



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



## **MAGINOT**

*Sistema Integrato per il monitoraggio e la Tutela  
dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino*

*Titolo*

***idrodinamica e dispersione inquinanti***



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

## 1. Indice

1.	sommario .....	3
2.	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO e oceanografico.....	4
3.	METODI NUMERICI .....	5
3.1	MODELLO IDRODINAMICO .....	6
3.2	Modello di trasporto EULERIANO .....	7
3.3	MODELLO DI TRASPORTO lagrangiano .....	8
4.	setup modello numerico.....	9
4.1	dominio numerico.....	9
4.2	setup simulazioni .....	12
4.3	definizione area di influenza e age .....	13
5.	risultati.....	14
5.1	idrodinamica .....	15
5.2	trasporto di sostanze inquinanti.....	31
6.	misure sperimentali.....	36
6.1	STRUMENTI DI MISURA .....	37
6.2	Imbarcazioni di supporto .....	38
6.3	Misure di corrente .....	39



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

## 1. SOMMARIO

Questo studio ha l'obiettivo di investigare la dinamica di circolazione delle acque nella rada e golfo di Augusta. A tal scopo sono stati utilizzati sia un approccio modellistico sia un approccio sperimentale in grado di analizzare la circolazione indotta dalle principali forzanti meteo-marine e gli annessi fenomeni di trasporto di sostanze inquinanti disperse o disciolte ad opera delle correnti marine nell'area di interesse. In particolare, sono stati utilizzati un modello idrodinamico tridimensionale, basato sul metodo degli elementi finiti, accoppiato a due diversi modelli per la simulazione del trasporto di sostanze in sospensione e disperse. Tale strumento è stato applicato all'area in esame al fine di riprodurre sia i campi tridimensionali di correnti indotte dai venti, dalle forzanti termoaline e dalla marea astronomica sia i processi di trasporto di traccianti con comportamento passivo durante un intero anno solare.

Sono stati considerati diversi scenari, ognuno dei quali caratterizzato da diverse inizializzazioni dei traccianti utilizzati per simulare sostanze inquinanti rilasciate all'interno della rada di Augusta. Sono state effettuate simulazioni annuali di tipo idrodinamico e i risultati sono stati analizzati al fine di stimare l'areale di influenza delle acque di rada nel tratto di mare ad essa antistante. Utilizzando il modulo di trasporto lagrangiano sono stati inoltre determinati i campi di distribuzione dei tempi di rinnovo delle masse d'acqua della rada mediante la stima della variabilità spaziale e temporale del parametro di *age*.

Il rapporto tecnico è suddiviso come segue: una parte iniziale relativa all'inquadramento geografico, meteorologico e oceanografico dell'area in esame, una parte successiva di descrizione metodologica dei modelli numerici, dei dati utilizzati ed infine la parte relativa alla descrizione dei risultati.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E OCEANOGRAFICO

In Figura 1 si riporta il settore costiero di interesse compreso tra i  $36.95^{\circ}$  N,  $15.05^{\circ}$  E ed i  $37.35^{\circ}$  N,  $15.55^{\circ}$  E. L'area è caratterizzata da una profondità variabile con un fondale molto degradante caratterizzato da batimetriche intorno ai 10-20 m nell'area costiera fino a valori massimi superiori ai 2000 m. Tale tratto di mare si colloca lungo la costa orientale della Sicilia, approssimativamente a circa 130 km a Sud dello Stretto di Messina e costituisce un'area di confine tra i sottobacini del Mar Ionio e del Canale di Sicilia.

Dal punto di vista oceanografico l'area è caratterizzata da una dinamica di circolazione stagionale con una corrente costiera meridionale che, proveniente dal Mar Ionio trasporta masse d'acqua superficiali verso il canale di Sicilia in prossimità di Capo Passero (Cucco et al., 2016). L'intensità di tale corrente varia durante l'anno con picchi intorno ai 0.5 m/s e valori minimi invernali intorno ai 0.1 m/s. Nell'area di interesse, data l'esigua estensione della piattaforma continentale, tale corrente influenza direttamente la dinamica di circolazione del tratto costiero.

Sotto l'aspetto meteorologico, i principali regimi di vento che caratterizzano l'area sono il Maestrale, Nord-Ovest, il Grecale, Nord-Est e lo Scirocco, Sud (De Marchis et al., 2014). Le intensità di tali venti variano con valori massimi fino a circa 10 m/s durante il periodo tardo invernale e autunnale. La componente mareale è di bassa intensità ed è ben descritta dalla sola componente lunare semidiurna M2, che presenta ampiezza inferiore ai 20 cm (De Marchis et al., 2014).



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



Figura 1: Area di indagine

### 3. METODI NUMERICI

Al fine di analizzare la dinamica di circolazione e i processi di trasporto degli inquinanti nell'area di indagine, si rende necessario l'utilizzo della modellistica numerica.

Data la complessità della tematica investigata, l'approccio modellistico deve essere di tipo integrato in grado quindi di descrivere e riprodurre sia la dinamica delle correnti indotte dalle forzanti meteomarine sia il trasporto degli inquinanti disciolti o dispersi. Tra i diversi tipi di modelli numerici idrodinamici e di trasporto è stato scelto di utilizzare quello basato sul metodo degli elementi finiti. Tale metodo utilizza griglie di calcolo non strutturate costituite da elementi di forma e dimensione variabile, mediante le quali è possibile riprodurre morfologie e batimetrie complesse quali quelle dei bacini costieri. Inoltre, la possibilità di variare la dimensione degli elementi di calcolo permette la simulazione contemporanea sia dei processi a grande scala che interessano le



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

aree di mare aperto sia dei processi a piccola scala che caratterizzano le dinamiche tipiche delle aree costiere.

Nella fattispecie, in questo studio, è stato utilizzato SHYFEM (Umgiesser et al., 2004), un modello tridimensionale idrodinamico accoppiato con un modello per la simulazione dei processi di avvezione e diffusione di sostanze disciolte o disperse nella colonna d'acqua. Tale modello è basato sul metodo degli elementi finiti ed è in grado di simulare la direzione e l'intensità della corrente nelle tre dimensioni indotta dalle principali forzanti meteomarine (marea, forzanti termoaline e vento) e i relativi processi di trasporto, nonché la variabilità spazio-temporale di altre variabili idrodinamiche quali i livelli superficiali, la temperatura e la salinità delle acque lungo tutta la colonna d'acqua. Di seguito, sono descritti con maggior dettaglio, il modello idrodinamico e i modelli per la simulazione dei processi di trasporto e diffusione delle sostanze disciolte e disperse.

### 3.1 MODELLO IDRODINAMICO

Il modello numerico SHYFEM ([www.ve.ismar.cnr.it/shyfem](http://www.ve.ismar.cnr.it/shyfem)) risolve il sistema di equazioni Shallow Water con approssimazione di Boussinesq in orizzontale e approssimazione idrostatica in verticale nella loro formulazione con i livelli d'acqua e i trasporti (Umgiesser et al., 2004; <https://sites.google.com/site/shyfem>). E' in grado di riprodurre il campo di moto indotto dai gradienti barotropico, baroclinico e di pressione atmosferica, dagli attriti all'interfaccia aria-mare (azione dei venti) ed all'interfaccia mare-fondale (attriti al fondo), dall'avvezione nonlineare e dai processi turbolenti lungo la verticale.

Le equazioni risolte sono di seguito descritte:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U_l}{\partial t} + Adv_l^x - fV_l &= gh_l \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\xi} \rho' dz + \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial V_l}{\partial t} + Adv_l^y + fU_l &= gh_l \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\xi} \rho' dz + \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \sum_{\tau} \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_{\tau} \frac{\partial V_l}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

Eq. 1

Dove  $l$  indica lo strato verticale,  $(U_l, V_l)$  le componenti orizzontali del trasporto nelle direzioni  $x$  ed  $y$  per ogni strato,  $Adv^x$  e  $Adv^y$  i termini avvezzivi,  $p_a$  la pressione atmosferica,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $f$  il parametro di Coriolis,  $\zeta$  il livello dell'acqua,  $\rho_0$  il valore di riferimento della densità dell'acqua di mare,  $\rho = \rho_0 + \rho'$  la densità dell'acqua di mare,  $h_l$  lo spessore dello strato,  $H_l$  la profondità del fondo dello strato  $l$ ,  $A_h$  il parametro di viscosità necessario per la risoluzione della dinamica di sotto-griglia (eddy viscosity). Per il calcolo della diffusività e viscosità verticali è stato usato il modello denominato GOTM (General Ocean Turbulence Model, Burchard et al., 1999). I termini di attrito all'interfaccia in superficie ed al fondo sono definiti come:

$$\begin{aligned} \tau_x^{surface} &= c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \\ \tau_x^{bottom} &= c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \\ \tau_y^{surface} &= c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \\ \tau_y^{bottom} &= c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \end{aligned} \quad \text{Eq. 2}$$

Dove  $C_D$  è il coefficiente di attrito del vento,  $C_B$  attrito al fondo,  $\rho_a$  la densità dell'aria,  $(w_x, w_y)$  le componenti della velocità del vento e  $(u_L, v_L)$  le componenti della velocità della corrente al fondo. Ulteriori dettagli della trattazione numerica sono definiti in Umgiesser et al., (2004).

### 3.2 MODELLO DI TRASPORTO EULERIANO

Il modello idrodinamico agli elementi finiti è stato accoppiato con un modello per la simulazione dei processi di trasporto e dispersione di sostanze disciolte in acqua quali inquinanti organici e metalli pesanti.

Tale modulo si basa su un approccio di tipo euleriano alla soluzione dell'equazione di avvezione-diffusione. Si consideri la concentrazione  $C$  di una sostanza in un punto della griglia di calcolo nel tempo  $t$ . L'evoluzione di tale concentrazione nel tempo e nello spazio è calcolabile mediante la risoluzione della seguente equazione differenziale:



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \Phi \quad \text{Eq. 3}$$

dove  $u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y}$  sono i termini di trasporto con  $u$  e  $v$  le velocità calcolate per ogni livello verticale ed elementi di griglia dalla soluzione del precedente sistema di equazioni,  $K \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$  sono i termini di diffusione orizzontale (equazione di Fick) con  $K$  coefficiente di diffusività, e infine  $\Phi$  racchiude le sorgenti e i pozzi quali i processi di trasformazione biochimica a cui tale sostanza può essere soggetta. Sotto l'aspetto numerico, la risoluzione di tale set di equazioni avviene in un sistema di riferimento solidale con la griglia di calcolo e in modo accoppiato con il sistema di equazioni 1 e 2.

### 3.3 MODELLO DI TRASPORTO LAGRANGIANO

Il modello idrodinamico SHYFEM è inoltre accoppiato con un modello per la simulazione dei processi di trasporto e diffusione di sostanze disperse in acqua, con comportamento attivo quali gli idrocarburi.

Tale modello, noto come Particle Tracking Model (PTM), si basa su un approccio lagrangiano alla soluzione dell'equazione di avvezione-diffusione. Il suddetto modulo risolve il seguente set di equazioni differenziali:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= u_a + u_d \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= v_a + v_d \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$

Dove  $u_a, v_a$  sono le velocità avvettive e  $u_d, v_d$  sono le componenti diffusive calcolate lungo l'asse  $x$  e  $y$ . Le componenti  $u_a$  e  $v_a$  sono espresso come:

$$\begin{aligned} u_a &= \alpha_c u_1 + \alpha_w w_x \\ v_a &= \alpha_c v_1 + \alpha_w w_y \end{aligned} \quad \text{Eq. 5}$$





investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

where  $u_l$ ,  $v_l$  sono le velocità calcolate per il primo livello verticale dal modello idrodinamico SHYFEM,  $w_x$ ,  $w_y$  sono le velocità del vento calcolate a 10 m dalla superficie del mare e  $\alpha_w$  e  $\alpha_c$  sono i fattori di correzione per il vento e la corrente generalmente pari a 0.01 e a 1.1. Le componenti orizzontali della velocità turbolenta  $u_d$  and  $v_d$  sono calcolate mediante una tecnica *random walk* (Smith, 1973) Sotto l'aspetto numerico, la risoluzione di tale set di equazioni avviene in modo accoppiato con il sistema di equazioni 1 e 2.

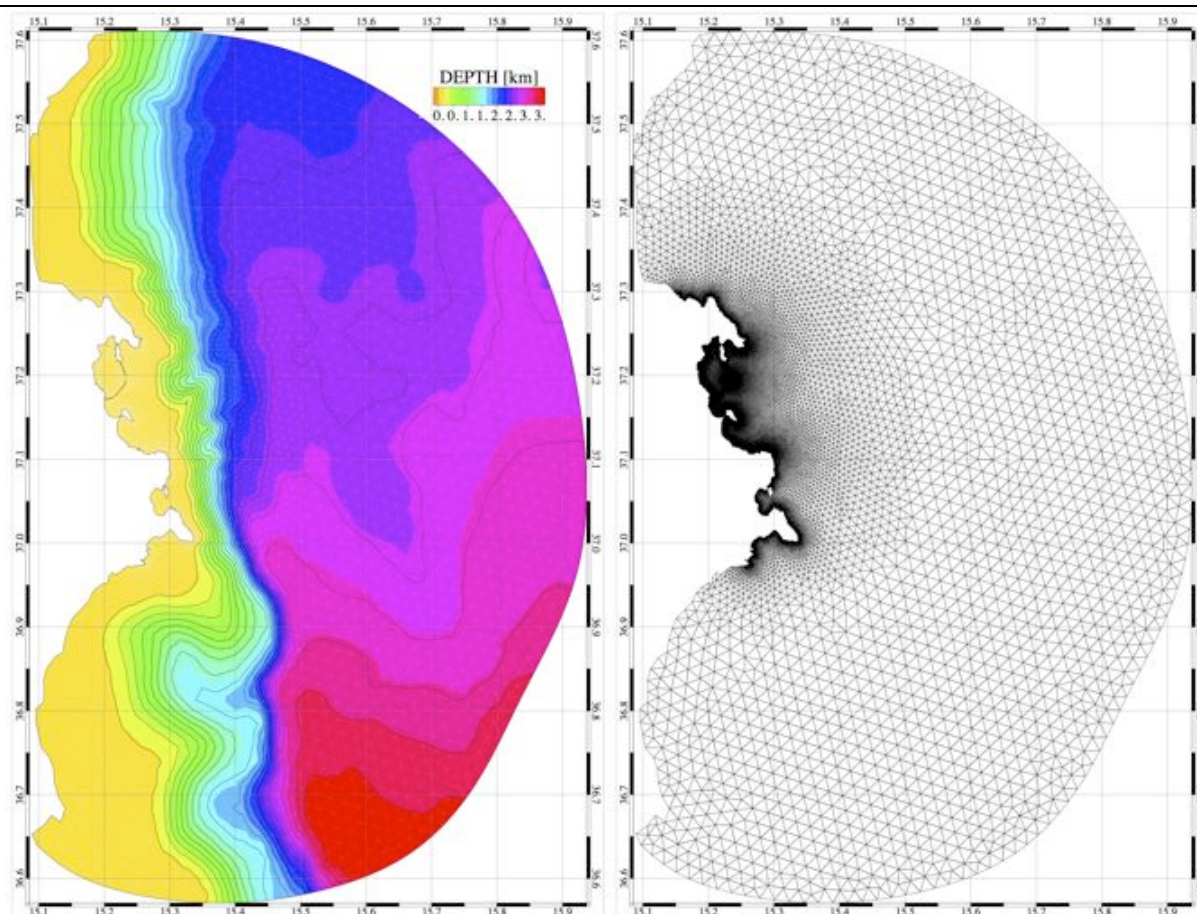
## 4. SETUP MODELLO NUMERICO

In questo paragrafo sono descritti il dominio di calcolo implementato per la soluzione dei precedenti sistemi di equazioni, i dati ambientali e i valori dei parametri del modello utilizzati nelle diverse simulazioni numeriche.

### 4.1 DOMINIO NUMERICO

Il modello idrodinamico utilizza una griglia di calcolo basata su elementi triangolari di forma e dimensioni variabili con una risoluzione spaziale compresa tra i 25 m e i 2-3 km, che permette una descrizione dettagliata della geometria e morfologia delle aree costiere (Figure 2, 3 e 4).

Il dominio numerico comprende l'intera unità fisiografica di interesse e si estende fino a circa 60-70 km a Est del Golfo di Augusta includendo parte del Mar Ionio e la parte Meridionale dello Stretto di Messina. Tale estensione permette di poter escludere le inaccurately derivanti dalla propagazione delle condizioni al contorno imposte, durante le simulazioni, lungo il bordo aperto della griglia di calcolo che, nella fattispecie corrisponde all'interno perimetro esterno del dominio (Figura 2).



*Figura 2: griglia di calcolo agli elementi finiti.*

In corrispondenza delle aree costiere di interesse (Figure 3 e 4) la griglia di calcolo è caratterizzata da un aumento graduale della risoluzione spaziale degli elementi fino a riprodurre il tratto di costa antistante il porto di Augusta con elementi di lato non superiore a 25 metri (Figura 4). A tale incremento della densità degli elementi corrisponde un aumento dell'accuratezza del calcolo numerico.

La riproduzione delle caratteristiche batimetriche del dominio di indagine è stata effettuata mediante l'utilizzo di dati batimetrici ad alta risoluzione ottenuti dall'integrazione dei dati a grande scala GEBCO (<http://www.gebco.net>), usati per le aree di mare aperto lontane dalla costa (Figura 2), con i dati derivati dalla digitalizzazione di carte nautiche, usati per le aree prossime alla linea di



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

costa (Figura 3 e 4). Per quanto riguarda la direzione verticale, il modello prevede 22 livelli con passo variabile da 5 a 200 metri.

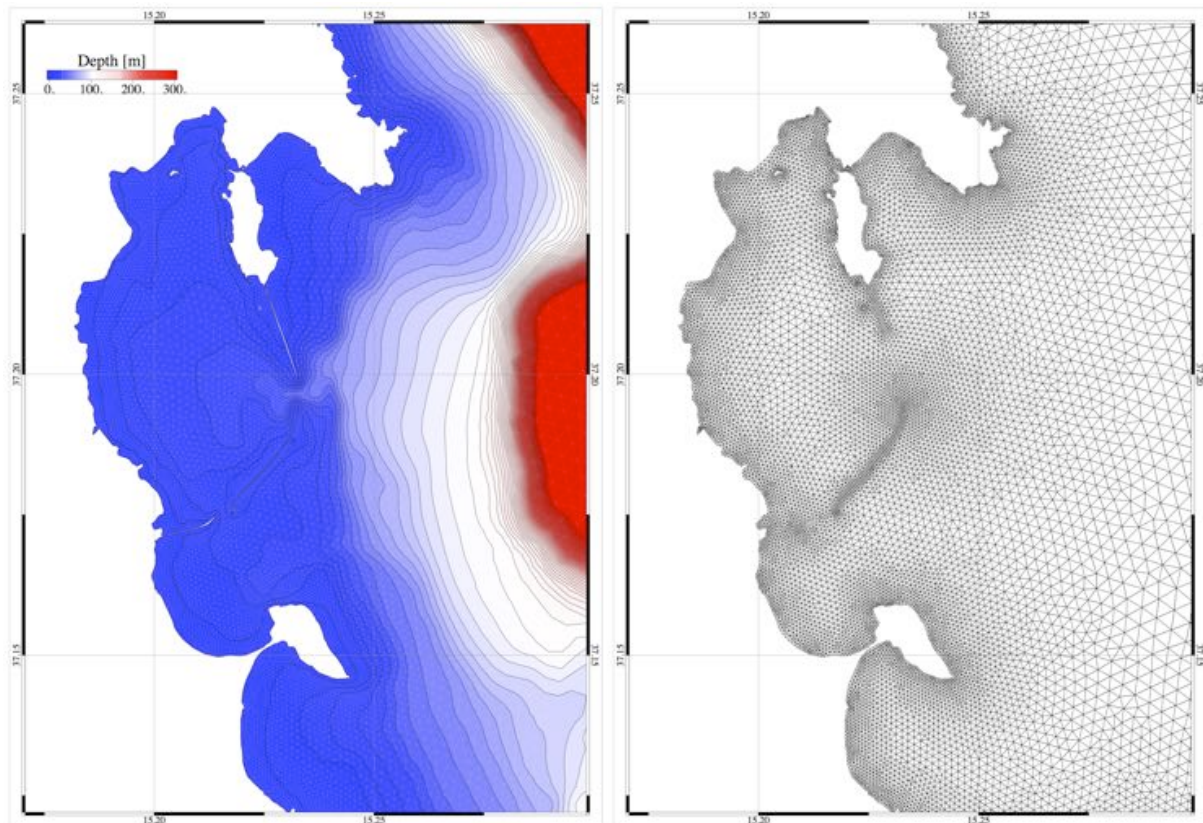


Figura 3: batimetria e griglia di calcolo utilizzata dal modello, zoom per l'area di interesse

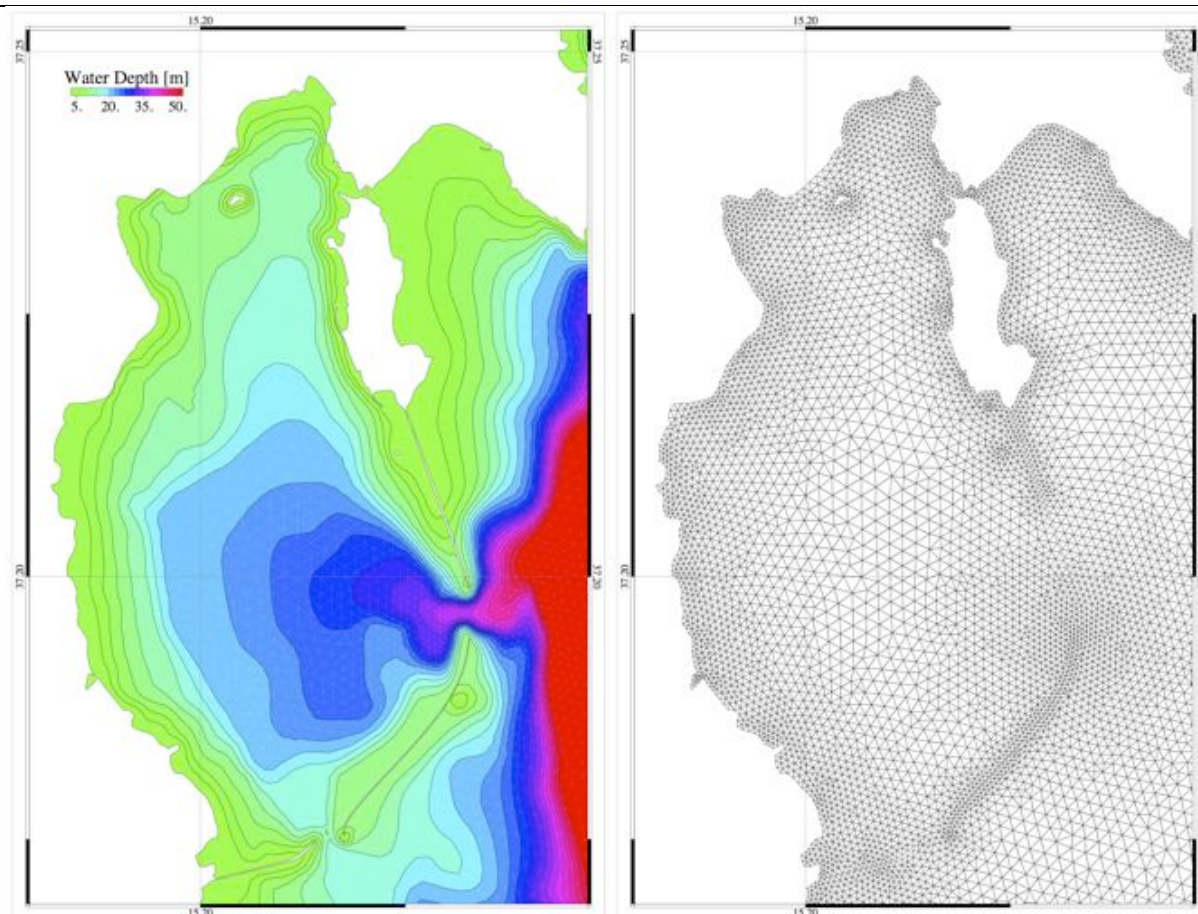


Figura 4: Batimetria e griglia di calcolo utilizzata dal modello, zoom per l'area portuale di Augusta

## 4.2 SETUP SIMULAZIONI

Per riprodurre la circolazione delle acque nell'area d'indagine sono state utilizzate 2 tipologie di dati forzanti: dati oceanografici e dati meteorologici entrambi provenienti da modelli numerici preesistenti ed operativi nell'area in esame.

Per quanto riguarda i dati oceanografici necessari per stabilire le condizioni al contorno durante le simulazioni numeriche, sono stati utilizzati i dati prodotti dal modello oceanografico operativo denominato Tyrrhenian-Sicily Strait sub-Regional Model (TSCRM), in uso presso l'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR (vedi [www.seaforecast.cnr.it](http://www.seaforecast.cnr.it)). Si tratta di un modello idrodinamico tridimensionale alle differenze finite basato sul Princeton Ocean Model (Blumberg



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

and Mellor, 1987). TSCRM include l'assimilazione dati (Dobricic and Pinardi, 2008) ed è implementato in un sub-dominio del Mar Mediterraneo compreso tra 9°E e 16.5°E e 31° Ne 43°N con una risoluzione orizzontale di 1/48° e un numero di livelli verticali sigma pari a 30.

E' stata implementata una procedura di nesting tra SHYFEM e il modello costiero precedentemente descritto. Tale procedura consiste nel rilassamento dei campi di temperatura, salinità e delle componenti delle velocità calcolate dal modello SHYFEM su tutto il dominio sugli stessi campi generati dal modello TSCRM.

Sono stati utilizzati i dati prodotti per l'anno 2015 relativi alle variabili Temperatura, Salinità, Livello e Velocità della corrente nelle 3 dimensioni ottenuti su base oraria per tutti i punti di calcolo costituenti il bordo aperto della griglia agli elementi finiti del modello SHYFEM (perimetro esterno della griglia in Figura 2).

Per quanto riguarda le condizioni alla superficie libera sono stati utilizzati i dati meteorologici prodotti dal modello meteorologico globale operativo presso l'European Centre for Medium range Weather Forecasting (ECMWF). In particolare, sono stati utilizzati i campi orari di vento, di copertura nuvolosa, di T e di umidità dell'aria a 10 metri e i dati di radiazione incidente prevista per l'anno 2015.

Utilizzando i dati sopra descritti, il modello idrodinamico SHYFEM produce, su base oraria, i campi di velocità nelle tre dimensioni, la temperatura, la salinità ed elevazione superficiale con una risoluzione pari a 25 metri nel tratto costiero di interesse per ognuno dei 22 livelli verticali per tutto l'anno 2015.

Per quanto riguarda la definizione dei coefficienti  $C_D$  di attrito del vento e  $C_B$  di attrito al fondo, sono stati definiti mediante: la formulazione di Smith and Banke, il primo e, mediante la formulazione di Manning, il secondo. Per quanto riguarda infine il coefficiente  $A_H$  di viscosità orizzontale e il coefficiente K di diffusione orizzontale, è stata utilizzata la formulazione di Smagorinsky.

#### 4.3 DEFINIZIONE AREA DI INFLUENZA E AGE

I modelli di trasporto e diffusione euleriani e lagrangiani sono stati utilizzati per investigare



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

rispettivamente l'areale di influenza degli inquinanti potenzialmente rilasciati dal porto di Augusta e la distribuzione dei tempi di rinnovo delle acque all'interno della rada. Per quanto riguarda la prima analisi, è stata effettuata una simulazione numerica per tutto l'anno 2015 in cui le masse d'acqua interne all'area del porto sono state identificate da un tracciante a concentrazione unitaria costante e omogenea. Il modello accoppiato idrodinamico e avvezione ha simulato il trasporto del tracciante durante l'intero periodo di indagine riproducendo, nel tempo, la propagazione delle masse d'acqua di origine portuale. .

La metodologia utilizzata per il calcolo del tempo della *age* delle acque di rada all'interno del bacino portuale si basa su un metodo lagrangiano. Si considera il dominio di indagine della sola area portuale inizializzato con un numero di particelle numeriche predeterminato e ognuna delle quali rappresentanti un volume d'acqua definito. Il modello numerico idrodinamico accoppiato con il modello PTM simula il trasporto e la diffusione delle particelle a seguito dell'azione delle correnti generate dalla marea e dai venti. Ad ogni particella è assegnata una data di nascita corrispondente al momento dell'inizializzazione della simulazione o al momento in cui questa è entrata nel dominio attraverso i canali di connessione con l'esterno (mare). Ad ogni istante di simulazione, per ogni particella viene aggiornata l'età per cui, conseguentemente, alla distribuzione delle particelle all'interno del dominio è associata la relativa distribuzione dell'età o *age* delle masse d'acqua. Si fa riferimento a Cucco e Umgiesser (2009) per una dettagliata descrizione del modello lagrangiano.

## 5. RISULTATI

I risultati ottenuti dalle simulazione numeriche sono stati analizzati e processati al fine di ottenere informazioni quantitative riguardo l'andamento stagionale delle correnti e della temperatura dell'acqua nella rada di Augusta e nel tratto di mare ad essa antistante, degli effetti potenziali di sversamenti all'interno della rada e della distribuzione dei tempi di rinnovo delle acque nel porto di Augusta. Di seguito si riportano i risultati del modello idrodinamico e i risultati dei modelli di trasporto euleriano e lagrangiano



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

## 5.1 IDRODINAMICA

I risultati relativi la circolazione delle acque ottenuti dalle simulazioni numeriche sono stati processati e analizzati per ottenere la distribuzione spaziale dei campi medi mensili delle correnti residue e istantanee alla superficie e come media verticale. Le correnti medie sono state calcolate come media algebrica dei campi orari di velocità istantanee ottenute per ogni mese dell'anno 2015. In Figura 6 sono riportati i campi mensili delle correnti residue ottenute per il livello superficiale corrispondente ai primi 2.5 m. Durante tutto il periodo considerato, il flusso residuo è diretto principalmente verso Sud in tutta l'area più esterna corrispondente all'area di influenza della corrente di origine Ionica. L'intensità di tale flusso varia da pochi cm/s fino a circa 0.5 m/s misurati in prossimità del Capo di Santa Croce a Nord durante i mesi invernali e dell'inizio della primavera. La presenza di tale circolazione meridionale di medio-alta intensità porta alla formazione di strutture inerziali immediatamente a ridosso dello stesso Capo di S. Croce. Nella fattispecie, in corrispondenza del tratto di mare costiero antistante al porto di Augusta, a seguito dell'intensificazione del flusso esterno durante i mesi invernali, si riscontra la presenza di una o più celle cicloniche caratterizzate da intensità delle correnti medie intorno ai 10-20 cm/s. Durante i mesi estivi e autunnali non si rilevano strutture definite e il flusso in tale area risulta di direzione variabile e di intensità medio-bassa attorno ai 5-10 cm/s. Nella parte meridionale del dominio di interesse, in corrispondenza dell'abitato di Priolo, la presenza del tombolo genera durante tutto l'anno strutture di circolazione caratterizzate da presenza di celle cicloniche e anticicloniche con intensità medio basse intorno ai 10 cm /s. Anche in questo caso l'intensificazione del flusso si registra nell'area antistante la costa orientale della penisola a seguito del processo di compressione delle linee fluide.

Per quanto riguarda il porto di Augusta, la circolazione superficiale media mensile è caratterizzata da intensità basse inferiori ai 10 cm/s e direzioni del moto variabili. Analogamente alle correnti esterne, anche per quest'area, intensificazioni si registrano prevalentemente durante i mesi invernali e inizio-primaverili per lo più a seguito dell'intensificarsi dei venti. Durante la maggior parte dei mesi dell'anno la corrente media attraverso le due bocche di porto è diretta verso il mare aperto

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

nella bocca Est e verso la rada nella bocca Sud indicando come lo scambio mediamente possa avvenire con un flusso residuo che collega la bocca Sud, il bacino portuale e quindi la bocca Est.

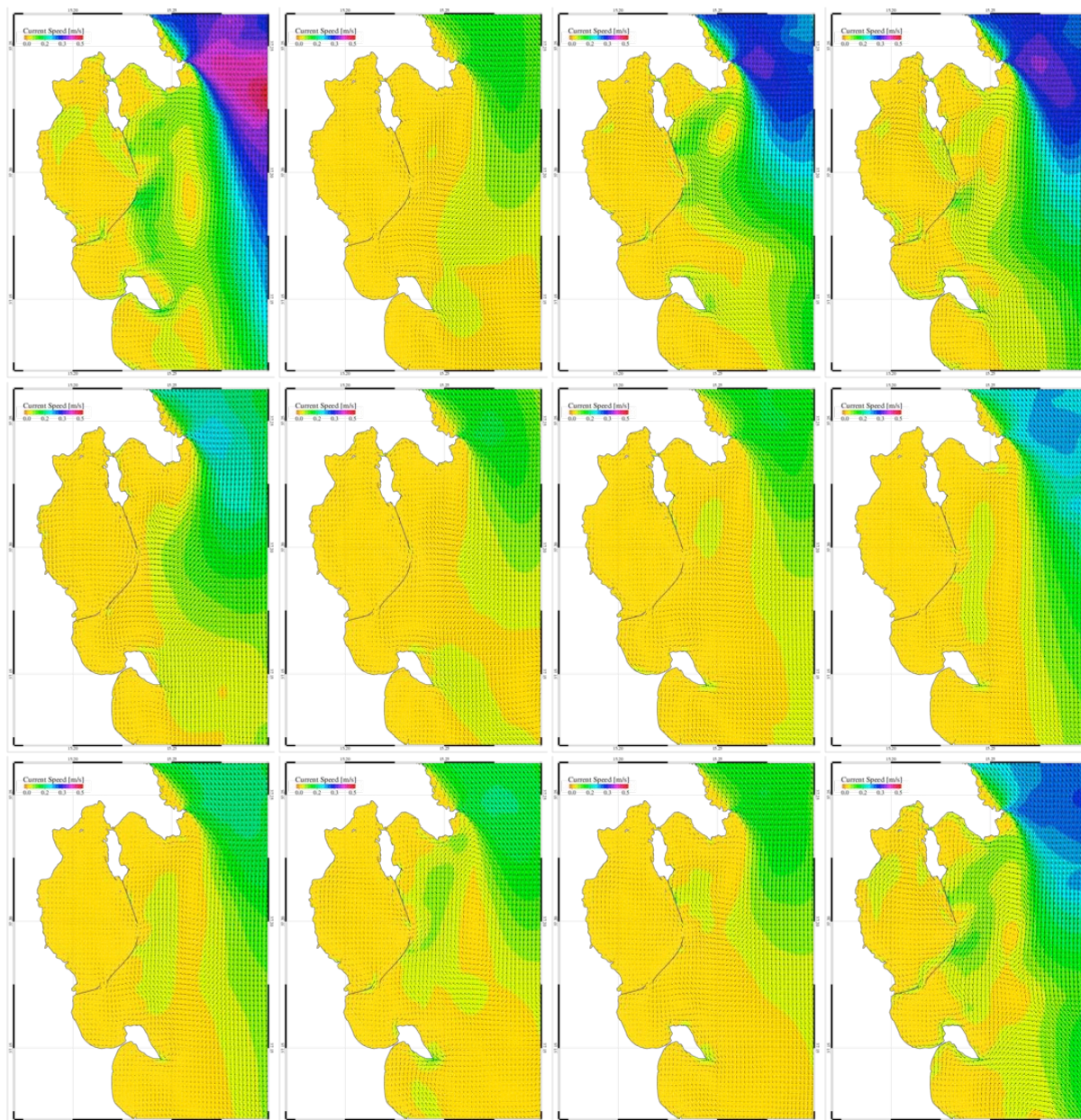


Figura 5: Distribuzione spaziale dei campi medi mensili delle velocità superficiali. Da sinistra verso destra, dall'alto in basso, si susseguono i diversi mesi dell'anno da Gennaio a Dicembre





investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

In Figura 7 sono riportati i campi mensili delle correnti residue medie verticali. Come per lo strato superficiale, anche la corrente mediata lungo la colonna d'acqua è diretta principalmente verso Sud in tutta l'area più esterna in cui prevale la corrente costiera di origine Ionica. L'intensità del flusso medio arriva fino a 0.5 m/s in prossimità del Capo di Santa Croce a Nord durante i mesi invernali e inizio primaverili a seguito dei processi di compressione di linea fluida.

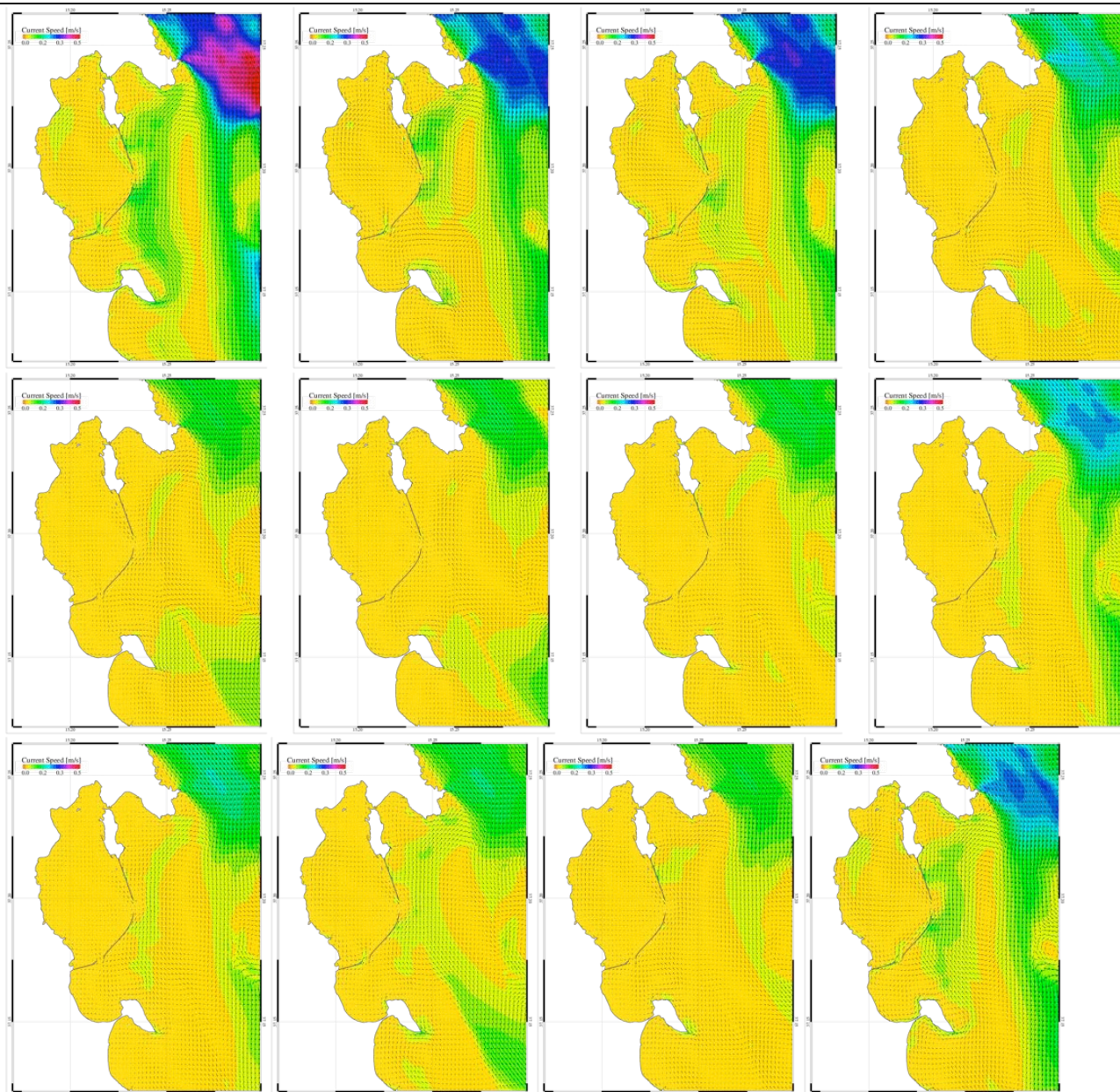
Anche per il flusso medio verticale, a ridosso del Capo in corrispondenza del tratto di mare costiero antistante al porto di Augusta, a seguito dell'intensificazione del flusso esterno durante i mesi invernali, si riscontra la presenza di una cella ciclonica caratterizzata da intensità delle correnti medie intorno ai 10 cm/s. In assenza di flusso meridionale intenso, durante i mesi estivi e autunnali la corrente media-verticale nell'area antistante ha direzione variabile e intensità medio-bassa, compresa nell'intervallo 5-10 cm/s. Anche nella parte meridionale, si riscontra una corrispondenza tra flusso superficiale e corrente media verticale, infatti, nell'area costiera antistante l'abitato di Priolo, la circolazione è caratterizzata da celle cicloniche e anticicloniche con intensità generalmente inferiori ai 10 cm /s.

La circolazione barotropica media mensile rispecchia nella sostanza il flusso superficiale con intensità basse inferiori ai 5 cm/s e direzioni del moto variabili. Per quanto riguarda i flussi attraverso le due bocche del porto si riscontra una direzione del moto verso il mare aperto per il canale Est e diretto verso la rada per il canale Sud confermando la struttura del flusso residuo che collega bocca Sud, bacino portuale e bocca Est.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B1400430008



*Figura 6: Distribuzione spaziale dei campi medi mensili delle velocità mediate sulla colonna d'acqua. Da sinistra verso destra, dall'alto in basso, si susseguono i diversi mesi dell'anno da Gennaio a Dicembre*

In Figura 7 sono riportate le distribuzioni spaziali della temperatura superficiale media mensile calcolata per la rada di Augusta. Durante tutto il periodo considerato, la temperatura media superficiale delle acque di rada varia tra valori minimi compresi tra i 15° ed i 16°C, ottenuti per il



investiamo nel vostro futuro



*P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”*  
*Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”*  
*Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008*

mese di Febbraio, e valori massimi prossimi ai 27° C, ottenuti per il mese di Agosto. La variabilità spaziale della temperatura superficiale media mensile è bassa e inferiore a 1.5° C con valori superiori nelle aree costiere caratterizzate da minore profondità e inferiori in prossimità delle bocche di connessione con il mare aperto e nelle aree centrali dove la profondità è superiore ai 10 metri.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

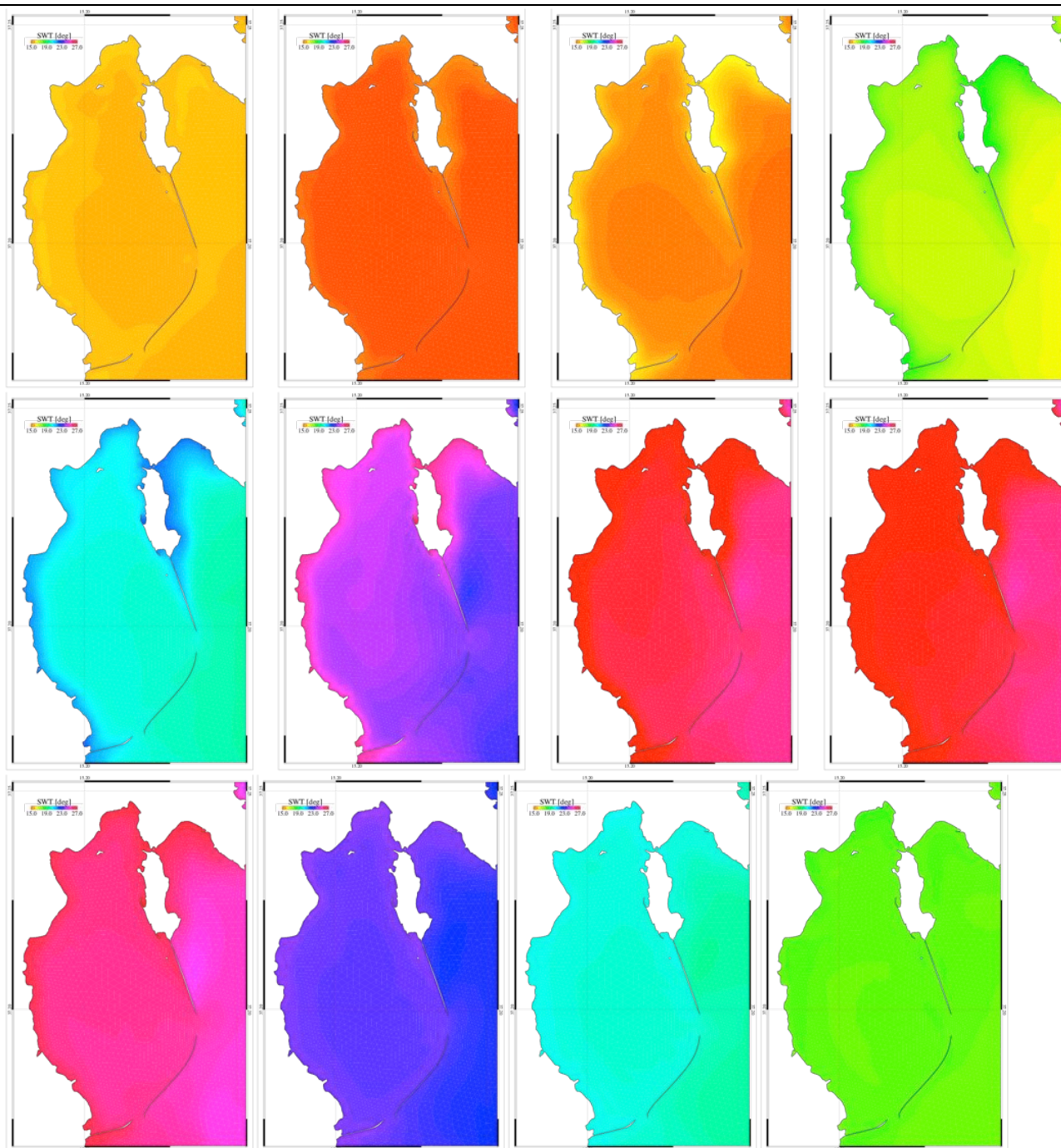


Figura 7: Distribuzione spaziale dei campi medi mensili della temperatura superficiale dell'acqua. Da sinistra verso destra, dall'alto in basso, si susseguono i diversi mesi dell'anno da Gennaio a Dicembre



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

Per quanto riguarda la risposta della circolazione nel bacino portuale all'azione dei venti, sono stati analizzati i campi di moto istantanei in corrispondenza di diversi regimi di vento. Nella fattispecie sono stati considerati diversi periodi dell'anno 2015 caratterizzati da eventi di Maestrale, Scirocco e Grecale d'intensità e direzione variabile.

In Figura 8 sono riportate le velocità della corrente superficiale (pannelli di sinistra) e mediata sulla colonna d'acqua (pannelli di destra) nella rada di Augusta, indotta da un vento di Maestrale (pannelli superiori) e Scirocco (pannelli inferiori) di intensità medio-alta corrispondente a 7.2 m/s e 6.6 m/s rispettivamente.

Nel caso del Maestrale la corrente superficiale è generalmente diretta verso Sud con intensità medie dell'ordine dei 7 cm/s. Un'intensificazione del flusso si registra lungo la costa e in corrispondenza dei moli esterni orientali, dove valori anche superiori ai 20 cm/s caratterizzano la velocità delle correnti litoranee. L'azione del vento porta ad un deflusso superficiale delle acque di rada principalmente attraverso la bocca meridionale dove l'azione del vento di maestrale genera un gradiente di livello superficiale che crea una corrente di deflusso diretta in verso opposto al vento stesso. Analizzando la corrente media verticale (pannello superiore destro di Figura 9) si nota come la dinamica di circolazione sia analoga a quella superficiale con intensificazioni del flusso lungo la costa e i moli foranei e una corrente generalmente d'intensità inferiore nelle aree centrali. Tuttavia, la circolazione barotropica differisce da quella superficiale per la presenza di un dipolo generato dal gradiente di pressione Sud-Nord indotto dall'azione di trascinamento del vento che genera un flusso settentrionale di direzione opposta a quella del Maestrale.

Contrariamente al caso di Maestrale, la corrente superficiale indotta da un vento di Scirocco di circa 7 m/s è generalmente diretta verso Nord-Est con intensità medie inferiori dei 10 cm/s (pannello superiore sinistro di Figura 9). Analogamente al caso precedente, il flusso si intensifica lungo la costa e in corrispondenza del molo meridionale, dove valori anche superiori ai 20 cm/s caratterizzano la velocità delle correnti superficiali. Il deflusso superficiale delle acque di rada principalmente avviene attraverso la bocca orientale con conseguente entrata delle acque di origine costiera attraverso il canale meridionale. Analizzando la corrente media verticale (pannello superiore destro di Figura 9) si nota anche in questo caso una similitudine con il flusso superficiale



investiamo nel vostro futuro



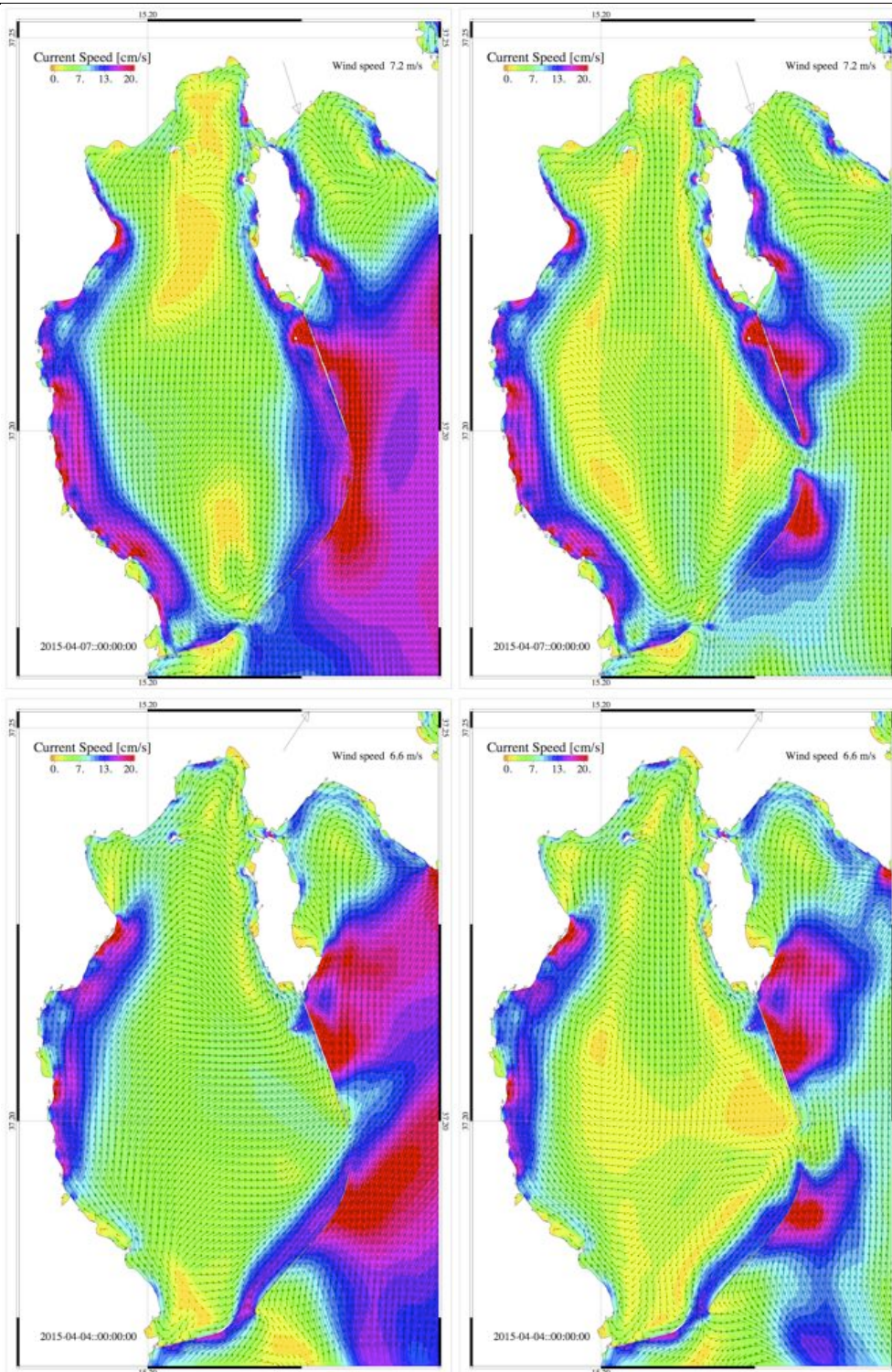
*P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008*

per quanto riguarda la presenza d'intensificazioni della corrente lungo la costa e i moli foranei e riduzioni della stessa nelle aree centrali del bacino. La struttura della circolazione barotropica è caratterizzata da un flusso centrale diretto verso Sud che genera diverse celle di circolazione lungo i bordi del bacino portuale.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008





*Figura 8: Distribuzione spaziale dei campi istantanei di corrente superficiale (pannelli di sinistra) e barotropica (pannelli di destra) indotta da un vento di Maestrale (pannelli superiori) e Scirocco (pannelli inferiori) di intensità medio-alta.*

Per gli stessi regimi di maestrale e scirocco sono stati analizzati i campi di moto indotti da venti d'intensità simile ai precedenti ma direzioni leggermente diverse. Nella fattispecie, in Figura 9 sono riportate le velocità della corrente superficiale (pannelli di sinistra) e mediata sulla colonna d'acqua (pannelli di destra) indotte da un vento di Maestrale con direzione Ovest Nord-Ovest (pannelli superiori) e Scirocco con direzione Ovest Sud-Ovest (pannelli inferiori). Come si nota, una variazione di direzione dei venti, sebbene appartenenti agli stessi quadranti dei precedenti induce una variazione della struttura di circolazione sia superficiale che barotropica nelle acque portuali. In particolare, per il caso di Maestrale, l'azione del vento induce la generazione di un flusso superficiale diretto verso Sud-Est nella parte centrale e meridionale del bacino con intensità della corrente variabili da pochi cm/s fino a valori superiori ai 20 cm/s. Nella parte settentrionale la circolazione superficiale indotta dal vento è di bassa intensità e variabile in direzione. L'analisi della corrente barotropica (pannello superiore destro di Figura 9) rivela in questo caso la presenza di almeno tre strutture di circolazione indotte dalla combinazione degli attriti superficiali e dei gradienti di pressione. Si notano, infatti, una cella ciclonica centrale e due periferiche a Nord e a Sud di quest'ultima con direzioni di rotazione opposte. Come per il caso precedente, le masse d'acqua esterne entrano attraverso il canale orientale e defluiscono attraverso il canale meridionale. Considerando lo Scirocco con direzione Ovest Sud-Ovest la struttura di circolazione da esso creata è del tutto simmetrica a quella precedentemente descritta ovvero caratterizzata da un flusso superficiale principalmente diretto verso Nord-Est nelle aree centrali e meridionali con intensificazioni fino ai 20 cm/s lungo i bordi del bacino portuale (pannello inferiore sinistro di Figura 9). Anche in questo caso, la parte settentrionale della rada è caratterizzata da una dinamica di circolazione di bassa intensità e direzione della corrente variabile. Considerando la circolazione barotropica (pannello inferiore destro di Figura 9), si nota la presenza della cella centrale, in questo caso caratterizzata da rotazione oraria, e delle due celle periferiche a Nord e a Sud di quest'ultima





investiamo nel vostro futuro



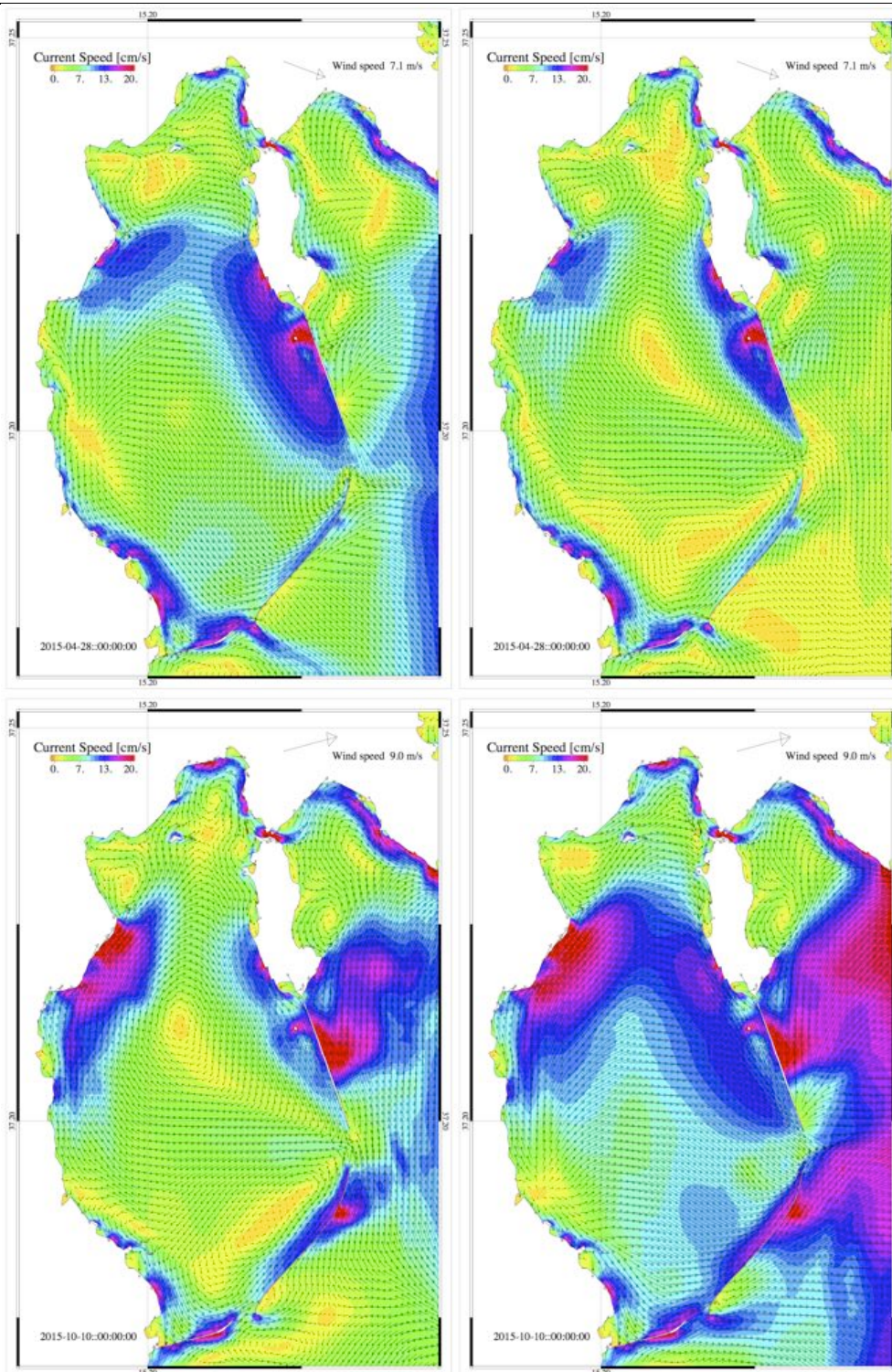
*P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008*

con direzioni di rotazione opposte. Contrariamente al caso precedente, le masse d'acqua esterne entrano attraverso il canale meridionale e defluiscono attraverso il canale orientale.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008





*Figura 9: Distribuzione spaziale dei campi istantanei di corrente superficiale (pannelli di sinistra) e barotropica (pannelli di destra) indotta da un vento di Maestrale (pannelli superiori) e Scirocco (pannelli inferiori) di intensità medio-alta e con direzioni diverse dalle precedenti.*

Per gli stessi regimi di maestrale e scirocco sono stati analizzati i campi di moto indotti da venti d'intensità bassa e direzioni simili a quelle dei casi di Figura 9. In Figura 10 sono riportate le velocità della corrente superficiale (pannelli di sinistra) e mediata sulla colonna d'acqua (pannelli di destra) indotte da un vento di Maestrale (pannelli superiori) e Scirocco (pannelli inferiori) di intensità pari a 3 m/s e 1.6 m/s.

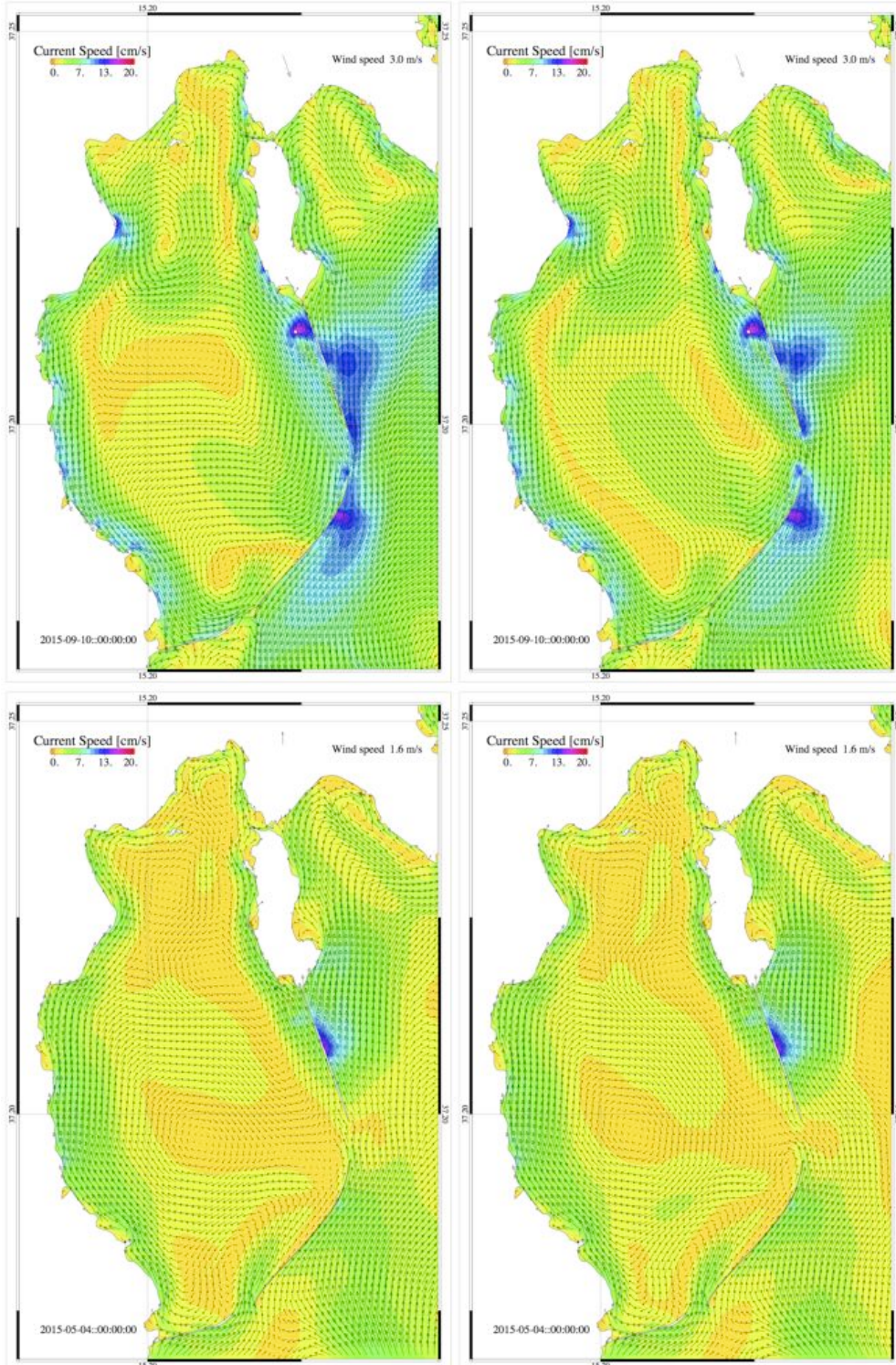
Nel caso del Maestrale la corrente superficiale presenta un'intensità media inferiore ai 10 cm/s e una direzione non omogenea con la presenza di diverse celle di circolazione (pannello superiore sinistro di Figura 10). Un'intensificazione del flusso si registra lungo la costa e in corrispondenza dei moli esterni orientali, dove valori anche superiori ai 10 cm/s caratterizzano la velocità delle correnti litoranee. Il deflusso superficiale delle acque di rada avviene principalmente attraverso la bocca meridionale in prossimità della quale l'azione del vento genera una cella di circolazione antioraria. Analizzando la corrente media verticale (pannello superiore destro di Figura 10) si nota come la dinamica di circolazione sia analoga a quella superficiale con intensificazioni del flusso lungo la costa e i moli foranei e una corrente generalmente d'intensità inferiore nelle aree centrali. Anche in questo caso si nota la presenza di strutture cicloniche e anticicloniche in tutta l'area portuale.

Nel caso di un vento di Scirocco di bassa intensità circa 2 m/s la circolazione delle acque superficiali e profonde è del tutto analoga come dimostrato dai pannelli inferiori sinistro e destro. Sono presenti diverse strutture cicloniche e anticicloniche in tutto il dominio d'indagine con un'intensità della corrente generalmente non superiore ai 7 cm/s e, analogamente ai casi precedenti, caratterizzata da intensificazioni lungo la costa e in corrispondenza dei moli. Il deflusso superficiale delle acque di rada avviene attraverso la bocca orientale con conseguente entrata delle acque di origine costiera attraverso il canale meridionale. Analizzando la corrente media verticale (pannello inferiore destro di Figura 10) si nota l'analogia con il flusso superficiale.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008





*Figura 10: Distribuzione spaziale dei campi istantanei di corrente superficiale (pannelli di sinistra) e barotropica (pannelli di destra) indotta da un vento di Maestrale (pannelli superiori) e Scirocco (pannelli inferiori) di bassa intensità e con direzioni diverse dalle precedenti.*

In Figura 11 sono riportate le velocità della corrente superficiale (pannelli di sinistra) e mediata sulla colonna d'acqua (pannelli di destra) nella rada di Augusta indotta da un vento di Grecale di intensità pari a 7.7 m/s (pannelli superiori) e di intensità pari a 4.6 m/s (pannelli inferiori).

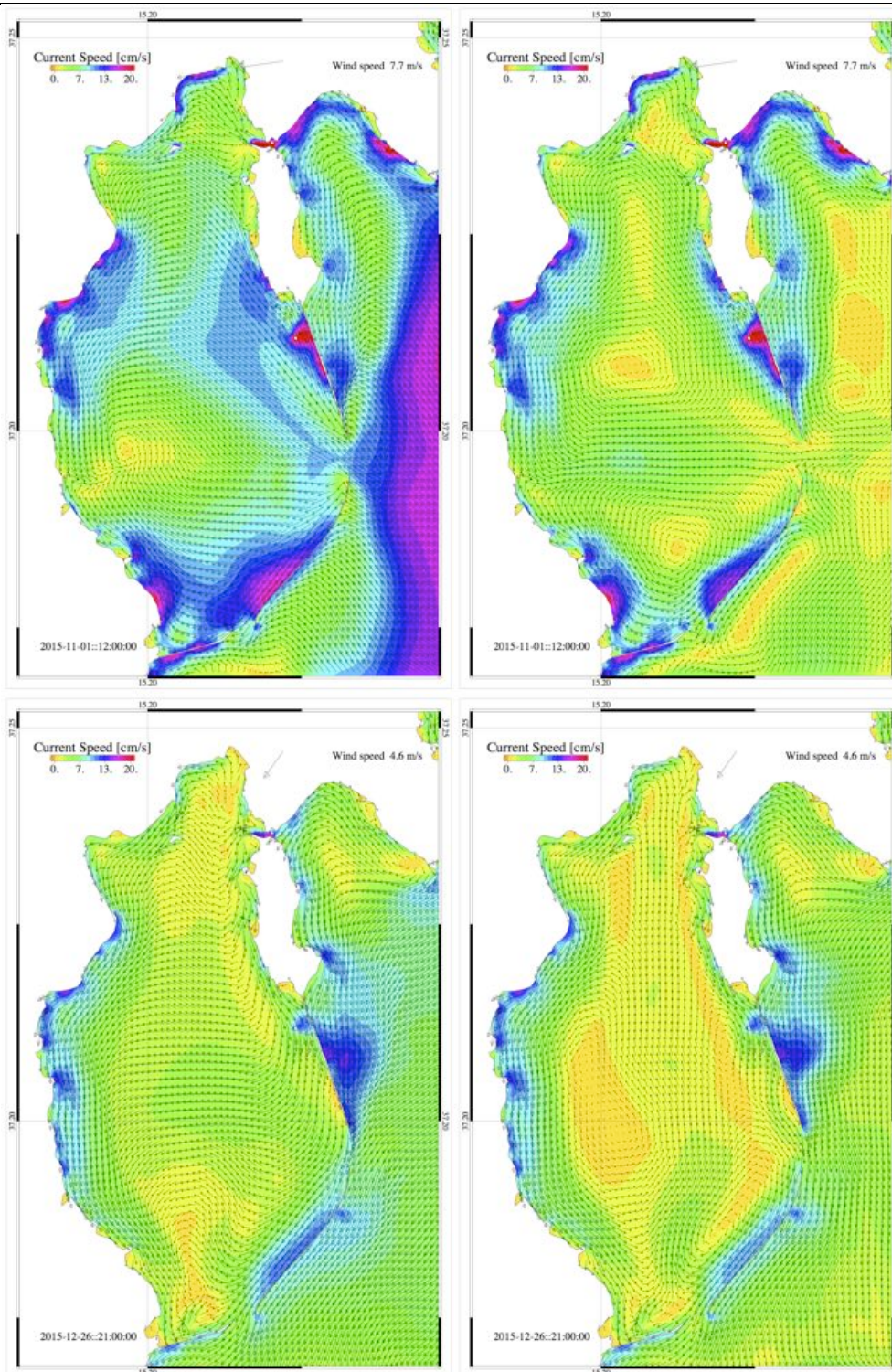
Nel caso del grecale di medio-alta intensità (pannelli superiori di Figura 11) la corrente superficiale è caratterizzata da intensità medie dell'ordine dei 10 cm/s con intensificazione del flusso lungo la costa e in corrispondenza dei moli esterni orientali, dove valori anche superiori ai 20 cm/s caratterizzano la velocità delle correnti litoranee. L'azione del vento genera un flusso diretto verso ovest nella maggior parte del bacino con rotazioni della direzione indotte dalla presenza dei moli foranei e della linea di riva. Il deflusso superficiale avviene tramite entrata delle acque attraverso il molo orientale e conseguente uscita attraverso il canale meridionale. Per quanto riguarda la circolazione mediata lungo la colonna d'acqua (pannello superiore destro di Figura 11), l'azione del vento genera un flusso medio verticale superficiale caratterizzato da una cella di circolazione con rotazione antioraria ed intensificazione delle velocità lungo la costa e i moli.

Nel caso del Grecale di media intensità (pannelli inferiori di Figura 11) la corrente superficiale è caratterizzata da intensità medie dell'ordine dei 7 cm/s con intensificazione del flusso lungo la costa e in corrispondenza dei moli esterni orientali. L'azione del vento anche in questo caso genera un flusso diretto verso ovest nella maggior parte del bacino con conseguente entrata delle acque attraverso il molo orientale ed uscita attraverso il canale meridionale. Per quanto riguarda la circolazione mediata lungo la colonna d'acqua (pannello inferiore destro di Figura 11), l'azione del vento genera un flusso medio verticale superficiale caratterizzato da una cella di circolazione principale con rotazione antioraria e altre strutture sia cicloniche che anticicloniche di ridotta estensione in corrispondenza dei moli orientali.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008





*Figura 11: Distribuzione spaziale dei campi istantanei di corrente superficiale (pannelli di sinistra) e barotropica (pannelli di destra) indotta da un vento di Grecale con intensità medio-alta (pannelli superiori) e intensità media (pannelli inferiori).*

## 5.2 TRASPORTO DI SOSTANZE INQUINANTI

Al fine di individuare le aree costiere e di mare aperto potenzialmente soggette ad impatti di sostanze inquinanti provenienti dalla rada di Augusta sono state effettuate delle simulazioni idrodinamiche accoppiate circolazione e trasporto utilizzando il modulo euleriano descritto nel paragrafo 3.2.

In particolare, utilizzando i dati ambientali e le parametrizzazioni descritte nei paragrafi 4.1 e 4.2 è stata simulata la dispersione di un tracciante passivo rilasciato nelle acque della rada di Augusta durante l'intero anno 2015. Ad ogni istante di simulazione, la concentrazione del tracciante nelle acque del porto è stata posta pari a 100 ed è stata riprodotta in tal modo la sua diluizione e dispersione ad opera delle correnti. Dai risultati delle simulazioni numeriche è stata quindi calcolata la distribuzione media mensile della concentrazione del tracciante nel dominio di indagine al fine di valutare l'influenza delle acque di rada nelle adiacenti aree costiere.

In Figura 12 si riportano le distribuzioni medie mensili della concentrazione superficiale del tracciante ottenuta mediante le procedure precedentemente descritte. La distribuzione del tracciante indica che le masse d'acqua di origine portuale defluiscono verso Nord e verso Sud accumulandosi principalmente in prossimità dell'area di Priolo e a ridosso del Capo di Santa Croce laddove la circolazione residuale (si veda paragrafo 5.1) è caratterizzata da celle di circolazione di tipo stazionario. I risultati dimostrano come la presenza della corrente costiera meridionale di origine Ionica riduce il trasporto del tracciante in direzione Nord oltre Capo Santa Croce, mentre ne favorisce l'accumulo nell'area antistante il molo orientale. In particolare, nei mesi dell'anno in cui questo flusso è particolarmente intenso (quali Gennaio, Marzo e Dicembre -si veda Figura 7), la conseguente intensificazione della cella inerziale da esso generata, aumenta la concentrazione del

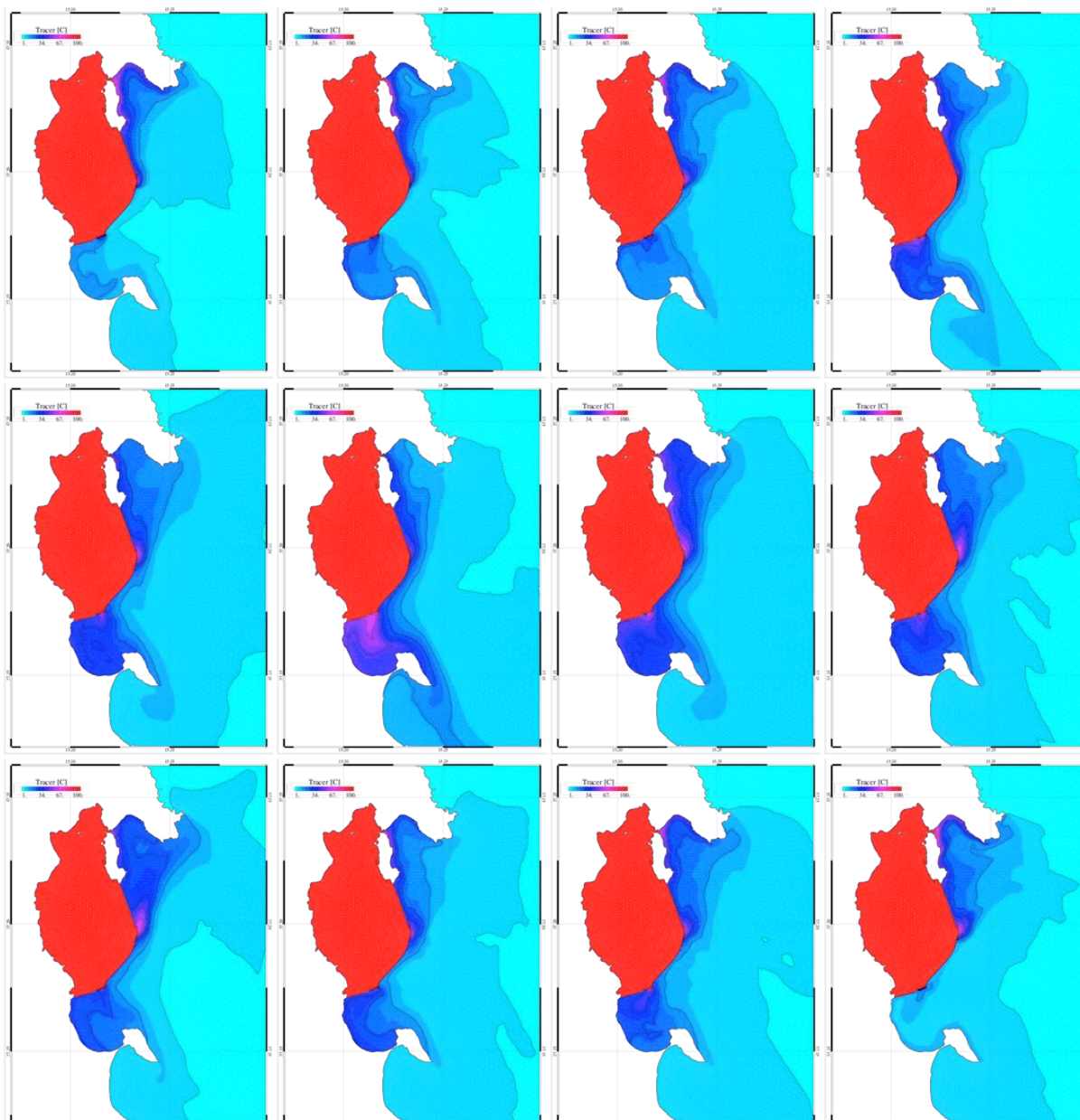


investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

tracciante nelle aree a ridosso del Capo Santa Croce e ne riduce la presenza nell'area costiera meridionale. Contrariamente, durante i mesi estivi e autunnali si registra un aumento della concentrazione nelle aree meridionali in corrispondenza del tratto di costa antistante Priolo.







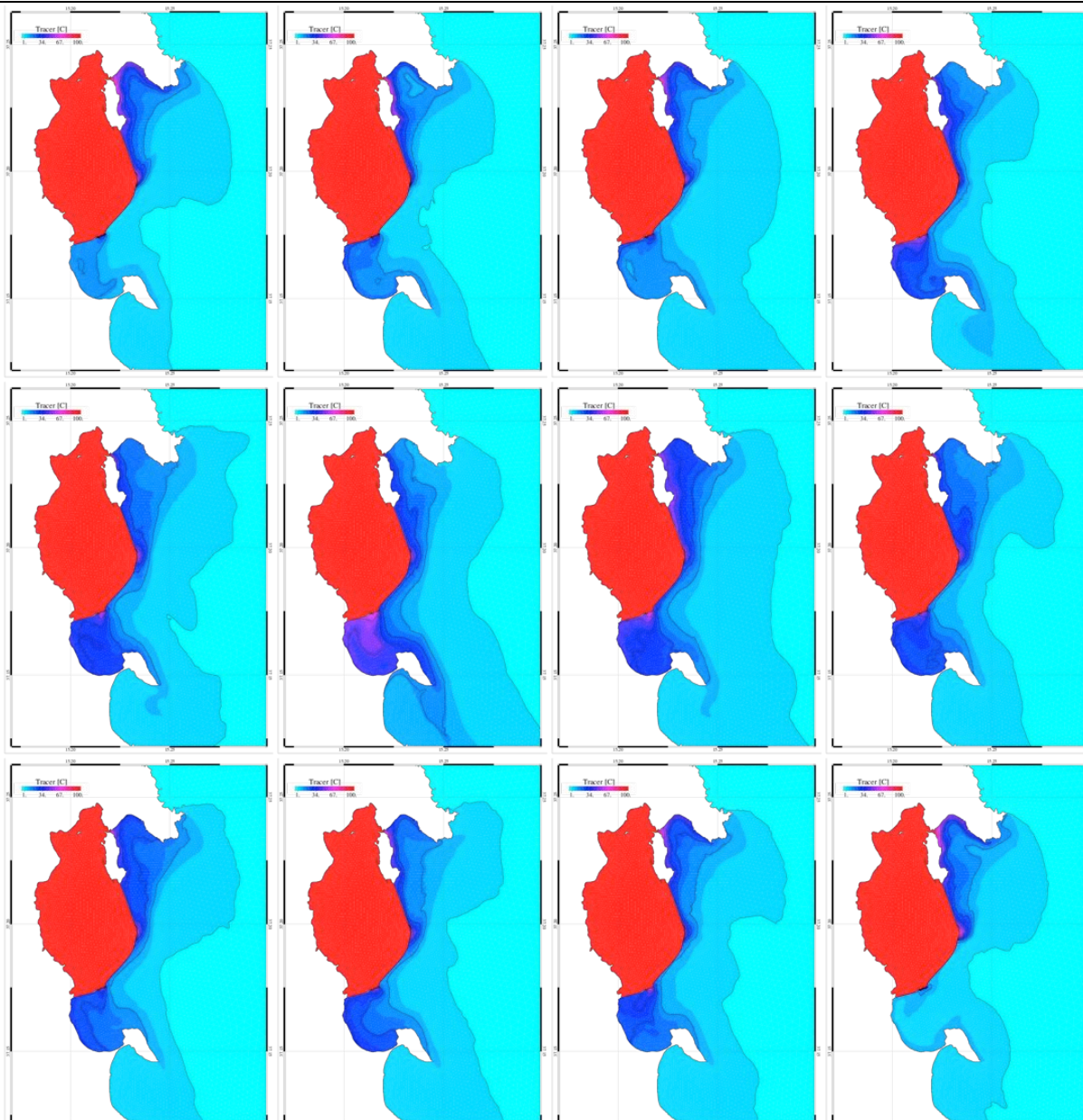
*Figura 12: Distribuzione spaziale dei campi medi mensili della concentrazione superficiale del tracciante passivo rilasciato all'interno del perimetro dell'area portuale di Augusta. Da sinistra verso destra, dall'alto in basso, si susseguono i diversi mesi dell'anno da Gennaio a Dicembre.*

Analogamente, le medie mensili delle concentrazioni mediate lungo la colonna d'acqua, presentano andamenti simili a quelle superficiali (si veda Figura 13). In particolare, durante i mesi caratterizzati da una intensificazione della corrente costiera esterna, si registra la riduzione dell'area di influenza delle acque portuali nella parte meridionale del dominio di indagine. Contrariamente, nei periodi estivo autunnali, la concentrazione media del tracciante passivo risulta essere elevata anche nelle aree meridionali, in corrispondenza del tratto di costa antistante l'abitato di Priolo.

investiamo nel vostro futuro



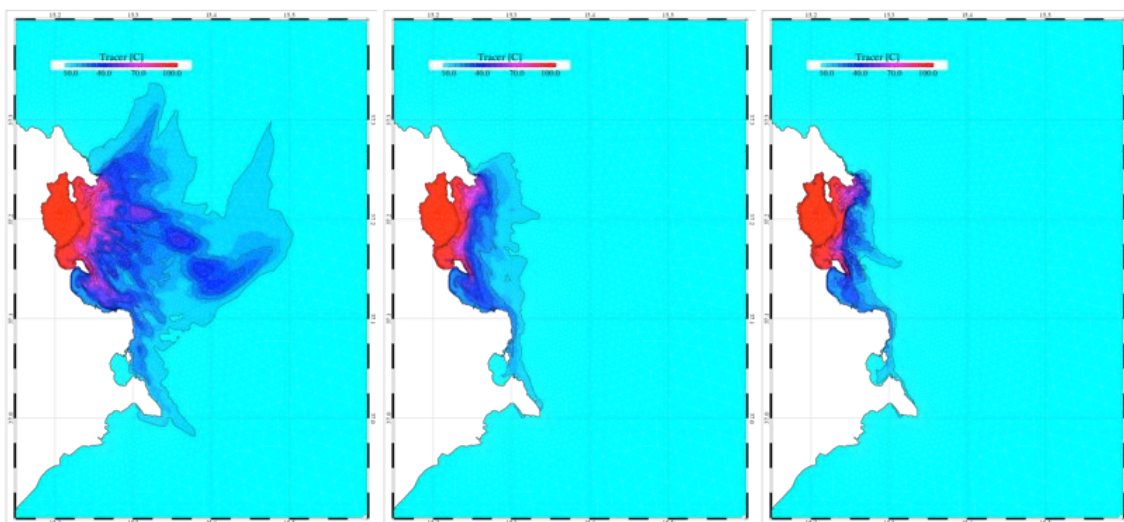
P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



*Figura 13: Distribuzione spaziale dei campi mensili della concentrazione media verticale del tracciante passivo rilasciato all'interno del perimetro dell'area portuale di Augusta. Da sinistra verso destra, dall'alto in basso, si susseguono i diversi mesi dell'anno da Gennaio a Dicembre.*

Si considerano infine le distribuzioni dei valori massimi di concentrazioni calcolati alla superficie, al fondo e lungo tutta la colonna d'acque per l'intero anno simulato (si veda Figura 14). Come si

nota dal pannello di sinistra, la concentrazione superficiale raggiunge valori elevati su un areale di elevata estensione che comprende l'intero arco costiero meridionale e un tratto di mare esterno fino a circa 30 km dalla costa. Contrariamente, le distribuzioni media lungo la colonna d'acqua e al fondo (pannelli centrale e sinistro di Figura 14) sono caratterizzate da valori medio alti unicamente nell'area più prossima alla rada di Augusta e lungo il tratto di costa a Sud di quest'ultima.



*Figura 14: Distribuzione spaziale dei campi dei valori massimi di concentrazione calcolata durante tutto l'anno di simulazione per lo strato superficiale, mediata lungo la colonna d'acqua e al fondo.*

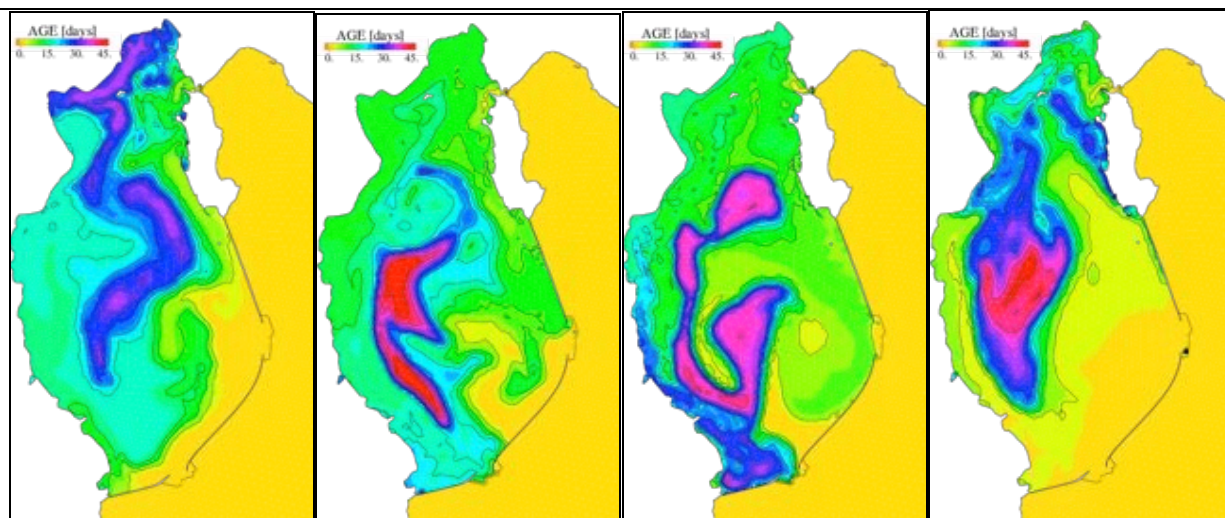
L'ultima analisi effettuata riguarda la stima dei tempi di residenza delle acque all'interno della rada di Augusta mediante la stima del parametro di Age. Questo parametro permette di calcolare il tempo passato dal momento in cui una particella numerica, rappresentativa di un predeterminato volume d'acqua, entra all'interno della rada fino al momento in cui ne esce. Tale parametro è stato calcolato per l'intero anno di simulazione permettendo di effettuare un'analisi della variabilità spaziale e temporale dell'età delle masse d'acqua all'interno del porto. In Figura 15 sono riportati alcuni esempi di distribuzione dell'età delle acque superficiali all'interno della rada. Come si nota i tempi variano tra poche ore in prossimità delle bocche a più di 45 giorni per le aree centrali del porto. La variabilità dell'età dipende dalle maree e dalle condizioni meteomarine.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
 Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



*Figura 15: Distribuzione spaziale dell'età delle masse d'acqua superficiali nella rada di Augusta ottenuta dai risultati del modello per 4 periodi diversi.*

## 6. MISURE SPERIMENTALI

Le analisi oceanografiche prevedono la descrizione della circolazione delle acque superficiali nell'area d'indagine attraverso attività sperimentali sul campo. L'esposizione della baia di Augusta è stata valutata sulla base di prodotti modellistici derivati dal centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine –ECMWF. La baia presenta episodi di vento tipicamente provenienti da Nord-Ovest e di intensità raramente maggiori 8 m/s. Simili valori di intensità del vento si trovano nel quadrante di Nord-Est e nel quadrante di Sud-Est seppure quest'ultimo mostri frequenze di occorrenza inferiori.

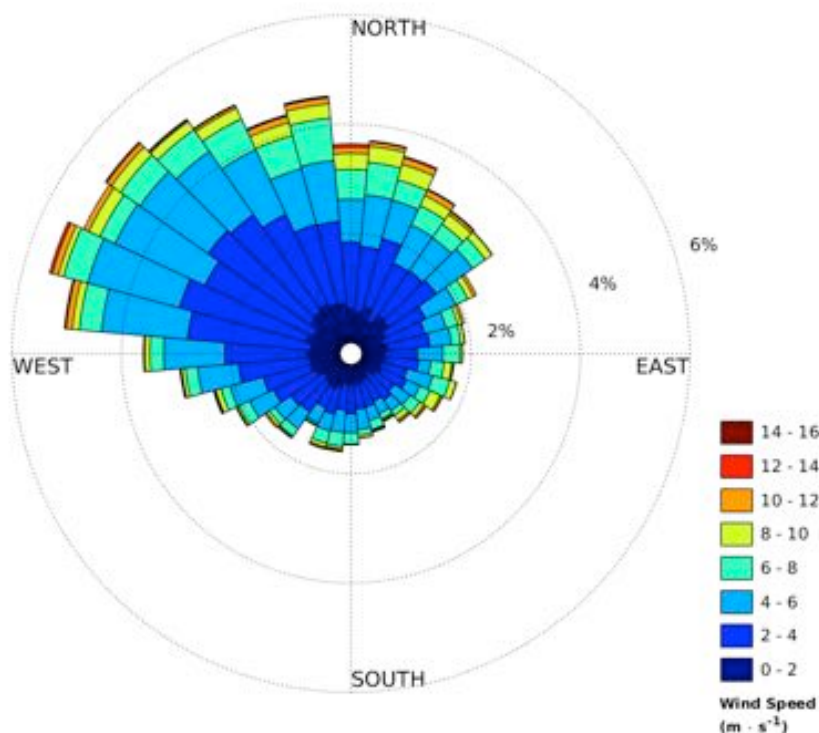
I prodotti modellistici utilizzati per questa analisi sono denominati ERAInterim, presentano una risoluzione spaziale originale di circa 80 km ed includono assimilazione di osservazioni attraverso metodo variazionale a 4 dimensioni. In Figura 17 mostriamo la statistica degli eventi nel punto di Latitudine 37.1869 °N e Longitudine 15.2489 °E, posizionato poco all'esterno della baia di Augusta, per il periodo di tempo compreso tra l'anno 2011 e 2017. Si tratta di dati della velocità del vento a 10 metri sul livello del mare con frequenza di 6 ore.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



*Figura 16. Rosa dei venti ottenuta da Modellistica Atmosferica ECMWF. Prodotti ERAInterim di risoluzione spaziale pari ad 80 km, relativa all'intervallo di tempo tra gli anni 2011 e 2017. Frequenza pari a 6 ore (00:00; 06:00; 12:00; 18:00), interpolata nel punto di Latitudine e Longitudine rispettivamente pari a 37.1869 °N e 15.2489 °E.*

## 6.1 STRUMENTI DI MISURA

Per le misure correntometriche vengono utilizzate delle boe alla deriva dette Drifter che permettono la descrizione della corrente sub superficiale all'interno ed all'esterno della rada di Augusta. I Drifter utilizzati sono i Coastal Nomad B della società spagnola SouthTEKSensing Technologies S.L. (vedi Figura 17). Sono strumenti pratici e robusti che incorporano i più recenti progressi della tecnologia di posizionamento e di comunicazione con tracciamento GPS e trasmissione GSM che consentono una determinazione precisa delle correnti marine e una comunicazione integrata tramite il World Wide Web da dove è possibile settare le boe e verificare la loro posizione in tempo reale nonché scaricare i dati in diversi formati. I Drifter sono di colore giallo, di dimensione



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

720x220x220 mm (HxLxP) e del peso di 2.895 Kg. Al di sotto di ogni Drifter è collegata una piccola “vela” di plastica o ancora galleggiante di colore nero per ridurre l’effetto di trascinamento del vento, che agisce sulla parte emersa, in favore del trasporto dovuto alla corrente sub-superficiale.



*Figura 17. Uno dei drifter utilizzati nelle tre fasi: in nave, al lancio, in mare.*

## 6.2 IMBARCAZIONI DI SUPPORTO

Le indagini in campo si sono avvalse del supporto della nave oceanografica N/O MINERVA UNO della SO.PRO.MAR. S.p.A. in affitto al CNR (Figura 18). La nave oceanografica MINERVA UNO (lunghezza F.T. 46.60 m; larghezza F.O. 9 m; immersione media 3 m; displacemento 700 t; figura 2) si colloca per dimensioni tra le principali imbarcazioni da ricerca europee operanti nel Mar Mediterraneo. La versatilità, assicurata dalla dotazione nautiche e dalle apparecchiature scientifiche, atte a condurre indagini dei vari ambiti tematici delle scienze del mare, è basata sull’adozione di un sistema modulare di diversi laboratori mobili che integrano quelli fissi



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



Figura 18. La N/O MINERVA

### 6.3 MISURE DI CORRENTE

La Figura 19 mostra le traiettorie seguite dai difter nel corso degli esperimenti e dunque la copertura spaziale delle analisi di correntometria lagrangiana effettuate all'interno dell'area di indagine, nel periodo compreso tra il 19 ed il 22 Ottobre 2017. Complessivamente sono stati rilasciati otto drifter, due all'esterno, due in prossimità degli ingressi e quattro all'interno della rada di Augusta. Il campionamento delle posizioni dei drifter è stato impostato con una frequenza di 5 minuti, allo scopo di avere una risoluzione spaziale compresa tra i 10 ed i 20 m, lungo le traiettorie. In fase successiva al campionamento, attraverso l'elaborazione dei dati è stata calcolata la velocità della boa che permette la rappresentazione della velocità della corrente in uno strato d'acqua pari a circa **2 metri**. Le informazioni su inizio e fine dei rilasci dei drifter sono elencate in Tabella 1:

ID Drifter	Inizio traiettoria	Fine traiettoria	Posizione
LCA 75	21.10.2017 10:00:00	21.10.2017 14:10:00	Interna alla rada
LCA 75b	21.10.2017 23:30:00	22.10.2017 08:00:00	Interna alla rada
LCA 76	21.10.2017 12:00:00	21.10.2017 16:10:00	Interna alla rada
LCA 112	20.10.2017 11:10:00	20.10.2017 11:30:00	Ingresso rada
LCA 116	20.10.2017 11:30:00	20.10.2017 12:20:00	Ingresso rada
LCA 116b	21.10.2017 08:10:00	22.10.2017 07:45:00	Interna alla rada
LCA 124	20.10.2017 10:55:00	20.10.2017 14:45:00	Esterna alla rada
LCA 128	21.10.2017 10:30:00	22.10.2017 07:20:00	Esterna alla rada

Tab. 1: periodi e aree di misurazione delle velocità lagrangiane

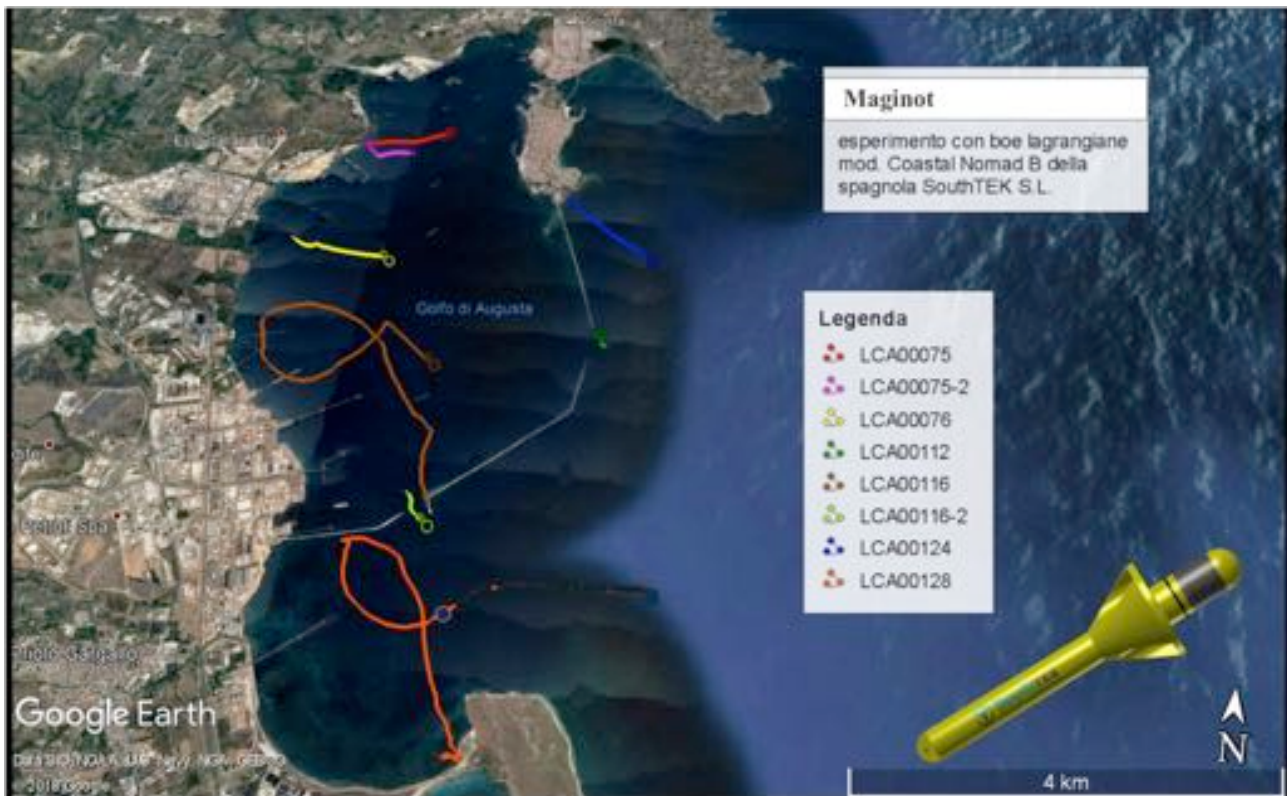


Figura 19: Copertura spaziale delle indagini e traiettoria dei drifter.

Su tutta l'area d'indagine, gli esperimenti di idrodinamica sul campo hanno permesso di rappresentare le principali caratteristiche della corrente.

Le misure di corrente effettuate nell'area di indagine interna alla rada mostrano valori massimi di 0.2 m/s (vedi Figure 20 e 21) e minimi prossimi a 0.01 m/s tipicamente riscontrati durante le ore notturne (vedi Figura 22). Massimi di velocità sono riscontrati in prossimità dei canali di ingresso della rada di Augusta (Figure 26 e 27) mentre non esistono differenze sostanziali tra i rilievi della velocità media riscontrata all'interno ed all'esterno della rada.

Le Figure 23 e 25 mostrano le velocità derivate dai tracciati drifter più lunghi, quasi 24 ore per ogni drifter, il primo interno ed il secondo esterno alla rada. Da queste immagini è possibile evidenziare gli effetti della marea semidiurna e dell'intensità del vento sull'intensità ed il comportamento della corrente osservata, composta dalla modulazione di un segnale a bassa e di un segnale a più alta





investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

frequenza. Per le stesse traiettorie, relative ad i drifter LCA116b ed LCA128, le figure 28 e 29 mostrano i grafici a dispersione delle singole componenti, zonali e meridionali delle velocità della corrente. Queste permettono di evidenziare la rotazione della corrente per effetto delle componenti mareali che agiscono nella zona

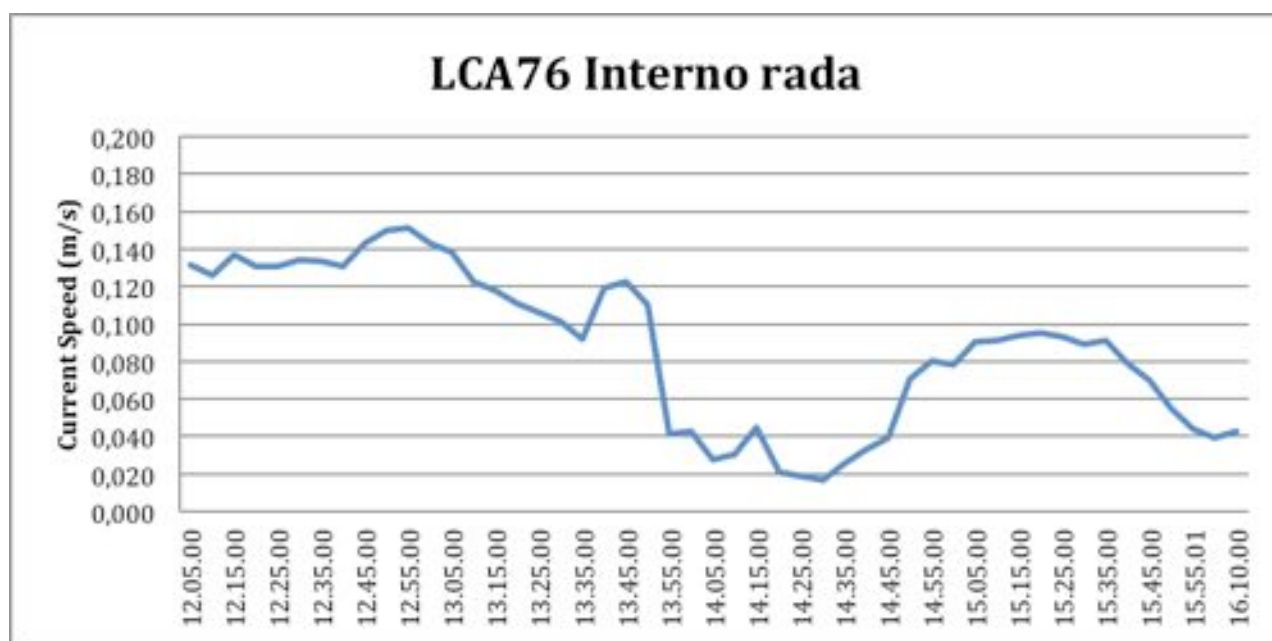


Figura 20. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA76 tra le ore 12:00 e le ore 16:10 del 21 Ottobre 2017.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

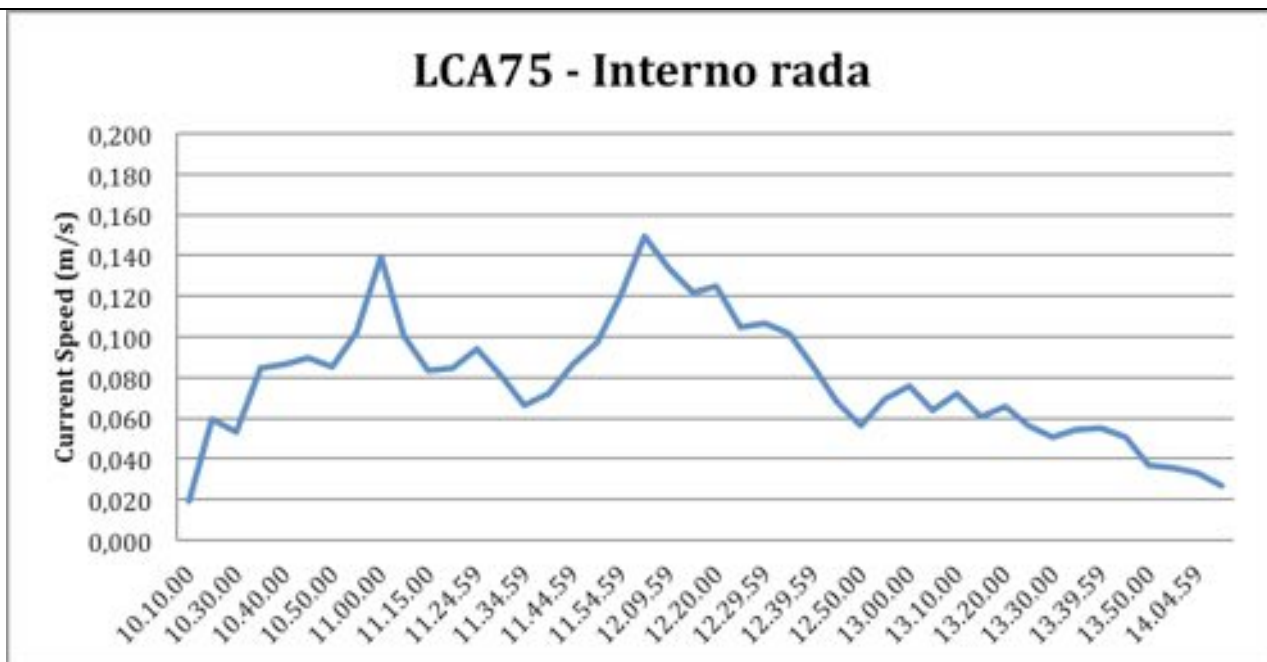
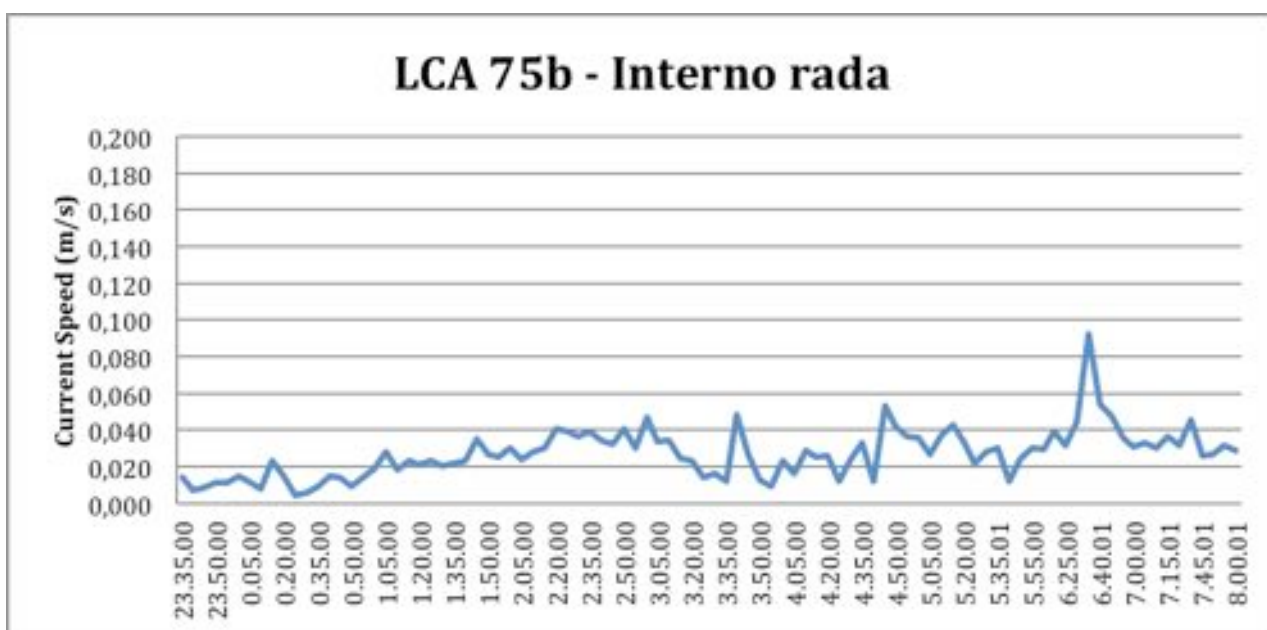


Figura 21. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA75 tra le ore 10:10 e le ore 14:10 del 21 Ottobre 2017.





investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

Figura 22. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA75btra le ore 23:30 del 21 Ottobre 2017 e le ore 08:00 del 22 Ottobre 2017.

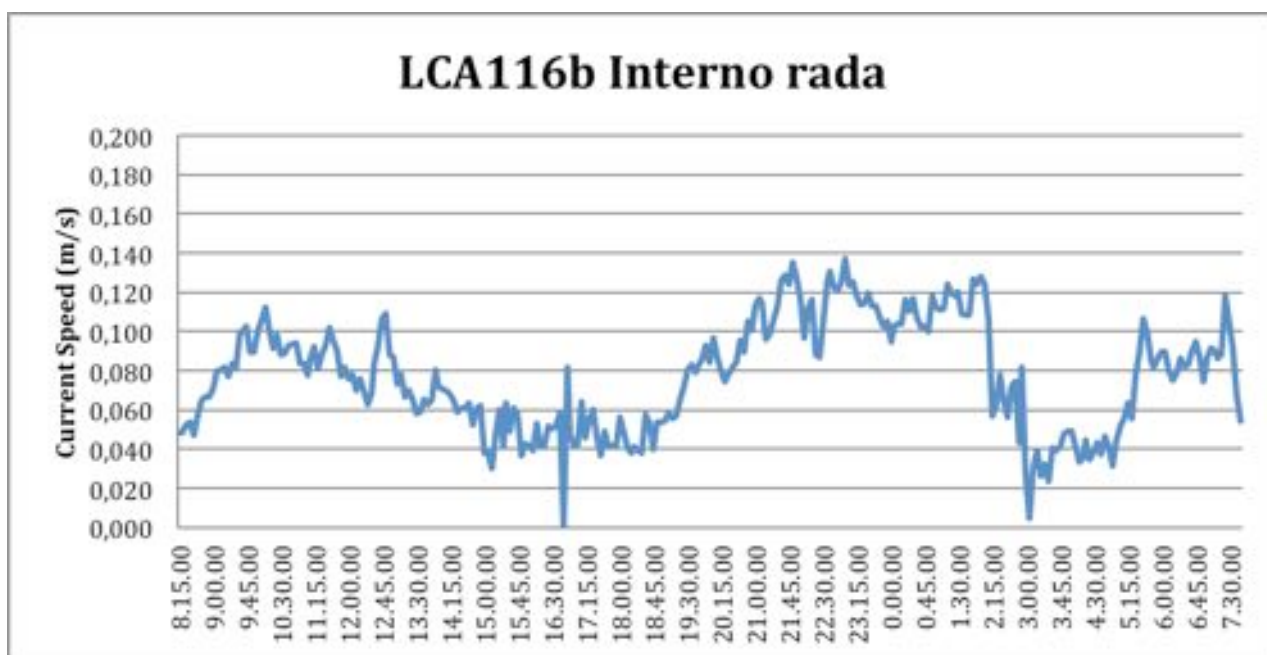


Figura 23. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA116b tra le ore 08:15 del 21 Ottobre 2017 e le ore 07:45 del 22 Ottobre 2017.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008



Figura24. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA124 tra le ore 10:55 e le ore 14:45 del 20 Ottobre 2017.



Figura 25. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA128 tra le ore 10:30 del 20 Ottobre 2017 e le ore 07:20 del 21 Ottobre 2017.



investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

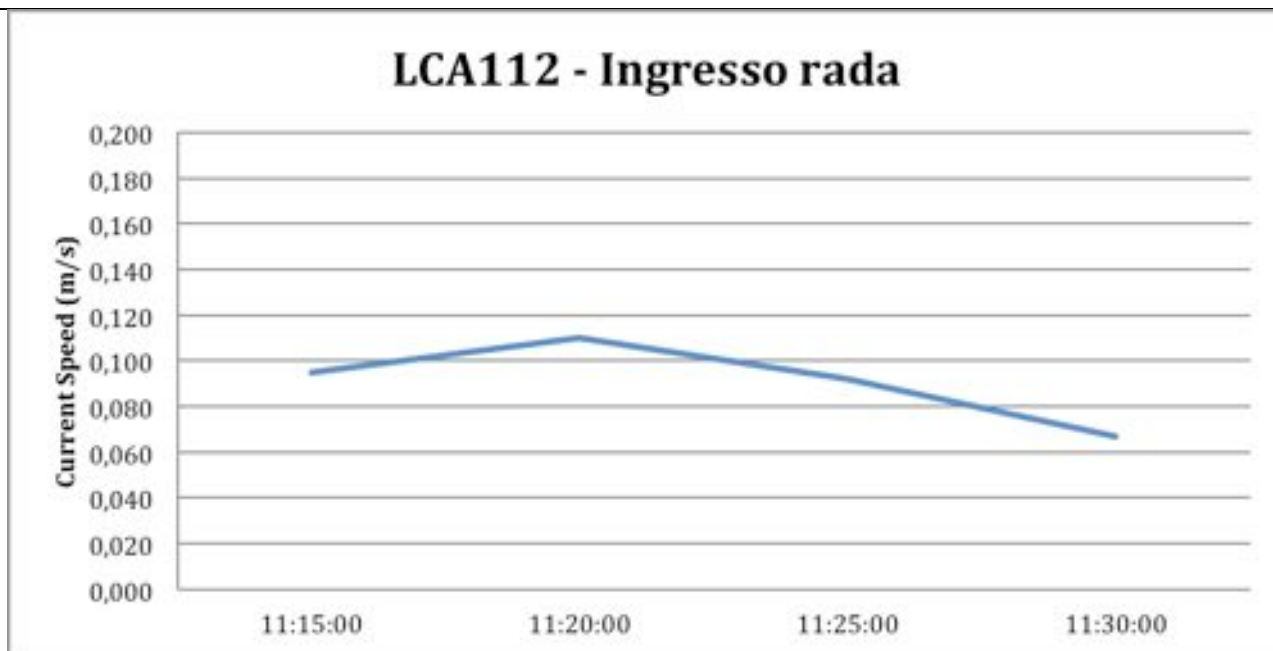


Figura 26. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA112btra le ore 11:15 e le ore 11:30 del 20 Ottobre 2017.

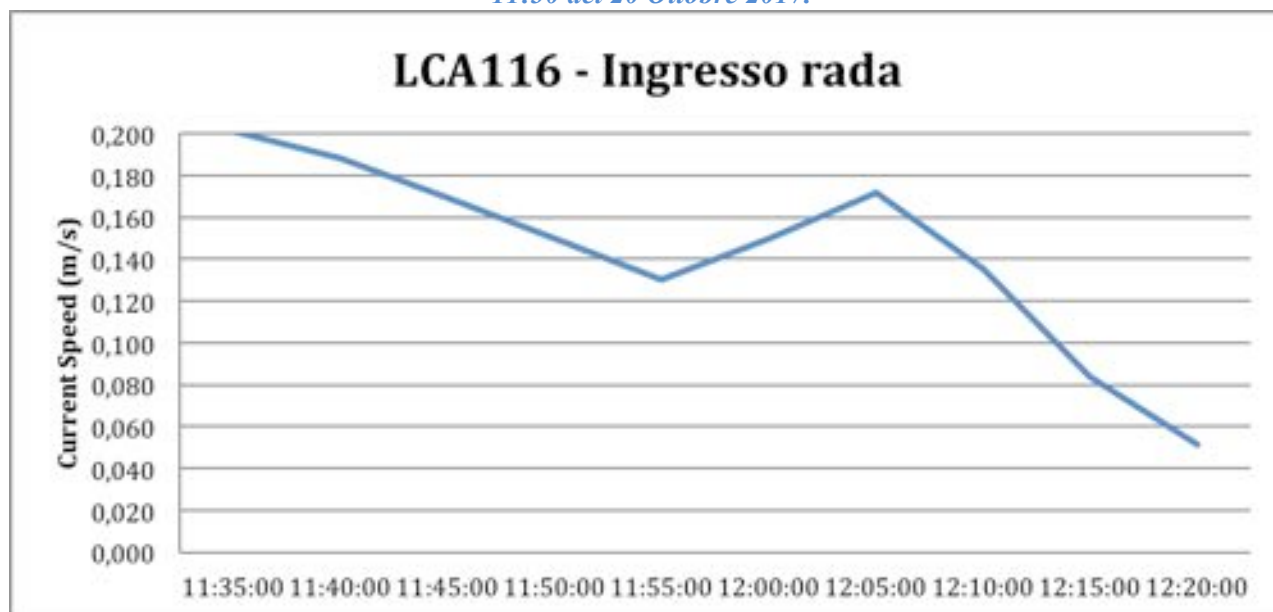


Figura 27. Serie temporale della corrente registrata attraverso il drifter LCA116 tra le ore 11:35 e le ore 12:20 del 20 Ottobre 2017.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

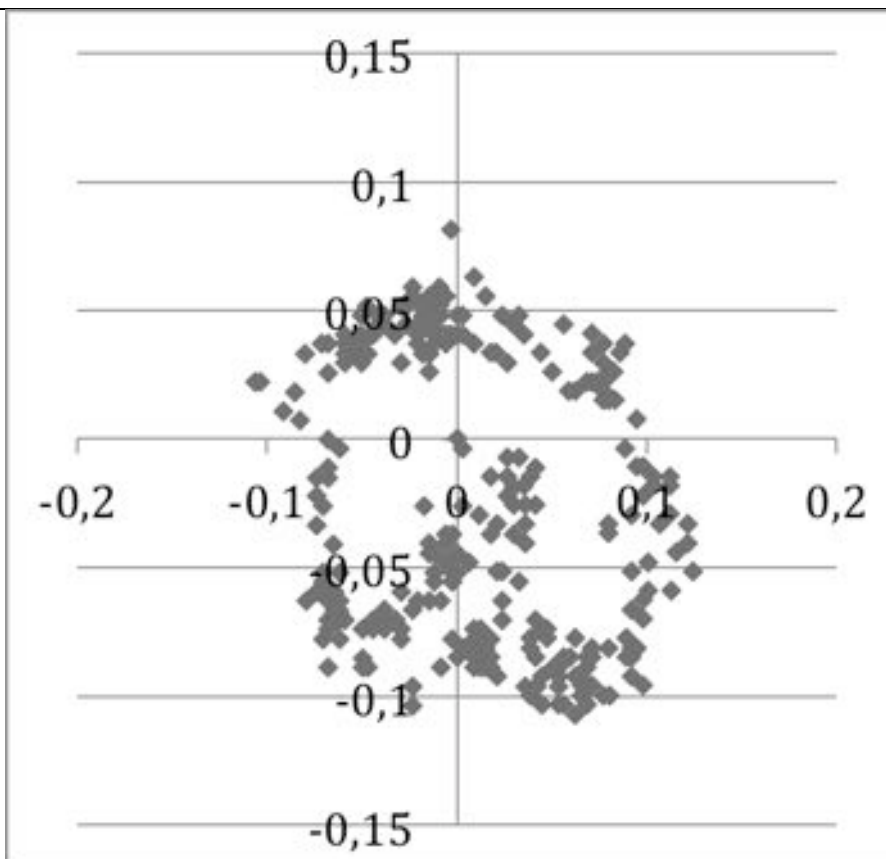


Figura 28. Rotazione della corrente per effetto della marea. Drifter LCA116b. Assi coordinati in m/s.

investiamo nel vostro futuro



P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008

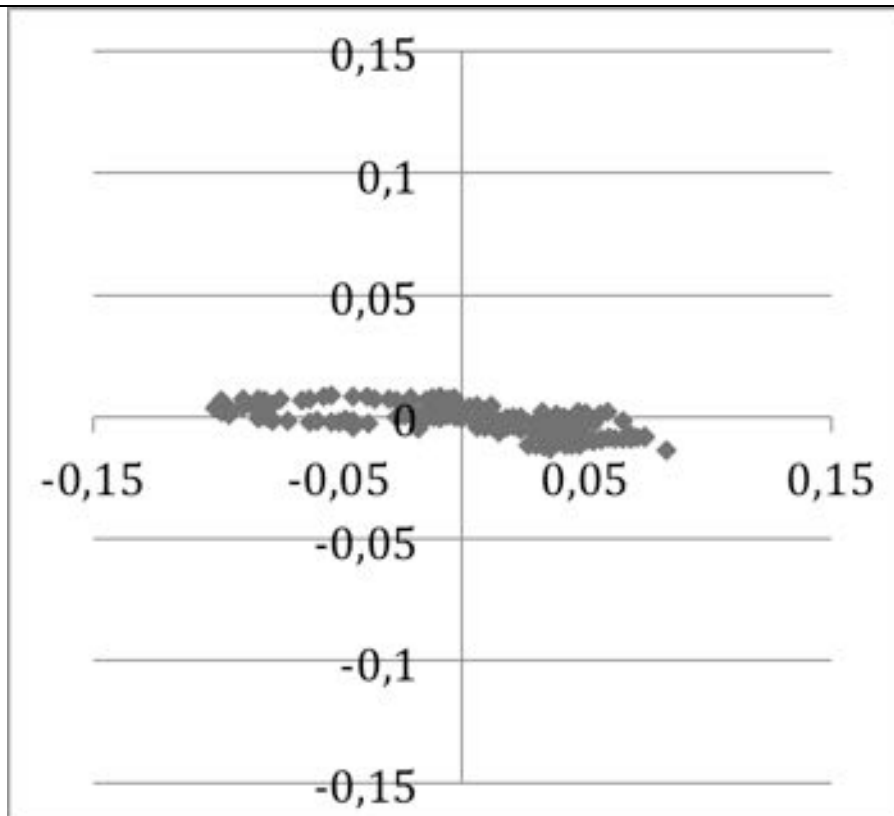


Figura 29. Rotazione della corrente per effetto della marea. Drifter LCA128. Assi coordinati in m/s.

I rilievi oceanografici effettuati in Ottobre 2017 e le simulazioni numeriche della dinamica oceanografica hanno permesso la descrizione dell'idrodinamica di tutta l'area d'investigazione, riportando informazioni riguardanti gli strati superficiali sia i più profondi.

## Bibliografia

Burchard, H., Petersen, O., 1999. Models of turbulence in the marine environment — a comparative study of two-equation turbulence models. *J. Mar. Syst.* 21, 29–53. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00004-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00004-4)

Cucco, A., Quattrocchi, G., Olita, A., Fazioli, L., Ribotti, A., Sinerchia, M., ... Sorgente, R. (2016). Hydrodynamic modelling of coastal seas: the role of tidal dynamics in the Messina Strait, Western Mediterranean Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 1553–1569.

Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Canu, D.M., Solidoro, C., 2009. Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin. *Ecol. Modell.* 220, 913–922. doi:[10.1016/j.ecolmodel.2009.01.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.01.008)

De Marchis, M., Freni, G., & Napoli, E. (2014). Three-dimensional numerical simulations on wind- and tide-induced currents: The case of Augusta Harbour (Italy). *Computers & Geosciences*, 72, 65–75.



investiamo nel vostro futuro



*P.O.N. RICERCA E COMPETITIVITÀ 2007-2013 – Azione II “Interventi di sostegno alla ricerca industriale”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309 - MAGINOT Sistema Integrato per il Monitoraggio e la Tutela dell'Ambiente Urbano, Extraurbano e Marino”  
Progetto di Ricerca PON01\_02309/1 - CUP B34B14000430008*

Dobricic, S., and N. Pinardi, 2008: An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme, *Ocean Modelling*, 22, 89-105.

Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems* 51 (1-4), 123-145.