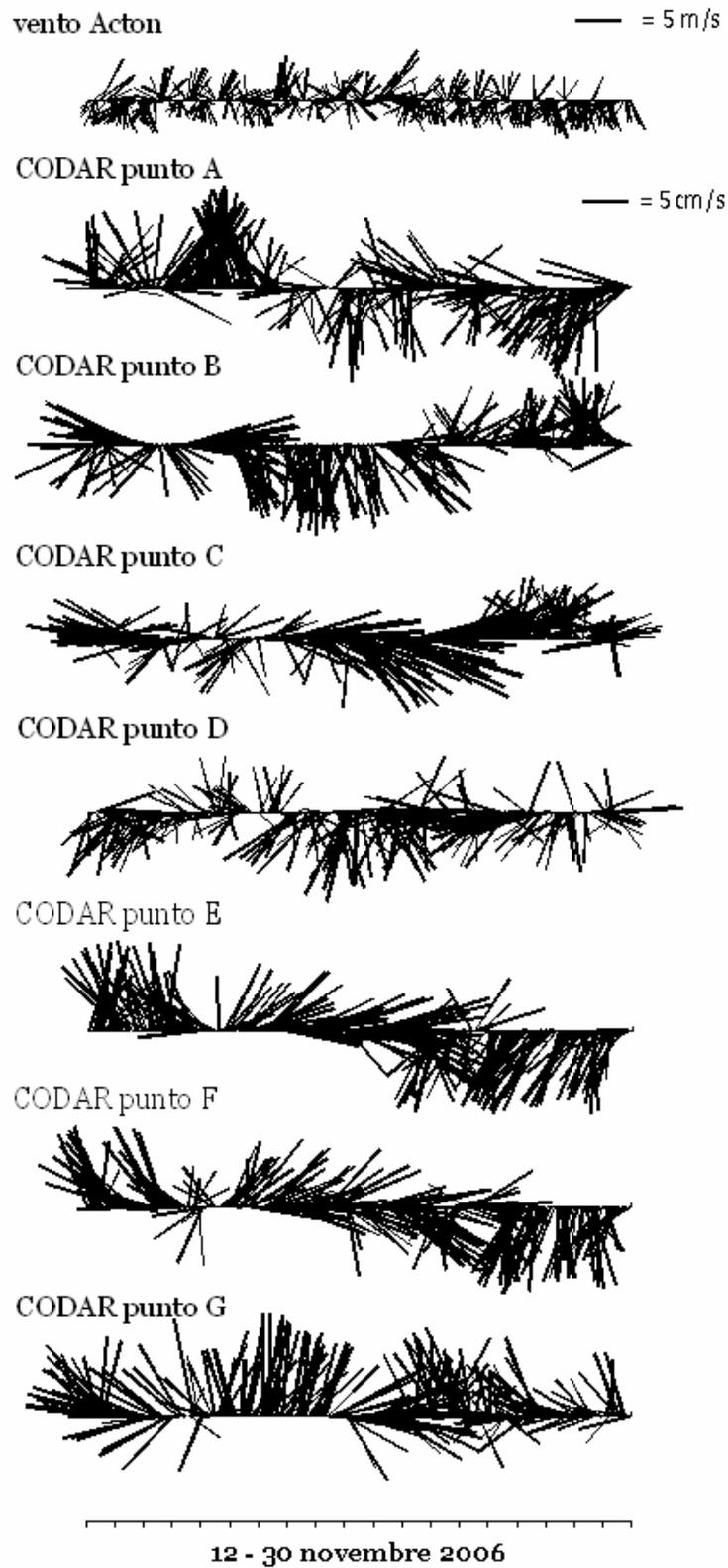


Figura 3.5 – Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Acton e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di novembre 2006.

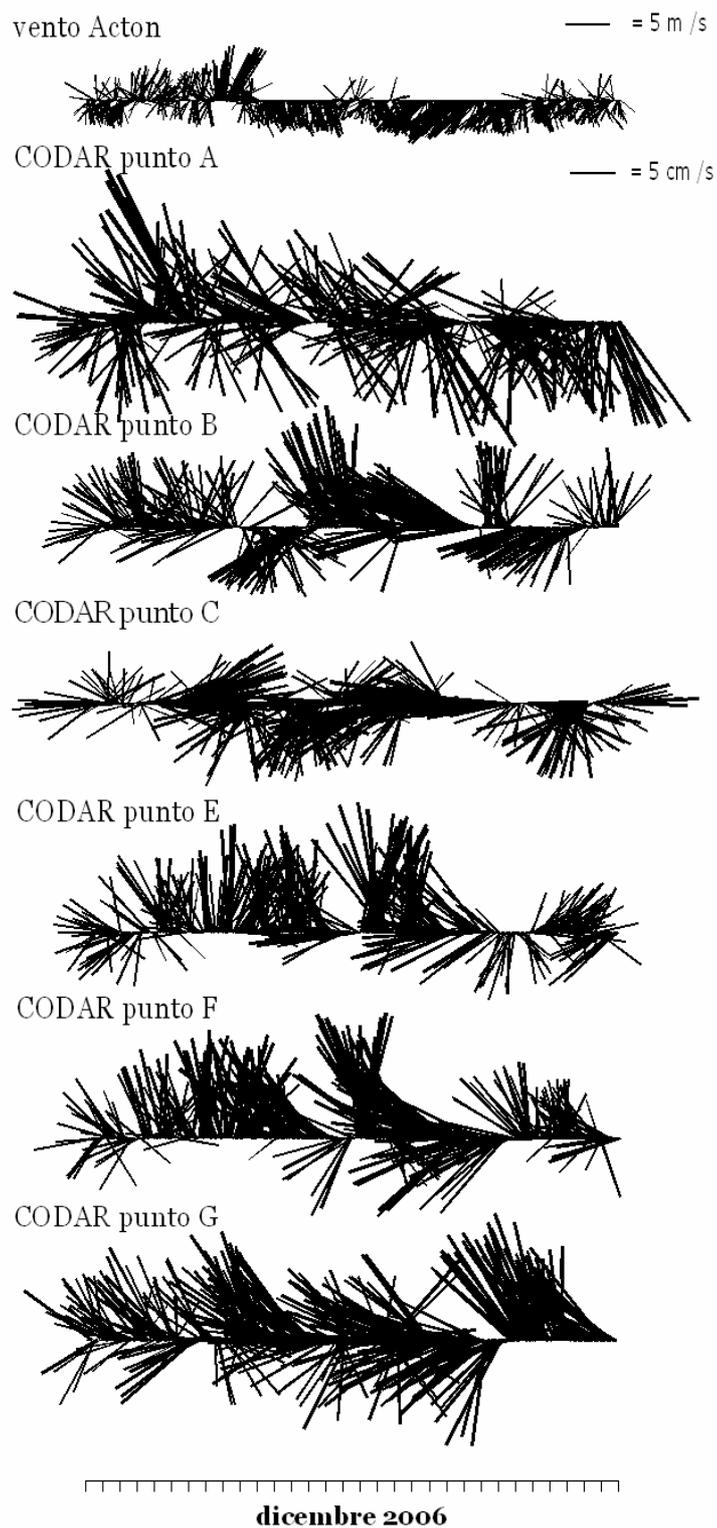


Figura 3.6 – Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Acton e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di dicembre 2006.

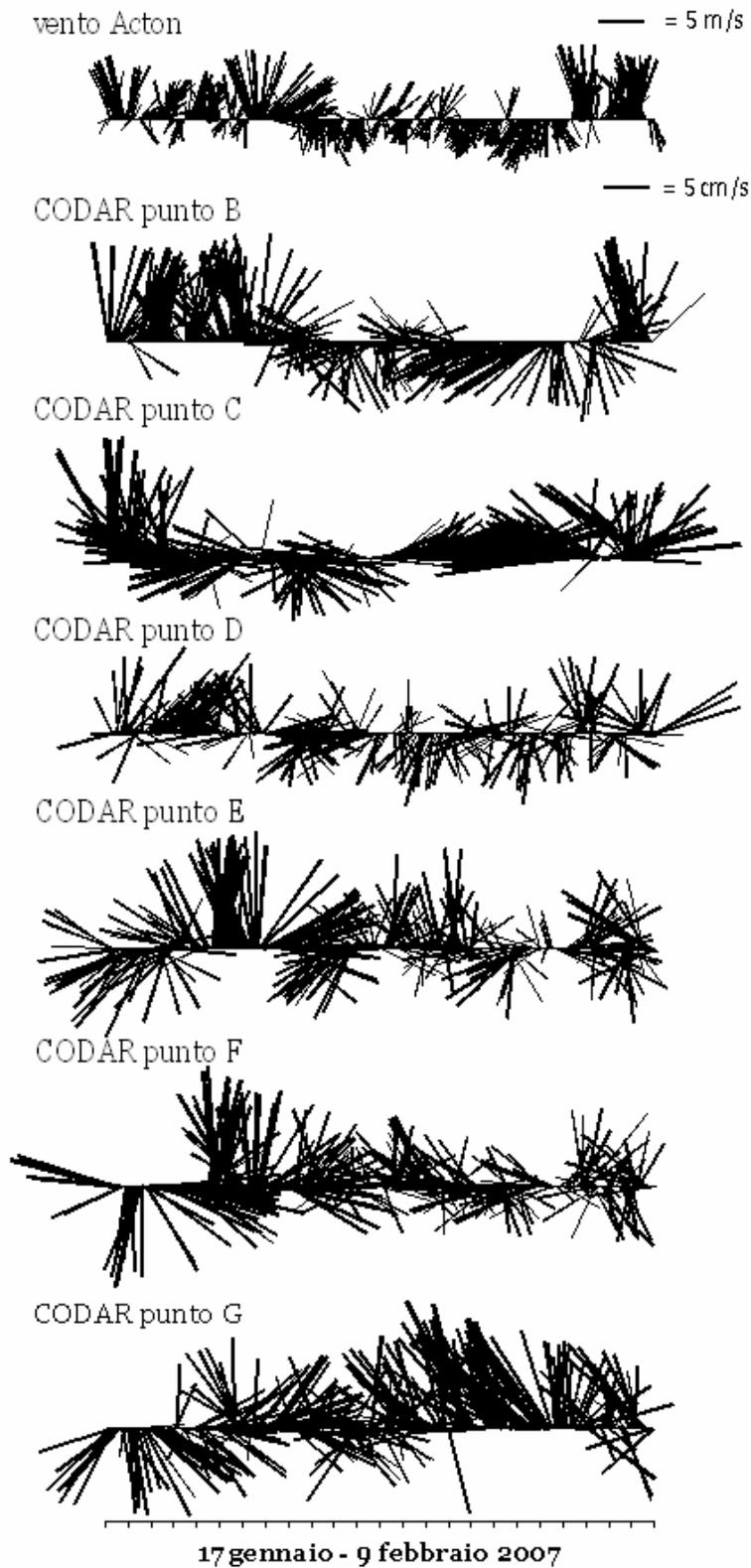


Figura 3.7– Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Acton e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di gennaio-febbraio 2007.

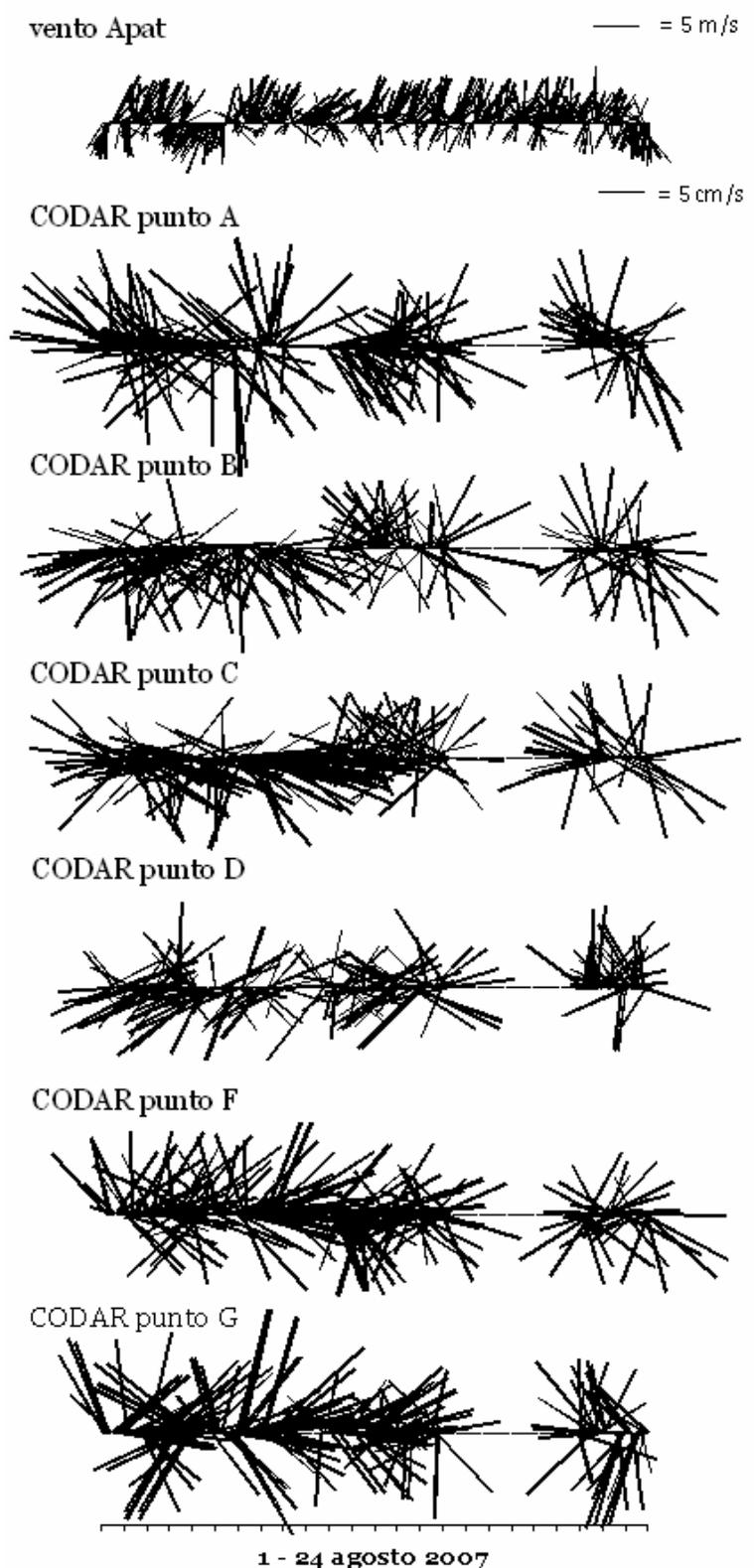


Figura 3.8 – Diagrammi a stick del vento registrato dalla stazione meteorologica Apat e delle correnti CODAR nei punti in Figura 3.1 per il periodo di agosto 2007.

Capitolo 4: **Analisi dei venti nel Golfo di Napoli**

INTRODUZIONE

Il vento è il principale forzante per la circolazione marina superficiale. Nei bacini costieri le masse d'acqua superficiali rispondono all'azione del forzante locale formando strutture tipiche fortemente correlate alle variazioni di direzione ed intensità dei campi di vento.

Il vento è stato da più lavori (Moretti et al, 1977; De Maio et al., 1985; Gravili et al., 2001) identificato come la principale causa di variabilità spaziale e temporale della circolazione superficiale nel Golfo di Napoli. Per questo motivo, risulta indispensabile effettuare una caratterizzazione del clima meteorologico dell'area in esame, allo scopo di poter riconoscere ed inquadrare le dinamiche superficiali delle masse d'acqua legate alle condizioni di vento più ricorrenti.

Il data-set utilizzato prende in esame cinque anni (2002-2006) di dati misurati in situ a cui sono stati aggiunti cinque anni (2002-2006) di dati diagnostici prodotti da un modello di circolazione generale dell'atmosfera.

4.5 L'AREA DEL GOLFO di NAPOLI E I SITI DI OSSERVAZIONE

Il data set è costituito da misurazioni effettuate da due stazioni meteorologiche localizzate nell'area urbana della città di Napoli (Apat e Acton in Figura 4.1) e da una terza stazione localizzata a nord del Golfo di Napoli lungo il litorale Domizio (Licola in Figura 4.1).

Le stazioni Acton (latitudine 40°50.19' NORD, longitudine 14°15.21' EST, altezza capannina meteo: 11 m s.l.m.; altezza sensori anemometrici: 16 m s.l.m.) e Licola (latitudine 40°52.618' NORD, longitudine 14°02.954' EST; altezza sensori anemometrici: 12 m s.l.m.) fanno parte della rete di monitoraggio gestita dal Dipartimento di Scienze per l'Ambiente dell'Università "Parthenope" di Napoli (Figura 1.9). La stazione Apat è situata nel porto di Napoli presso il molo Carmine (latitudine: 40° 50' 23" NORD, longitudine: 14° 16' 09" EST velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo), ed è gestita dall'APAT

(Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici); i dati relativi a questa stazione sono disponibili sul sito internet www.idromare.com.

Le due stazioni interne al Golfo (Apat e Acton in Figura 4.1) risultano fortemente riparate dai venti provenienti dai quadranti occidentali poiché, la collina di Posillipo e il promontorio che chiude ad ovest il Golfo di Pozzuoli fanno da barriera orografica.

Per questo motivo si è scelto di prendere in considerazione anche i dati provenienti da una terza stazione, Licola, che si trova in un' area prossima al mare e priva di ostacoli orografici.

Il data set è stato completato con dati da modello relativi ad un punto di griglia ECMWF (coordinate 40°30' latitudine NORD, 14°00' longitudine EST), scelto per ottenere un confronto tra i risultati di misure puntuali e le caratteristiche del vento a scala di bacino.

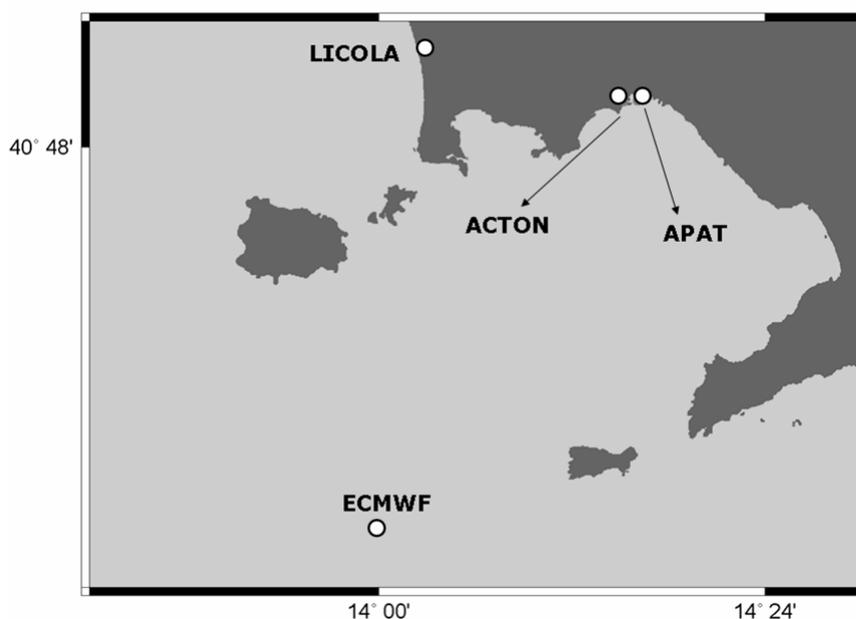


Figura 4.1 – Localizzazione dei siti presi in esame.

4.6 ANALISI STATISTICHE

Il grado di “confrontabilità” delle diverse serie temporali che compongono il data-set è stato valutato attraverso la rappresentazione con i box-plot, diagrammi che mostrano graficamente la posizione dei quartili, mediana e outlier di una distribuzione.

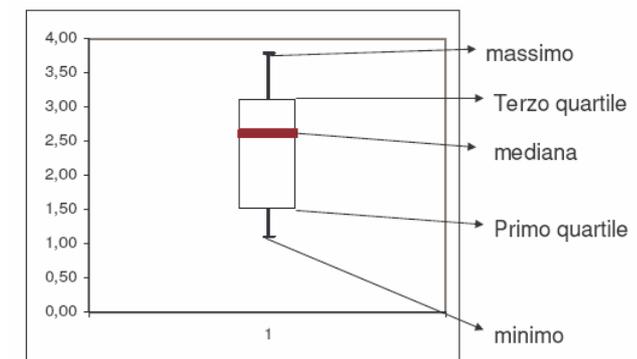


Figura 4.2 – Schema generale della rappresentazione con box-plot.

Il rettangolo al centro in Figura 4.2 contiene il 50% centrale della distribuzione, gli estremi del rettangolo sono il primo e il terzo quartile, e la linea che taglia il rettangolo è la mediana. Le due righe che partono dal box centrale vengono chiamati baffi e corrispondono ai valori distanti 1,5 volte la distanza interquartile a partire rispettivamente dal primo dal terzo quartile. I valori che fuoriescono dai baffi (outlier) vengono rappresentati come punti isolati.

Per ogni famiglia di valori il grafico in questione permette di evidenziare la misura della **dispersione**, la presenza di eventuali **valori anomali** (outliers) e la **simmetria** o **asimmetria** della distribuzione.

La misura della dispersione della distribuzione è data dalla distanza tra il terzo ed il primo quartile, *Distanza interquartilica*. Il 50% delle osservazioni si trovano comprese tra questi due valori. Se l'intervallo interquartilico è piccolo, la metà delle osservazioni si trova fortemente concentrata intorno alla mediana; all'aumentare della distanza interquartilica aumenta la dispersione del 50% delle osservazioni centrali intorno alla mediana.

Le distanze tra ciascun quartile e la mediana forniscono informazioni relativamente alla forma della distribuzione. Se la distanza è uguale, allora la distribuzione è simmetrica e la media aritmetica coincide con la mediana; se una distanza è diversa dall'altra allora la distribuzione è asimmetrica, la media aritmetica è minore o maggiore della mediana a seconda che si tratti di asimmetria negativa o positiva, rispettivamente.

I box plot risultano utili per comparare due o più distribuzioni di valori. Nel nostro caso sono stati usati per comparare famiglie di dati, corrispondenti ad un anno di misure, per ogni sito in esame.

Le Figure 4.3 e 4.4 mostrano, rispettivamente, i box-plot relativi alle intensità e alle direzioni del vento misurato nelle 3 stazioni meteorologiche e nel punto di griglia ECMWF, per gli anni che vanno dal 2002 al 2006.

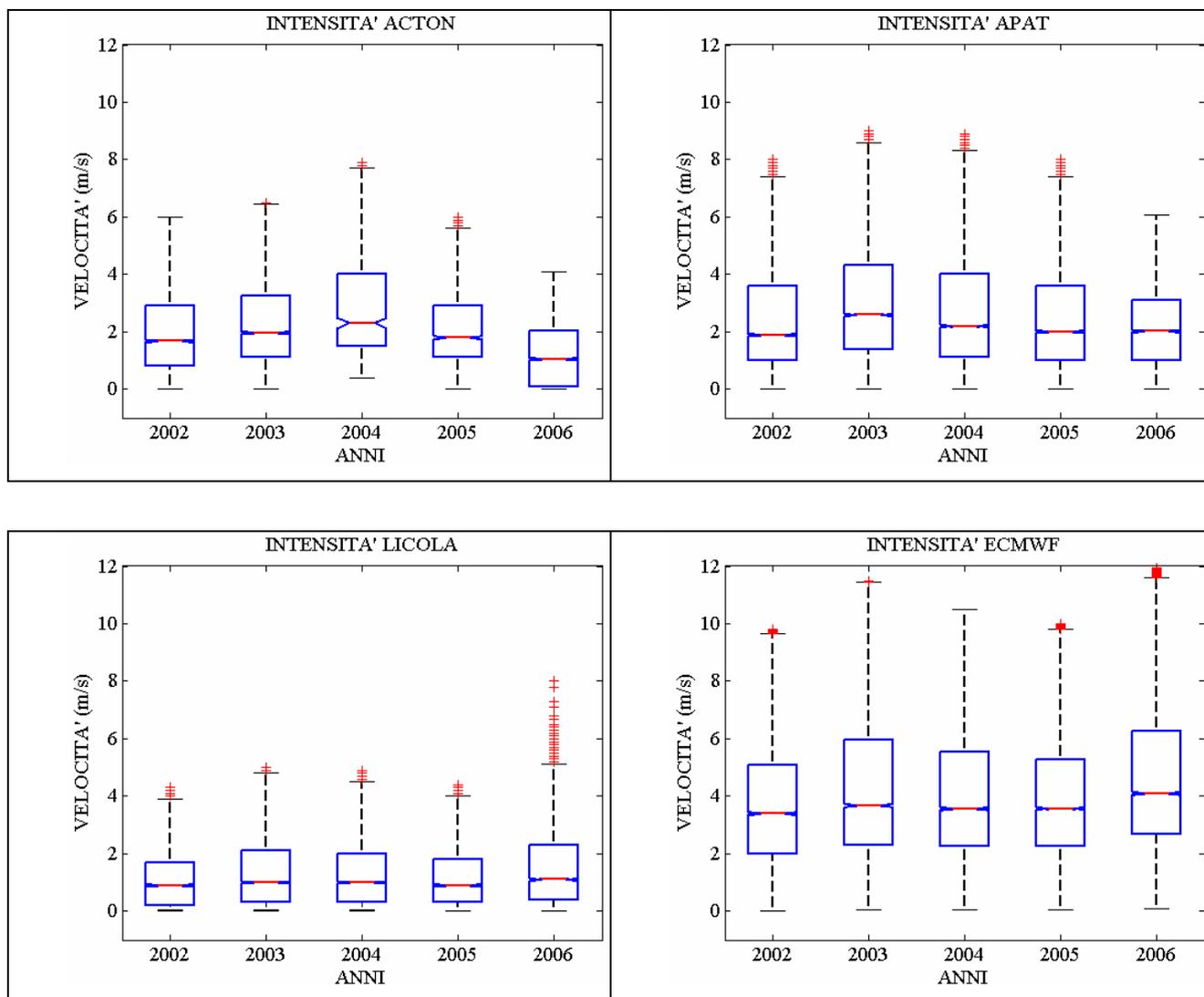


Figura 4.3 – Box-plot delle intensità del vento per gli anni 2002-2005 relativi alle stazioni di Acton, Apat, Licola ed ECMWF.

La Figura 4.3 evidenzia per tutte le stazioni che i diversi anni di dati sono statisticamente confrontabili. La dispersione dei dati è maggiore per gli anni 2003 e 2004 e l'asimmetria è praticamente sempre positiva.

La Figura 4.4 conferma la confrontabilità dei dati anche in termini di direzioni. Le uniche anomalie si ritrovano per le stazioni Acton nel 2004 e Licola nel 2006, in cui il valore della mediana è nettamente inferiore rispetto agli anni precedenti e successivi. Si tratta di anni in cui i dati presentano numerosi buchi nei periodi estivi, quindi sul calcolo

della mediana incidono maggiormente i valori di direzione registrati nei periodi invernali (quadrante NE).

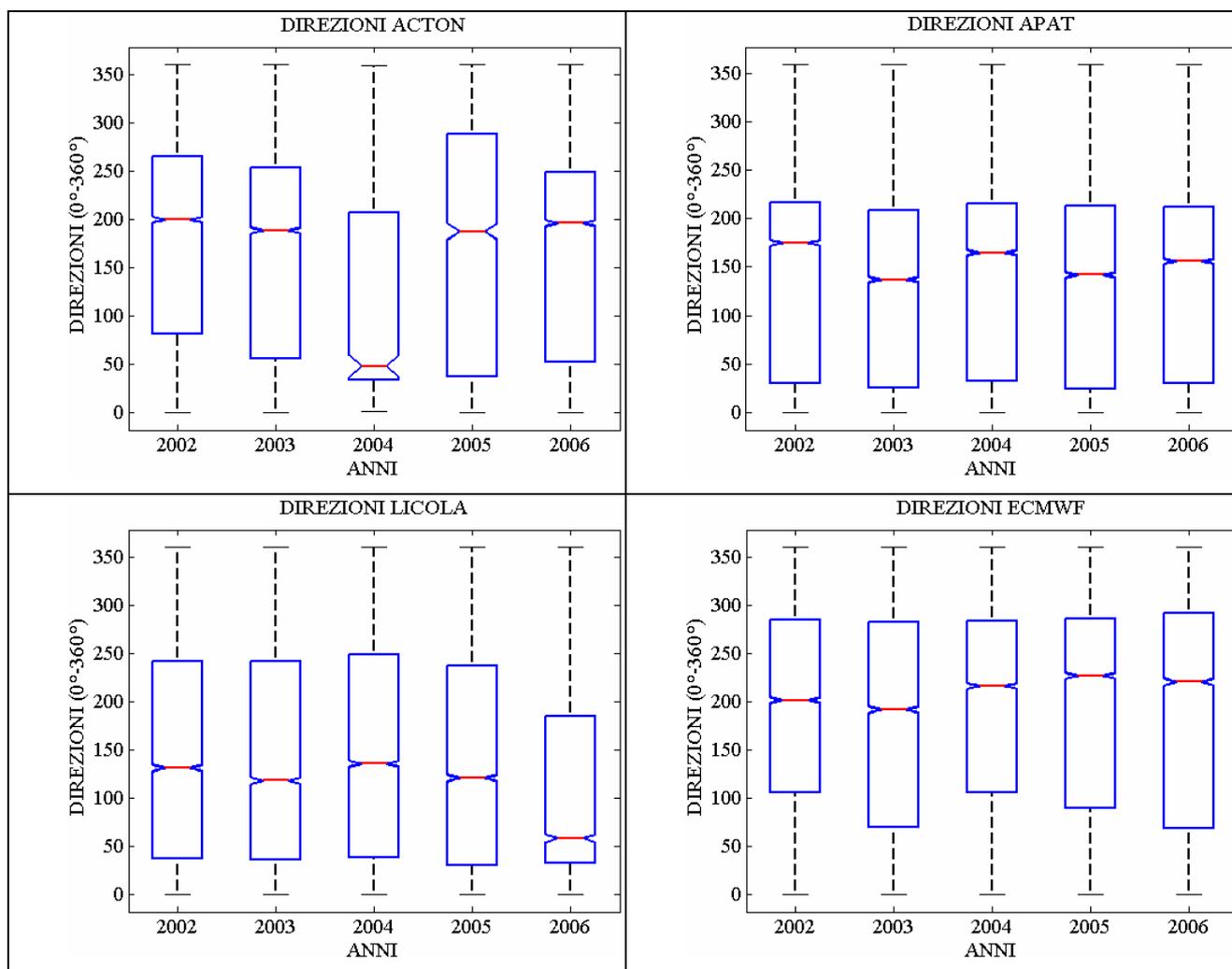


Figura 4.4 – Box-plot delle direzioni del vento per gli anni 2002-2005 relativi alle stazioni di Acton, Apat, Licola e per il punto di griglia ECMWF.

4.7 ANALISI INTERANNUALE

La Figura 4.5 mostra i diagrammi a rosa realizzati per i siti in esame a partire da serie temporali di durata quinquennale (2002 - 2006).

In questi diagrammi tutte le possibili direzioni di provenienza dei venti sono suddivise in 16 settori ciascuno da 22.5 gradi; la lunghezza di ogni bin indica la frequenza in percentuale di venti in quella direzione, mentre i diversi colori indicano la frequenza in percentuale di venti con una data intensità.

Le due stazioni meteorologiche, interne al Golfo di Napoli, evidenziano una netta predominanza di venti provenienti dai quadranti NE e SW; il vento a scala di bacino

(ECMWF) è in accordo con la stazione meteorologica di Licola e presenta le stesse caratteristiche delle stazioni interne, per quanto concerne il quadrante NE, ma non mostra contributi significativi da parte di venti dal quadrante SW. Le frequenze più importanti sono concentrate a W, W-SW e W-NW. In sostanza, le stazioni interne al Golfo risultano fortemente schermate dai venti provenienti dai quadranti occidentali a causa di ostacoli orografici (Figura 4.1).

I venti ECMWF mostrano intensità maggiori di quelle registrate dalle tre stazioni meteorologiche localizzate sulla terraferma. Questa discrepanza è evidenziata anche in altri lavori che mettono a confronto dati osservati con dati da modello ECMWF (ad esempio Escoffier e Provost, 1995) .

I venti si distribuiscono nel corso degli anni come rappresentato nelle Figure 4.6 - 4.10; i diagrammi a stick riportano direzione ed intensità del vento con periodo di 20 ore per la stazione Apat e per il punto di griglia ECMWF (anni 2002-2006). I dati ECMWF, disponibili solo alle ore sinottiche (00:00, 06:00, 12:00, 18:00), sono stati interpolati per ottenere serie temporali orarie, confrontabili con Apat.

Gli stick della stazione interna al Golfo (Apat) evidenziano a gennaio e febbraio una prevalenza di venti dal quadrante NE, elevata variabilità tra marzo e ottobre con venti che si alternano dal quadrante NE e dal quadrante SW, ed eventi particolarmente intensi concentrati nei mesi di novembre e dicembre. Per i venti a scala di bacino è evidente una maggior frequenza dai quadranti occidentali; le intensità maggiori si raggiungono durante i mesi invernali e autunnali.

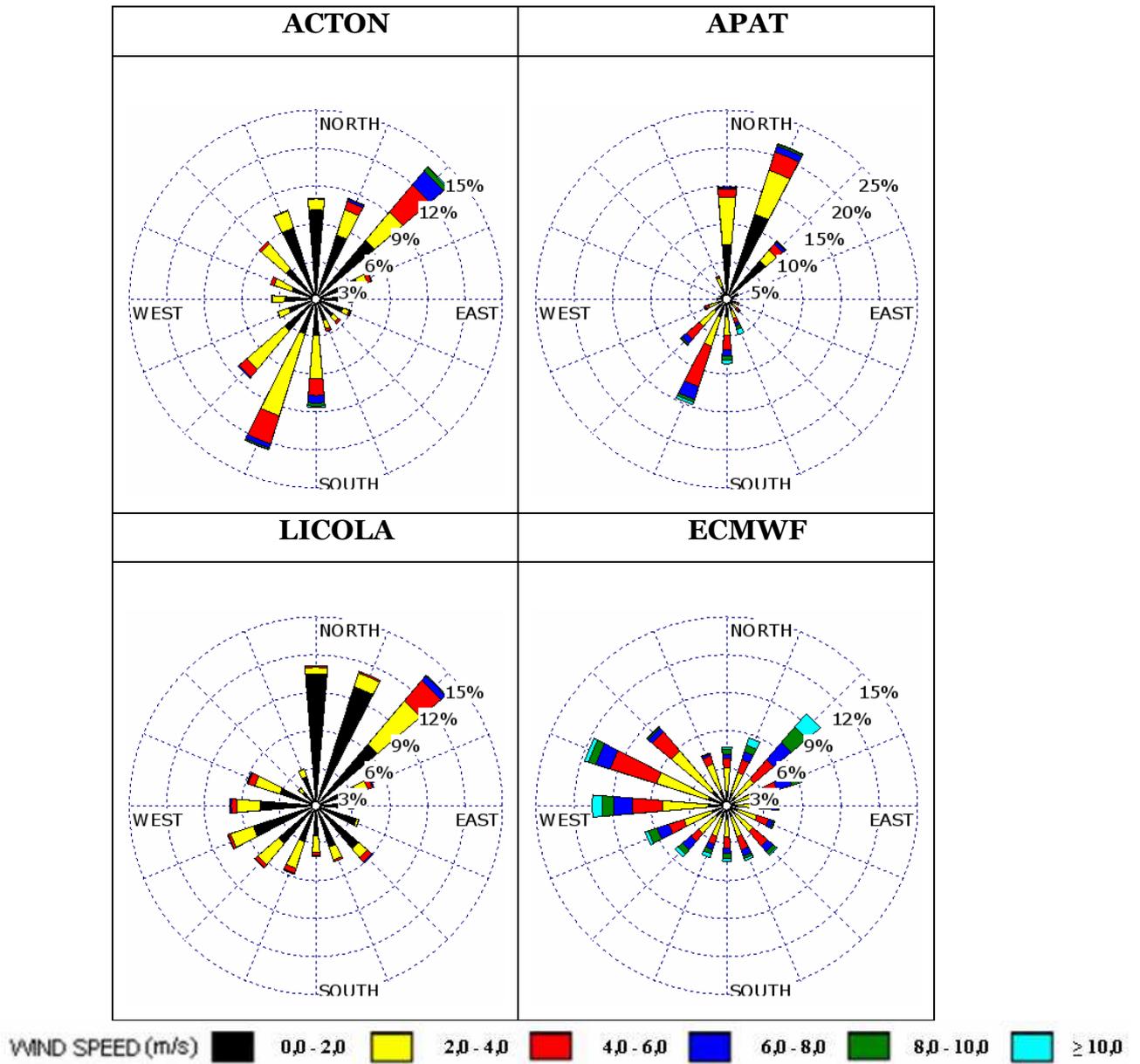


Figura 4.5 – Rose del vento interannuali (2002-2006) per le stazioni Acton, Apat, Licola e per il punto di griglia ECMWF.

Venti ECMWF



Venti APAT

— = 5 m/s



gen feb mar apr mag giu lug ago set ott nov dic

Figura 4.6 – Diagramma a stick del vento ECMWF e del vento Apat per l'anno 2002. I vettori vento orari sono rappresentati con un periodo di 20 ore.

Venti ECMWF



Venti APAT

— = 5 m/s



gen feb mar apr mag giu lug ago set ott nov dic

Figura 4.7 – Diagramma a stick del vento ECMWF e del vento Apat per l'anno 2003. I vettori vento orari sono rappresentati con un periodo di 20 ore.

Venti ECMWF

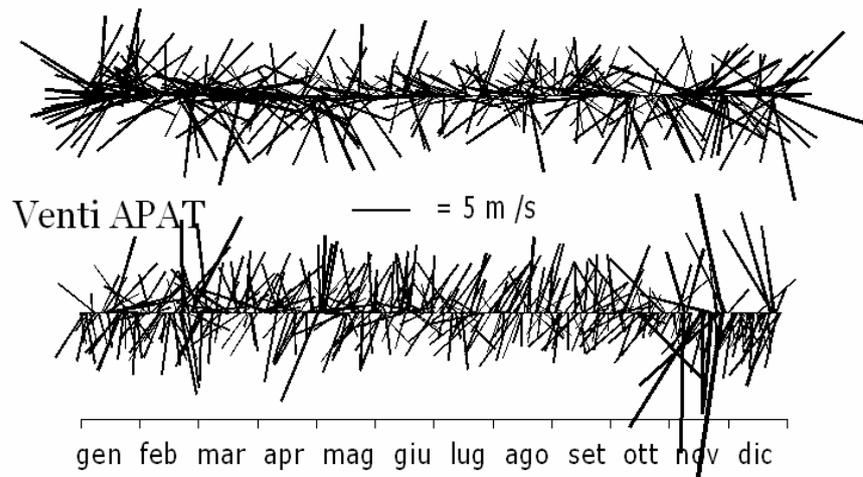


Figura 4.8 – Diagramma a stick del vento ECMWF e del vento Apat per l'anno 2004. I vettori vento orari sono rappresentati con un periodo di 20 ore.

Venti ECMWF

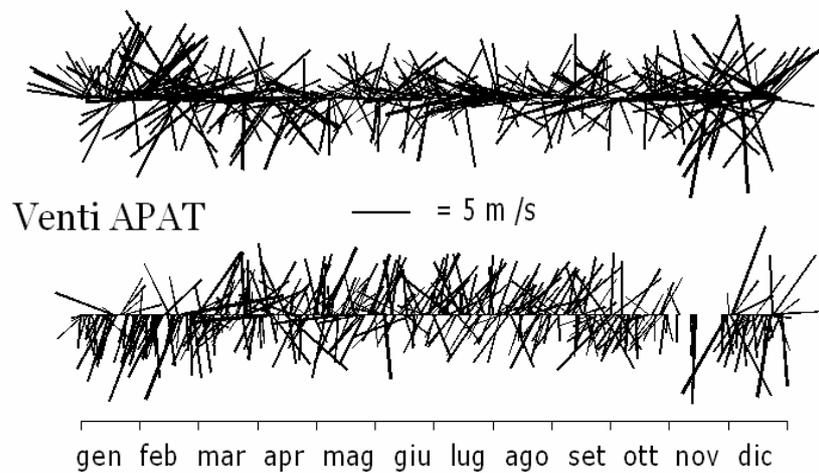


Figura 4.9 – Diagramma a stick del vento ECMWF e del vento Apat per l'anno 2005. I vettori vento orari sono rappresentati con un periodo di 20 ore.

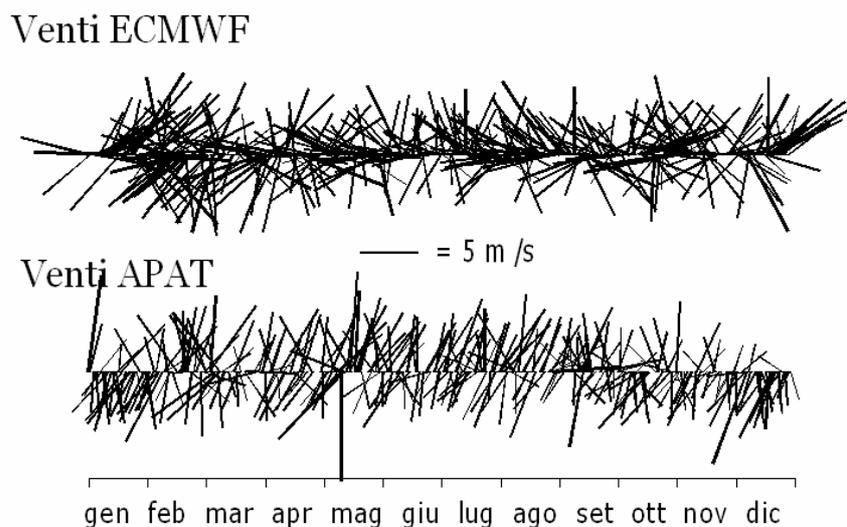


Figura 4.10 – Diagramma a stick del vento ECMWF e del vento Apat per l’anno 2006. I vettori vento orari sono rappresentati con un periodo di 20 ore.

4.8 VARIABILITA’ STAGIONALE DEI VENTI

L’analisi stagionale dei venti prende in considerazione le stagioni meteorologiche:

- Inverno meteorologico: 1 Dicembre - 28 (29) febbraio;
- Primavera meteorologica: 1 marzo - 31 maggio;
- Estate meteorologica: 1 giugno - 31 agosto;
- Autunno meteorologico: 1 settembre - 30 novembre.

In Appendice A è possibile osservare le rose del vento stagionali realizzate nell’arco dei cinque anni in esame per Apat, Acton, ECMWF e Licola.

Direzioni. L’area del Golfo di Napoli presenta venti provenienti principalmente dal quadrante SW nei mesi più caldi e dal quadrante NE nei mesi più freddi (rose dei venti in Appendice A).

Per le due stazioni interne al Golfo, durante i mesi invernali, le frequenze maggiori in termini di direzione (25-30%) si raggiungono per i bin orientati a NNE e NE; le intensità massime sono comprese nell’intervallo 8-10 m/s (Figure A.1 e A.5). I venti dal quadrante SW sono percentualmente poco frequenti ma molto intensi (velocità > 10 m/s) perché generati dal passaggio di sistemi depressionari nell’area del Golfo. Questi eventi sono facilmente riconoscibili nei diagrammi a stick in Figura 4.11.

Con l’arrivo della primavera (Figure A.2 e A.6) le direzioni principali sono localizzate lungo l’asse NNE-SSW e i venti più intensi sono quelli provenienti da SSW (> 10 m/s). I

diagrammi a stick (Figura 4.12) evidenziano la continua alternanza di direzione del vento che è tipica dei regimi di brezza.

In estate si riducono fortemente i venti provenienti dai quadranti settentrionali (~ 15%) e le frequenze maggiori sono localizzate in direzione SSW (18%-25%) (Figure A.3 e A.7). Le velocità raggiunte dal vento non superano gli 8 m/s. I diagrammi a stick (Figura 4.13) evidenziano l'alternanza di direzioni tipica della brezza (NE-SW).

In autunno, (Figure A.4 e A.8), la situazione è prossima a quella primaverile con venti predominanti diretti lungo l'asse NNE-SSW, e velocità più intense nel quadrante SW (> 10 m/s). I venti dal quadrante NE sono percentualmente più frequenti (tra il 15% e 30%) rispetto a quelli dal quadrante SW (~ 10%) in tutti gli anni presi in esame.

Per un punto esterno al Golfo (ECMWF Figura A.9) e per la stazione meteorologica di Licola (Figura A.13) del direzioni di provenienza del vento sono in accordo tra le varie stagioni. Il vento nel periodo invernale proviene principalmente da NE (15%-20%) con intensità che superano i 10 m/s; i venti dai quadranti occidentali sono percentualmente poco frequenti (~ 8%) ma altrettanto intensi (Figura A.9).

In primavera (Figura A.10) il vento assume direzioni altamente variabili che coprono tutti i settori della rosa ma con prevalenza delle direzioni W-WNW (~ 12%).

In estate (Figura A.11) le direzioni predominanti restano W-WNW (18%-20%) ; le intensità non superano i 10 m/s.

In autunno (Figura A.12) la variabilità in direzione è elevata; i venti percentualmente più frequenti provengono da NE (10%-15%) e da W-WNW (10%-15%).

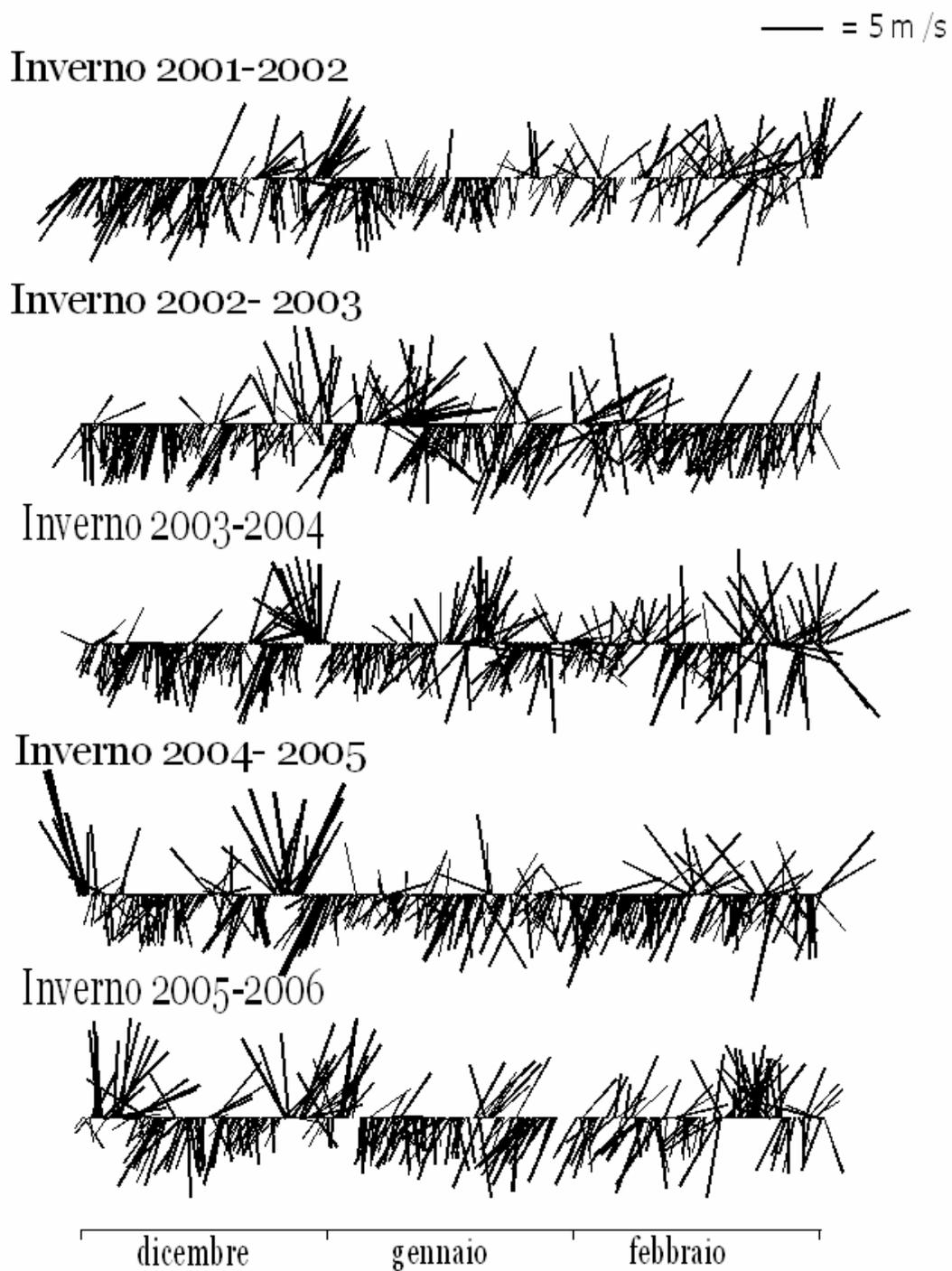


Figura 4.11 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione Apat per i mesi invernali negli anni 2002-2006.

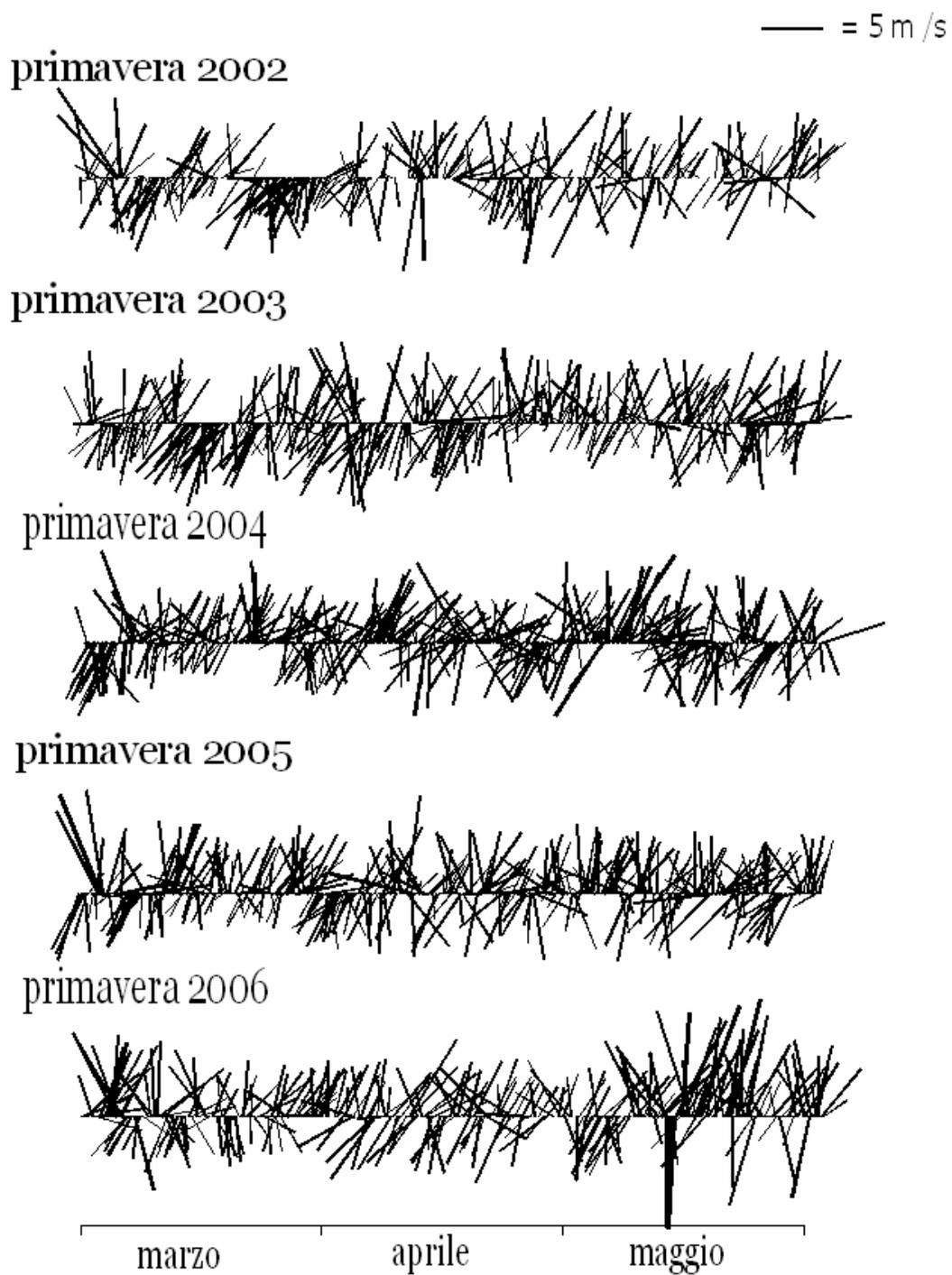


Figura 4.12 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione Apat per i mesi primaverili negli anni 2002-2006.

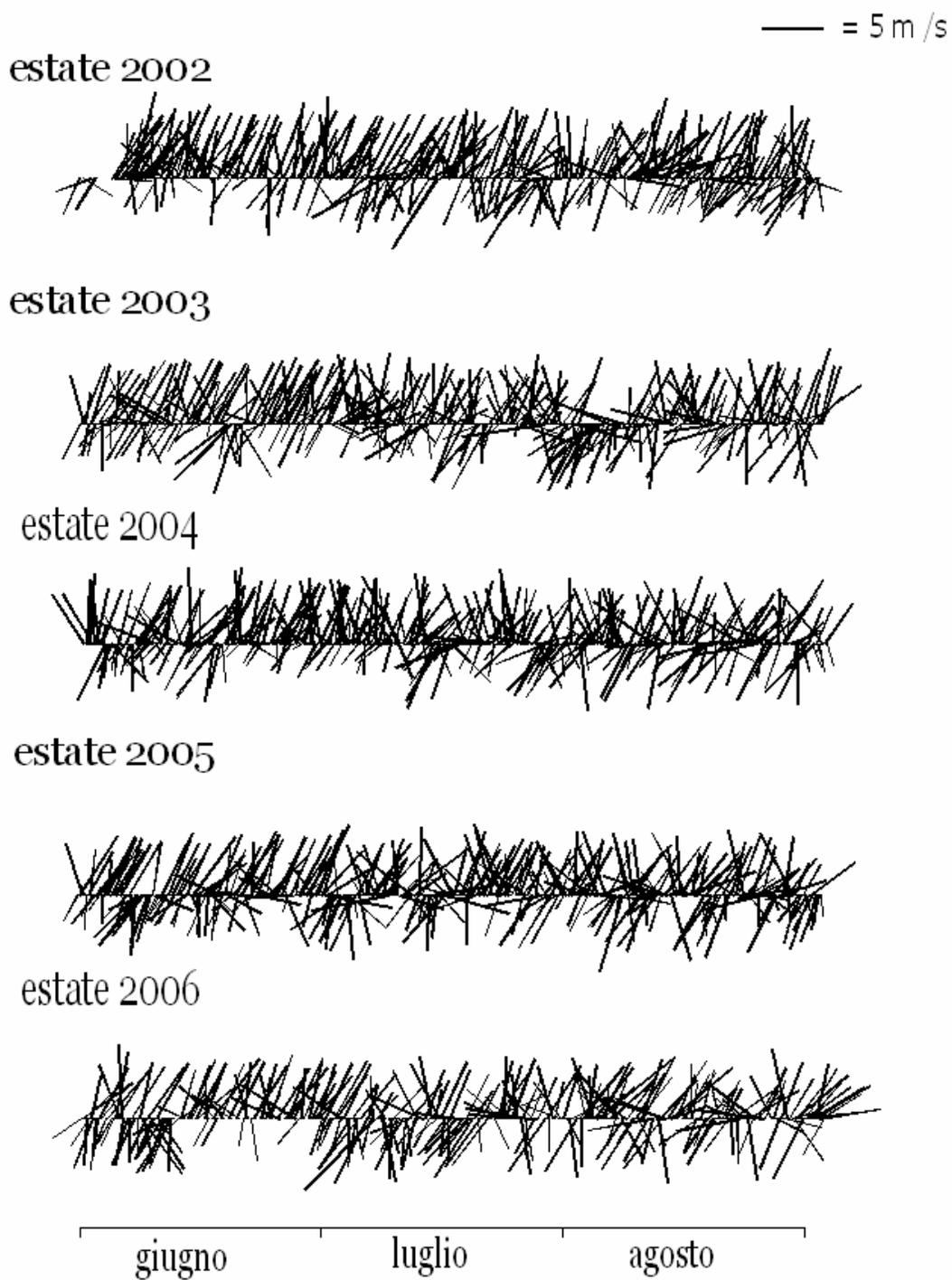


Figura 4.13 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione Apat per i mesi estivi negli anni 2002-2006.

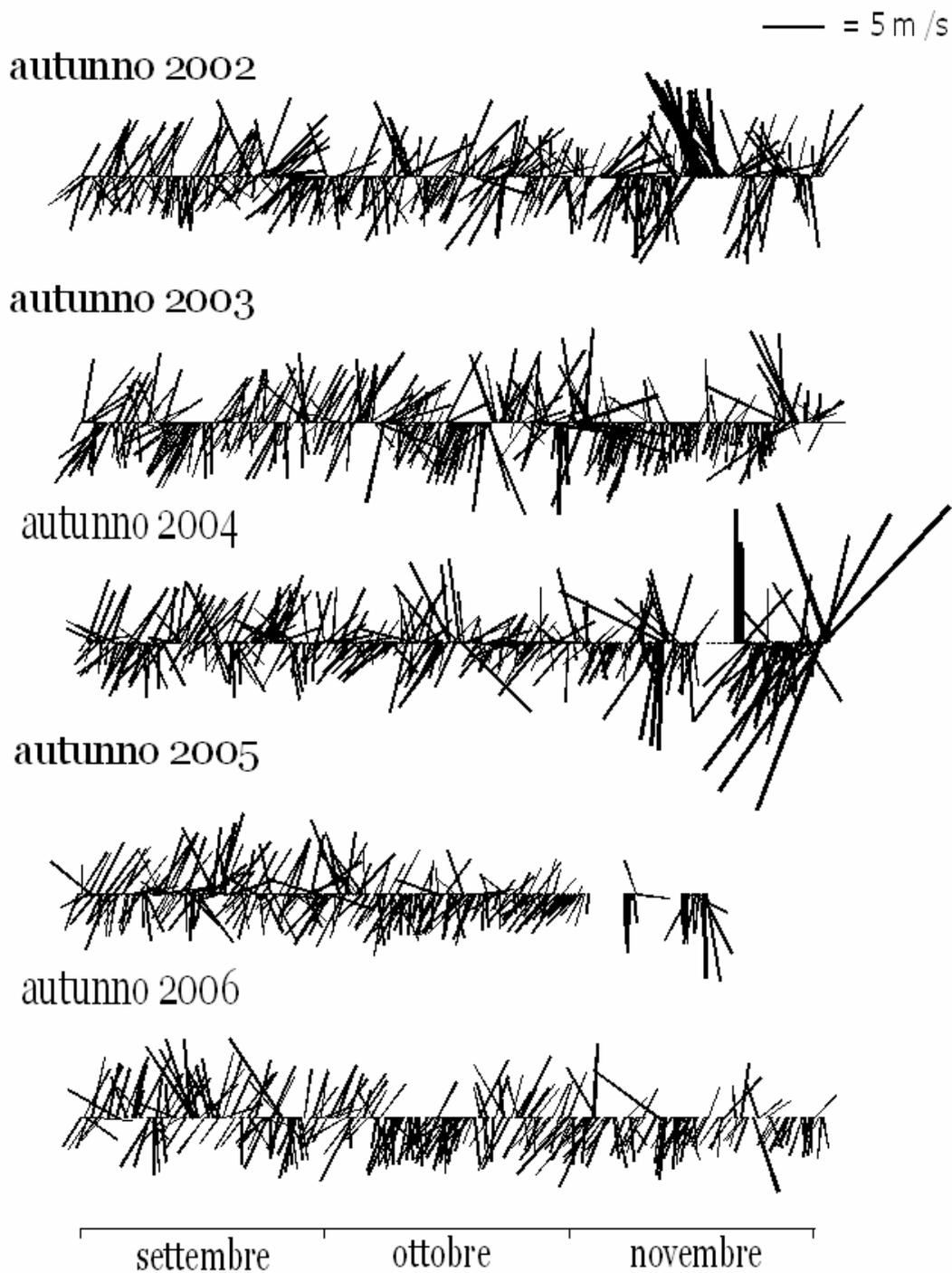


Figura 4.14 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione Apat per i mesi autunnali negli anni 2002-2006.

Pressioni e Intensità. I periodi invernali sono caratterizzati da continue oscillazioni della pressione atmosferica causate dal passaggio di sistemi di bassa pressione (cicloni)

(Figura 4.16). Gli abbassamenti di pressione provocano un repentino aumento delle intensità dei venti e un'inversione della direzione di provenienza (da NE a SW; Figura 4.11); in corrispondenza di massimi di pressione le velocità assumono valori meno intensi ed i venti si orientano dal quadrante NE (Figure 4.11, 4.16).

In primavera il campo di venti locali è dominato dal regime di brezza; l'intensità del vento oscilla con un periodo di 24 ore; la regolarità delle oscillazioni è interrotta solo da bruschi abbassamenti di pressione legati a picchi di intensità (Figura 4.17). Le direzioni di provenienza del vento si distribuiscono lungo l'asse NE e SW (Figura 4.12).

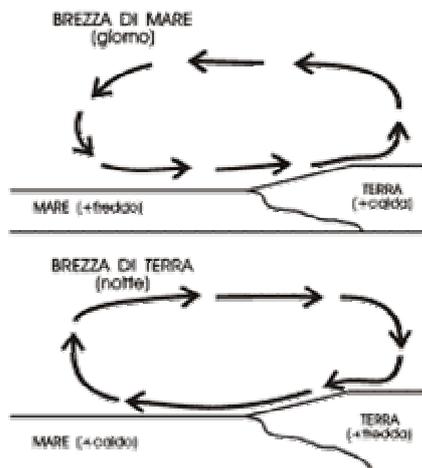
La brezza è un vento periodico, prodotto dal diverso riscaldamento di due zone contigue. La brezza marina è provocata dalla differenza di temperatura fra aria e mare. Il sole scalda indifferentemente il mare e la terra, ma mentre il mare assorbe e trattiene il calore, la terra lo riflette e ne trattiene molto meno; il calore riflesso aumenta il riscaldamento dell'aria sovrastante che comincia a salire. Si viene pertanto a creare sulla terraferma una sorta di "depressione termica" e le masse d'aria iniziano a spostarsi dalla zona di alta pressione verso la zona di bassa pressione (da mare verso la terraferma), provocando la brezza di mare. Di notte la terra, non più irradiata dal sole, non è in grado di scaldare l'aria, mentre il mare, che ha assorbito il calore durante il giorno, è in grado di cederlo scaldando masse di aria che salgono verso l'alto richiamando aria dalla terra. In questo modo si forma la brezza di terra.

Durante il giorno la differenza di temperatura tra terra e mare è superiore rispetto alle ore notturne; la maggiore differenza di pressione al suolo fa sì che il fenomeno delle brezze di mare sia più intenso di quello delle brezze di terra.

Il regime di brezza nel Golfo di Napoli si instaura nel periodo primaverile e persiste fino alla prima metà dell'autunno. Durante i mesi estivi assume la sua massima espressione; la pressione atmosferica mantiene un andamento pressappoco costante (Figura 4.18), le velocità oscillano raggiungendo valori massimi intorno alle ore 12:00- 13:00 di ogni giorno e valori minimi nelle ore notturne intorno alla mezzanotte. Le oscillazioni giornaliere della velocità del vento sono in direzione ed intensità sono ben visibili nelle Figure 4.20-4.21; ai picchi di velocità corrispondono venti provenienti da SW (brezza di mare); ai minimi corrispondono i venti provenienti da NE (brezza di terra).

Figura 4.15– Schema della circolazione atmosferica generata dalla presenza delle brezze.

In autunno le caratteristiche tipiche del regime di brezza (Figura 4.19) persistono fino a tutta la metà di ottobre, poi i venti assumono un andamento più prossimo alle



caratteristiche invernali con le direzioni orientate da NE e picchi di velocità in relazione agli abbassamenti di pressione (Figura 4.14 e Figura 4.19). Per gli anni 2003 e 2006 la condizione di brezza persiste in tutto il periodo autunnale (Figura 4.19).

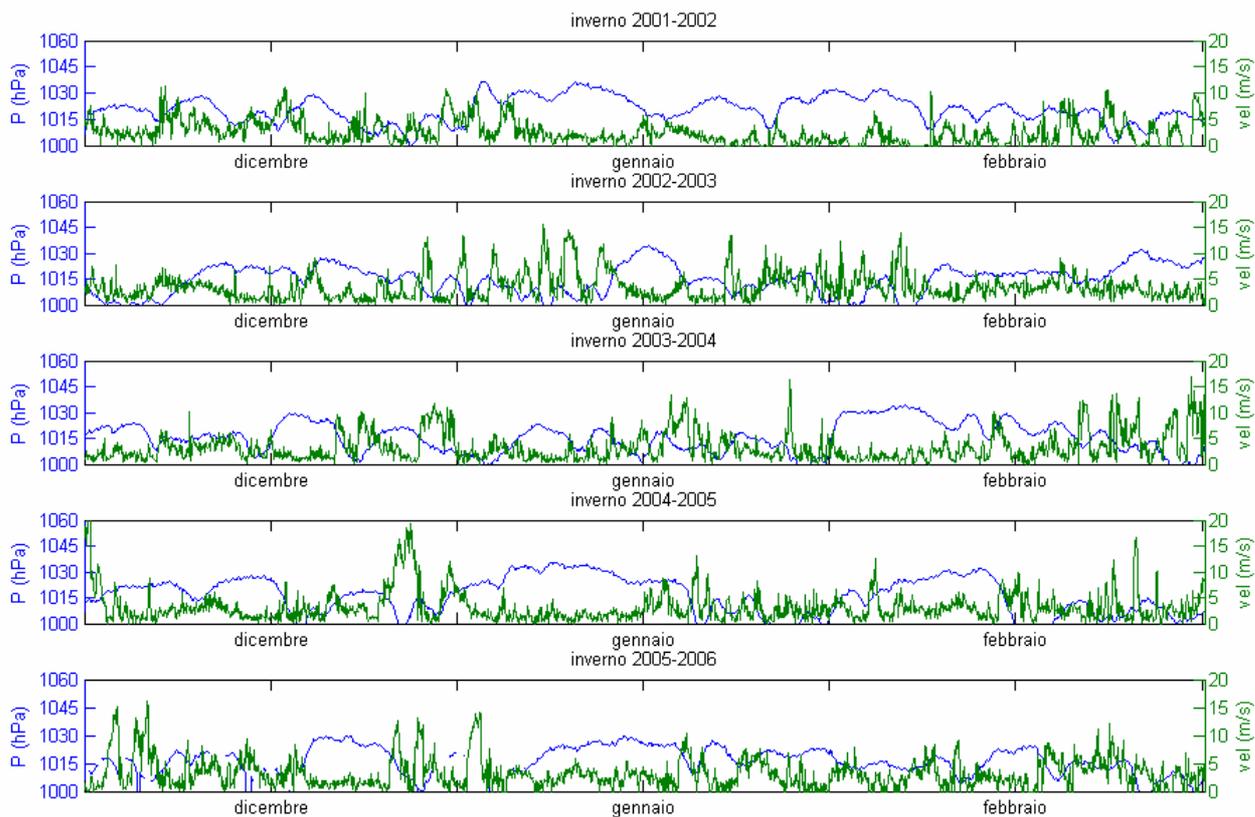


Figura 4.16 – Andamento orario della pressione e dell'intensità del vento per i mesi invernali negli anni 2002-2006.

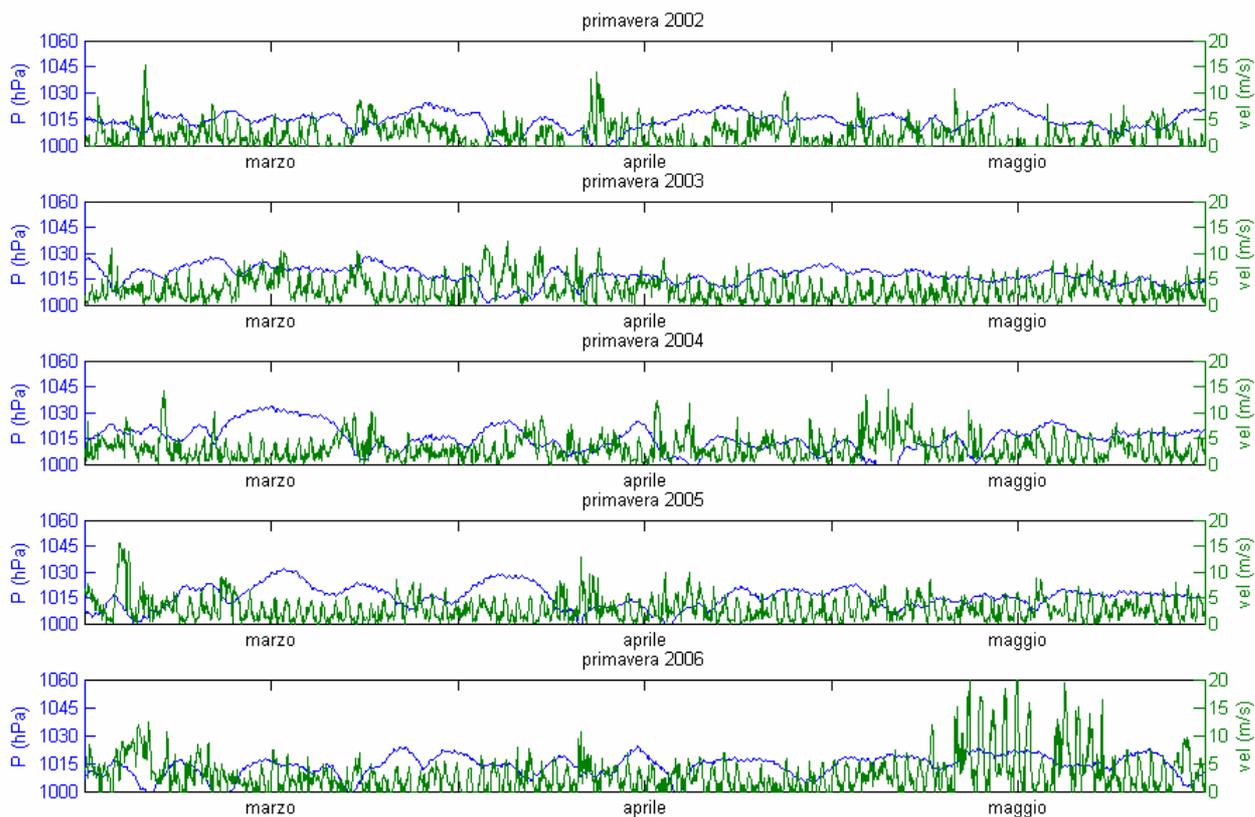


Figura 4.17 – Andamento orario della pressione e dell'intensità del vento per i mesi primaverili negli anni 2002-2006.

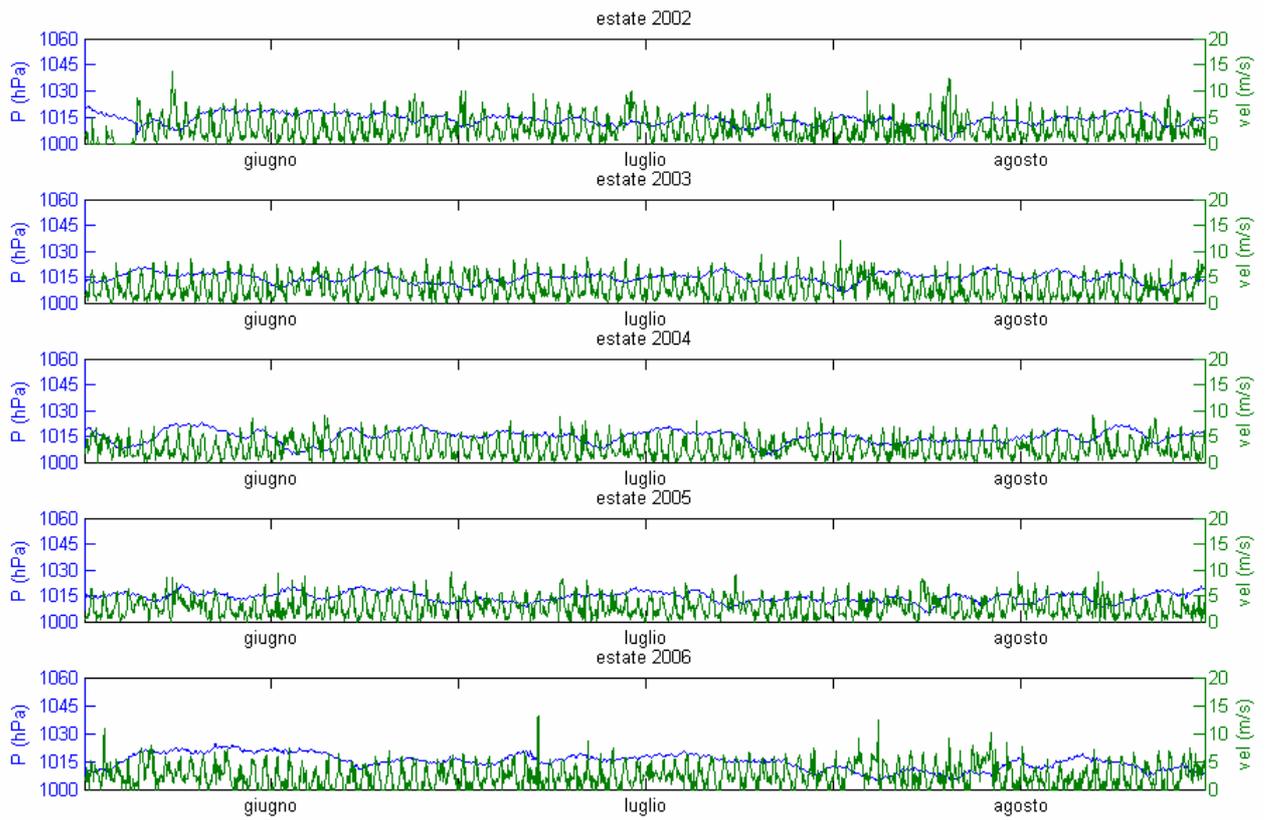


Figura 4.18 – Andamento orario della pressione e dell'intensità del vento per i mesi estivi negli anni 2002-2006.

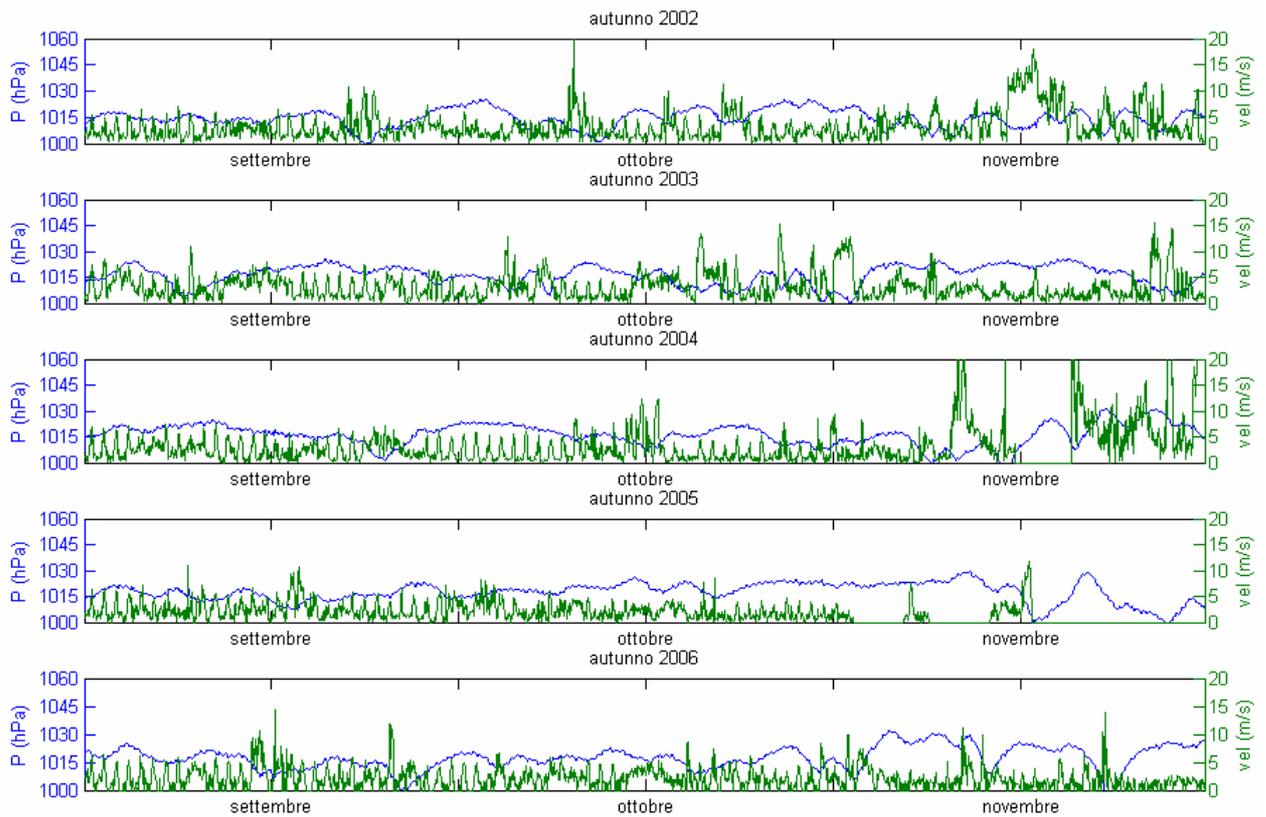


Figura 4.19 – Andamento orario della pressione e dell'intensità del vento per i mesi autunnali negli anni 2002-2006.

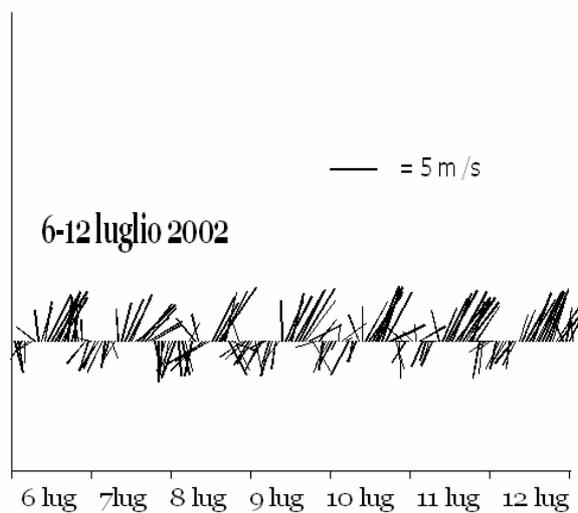


Figura 4.20 – Diagramma a stick del vento tipico del regime di brezza (settimana 6-12 luglio 2002).

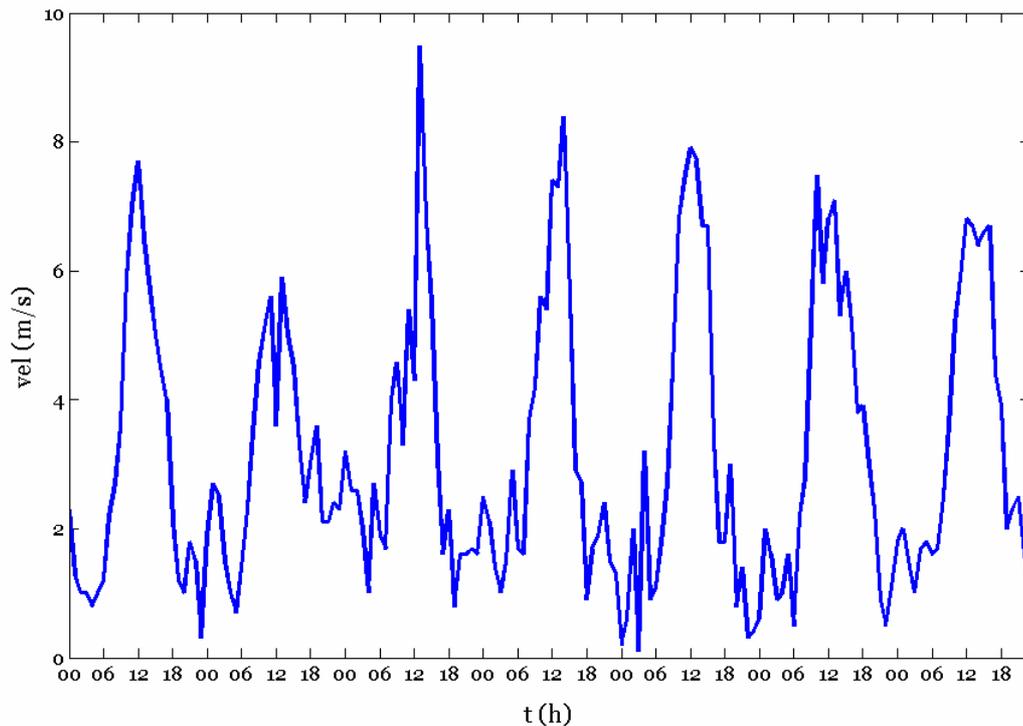


Figura 4.21 – Intensità e direzione del vento tipiche del regime di brezza (settimana 6-12 luglio 2002).

4.9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il Golfo di Napoli è caratterizzato da tre regimi di vento principali:

- venti da NE, tipici del periodo invernale e caratteristici sia delle stazioni interne che di quelle esterne al Golfo;
- venti dai quadranti occidentali, legati ad eventi temporaleschi o comunque al passaggio di cicloni atmosferici nell'area del Golfo. Si tratta di fenomeni intensi ma di breve durata (ore o pochi giorni), caratterizzati da elevate velocità del vento, più frequenti nei periodi invernali ed autunnali;
- brezze, fenomeno locale caratterizzato da venti deboli allineati lungo l'asse NE-SW e particolarmente concentrati nei mesi primaverili ed estivi. I venti cambiano direzione in maniera regolare nel corso della giornata, provenendo dal quadrante NE (brezza di terra) durante le ore notturne e da SW (brezza di mare) durante le ore diurne. In genere la brezza di mare è predominante in intensità e frequenza quindi le rose di vento stagionali (Figura Appendice A) registrano un numero superiore di eventi da SW.

Capitolo 5: **Dinamica superficiale delle correnti**

INTRODUZIONE

La circolazione superficiale nel Golfo di Napoli è caratterizzata da un'elevata variabilità ed è spesso dominata da effetti locali.

Secondo Moretti et al. (1983) la circolazione del Golfo è il risultato della sovrapposizione di diversi moti non lineari che evolvono su differenti scale temporali e spaziali. In particolare sono state identificate due distinte classi di forzanti: remoti e locali (Gravili et al., 2001). Il principale forzante remoto è la circolazione del Tirreno meridionale (Pierini e Simioli, 1998); il fattore locale che conferisce alla circolazione del Golfo la maggiore variabilità dinamica spaziale e temporale è lo stress del vento (Moretti et al., 1977; De Maio et al., 1985; Gravili et al., 2001;). In aggiunta a questi forzanti principali, le strutture di circolazione osservate sono influenzate anche dalla topografia del fondo (Moretti et al., 1977; Gravili et al., 2001; Greco et al., 2005) e dall'effetto schermante del Vesuvio (Moretti et al., 1977; De Maio et al., 1985; Gravili et al., 2001;).

Le immagini di correnti superficiali fornite dal CODAR confermano l'elevata variabilità della circolazione nell'area in esame e la formazione di strutture dinamiche che evolvono, si rompono e si riformano in poche ore modificando le proprie caratteristiche (Figura 5.1).

Per poter identificare schemi di circolazione tipici e strutture ricorrenti e poter correlare tali schemi e strutture a particolari periodi dell'anno e a particolari condizioni, sono stati scelti come fattori guida i due principali forzanti indicati in letteratura.

Il vento rappresenta il forzante principale della circolazione a breve termine del Golfo; le correnti superficiali rispondono velocemente all'input impresso, formando strutture più o meno coerenti localizzate principalmente nella regione centro settentrionale del bacino. L'area antistante la città di Napoli (Baia di Napoli), non risulta quasi mai direttamente influenzata dallo stress del vento, ma mostra una circolazione principalmente indotta da quella a scala di bacino. La circolazione nella parte meridionale del Golfo (latitudine inferiore a $41^{\circ} 50' N$) risulta non direttamente, o meglio non solo, condizionata dal vento, ma legata anche allo scambio tra acqua tirrenica e acqua interna al Golfo che avviene nell'area della Bocca Piccola e nell'area della Bocca Grande localizzata immediatamente ad ovest dell'isola di Capri.

In determinate situazioni, la circolazione superficiale del Golfo risulta fortemente condizionata da quella del Mar Tirreno. Questo si verifica quando rami della circolazione tirrenica penetrano all'interno del bacino e non si limitano a lambirne il margine più esterno (Bocca Grande); il forzante meteorologico, quindi, passa in secondo piano e il flusso tirrenico diventa il motore principale della circolazione interna al Golfo.

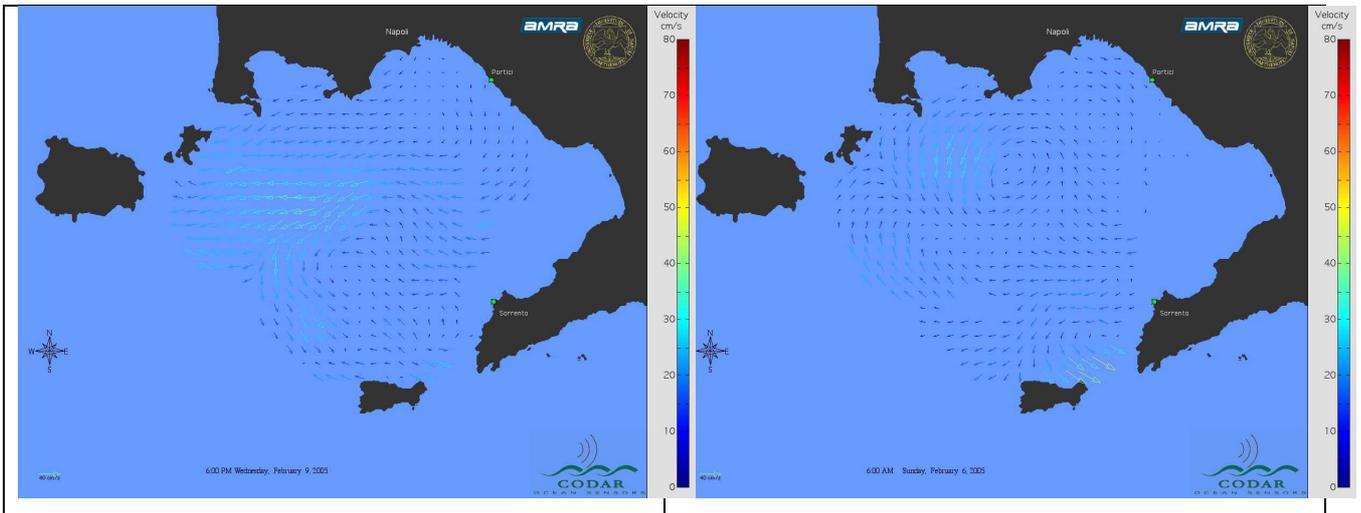


Figura 5.1- Alcuni esempi di campi di correnti superficiali CODAR.

Cross-correlazione tra correnti superficiali e stress del vento. Per caratterizzare il ruolo che ha lo stress del vento nel guidare le correnti superficiali, è stata usata la funzione di cross-correlazione $X_{cc}(-\tau)$ (Kundu, 1990). Questa funzione serve a valutare in che modo la corrente superficiale ad un determinato istante t dipende dallo stress del vento agente nello stesso momento (t) e ai tempi precedenti ($t-\tau$). In particolare in questo lavoro si è scelto di cross-correlare la direzione (d) e le componenti zonali (u) e meridionali (v) della corrente e delle stress del vento:

$$X_{ccu}(-\tau) \equiv \overline{u_s(t) u_w(t-\tau)}$$

$$X_{ccv}(-\tau) \equiv \overline{v_s(t) v_w(t-\tau)}$$

$$X_{ccd}(-\tau) \equiv \overline{d_s(t) d_w(t-\tau)}$$

Dove le lettere s e w poste al pedice indicano rispettivamente la componente del mare e la componente del vento. Lo stress del vento è calcolato come:

$$\tau_x = \rho_a c_d |U| u$$

$$\tau_y = \rho_a c_d |U| v$$

dove $U = (u, v)$ è la velocità del vento, ρ_a è la densità dell'aria (1.3 Kg/m^3), e c_d è il coefficiente di drag; il coefficiente di drag è dato da:

$$\begin{cases} c_d = 10^{-3} & |U| \leq 6 \text{ m/s} \\ c_d = (0.61 + 0.063 \cdot |U|) / 10^{-3} & 6 \text{ m/s} < |U| \leq 22 \text{ m/s} \\ c_d = 2 \cdot 10^{-3} & 22 \text{ m/s} < |U| \end{cases} \quad (\text{Smith, 1980})$$

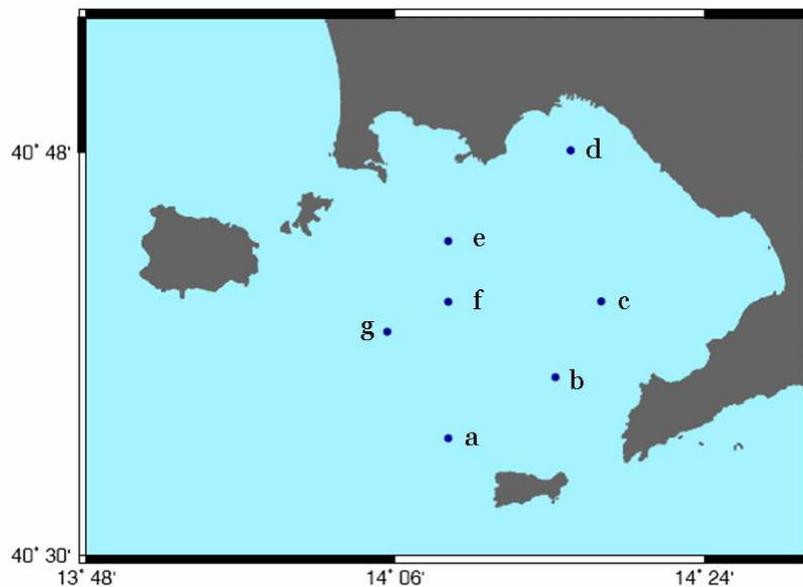


Figura 5.2 – Localizzazione dei punti della griglia CODAR in cui è stata effettuata la cross-correlazione con il vento.

I dati di vento utilizzati per svolgere questa analisi provengono da una stazione interna al Golfo (Acton o Apat) .

I dati di corrente utilizzati per la cross-correlazione sono ricavati da sette punti della griglia CODAR (Figura 5.2) sparsi in diverse regioni del Golfo.

5.4 CASI STUDIO

I risultati ottenuti dal Capitolo 4 hanno rilevato l'esistenza di tre regimi di vento principali nel Golfo di Napoli, che si alternano nelle diverse stagioni dell'anno. Su scala annuale, si può affermare che il vento fluisce principalmente dal quadrante NE durante i

mesi invernali, e dal quadrante SW durante i mesi estivi; in primavera ed in autunno le direzioni ricorrenti risultano allineate lungo l'asse NNE-SSW.

Andando più a fondo (Figure 4.16-4.19) si è scoperto che in realtà il periodo invernale è caratterizzato da frequenti e rapide (ore o pochi giorni) incursioni di vento dal quadrante SW, legate al passaggio di sistemi di bassa pressione, che provocano una rapida inversione della direzione di provenienza del vento; l'autunno e la primavera sono caratterizzati da venti sull'asse NNE-SSW perché interessati dall'insediamento del regime di brezza; in estate le rose stagionali (Appendice A Figure A.3 e A.7) registrano una maggiore provenienza di venti da SW ma, in realtà, anche in questo periodo prevale il regime di brezza (Figura 4.18) con brezza di mare più intensa e più duratura di quella di terra (quindi con venti più intensi e frequenti da SW).

Conoscendo questi aspetti dei pattern di circolazione caratteristici del Golfo, si sono isolati dai dati CODAR disponibili (Figure 3.3-3.8) coincidenti con le suddette situazioni di vento, che sono stati analizzati singolarmente.

Per realizzare le curve di cross-correlazione tra vento e corrente è stato usato il data set registrato dalla stazione meteorologica ACTON e le serie temporali ottenute dai punti corrente rappresentati in Figura 5.2.

5.4.1 Vento dal quadrante NE. I periodi di dati CODAR disponibili, corrispondenti a venti che spirano sul Golfo di Napoli dal quadrante NE, mostrano alcune caratteristiche di base, comuni a tutte le situazioni che rientrano in questa categoria, a cui si aggiungono delle caratteristiche peculiari per ogni singolo periodo. Le caratteristiche comuni sono: l'orientamento delle correnti in senso zonale, il trasporto netto di acqua verso l'esterno del Golfo, in direzione della Bocca Grande, e la formazione di un jet, disposto lungo l'asse E-W, in genere localizzato nella parte settentrionale o nella parte centrale del bacino. Entrando nello specifico delle situazioni reali, è possibile esaminare tre diverse tipologie di dinamica superficiale legate alla prevalenza del vento dal quadrante NE, che chiameremo *caso a*, *caso b* e *caso c*.

Caso a: Periodo 2-6 febbraio 2005. I giorni in esame si inquadrano in un periodo stabile di venti da NE; i diagrammi a stick in Figura 5.3b evidenziano la presenza di venti dal quadrante NE anche nei 5 giorni precedenti a quelli in oggetto. Il vento registrato dalla stazione interna al Golfo (Figura 5.3a) raggiunge velocità di 8-10 m/s e proviene principalmente da NNE-NE (~ 30%), con intensità che superano i 10 m/s.

Le snapshot in Figura 5.4 forniscono un'indicazione sull'evoluzione dei campi di corrente nel periodo in esame. La circolazione superficiale (Figura 5.4a) è caratterizzata dalla formazione di due flussi diretti lungo l'asse E-W, il primo localizzato nella regione settentrionale del bacino, il secondo localizzato nella parte meridionale. Questi due rami di circolazione sono separati da una struttura con andamento ciclonico localizzata tra i 40.69° - 40.77° N e 14.11° - 14.24° E, e con un diametro di circa 10 Km (Figura 5.5a, Figura 5.8) . All'interno dei due jet le correnti, direttamente trascinate dal vento, assumono velocità elevate anche superiori ai 20 cm/s ; la parte centrale del Golfo, schermata dalla presenza del Vesuvio, è caratterizzata, invece, da velocità meno intense e da un tipo di circolazione indotta dai settori adiacenti. I due flussi tendono a convergere lungo il margine settentrionale del bacino; fenomeni di divergenza accompagnano invece la fuoriuscita di acqua dal Golfo lungo il margine meridionale (Figura 5.6a). Nei due giorni successivi (Figura 5.4b) le strutture restano sempre ben delineate ma sono caratterizzate da correnti meno intense (si raggiungono velocità superiori ai 20 m/s solo in prossimità dell'isola di Capri e all'ingresso del Golfo di Pozzuoli); il vortice ciclonico ha un diametro ridotto (\sim 6-7 Km) ed è localizzato nella parte settentrionale del bacino (Figura 5.5b) . Nei giorni 5 e 6 febbraio (Figura 5.4c) i venti hanno intensità più modeste, le correnti risentono maggiormente dell'influenza della batimetria e tendono a convergere (Figura 5.6c) nella regione antistante l'isola di Procida; il flusso che si forma alimenta il ramo discendente della struttura ciclonica (Figura 5.5c).

In situazioni di vento stabile da NE le strutture superficiali evolvono fino a creare una zona di convergenza nella regione centrale del Golfo (Figura 5.6), accompagnata da due zone di divergenza nelle regioni meridionale e settentrionale. Questo fenomeno, attribuito all'effetto schermante del Vesuvio (Figura 1.1) in presenza di venti da NE, è riscontrato anche da Moretti et al. (1977) (Figura 1.4).

Le stream line (Figura 5.8), forniscono informazioni sul campo medio di correnti per il periodo in esame.

I diagrammi a stick (Figura 5.7) mostrano l'evoluzione temporale in direzione ed intensità del campo di correnti relativo ai punti in Figura 5.2. I punti B e C più interni al Golfo mostrano un maggior orientamento delle correnti in senso zonale; i punti E ed F, localizzati nel vortice ciclonico, mostrano correnti orientate in senso meridionale; i punti G ed A, prossimi alla Bocca Grande sono caratterizzati da maggiore variabilità in termini di direzione della corrente (il punto G, in particolare,

evidenzia la formazione della zona di convergenza con le correnti che invertono la direzione i giorni 5 e 6); anche nell'area costiera della Baia di Napoli le correnti tendono a dirigersi verso SW.

La componente zonale (Figura 5.9a1, a2) della corrente risulta fortemente correlata con il vento presente nelle venti ore precedenti in tutti i punti del bacino; la componente meridionale mostra per i punti prossimi alla costa (Figura 5.9b1) un livello di correlazione modesto, mentre i punti localizzati nella parte centrale del Golfo (Figura 5.9b2) hanno buona correlazione con il vento presente nelle 20-25 ore precedenti. Le cross-correlazioni in direzione confermano i risultati ottenuti per le componenti, rilevando in tutti i punti del bacino un buon accordo tra le direzioni della corrente e del vento presente nelle venti ore precedenti (Figura 5.9c1, c2).

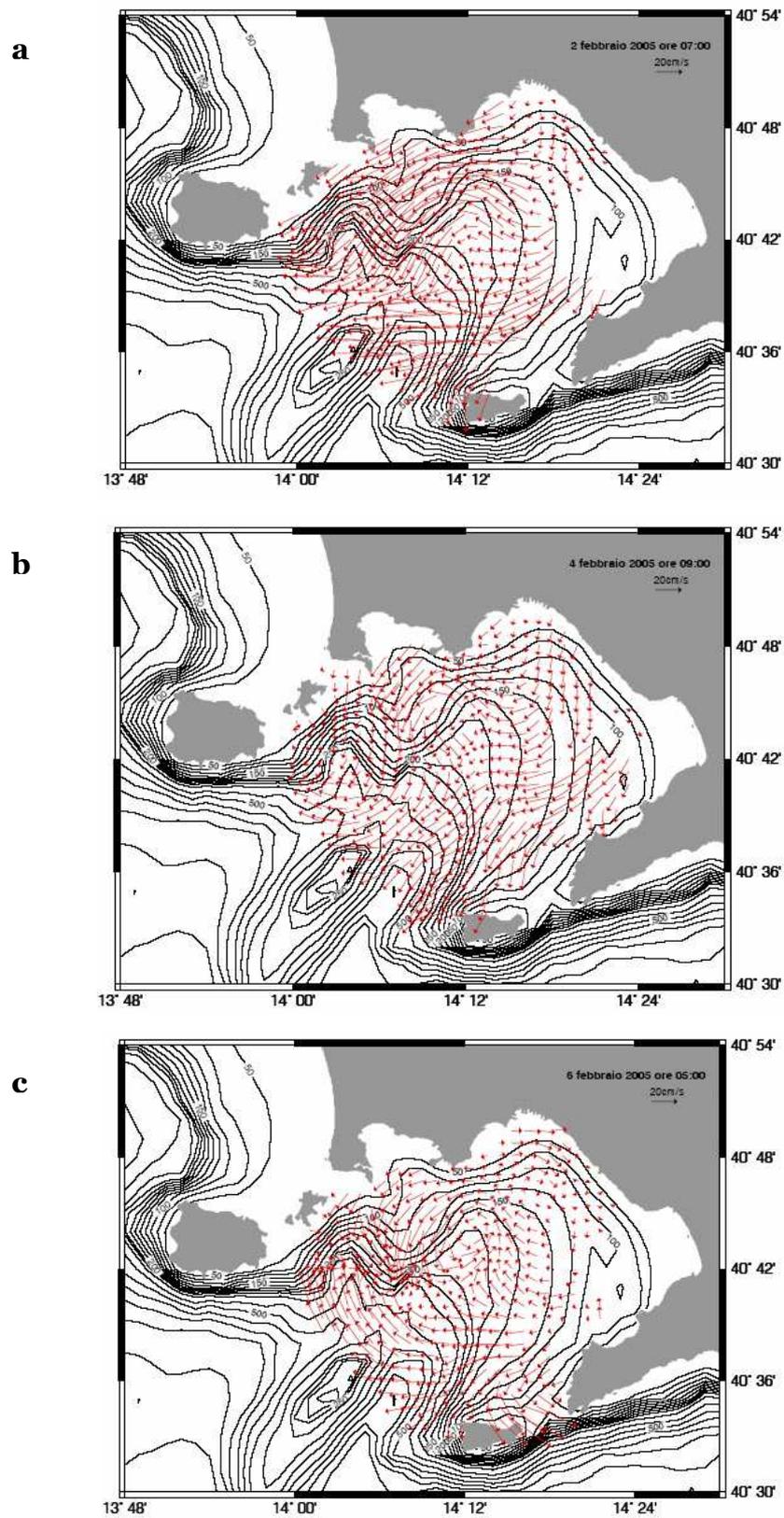


Figura 5.4 – Campi di correnti CODAR: a) 2 febbraio 2005 ore 7:00. b) 4 febbraio 2005 ore 9:00. c) 6 febbraio 2005 ore 5:00.

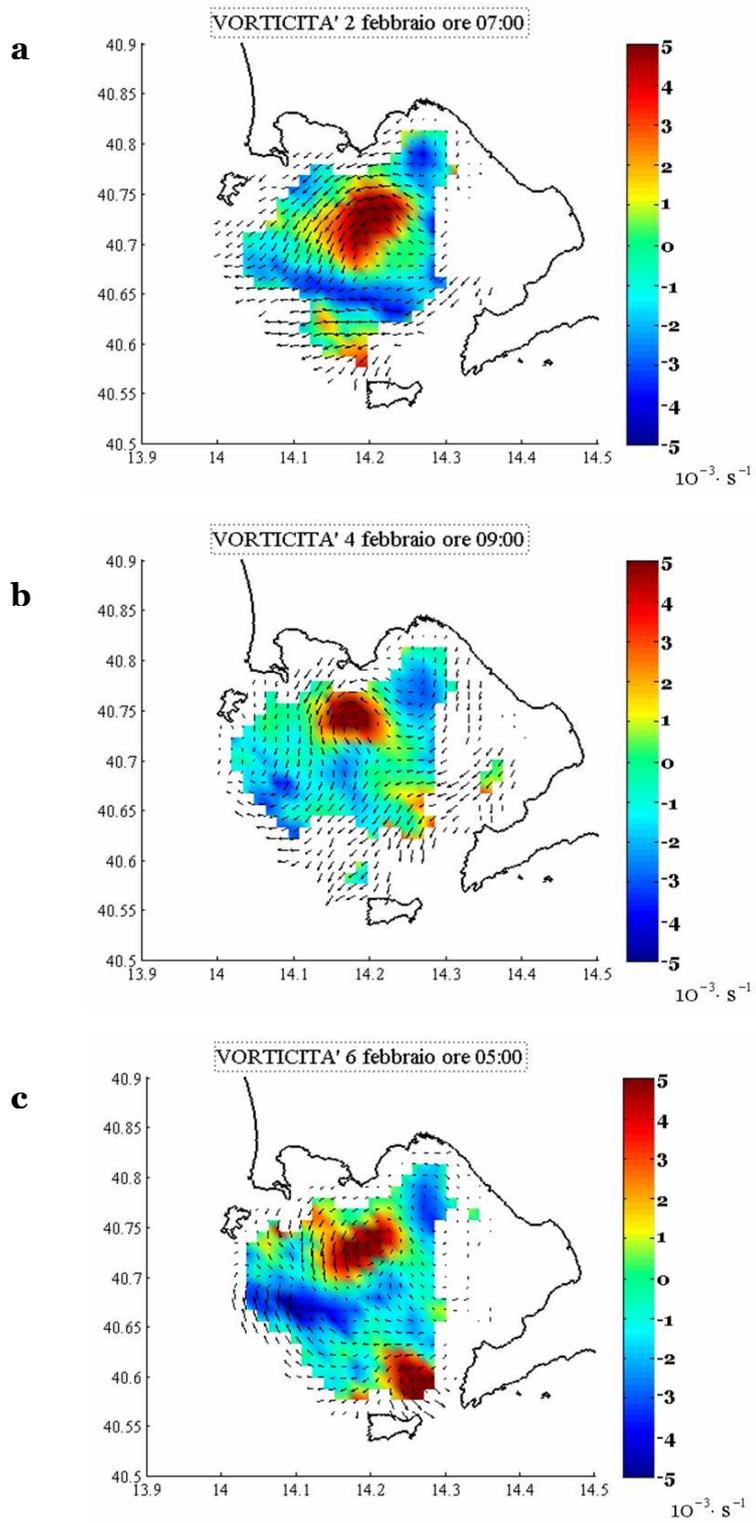


Figura 5.5 – Campi di vorticità : a) 2 febbraio 2005 ore 7:00. b) 4 febbraio 2005 ore 9:00. c) 6 febbraio 2005 ore 5:00.

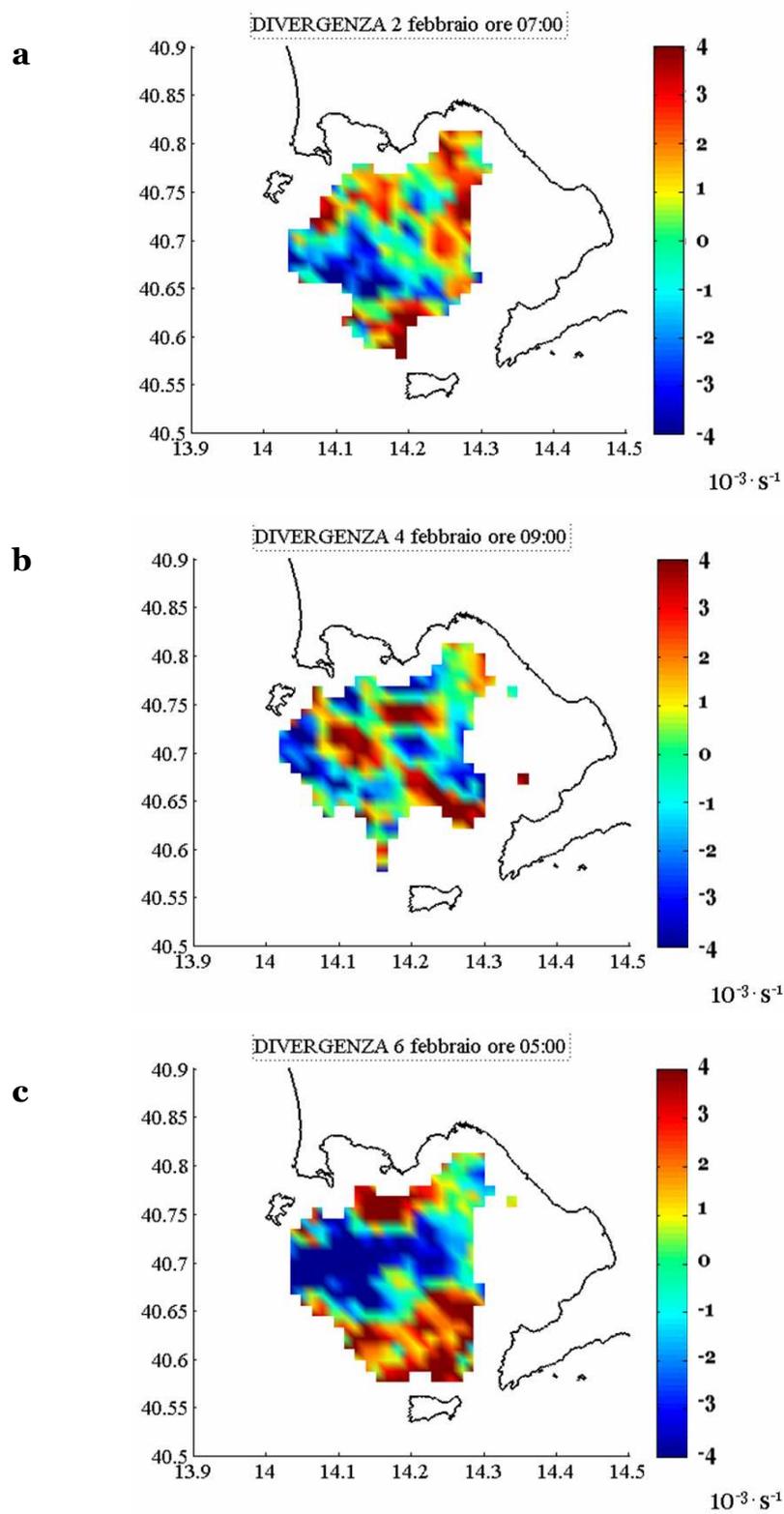


Figura 5.6 – Campi di divergenza : a) 2 febbraio 2005 ore 7:00. b) 4 febbraio 2005 ore 9:00. c) 6 febbraio 2005 ore 5:00.

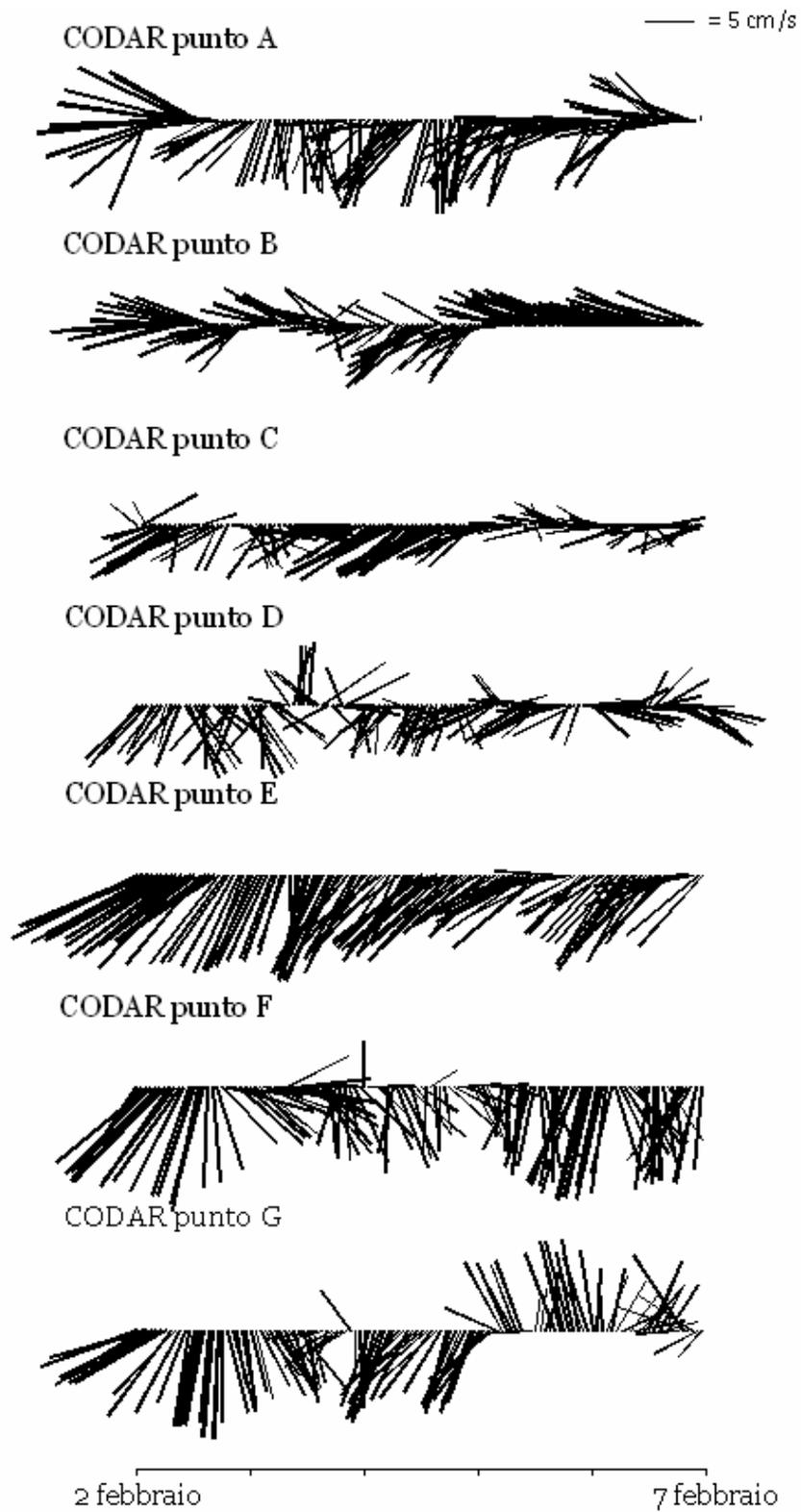


Figura 5.7 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 2-6 febbraio 05.

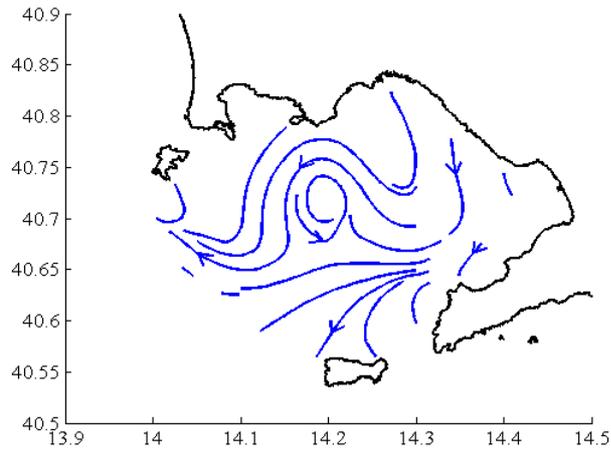
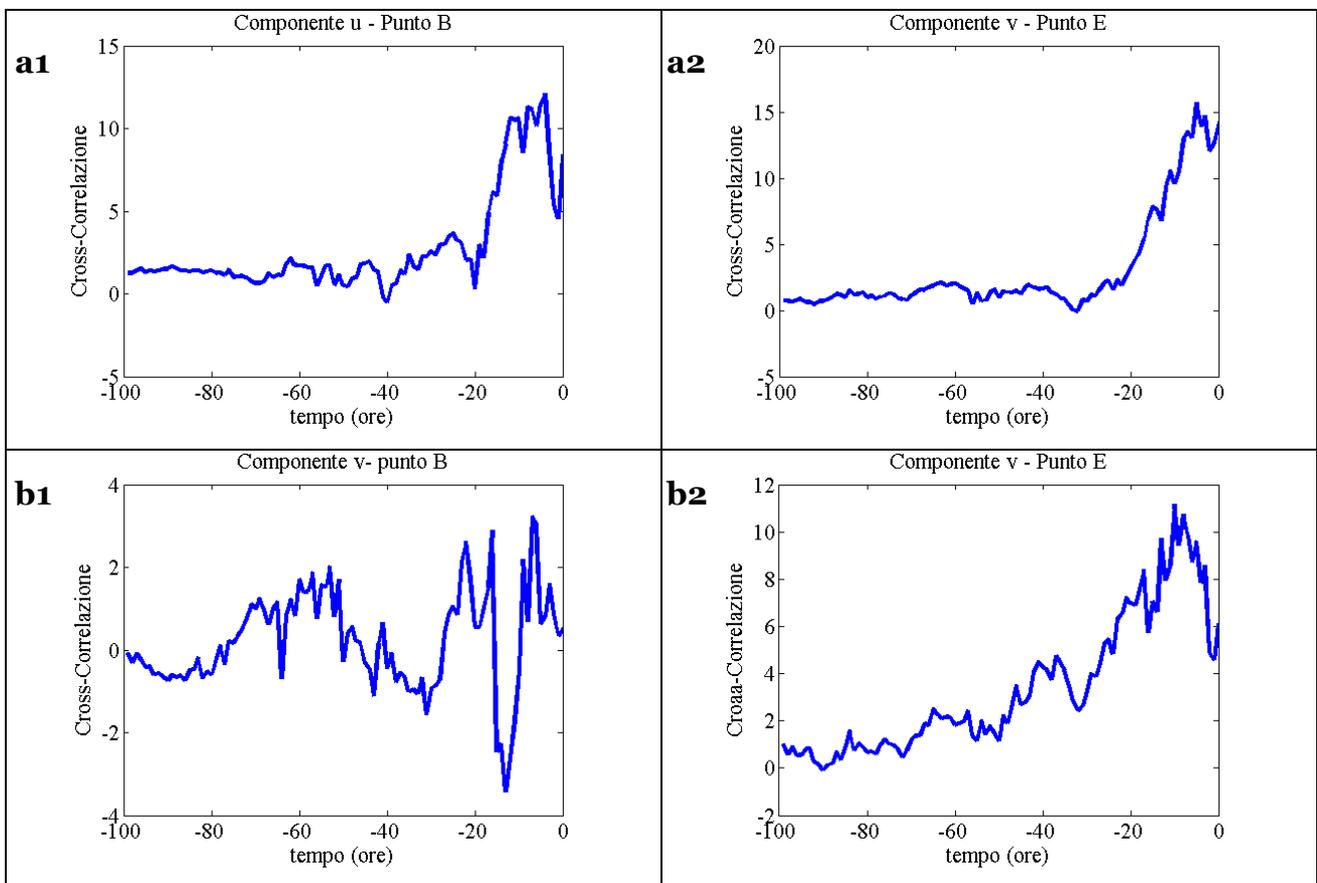


Figura 5.8 – Stream line per il campo di correnti medio del periodo 2-6 febbraio 2005.



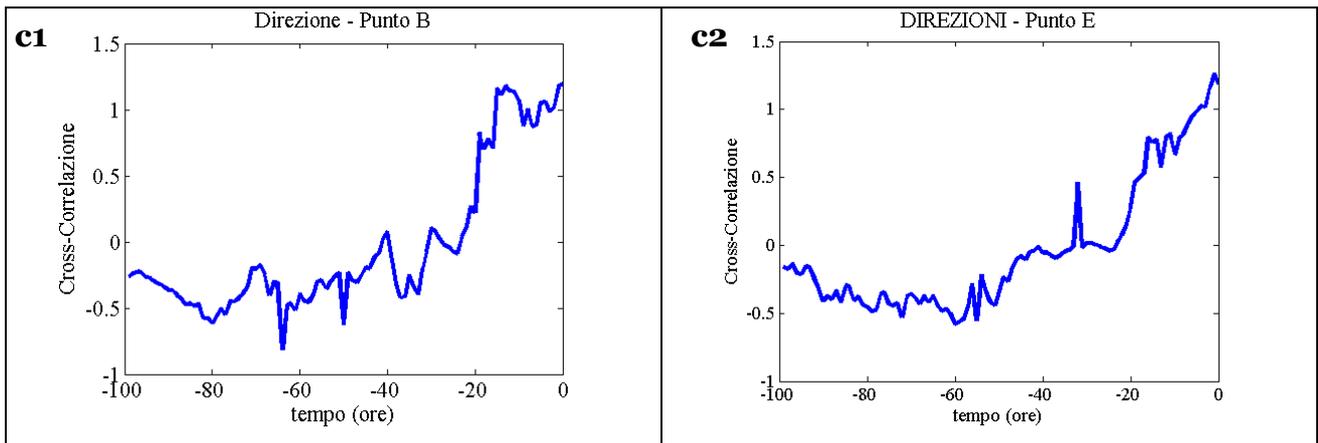


Figura 5.9 – Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto B (a1) e nel punto E (a2) . b) per la componente meridionale nel punto B (a1) e nel punto E (a2) . c) per le direzioni nel punto B (a1) e nel punto E (a2) .

Caso b: Periodo 14-18 febbraio 2005. La rosa dei venti per il periodo in esame (Figura 5.10a) evidenzia che le frequenze maggiori in termine di direzioni sono concentrate a N-NE (~ 50%) e N (~ 20%) e le velocità raggiunte sono comprese tra 6 e 8 m/s. Nelle prime ore del giorno 14 (Figura 5.10c) il vento è molto intenso e proviene dal quadrante SW; si tratta della fase finale del passaggio di una perturbazione nel Golfo. La bassa pressione provoca una rapida inversione della direzione del vento (Figura 5.10b) concentrata nei giorni 12 e 13 febbraio (dal quadrante NE al SW) (grafico pressione Figura 6.1); dopo il passaggio della perturbazione, i venti si dispongono nuovamente dal quadrante NE (Figura 5.10c). La circolazione segue la variazione di direzione del vento. Le correnti, nei giorni 12 e 13, si dirigono verso la costa formando un jet, orientato da SW a NE (Figura 5.15) localizzato nella parte centrale del bacino, ed un flusso più costiero che si muove lungo la Penisola Sorrentina in direzione del Golfo di Castellammare. La rapida inversione del flusso interno al Golfo, causata dal passaggio di una linea temporalesca, è stata riscontrata anche dalle osservazioni condotte da De Maio et al. (1981). I relativi schemi di corrente mostrano il flusso entrante nel Golfo in corrispondenza di venti da sud; passata la linea temporalesca il flusso diventa uscente e i venti si dispongono da NNW (De Maio et al., 1981 Figure 7a e 7b). Il campo di correnti del girono 14 (Figura 5.11a) è caratterizzato da un jet diretto da est ad ovest particolarmente intenso e ben delineato, localizzato nella regione settentrionale del bacino. La regione meridionale risponde più lentamente alle variazioni del vento e presenta un flusso costiero che si dirige verso il Golfo di

Castellammare, tipico della circolazione presente nei giorni precedenti (Figura 5.15). I due settori sono messi in comunicazione dalla una struttura ciclonica presente nella regione centrale del Golfo (Figura 5.12a).

Nei giorni successivi (Figura 5.11b) la circolazione mantiene le stesse caratteristiche; la struttura ciclonica si allunga in direzione zonale (Figura 5.12b), mentre la regione meridionale continua ad avere caratteristiche di circolazione non direttamente riconducibili all'azione del vento. Il giorno 18 (Figura 5.11c) la struttura ciclonica si disgrega completamente (Figura 5.12c) e la parte centrale del bacino è interessata da fenomeni di convergenza (Figura 5.13c). Anche nella regione meridionale le correnti tendono nel complesso ad uscire dal Golfo indirizzandosi verso la Bocca Grande e ricongiungendosi al jet settentrionale nell'area compresa tra i 14.01 e 14.17° E e 40.65 - 40.67° N dove si crea una zona di convergenza (Figure 5.11c e 5.13c).

Le stream line (Figura 5.16) sono rappresentative del campo di correnti medio del periodo in esame.

Gli stick diagram (Figura 5.14), realizzati per i punti della griglia CODAR in Figura 5.2 evidenziano: nella regione meridionale del bacino (A, B e C), la formazione della corrente costiera che risale la Penisola Sorrentina; nei punti E ed F, localizzati nel jet settentrionale, l'orientamento in senso zonale della corrente; nel punto G, la convergenza del flusso durante il giorno 18; nell'area costiera (punto D), le correnti tendono ad uscire in direzione SW o SE.

Le cross-correlazioni tra stress del vento e corrente sia per le componenti della velocità che per le direzioni forniscono risultati variabili da punto a punto (Figura 5.17). La cross-correlazione tra le componenti della corrente e dello stress del vento (Figura 5.17a1, a2, b1, b2) mostrano valori pari a zero per il vento presente nelle venti ore precedenti, seguiti da un picco di correlazione. Le direzioni sono meglio correlate per punti più vicini alla costa con lo stress del vento presente nelle 10 ore precedenti; per un punto centrale nel Golfo appaiono anticorrelate (Figura 5.17c1, c2). Il sistema è evidentemente stressato dal passaggio della perturbazione dei giorni precedenti e le correnti superficiali stentano a raggiungere un alto grado di correlazione con il vento.

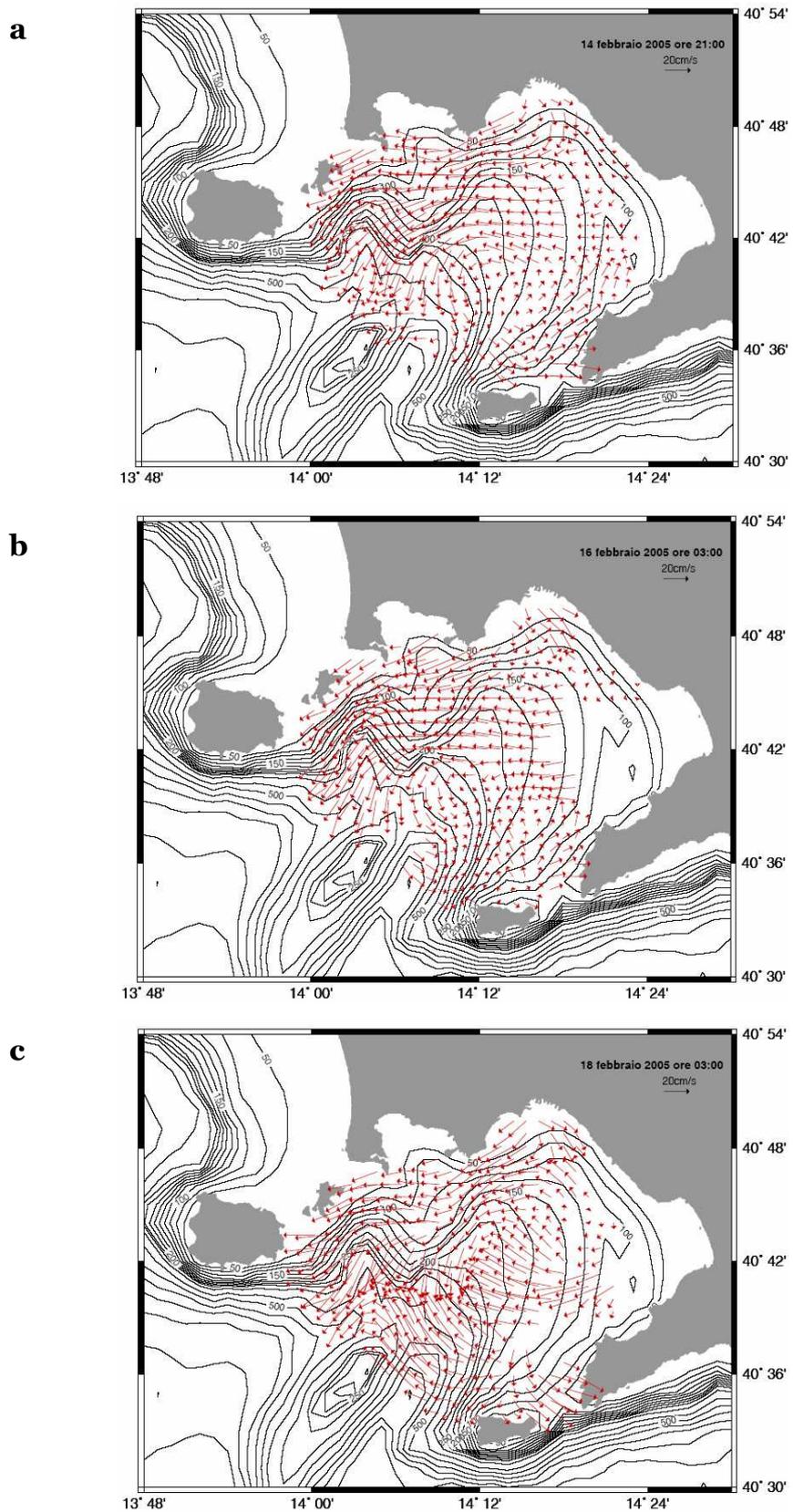


Figura 5.11 – Campi di correnti CODAR: a) 14 febbraio 2005 ore 21:00. b) 16 febbraio 2005 ore 3:00. c) 17 febbraio 2005 ore 3:00.

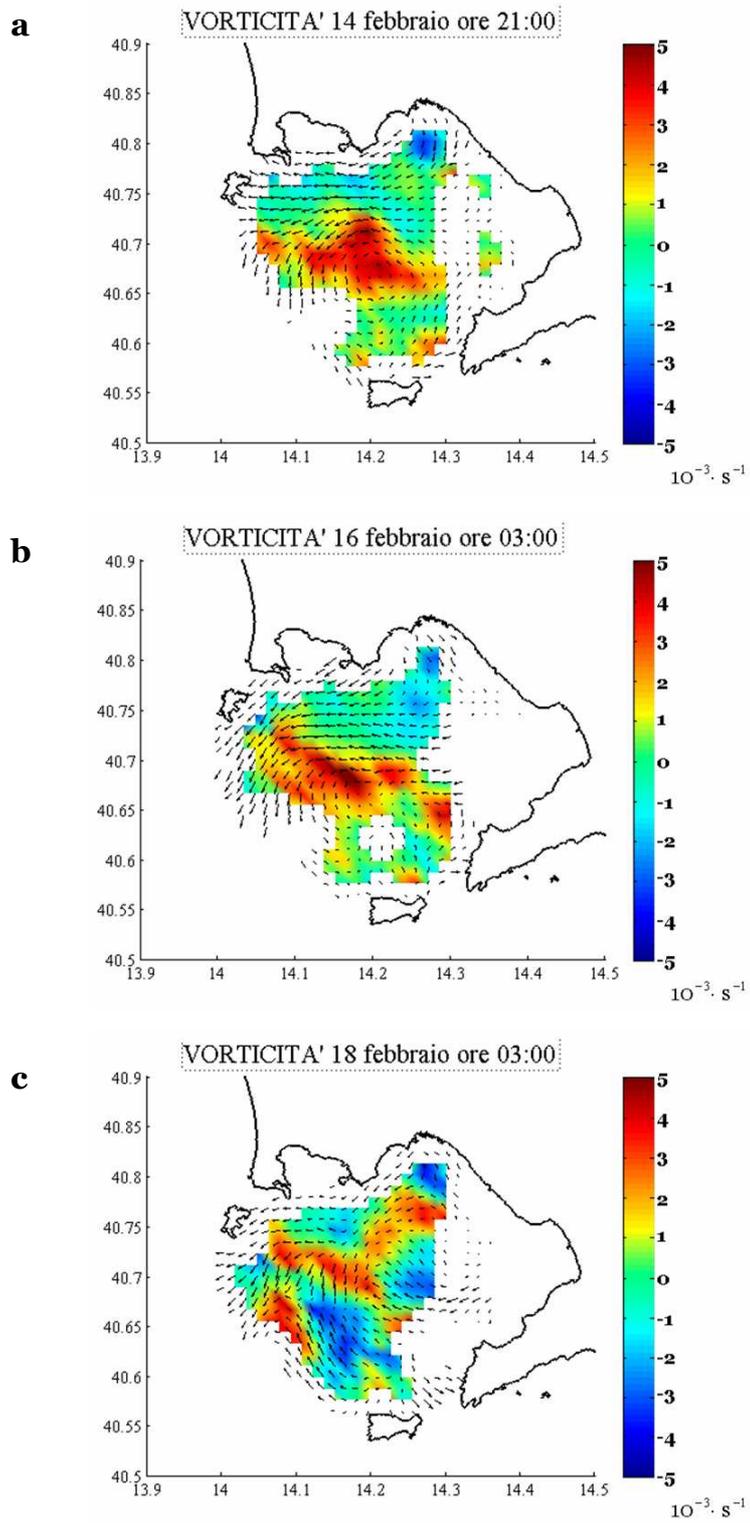


Figura 5.12 – Campi di vorticità : a) 14 febbraio 2005 ore 21:00. b) 16 febbraio 2005 ore 3:00. c) 17 febbraio 2005 ore 3:00.

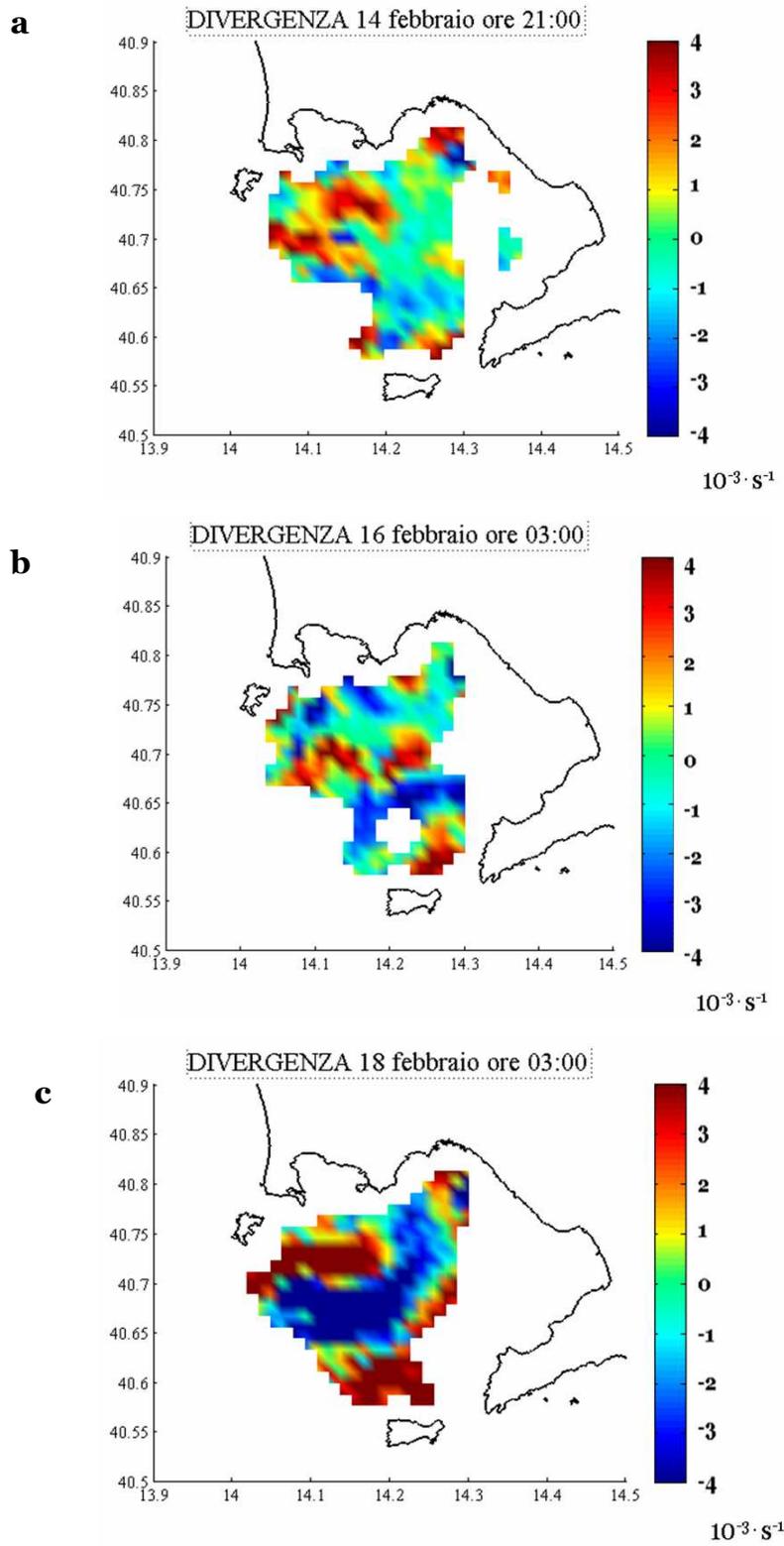


Figura 5.13 – Campi di divergenza : a) 14 febbraio 2005 ore 21:00. b) 16 febbraio 2005 ore 3:00. c) 17 febbraio 2005 ore 3:00.

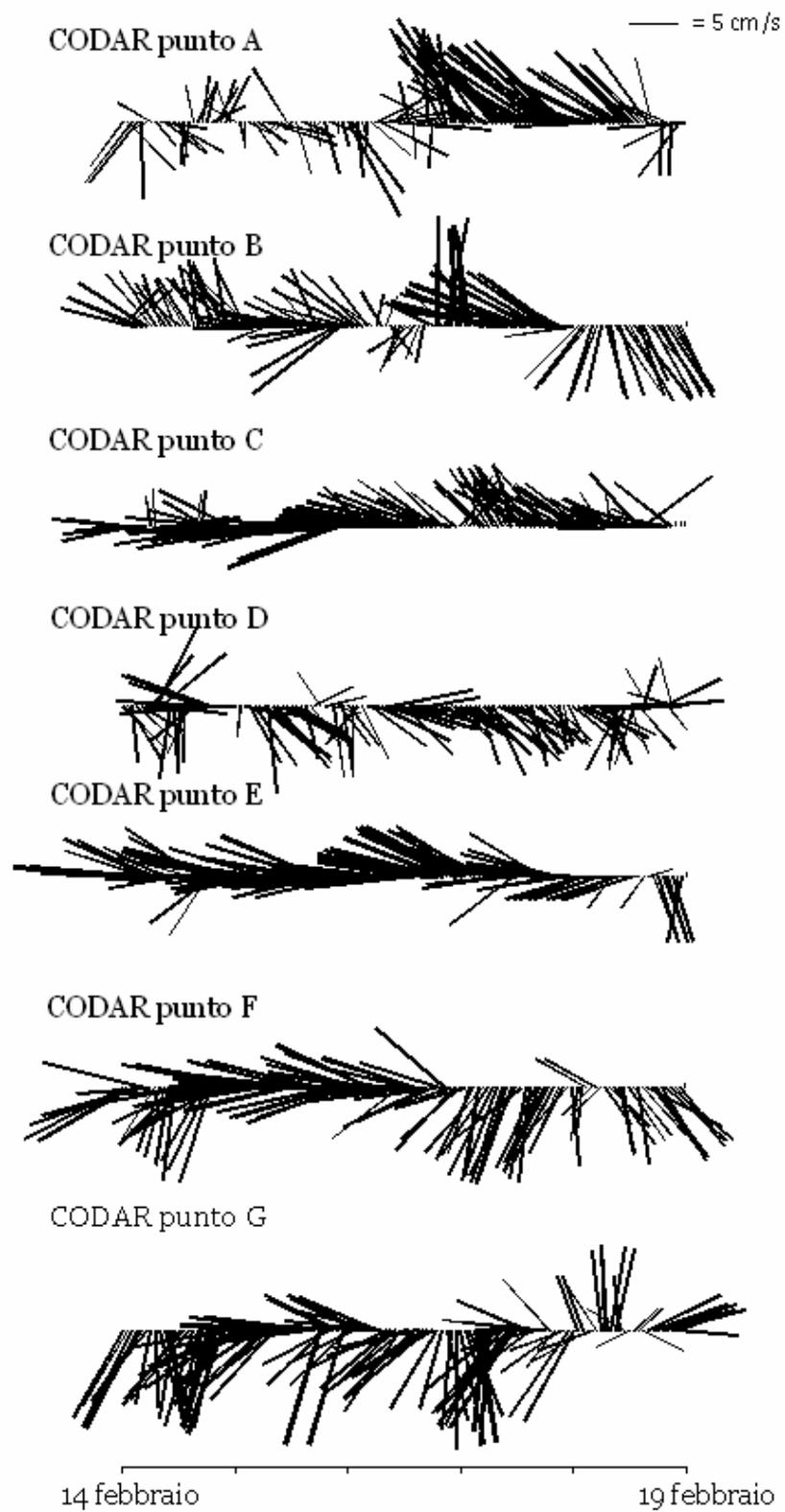


Figura 5.14 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 14-18 febbraio 05.

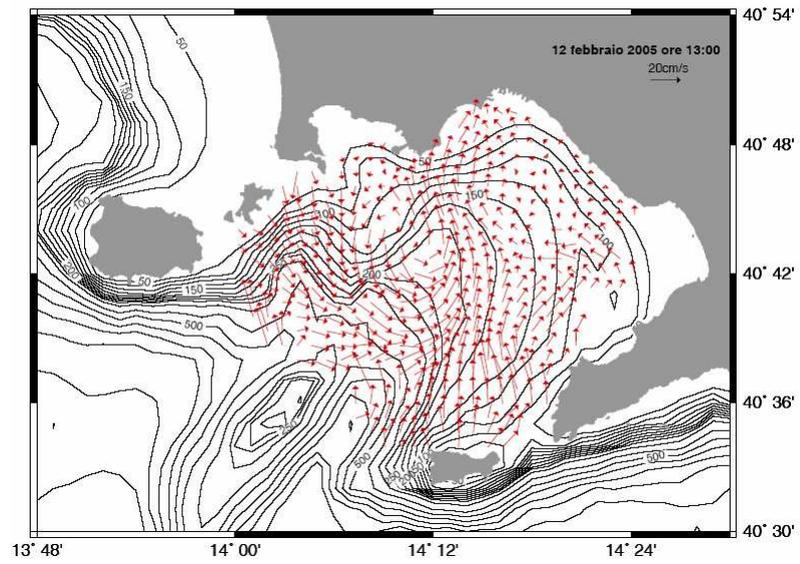


Figura 5.15 – Correnti CODAR 12 febbraio ore 13:00.

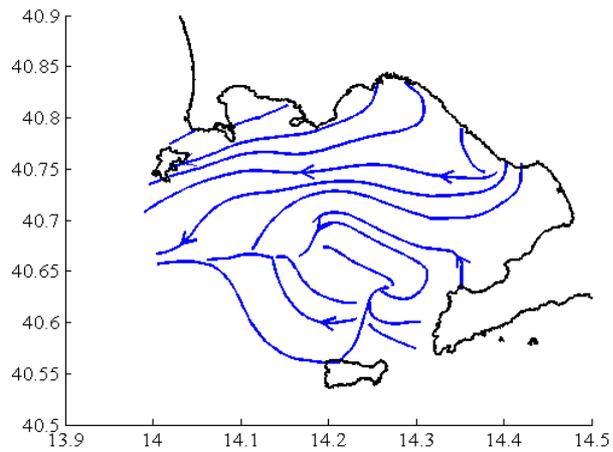


Figura 5.16 – Stream line per il campo di correnti medio del periodo 14-18 febbraio 2005.

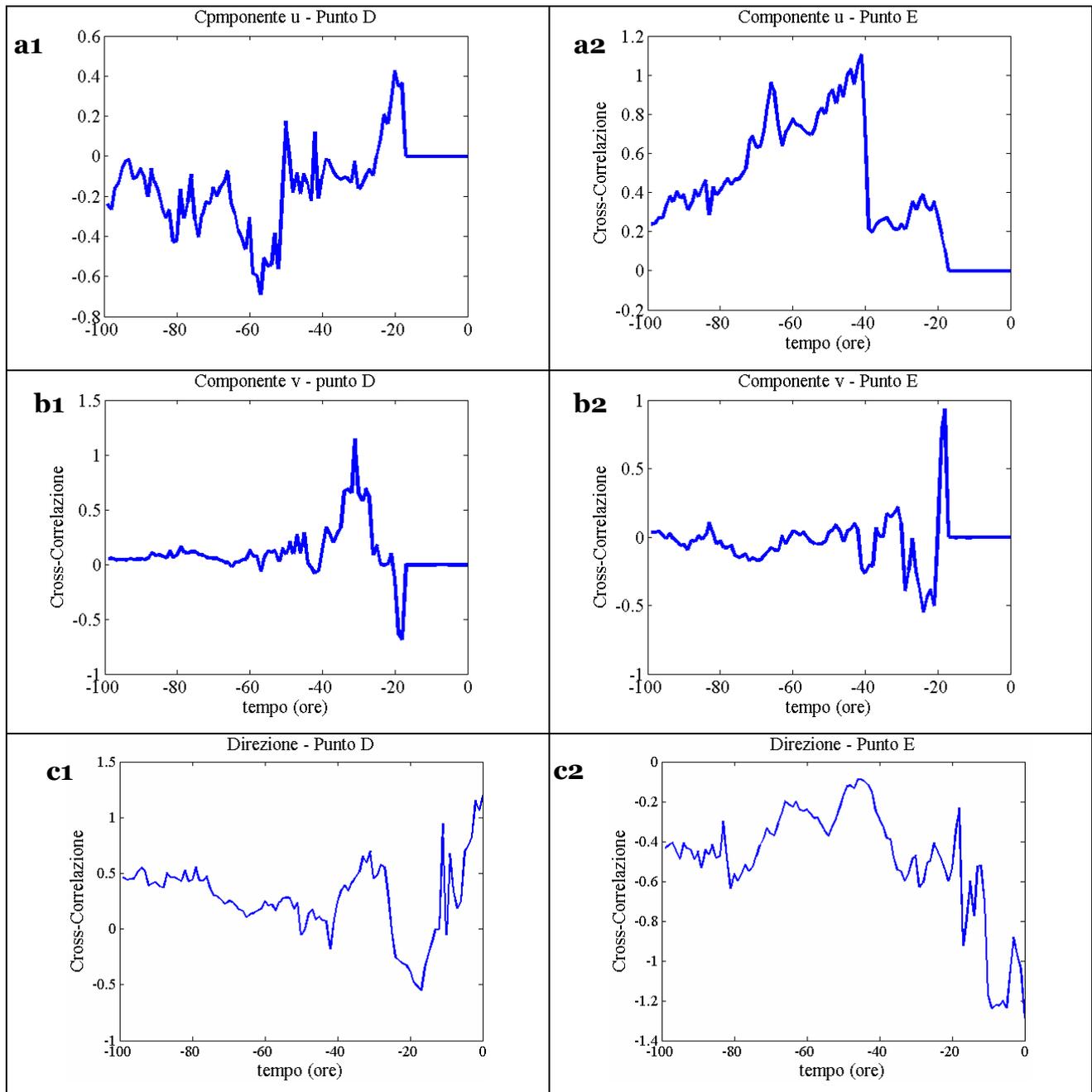


Figura 5.17– Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto D (a1) e nel punto E (a2) . b) per la componente meridionale nel punto D (a1) e nel punto E (a2) . c) per le direzioni nel punto D (a1) e nel punto E (a2) .

Caso c: Periodo 5-9 marzo 2005. Questi giorni sono caratterizzati da vento debole che solo sporadicamente supera velocità di 6-8 m/s (Figura 5.18a) diretto prevalentemente da NNE (~ 22%) e NE (~ 15%). Le prime 36 ore del periodo in esame presentano venti da W e WNW (Figura 5.18a, c); si tratta di una fase di transizione a seguito del passaggio di una perturbazione concentrata (Figura 5.18b) nei giorni 3 e 4 marzo.

Il campo di correnti risponde ai venti dai quadranti orientali orientandosi da NW a SE (Figura 5.19a) su tutta la parte interna del bacino; nell'area della Bocca Grande le direzioni delle correnti sono altamente variabili. Le velocità non superano mai i 20 cm/s; i flussi più intensi (18 cm/s) sono localizzati lungo la costa nord orientale del Golfo e nella regione centrale.

Nei giorni successivi, i venti provengono da NE ed il campo di correnti si orienta da NE a SW. Nella regione settentrionale del bacino (Figura 5.19b) si crea un flusso con intensità di circa 15-20 cm/s che tende ad incanalarsi secondo la batimetria; le regioni dinamicamente più attive sono localizzate a sud dell'isola di Procida (14.02-14.14° E, 40.68-40.78° N), dove si raggiungono velocità massime anche di 40 cm/s, e a nord dell'isola di Capri (14.18-14.3°E, 40.64-40.57°N), dove le velocità raggiunte sono dell'ordine di 30 cm/s.

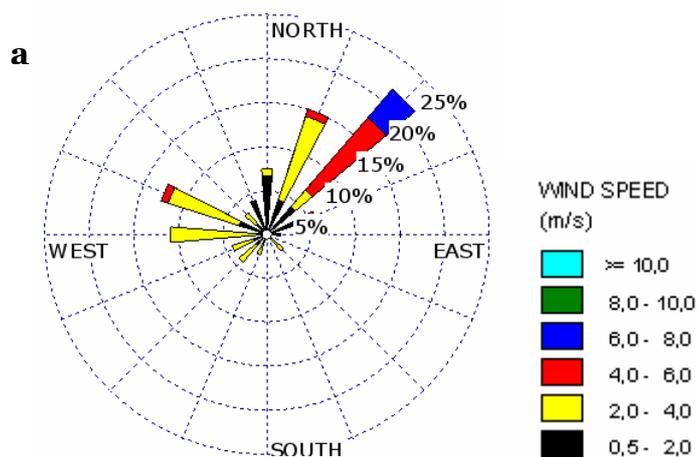
Il flusso lungo le batimetriche si stabilizza nelle ore successive (Figura 5.19c) e le correnti sono dirette da est ad ovest in tutta la parte settentrionale del bacino; le intensità maggiori (> 20 cm/s) si raggiungono per le correnti in uscita dal Golfo in prossimità della Bocca Grande. La regione meridionale del bacino è caratterizzata da modeste intensità e direzioni variabili.

Quasi tutte le aree del Golfo mostrano valori di vorticità prossimi allo zero (Figura 5.20), con tendenza alla rotazione ciclonica nella regione prossima al margine occidentale del bacino (Figura 5.20b, c). In questa area i vettori velocità tendono a divergere (Figura 5.21b, c).

I diagrammi a stick (Figura 5.22) mostrano nelle prime 36 ore la corrente che si orienta in direzione SE e SW, seguendo alla direzione preferenziale dei venti (quadrante NW; Figura 5.18). Nelle ore successive si nota la tendenza delle correnti a muoversi in direzione zonale (in particolare nei punti B, C, E, F, G); i punti A e D, rispettivamente localizzati alla Bocca Grande e nella Baia di Napoli, sono caratterizzati da una certa variabilità direzionale.

Le stream line (Figure 5.23), riferite al campo medio di correnti, evidenziano un orientamento delle correnti in direzione NE-SW in tutte le regioni del Golfo.

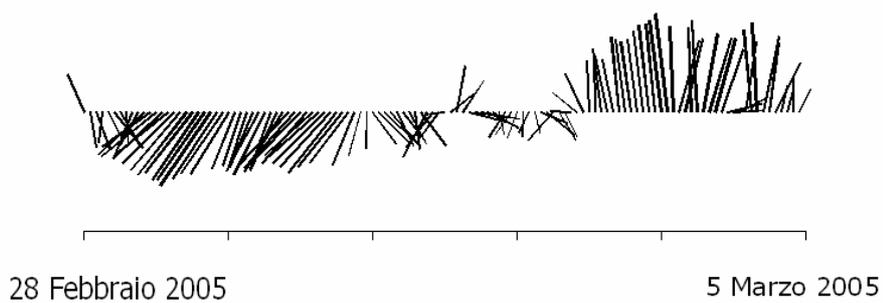
Le cross-correlazioni delle componenti (Figura 5.21a1, a2, b1, b2) hanno valori pari a zero per tutti i punti presi in esame. Le direzioni risultano meglio e più a lungo correlate per punti centrali nel Golfo (Figura 5.22c1, c2).



Vento Acton

— = 5 m /s

b



c

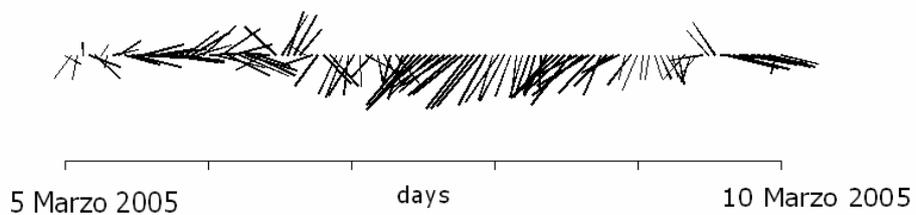


Figura 5.18 – Rosa (a) e diagrammi a stick (b) dei venti registrati dalla stazione ACTON nei periodi 28 febbraio – 4 marzo e (c) 5-9 marzo 2005.

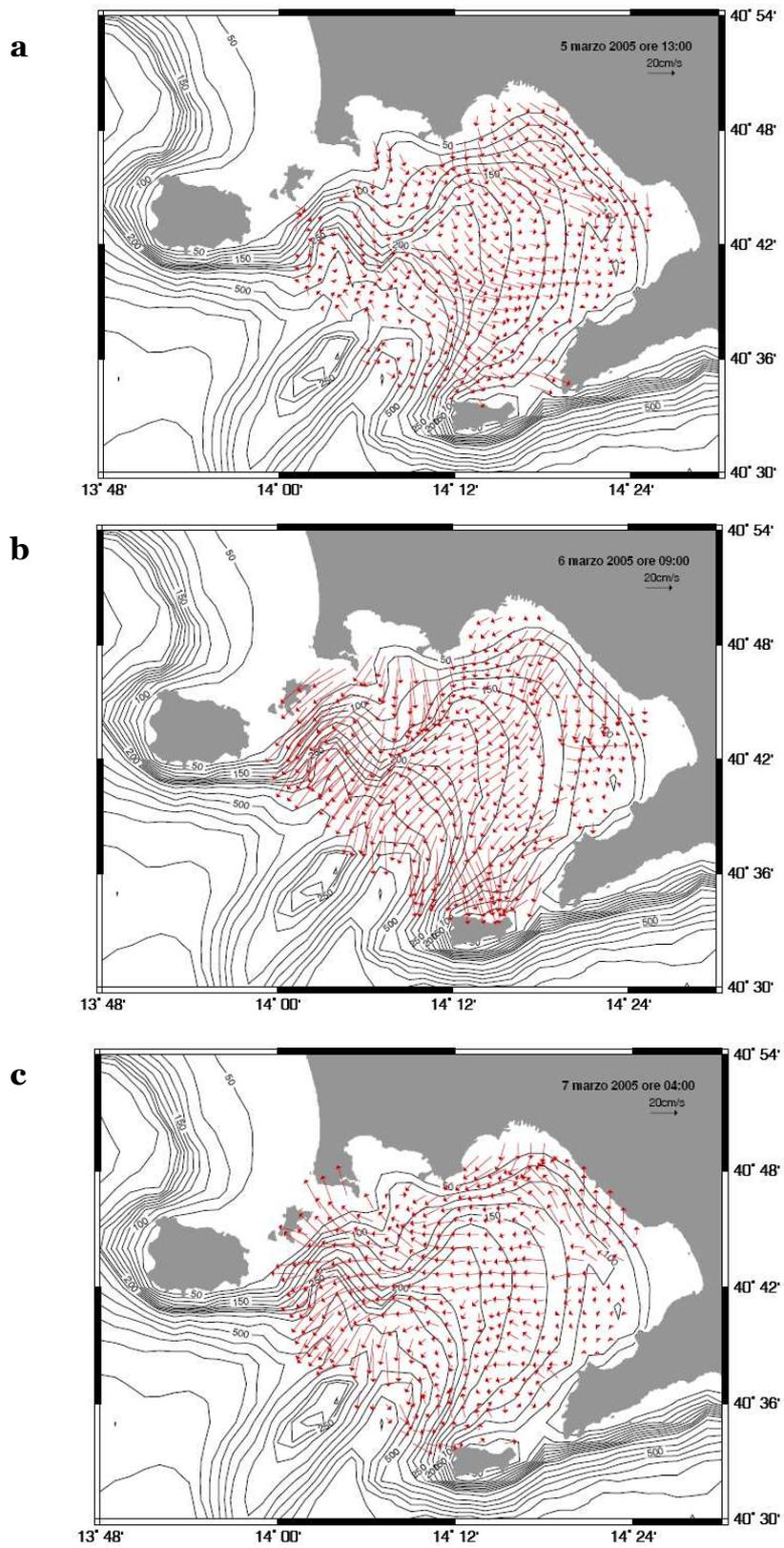


Figura 5.19 – Campi di correnti CODAR : a) 5 marzo 2005 ore 13:00. b) 6 marzo 2005 ore 9:00. c) 7 marzo 2005 ore 9:00.

a

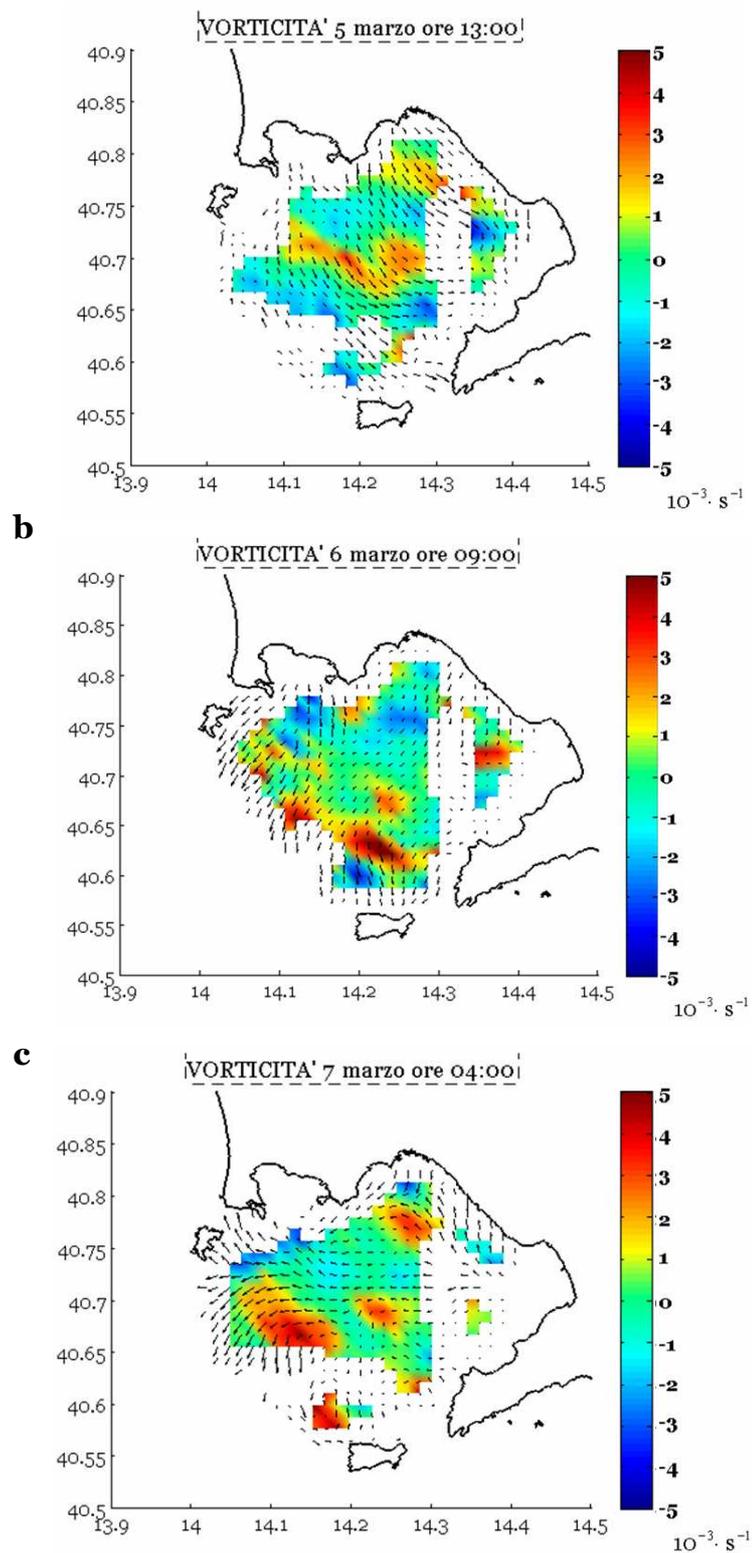


Figura 5.20 – Campi di vorticità : a) 5 marzo 2005 ore 13:00. b) 6 marzo 2005 ore 9:00. c) 7 marzo 2005 ore 4:00.

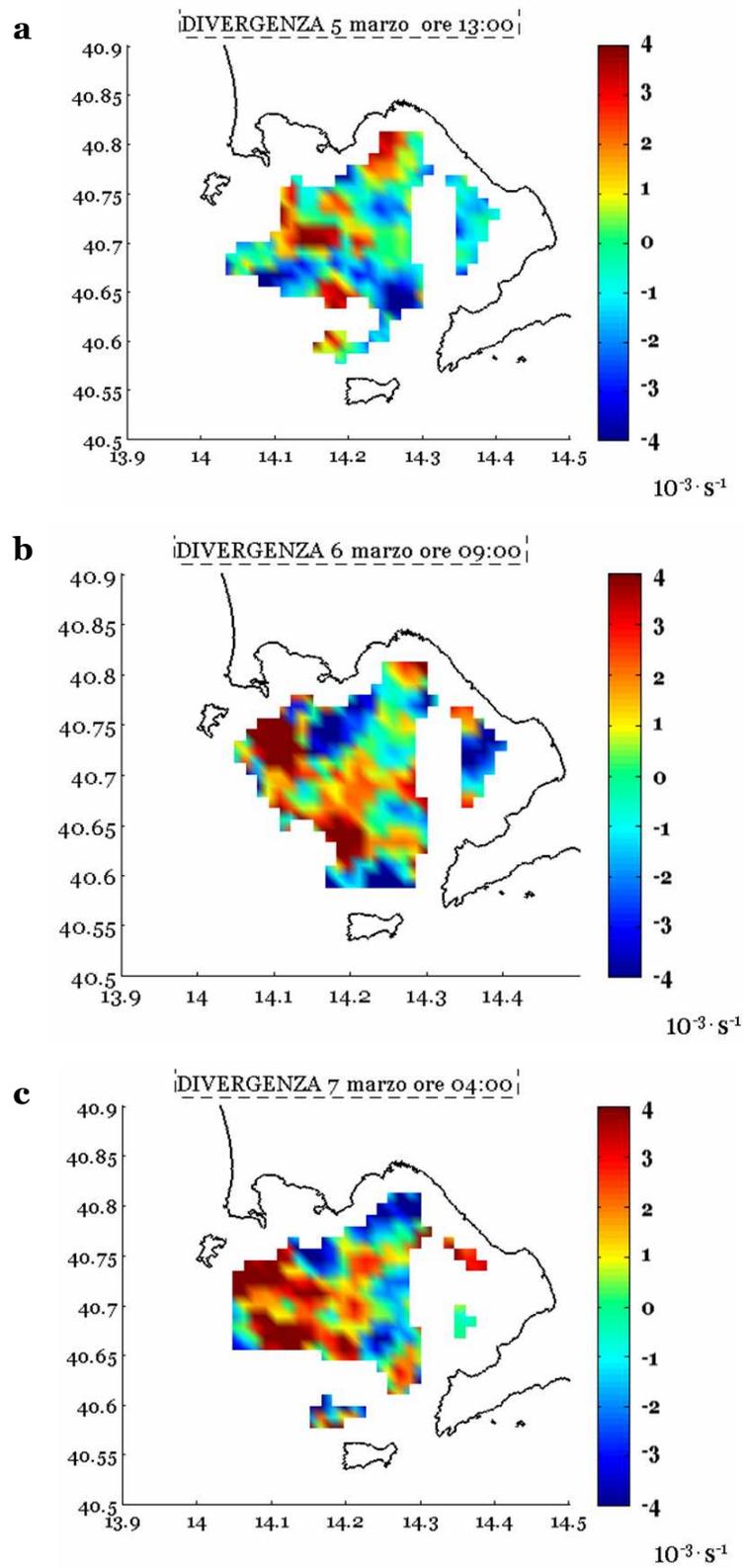


Figura 5.21 – Campi di divergenza : a) 5 marzo 2005 ore 13:00. b) 6 marzo 2005 ore 9:00.
c) 7 marzo 2005 ore 4:00.

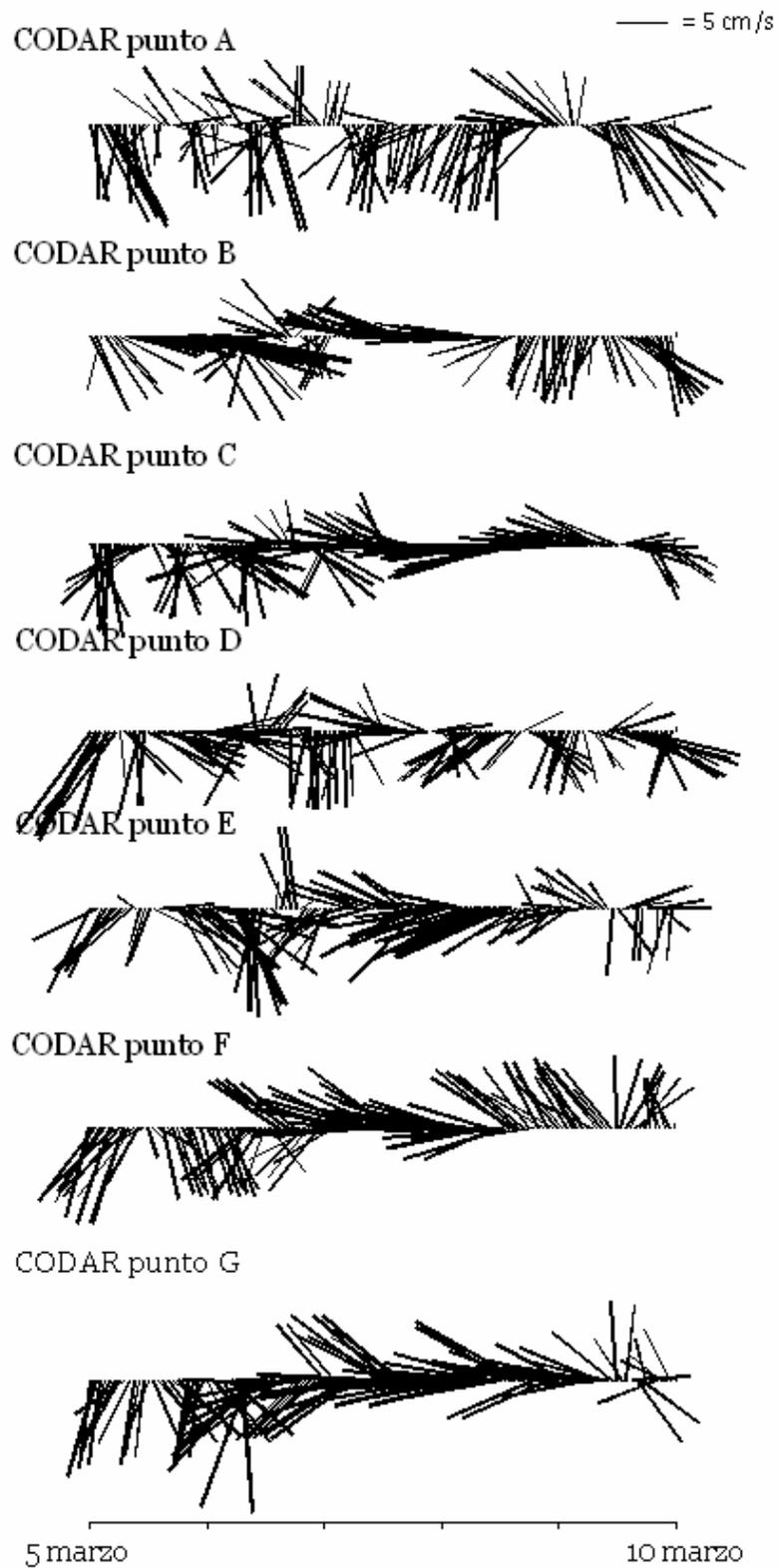


Figura 5.22 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 5-9 marzo 05.

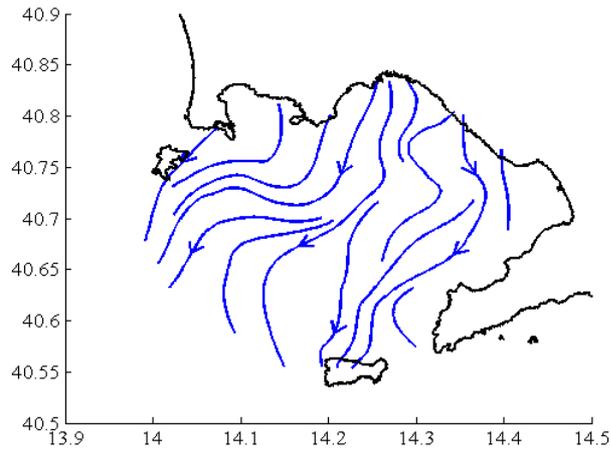
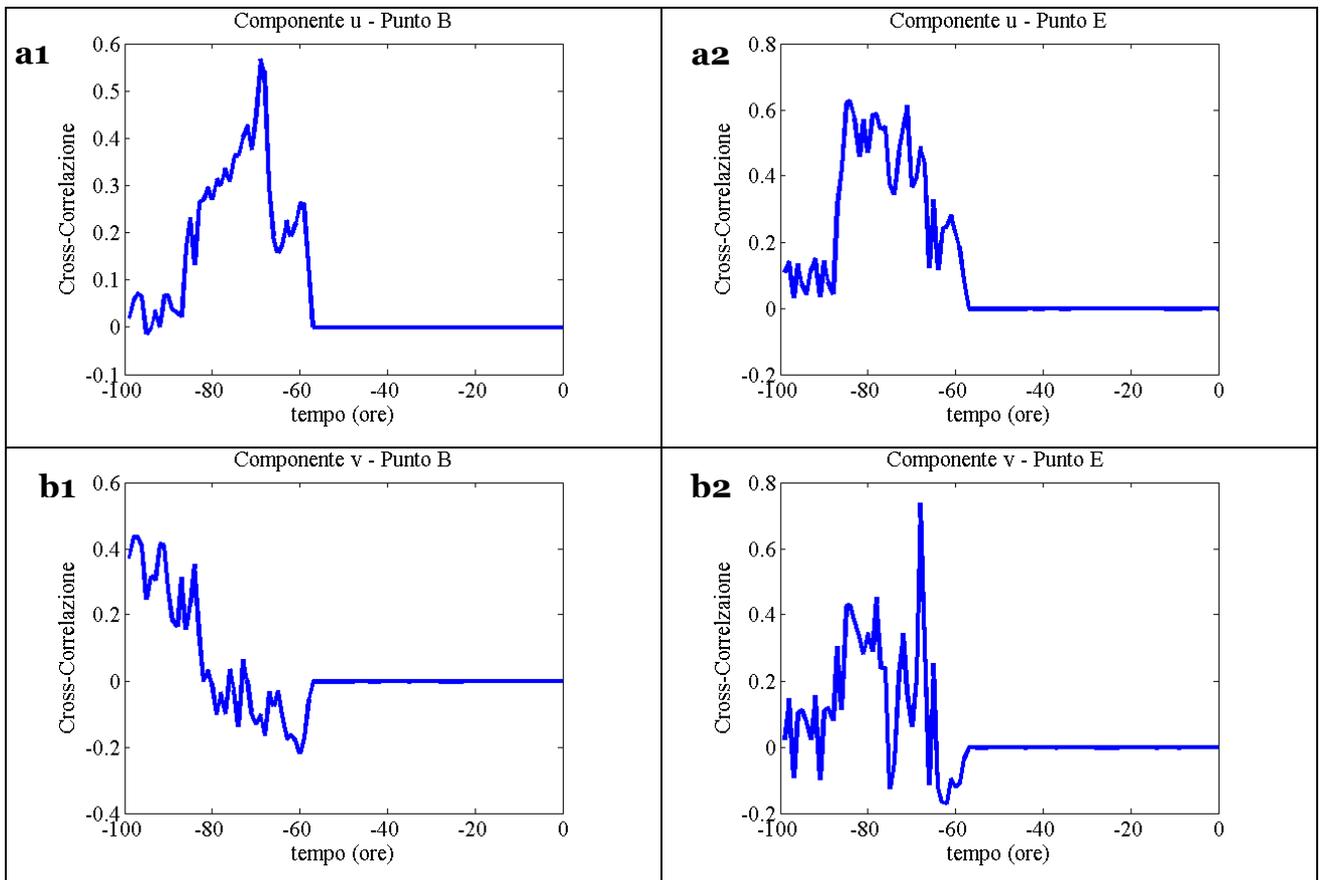


Figura 5.23 – Stream line per il campo di correnti medio del periodo 5-9 marzo 2005.



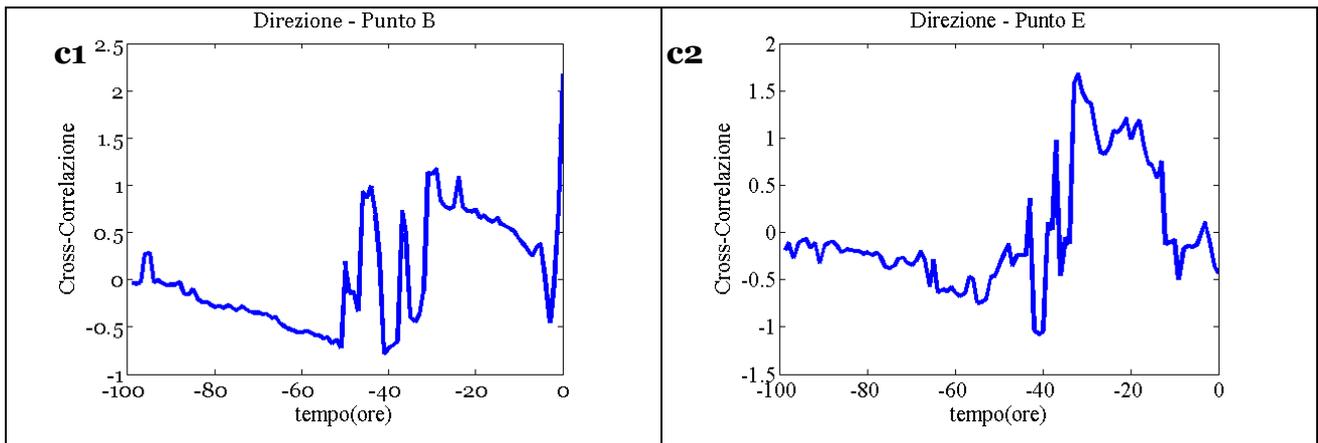


Figura 5.24 – Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto B (a1) e nel punto E (a2) . b) per la componente meridionale nel punto B (a1) e nel punto E (a2) . c) per le direzioni nel punto B (a1) e nel punto E (a2) .

5.4.2 Venti dal quadrante SW. In condizione di vento da SW, le correnti superficiali tendono ad entrare nel Golfo provocando l'accumulo di acqua nell'area costiera. Come osservato dai risultati del Capitolo 4, queste situazioni si verificano nei periodi invernali a seguito di abbassamenti della pressione atmosferica (cicloni), e persistono per tutta la durata della perturbazione (periodo variabile da qualche ora a qualche giorno).

Per esaminare nel dettaglio il tipo di circolazione legata a questi venti, si è scelto il periodo dal 17 al 21 gennaio 2007, caratterizzato da 5 giorni di vento da W-SW (Figura 5.25a). Nei 5 giorni precedenti al periodo preso in esame il vento è debole (Figura 5.25b) e variabile come direzioni poiché segue le piccole oscillazioni di pressione (Figura 5.26) con un periodo di 12-15 ore.

Le registrazioni della stazione interna al Golfo (Figura 5.25a) mostrano come più frequenti i venti provenienti da SW (~ 26%), seguiti da SSW (~ 15%) e da S (~ 13%). Le intensità maggiori registrate (8-10 m/s) sono riferite ai venti provenienti da S.

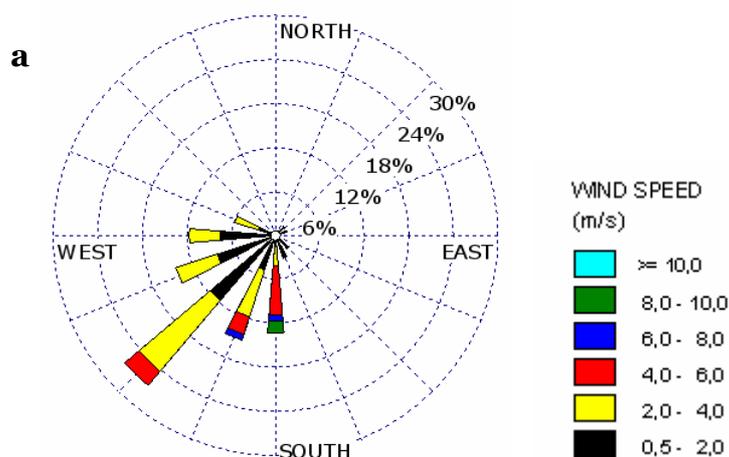
I campi di corrente (Figura 5.27) mostrano la generale tendenza delle correnti a dirigersi verso la costa, trasportate da un jet particolarmente intenso (velocità anche > 30 cm/s). Il giorno 17 il vento proviene da sud e spinge l'acqua superficiale ad entrare nel Golfo attraverso le regioni ad est (Bocca Piccola) e ad ovest dell'isola di Capri (Figura 5.27a). Una parte di questo flusso forma un jet diretto dalla Bocca Piccola verso la Baia di Napoli (S-N), l'altra parte entra in una struttura ciclonica localizzata nella regione occidentale del Golfo (Figure 5.28a) che tende a trasportare acqua fuori dal Golfo.

Il giorno 18 l'asse del jet assume direzione SW-NE (Figura 5.27b); la regione a ovest del jet è interessata da una circolazione con andamento ciclonico (Figura 5.28b), quella ad est presenta una circolazione meno organizzata e caratterizzata da elevata variabilità temporale. Nell'area della Bocca Grande il flusso è diretto verso sud e non vi è fuoriuscita di acqua dal Golfo. Questo tipo di circolazione persiste fino alla fine del periodo (Figura 5.27c); il flusso lungo la Bocca Grande diventa più intenso e la struttura ciclonica si distende verso la regione meridionale del bacino chiusa tra il suddetto flusso e il jet (Figura 5.28c).

Le stream line (Figura 5.31), mostrano che il flusso alla Bocca Grande mediamente è entrante e trasporta acqua nel Golfo fino alle regioni costiere; si creano delle regioni di ricircolo ed est e ad ovest del flusso centrale.

Gli stick diagram mostrano nei punti B, C, D (Figura 5.30), interni al jet, correnti intense ed orientate a N-NE; i punti E, F, G sono invece localizzati nell'area della struttura ciclonica, quindi hanno direzioni variabili e spesso dirette a sud; il punto A, prossimo alla Bocca Grande, mostra nei primi tre giorni il flusso in entrata nel Golfo, mentre nei giorni successivi è interessato dal flusso diretto a sud lungo il margine del bacino (Figure 5.30 e 5.27c).

La correlazione tra componenti delle correnti e dello stress del vento presente nelle venti ore precedenti è pari a zero, seguita da un picco di correlazione o anticorrelazione (Figura 5.32). Le direzioni mostrano un picco di correlazione con il vento presente nelle 2-3 ore precedenti (Figura 5.32c1, c2).



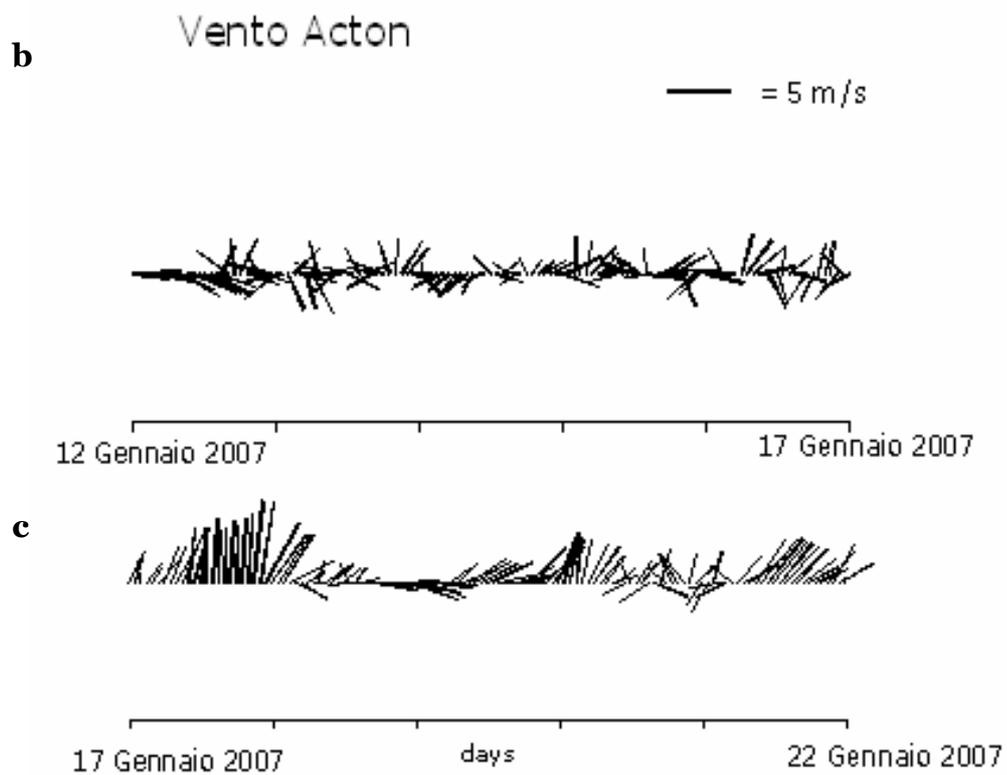


Figura 5.25 – Rosa (a) e diagrammi a stick (b) dei venti registrati dalla stazione ACTON nei periodi 12 – 16 gennaio e (c) 17-21 gennaio 2007.

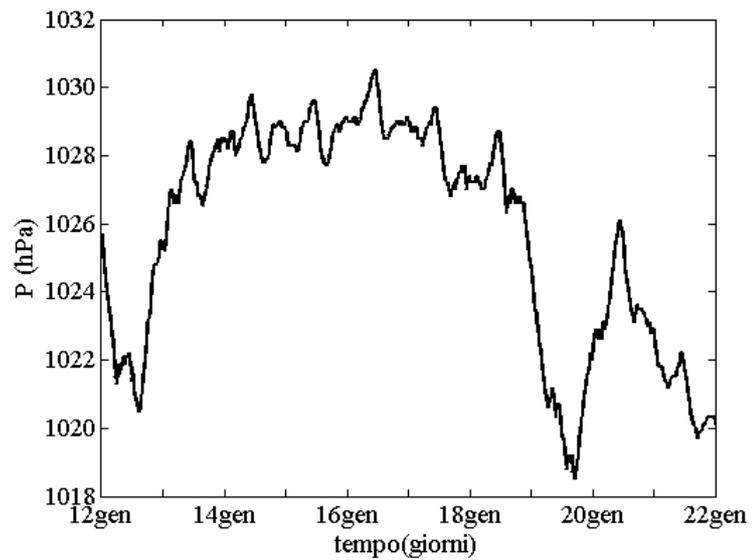


Figura 5.26 – Andamento della pressione atmosferica nei giorni 12-22 gennaio 2007.

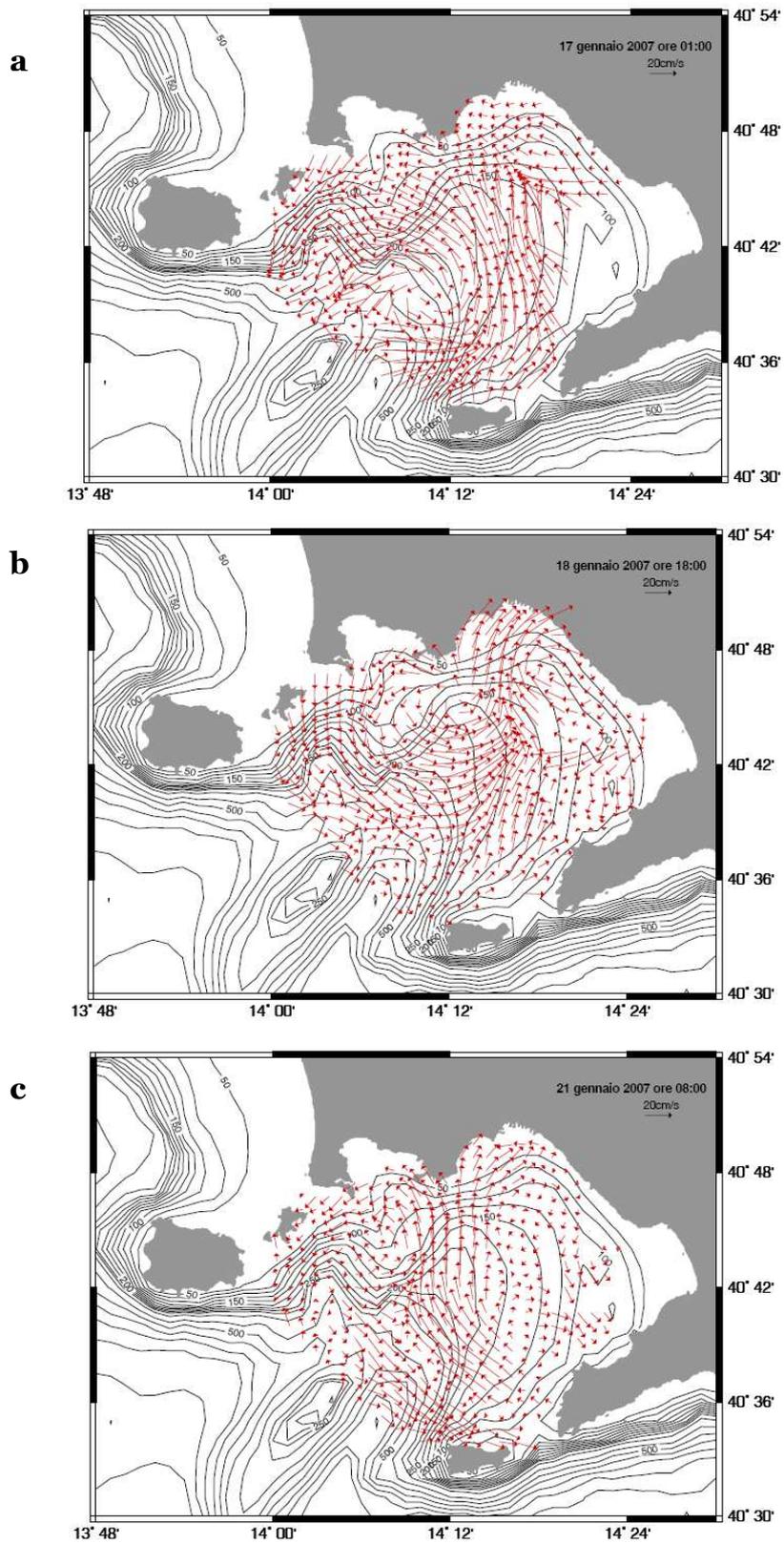


Figura 5.27 – Campi di correnti CODAR : a) 17 gennaio 2007 ore 1:00. b) 18 gennaio 2007 ore 18:00. c) 21 gennaio 2007 ore 8:00.

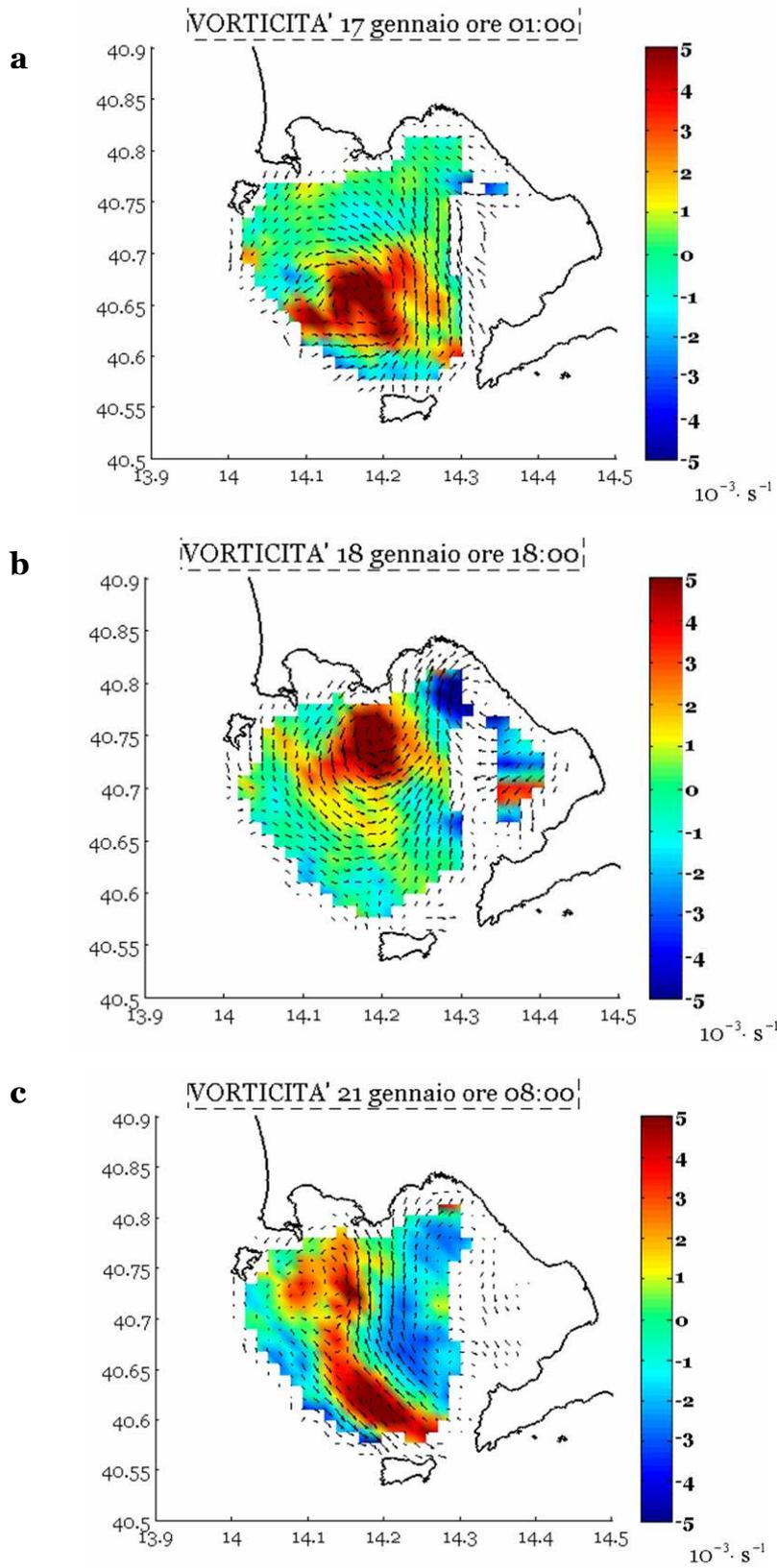


Figura 5.28 – Campi di vorticità : a) 17 gennaio 2007 ore 1:00. b) 18 gennaio 2007 ore 18:00. c) 21 gennaio 2007 ore 8:00.

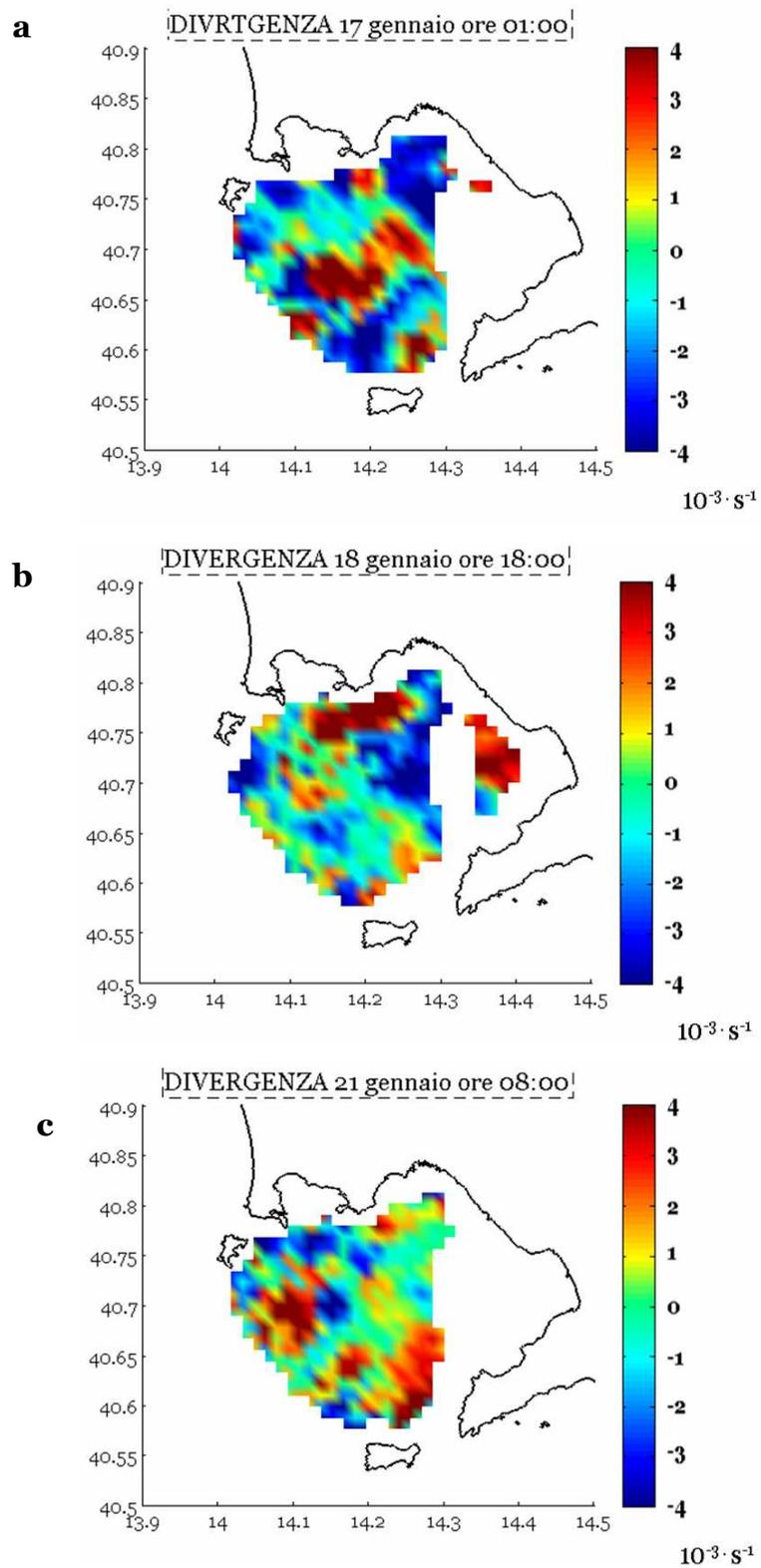


Figura 5.29 – Campi di divergenza : a) 17 gennaio 2007 ore 1:00. b) 18 gennaio 2007 ore 18:00. c) 21 gennaio 2007 ore 8:00.

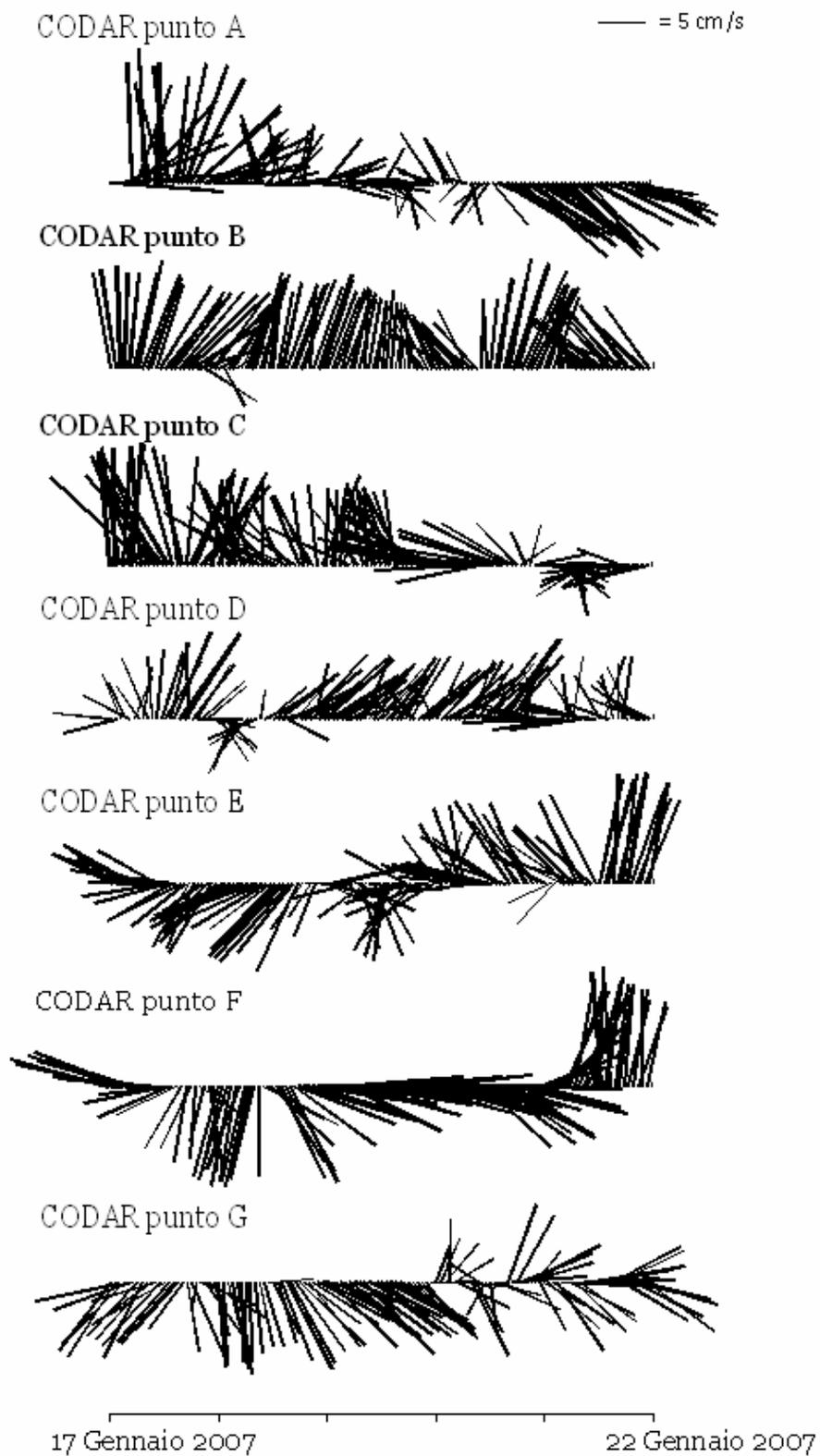


Figura 5.30 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 17-21 gennaio 07.

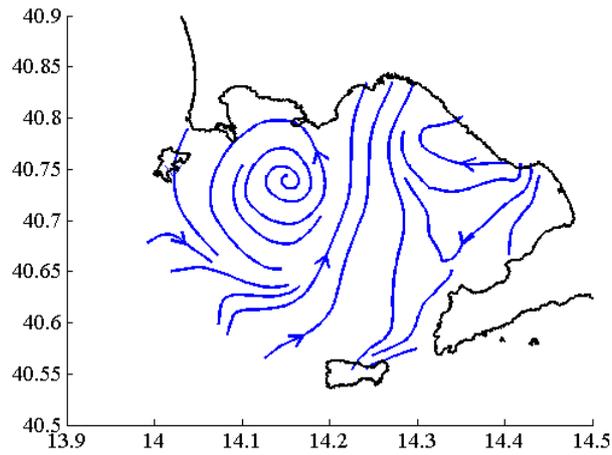
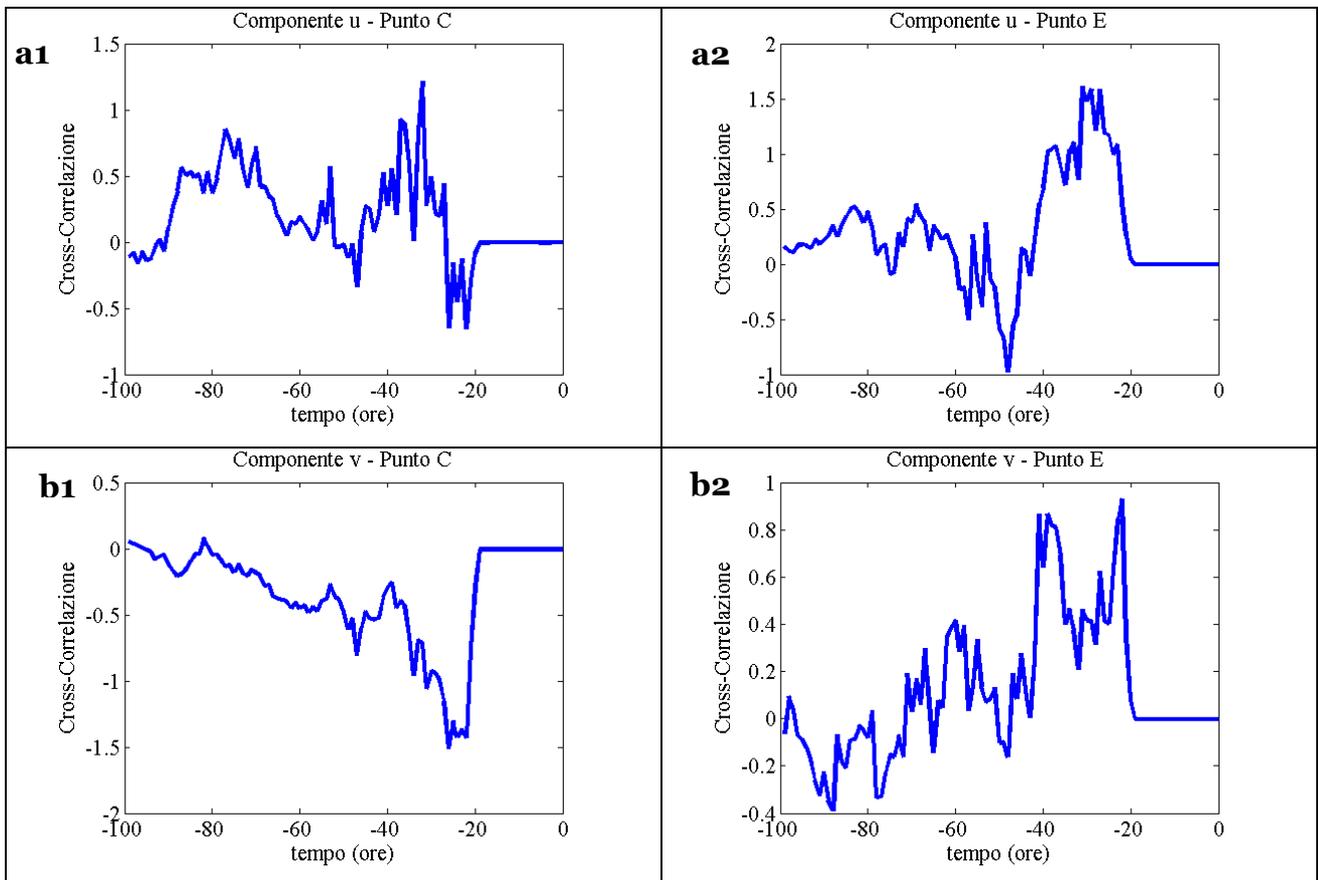


Figura 5.31 – Stream line per il campo di correnti medio del periodo 17-21 gennaio 2007.



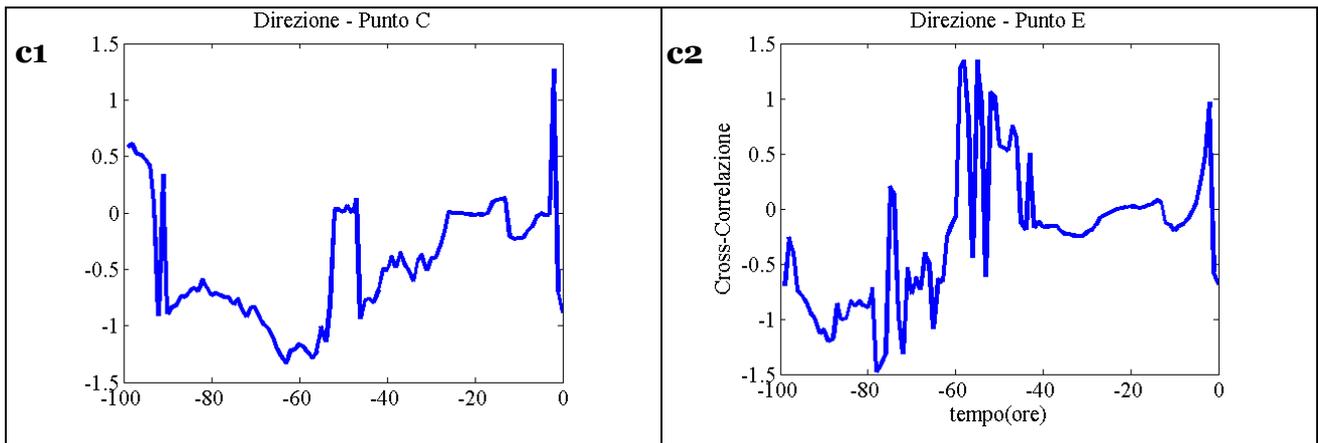


Figura 5.32 – Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto C (a1) e nel punto E (a2) . b) per la componente meridionale nel punto C (a1) e nel punto E (a2) . c) per le direzioni nel punto C (a1) e nel punto E (a2) .

5.4.3 Regime di brezza. Il regime di brezza è caratterizzato da venti che spirano da mare verso terra (SW) durante le ore più calde della giornata, e da terra verso mare (NE) durante le ore notturne e prime ore della mattinata; un esempio di come si dispone il vento nel Golfo di Napoli in regime di brezza è mostrato in Figura 4.20. Come già approfondito nel Capitolo 4, la brezza è un vento locale dovuto alla differenza di temperatura tra due aree contigue, per questo motivo esso non raggiunge intensità particolarmente elevate.

Caso a: Periodo 16-23 marzo 2005. L'intensità del vento (Figura 5.33b) oscilla seguendo l'andamento giornaliero delle brezze, e mostra valori massimi intorno alle ore 12:00-13:00 di ogni giorno e valori minimi nelle ore notturne intorno alla mezzanotte; la brezza di mare è, quindi, più intensa della brezza di terra, perché in genere durante il giorno la differenza di temperatura tra mare e terra è superiore. L'intensità della corrente oscilla seguendo il vento con un ritardo tra le 15 e le 20 ore (Figura 5.34).

Le correnti superficiali seguono i cambiamenti di direzione del vento orientandosi lungo l'asse zonale, in direzione W-E durante le ore in cui spira brezza di mare (Figura 5.35c), e in direzione E-W durante le ore in cui spira brezza di terra (Figura 5.35a); nelle ore di transizione tra una situazione e l'altra tendono a disporsi in direzione meridionale (Figura 5.35b, d). In sostanza, le correnti compiono una rotazione completa di 360° sulla superficie del Golfo, ricoprendo un quarto di giro ad intervalli regolari sei ore circa.

Indipendentemente da come è orientata la corrente, l'asse centrale del flusso è sempre l'area in cui si raggiungono le velocità più sostenute, il cui valore è di ~ 20 cm/s (Figura 5.35).

I diagrammi a stick mostrano la rotazione delle correnti nell'arco di ogni giornata; il comportamento delle correnti è molto simile in tutti i punti del Golfo (Figura 5.36).

La cross-correlazione tra stress del vento e correnti per le componenti u e v (Figura 5.37a1, a2, b1, b2) evidenzia, in tutti i punti presi in esame, delle oscillazioni regolari del segnale con picchi di correlazione ed anticorrelazione che si ripetono ad intervalli di 24-25 ore. La stessa periodicità è riscontrata anche per le direzioni (Figura 5.37c1, c2), dimostrando che ogni punto del Golfo ed il vento assumono, ad ogni ora, la stessa posizione che avevano assunto 24 ore prima.

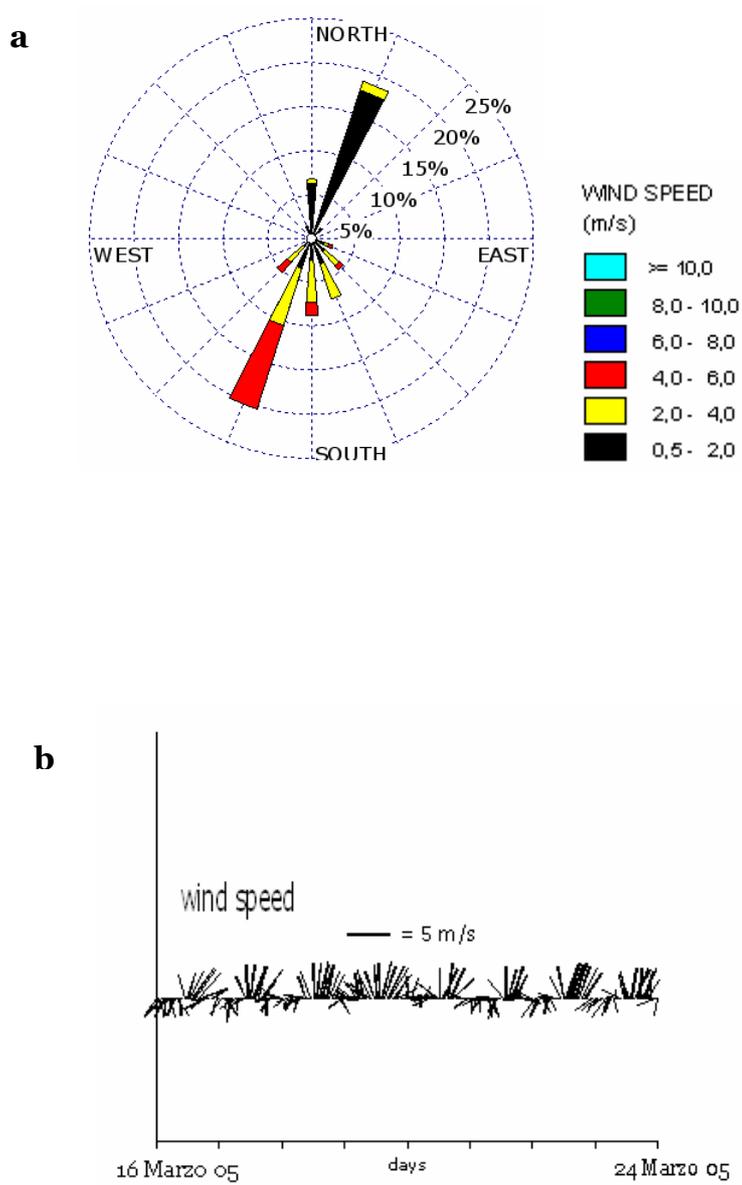


Figura 5.33 – a) Rosa dei venti relativa alla stazione ACTON. b) Diagramma a stick per il periodo 16-23 marzo 2005.

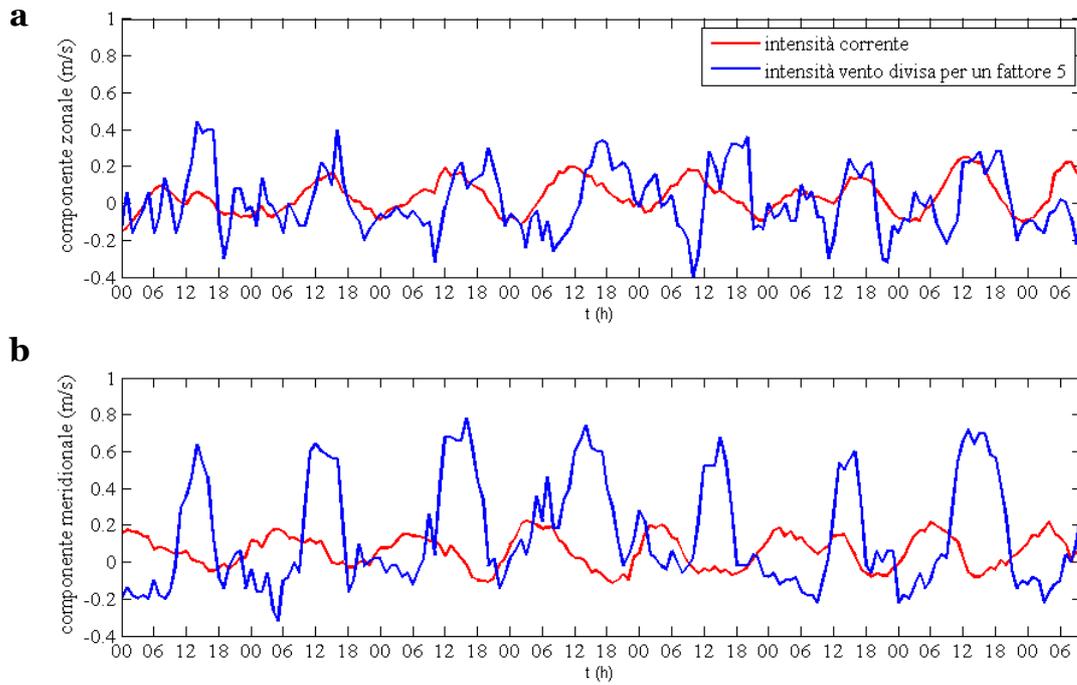


Figura 5.34 – Serie temporali della componente zonale (a) e meridionale (b) della velocità del vento e del punto corrente F (Figura 5.2). Le intensità del vento sono state divise per un fattore 5.

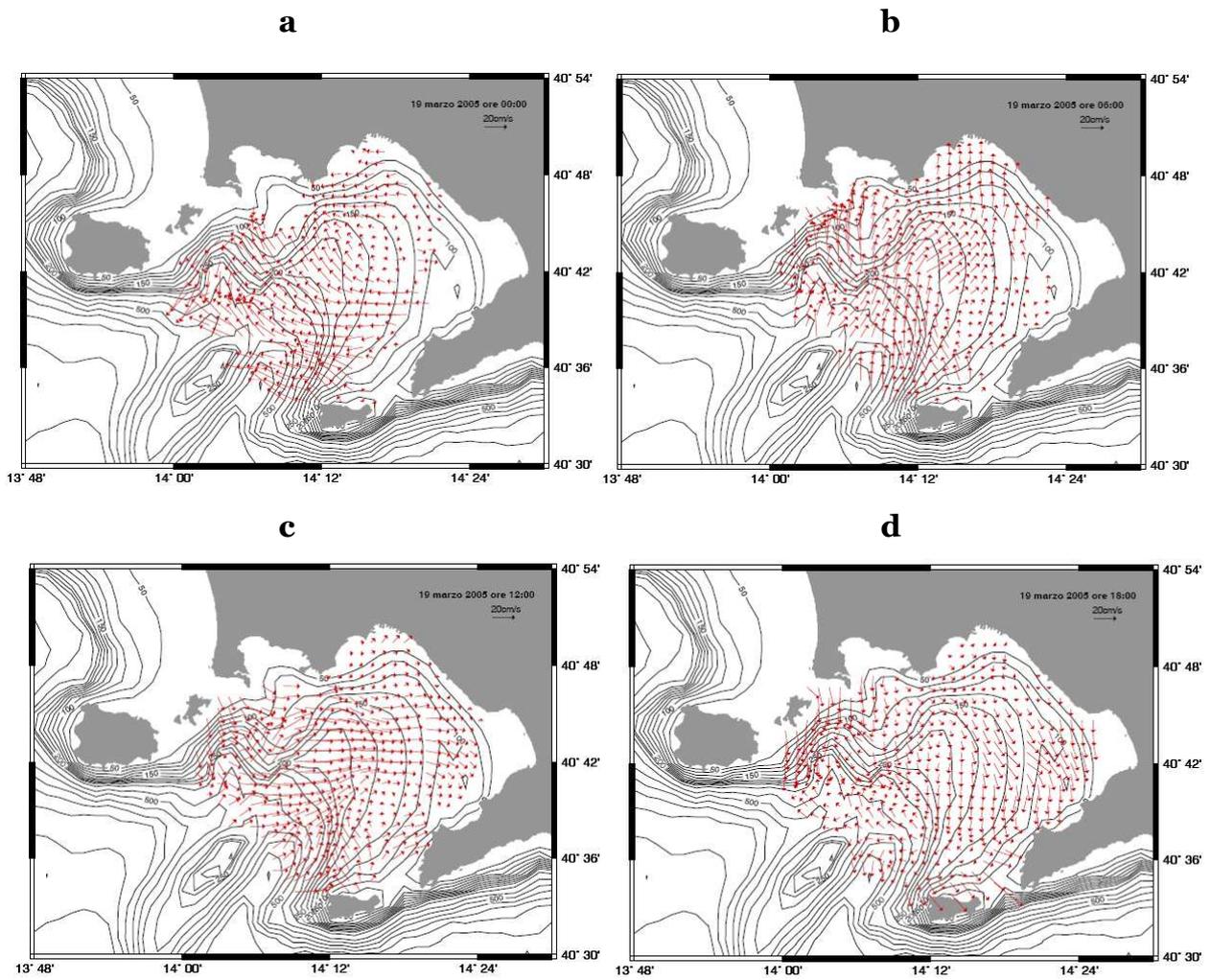


Figura 5.35 – Andamento giornaliero delle correnti CODAR in presenza del regime di brezza, 19 marzo 2005: a) ore 00:00, b) ore 06:00, c) ore 12:00, d) ore 18:00. Le correnti nell'arco di 24 ore compiono una rotazione in senso orario che interessa tutte le regioni del Golfo.

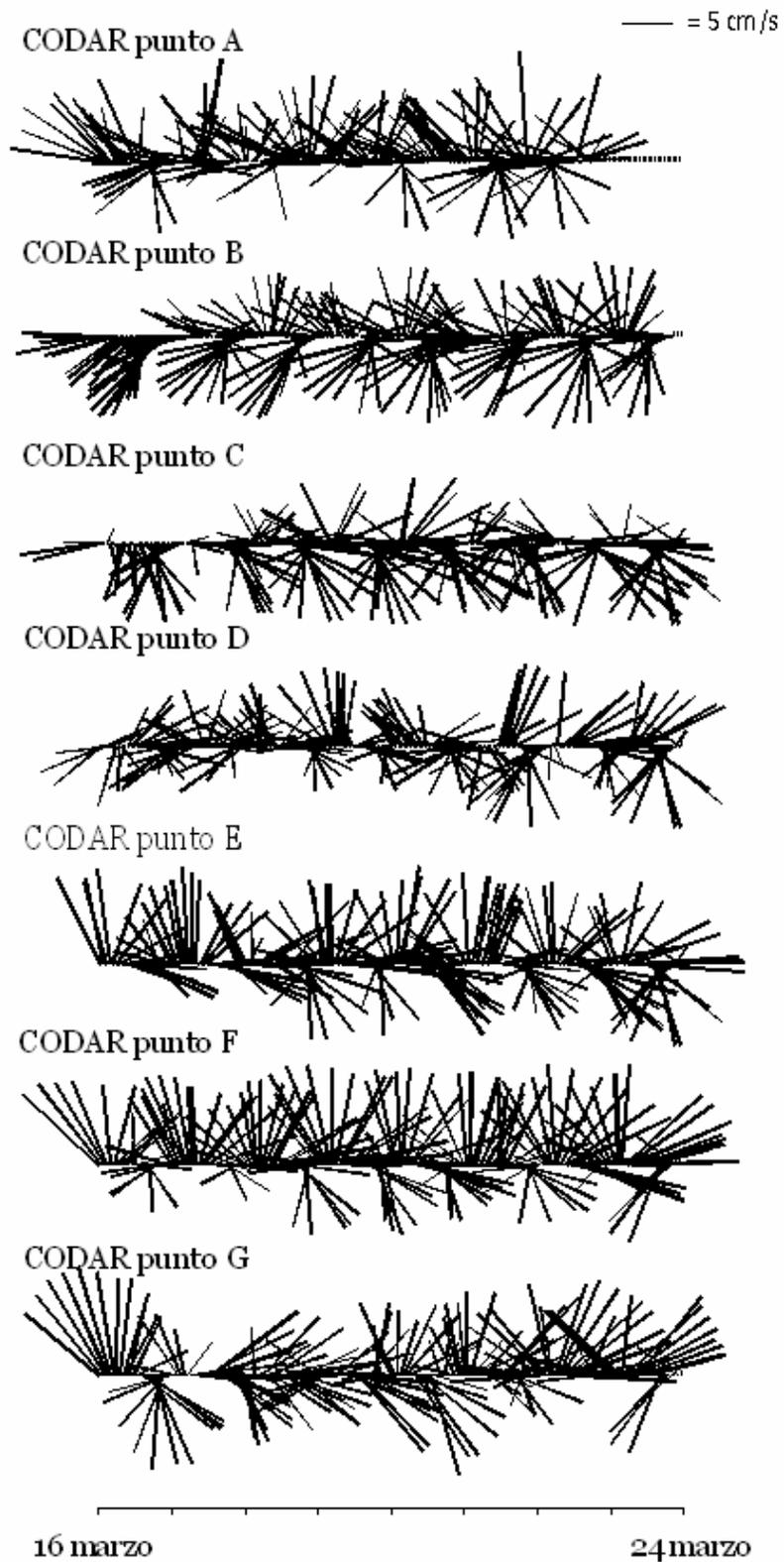


Figura 5.36 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 16-23 marzo 2005.

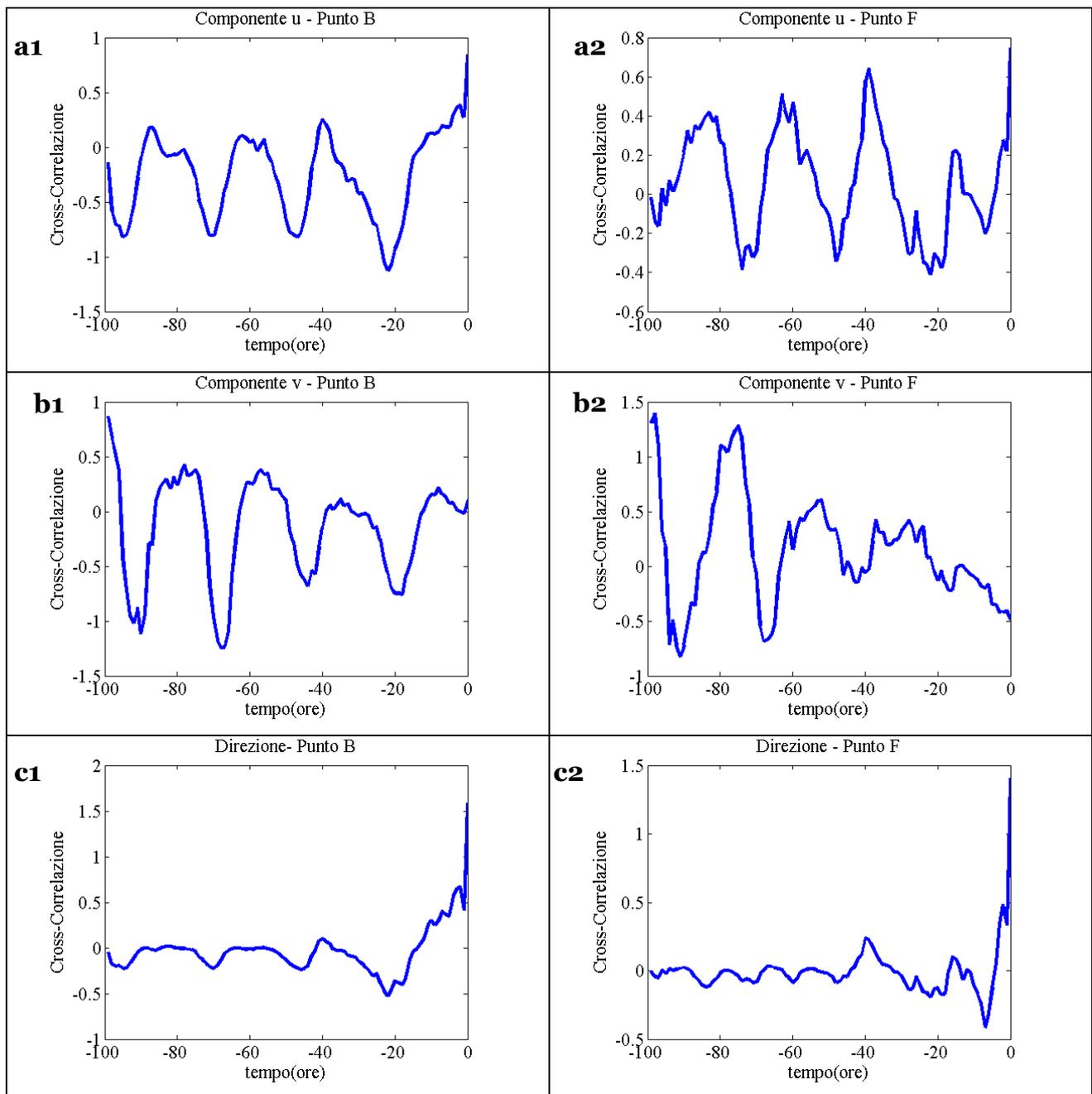


Figura 5.37 – Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto B (a1) e nel punto F (a2) . b) per la componente meridionale nel punto B (a1) e nel punto F (a2) . c) per le direzioni nel punto B (a1) e nel punto F (a2) .

Caso b: Periodo 1-8 agosto 2007. I venti più frequenti sono allineati sull'asse NE-SW (~ 13%) e le intensità massime sono comprese nell'ordine dei 6-8 m/s (Figura 5.38a) e sono più frequenti in direzione SW.

Le componenti della velocità della corrente oscillano (Figura 5.39) seguendo le oscillazioni del vento, con un ritardo di circa 12 ore.

I campi di corrente mostrano la tipica rotazione giornaliera della direzione del flusso in senso orario (Figure 5.40 e 5.41); le intensità maggiori si raggiungono alle ore 12:00 (Figura 5.40c) ed alle ore 18:00 (Figura 5.40d).

Anche in questo le curve di cross-correlazione tra stress del vento e correnti, sia per le componenti che per le direzioni, compiono oscillazioni con un periodo di circa 24 ore (Figura 5.42) .

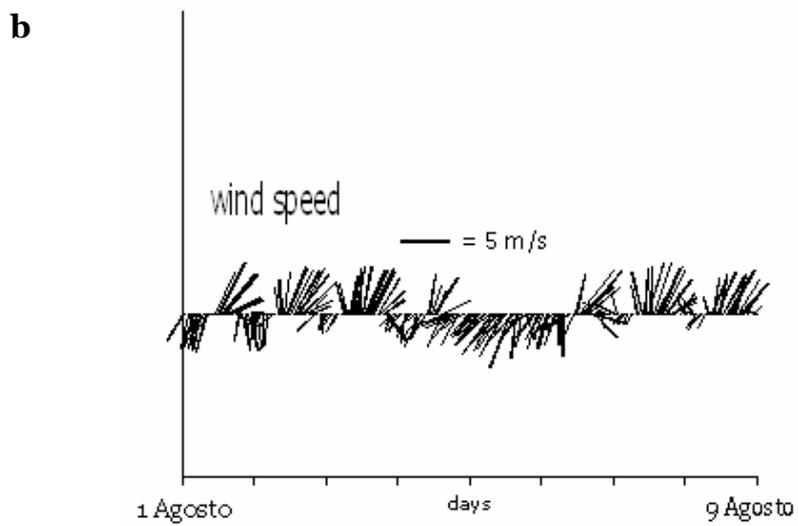
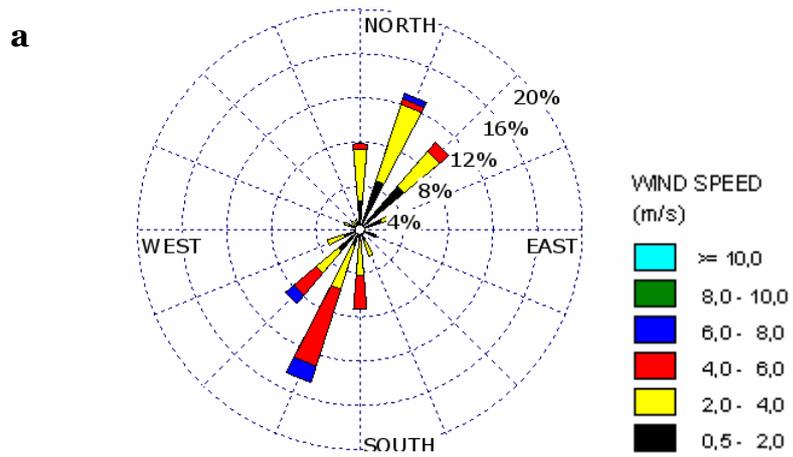


Figura 5.38 – a) Rosa dei venti relativa alla stazione ACTON. b) Diagramma a stick per il periodo 1-8 agosto 2007.

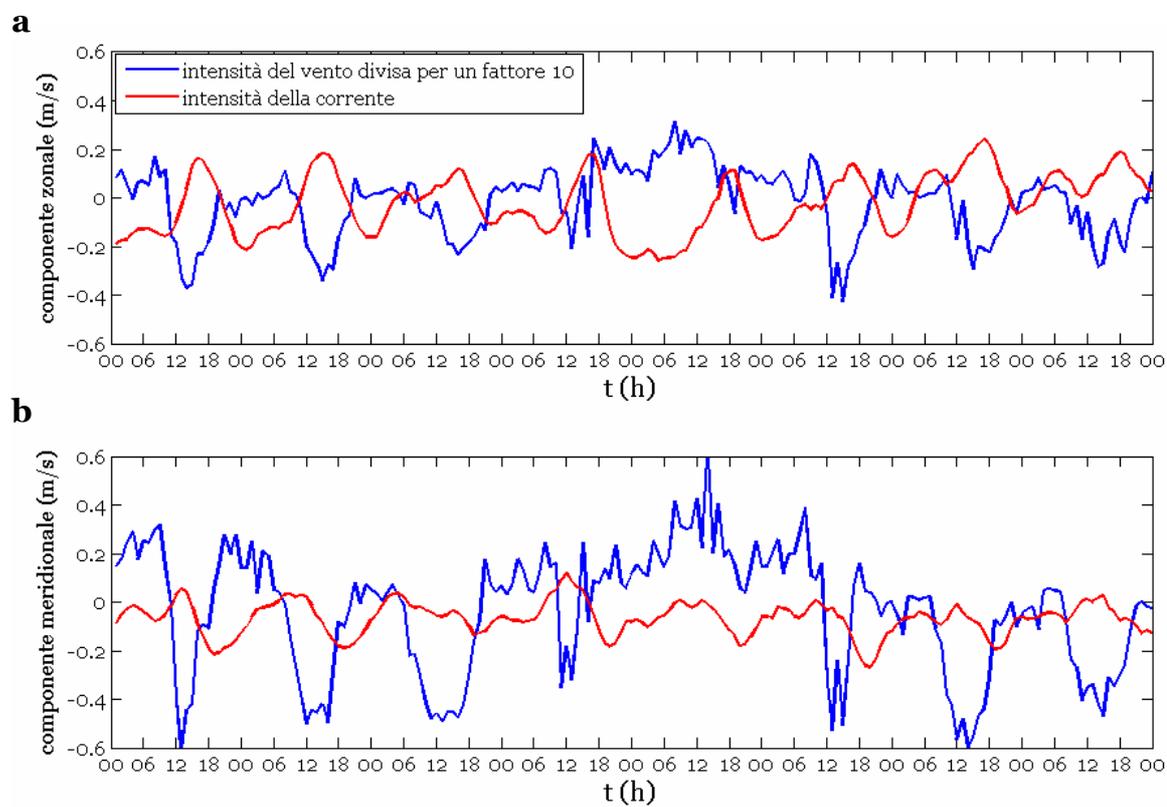


Figura 5.39 – Serie temporali della componente zonale (a) e meridionale (b) della velocità del vento Apat e del punto corrente B (Figura 5.2). Le intensità del vento sono state divise per un fattore 10.

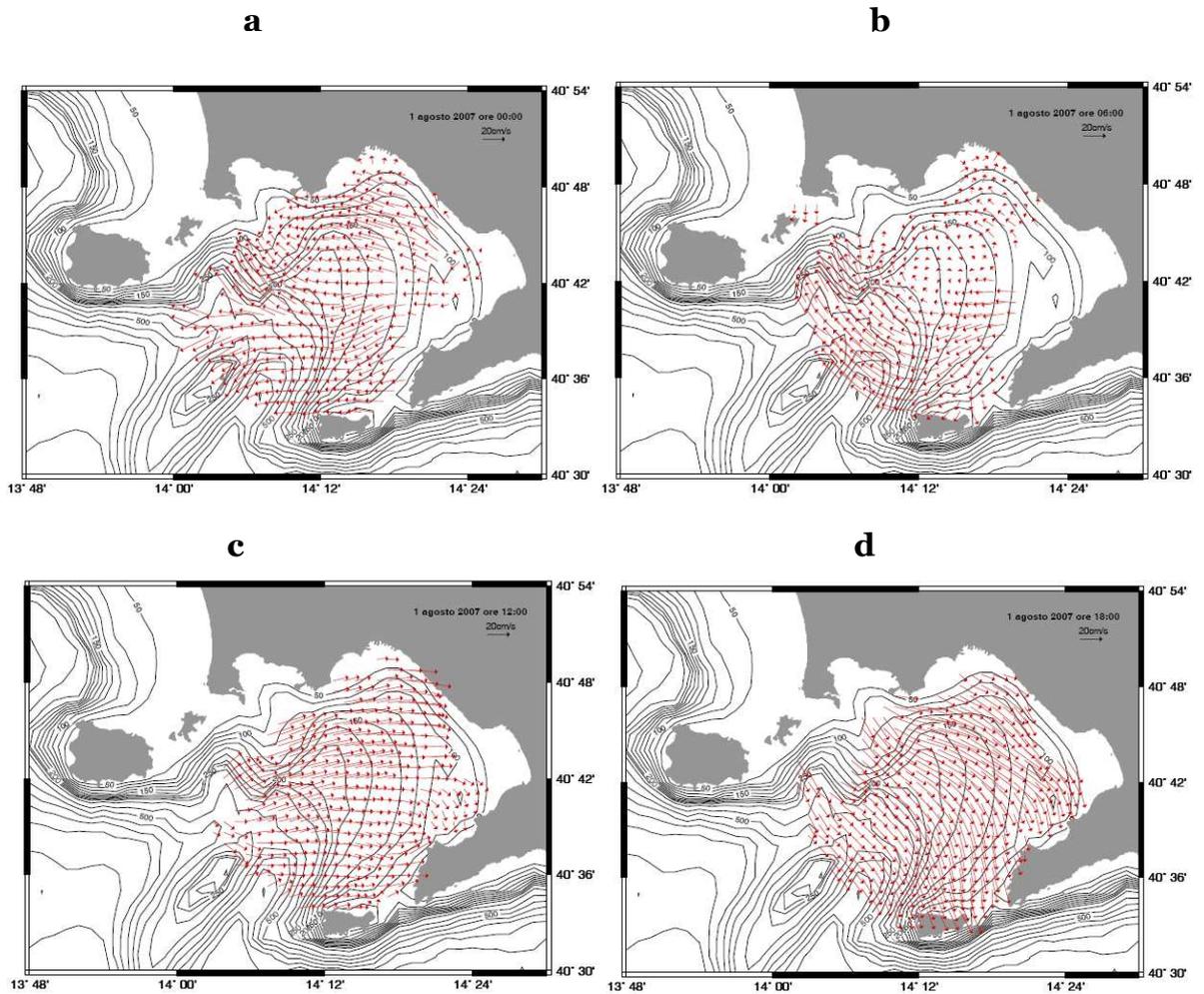


Figura 5.40 – Andamento giornaliero delle correnti CODAR in presenza del regime di brezza, 1 agosto 2007 : a) ore 00:00, b) ore 06:00, c) ore 12:00, d) ore 18:00. Le correnti nell'arco di 24 ore compiono una rotazione in senso orario che interessa tutte le regioni del Golfo.

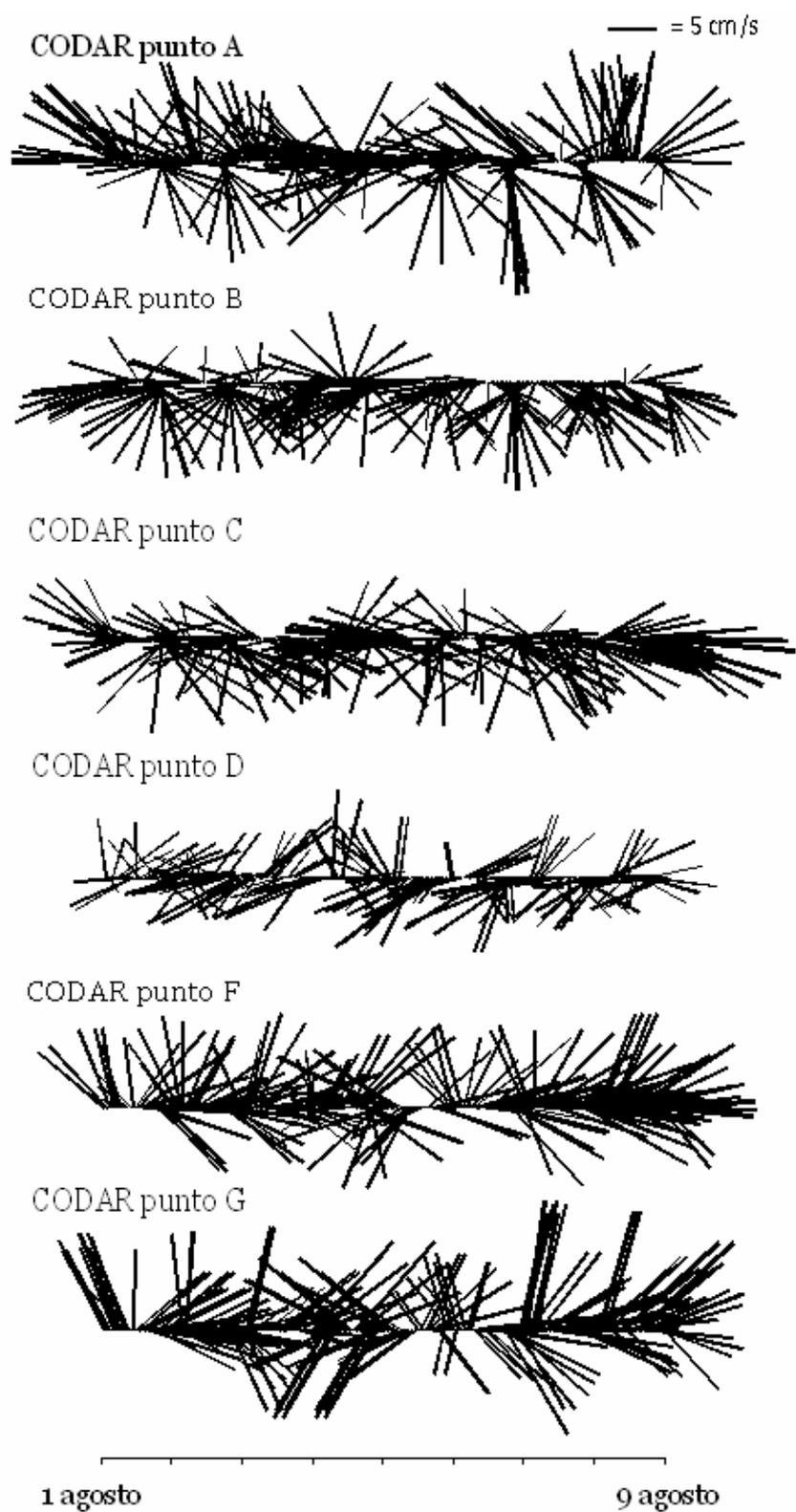


Figura 5.41 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 1-8 agosto 2007.

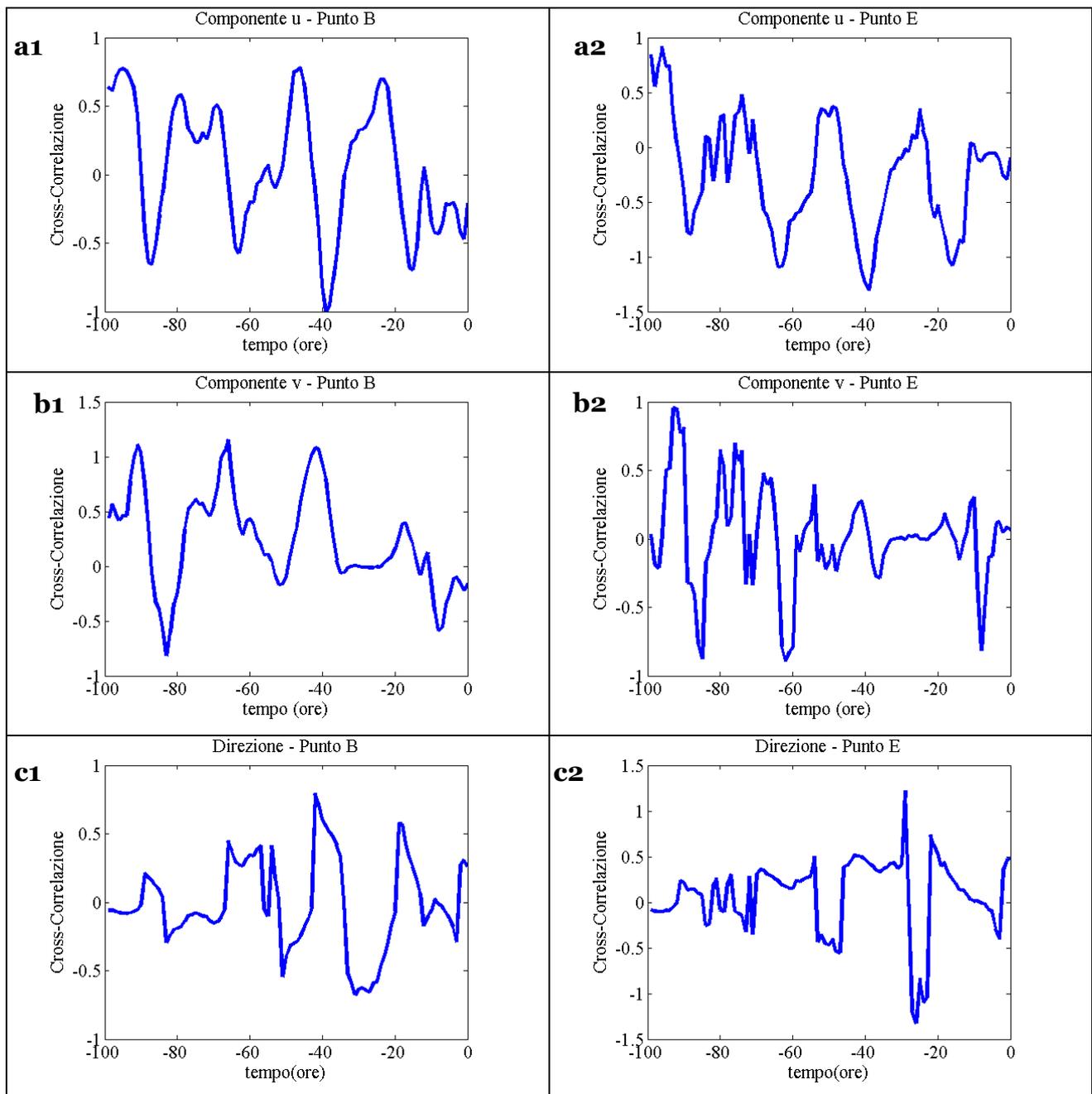


Figura 5.42 – Cross-correlazioni tra vento e corrente: a) per la componente zonale nel punto B (a1) e nel punto E (a2). b) per la componente meridionale nel punto B (a1) e nel punto E (a2). c) per le direzioni nel punto B (a1) e nel punto E (a2) .

5.5 CIRCOLAZIONE GUIDATA DALLE CORRENTI ESTERNE AL BACINO COSTIERO.

I dati CODAR collezionati nel mese di dicembre del 2006 evidenziano l'esistenza di un flusso molto intenso diretto lungo l'asse Bocca Piccola – Canale di Procida; questo flusso non è legato a particolari condizioni di vento, ma all'ingresso di acqua tirrenica all'interno del Golfo attraverso la Bocca Piccola. Durante il periodo invernale un ramo della corrente,

che fluisce verso nord lungo le coste tirreniche orientali, può entrare nel Golfo di Napoli influenzandone la dinamica superficiale e rendendo poco influente l'azione del vento locale.

La circolazione del Tirreno meridionale è caratterizzata da una marcata componente barotropica (Pierini and Simioli, 1998) e risulta organizzata in tre grandi gyre (due con andamento ciclonico localizzati nella parte meridionale e settentrionale, e uno centrale con andamento anticiclonico) con un tipico pattern stagionale (Artale et al.,1994). Durante il periodo invernale si sviluppa nell'intero bacino un intenso flusso orientato in senso meridionale e diretto a nord; questo flusso è determinato dall'ingresso di Modified Atlantic Water (MAW) (Krivosheya e Ovchinnikov, 1973) attraverso il margine sud-orientale tirrenico e provoca lo stiramento del gyre settentrionale verso la parte centrale e meridionale del bacino (Artale et al.,1994) (Figura 5.43a) .

Studi numerici condotti da Pierini e Simioli (1998) e riguardanti la circolazione del Mar Tirreno, forzata da dati di vento del "National Meteorological Center" (1980-1988), mostrano che le correnti barotropiche guidate dal vento in un punto localizzato al boundary esterno del Golfo di Napoli (Figura 5.45a) sono dirette a nord-ovest in tutti i mesi ad esclusione dell'estate, quando le correnti sono meno intense possono esserci episodi di inversione di direzioni. La corrente costiera diretta a nord-ovest rientra nel ramo ascendente della struttura ciclonica che interessa il Tirreno meridionale, può penetrare all'interno del Golfo di Napoli attraverso la Bocca Piccola e parzialmente attraverso al Bocca Grande. La Figura 5.43b si riferisce alle traiettorie di boe derivanti lagrangiane lanciate tra il 2001 e il 2005 nel Tirreno meridionale (dati non pubblicati); i drifter, lanciati nel periodo estivo lungo la rotta Napoli – Palermo, tendono a restare localizzati nella parte sud-orientale del bacino fino all'arrivo dei mesi autunnali in cui il flusso di MAW diventa più intenso e le boe tendono ad incanalarsi verso nord. La Figura 5.44 mostra il particolare di una boa che penetra nel Golfo di Napoli attraverso la Bocca Piccola, descrive un vortice anticiclonico e poi esce costeggiando l'isola di Ischia.

Per caratterizzare quello che succede alla dinamica superficiale interna del Golfo di Napoli è stato scelto come esempio il periodo 10-17 dicembre 2006. Nel mese di dicembre 2006 le registrazioni della stazione ACTON mostrano una netta predominanza di venti dal quadrante NE (Figura 6.20); questo porterebbe a immaginare una situazione del campo di correnti superficiale prossima a quelle esaminate nel sottoparagrafo 5.2.2. In realtà le stream line, risultanti dalle correnti medie del periodo in esame mostrano delle caratteristiche assolutamente indipendenti dal forzante locale : (Figura 5.51) un flusso

intenso diretto lungo l'asse Bocca Piccola – Canale di Procida taglia il Golfo in due metà, le correnti a est del jet ruotano in maniera ciclonica quelle ad ovest in maniera anticiclonica.

La caratteristica dominante dei campi di corrente in questo periodo è l'ingresso nel Golfo di acqua tirrenica attraverso la Bocca Piccola (Figura 5.47); questo flusso abbandona il bacino nella regione settentrionale dell'apertura principale dirigendo ad ovest lungo le batimetriche (Figura 5.47b, c). Le correnti raggiungono intensità elevate con picchi che superano i 40 cm/s. Le regioni localizzate alla destra del jet sono caratterizzate da rotazione anticiclonica (vorticità negativa Figura 5.48), quelle alla sinistra del jet da rotazione ciclonica (vorticata positiva Figura 5.48).

Nei punti E, F e G, localizzati nel jet (Figura 5.2), le correnti sono dirette verso nord (Figura 5.50); per gli altri punti i diagrammi a stick mostrano un'elevata variabilità direzionale.

I risultati della cross-correlazione tra lo stress del vento e la corrente mostrano una scarsa correlazione sia per le componenti che per le direzioni in tutti i punti presi in esame (Figura 5.53).

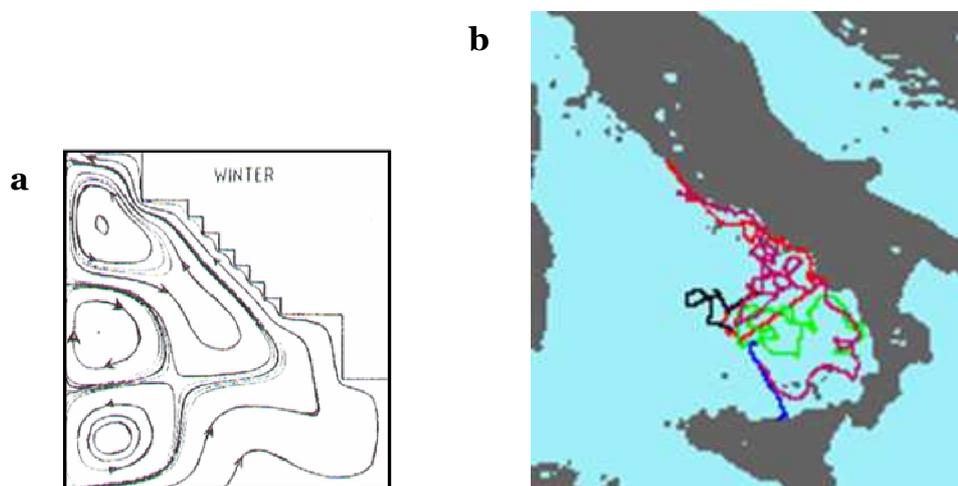


Figura 5.43 – a) Struttura a tre gyre tipica della circolazione del Tirreno meridionale (Artale et al.,2004). b) traiettorie di boe derivanti lagrangiane nel Tirreno meridionale.

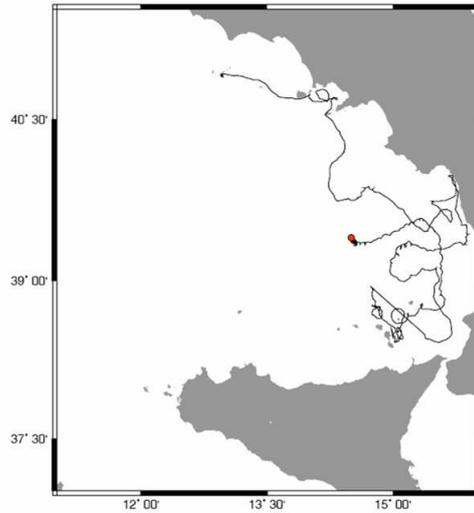


Figura 5.44 – Boa derivante lagrangiana che penetra nel golfo di Napoli trasportata dal flusso di MAW.

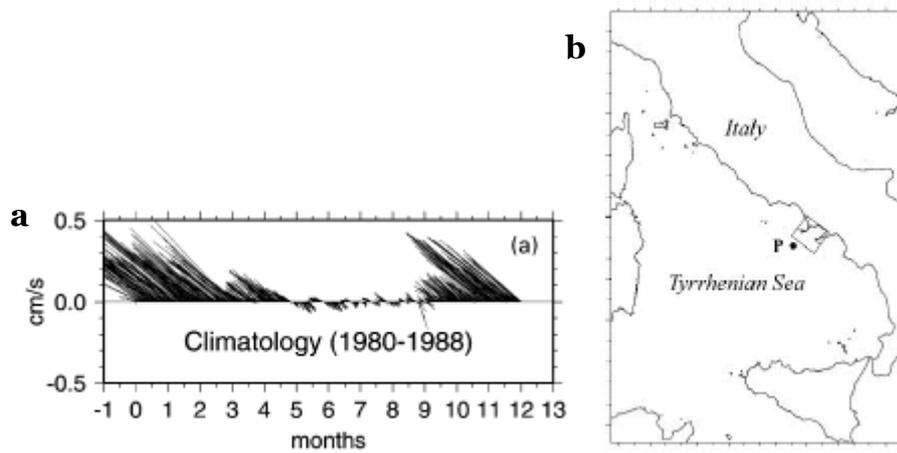


Figura 5.45 – Diagramma a stick (a) delle correnti guidate dal vento negli anni 1980-1988 valutate nel punto P (b) lungo il boundary esterno del Golfo di Napoli.(Gravili et al.,2001).

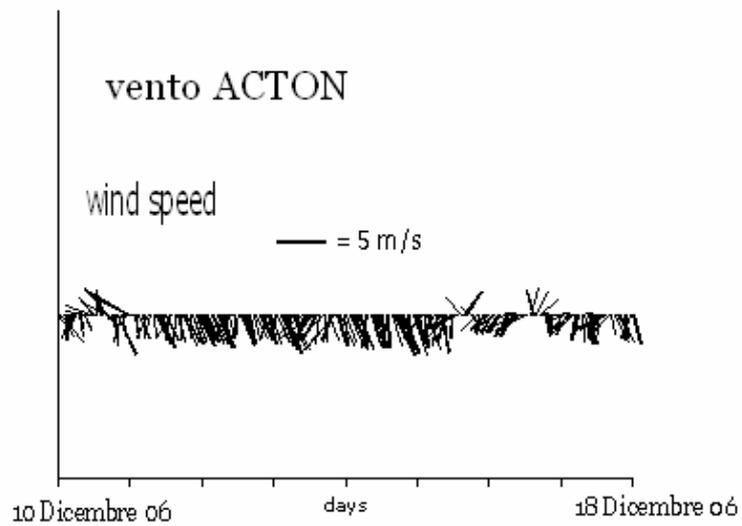


Figura 5.46 –Diagramma a stick a) del vento misurato dalla stazione APAT nel mese di dicembre 2006, b) del vento misurato dalla stazione APAT nel periodo 10-17 dicembre 2006.

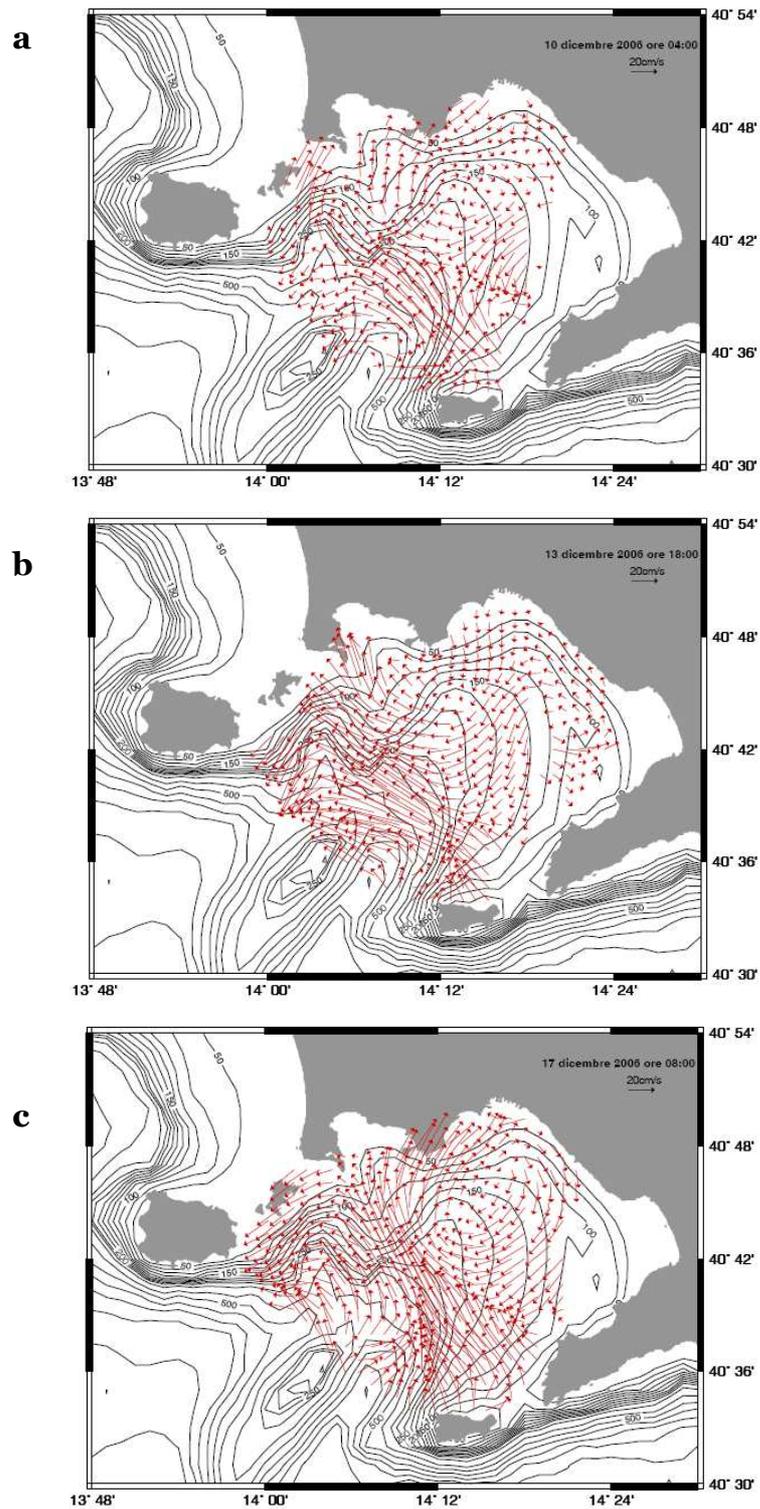


Figura 5.47 – Campo di correnti CODAR: a) 10 dicembre 2006 ore 4:00. b) 13 dicembre 2006 ore 18:00. c) 17 dicembre 2006 ore 8:00.

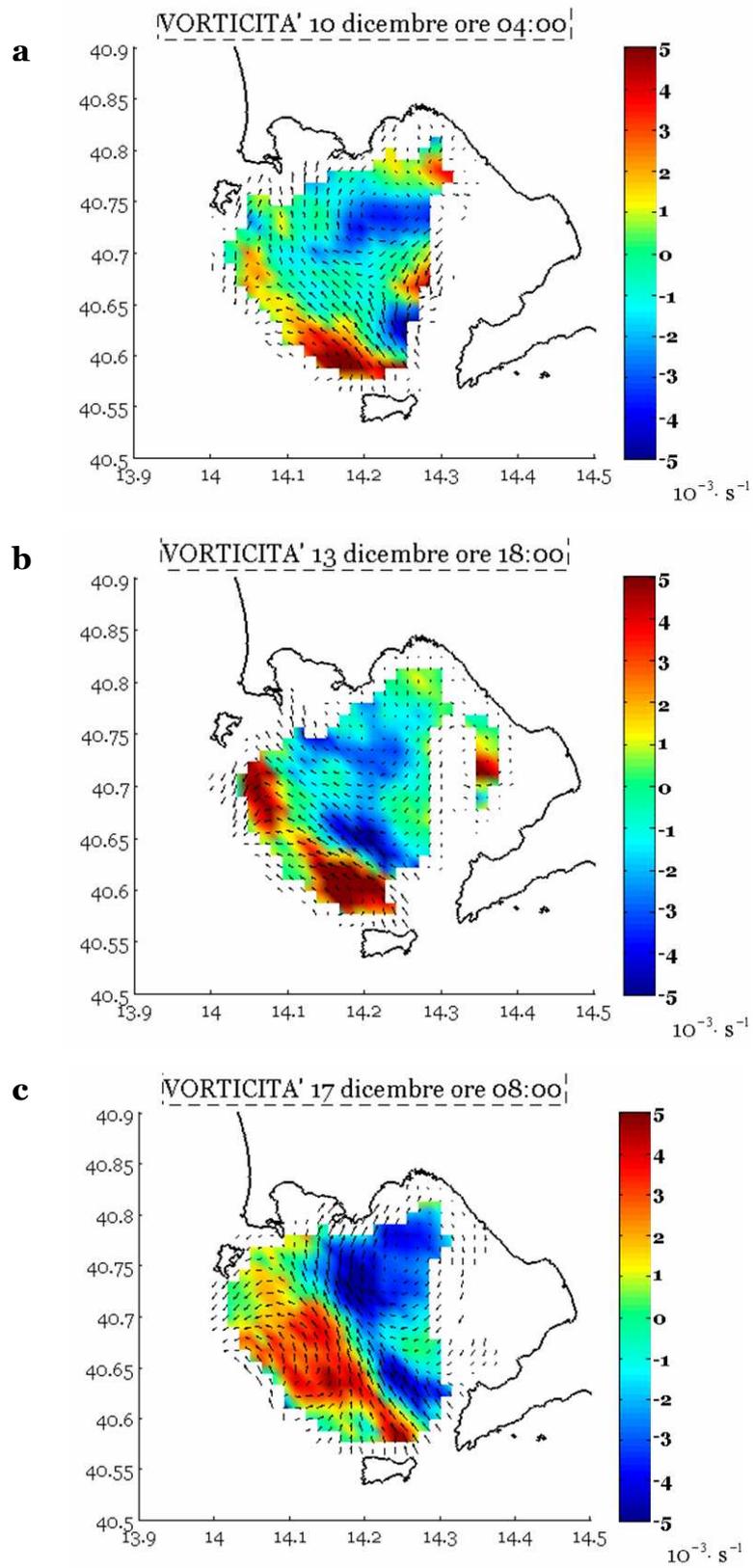


Figura 5.48 – Campi di vorticità : a) 10 dicembre 2006 ore 4:00. b) 13 dicembre 2006 ore 18:00. c) 17 dicembre 2006 ore 8:00.

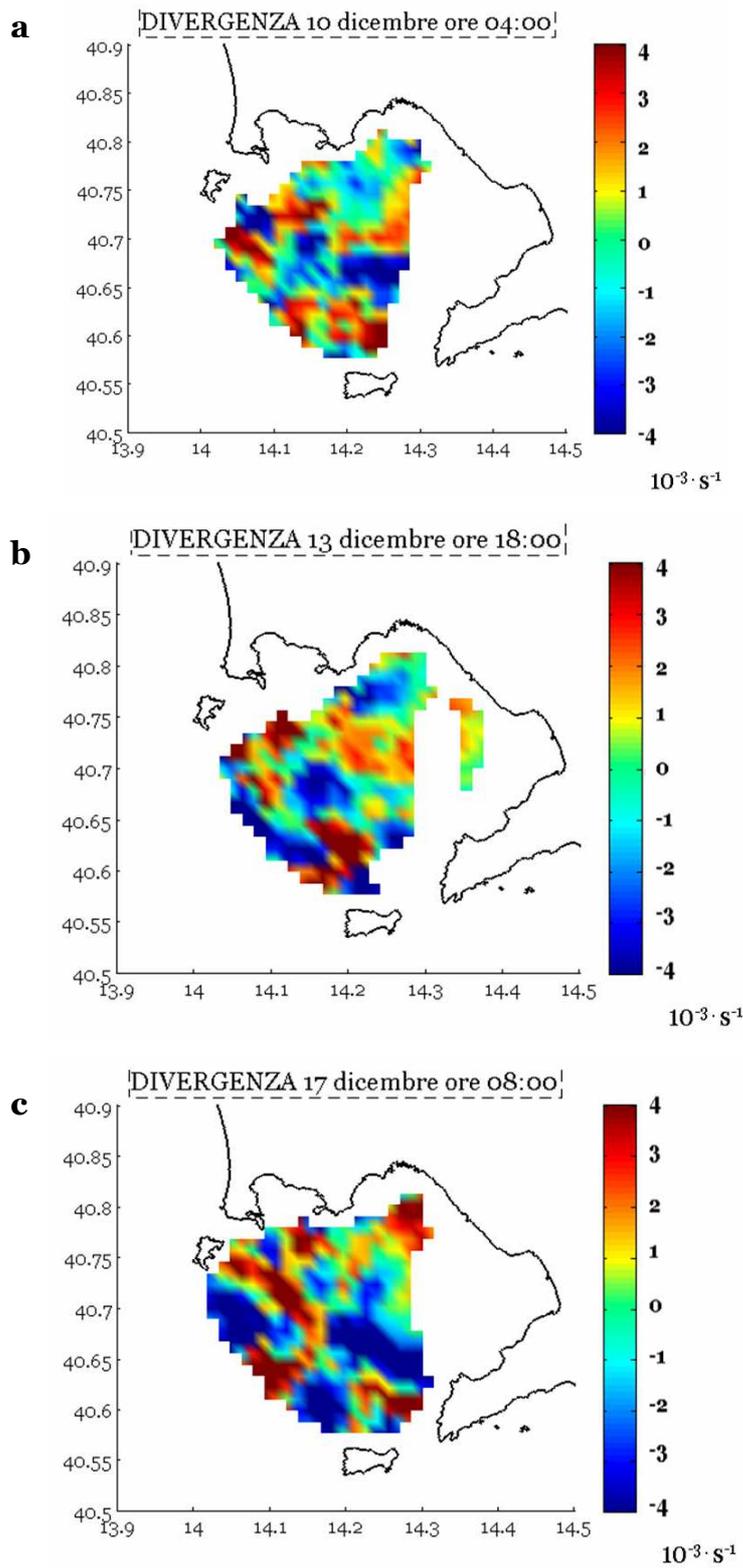


Figura 5.49 – Campi di divergenza : a) 10 dicembre 2006 ore 4:00. b) 13 dicembre 2006 ore 18:00. c) 17 dicembre 2006 ore 8:00.

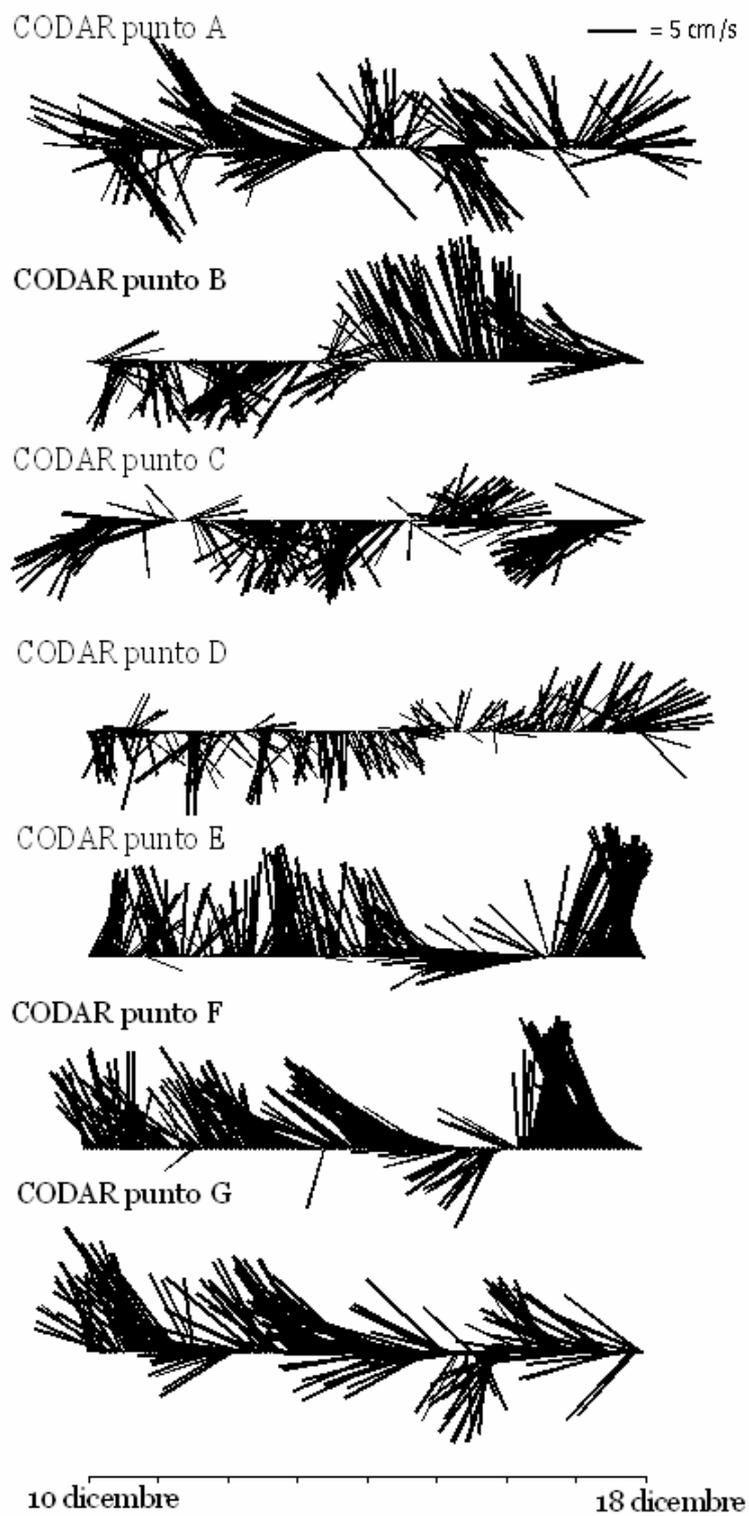


Figura 5.50 – Diagramma a stick per le correnti CODAR nei punti in Figura 5.2 nel periodo 10-17 dicembre 2006.

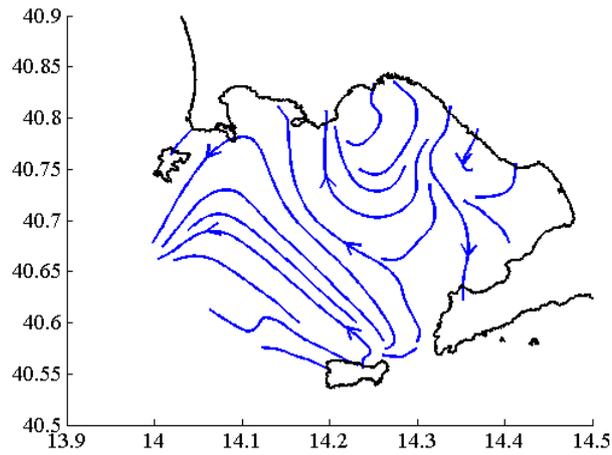
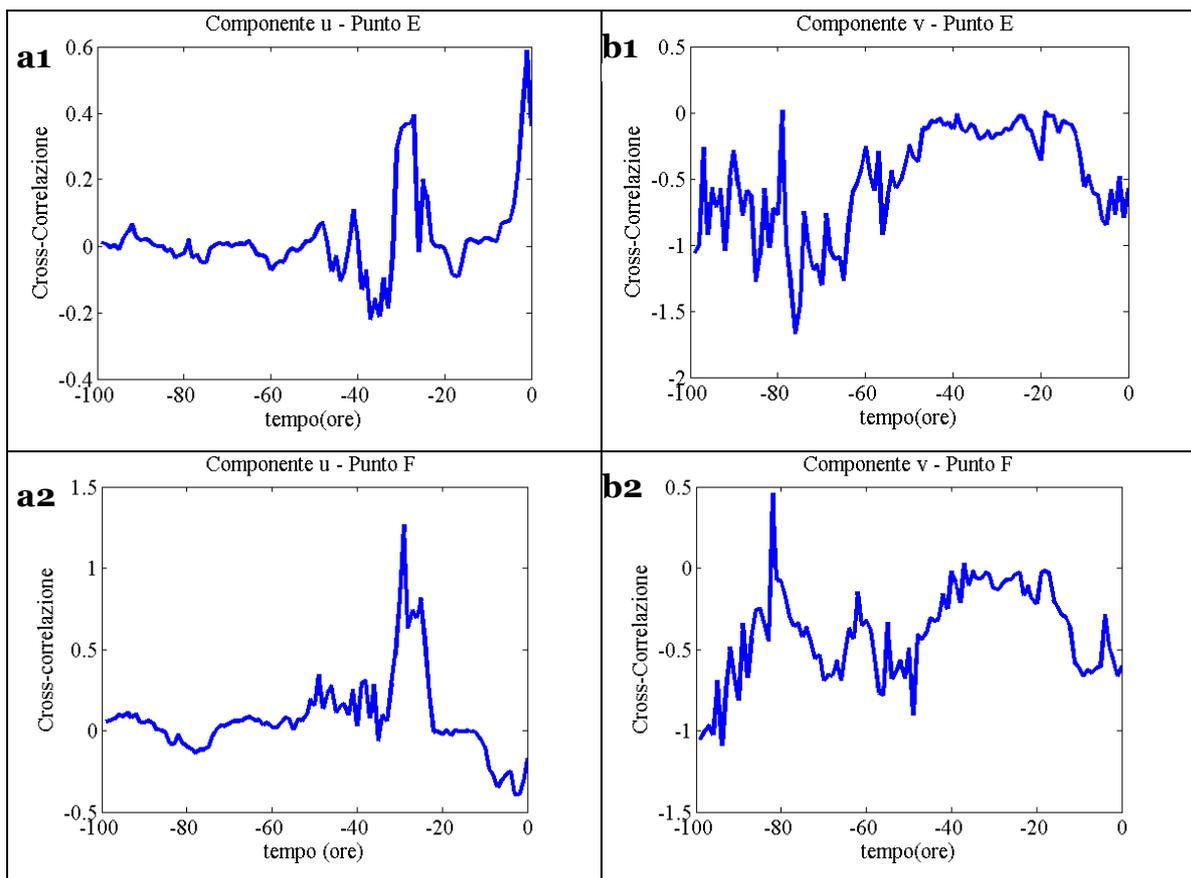


Figura 5.51 – Stream line per il campo di correnti medio del periodo 10-17 dicembre 2006.



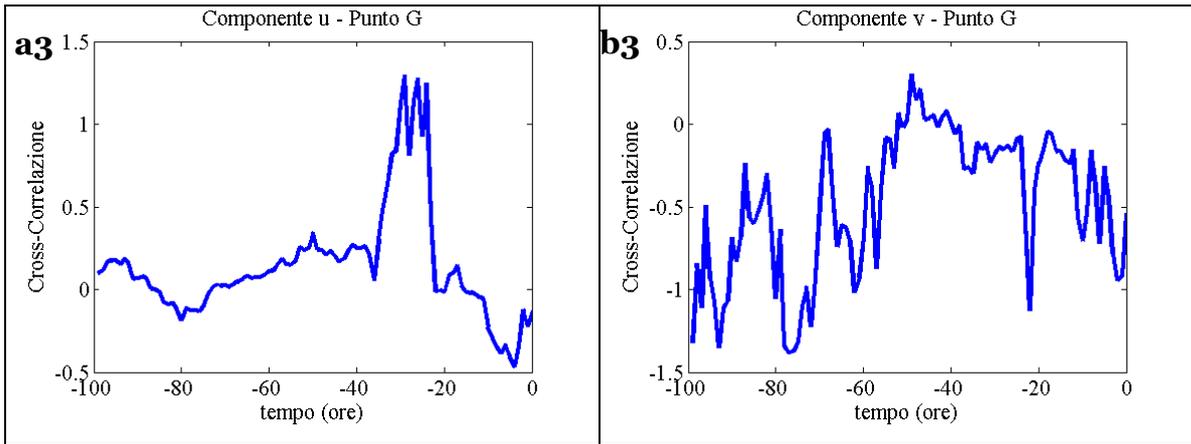
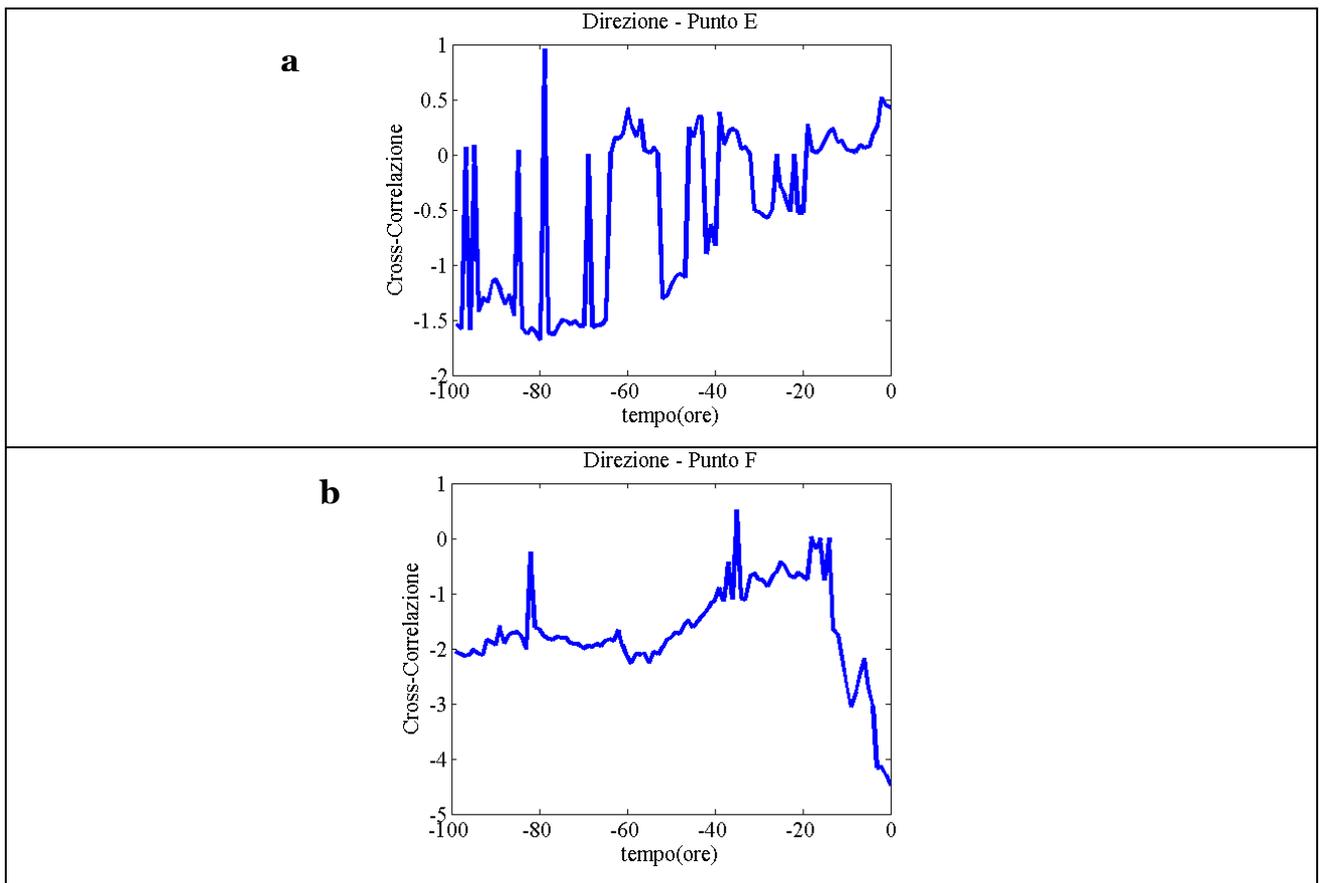


Figura 5.52 – Cross-correlazione tra le componenti della velocità (u,v) e dello stress del vento (τ_x , τ_y) in punti localizzati nella regione anticiclonica (a1, b1), nella regione ciclonica (a2,b2), nel jet (a3, b3).



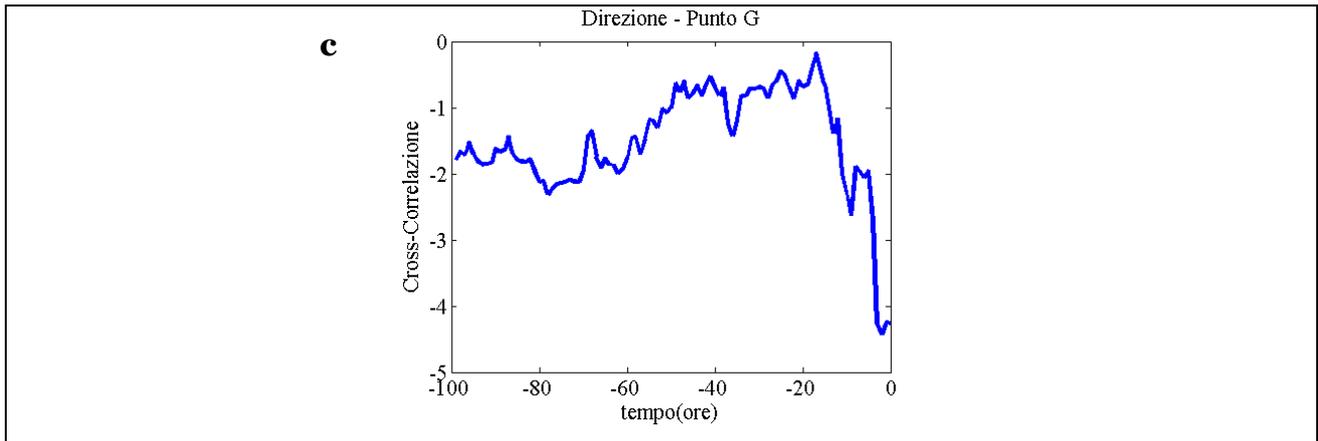


Figura 5.53 – Cross-correlazione tra le direzioni dello stress del vento e della corrente in punti localizzati a) nella regione anticiclonica, b) nella regione ciclonica, c) nel jet.

5.6 PROCESSI DI TRASPORTO

Il Golfo di Napoli rappresenta un area di grande interesse per le attività turistiche, ma è estremamente vulnerabile dal punto di vista dell'ecosistema marino, a causa della presenza di numerosi siti industriali lungo la costa, dell'estuario di un fiume particolarmente inquinato e di scarichi urbani non correttamente trattati.

Per questa ragione, capire i processi che regolano il trasporto costa-largo di masse d'acqua riveste una notevole importanza per la difesa dell'ecosistema e per lo sfruttamento sostenibile delle risorse ambientali.

Il trasporto superficiale di traccianti lagrangiani è stato simulato numericamente usando i campi di velocità superficiale misurati dal CODAR per creare il movimento avvevativo delle particelle. I traccianti vengono considerati conservativi e puramente passivi; questa assunzione permette di esaltare il ruolo della circolazione sulla dispersione delle particelle, ignorando i fenomeni di diffusione e gli eventuali cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei traccianti. Il movimento di ciascuna particella è stato ricostruito mediante l'utilizzo di una routine java appositamente concepita che provvede all'interpolazione dei dati CODAR ogni 30 minuti per ciascun punto di griglia e calcola la posizione di ogni particella a partire dalle coordinate del time step precedente interpolandole utilizzando le velocità dei quattro punti griglia più vicini.

Seguendo il tipo di procedimento proposto da Buffoni et al. (1997), si è scelto di quantificare i processi di trasporto a partire dalla media della concentrazione totale $Q(t)$ e dal tempo di residenza T delle particelle rilasciate. Se le particelle sono assunte come conservative, la loro concentrazione corrisponde alla concentrazione media dei traccianti

nella zona di rilascio (Csanady, 1980). Il numero normalizzato di particelle che, al tempo t , si trovano ancora nella zona di rilascio è calcolato come:

$$Q(t) = \frac{N(t)}{N(0)}$$

Dove $N(t)$ è il numero di particelle presenti al tempo t e $N(0)$ è il numero iniziale di particelle rilasciate. Il tempo di residenza, cioè il tempo che una particella trascorre nella zona di rilascio prima di fuoriuscire, è calcolato come (Buffoni et al., 1997):

$$T = \lim_{t \rightarrow \infty} T^*(t)$$

dove

$$T^*(t) = t Q(t) + \sum_{i=1}^{N_e(t)} \frac{t_{ei}}{N(0)}$$

dove $N_e(t) = N(0) - N(t)$ è il numero di particelle ancora presenti nell'area di rilascio t , e t_{ei} rappresenta il tempo impiegato dall' i -esima particella per abbandonare il settore di rilascio. Un'analisi condotta preliminarmente ha mostrato che le particelle, una volta fuoriuscite dal dominio originario, non tendono a rientrarvi, rendendo quindi inutile la definizione di una buffer zone (Falco et al., 2000).

Le curve di concentrazione $Q(t)$ sono state calcolate in modo da rappresentare gli scambi fra le due zone di rilascio: per la zona costiera viene graficata la quantità relativa di particelle che abbandonano il dominio; per la zona di largo, invece, viene mostrata la quantità di particelle che penetrano nella zona più strettamente costiera. I tempi di residenza sono stati calcolati unicamente per le particelle rilasciate nella Baia di Napoli. I periodi analizzati hanno durata di otto giorni, durante i quali le condizioni dinamiche di circolazione superficiale sono riconducibili a quattro scenari tipici: vento da NE (caso a), vento da SW (caso b), regime di brezza (caso c) e input tirrenico di circolazione (caso d).

Per ciascun periodo esaminato (caso a,b,c ,d) sono state usate due diverse griglie di rilascio, una per un settore centrale del Golfo e una per il settore costiero (Figura 5.54). Ogni griglia contiene 100 particelle omogeneamente distribuite su una superficie di 5 X 5 Km.

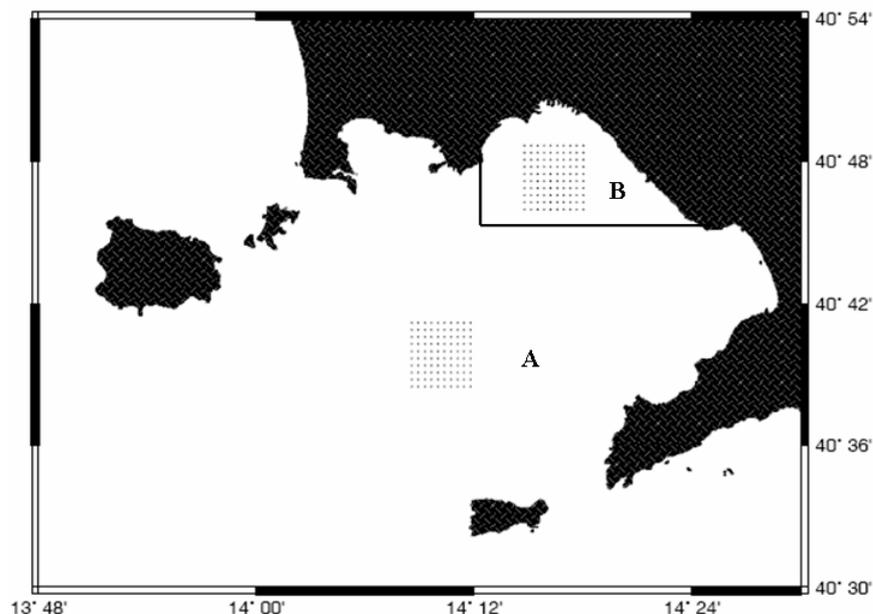


Figura 5.54– Griglie di rilascio dei traccianti passivi per il settore centrale (A) e per il settore costiero (B) del Golfo.

Caso a: Trasporto in caso di venti dal quadrante NE. Gli episodi di vento da NE sono caratterizzati da processi di trasporto costa-largo. Le particelle rilasciate nella regione costiera tendono ad abbandonare l'area di rilascio, ma non completamente, infatti circa il 6% delle particelle rimane all'interno della Baia di Napoli (Figura 5.55a). Per questo motivo risulta impossibile valutare i tempi di residenza in maniera accurata, ma si può stimare che le particelle che abbandonano l'area costiera hanno tempi di residenza di circa 35 ore (Figura 5.56a). Le particelle rilasciate nel settore di largo vengono rapidamente trasportate dalle correnti verso i margini esterni del bacino; nessuna di esse penetra nel settore costiero (Figura 5.55a).

Caso b: Trasporto in caso di venti dal quadrante SW. Durante gli episodi di vento da SW la presenza di correnti entranti nel Golfo e di strutture di ricircolazione, favorisce processi di trasporto verso la costa. La dinamica superficiale della circolazione relega le particelle lanciate nella Baia di Napoli nella stessa zona di rilascio; in questa situazione i tempi di residenza crescono linearmente (Figura 5.56b). In aggiunta, oltre il 95% della particelle rilasciate nella zona di largo riesce a penetrare nella Baia (Figura 5.55b).

Caso c: Trasporto in caso di regime di brezza. La dinamica superficiale associata al regime di brezza favorisce la graduale fuoriuscita di particelle dalla zona costiera. Circa il 70% delle particelle rilasciate nella Baia di Napoli abbandona la

zona di rilascio (Figura 5.55c) con tempi di residenza prossimi alle 90 ore (Figura 5.56c) . Solo una piccola parte delle particelle rilasciate nel centro del bacino riesce a raggiungere la zona costiera (Figura 5.55c).

Caso d: Trasporto in caso influenza della circolazione tirrenica. La circolazione guidata dall'ingresso di correnti tirreniche favorisce il ricambio delle acque interne al Golfo. Le particelle rilasciate nella Baia di Napoli abbandonano quasi completamente questo settore (>95%) (Figura 5.56c), con tempi di residenza approssimativamente di 40 ore (Figura 5.56c). Nessuna particella penetra nell'area costiera dalla zona di largo (Figura 5.55c).

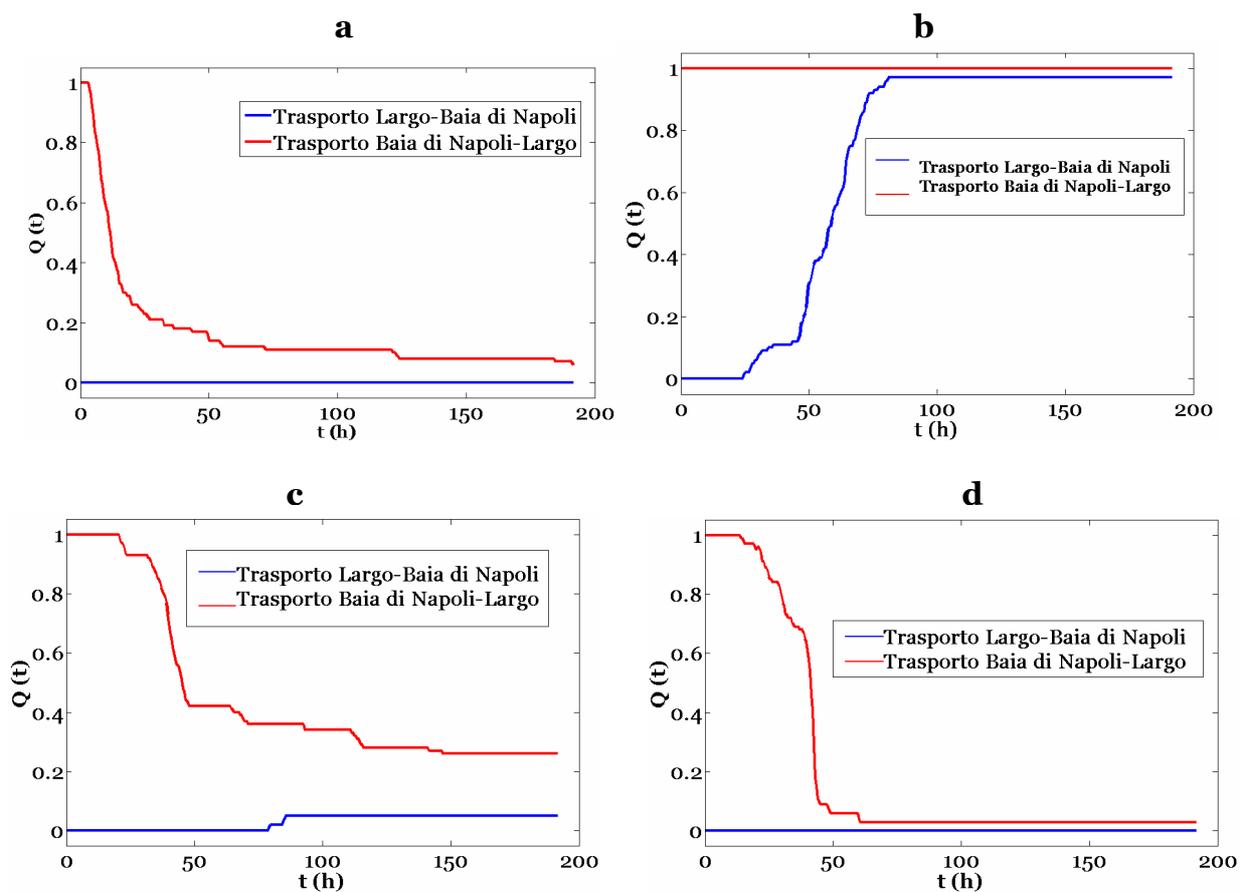
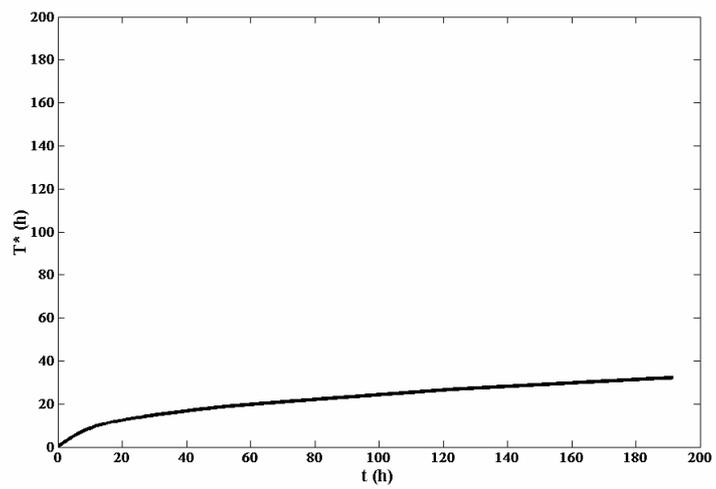
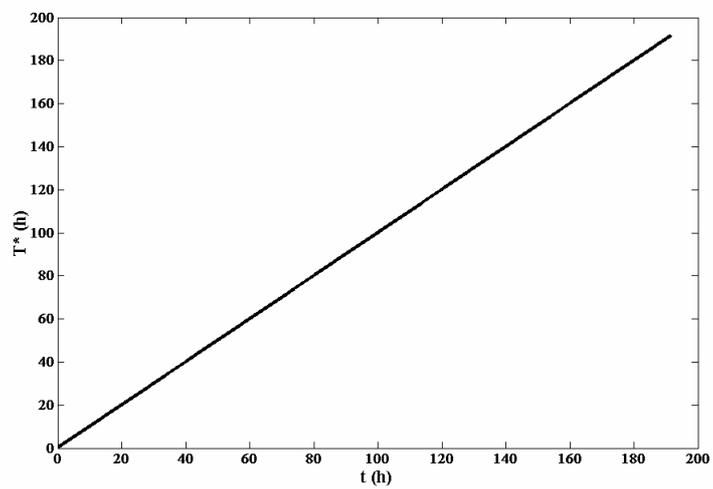


Figura 5.55– Curve di concentrazione relative al caso di vento da NE (a), da SW (b), brezze (c) e input tirrenico (d).

a



b



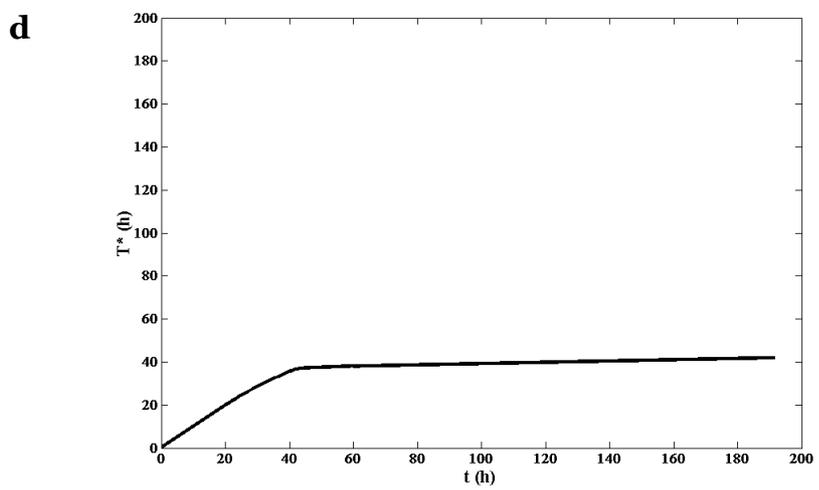
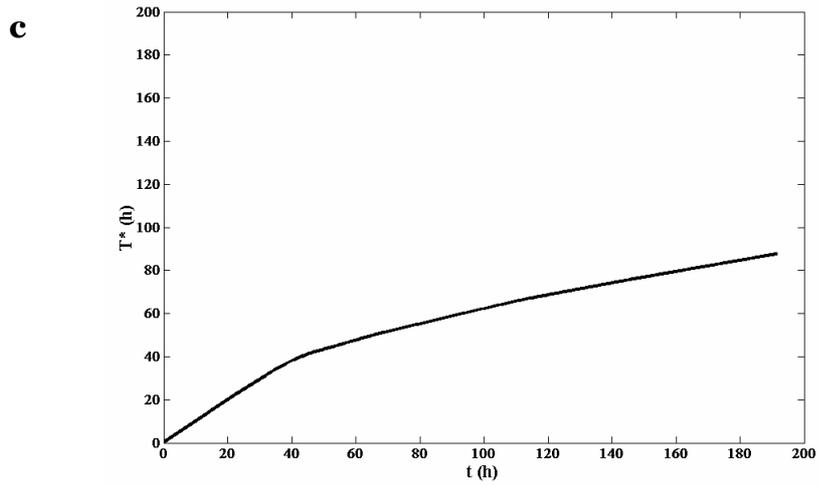


Figura 5.56– Tempi di residenza relativi al caso di vento da NE (a), da SW (b), brezze (c) e input tirrenico (d).

Capitolo 6 : Analisi Spettrale Rotatoria

INTRODUZIONE

Lo spettro di un segnale fornisce una descrizione delle scale tipiche (spazio-)temporali che contribuiscono alla formazione del segnale stesso (Konyaev, 1990). Per ottenere le caratteristiche spettrali delle serie temporali misurate dal CODAR in punti diversi del Golfo, per valutarne la variabilità spaziale e la correlazione con le serie temporali del vento, si è scelto di usare la tecnica degli spettri rotatori.

Questa tecnica prevede la creazione di un vettore velocità complesso $w(t)$:

$$w(t) = u(t) + iv(t)$$

dove la parte reale, $u(t)$, è la proiezione del vettore sull'asse zonale, e la parte immaginaria, $v(t)$, è la proiezione del vettore sull'asse meridionale (Gonella,1972; Mooers,1973; Emery, 2001) .

L'analisi rotatoria delle correnti comporta la separazione del vettore velocità $w(t)$ in due componenti circolari rotanti l'una in senso orario e l'altra in senso antiorario, per ogni specifica frequenza ω . Questa tecnica consente di ottenere delle informazioni in merito al verso preferenziale di rotazione dei moti e di evidenziare quale delle due componenti (oraria o antioraria) domina il campo di correnti. Le informazioni ricavate sono particolarmente utili in oceanografia perché è possibile trovarsi in presenza di moti che si sviluppano secondo un verso rotatorio ben preciso. Ad esempio, i moti inerziali ruotano quasi completamente in senso orario nell'emisfero nord, questo consente di trascurare la componente antioraria in molte applicazioni. Un ulteriore vantaggio nell'utilizzo di questa tecnica sta nel fatto che molte proprietà rotatorie (es. l'energia spettrale ed il coefficiente rotatorio) non variano al ruotare delle coordinate (Emery et al, 2001).

Convenzionalmente, l'analisi rotatoria prevede che la componente antioraria ruoti con una frequenza angolare positiva ($\omega \geq 0$), con ampiezza A^+ e relativa frequenza θ^+ , e che la componente oraria ruoti con una frequenza angolare negativa ($\omega \leq 0$) con ampiezza A^- e relativa frequenza θ^- . Il vettore somma dei due vettori circolari rotanti in senso opposto,

ruota tracciando un'ellisse; il senso di rotazione di questo vettore somma dipende da quale dei due vettori componenti ha modulo maggiore.

6.6 SPETTRO ROTATORIO DELLE COMPONENTI

L'analisi spettrale rotatoria fornisce uno spettro positivo $S^+(\omega)$, corrispondente a frequenze positive e a verso di rotazione antiorario, ed uno spettro negativo $S^-(\omega)$ corrispondente all'asse di frequenze negative e a verso di rotazione orario.

Se u e v rappresentano le componenti ortogonali cartesiane del vettore velocità, $w = (u, v)$, lo spettro rotatorio può essere espresso come:

$$\begin{aligned} S^+(\omega) &= [A^+(\omega)]^2, \omega \geq 0 \\ &= \frac{1}{2}[S_{uu} + S_{vv} + 2Q_{uv}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^-(\omega) &= [A^-(\omega)]^2, \omega \leq 0 \\ &= \frac{1}{2}[S_{uu} + S_{vv} - 2Q_{uv}] \end{aligned}$$

Dove S_{uu} e S_{vv} sono i rispettivi autospettri (spettri delle autocorrelazioni) delle componenti u e v , e Q_{uv} è lo spettro di quadratura (spettro della cross-correlazione) tra le due componenti.

I periodi in cui è stata condotta l'analisi spettrale rotatoria sono: febbraio 2005, marzo 2005, dicembre 2006. La scelta del data-set è stata effettuata sia in base alla disponibilità e qualità dei dati che in base alle caratteristiche del campo di correnti che si desidera investigare. Nei tre mesi selezionati, infatti, le correnti sono influenzate e guidate da forzanti specifici:

- *febbraio 2005*: circolazione superficiale strettamente legata al passaggio di sistemi depressionari nell'area del Golfo;
- *marzo 2005*: circolazione influenzata dall'effetto delle brezze;
- *dicembre 2006*: il forzante principale è l'input di circolazione tirrenica;

le serie temporali utilizzate per l'analisi spettrale sono della durata di 30 giorni per i mesi di marzo 2005 e dicembre 2006, di 28 giorni per febbraio 2005.

6.7 ANALISI ROTATORIA PER UNA COPPIA DI SERIE TEMPORALI

L'analisi spettrale rotatoria effettuata per un singolo punto, può essere estesa ad una coppia di serie temporali allo scopo di valutare la coerenza e la fase di due set di misure simultanee acquisite in punti diversi. L'obiettivo principale è determinare la 'similarità' tra due serie temporali in termini di componente rotatoria attraverso il calcolo del cross-spettro interno e del cross-spettro esterno (inner e outer rotary cross spectra): la funzione inner descrive la relazione tra le componenti rotanti nello stesso senso, la funzione outer descrive la relazione tra componenti rotanti in senso opposto (Mooers, 1973; Emery, 2001). Il vantaggio di usare un'analisi di tipo rotatorio è : 1) l'analisi di coerenza è indipendente dall'orientamento del sistema di coordinate (coordinate invarianti); 2) i risultati esprimono la coerenza e la fase delle componenti rotanti in senso opposto per moti che possono essere altamente non rettilinei. Poiché le componenti rotanti in senso opposto hanno una simmetria circolare, l'invarianza a cui è soggetto il sistema di coordinate è estesa anche alla coerenza (Emery, 2001; Blodgett, 2002; Weltmer, 2002).

Nei casi presi in considerazione in questo capitolo si mettono a confronto le serie temporali di vento e corrente.

I vettori velocità complessi di corrente (w_c) e vento (w_w) sono:

$$\begin{aligned}w_c &= u_c + iv_c \\w_w &= u_w + iv_w\end{aligned}$$

gli autospettri interni per ciascuna serie temporale sono dati da:

$$W(f) = \begin{cases} [A^+(\omega)] & \omega \geq 0 \\ [A^-(\omega)] & \omega \leq 0 \end{cases}$$

Inner cross-spectrum: Il cross-spettro interno $S_{cw}(f)$ confronta l'energia associata alle serie temporali di vento e corrente per le componenti rotatorie rotanti nella stessa direzione:

$$\begin{aligned}S_{cw}(f) &= \langle W_c^*(f)W_w(f) \rangle \\ &= \begin{cases} A_c^+(\omega)A_w^+(\omega)e^{-i(\theta_c^+ - \theta_w^+)}, & \omega \geq 0 \\ A_c^-(\omega)A_w^-(\omega)e^{-i(\theta_c^- - \theta_w^-)}, & \omega \leq 0 \end{cases}\end{aligned}$$

dove * rappresenta il complesso coniugato .

Inner coherence squared: La coerenza quadratica interna tra le serie temporali di vento e corrente alla frequenza f è calcolata come:

$$C_{cw} = \begin{cases} \left\{ \left\langle A_c^+ A_w^+ \sin(\theta_c^+ - \theta_w^+) \right\rangle^2 + \left\langle A_c^+ A_w^+ \cos(\theta_c^+ - \theta_w^+) \right\rangle^2 \right\} / \left\langle A_c^{+2} \right\rangle \left\langle A_w^{+2} \right\rangle, \omega \geq 0 \\ \left\{ \left\langle -A_c^- A_w^- \sin(\theta_c^- - \theta_w^-) \right\rangle^2 + \left\langle A_c^- A_w^- \cos(\theta_c^- - \theta_w^-) \right\rangle^2 \right\} / \left\langle A_c^{-2} \right\rangle \left\langle A_w^{-2} \right\rangle, \omega \leq 0 \end{cases}$$

Il range di coerenza va da zero a uno, e rappresenta la similarità (o la variabilità) di una serie temporale rispetto all'altra. Un valore di coerenza prossimo all'unità indica un alto grado di correlazione, mentre una coerenza prossima allo zero indica una correlazione trascurabile. E' possibile calcolare un valore limite al di sotto del quale il valore della coerenza quadratica è dovuto al caso; usando un intervallo di confidenza del 95%, il valore limite è calcolato come segue:

$$C_{cw}^{significativo} = \sqrt{1 - 0.05^{[GL^{-1}]}} \quad (\text{Morrow et al., 1994})$$

dove GL rappresenta il numero di gradi di libertà della serie temporale.

Inner phase: La fase interna è l'angolo tra ciascun elemento dei due vettori che formano le serie temporali. L'angolo di fase è identico sia per il cross-spettro interno che per la coerenza interna, ed è una misura dello sfasamento tra la componente rotatoria della serie temporale della corrente rispetto alla serie temporale del vento. Essa può essere calcolata come:

$$\tan(\phi_{cw}) = \begin{cases} \left\{ \left\langle A_c^+ A_w^+ \sin(\theta_c^+ - \theta_w^+) \right\rangle^2 / \left\langle A_c^+ A_w^+ \cos(\theta_c^+ - \theta_w^+) \right\rangle^2 \right\} \\ \left\{ \left\langle -A_c^- A_w^- \sin(\theta_c^- - \theta_w^-) \right\rangle^2 / \left\langle A_c^- A_w^- \cos(\theta_c^- - \theta_w^-) \right\rangle^2 \right\} \end{cases}$$

Outer cross-spectrum: Il cross-spettro esterno $O_{cw}(f)$ confronta l'energia delle serie temporali del vento e della corrente per componenti rotatorie rotanti in direzioni opposte (es. la componente oraria del vettore vento confrontata con la componente antioraria della corrente superficiale).

$$O_{cw}(f) = \langle W_c^*(-f)W_w(f) \rangle$$

$$= \begin{cases} A_c^-(\omega)A_w^+(\omega)e^{-i(\theta_c^- - \theta_w^+)}, & \omega \geq 0 \\ A_c^+(\omega)A_w^-(\omega)e^{-i(\theta_c^+ - \theta_w^-)}, & \omega \leq 0 \end{cases}$$

Outer coherence squared: La coerenza quadratica esterna tra le serie temporali del vento e della corrente alla frequenza f è calcolata come:

$$D_{cw} = \begin{cases} \left\langle A_c^- A_w^+ \left[\langle \cos(\theta_w^+ - \theta_c^-) \rangle^2 + \langle \sin(\theta_c^+ - \theta_w^-) \rangle^2 \right] \right\rangle / \left\langle A_w^{+2} \right\rangle \left\langle A_c^{-2} \right\rangle, & \omega \geq 0 \\ \left\langle A_c^+ A_w^- \left[\langle \cos(\theta_w^+ - \theta_c^-) \rangle^2 + \langle \sin(\theta_c^+ - \theta_w^-) \rangle^2 \right] \right\rangle / \left\langle A_c^{+2} \right\rangle \left\langle A_w^{-2} \right\rangle, & \omega \leq 0 \end{cases}$$

Outer phase: La fase per la coerenza e il cross-spettro esterno è data da:

$$\tan(\varphi_{cw}) = \begin{cases} \left\langle A_c^- A_w^+ \sin(\theta_c^- - \theta_w^+) \right\rangle / \left\langle A_c^- A_w^+ \cos(\theta_c^- - \theta_w^+) \right\rangle, & \omega \geq 0 \\ \left\langle A_c^+ A_w^- \sin(\theta_c^+ - \theta_w^-) \right\rangle / \left\langle A_c^+ A_w^- \cos(\theta_c^+ - \theta_w^-) \right\rangle, & \omega \leq 0 \end{cases}$$

Coefficiente rotatorio: Il coefficiente rotatorio R indica l'intensità e il verso del moto rotatorio:

$$R = \frac{S^+ - S^-}{S^+ + S^-} \quad (\text{Emery, 2001})$$

Assume valori che vanno da $R = -1$ per i moti in senso orario, $R = 0$ per i moti unidirezionali, ed $R = 1$ per i moti in senso antiorario.

Questa definizione differisce da quella data da Gonella (1972) che usa $S^- - S^+$ al posto di $S^+ - S^-$ al numeratore, ottenendo il coefficiente rotatorio positivo per i moti in senso orario e negativo per i moti in senso antiorario. La scelta di Gonella dipende dal fatto che molti flussi oceanici ruotano in senso orario nell'emisfero nord, quindi trova più comodo associare un coefficiente positivo ai moti più frequenti; in realtà questa scelta crea confusione nello sviluppo dell'analisi rotatoria perché associa al moto orario, caratterizzato da frequenze negative, un coefficiente rotatorio positivo. Per questo motivo nella

trattazione seguente preferiamo prendere in considerazione la definizione di Emery (2001).

Il coefficiente rotatorio teorico R_t , detto anche coerenza rotatoria, è definito da:

$$R_t = \frac{2\omega f}{(\omega^2 + f^2)} \text{ (Fofonoff, 1969)}$$

dove f è la frequenza di Coriolis relativa alla latitudine media e ω è la frequenza del moto.

Il data-set di vento utilizzato per l'analisi rotatoria proviene dalle misurazioni della stazione meteorologica ACTON ed è stato confrontato con le serie temporali estratte dai dati CODAR per i punti in Figura 5.2.

6.3 ANALISI SPETTRALE ROTATORIA DEI VETTORI CORRENTE E VENTO

Febbraio 2005. I mesi invernali sono solitamente caratterizzati da venti provenienti dal quadrante NE; nel caso di febbraio 2005 le direzioni dei venti predominanti sono influenzate dal passaggio di sistemi depressionari nell'area del Golfo (Figura 6.1). Un brusco abbassamento della pressione si verifica tra i giorni 12 e 14, e poi si ripete con una certa ciclicità ad intervalli di circa sei giorni; questo andamento periodico regolare prosegue anche nel mese di marzo 2005 (vedi Figura 6.8). Com'è stato possibile verificare nel capitolo 4, il passaggio di centri di bassa pressione è caratterizzato da un repentino aumento delle intensità dei venti, e da una rotazione nelle direzioni che ricadono frequentemente nell'intervallo S-WSW; il diagramma a stick (Figura 6.2) mostra la presenza di venti dal quadrante NE nei giorni precedenti al crollo della pressione e di inversioni periodiche da NE-SW nei giorni successivi.

Lo spettro rotatorio del vento ha un andamento ben delineato in concomitanza delle basse frequenze e molto più confuso per le alte frequenze. I periodi predominanti sono evidenziati in Figura 6.3 (170, 120, 90, 50, 20, 12 ore). Il picco a 170 ore (~ 7 giorni) è dettato dalle oscillazioni della pressione tipiche del mese in esame, quello a 12 ore è invece dovuto alle oscillazioni diurne, rappresentate dalle piccole increspature del segnale visibili in Figura 6.1. Il periodo di 20 ore è causato dalle oscillazioni in intensità del vento (Figura

6.4) ed in particolare da quelle concentrate nei giorni successivi al passaggio della perturbazione (tra il 14 e il 26 febbraio).

Gli spettri rotatori relativi ai sei punti della griglia CODAR selezionati per febbraio 2005 sono rappresentati in Figura 6.5. Per ogni spettro sono evidenziate con le frecce nere le frequenze corrispondenti ai periodi mareali (24 ore pari a 0.042 cph; 12 ore pari a 0.083 cph) e con le frecce rosse la frequenza corrispondente al periodo inerziale (17.3 ore pari a 0.058 cph).

Le caratteristiche spettrali di questo periodo sono:

- le frequenze diurne e semidiurne sono poco evidenti;
- la frequenza inerziale è poco evidente ma è sempre presente un picco di frequenza intorno alle 20 ore (oscillazioni quasi inerziali);
- sono sempre presenti dei picchi corrispondenti a periodi intorno alle 30 – 35 ore;
- le basse frequenze presentano un importante contributo intorno alle 50, 70-90, 170-200 ore.

L'assenza di evidenze marcate in prossimità dei periodi inerziali e mareali trova conferma in bibliografia. Infatti, secondo Moretti et al., (1985), il Golfo di Napoli è caratterizzato da picchi di piccola entità per le componenti mareali diurne e semidiurne. I fenomeni inerziali prevalgono in estate ed in autunno, cioè nei periodi dell'anno in cui il termoclino è ben sviluppato, e sono meno evidenti nei mesi invernali, quando condizioni meteorologiche sono meno severe.

Dal confronto dei risultati dell'analisi spettrale rotatoria, condotta per i punti corrente e per il vento, è già evidente la stretta correlazione tra le due serie temporali e, di conseguenza, la diretta reazione delle masse d'acqua superficiali del Golfo all'azione guida del forzante locale; ma, per ottenere una conferma di questo aspetto e verificare la similarità e la coerenza delle due serie temporali si passa attraverso l'analisi dei cross-spettri.

I cross-spettri interni (Figura 6.6) evidenziano una buona correlazione tra i due segnali sulle basse frequenze. L'energia spettrale presenta un forte picco intorno alle 170 ore (~ 7 giorni), una serie di picchi tra le 120 e le 66 ore (tra i 3 ed i 4 giorni) e intorno alle 50 ore (~ 2 giorni). Sulle basse frequenze non si ritrovano dei segnali nettamente prevalenti ma è possibile evidenziare, in tutti i punti esaminati, la presenza di un piccolo picco relativo ad un periodo di 20 ore (frequenza pari a 0.05 cph). Non c'è netta predominanza di una componente rotatoria sull'altra.

I valori di coerenza prossimi all'unità (Figura 6.7) si raggiungono per le basse frequenze; in questa situazione i due segnali risultano in fase. Per periodi inferiori a 27 ore l'andamento della coerenza diventa oscillante e i valori più alti si raggiungono solo a frequenze specifiche; le serie temporali risultano nel loro complesso non in fase.

I cross-spettri esterni (Figura 6.8) sono stati realizzati correlando la componente antioraria della corrente (+) con la componente oraria del vento (-) e viceversa. Com'era facile aspettarsi, i valori di densità spettrale raggiunti sono mediamente più bassi rispetto ai cross-spettri interni, ma le frequenze più rilevanti coincidono in corrispondenza delle basse frequenze. Per le alte frequenze non si riscontra il picco intorno alle 20 ore, ma risulta evidente la presenza di un segnale che si ripete con un periodo tra le 30 e le 40 ore, riscontrato anche per gli autospettri dei punti corrente.

Il coefficiente rotatorio (Figura 6.9) fornisce un'indicazione sul senso di rotazione predominante dei moti in esame; la curva rossa rappresenta l'andamento del coefficiente rotatorio teorico e il punto in cui la linea teorica tocca l'asse rappresenta proprio la frequenza inerziale. In questa analisi il coefficiente rotatorio è stato valutato per gli spettri rotatori delle correnti (S^+) e per i cross spettri interni (S_{cw}^+). In corrispondenza delle basse frequenze e nell'intorno della frequenza inerziale, le correnti (Figura 6.9a) tendono a ruotare in senso orario; per frequenze più alte di quella inerziale le correnti cambiano verso di rotazione dirigendosi verso valori di R più prossimi a 1. Il coefficiente rotatorio valutato a partire dai cross spettri (Figura 6.9b) fornisce gli stessi risultati ottenuti per le correnti; sulle basse frequenze e nell'intorno della frequenza inerziale la tendenza a ruotare in senso orario appare ancora più marcata, infatti i coefficienti hanno tutti valori prossimi a -1. Per frequenze più alte di quella inerziale i punti tendono a seguire la curva teorica per poi dirigersi verso valori maggiori di zero in corrispondenza delle alte frequenze.

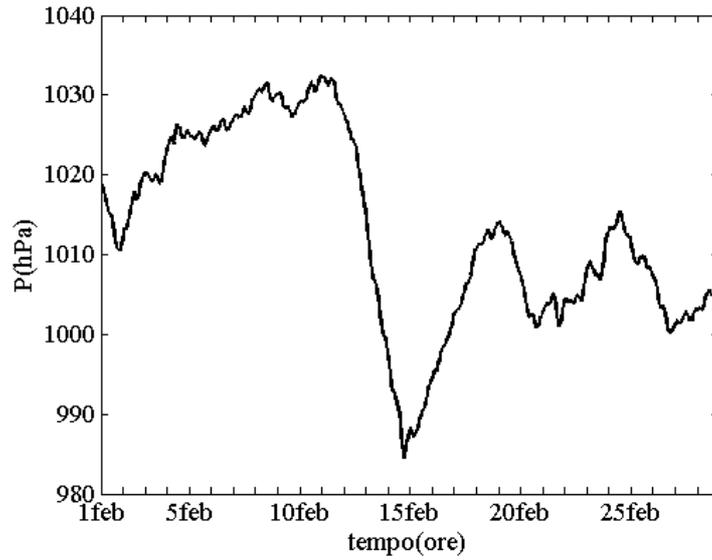


Figura 6.1 – Andamento della pressione nel mese di febbraio 2005.

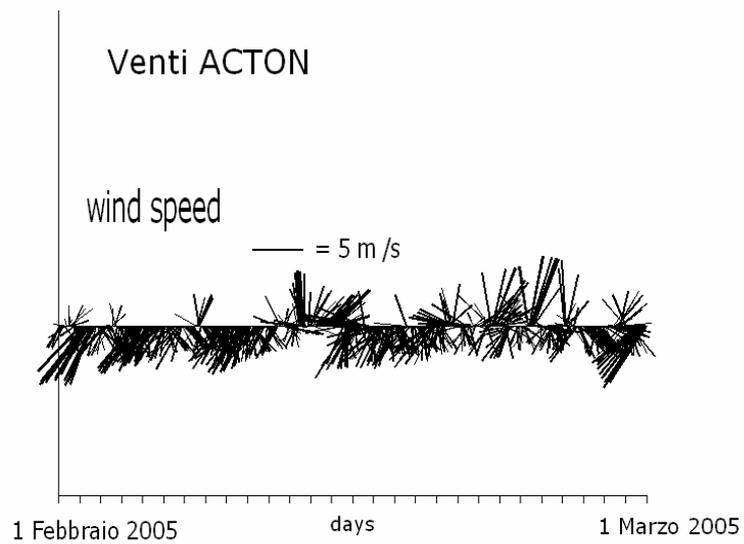


Figura 6.2 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione ACTON per il mese di febbraio 2005.

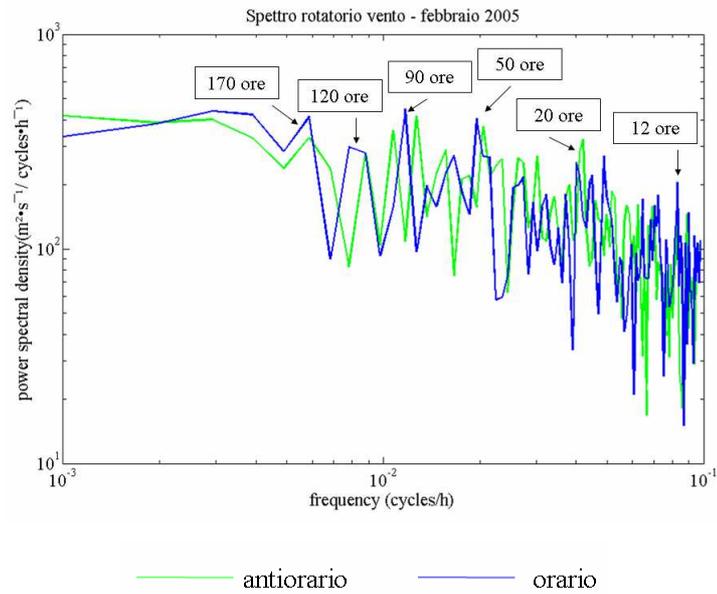


Figura 6.3 – Spettro rotatorio del vento per febbraio 2005. Sono evidenziati i periodi corrispondenti alle frequenze più importanti.

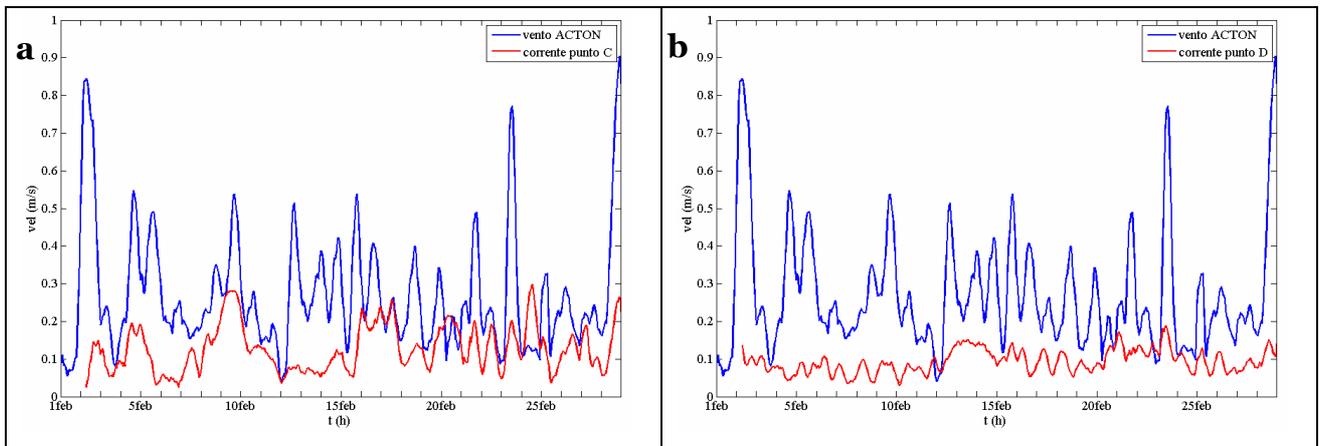
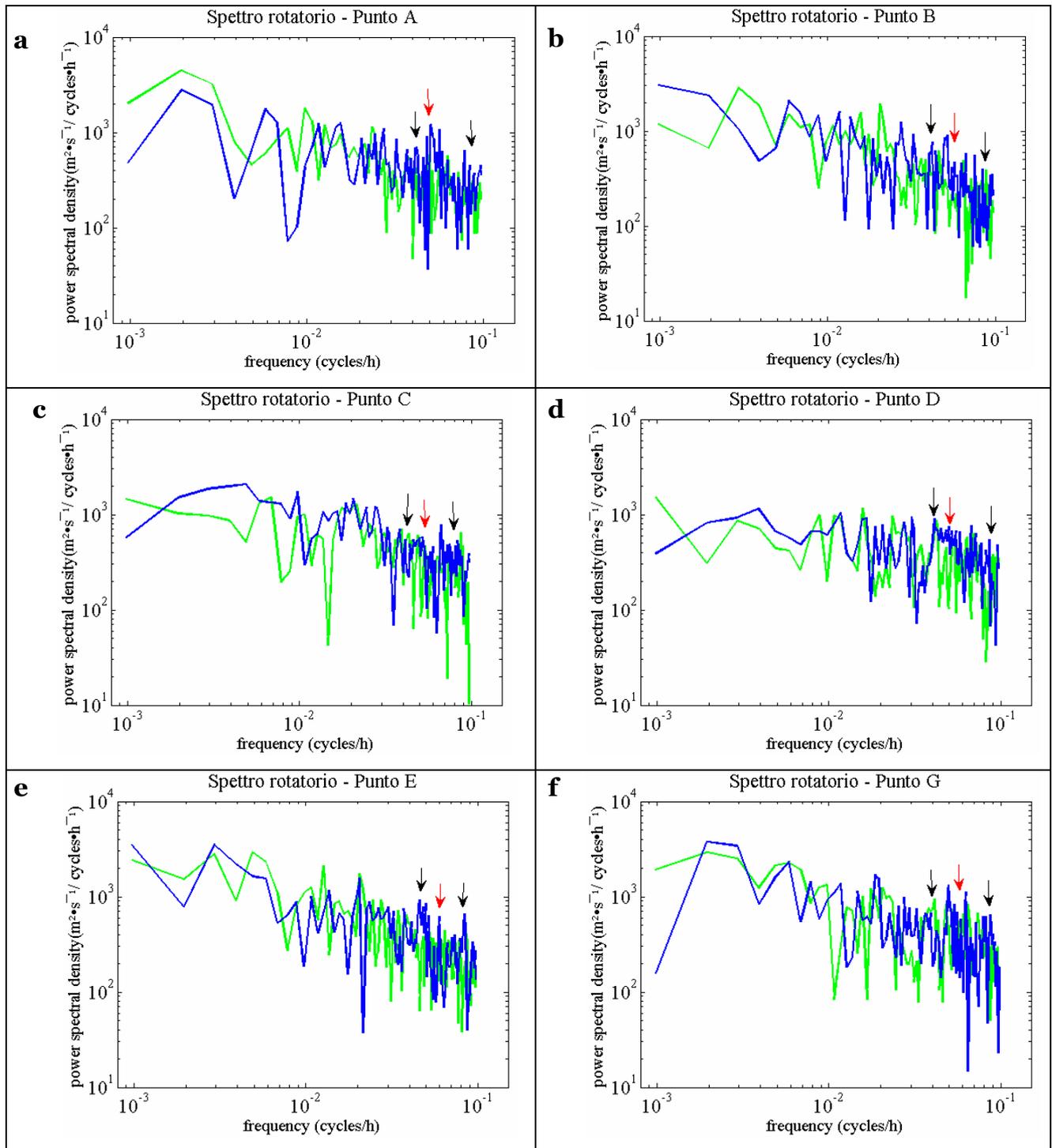


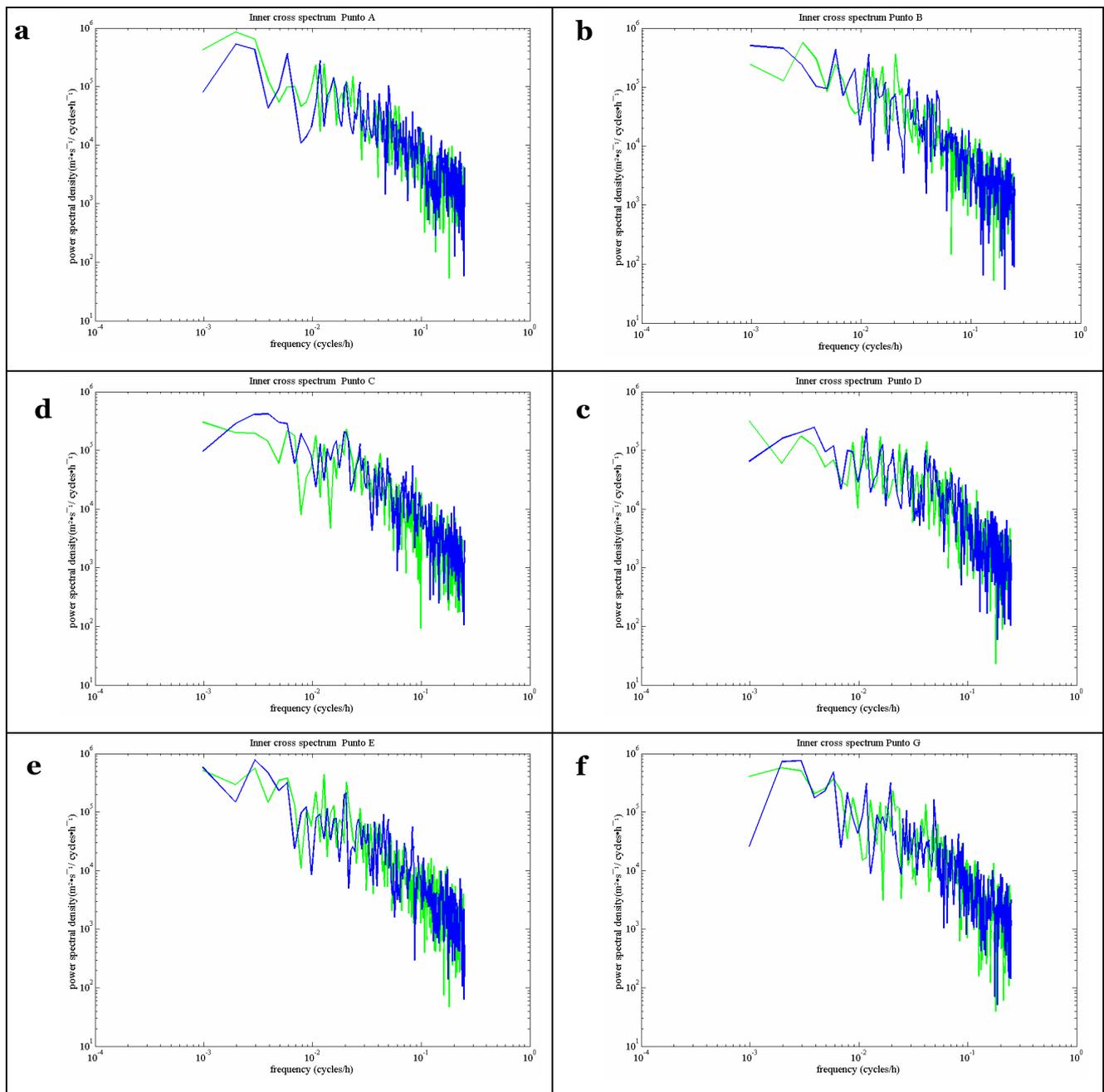
Figura 6.4 – a) Intensità del vento (ACTON) e della corrente nel punto C (Figura 5.2). b) Intensità del vento (ACTON) e della corrente nel punto D (Figura 5.2).



— antiorario — orario

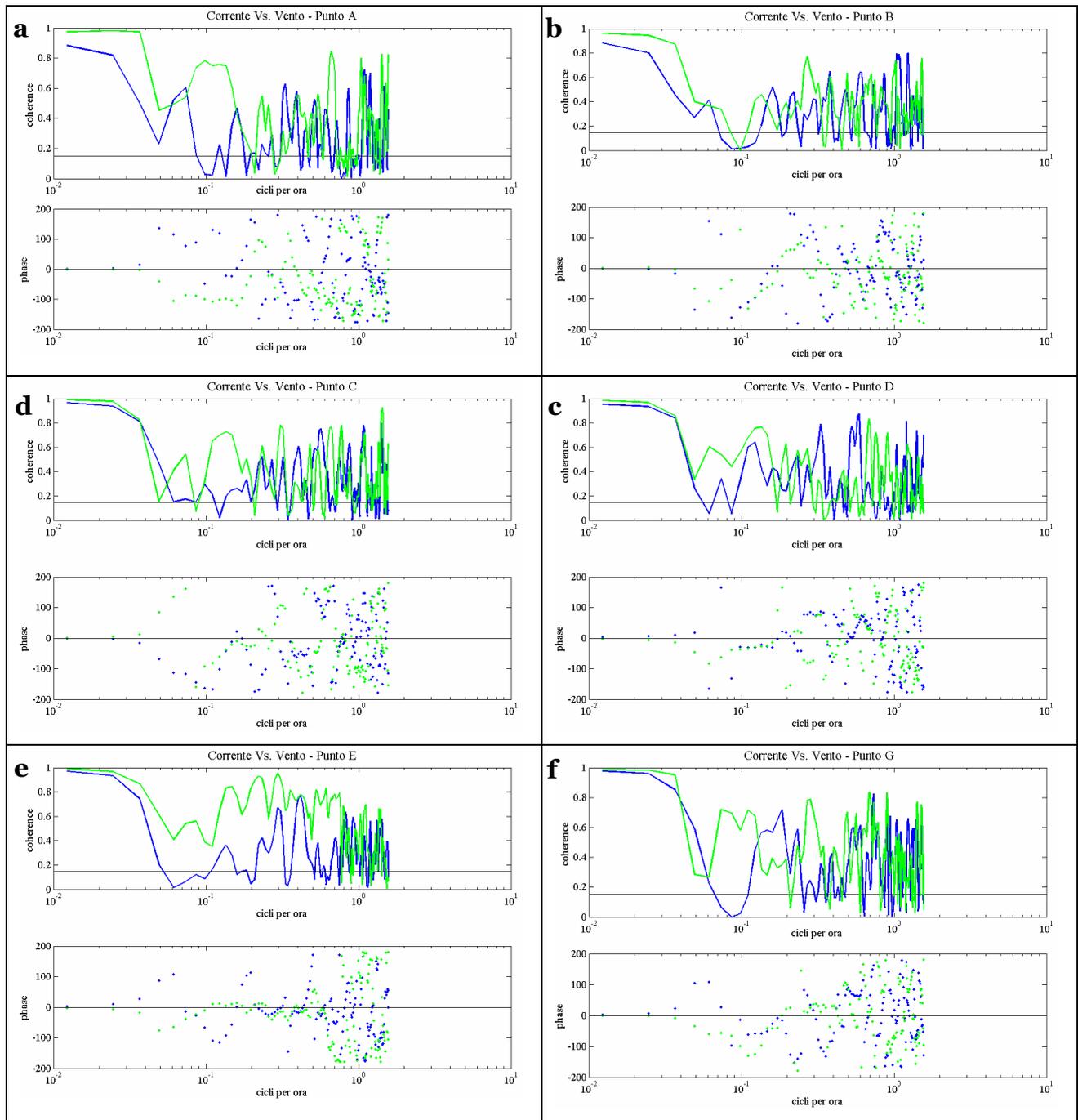
Figura 6.5 – Spettro rotatorio della corrente (febbraio 2005) per i punti rappresentati in Figura

5.2.



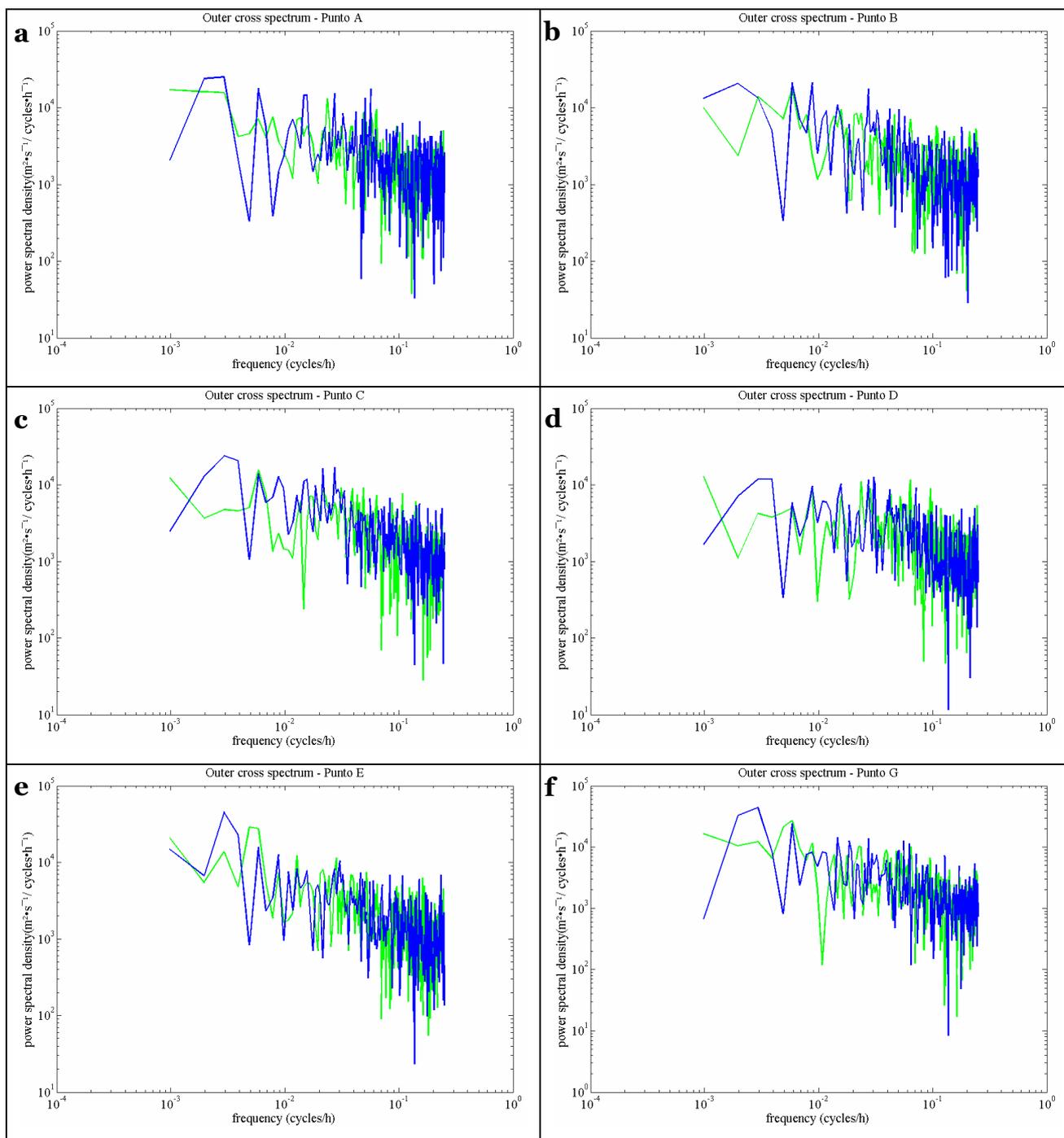
— antiorario — orario

Figura 6.6 – Inner cross-spettro (febbraio 2005) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.



— antiorario — orario

Figura 6.7 – Coerenza e fase relative ai cross spettri interni (febbraio 2005). Per le immagini di coerenza la linea nera evidenzia il valore limite relativo ad un intervallo di confidenza del 95%; per le immagini della fase la linea nera evidenzia il valore zero.



— corrente + ; vento -
 — corrente - ; vento +

Figura 6.8 – Outer cross spettro (febbraio 2005) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.

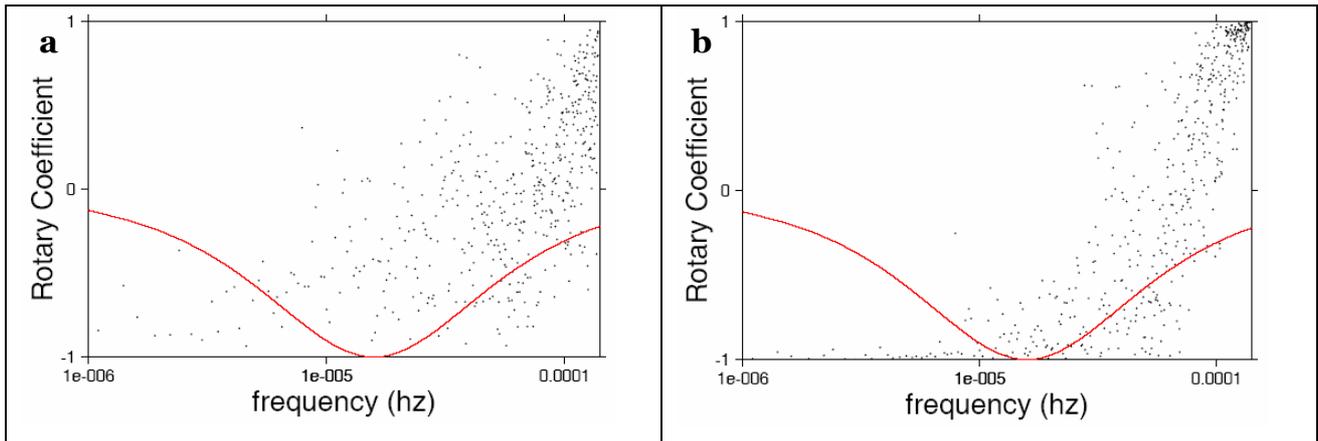


Figura 6.9– Coefficiente rotatorio per lo spettro del campo di corrente nel punto A (a) e per il cross spettro tra vento e corrente nel punto A (b).

Marzo 2005. Per questo mese le condizioni di vento registrate dalla stazione ACTON mostrano un comportamento tipicamente primaverile, caratterizzato dall'insediamento del regime di brezza (vedi capitolo 3 e 4).

La pressione atmosferica (Figura 6.10) oscilla con un periodo 7-8 giorni (~ 180-200 ore); le piccole increspature del segnale rappresentano le variazioni diurne di pressione, caratterizzate da un periodo di circa 12 ore.

Lo spettro rotatorio del vento (Figura 6.12) mostra due picchi di frequenza caratteristici per periodi di 24 e 12 ore, il primo legato alla periodicità stessa del fenomeno, il secondo, invece, caratteristico dell'inversione di brezza (la direzione del vento si inverte e le intensità variano da valori massimi a valori minimi ogni 12 ore in concomitanza della transizione da brezza di mare a brezza di terra). Lo spettro orario prevale su quello antiorario. Per quanto riguarda le basse frequenze, i segnali più intensi corrispondono a periodi dell'ordine di 208 (8 giorni), 128 (5 giorni) e 80-100 (3-4 giorni) ore.

Gli spettri rotatori della corrente relativi al periodo marzo 2005 sono rappresentati in Figura 6.14 per i sei punti selezionati. Le caratteristiche spettrali di questo periodo sono:

- le densità spettrali raggiungono i valori più alti in concomitanza delle alte frequenze;
- le frequenze inerziali, diurne e la semidiurne sono ben evidenti in tutti i punti del bacino;
- esiste un periodo tipico intorno alle 30 ore;
- esistono dei contributi sulle basse frequenze in particolare nell'intorno delle 80 ore e delle 130-200 ore.

Lo spettro rotatorio orario prevale su quello antiorario in tutti i punti corrente esaminati, in particolare nella regione delle alte frequenze. Questa caratteristica, evidenziata anche per lo spettro del vento, indica la tendenza generale del forzante locale ad imprimere un input rotatorio anticiclonico.

L'intensità del vento (Figura 6.13) oscilla seguendo l'andamento giornaliero delle brezze dal 7 marzo in poi; la corrente segue questo andamento del vento con un ritardo compreso tra le 6 e le 10 ore (Paragrafo 4.2.3, Figura 4.29) e mostra risultati praticamente identici in tutti i punti esaminati (non mostrati).

I cross-spettri interni (Figura 6.15) raggiungono la densità spettrale maggiore per frequenze pari a 0,041 cph (24 ore); sulle basse frequenze i periodi più rappresentativi coincidono con quelli evidenziati per lo spettro rotatorio del vento in Figura 6.12 (208, 128, 85 ore). I valori di coerenza più alti si raggiungono per la componente antioraria; per periodi compresi tra le 100 e le 9 ore i segnali risultano in fase nella zona costiera (Figura 5.14 d) e sfasati di massimo 90° negli altri punti del bacino (Figura 6.16 a, b, c, e, f).

I cross-spettri esterni (Figura 6.17) non aggiungono nessuna novità particolare alle caratteristiche rotatorie del periodo in esame; non ci sono frequenze realmente predominanti. E' possibile distinguere la correlazione intorno alle 24 ore ma non quella intorno alle 12 ore; in particolare per gli spettri relativi ai punti corrente C, D, E, F c'è un piccolo picco centrato sui 0,033 cph (~ 30 ore) che si riscontra anche per lo spettro della corrente superficiale .

Il coefficiente rotatorio (Figura 6.18) valutato per gli spettri delle correnti e per i cross spettri evidenzia la tendenza del flusso a ruotare in senso orario in particolare per tutta la regione delle basse frequenze, fino alla frequenza inerziale. Per frequenze più alte di quella inerziale c'è una maggiore tendenza alla rotazione in senso antiorario. Anche in questo caso i coefficienti rotatori relativi ai cross spettri permettono di individuare in maniera chiara la fascia di frequenze per cui il moto è diretto in senso orario e quella per cui il moto è diretto in senso antiorario.

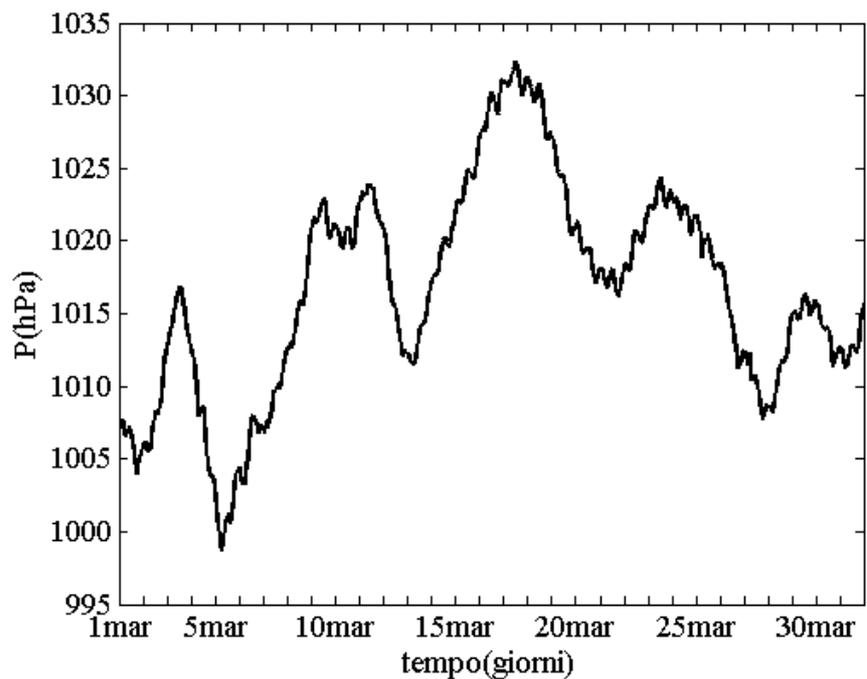


Figura 6.10 – Andamento della pressione nel mese di marzo 2005.

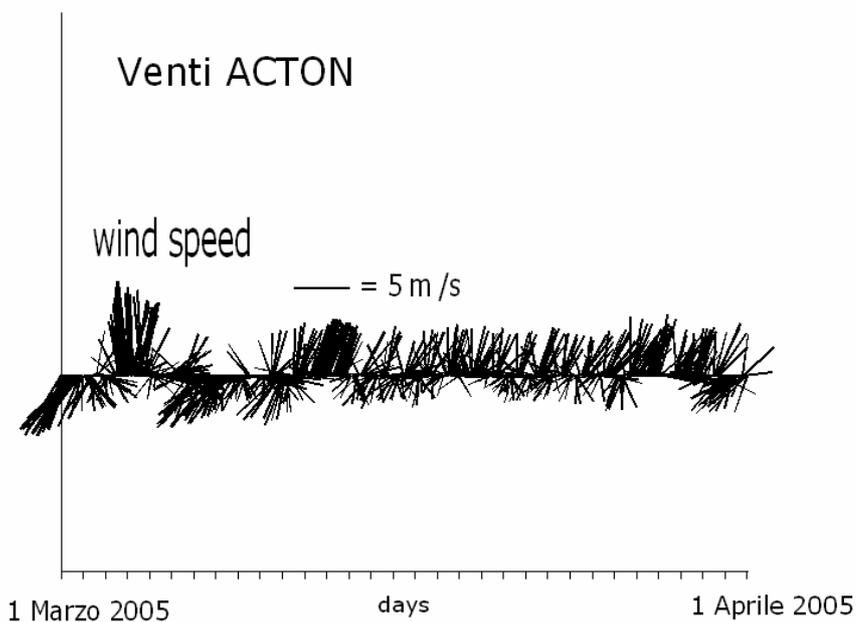


Figura 6.11 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione ACTON per il mese di marzo 2005.

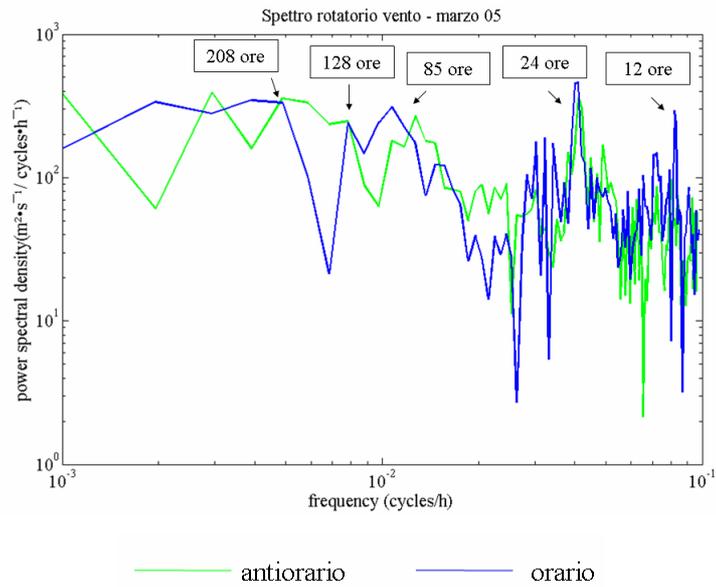


Figura 6.12 – Spettro rotatorio del vento per marzo 2005. Sono evidenziati i periodi corrispondenti alle frequenze più importanti.

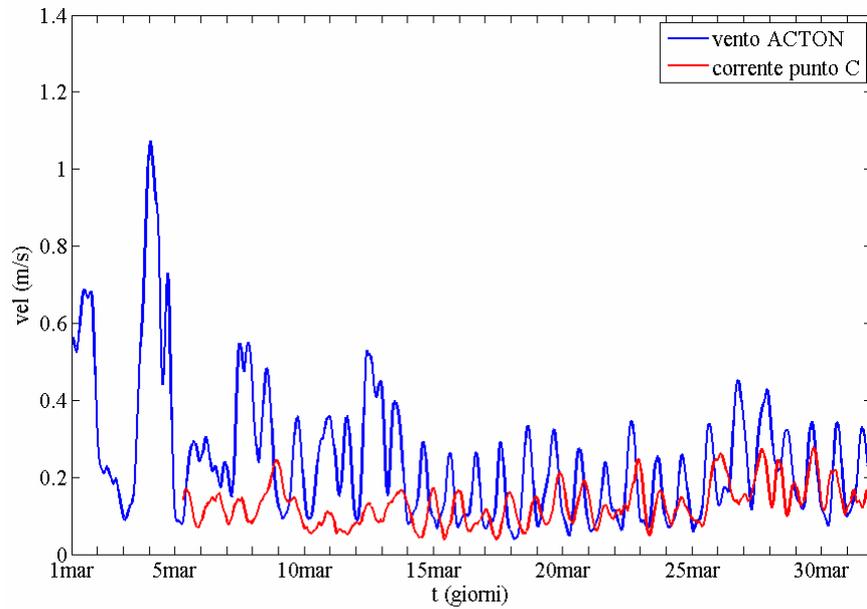


Figura 6.13 – Intensità del vento (ACTON) e della corrente nel punto C (Figura 5.2).

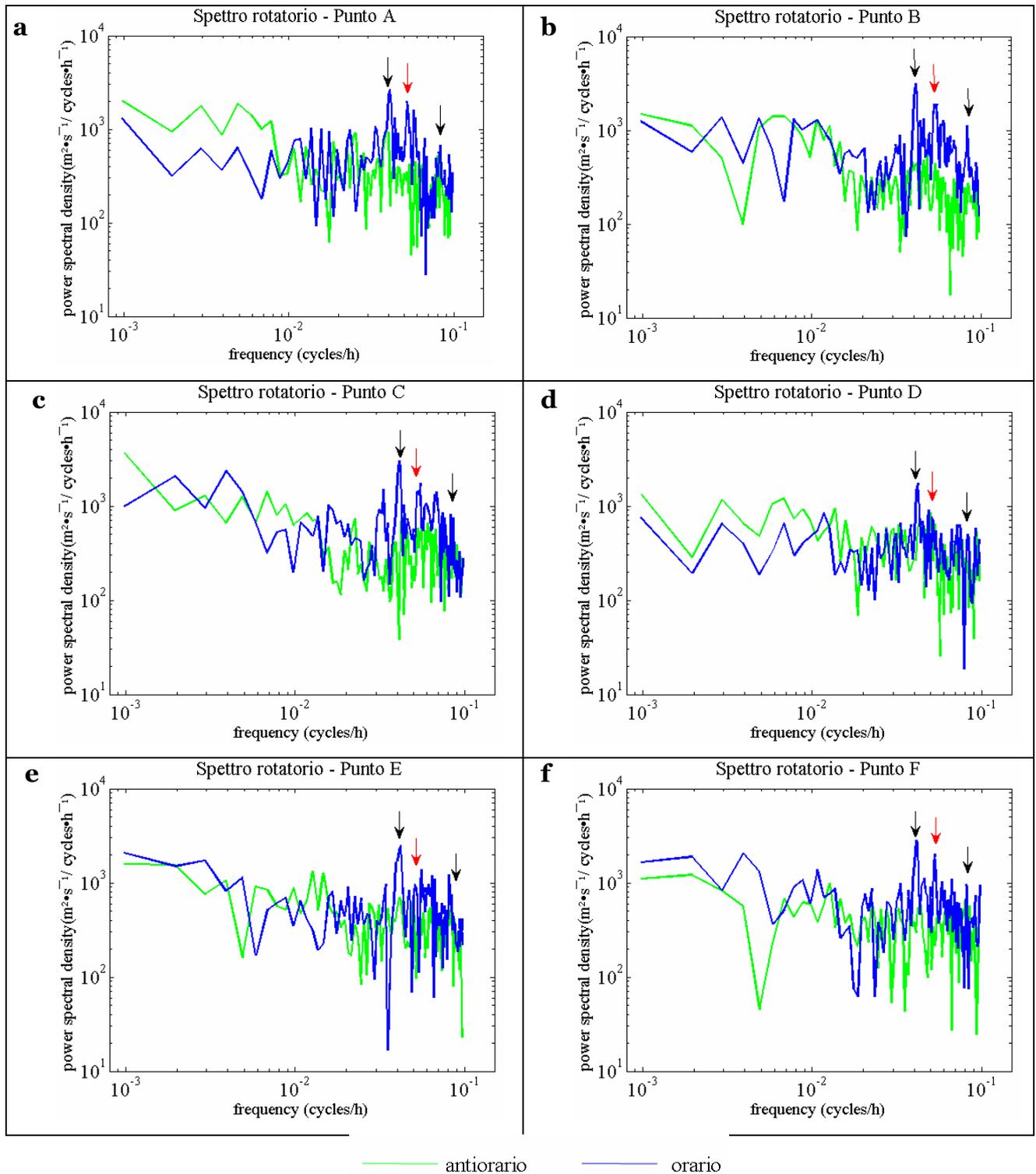
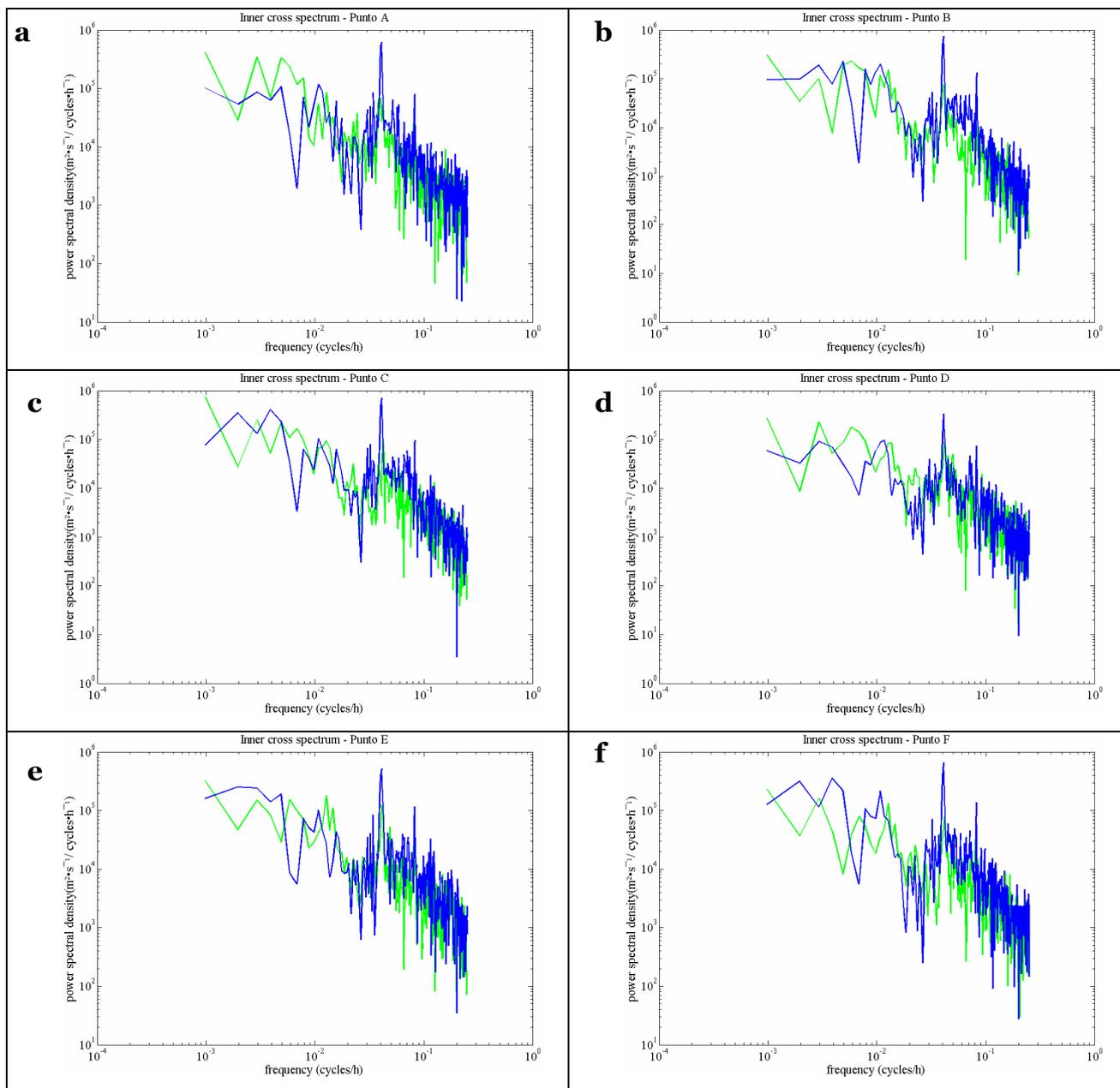


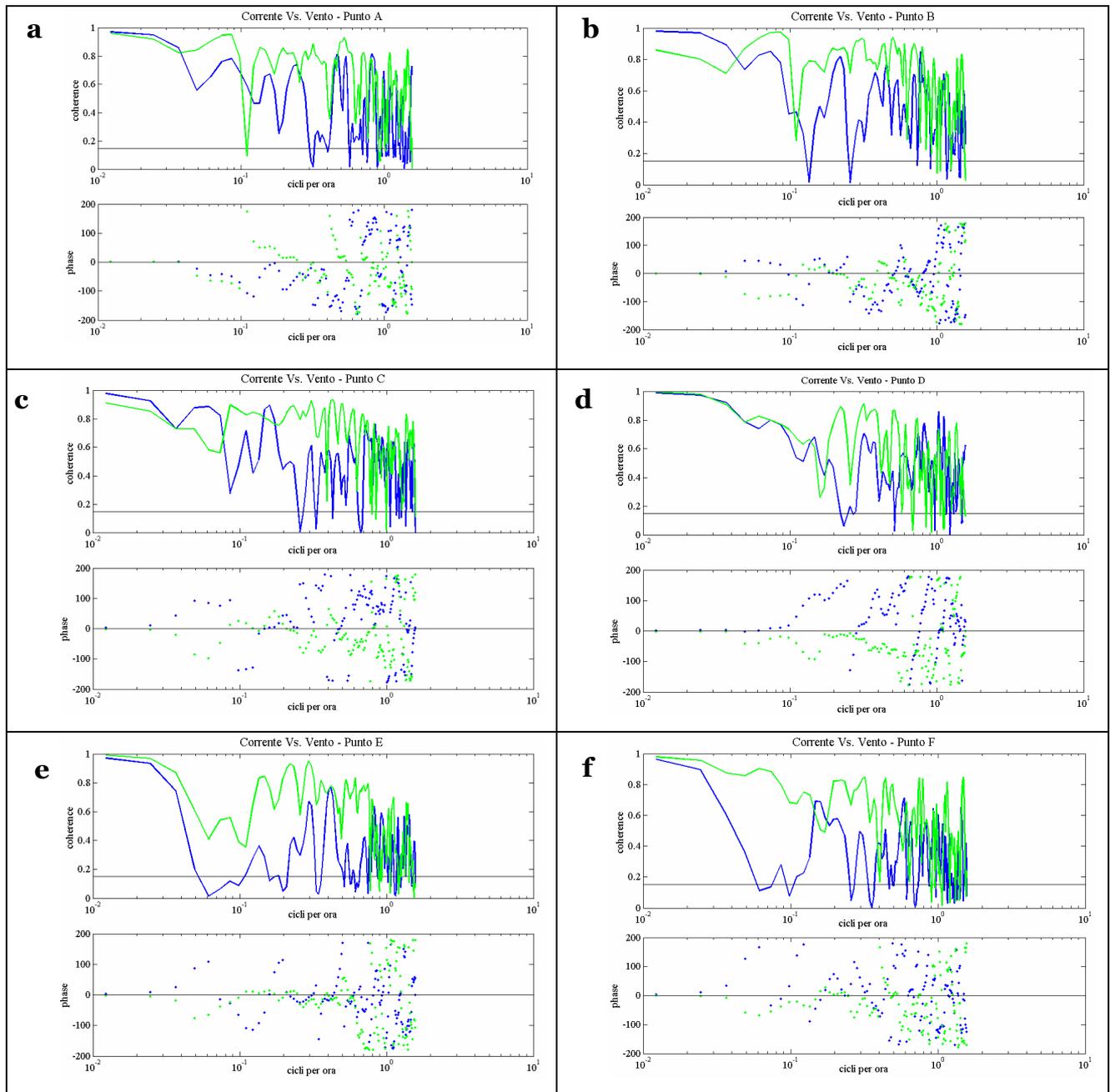
Figura 6.14 – Spettro rotatorio della corrente (marzo 2005) per i punti rappresentati in Figura

5.2.



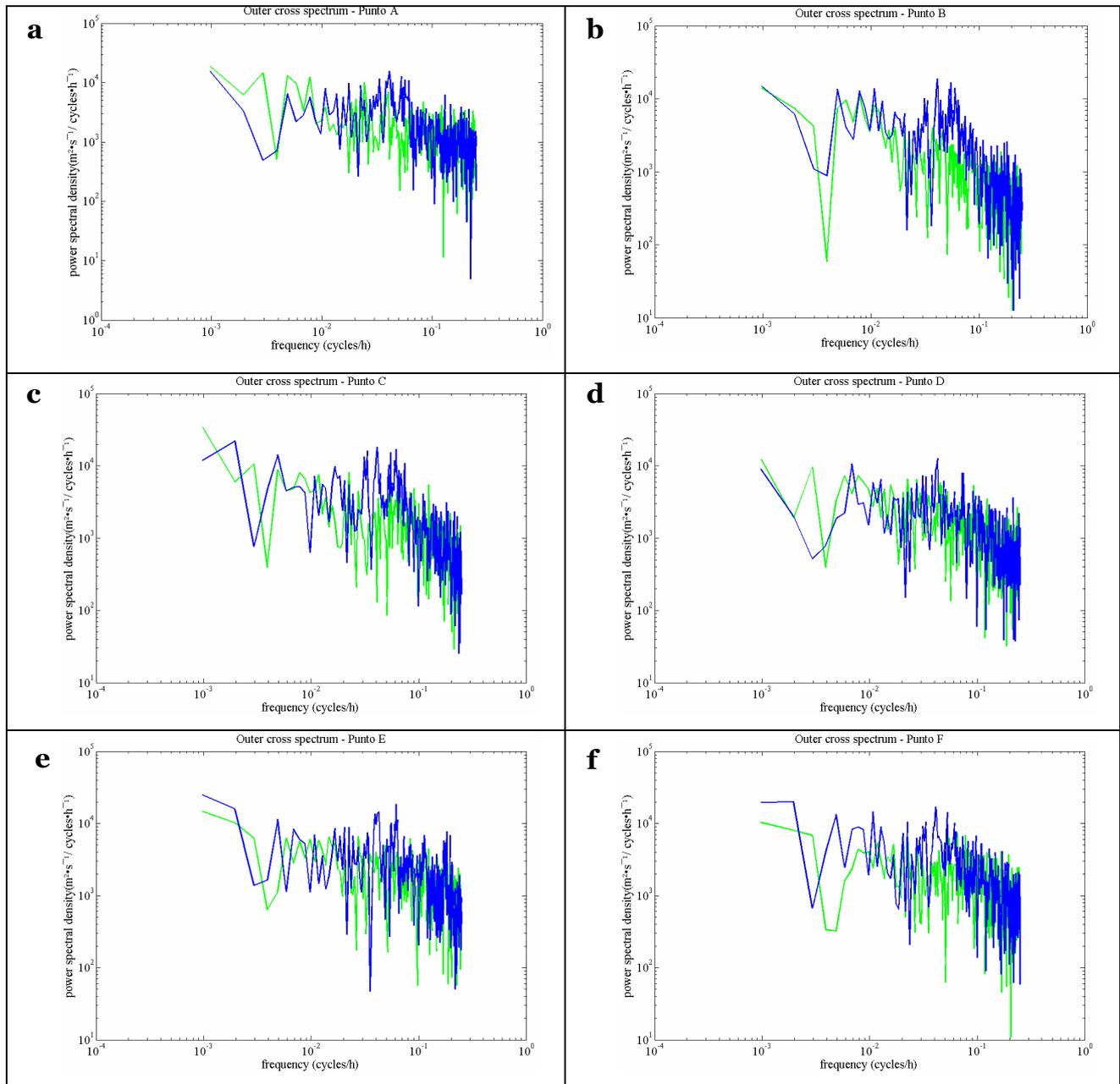
— antiorario — orario

Figura 6.15 – Inner cross-spettro (marzo 2005) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.



— antiorario — orario

Figura 6.16 – Coerenza e fase relative ai cross spettri interni (marzo 2005). Per le immagini di coerenza la linea nera evidenzia il valore limite relativo ad un intervallo di confidenza del 95%; per le immagini della fase la linea nera evidenzia il valore zero.



— corrente + ; vento -
— corrente - ; vento +

Figura 6.17– Outer cross-spettro (marzo 2005) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.

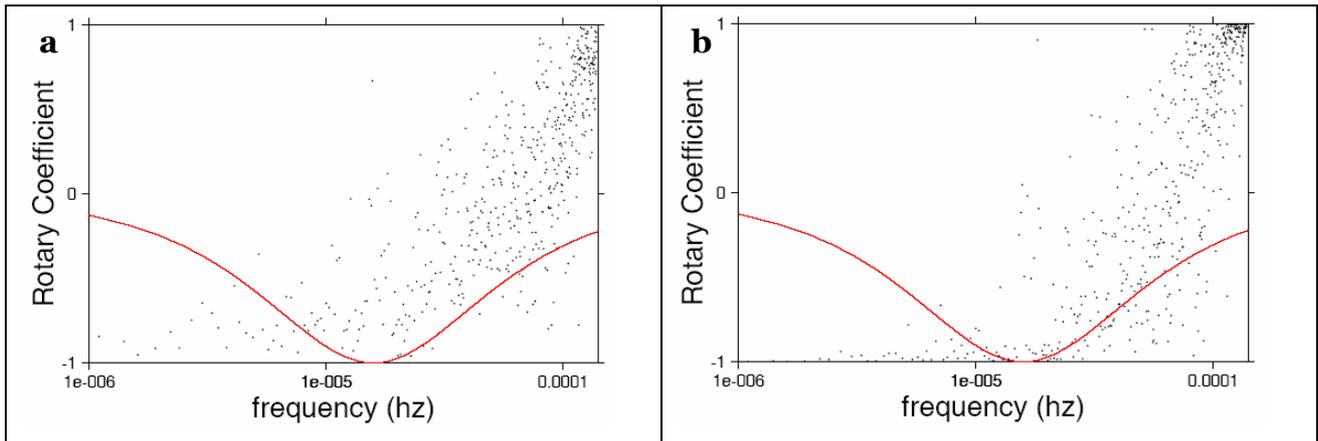


Figura 6.18– Coefficiente rotatorio per lo spettro del campo di corrente nel punto D (a) e per il cross spettro tra vento e corrente nel punto D (b).

Dicembre 2006. Nel periodo esaminato il campo di correnti superficiale è guidato dall'ingresso di acqua tirrenica attraverso la Bocca Piccola. La scarsa correlazione con il vento, in termini di direzioni, è esplicitata dai risultati della cross-covarianza vento-corrente, effettuata su un periodo di 8 giorni (paragrafo 4.3).

Il vento proviene dal quadrante NE nella parte centrale del mese (tra il 9 ed il 27 dicembre) (Figura 6.20); nei primi 8 giorni la continua diminuzione della pressione (Figura 6.19) genera l'alternanza di venti da NE e da SW, che si ripete in maniera meno intensa anche negli ultimi 5 giorni di dicembre. In queste fasi del mese l'intensità del vento (Figura 6.22) oscilla con un periodo compreso tra 20 e 25 ore.

La pressione (Figura 6.19) mostra dei minimi relativi a 200, 440 e 590 ore corrispondenti ai principali picchi di intensità del vento (Figura 6.22). Anche in questo caso sono presenti le oscillazioni corrispondenti all'andamento diurno della pressione (periodo di 12 ore).

L'intensità del segnale corrente (Figura 6.22) oscilla in maniera irregolare e mostra evidenti connessioni con l'oscillazione del segnale vento.

Lo spettro rotatorio del vento (Figura 6.21) evidenzia periodi tipici di 256, 128 103 e tra 40 e 60 ore. Nella regione delle alte frequenze è possibile distinguere dei picchi intorno alle 24 e 12 ore.

Gli spettri rotatori dei punti corrente sono rappresentati in Figura 6.23 per i sei punti selezionati. Le caratteristiche spettrali di questo periodo sono:

- le densità spettrali raggiungono i valori più alti sulle basse frequenze;
- le alte frequenze non mostrano nessun picco significativo;

- le frequenze mareali e quella inerziale sono poco evidenti in tutti i punti del bacino ma si evidenzia la presenza di oscillazioni quasi inerziali con periodo di 20 ore;
- le basse frequenze mostrano dei contributi significativi a 50, 60, 130 e 250 ore circa.

I cross-spettri interni per dicembre 2006 (Figura 6.24) mostrano che c'è correlazione tra vento e corrente solo su periodi lunghi intorno ai 10 e 5 giorni (rispettivamente 256 e 120 ore); non ci sono picchi nella regione delle basse frequenze ad eccezione dei punti corrente C e D che, trovandosi in un'area più prossima alla costa, risentono maggiormente dell'influenza del vento di brezza e mostrano frequenze più piccate nell'intorno delle 24 e 12 ore. Le correnti superficiali relative al mese in esame sono principalmente guidate dall'input di circolazione tirrenica quindi, la scarsa correlazione tra serie temporali di vento e corrente, non solo non stupisce ma addirittura conferma quanto osservato dai campi di corrente CODAR (Capitolo 5, paragrafo 5.3).

Le due serie temporali raggiungono valori di coerenza maggiori in concomitanza delle basse frequenze; i segnali risultano in fase solo quando la coerenza è alta (Figura 6.25).

I cross-spettri esterni (Figura 6.26) evidenziano gli stessi periodi definiti per i cross-spettri interni in concomitanza di basse frequenze (256 e 120 ore) e anche l'andamento delle curve è molto simile; evidentemente la corrente superficiale è influenzata allo stesso modo sia dalla componente del vento rotante nella stessa direzione che da quella rotante in senso opposto a conferma della scarso input impresso dal forzante locale nel periodo in esame.

I coefficienti rotatori (Figura 6.27) mostrano risultati molto simili a quelli ottenuti per febbraio e marzo 2005.

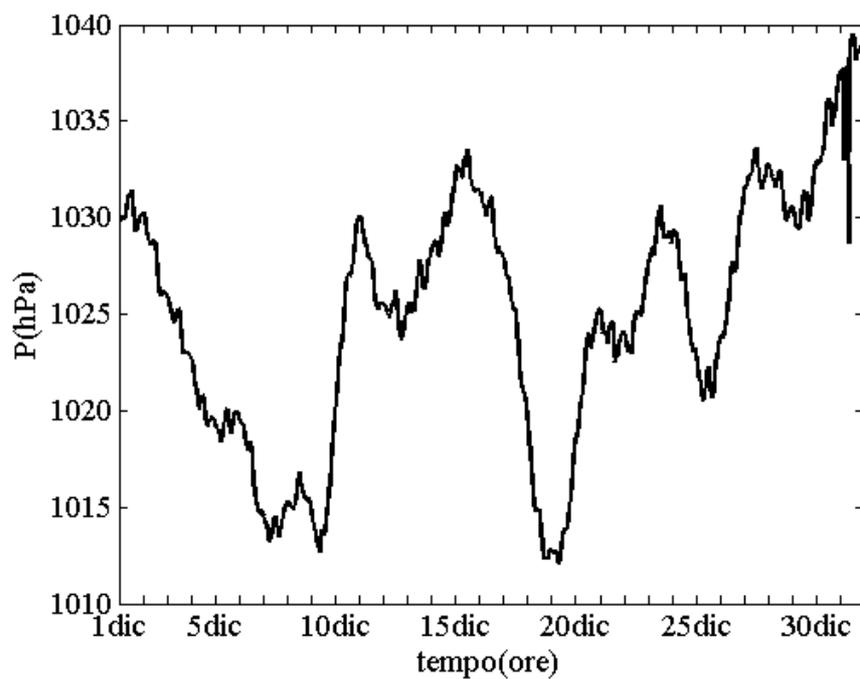


Figura 6.19 – Andamento della pressione nel mese di dicembre 2006.

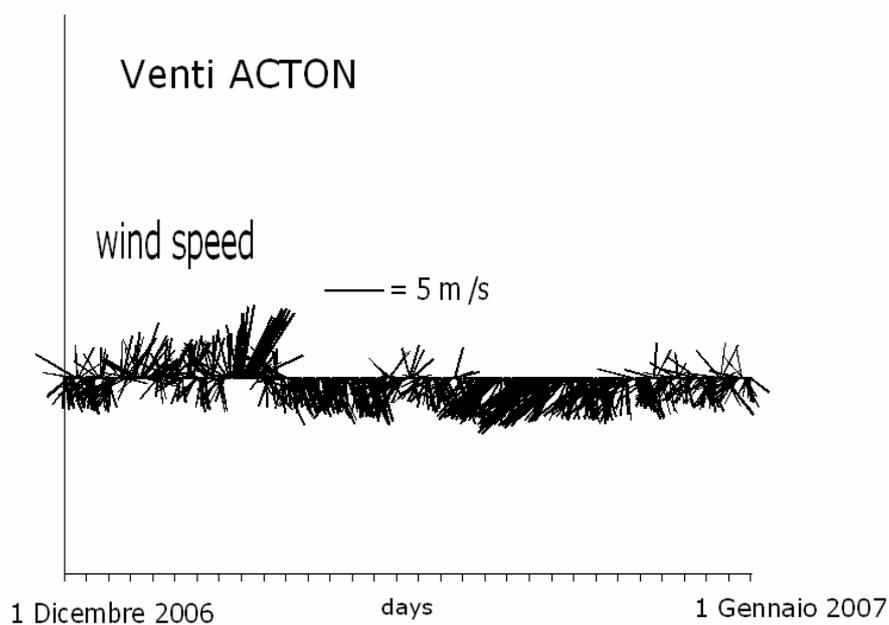


Figura 6.20 – Diagramma a stick del vento registrato dalla stazione ACTON per il mese di dicembre 2006.

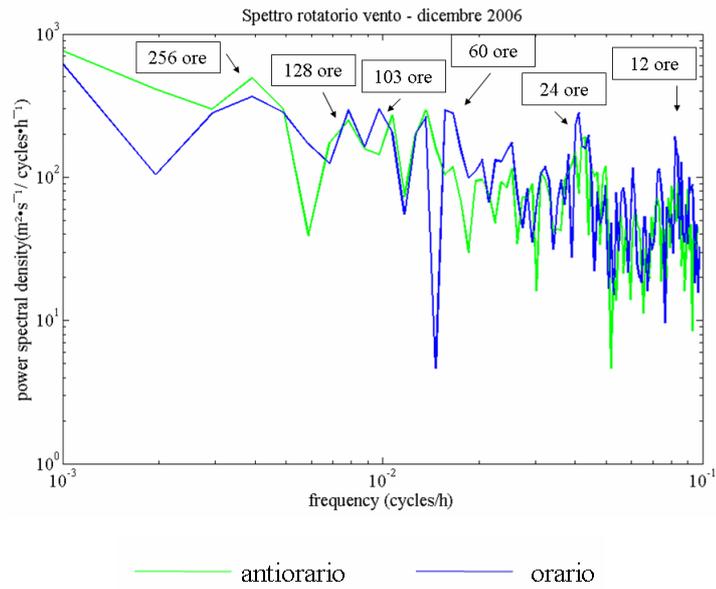


Figura 6.21 – Spettro rotatorio del vento per dicembre 2006. Sono evidenziati i periodi corrispondenti alle frequenze più importanti.

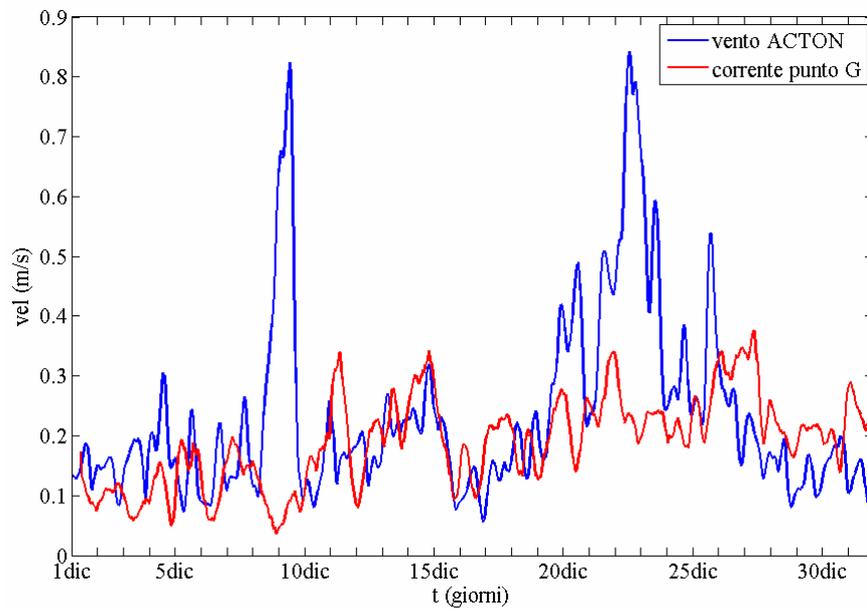
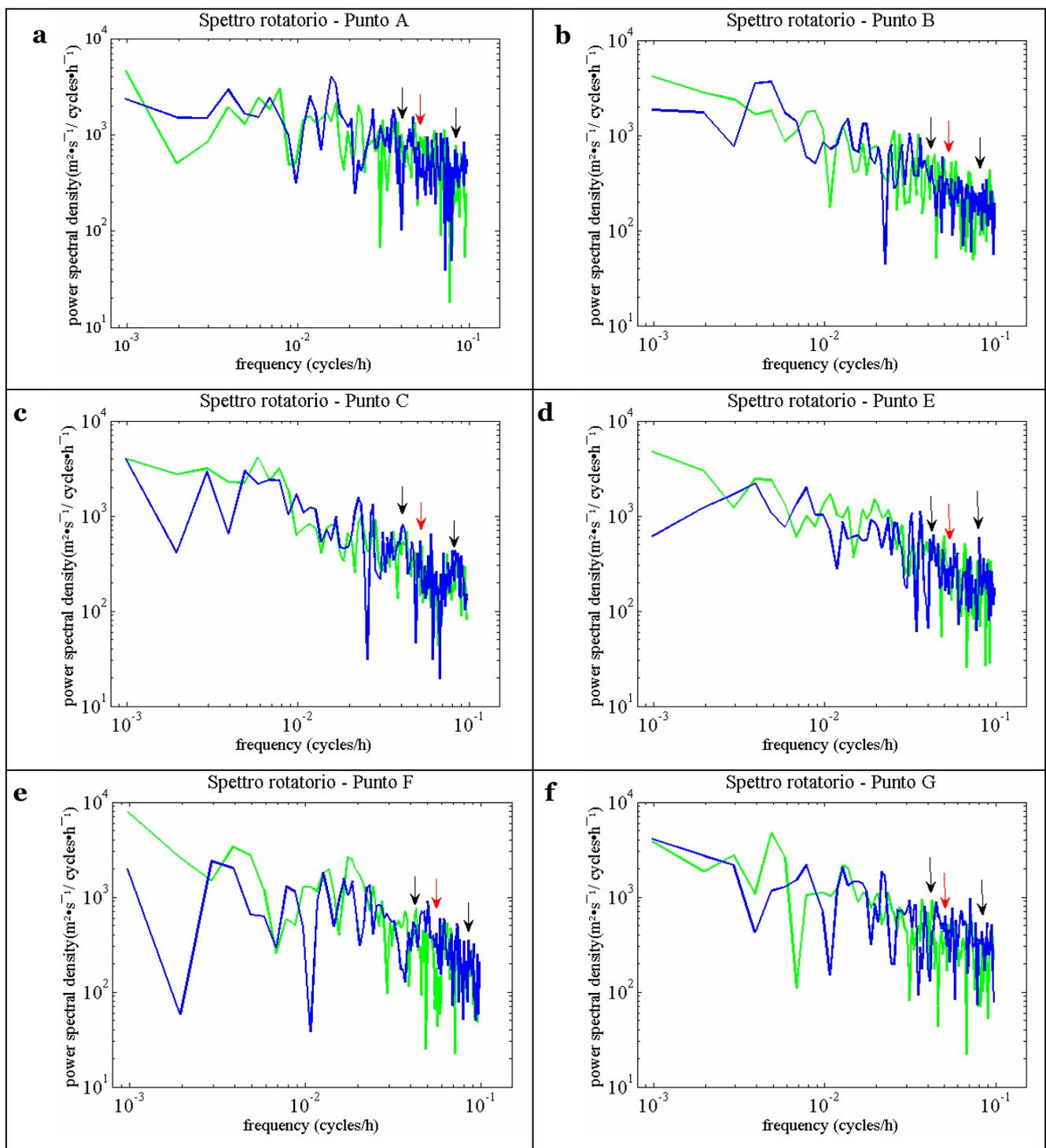
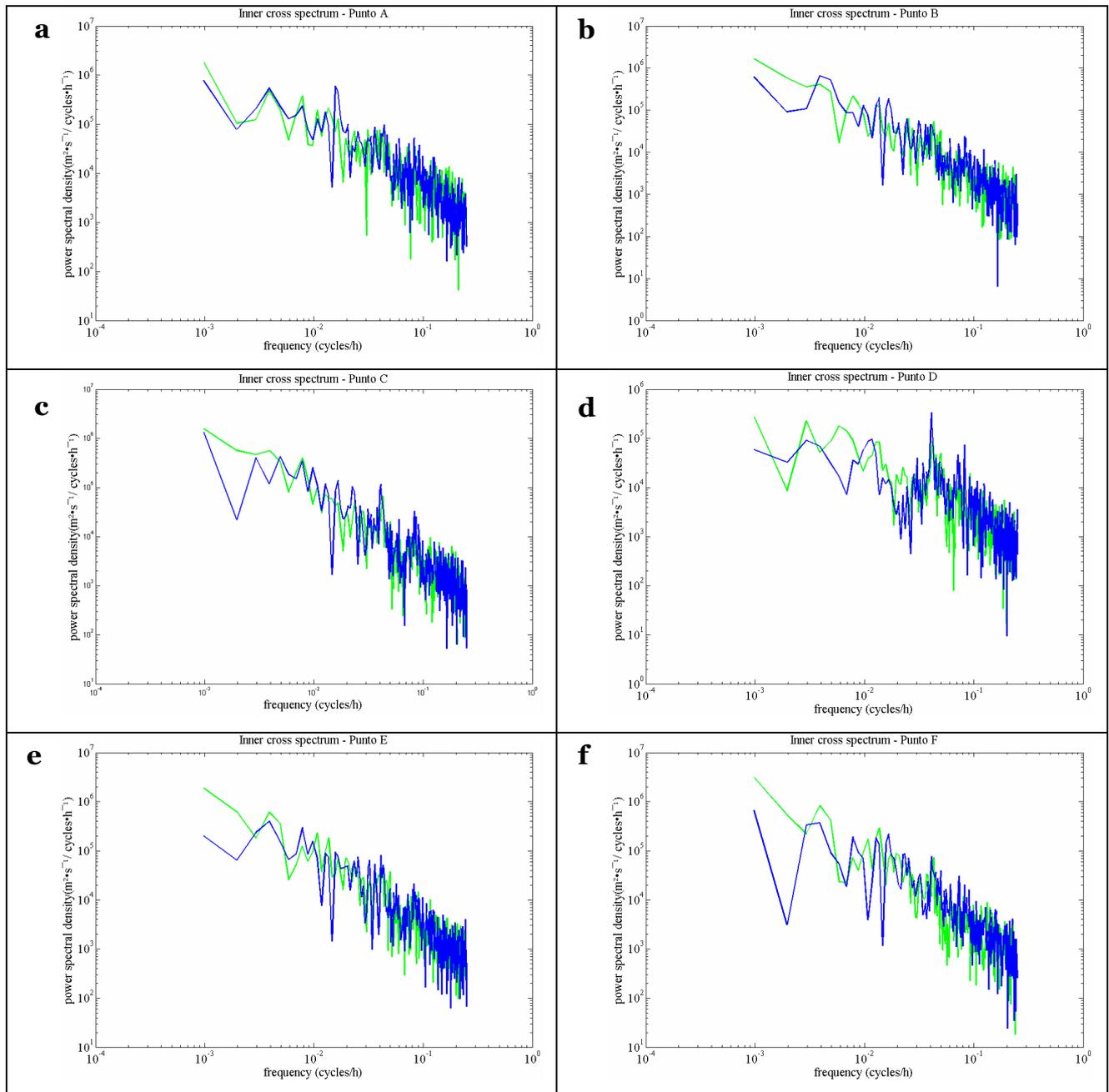


Figura 6.22 – Intensità del vento (ACTON) e della corrente nel punto G (Figura 5.2).



— antiorario — orario

Figura 6.23 – Spettro rotatorio della corrente nel mese (dicembre 2006) per i punti rappresentati in Figura 5.2.



— antiorario — orario

Figura 6.24 – Inner cross-spettro (dicembre 2006) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.

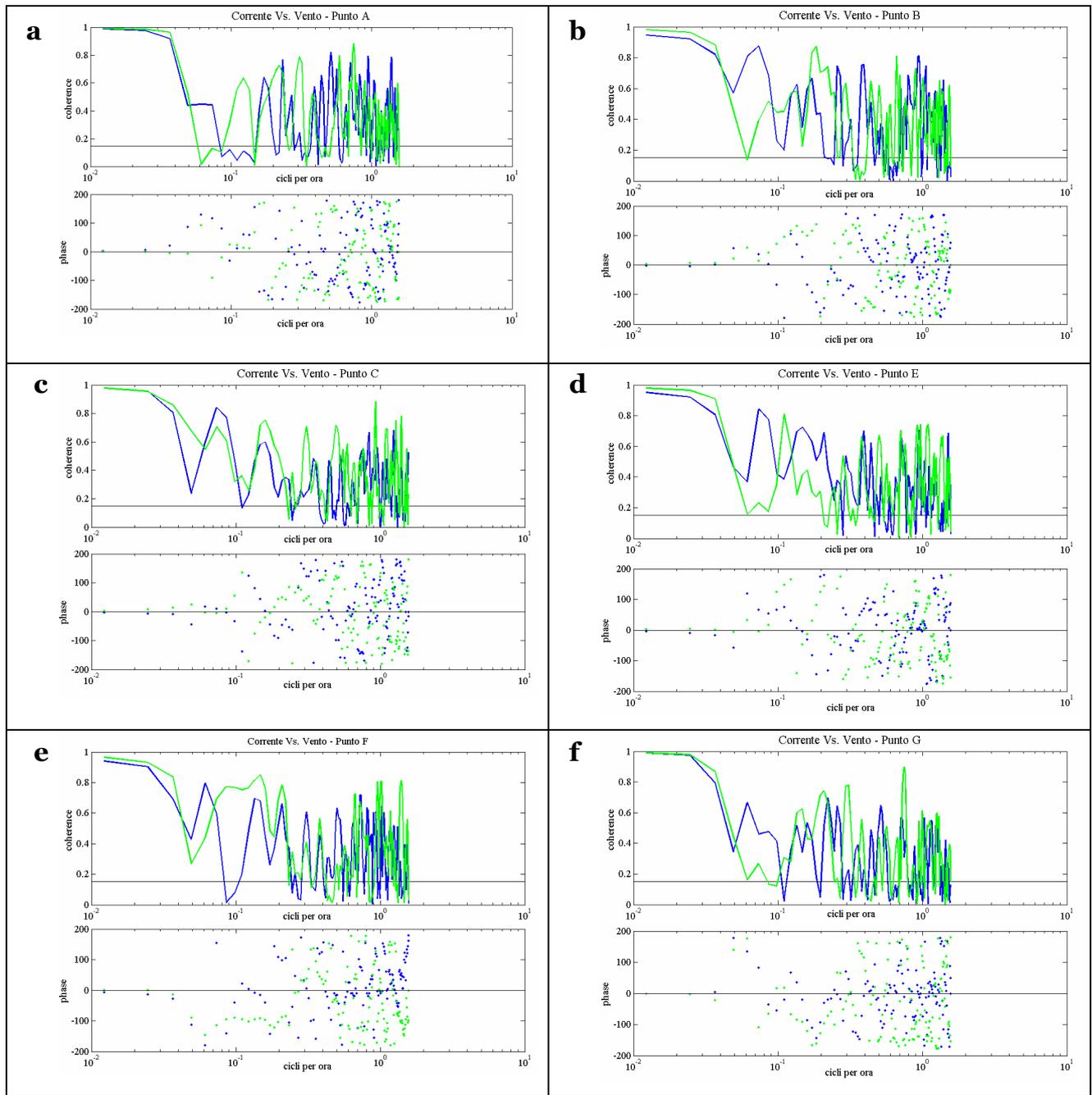
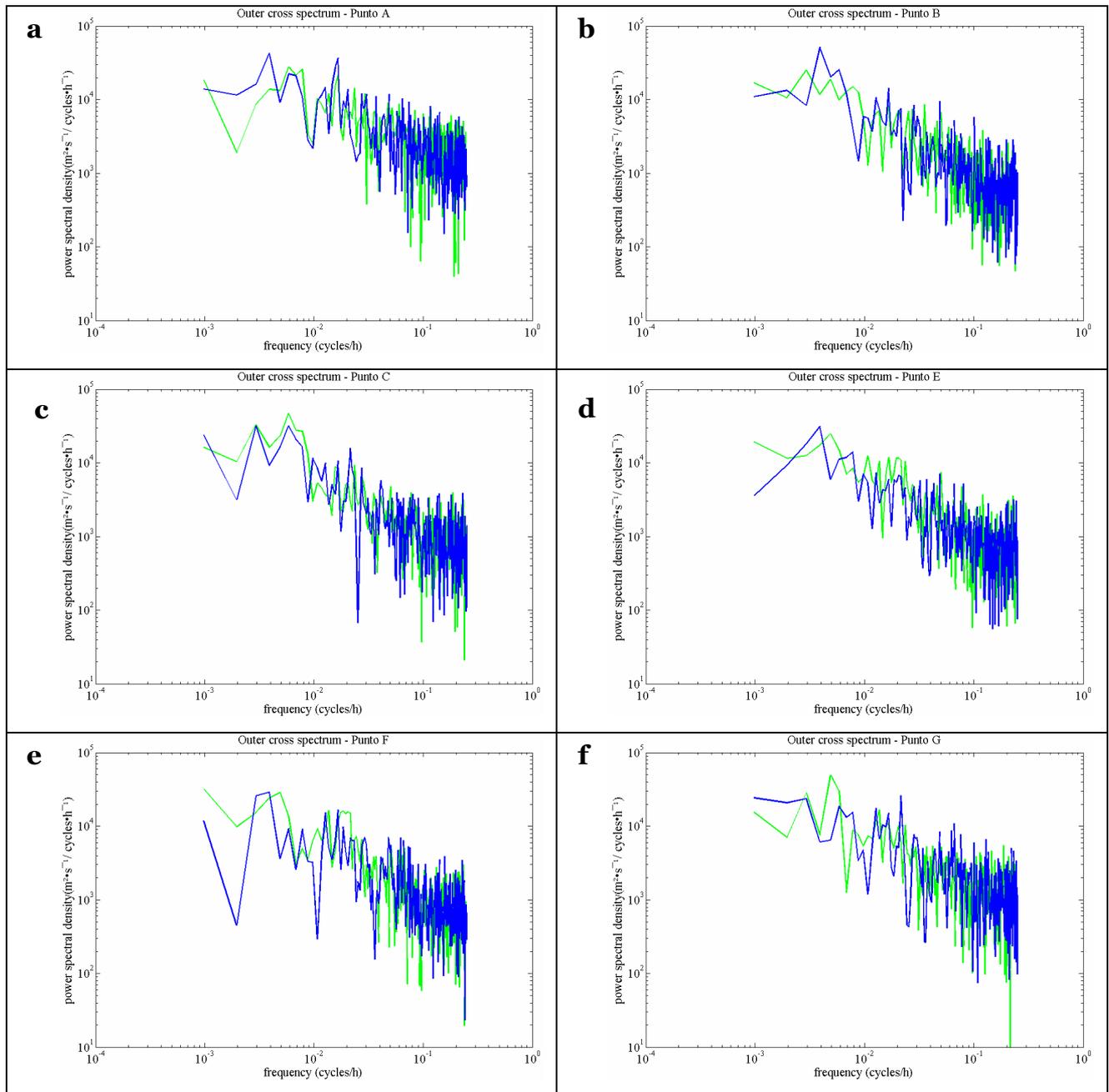


Figura 6.25 – Coerenza e fase relative ai cross spettri interni (dicembre 2006). Per le immagini di coerenza la linea nera evidenzia il valore limite relativo ad un intervallo di confidenza del 95%; per le immagini della fase la linea nera evidenzia il valore zero.



— corrente + ; vento -
 — corrente - ; vento +

Figura 6.26 – Outer cross-spettro (dicembre 2006) tra le serie temporali del vento e della corrente nei punti rappresentati in Figura 5.2.

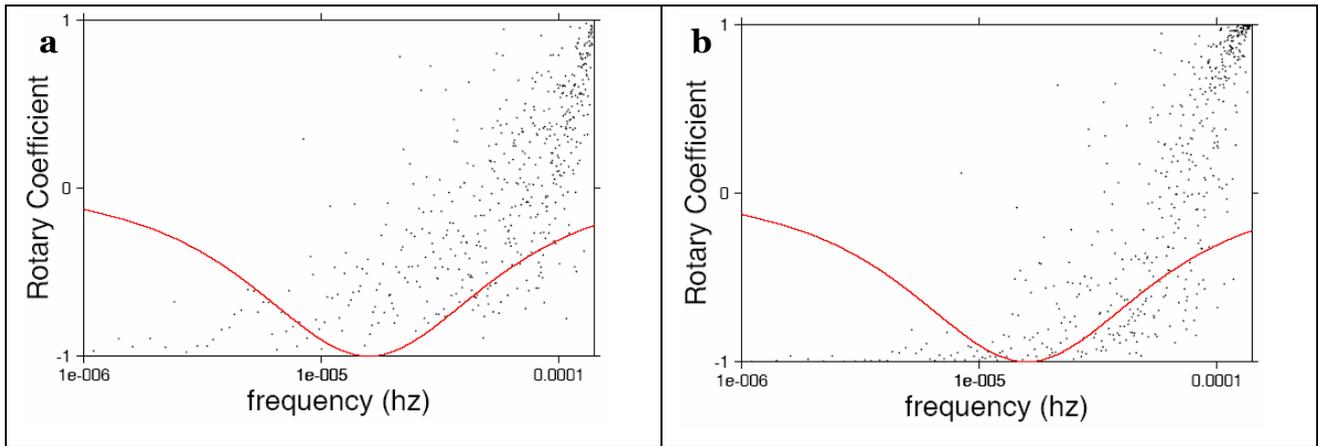


Figura 6.27– Coefficiente rotatorio per lo spettro del campo di corrente nel punto A (a) e per il cross spettro tra vento e corrente nel punto A (b).

6.4 DINAMICA AD ALTA FREQUENZA

I risultati ottenuti dall'analisi spettrale rotatoria evidenziano la presenza nel Golfo di Napoli di moti caratteristici con periodi inferiori alle 24 ore (in accordo con De Maio et al. (1981) e con Roselli et al. (2007)), con segnali più marcati in una banda prossima alla frequenza inerziale.

In passato, l' analisi delle serie temporali di correnti registrate nel periodo 1977 – 1981 aveva mostrato oscillazioni inerziali in diversi siti del Golfo aventi periodi di circa 18 ore; la situazione tipica in cui si presentavano le oscillazioni inerziali era stata ricondotta ad una rapida inversione della corrente, o comunque ad un suo brusco cambiamento di direzione, in relazione ad una variazione del campo dei venti. (Moretti et al.,1985).

Per mettere in evidenza le frequenze quasi inerziali, i dati dei punti corrente CODAR (Figura 5.2) sono stati filtrati con un filtro di Chebyshev passa banda, che offre la possibilità di concentrare l'analisi solo su una porzione dello spettro, relativa ad un prefissato intervallo di frequenze, eliminando il contenuto frequenziale presente al di fuori di questa banda. I limiti della banda di frequenze utilizzata in questo caso corrispondono a 0,047 – 0,06 cph, cioè a moti con periodi che vanno dalle 16,5 alle 21 ore. I risultati (Figure 6.28-6.31) sono rappresentati in quattro pannelli per ogni componente del campo di velocità e mostrano l'andamento del segnale di input (pannelli a), la serie temporale residua dopo la rimozione del trend lineare sovrapposta a quella del segnale filtrato (pannelli b), la densità spettrale di energia del segnale filtrato sovrapposta a quella del segnale residuo in funzione della frequenza (pannelli c), l'intensità del segnale filtrato (pannelli d).

A febbraio 2005 il segnale filtrato mostra un picco di energia centrato a 0,054 cph (18,6 ore) (Figura 6.28c) con densità spettrale maggiore per la componente zonale rispetto a quella meridionale; le oscillazioni inerziali aumentano di intensità in seguito agli abbassamenti di pressione (Figura 6.1). Per il punto D, localizzato nella Baia di Napoli (Figura 6.29c), non esiste un solo picco di frequenza nell'intorno dell'inerziale, ma una banda di frequenze più marcate corrispondenti a periodi tra le 17 e le 21 ore; anche in questo caso le densità spettrali più alte si raggiungono per la componente zonale.

A marzo 2005, le frequenze quasi inerziali raggiungono densità spettrali molto più elevate rispetto al periodo di febbraio. Nei punti più interni al Golfo la banda inerziale va dalle 17 alle 19 ore (Figura 6.30); nei punti più esterni esiste un solo picco dominante centrato sulla frequenza di 0,054 cph (Figura 6.31).

A dicembre 2006 la banda quasi inerziale abbraccia periodi tra le 17 e le 21 ore (0,058 – 0,048 cph) (Figure 6.32, 6.33). Le oscillazioni sono direttamente legate agli abbassamenti di pressione, quindi i picchi di intensità corrispondono ai due minimi di pressione in Figura 6.19.

6.5 DINAMICA A BASSA FREQUENZA

Il Golfo di Napoli è interessato da moti a bassa frequenza con periodo superiore alle 24 ore, ossia da correnti di durata settimanale o meno legate a condizioni meteorologiche sul Tirreno (De Maio et al. ,1981) . Gli spettri rotatori relativi ai punti corrente CODAR hanno evidenziato importanti contributi sulle basse frequenze direttamente correlati all'azione del forzante locale in tutti i periodi esaminati.

Per analizzare in maniera più dettagliata la dinamica sub inerziale è stato utilizzato un filtro di Chebyshev passa-basso, che ha il compito di attenuare fortemente le alte frequenze del segnale e lasciar passare le basse frequenze. La frequenza di taglio selezionata corrisponde ad un periodo di 36 ore (0,028 cph) e consente di eliminare le componenti mareali diurne e semidiurne, le oscillazioni inerziali ed i moti con periodo inferiore a quello inerziale.

A febbraio del 2005 le densità spettrali maggiori per la componente u si raggiungono nei punti del Golfo più esterni (A, E, F, G), in particolare in corrispondenza di periodi di 8-9 giorni (intorno a 0,0048 cph) (Figura 6.36a); nei punti interni (B, C, D) le frequenze più importanti corrispondono a periodi di 5-6 giorni (intorno a 0,07 cph) (Figure 6.34a, 6.35a). In tutte le regioni del bacino la componente zonale della velocità evidenzia periodi di 4 e di 2 giorni, con densità spettrali paragonabili tra punti interni e punti esterni al

Golfo. L'energia spettrale associata alla componente meridionale è generalmente inferiore a quella associata alla componente zonale; i punti B, G, E, F (Figura 6.36b) sono quelli che raggiungono le densità spettrali più elevate in relazione a periodi di 8-9 giorni e di 4-2 giorni; il punto D localizzato in prossimità della costa (Figura 6.35b) non mostra picchi di frequenza evidenti per nessuna delle componenti.

Il periodo di marzo 2005 è caratterizzato da valori dell'energia spettrale nettamente inferiori rispetto a quelli degli altri periodi esaminati (febbraio 2005 e dicembre 2006). Questo mese, infatti, è dominato dalla presenza delle brezze e le correnti superficiali mostrano una dinamica molto attiva in corrispondenza delle frequenze mareali (Figura 6.14) e quasi inerziali (Figure 6.30, 6.31) ed una dinamica sub inerziale meno marcata (Figura 6.37). Le componenti zonali e meridionali raggiungono densità spettrali confrontabili e mostrano picchi di frequenza per periodi di 8-9 giorni, per periodi di 6 e di 2-3 giorni circa.

A dicembre 2006 l'energia spettrale è distribuita in maniera equa sulle componenti zonali e meridionali; i picchi di frequenza più caratteristici corrispondono a periodi di 10 e 5 giorni e di 2-3 giorni (Figura 6.38).

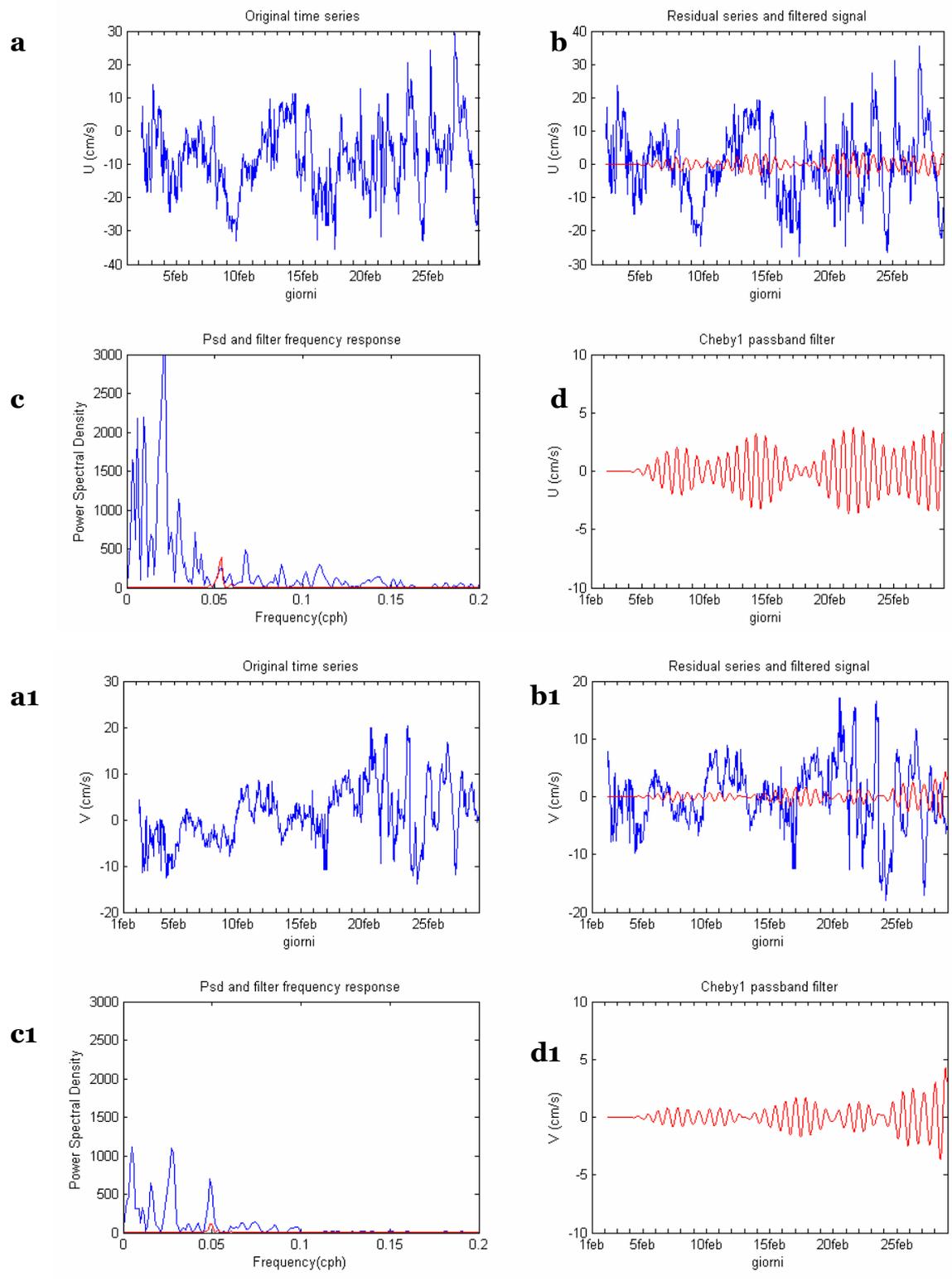


Figura 6.28– Febbraio 2005 - punto C. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

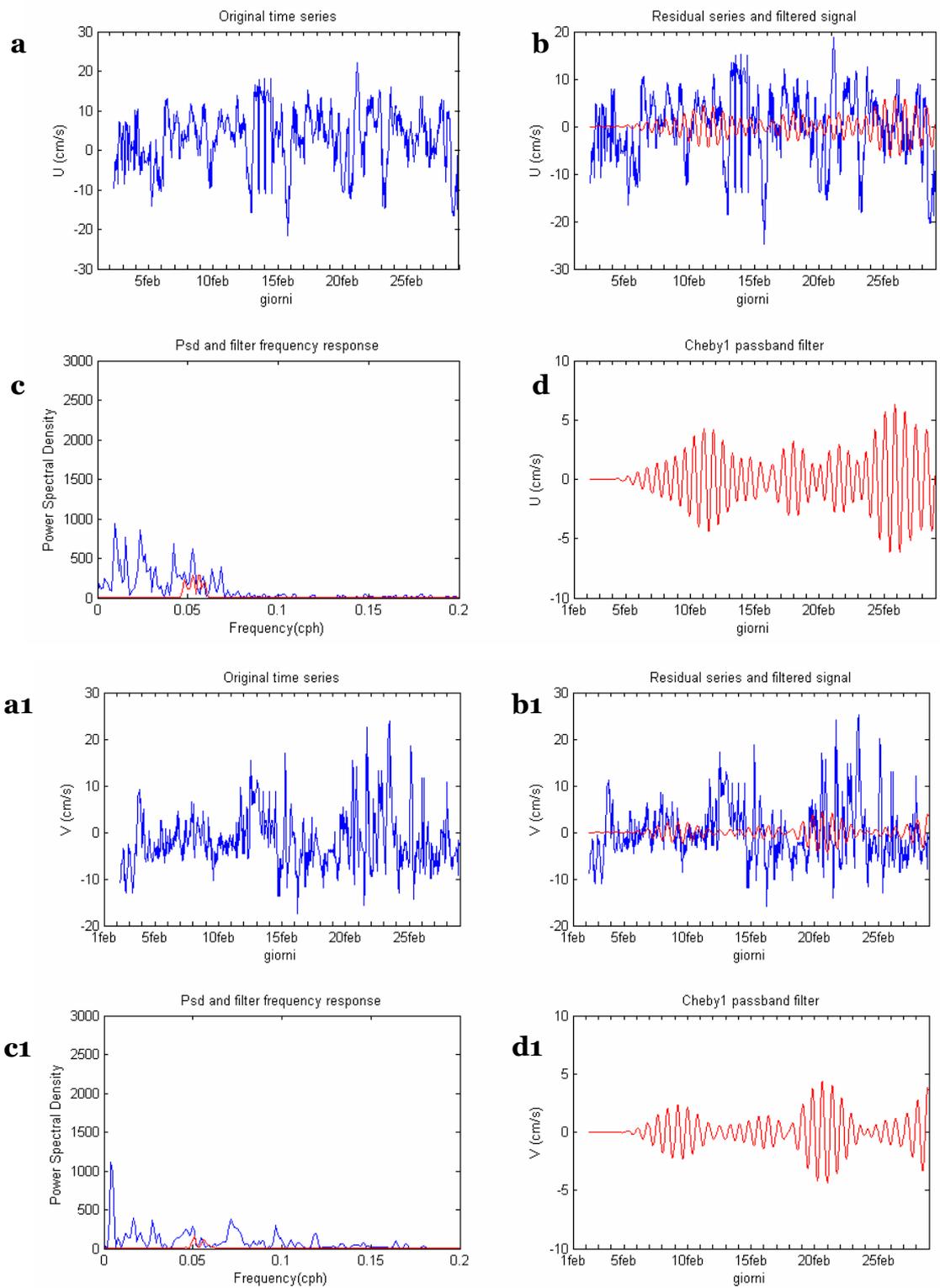


Figura 6.29– Febbraio 2005 - punto D. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

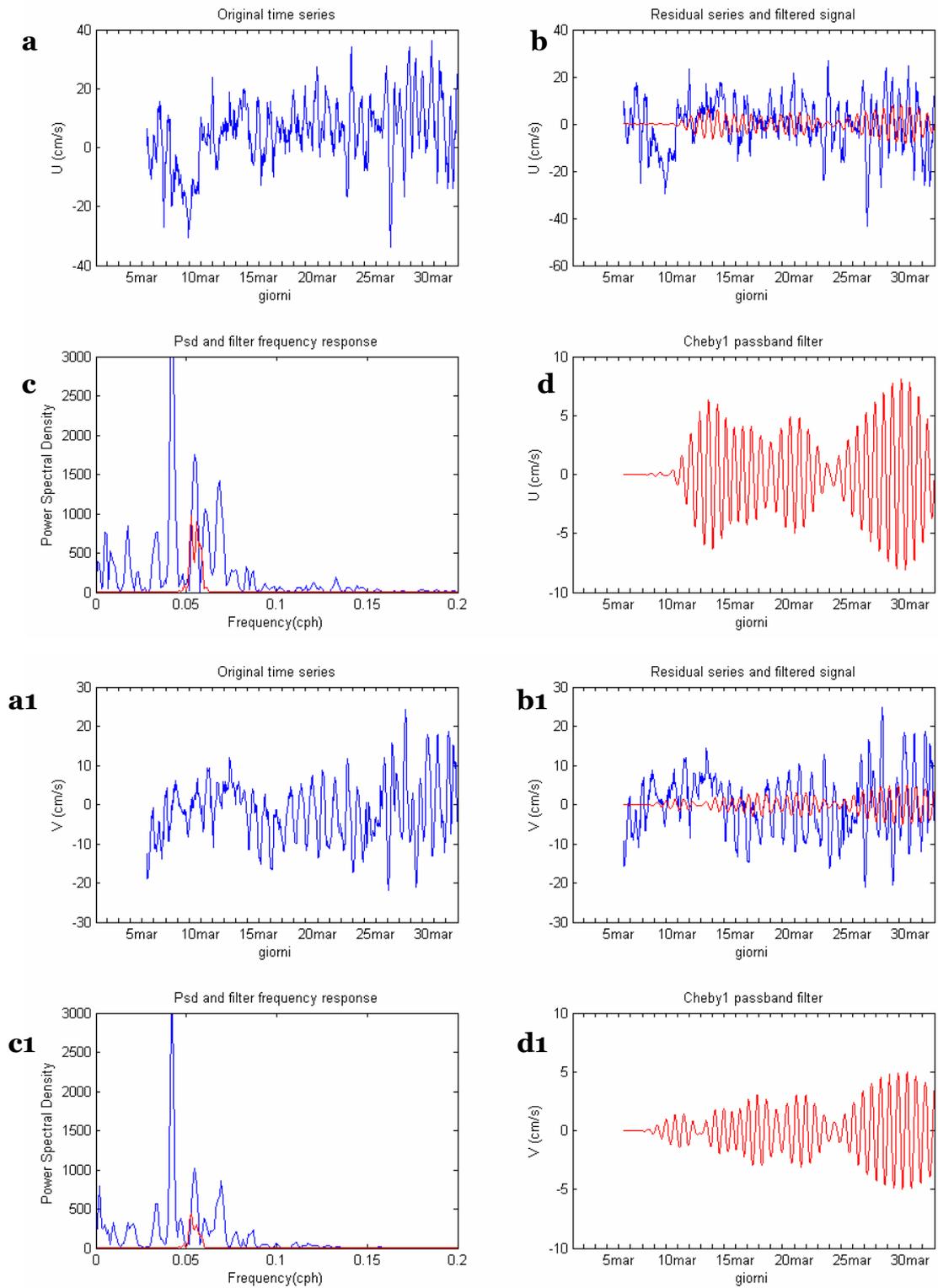


Figura 6.30– Marzo 2005 - punto C. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

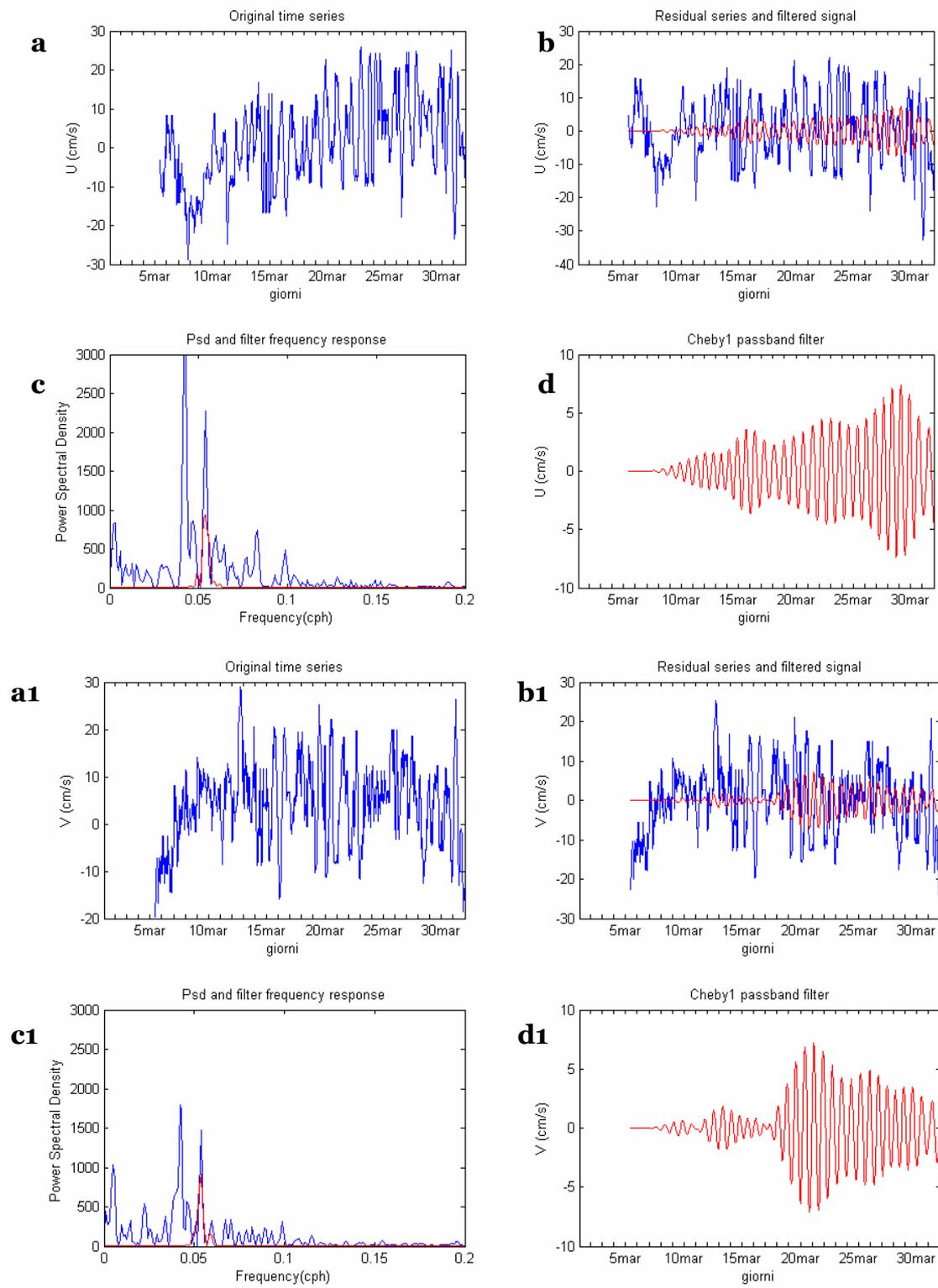


Figura 6.31– Marzo 2005 - punto F. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

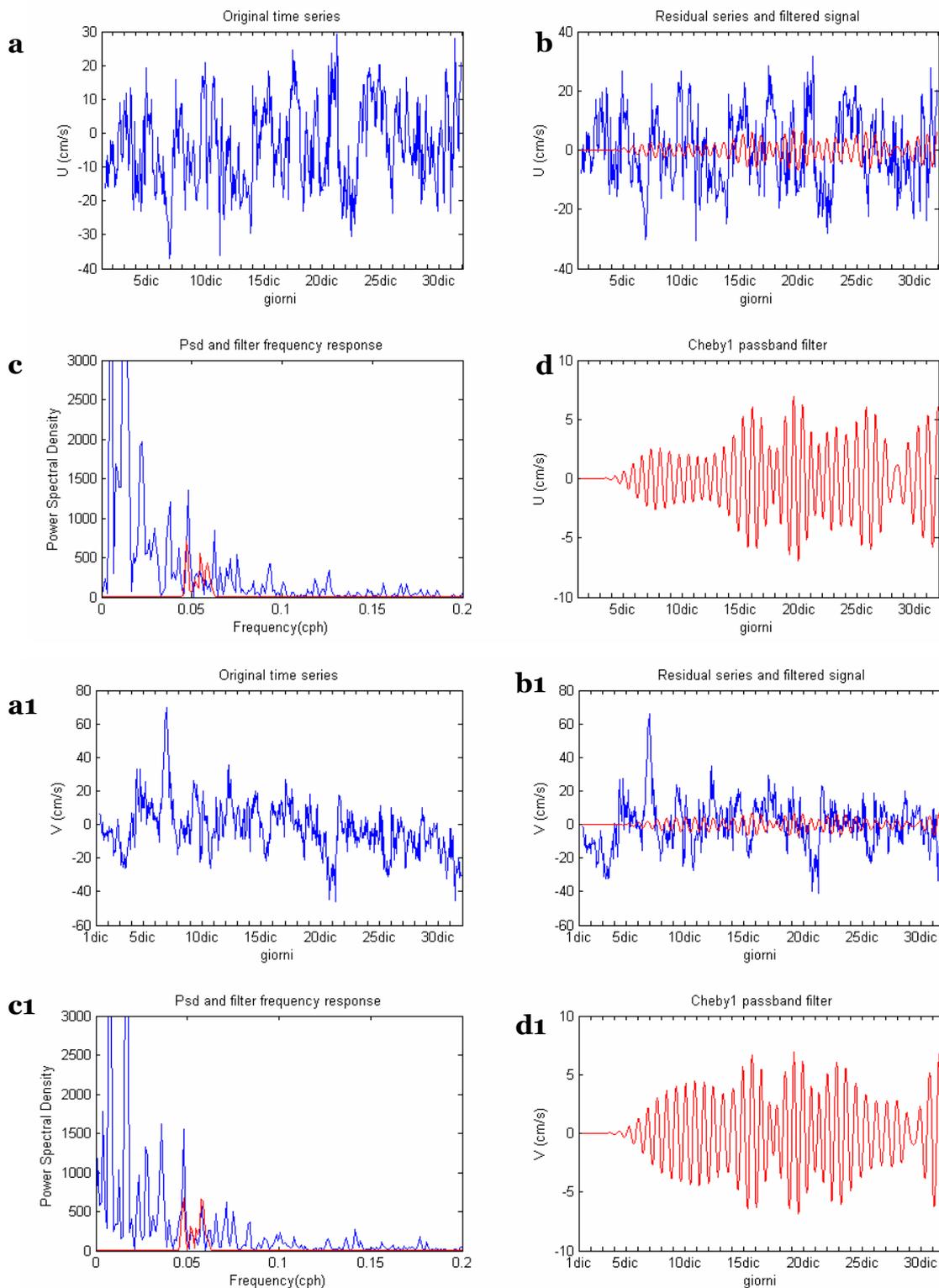


Figura 6.32– Dicembre 2006 - punto A. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

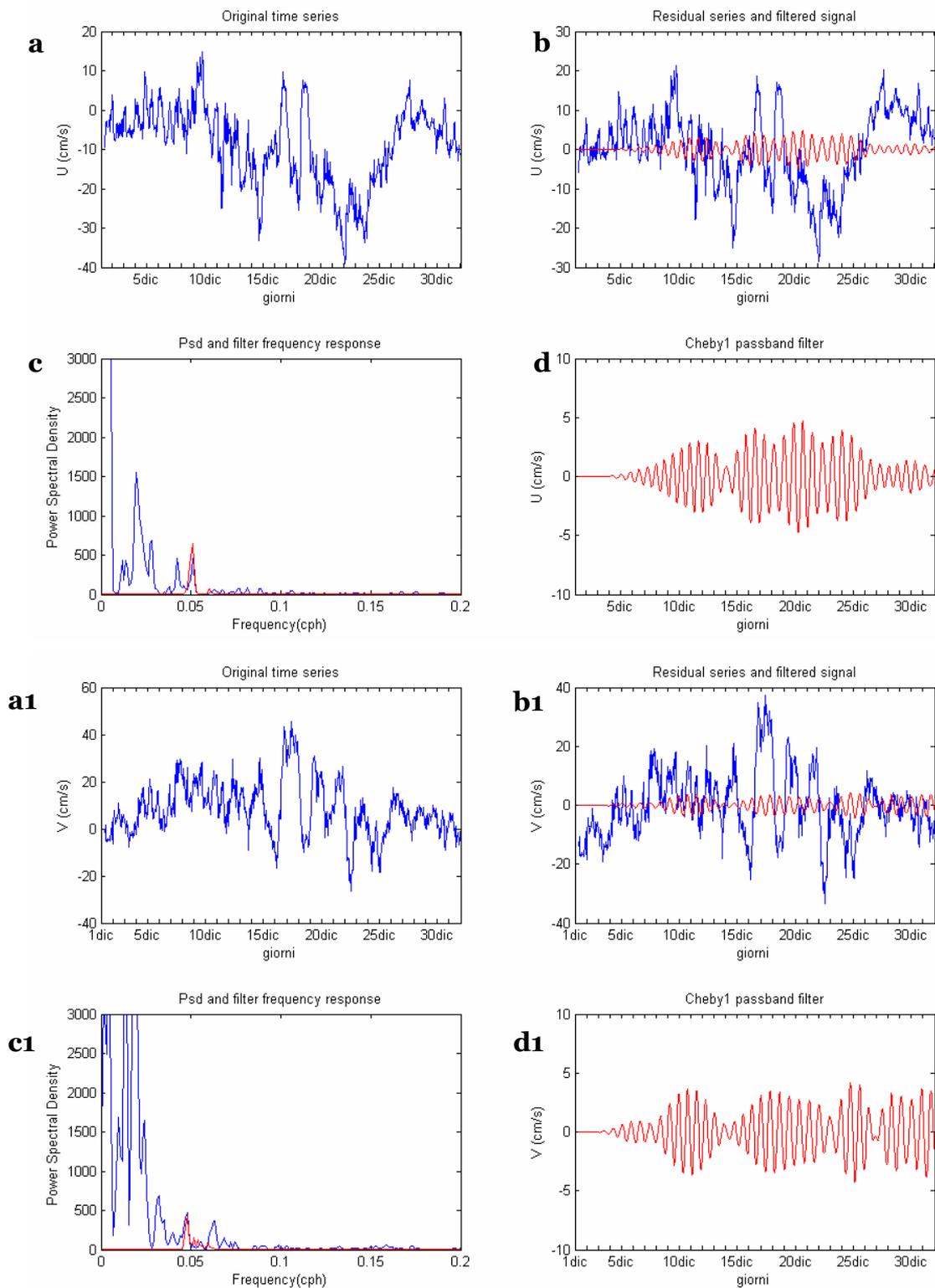


Figura 6.33– Dicembre 2006 - punto F. Andamento delle componenti u (a) e v (a1) della corrente; andamento del segnale residuo in blu e del segnale filtrato (rosso) per le componenti u (b) e v (b1); spettro di energia per il segnale residuo in blu e del segnale filtrato in rosso per le componenti u (c) e v (c1); intensità del segnale filtrato per le componenti u (d) e v (d1).

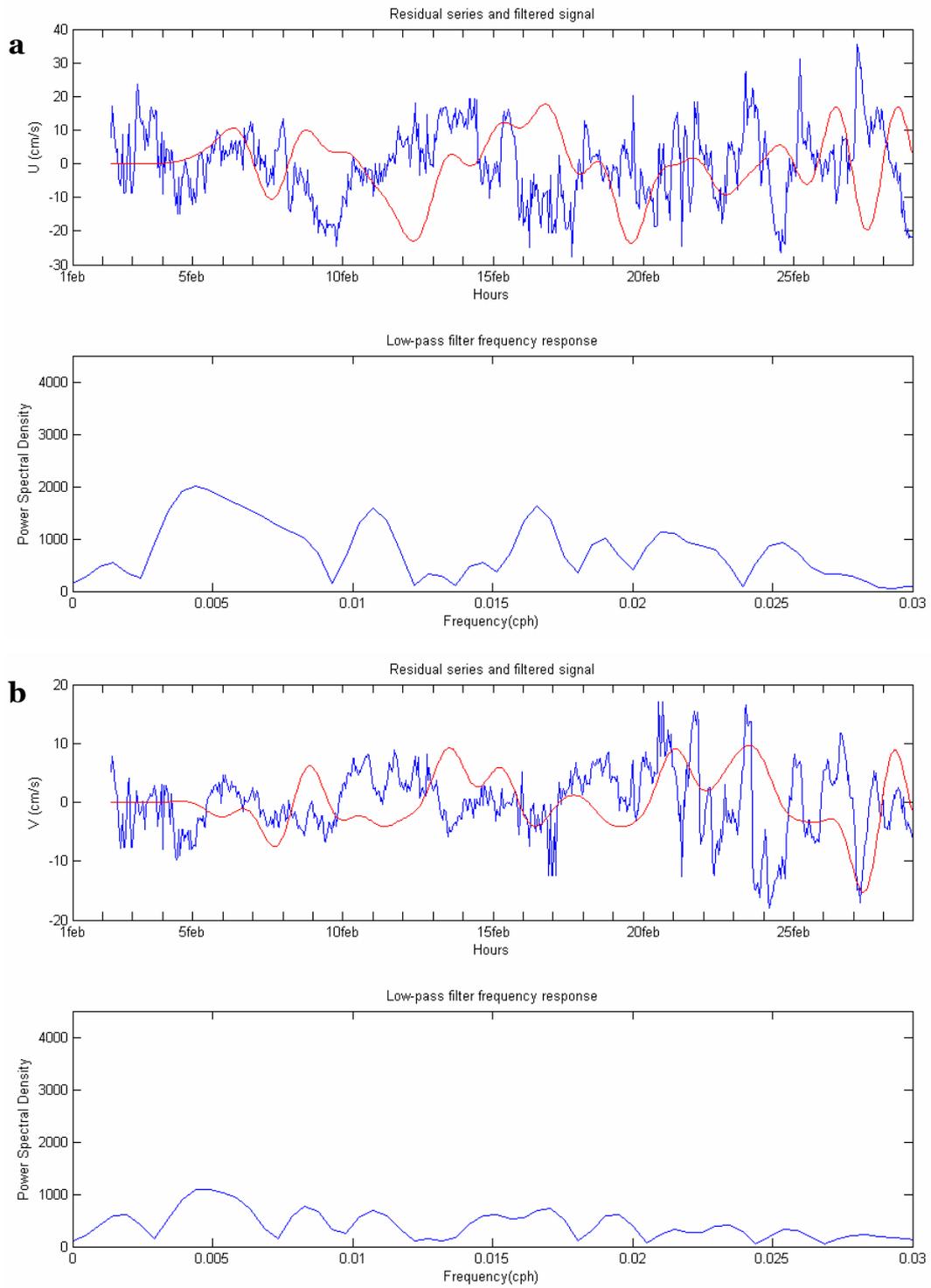


Figura 6.34– Febbraio 2005 punto C. Segnale residuo (blu) , segnale filtrato (rosso) e spettro di frequenza per la componente u (a) e v (b).

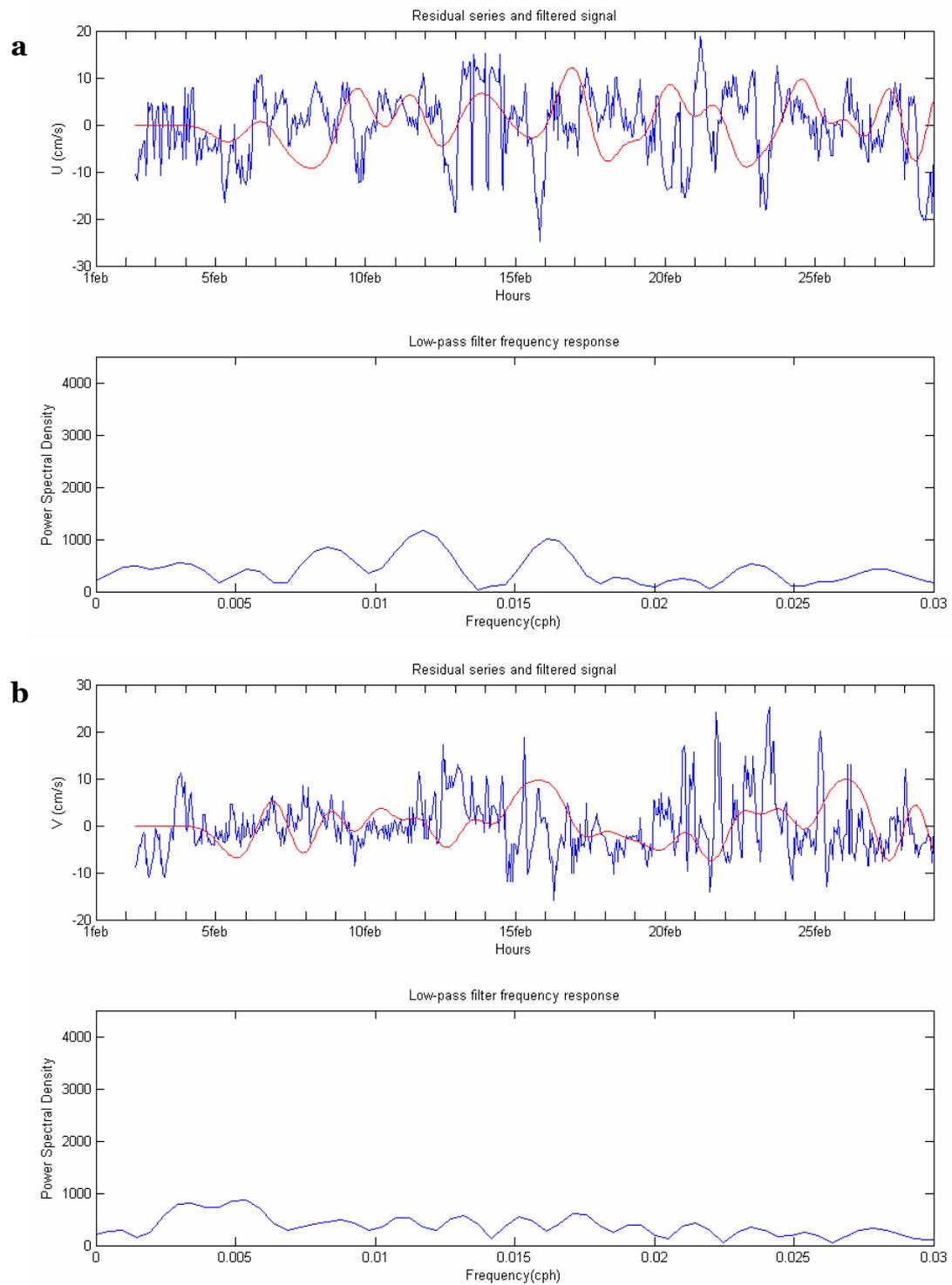


Figura 6.35– Febbraio 2005 punto D. Segnale residuo (blu) , segnale filtrato (rosso) e spettro di frequenza per la componente u (a) e v (b).

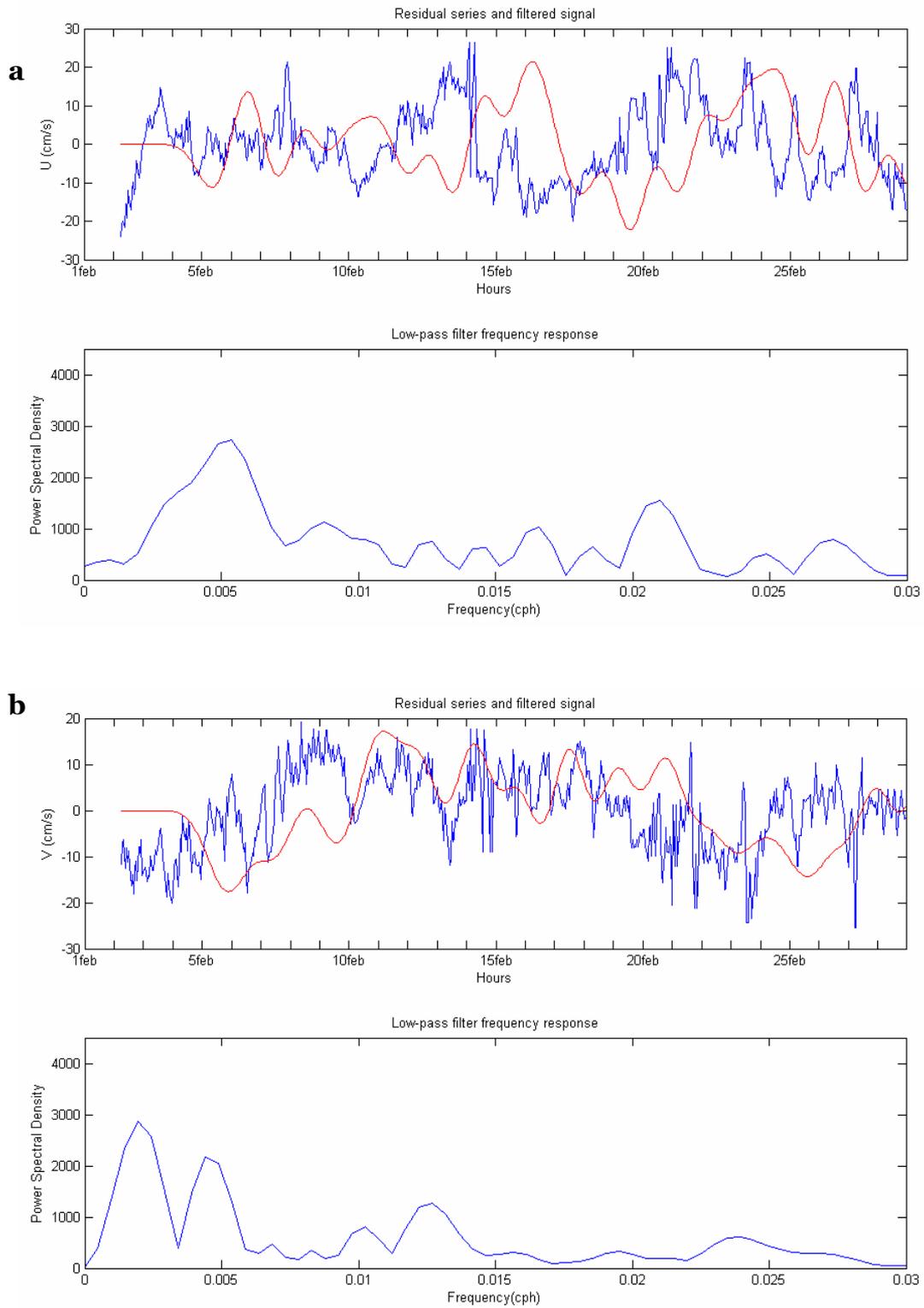


Figura 6.36– Febbraio 2005 punto E. Segnale residuo (blu) , segnale filtrato (rosso) e spettro di frequenza per la componente u (a) e v (b).

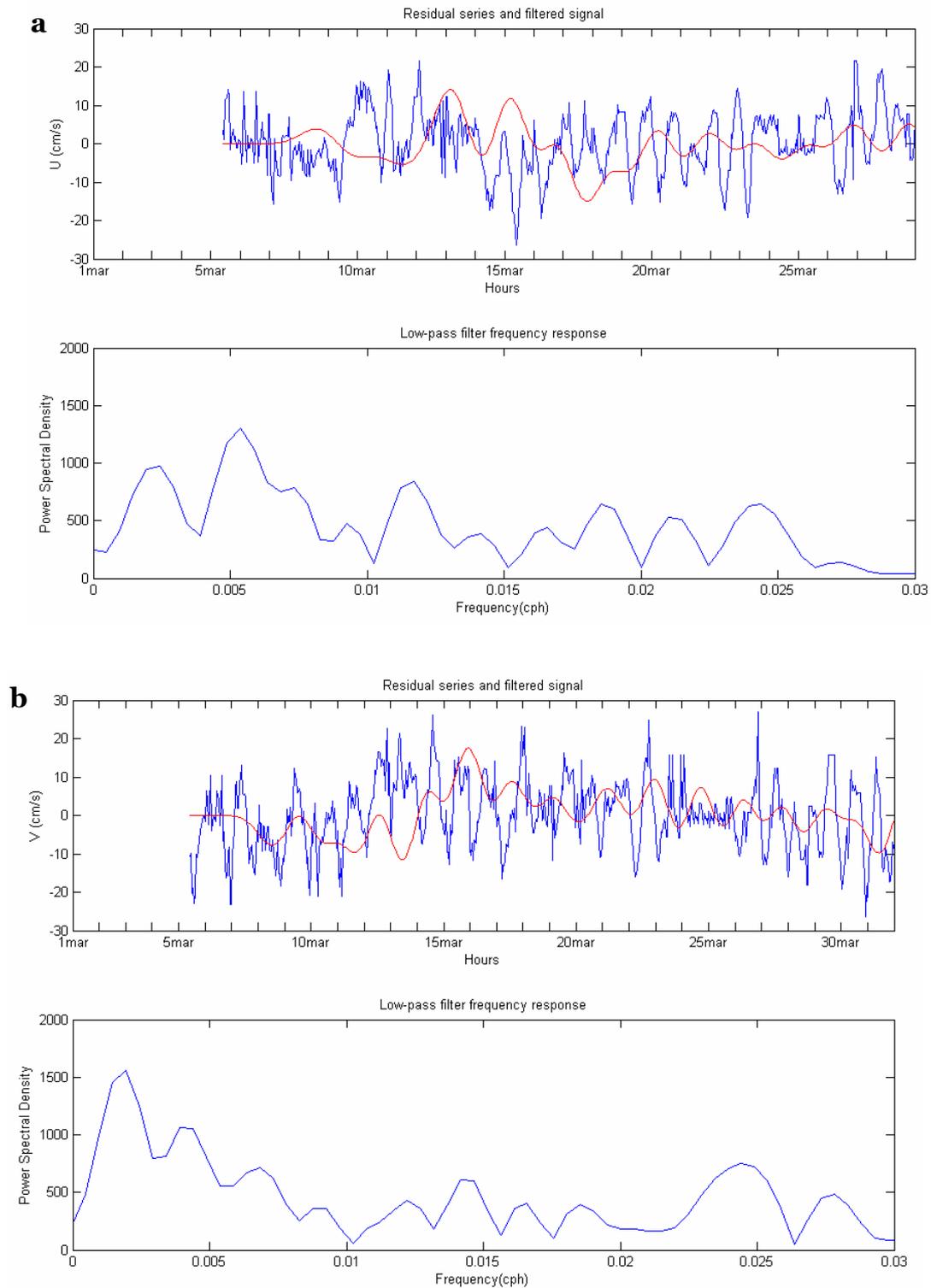


Figura 6.37– Marzo 2005 punto A. Segnale residuo (blu) , segnale filtrato (rosso) e spettro di frequenza per la componente u (a) e v (b).

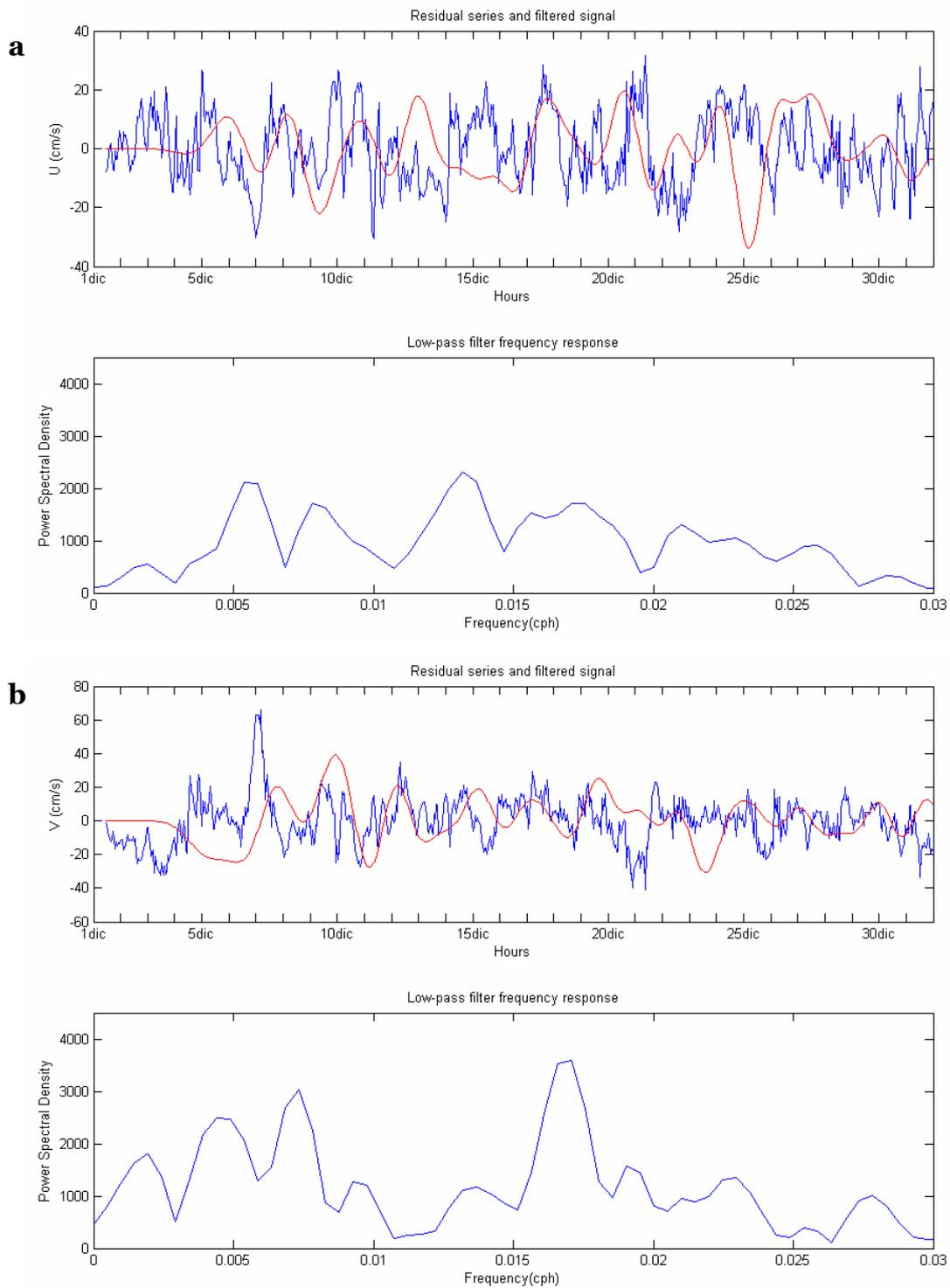


Figura 6.38– Dicembre 2006 punto A. Segnale residuo (blu) , segnale filtrato (rosso) e spettro di frequenza per la componente u (a) e v (b).

Conclusioni

La circolazione nell'area costiera del Golfo di Napoli è stata studiata utilizzando i dati provenienti da un sistema di radar ad alta frequenza (CODAR).

Le mappe di correnti superficiali prodotte dal CODAR (con cadenza temporale oraria e con risoluzione spaziale di 1.25 Km) mostrano un'elevata variabilità delle strutture superficiali, risultato della sovrapposizione di moti che evolvono su differenti scale temporali e spaziali. I principali forzanti di questi moti sono la circolazione del Tirreno meridionale e lo stress del vento.

Per capire in che modo il vento influenza la circolazione superficiale si è condotto uno studio del clima meteorologico dell'area del Golfo, attraverso l'analisi di serie temporali di 5 anni di dati (2002-2006) che includono misure puntuali e a scala di bacino. I risultati mostrano l'esistenza di tre regimi di vento prevalenti:

- *venti da NE*, tipici del periodo invernale raggiungono intensità di 8-10 m/s;
- *venti dai quadranti occidentali*, frequenti nei periodi invernali ed autunnali legati al passaggio di sistemi depressionari nell'area del Golfo. Si tratta di fenomeni intensi (velocità che superano i 10 m/s) ma di breve durata (ore o pochi giorni);
- *regime di brezza*, i venti cambiano direzione in maniera regolare nel corso della giornata, provenendo dal quadrante NE (brezza di mare) durante le ore notturne e da SW (brezza di mare) durante le ore diurne.

Individuati i pattern di vento ricorrenti, è stato possibile andare a ricercare queste caratteristiche dominanti nei dati meteorologici che si sovrappongono con i periodi di dati CODAR disponibili e valutare la correlazione tra le serie temporali di vento e corrente superficiale.

Il vento rappresenta il forzante principale della circolazione a breve termine del Golfo; le correnti superficiali rispondono velocemente all'input impresso, formando strutture più o meno coerenti localizzate principalmente nella regione centro settentrionale del bacino. La circolazione nella parte meridionale risulta non condizionata solo dal vento, ma legata anche allo scambio tra acqua tirrenica e acqua interna al Golfo che avviene nell'area della Bocca Piccola.

In condizioni di vento stabile da NE, le correnti superficiali sono altamente correlate (in termini di componenti della velocità e di direzioni) con il vento presente nelle venti ore precedenti; il campo di correnti si orienta in senso zonale in direzione E-W, con la

formazione di un jet più intenso in genere localizzato nella parte settentrionale o nella parte centrale del bacino. Alla regione del jet è solitamente associata convergenza.

In concomitanza al passaggio di sistemi ciclonici nell'area del Golfo, i venti invertono bruscamente direzione (da NE a SW) per poi tornare a stabilizzarsi nuovamente da NE dopo il passaggio della linea temporalesca. Il comportamento del campo di correnti superficiali in queste situazioni dipende dalla persistenza dei venti da SW. Se durano svariati giorni il flusso interno al Golfo si orienta in direzione SW-NE con conseguente accumulo di acqua nella zona costiera; se, invece durano poche ore le correnti reagiscono velocemente al cambiamento di direzione del vento e, una volta passata la perturbazione, impiegano circa 20 ore a ritrovare un buon grado di correlazione con i venti da NE.

In condizioni di brezza, tipica dei periodi primaverili ed estivi, l'oscillazione in direzione ed intensità del vento è seguita dalle correnti con un ritardo tra le 15 e le 20 ore. Nell'arco di 24 ore le correnti ruotano su tutta la superficie del Golfo in senso orario, orientandosi in direzione ovest-est nelle ore in cui è presente la brezza di mare, ed in direzione est-ovest nelle ore in cui è presente la brezza di terra. La cross-correlazione tra stress del vento e correnti evidenzia, in tutti i punti presi in esame, delle oscillazioni regolari del segnale con picchi di correlazione ed anticorrelazione che si ripetono ad intervalli di 24-25 ore. La stessa periodicità è riscontrata anche per le direzioni, dimostrando che ogni punto del Golfo e il vento assumono, ad ogni ora, la stessa posizione che avevano assunto 24 ore prima.

In alcune situazioni, la circolazione superficiale del Golfo risulta fortemente condizionata da quella del Mar Tirreno. Questo si verifica quando rami della circolazione tirrenica penetrano all'interno del bacino e non si limitano a lambirne il margine più esterno (Bocca Grande); il forzante locale, quindi, passa in secondo piano e il flusso tirrenico diventa il motore principale della circolazione interna al Golfo. La caratteristica dominante di queste situazioni è l'ingresso di acqua tirrenica attraverso la Bocca Piccola, che porta alla formazione di un jet molto intenso (velocità che superano i 40 cm/s) diretto verso il Canale di Procida. Alla destra del jet si formano delle strutture con rotazione anticiclonica alla sinistra del jet con rotazione ciclonica.

I campi di velocità superficiale misurati dal CODAR e relativi ai quattro scenari tipici sopra descritti, (vento da NE, vento da SW, regime di brezza e input tirrenico di circolazione), sono stati utilizzati per simulare il trasporto superficiale di traccianti lagrangiani passivi. Quello che si è studiato è lo scambio di particelle tra la zona costiera della Baia di Napoli e il settore di largo del Golfo. Le curve di concentrazione $Q(t)$ sono state costruite in modo tale da rappresentare, per la zona costiera, la quantità relativa di

particelle che abbandonano il dominio, per la zona di largo la quantità di particelle che penetrano nella zona più strettamente costiera. Tre dei quattro schemi di circolazione analizzati favorisce la fuoriuscita di acqua dalla zona costiera con tempi di residenza che vanno dalle 35 alle 90 ore. Solo in caso di vento da SW, la dinamica superficiale relega le particelle lanciate nella Baia di Napoli nella stessa zona di rilascio con tempi di residenza che crescono linearmente; in aggiunta la quasi totalità delle particelle rilasciate a largo penetra nella regione costiera.

In ultimo si è condotta l'analisi spettrale rotatoria per individuare le frequenze caratteristiche dei moti nel Golfo e il senso di rotazione preferenziale. I risultati mostrano la presenza di moti con periodi quasi inerziali (che ruotano in senso orario) e di moti a bassa frequenza con periodi superiori alle 24 ore. La dinamica ad alta frequenza è più attiva durante i periodi primaverili, in cui si raggiungono densità spettrali molto elevate, mentre, nei periodi invernali, è legata al passaggio di sistemi depressionari che forniscono l'input per la formazione di oscillazioni inerziali. La dinamica a bassa frequenza è attiva in tutti i periodi dell'anno con moti caratteristici di circa 2, 5 e 10 giorni.

I risultati di questo lavoro arricchiscono le ben poche conoscenze pregresse in merito alla circolazione superficiale, a breve e medio periodo, nel Golfo di Napoli e pongono le basi per l'applicazione di dati di radar costieri a modelli di dispersione e diffusione di inquinanti e ad indagini sul rischio ambientale prodotto dallo sversamento di sostanze inquinanti in ambiente marino.

APPENDICE

A

Rose del vento stagionali

Stazione APAT

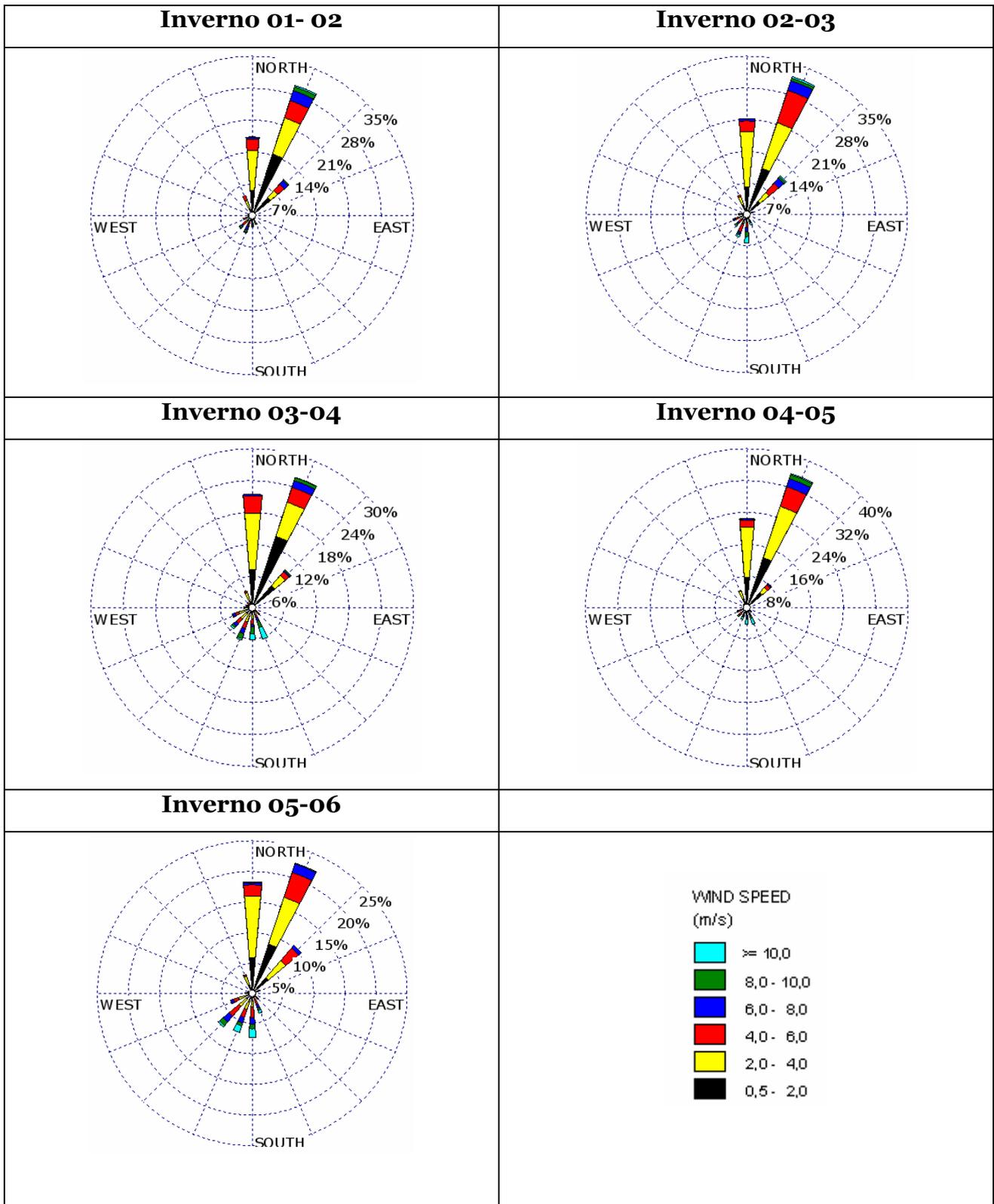


Figura A.1 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 - inverni (Apat).

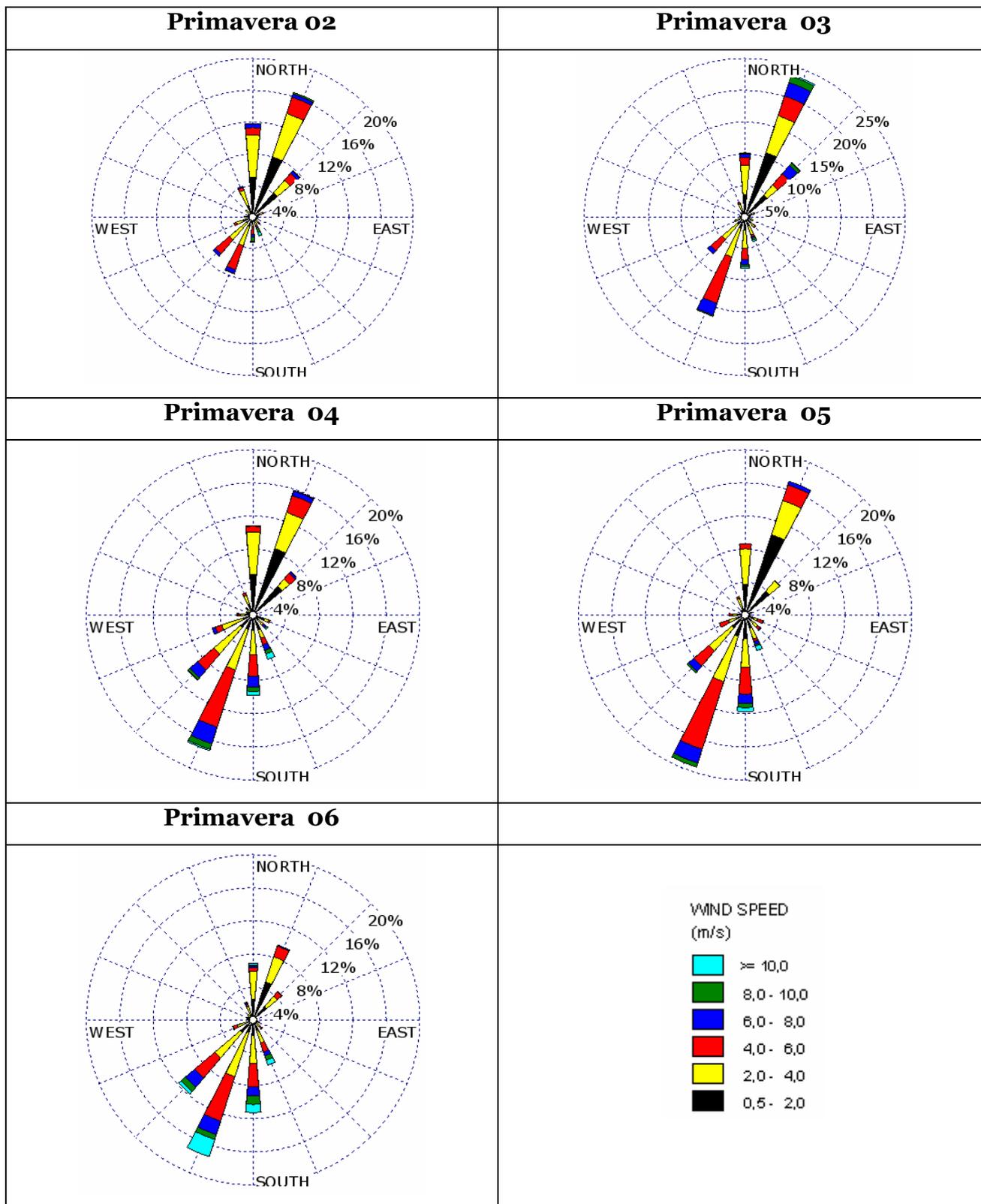


Figura A.2 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – primavere (Apat).

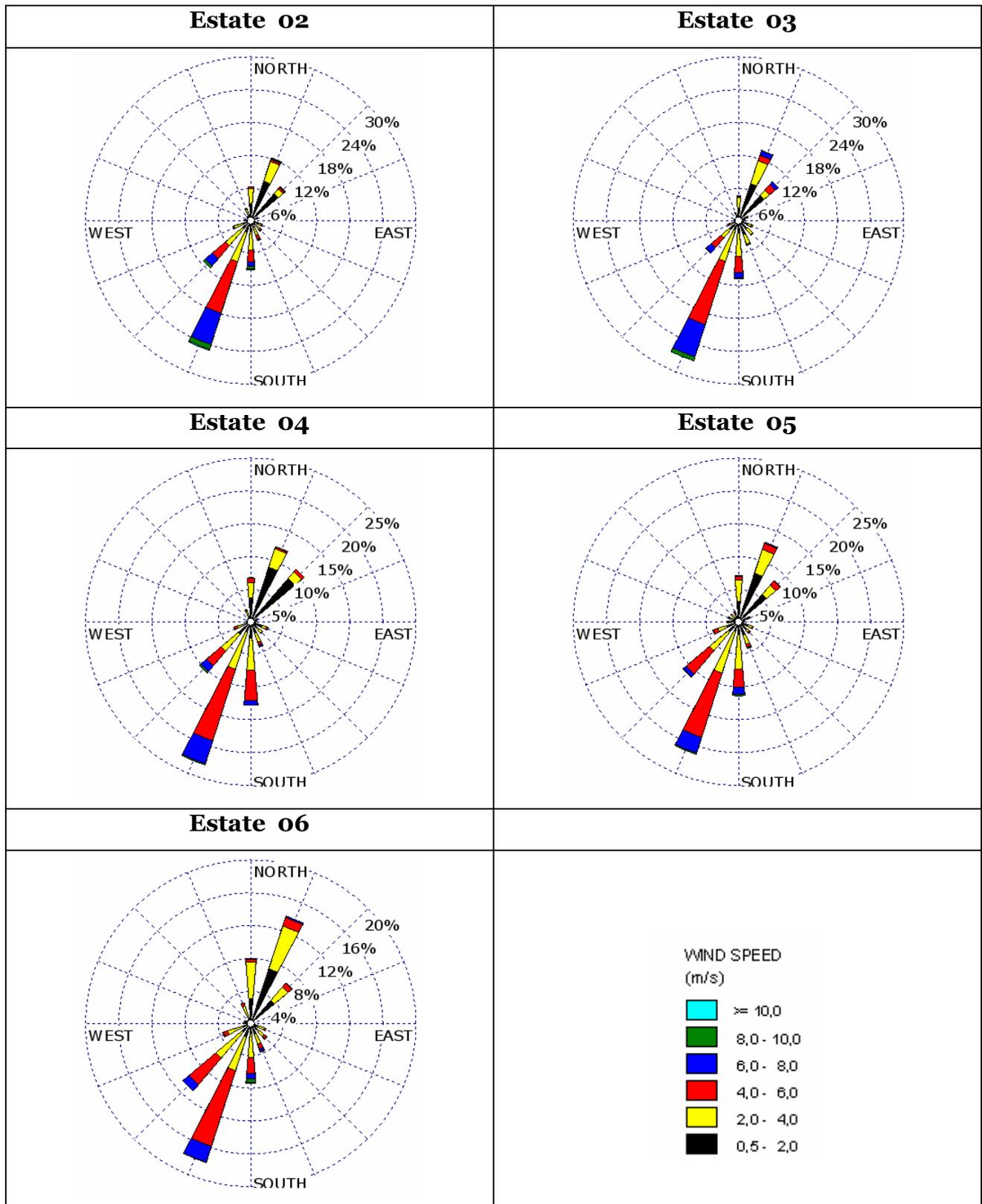


Figura A.3 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – estati (Apat).

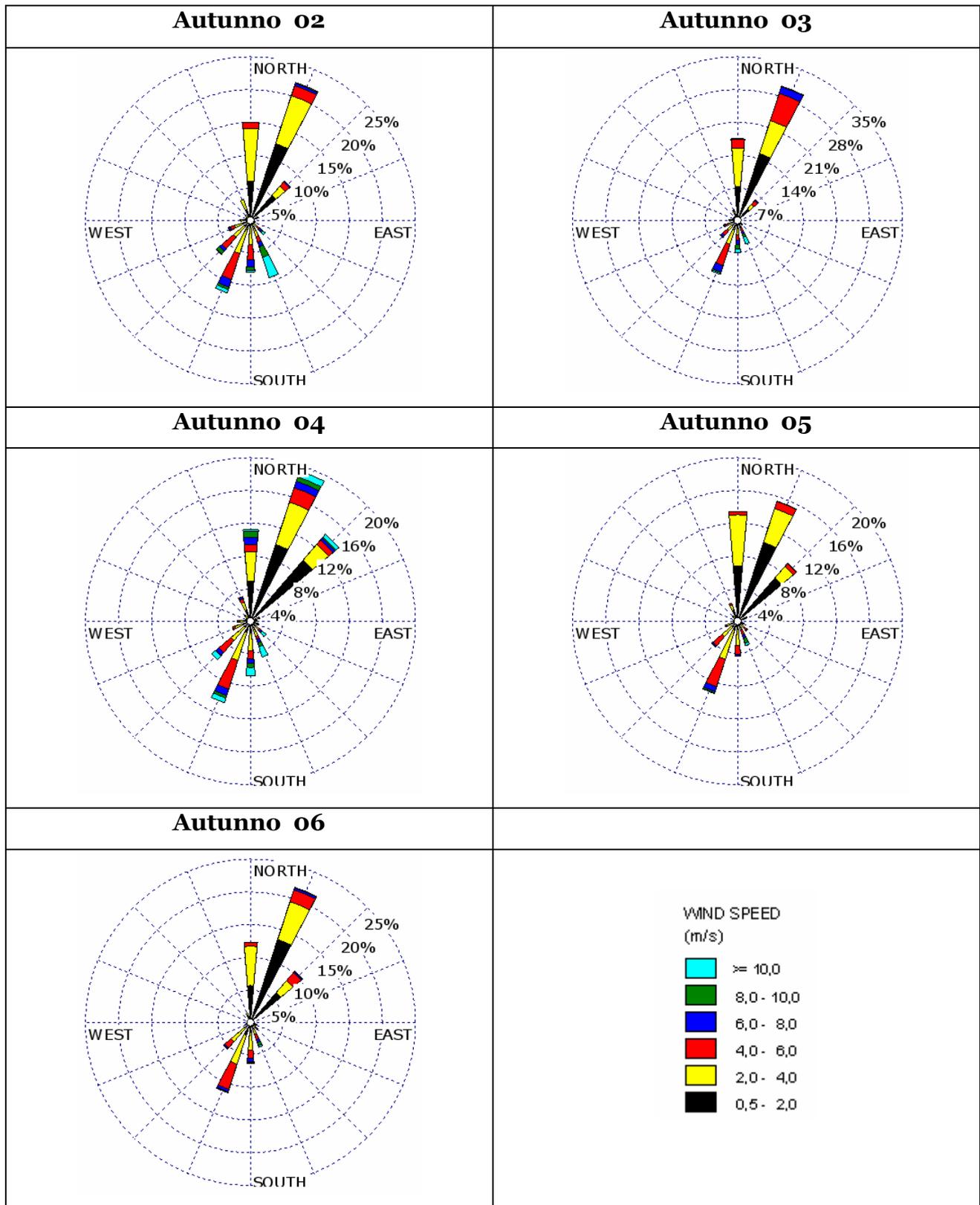


Figura A.4 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – autunni (Apat).

Stazione ACTON

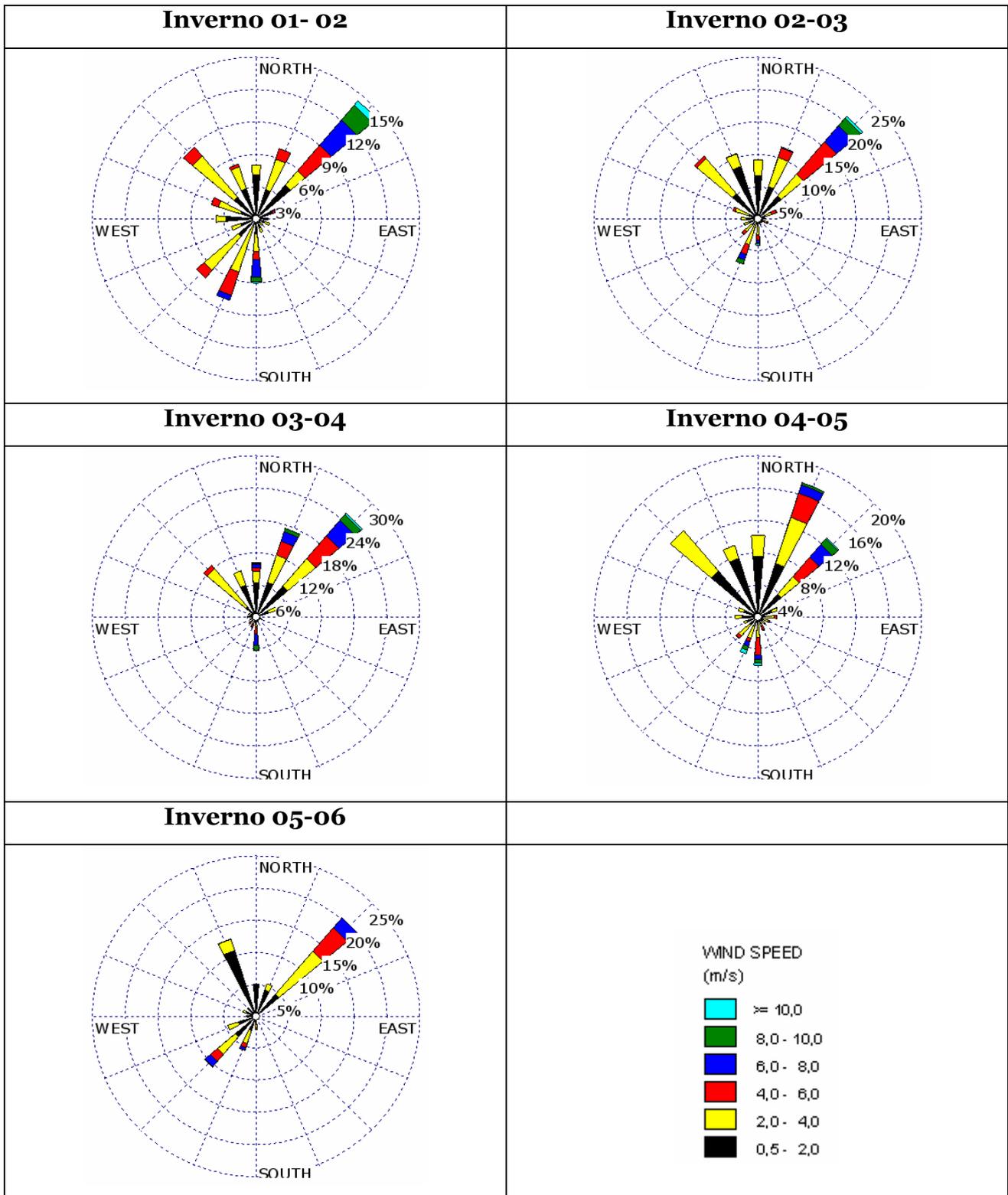


Figura A.5 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – inverni (Acton).

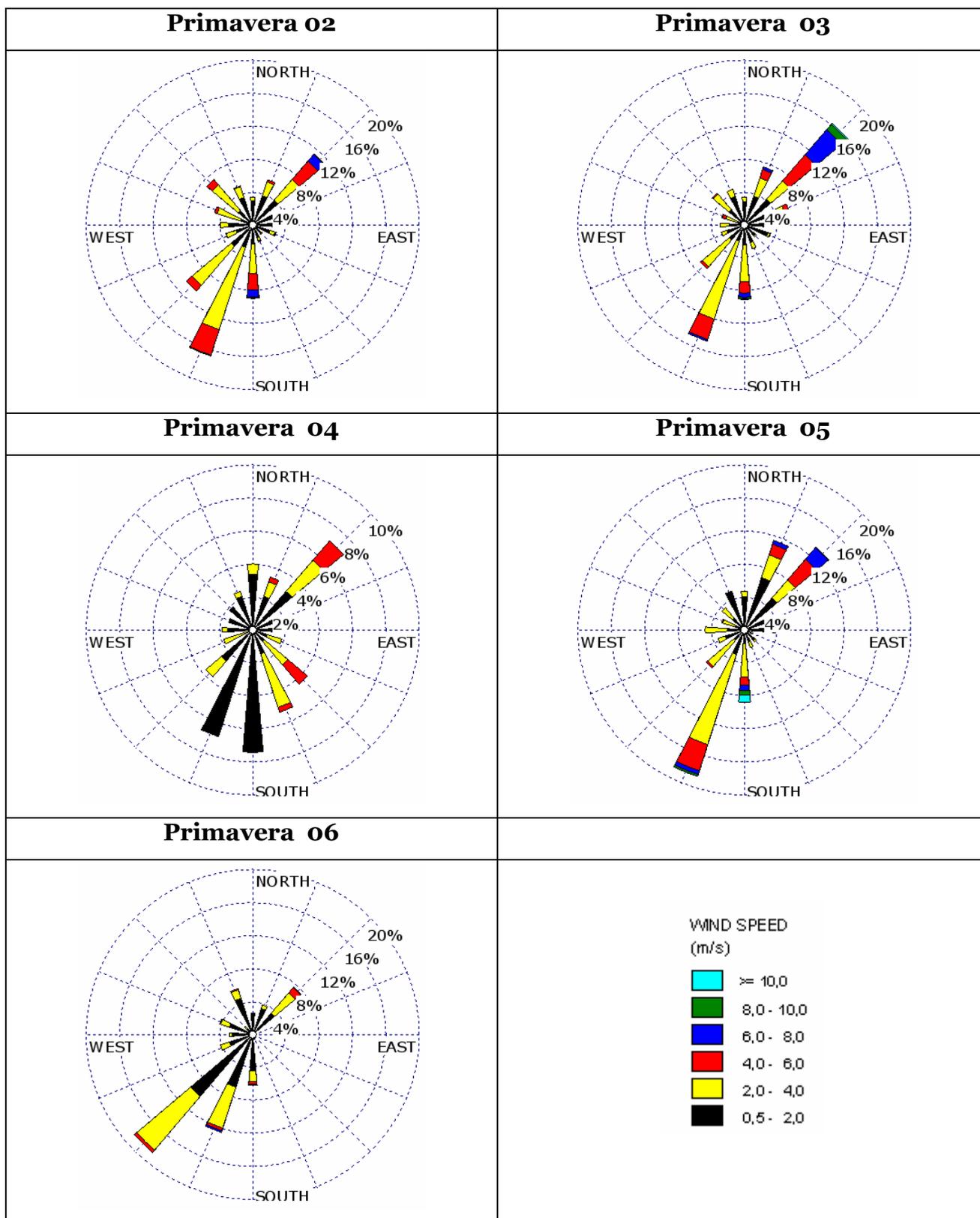


Figura A.6 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – primavera (Acton).

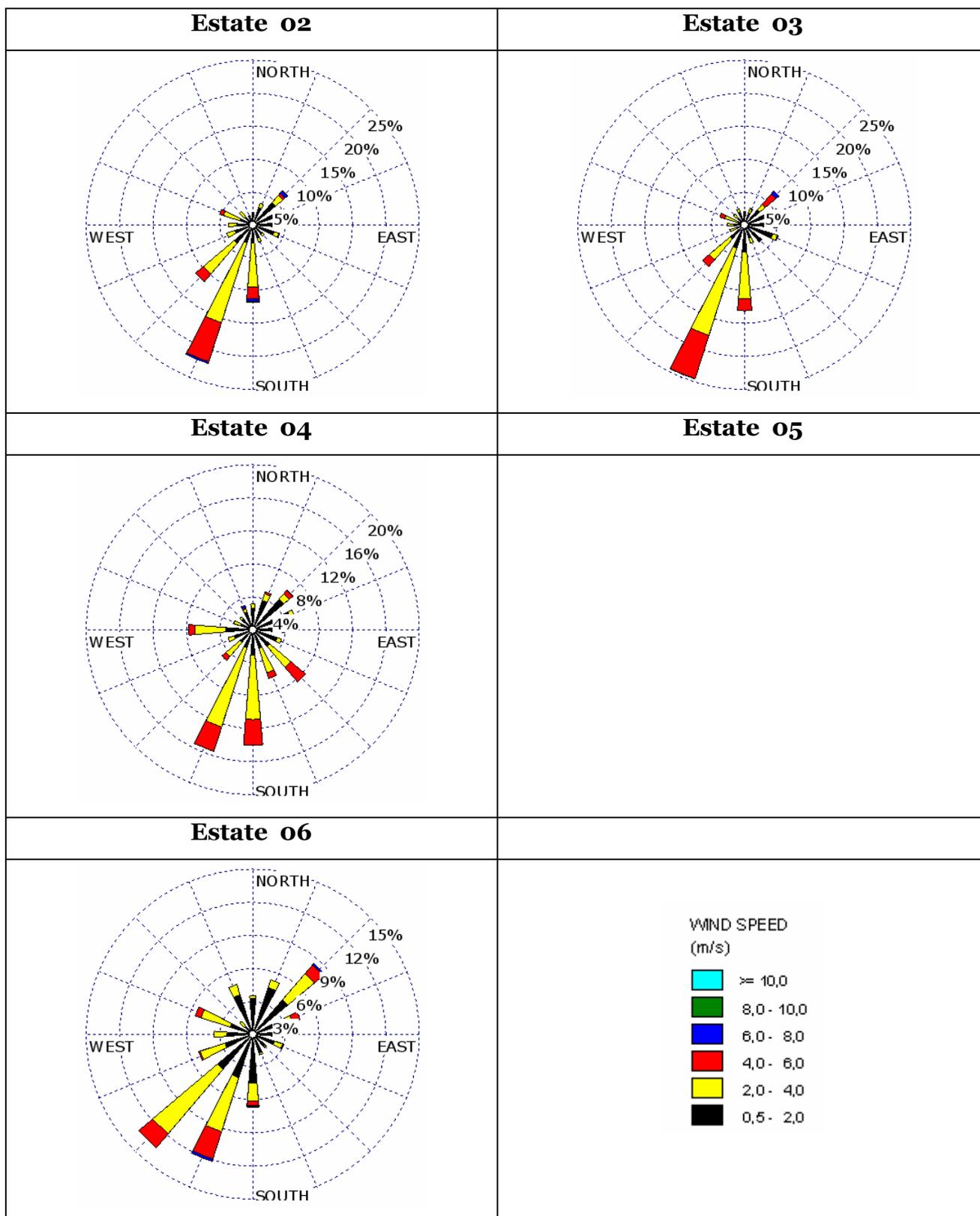


Figura A.7 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – estati (Acton).

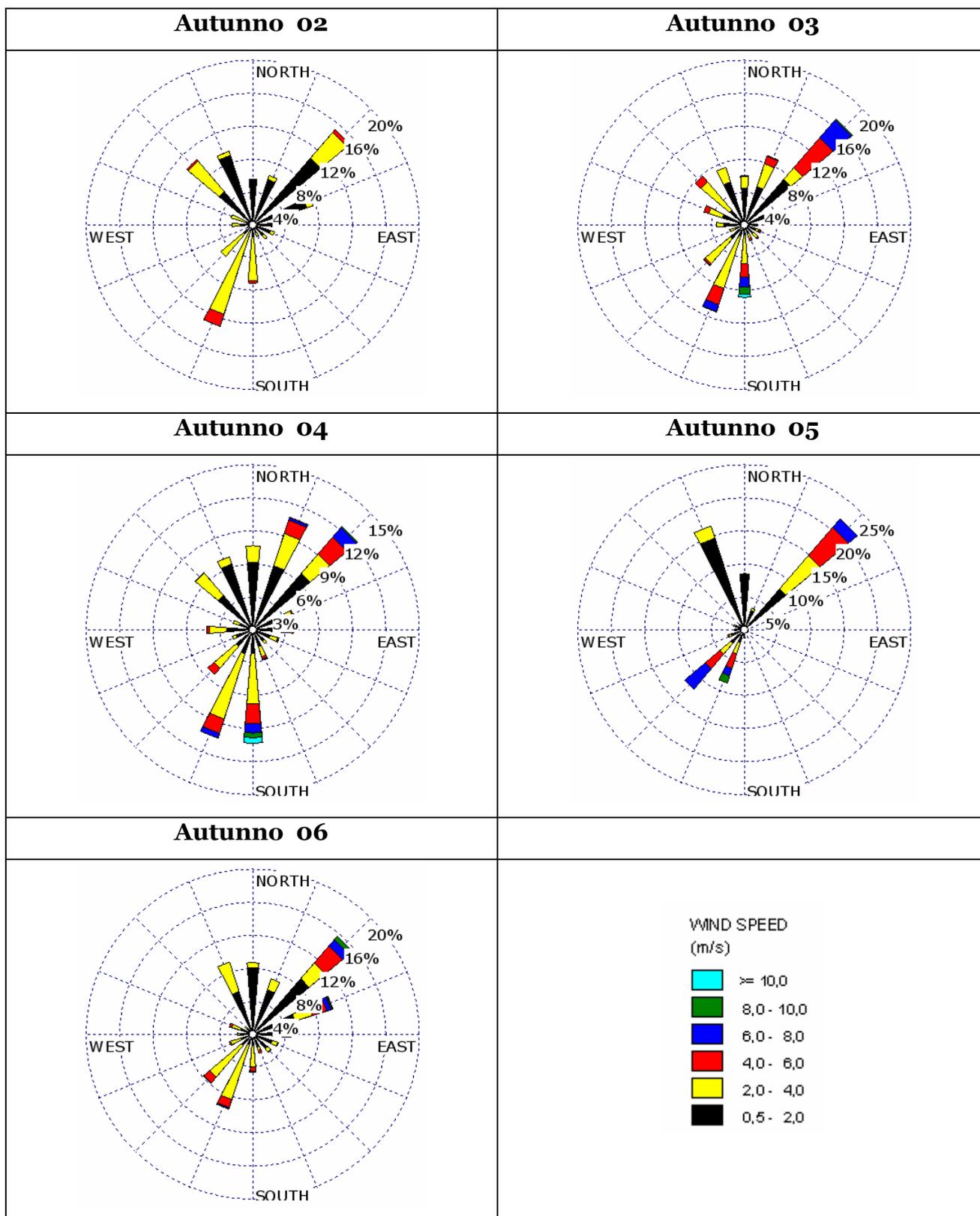


Figura A.8 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – autunni (Acton).

ECMWF

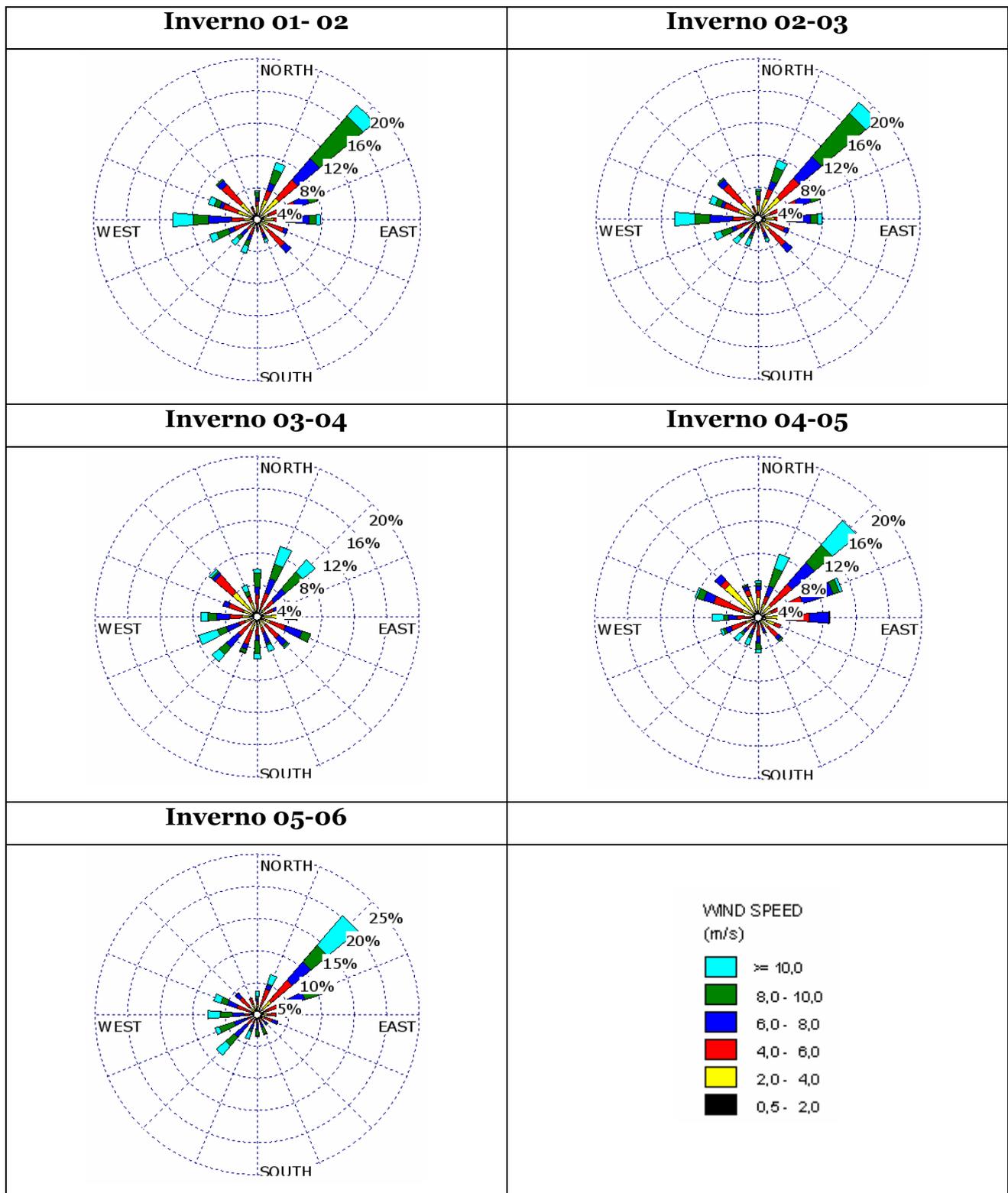


Figura A.9 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – inverni (ECMWF).

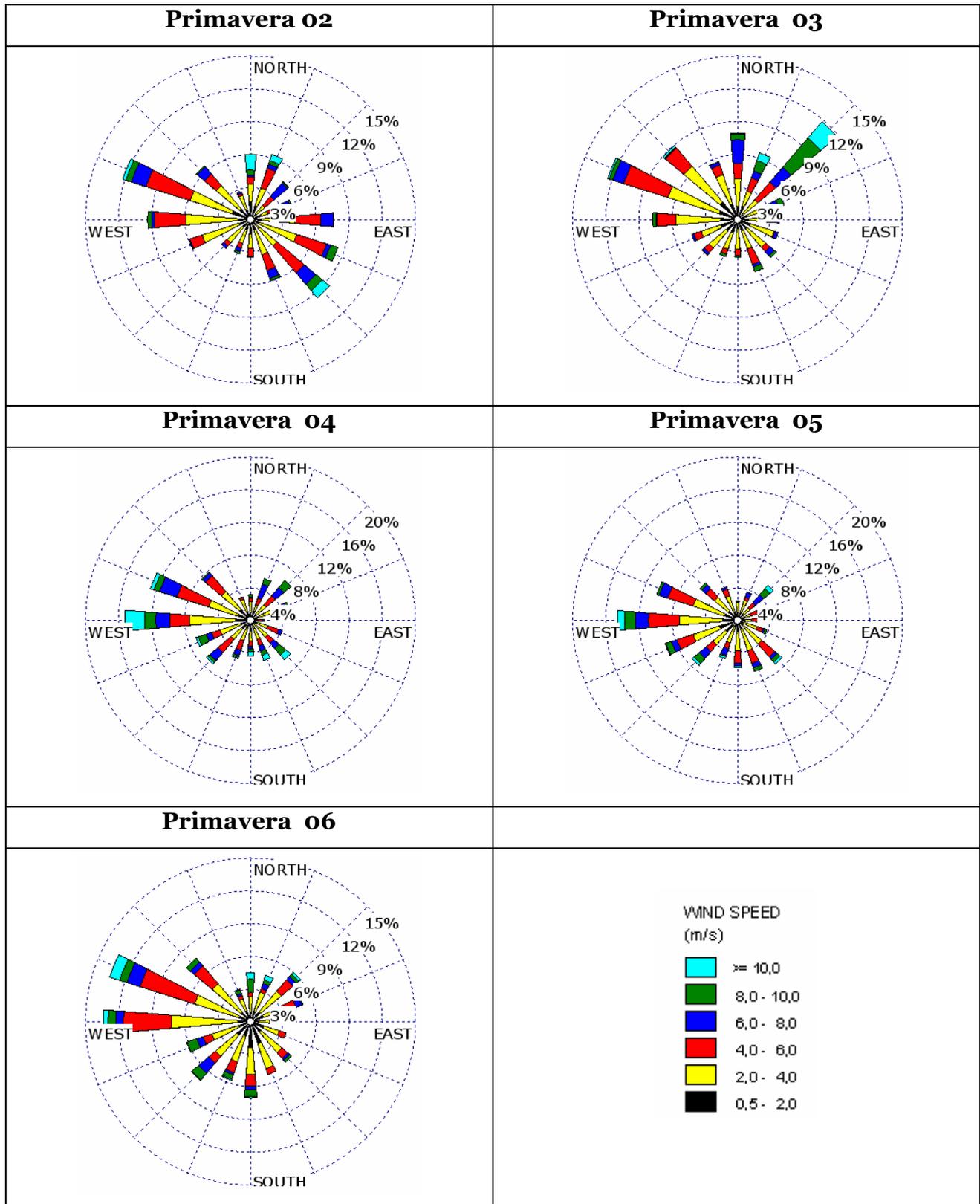


Figura A.10 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – primavera (ECMWF).

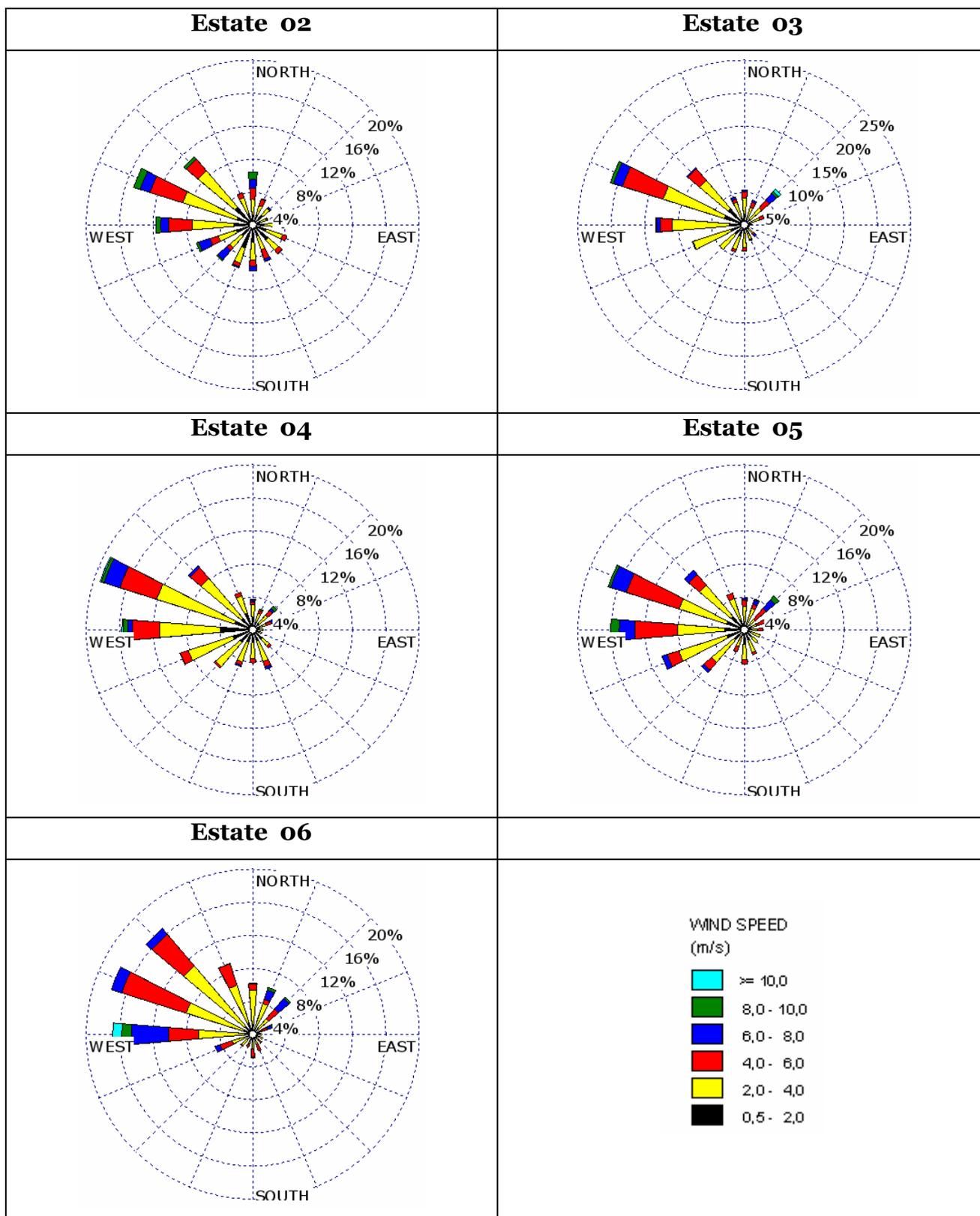


Figura A.11 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – estati (ECMWF).

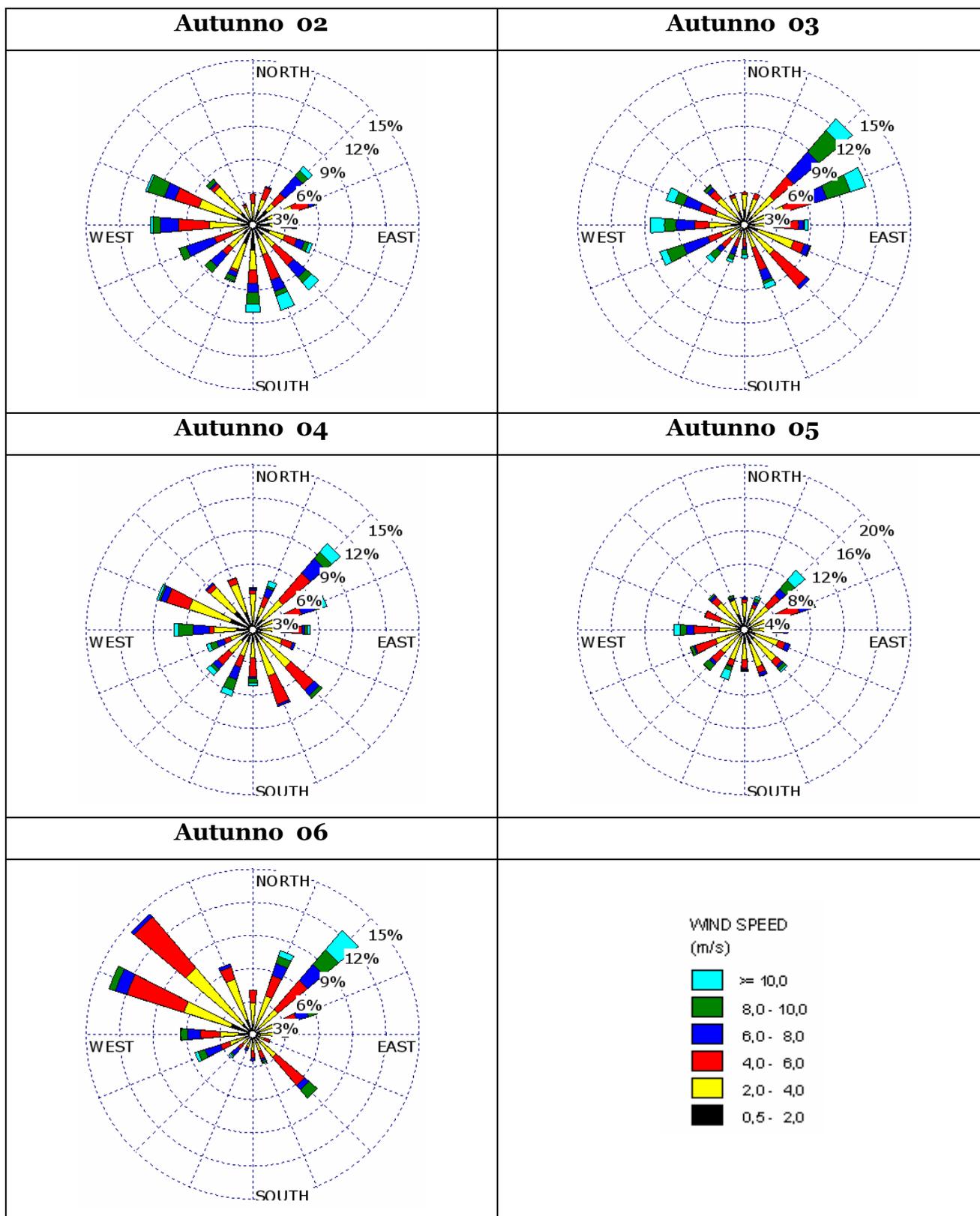


Figura A.12– Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – autunni (ECMWF).

Stazione LICOLA

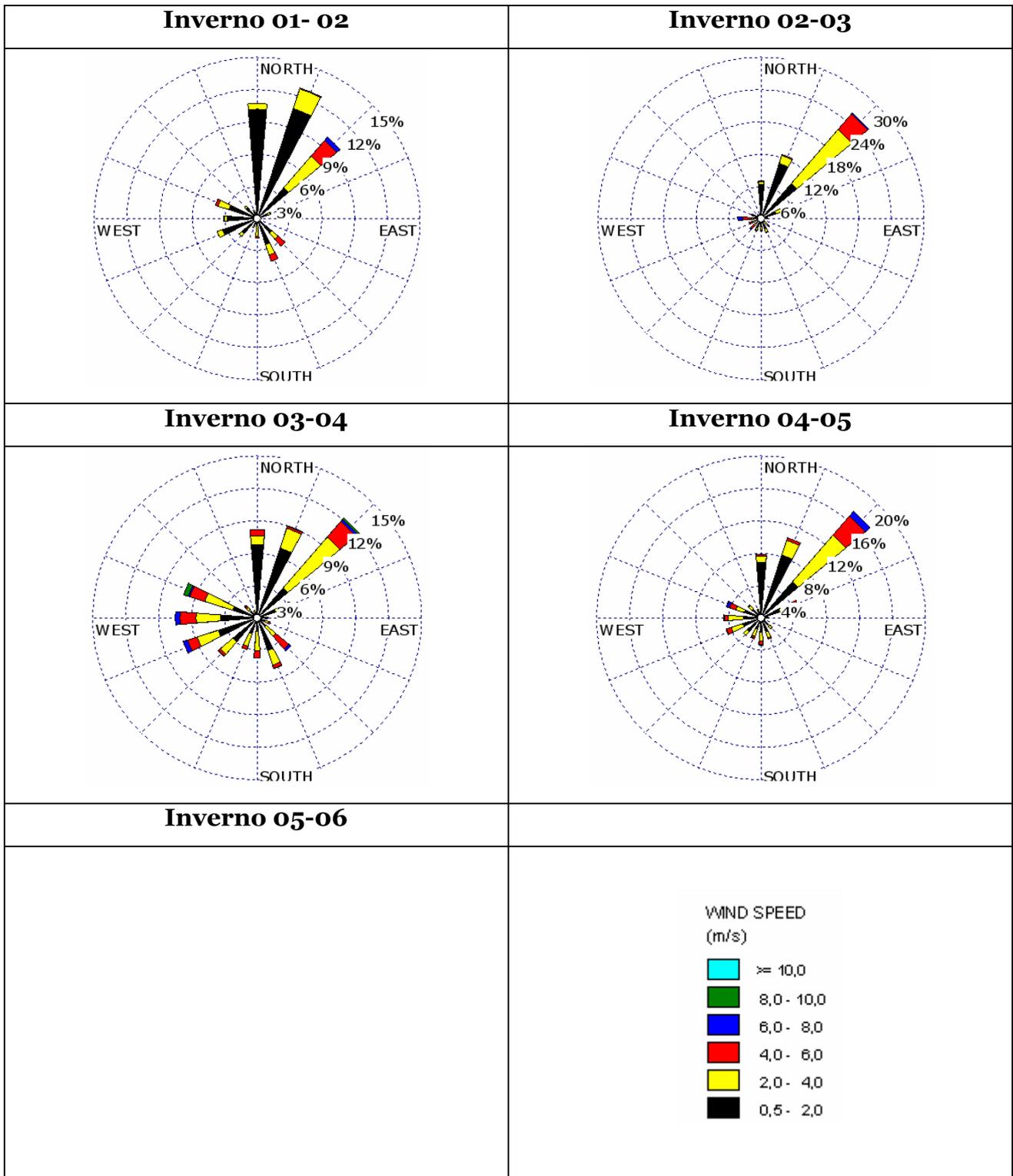


Figura A.13 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – inverni (Licola).

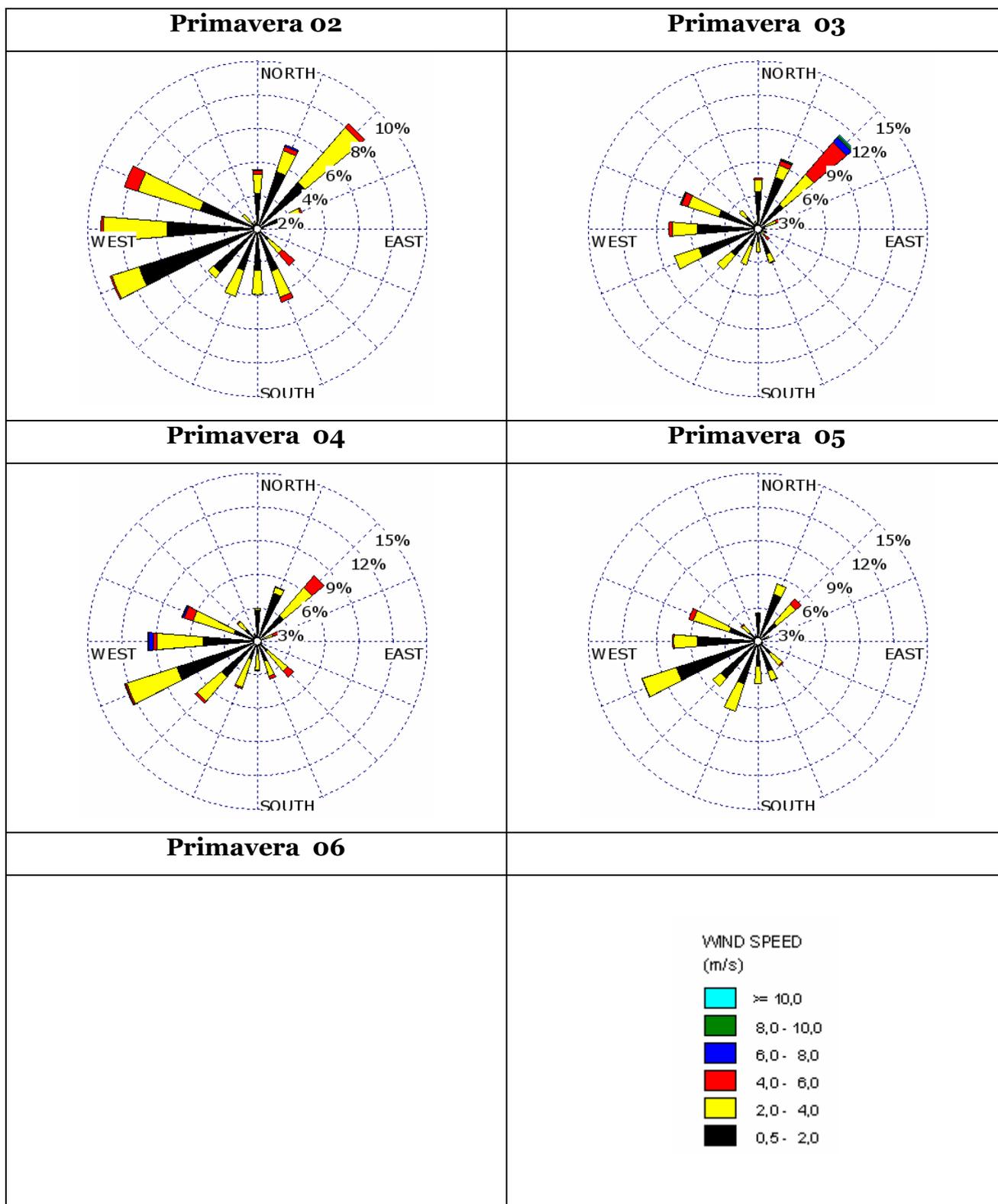


Figura A.14 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – primavere (Licola).

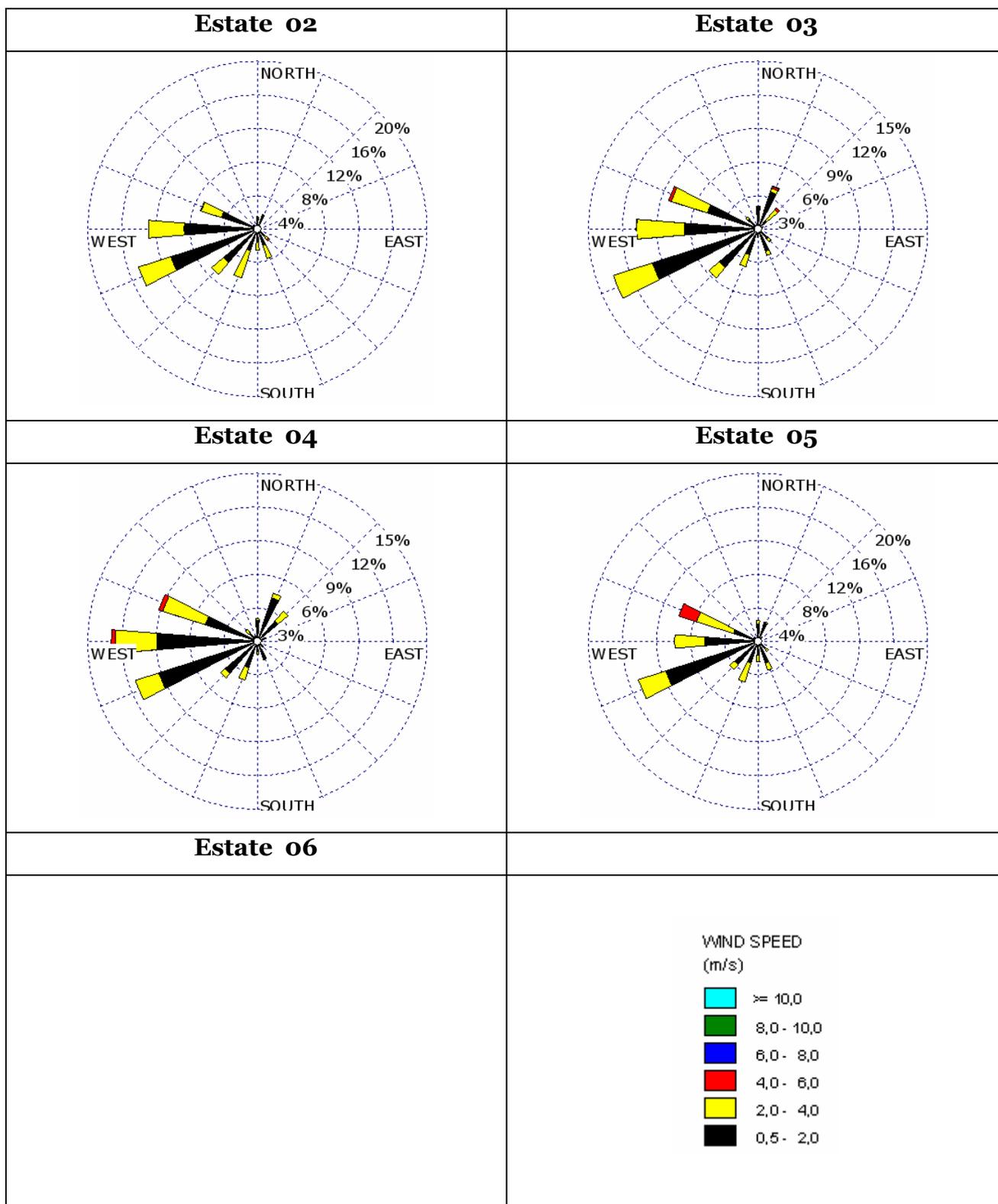


Figura A.15 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – estati (Licola).

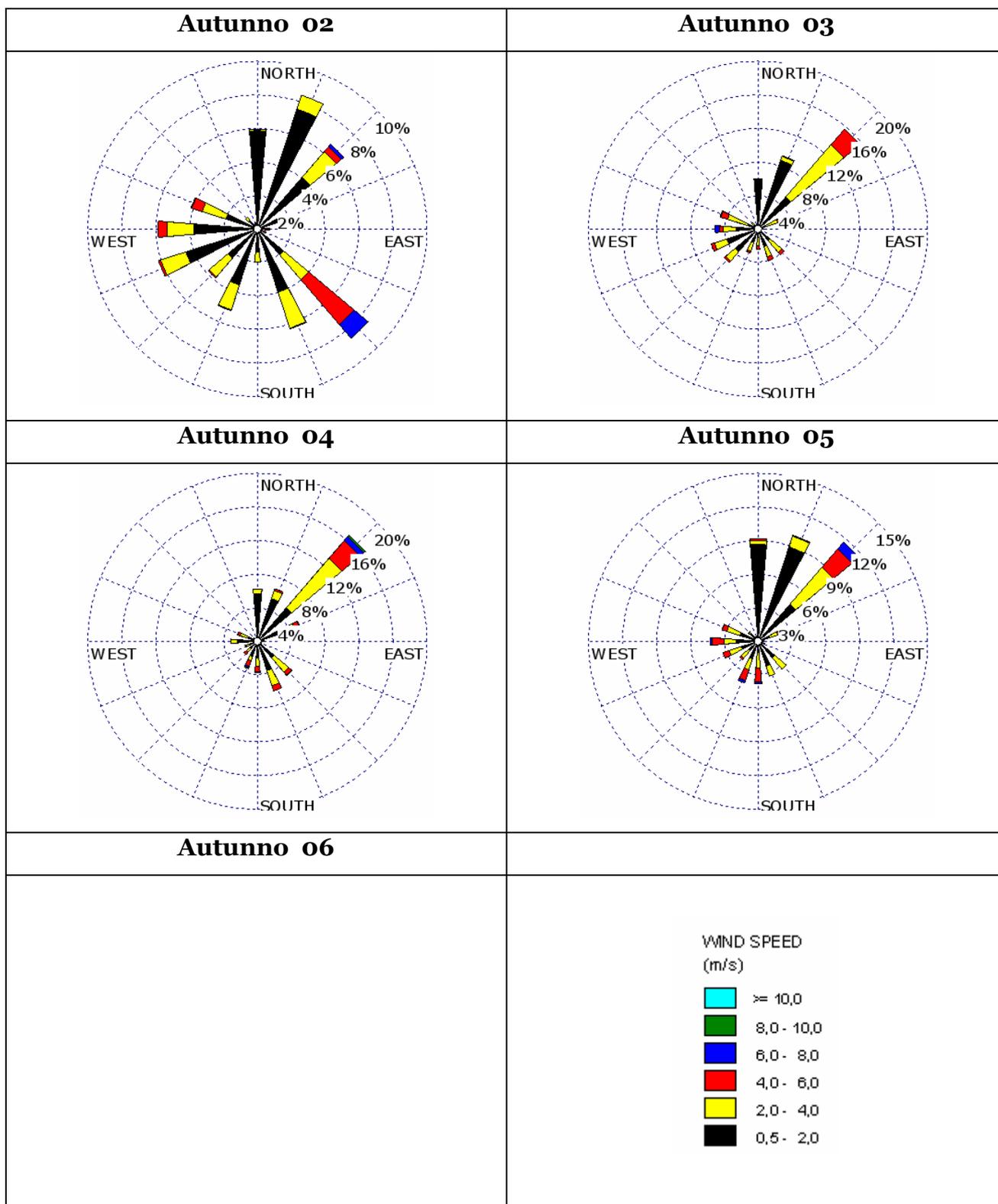


Figura A.16 – Rose dei venti per gli anni 2002-2006 – autunni (Licola).

Bibliografia

Artale V., Astraldi M., Buffoni G., Gasparini G. (1994) Seasonal variability of gyre-scale circulation in the northern Tyrrhenian Sea. *Journal of Geophysical Research* 99 (C7): 14127-14138.

Barrick D. E., Evans M., Weber B. (1977) Ocean surface currents mapped by radar. *Science*: 138-144.

Barrick D. E., Headrick J. M., Bogle R. W., Crombie D. D. (1974) Sea backscatter at HF - Interpretation and utilization of the echo. *IEEE* 62: 673-680.

Blodgett W. C. (2002) Rotary cross-spectral analysis of low frequency currents with co-located wind measurement in southern Monterey Bay. Class project, OC3570 Operational Oceanography: 29.

Budillon G., Paschini E., Simioli A., Zambianchi E. (2001) Surface dynamics of coastal area off Ancona (Adriatic Sea). In: F. M. Faranda, L. Guglielmo G. Spezie, *Mediterranean Ecosystems: Structures and Processes*. Springer-Verlag Italia, p 19-24.

Buffoni G., Griffa A., Zambianchi E. (1999) Modelling of dispersion processes in a tide-forced flow. *Hydrobiologia* 393: 19-24.

Buffoni G., Falco P., Griffa A., Zambianchi E. (1997) Dispersion processes and residence times in a semi-enclosed basin with recirculating gyres. An application to the Tyrrhenian Sea. *J. Geophys. Res.* 102 (18): 699-18.

Buonocore B., Menna M. (2006) La variabilità del livello del mare nel Golfo di Napoli e la sua dipendenza dalla pressione atmosferica.

Buonocore B., Sansone E., Zambardino G. (2003) Rilievi ondametrici nel Golfo di Napoli. *Annali della Facoltà di Scienze e Tecnologie Università Parthenope LXVII*: 203-211.

Buonocore B., Flocco D., Zambianchi E. (2005) Micser. Misure di correnti superficiali eseguite con radar costiero. 16.

Buonocore B., Menna M., Mercatini A., Uttieri M., Zambianchi E. (2006) Processi di trasporto nel Golfo di Napoli tramite misure radar di correnti superficiali. V Convegno CoNISMa.

Carrada G. C., Hopkins T. S., G. B., Ianora A., Marino D., Modigh M., Ribera d'Alcalà M., B. S. D. C. (1979) Variability in the hydrographic and biological features of the Gulf of Naples. P.S.Z.N.I: Marine ecology 1: 105-120.

Crombie D. D. (1955) Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. Nature 175: 681-682
Csanady G. T. (1984) Circulation in the Coastal Ocean.

De Alteris A., De Stefano M., Bianco G., Budillon G., Sansone E. (2004) Analisi della dinamica marina di una zona costiera del Golfo di Napoli. Conisma – AIOL.

De Maio A., Moretti M. (1973) Contributo ad un progetto di studio delle correnti nel Golfo di Napoli. Fondazione Politecnica per il Mezzogiorno d'Italia quad. n° 71.

De Maio A., Moretti M., Sansone E., Spezie G., Vultaggio M. (1979) Dinamica delle acque nel Golfo di Napoli. Atti del Convegno Scientifico Nazionale P.F. Oceanografia e fondali marini II: 1033-1045.

De Maio A., Moretti M., Sansone E., Spezie G., Vultaggio M. (1981) Circolazione costiera. Analisi dinamica e idrologica di una situazione osservata nel Golfo di Napoli. paper presented at the conference Unità Operative afferenti ai sottoprogetti Risorse Biologiche e Inquinamento Marino, Rome.

De Maio A., Moretti M., Sansone E., Spezie G., Vultaggio M. (1983) Dinamica delle acque nel Golfo di Napoli e adiacenze. Risultati ottenuti dal 1977 al 1980. Annali I.U.N. 49 (appendice n°2): 58.

De Maio A., Moretti M., Sansone E., Spezie G., Vultaggio M. (1985) Outline of marine currents in the bay of Naples and some considerations on pollutant transport. Il Nuovo Cimento C 8 (6): 955-969.

Emery W., Thomson R. (2001) *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Science.

Escoffier C., Provost C. (1995) Wind Forcing over the Southwest Atlantic: Comparison between Observations and ECMWF Analyses. *Monthly Weather Review* 123: 1269–1287.

Falco P., Griffa A., Poulain P., Zambianchi E. (2000) Transport Properties in the Adriatic Sea as Deduced from Drifter Data. *Journal of Physical Oceanography* 30 (8): 2055-2071.

Fernandez D. M., Graber C., Paduan J. D., Barrick D. E. (1997) Mapping wind direction with HF radar. *Oceanography* 10: 93-95.

Fofonoff N. P. (1969) Spectral characteristics of internal waves in the ocean. *Deep-Sea Research* 16: 58-61.

Gonella J. (1972) A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. *Deep-Sea Research* 19: 833–846.

Graber C., Heron M. L. (1997) Wave height measurement from HF radar. *Oceanography* 10: 90-92.

Gravili D., Napolitano E., Pierini S. (2001) Barotropic aspects of the dynamics of the Gulf of Naples (Tyrrhenian Sea). *Continental Shelf Research* 21 (5): 455–471.

Grieco L., Tremblay L., Zambianchi E. (2005) A hybrid approach to transport processes in the Gulf of Naples: an application to phytoplankton and zooplankton population dynamics. *Continental Shelf Research* 25: 711-728.

Konyaev K. (1990) *Spectral Analysis of Physical Oceanographic Data*. Balkema Rotterdam.

Krivosheya V., Ovchinnikov I. (1973) Peculiarities in the geostrophic circulation of the waters of the Tyrrhenian Sea. *Oceanology* 13: 822-827.

Kundu P. J. (1990) *Fluid Mechanics*. Academic Press, San Diego.

Mattia G. (2007) Stidi modellistici di circolazione marina e trasporto in aree costiere campane. Tesi di Dottorato, Università Federico II, Napoli.

Mooers C. (1973) A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants. *Deep-Sea Res* 20 (12): 1129–1141.

Moretti M., Spezie G., Vultaggio M. (1985) Observation of near inertial period oscillations in the Gulf of Naples. *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata* 3 (2): 145-152.

Moretti M., Sansone E., Spezie G., De Maio A. (1977) Alcuni aspetti del Movimento delle acque nel golfo di Napoli. *Annali I.U.N.* 46: 207-217.

Morrow R., Coleman R., Church J., Chelton D. (1994) Surface Eddy Momentum Flux and Velocity Variances in the Southern Ocean from Geosat Altimetry. *Journal of Physical Oceanography* 24: 2050-2071.

Paduan J. D., Rosenfeld L. K. (1996) Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore-based HF radar (Coastal Ocean Dynamics Application Radar). *Journal of Geophysical Research* 101: 20,669-20,686.

Paduan J. D., Graber C. (1997) Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography* 10: 36-39.

Pedlosky J. (1987) *Geophysical Fluid Dynamics*. second edition. Springer-Verlag, New York.

Peluso T. (2003) Studio della fascia costiera di Mergellina (Napoli) attraverso l'elaborazione di dati meteo-marini e di un modello di avvezione e diffusione, in ambiente GIS. Tesi di Laurea, Università Parthenope, Napoli.

Petrillo A. (2006) Analisi di dati correntometrici nel Golfo di Napoli. Tesi di laurea, Università Parthenope, Napoli.

Pickard G. L., Emery W. J. (1964) *Descriptive Physical Oceanography*. Butterworth – Heinemann.

Pierini S., Simioli A. (1998) A wind-driven circulation model of the Tyrrhenian Sea area. *Journal of Marine Systems* 18 (1-3): 161-178.

Ribera d'Alcalà M., Modigh M., Moretti M., Saggiomo V., Scardi M., Spezie G., Zingone A. (1989) Una storia infinita: eutrofizzazione nella Baia di Napoli. *Oebalia XV-1*: 491-501.

Roselli L. (2003) *Interazioni dinamiche alla Bocca Piccola di Capri*. Tesi di Laurea, Università Parthenope, Napoli.

Roselli L., Manno C., Spezie G. (2007) Inertial oscillations and particle flux interactions in a marine protected area in Gulf of Naples. *Chemistry and Ecology* 23 (2): 177-190.

Smith S. D. (1980) Wind Stress and Heat Flux over the Ocean in Gale Force Winds. *Journal of Physical Oceanography* 10 (5): 709–726.

Stewart R. H. (2005) *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A & M University.

Stewart R. H., Joy J. W. (1974) HF radar measurement of surface current. *Deep-Sea Res* 21: 1039-1049.

Weltmer M. (2002) *Spatially Correlated Rotary Cross-Spectral Analysis of Wave Forcing in the Surf Zone during the RIPEX / Sttep Beach Experiment, Sand City, CA*. Class project, OC3570 Operational Oceanography: 24.

Wyatt L. R. (1977) The ocean wave directional spectrum. *Oceanography* 10: 85-89

