

Atti del X Convegno  
Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia

13 novembre 2010  
Marano Lagunare (UD)

**evento**

[www.umfvg.org](http://www.umfvg.org)

ISSN 1827 3858

Photo courtesy Steve Castle—Penarth, Wales, UK



# evento

## **Atti del X Convegno di meteorologia del Friuli Venezia Giulia**

Supplemento alla rivista "Meteorologica"  
ISSN 1827 3858

**13 novembre 2010  
Sala Convegni "Vecchia Pescheria"  
Marano Lagunare (UD)**

Pubblicazione realizzata da  
**Unione Meteorologica Friuli Venezia Giulia**

Convegno realizzato da  
**Unione Meteorologica Friuli Venezia Giulia**

con il patrocinio ed il contributo di  
**Comune di Marano Lagunare (UD)**





## **ORGANIGRAMMA UMFVG**

### **Presidente**

Renato R. Colucci

### **Consiglieri**

Laura Feudale, Furio Pieri, Arturo Pucillo, Marco Virgilio

### **Amministrazione**

#### Responsabile contabile

Pietro Cicuttini

### **Ufficio stampa**

#### Responsabile contatti con i media

Barbara Pernar

#### Coordinamento Convegni e supervisione scientifica

Fabio Pagan

### **Sito web**

#### Web master

Riccardo Sluga

### **Rivista "Meteorologica"**

#### Direttore Responsabile

Marco Virgilio

#### Capo redazione

Renato R. Colucci

#### Redazione

Massimo Ongaro, Fulvio Crisciani, Fabio Raicich, Angelo Tavoschi, Rodolfo Gratton, Gianfranco Mazzilli, Marco Fancello, Franco Stravisi, Pietro Cicuttini, Guido Guidi, Tanja Cegnar, Franz Stockinger, Johan Kerchman, Fulvio Stel, Dario Giaiotti

#### Segreteria

Dario Giaiotti, Fulvio Stel, Ester Colizza

### **Gruppo Escursioni ed Attività Meteo—G.E.A.M.**

#### Responsabile

Luca Pravisano

#### Membri

Monica Decata, Francesca Geatti, Paolo Minen, Ester Scaini, Paolo Grabar, Giulio Tagliapietra

**Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia—ONLUS**

Sede Legale, via Silvio Pellico n.9

33043 Cividale del Friuli (UD)

P.I. e C.F. 02150490304

**[www.umfvg.org](http://www.umfvg.org)**

Raccolta, organizzazione testi ed immagini ed impaginazione, a cura di  
Renato R. Colucci

*Un sentito ringraziamento*

*a tutti i soci UMFVG che hanno collaborato alla realizzazione  
di questo convegno*

*alla Giunta del Comune di Marano Lagunare, ed in particolare  
al Sindaco dott. Mario Cepile, per aver appoggiato e supportato  
l'iniziativa*

*A tutti i relatori, anima di questo convegno, per la loro  
professionalità e disponibilità*

*Gli autori degli articoli pubblicati si assumono la responsabilità  
personale per l'eventuale uso di materiale coperto da copyright*

In copertina: una centrale eolica nel Wales (UK) - foto Steve Castle

## Indice

---

- Una ventata di energia** **Pag. 9**  
*Pro e contro per la produzione di energia eolica nel Friuli Venezia Giulia*  
*(Fulvio Stel, Dario Giaiotti)*
- L'acqua batte dove il vento vuole** **Pag. 24**  
*Vento e livello marino nell'Adriatico settentrionale*  
*(Fabio Raicich)*
- Una vita nel vento** **Pag. 32**  
*di Chiara Calligaris, velista e geologo ricercatore*  
*(Chiara Calligaris)*
- Bora di ieri, Bora di oggi** **Pag. 39**  
*2000 anni raccontati dal più famoso vento triestino*  
*(Renato Roberto Colucci, Arturo Pucillo)*
- Venti extraterrestri** **Pag. 50**  
*Il vento su pianeti ed esopianeti*  
*(Mauro Messerotti )*
- Venti negli abissi** **Pag. 58**  
*L'effetto del vento sui fondali del Mediterraneo:  
l'esempio del sud Adriatico.*  
*(Fabio Trincardi)*



## Una ventata di energia

Pro e contro per la produzione di energia eolica in Friuli Venezia Giulia

**Dario B. Giaiotti<sup>(1,2)</sup>, Fulvio Stel<sup>(1,2)</sup>**

(1) ARPA FVG, CRMA — Centro Regionale di Modellistica Ambientale

(2) UMFVG — Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia

### CHE COS'È IL VENTO

Dal punto di vista dinamico, il vento è un movimento ordinato di aria dovuto alle differenze di pressione che si vengono a creare tra due punti distinti dell'atmosfera. In particolare, questo movimento ordinato si sviluppa partendo dal punto a maggior pressione verso il punto a minor pressione. Anche se ciò che genera il vento è la differenza di pressione, il movimento della massa d'aria è condizionato dall'interazione con l'orografia e, soprattutto a larga scala, è condizionato anche dalla rotazione terrestre. Dal punto di vista termodinamico, invece, il vento è il risultato della trasformazione dell'energia solare, sostanzialmente di natura elettromagnetica, in energia di movimento, detta anche cinetica. Secondo il mero bilancio energetico, questa trasformazione non risulta particolarmente efficiente. Infatti la quantità di energia cinetica prodotta per unità di energia solare che arriva sul terreno è bassa se confrontata con l'energia chimica immagazzinata dalle piante attraverso la fotosintesi.

Affrontando il tema dell'eolico, è utile dividere il vento in due diverse tipologie: quella del vento della larga scala (detto anche sinottico) e quella del vento locale. Il vento sinottico è quello che nasce a seguito delle differenze di

(1) In realtà il vento di caduta che si osserva nelle ore notturne in montagna non è direttamente collegato alla radiazione solare ma al raffreddamento differenziale che avviene tra il rilievo e la zona pianeggiante. Si può comunque ritenere che, senza il vento di brezza di montagna che riporta la massa d'aria in quota, il movimento di caduta non potrebbe avvenire.

Figura 1  
Stampa risalente al  
XIV secolo raffiguran-  
te un mulino a vento  
in Inghilterra.



pressione che si hanno a livello planetario (ad esempio gli alisei o il vento zonale) o per sistemi barici molto estesi (bassa d'Islanda). Il vento locale, invece, nasce a seguito di differenza di pressione connesse a peculiarità geografiche od orografiche. In questa tipologia di vento si annovera il vento delle brezze di mare o montagna e i venti orografici, cioè i venti che derivano dall'intensificazione del movimento delle masse d'aria a causa dei vincoli orografici. Poiché, solitamente, le differenze di pressione che originano i venti non sono molto grandi (alcune decine di hPa, da confrontarsi con la pressione media di 1013 hPa), i venti sinottici si manifestano solitamente con maggior vigore su superfici estese, sgombre da orografia e con basso attrito: tipicamente grandi pianure o distese d'acqua. I venti orografici, invece, si presentano solamente a ridosso di strette valli o aperture tra i rilievi e calano rapidamente di intensità all'aumentare della distanza dai rilievi.

### LE DIVERSE TIPOLOGIE DI GENERATORI EOLICI

Storicamente, la prima forma di utilizzo dell'energia cinetica del vento (detta anche energia eolica dal nome del dio greco dei venti) è certamente quella legata alla propulsione delle navi mediante le vele. Questa forma di utilizzo dell'energia eolica si perde tra le nebbie del passato anche se, solitamente, il primo utilizzo di questa forma di propulsione navale viene attribuito agli egizi (3200 anni a.C.). La prima citazione storica di un utilizzo non navale dell'energia eolica viene fatta risalire ad Erone d'Alessandria (ca. I secolo d.C.), il quale costruì una ruota mossa dal vento che

poteva essere utilizzata per far suonare un organo. Le prime notizie relative a veri e propri mulini a vento, invece, risalgono al VII secolo d.C. e vengono dal Sistan, una terra al confine tra Iran ed Afghanistan, dove questi dispositivi venivano utilizzati per pompare acqua e aiutare l'irrigazione dei campi. Le citazioni dei primi mulini a vento europei, invece, risalgono al X secolo (Figura 1), quando questi dispositivi hanno iniziato ad essere installati sia nell'Europa del nord per pompare acqua e nel Mediterraneo per portare l'acqua nelle saline. La grande diffusione dei mulini a vento in Olanda ebbe

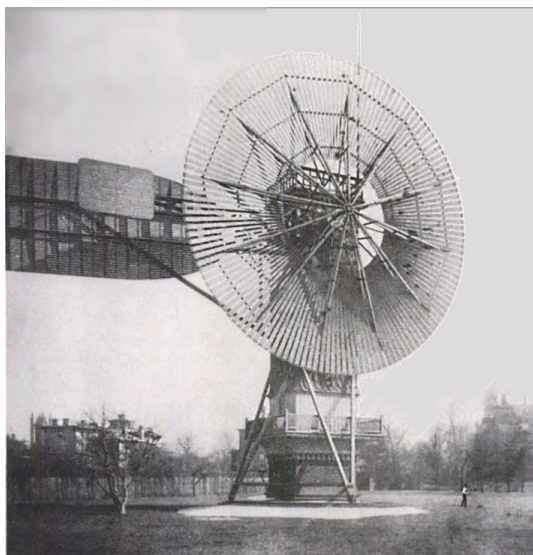


Figura 2  
Generatore eolico di Brush, installato  
a Cleveland, Ohio, nel 1888.

luogo con il XV e XVI secolo, periodo nel quale queste installazioni divennero il vero e proprio simbolo di quella terra. Bisogna invece aspettare sino alla fine del 1800 perché a qualcuno venisse in mente che i mulini a vento potevano essere collegati non solo ad una sorgente d'acqua, ma ad una dinamo, inventata proprio nel 1860 dal fisico italiano Pacinotti e perfezionata da Werner Siemens e Charles Weathstone (1867). In questo modo, l'energia eolica poteva direttamente essere convertita in energia elettrica sfruttando la legge di Faraday secondo la quale ogni variazione del flusso di campo magnetico attraverso una spira composta da un materiale conduttore produce una corrente elettrica. I pionieri di questa sperimentazione furono lo scienziato scozzese James Blythe (1887) che nel 1891 brevettò la sua idea, e lo statunitense Charles F. Brush, che nel 1886 utilizzò questi dispositivi per caricare delle batterie elettriche a Cleveland, Ohio, nel suo laboratorio (Figura 2), cedendo



*Figura 3*  
*Campo di sperimentazione eolica della NASA/DOE. Installato negli anni '80 ed attualmente ancora in funzione.*

il surplus di corrente alle vicine abitazioni (1886). Sempre in questi anni, lo scienziato Danese Paul La Cour utilizzò questi dispositivi per produrre energia elettrica e in seguito idrogeno, mediante un processo di elettrolisi, percorrendo in maniera inconsapevole i tempi e l'attuale ricerca di punta sull'immagazzinamento della corrente elettrica in energia chimica dell'idrogeno. Gli studi sull'eolico, comunque, rimasero a lungo un argomento di nicchia, rispolverato negli anni '70-'80 a seguito della prima crisi energetica mondiale. Negli anni '80, infatti, la NASA si dedicò, congiuntamente al Ministero dell'Energia, ad una ampia e strutturata campagna di sperimentazioni sull'eolico che portò, nel giro di pochi anni, a importanti perfezionamenti nella tecnica sia di costruzione dei generatori che della loro gestione ed installazione (Figura 3).



Sempre negli anni '80, la California, primo stato al mondo, finanziò anche la diffusione degli aerogeneratori con contributi destinati a coprire la ridotta remuneratività di questi dispositivi.

I moderni generatori eolici si possono distinguere in due tipologie: quella dei dispositivi che utilizzano la differenza di pressione che si viene a creare tra le diverse componenti del rotore, e quella dei dispositivi che utilizzano la differenza di attrito tra le diverse componenti del rotore.

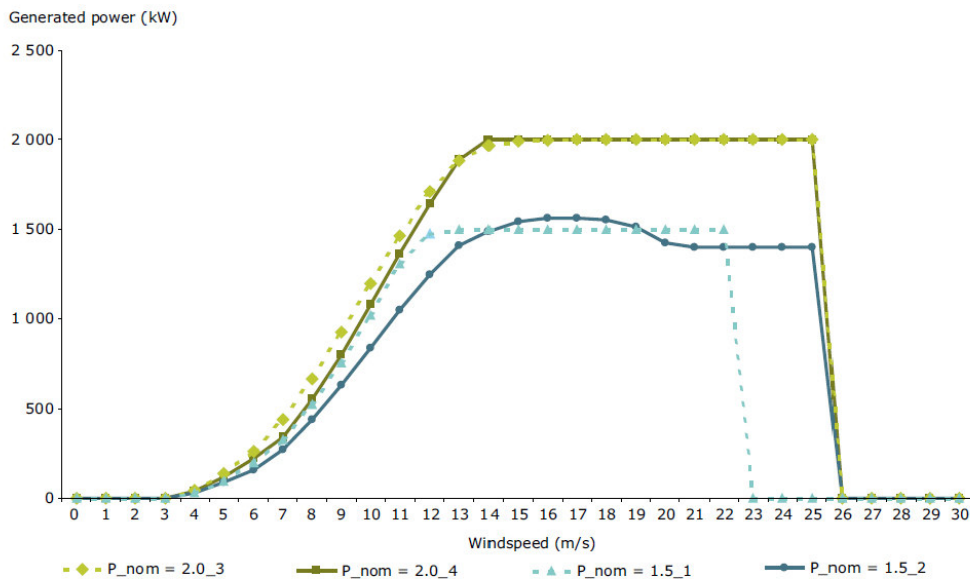
La prima tipologia è quella che annovera i generatori eolici a pale, sia verticali che orizzontali (Figura 4). Questo tipo di generatori è quello caratterizzato dalla maggiore efficienza nella produzione di energia elettrica a parità di vento. I generatori a pale orizzontali sono in tutto e per tutto dei motori aeronautici inversi, dove il movimento relativo del vento sull'elica produce la differenza di pressione necessaria a mettere in movimento l'elica, quindi la dinamo, producendo corrente elettrica. L'energia elettrica prodotta da questo tipo di generatori è funzione della velocità del vento. In particolare, la produzione di energia elettrica avviene solo quando il vento raggiunge velocità superiori ai 3-4 m/s (detta velocità di *cut-in*) e cresce rapidamente sino a raggiungere una sorta di massimo costante attorno ai 15 m/s. A questo punto, anche aumentando la velocità del vento, la produzione di energia



Figura 4  
Moderno campo eolico off-shore (installazione su specchio d'acqua) nel Mare del Nord.

elettrica non cresce più in maniera significativa. Quando la velocità raggiunge i 20-25 m/s (velocità di *cut-out*), inoltre, il sistema viene messo in sicurezza e non si ha più produzione di energia elettrica. La potenza massima nominale dell'aerogeneratore (Figura 4.1), che si raggiunge attorno ai 12-15 m/s, viene solitamente ridotta dal fatto che il vento può cambiare direzione pur mantenendo costante la velocità. Questo il motivo per il quale i punti migliori ove installare degli aerogeneratori sono anche quelli dove il vento, oltre che sostenuto, è anche mediamente costante in direzione.

Un tipo particolare di aerogeneratore che sfrutta la differenza di pressione tra le diverse componenti del rotore è rappresentato dai generatori ad asse verticale (detti anche "Macchine di Darrieus", dal nome dello scienziato Francese Georges Darrieus). Questi generatori (Figura 5) hanno il grande vantaggio di non dipendere dalle variazioni della direzione del vento proprio in virtù della loro simmetria verticale. Questo notevole vantaggio è però pagato attraverso una maggiore difficoltà di installazione e di progettazione e con un minor rendimento dovuto, in particolare, al fatto che gli aerogeneratori verticali ruotano più lentamente a parità di vento.



Source: Hoogwijk, 2008.

Figura 4.1

Curva di potenza per quattro diversi tipi di aerogeneratori ad asse verticale. Come si vede, la potenza prodotta cresce rapidamente sino a raggiungere un massimo intorno ai 10-15 m/s. La potenza ottenibile per velocità del vento inferiori a 3 m/s non risulta attualmente

L'efficienza di trasformazione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica per questo tipo di dispositivi ha attualmente raggiunto valori dell'ordine del 60-70% (per i generatori classici ad asse orizzontale), quindi molto alta. Pertanto non è ragionevole aspettarsi ulteriori grossi miglioramenti che, in definitiva, potrebbero derivare solo da una riduzione della massa del rotore, da una riduzione nel numero delle componenti dell'aerogeneratore o da un aumento delle sue dimensioni. Con questo tipo di efficienza, un impianto caratterizzato da una potenza nominale di 1.5 MW, assumendo un suo funzionamento per circa 2000 ore all'anno (circa

20% del tempo), con una velocità media del vento dell'ordine di 7-8 m/s si potrebbe ottenere una quantità di energia di ca. 0.7-0.9 GWh all'anno, equivalente al fabbisogno di un centinaio di famiglie (assumendo un consumo medio orario di 1 kW).

La seconda tipologia di aerogeneratori, annovera i dispositivi eolici a coppe o assimilabili. Questi dispositivi sfruttano la differenza di attrito che si viene a creare tra le diverse parti del rotore, con la conseguente creazione di un momento che fa ruotare il dispositivo. Questo tipo di dispositivi ha una resa molto bassa a parità di vento, anche se sono solitamente molto robusti e di facile costruzione. Questa tipologia di aerogeneratori, detti anche "macchine di Savonius" (dal nome dello scienziato Finlandese Sigurde Savonius),



*Figura 5*  
Generatore eolico ad asse verticale di Darrieus. Questo tipo di generatore non deve disporre di meccanismi per orientarsi lungo la linea di flusso del vento, ma presenta altre peculiarità che rendono la sua installazione più problematica di quella dei generatori ad asse orizzontale.

sono inoltre in grado di mettersi in movimento anche per piccole velocità del vento (Figura 6). Per questo motivo sono spesso usati in collegamento ad altri dispositivi meccanici, ad esempio per il pompaggio dell'acqua. Quasi tutti gli anemometri meccanici, cioè i dispositivi per la misura della velocità del vento, si basano su questo tipo di effetto, dato che per gli anemometri non è tanto importante l'efficienza nella trasformazione energetica, quanto la robustezza e la capacità di sentire anche i venti deboli. Dal punto di vista energetico, questo tipo di dispositivi, è particolarmente adatto ad impianti di piccole dimensioni, tipicamente per uso domestico ed a u t o p r o d u z i o n e dell'energia.

### **I VANTAGGI DELL'EOLICO**

Nonostante la trasformazione dell'energia solare in energia eolica non sia particolarmente efficiente, questa trasformazione risulta comunque vantaggiosa in quanto l'energia cinetica immagazzinata dal vento può essere direttamente trasformata in altra energia meccanica, come accade ad esempio nei mulini a vento o nelle navi a vela, o in energia elettrica, a sua volta facilmente trasportabile lontano dal punto di produzione e facilmente utilizzabile per i più disparati scopi. Il grande vantaggio dell'energia eolica, pertanto, è quello di non necessitare di ulteriori



*Figura 6*  
Generatore eolico di Savonius. Anche questo generatore, come tutti quelli ad asse verticale, non risente della direzione di provenienza del vento. Ha dei rendimenti mediamente più bassi dei generatori di Darrieus o a pale, ma si attiva con velocità minori del vento.

passaggi per poter essere utilizzata, come invece accade con l'energia chimica delle biomasse o dei combustibili fossili. L'energia chimica dei combustibili, infatti, per essere liberata deve necessariamente passare attraverso la combustione, con un inevitabile impatto ambientale dovuto al rilascio di sostanze più o meno inquinanti. L'energia eolica, pertanto, sia nel suo utilizzo meccanico (mulini a vento) che nel suo utilizzo per la produzione di energia elettrica (aerogeneratori) può considerarsi come sostanzialmente pulita e ad emissioni nulle di anidride carbonica, quindi ad impatto quasi nullo sul clima.

Un ulteriore aspetto importante dell'energia eolica è rappresentato dal fatto che essa, dipendendo direttamente dalla radiazione solare, rappresenta un flusso di energia grossomodo costante nel tempo (almeno per i prossimi 4.5 miliardi di anni). Questo significa che l'energia cinetica del vento viene costantemente rigenerata dal flusso di energia solare, indipendentemente dal fatto che sia o no utilizzata dall'uomo. Questo non può dirsi per l'energia derivante dai combustibili fossili (petrolio, carbone e metano) i quali rappresentano una sorta di serbatoio limitato, per quanto vasto, presente nel nostro pianeta grazie alla sua storia passata. Lo stesso vale per l'energia nucleare. Utilizzare i combustibili fossili, pertanto, significa intaccare l'eredità energetica presente nel pianeta, mentre utilizzare l'energia eolica significa attingere ad un flusso di energia che continuamente abbiamo a disposizione.

### **GLI SVANTAGGI DELL'EOLICO**

Benché i vantaggi dell'eolico, come sopra indicato siano molteplici, l'energia ottenuta dal vento presenta anche degli svantaggi. Il primo di questi svantaggi, connesso alla produzione di energia elettrica, è che solitamente il ciclo diurno di efficienza di questi dispositivi non è sempre in fase con la domanda di energia elettrica (Figura 7 e 8). Soprattutto per i generatori che utilizzano la componente di brezza del vento, il picco di produzione si colloca solitamente al mattino o nel tardo pomeriggio, mentre il picco di richieste di produzione elettrica si ha nella parte centrale della giornata. I generatori eolici, pertanto, a differenza di quanto accade con il fotovoltaico, solitamente producono più corrente nel momento in cui ne serve di meno.

Un ulteriore svantaggio dell'energia eolica è quello connesso con la rumorosità degli aerogeneratori. Questi dispositivi, infatti,

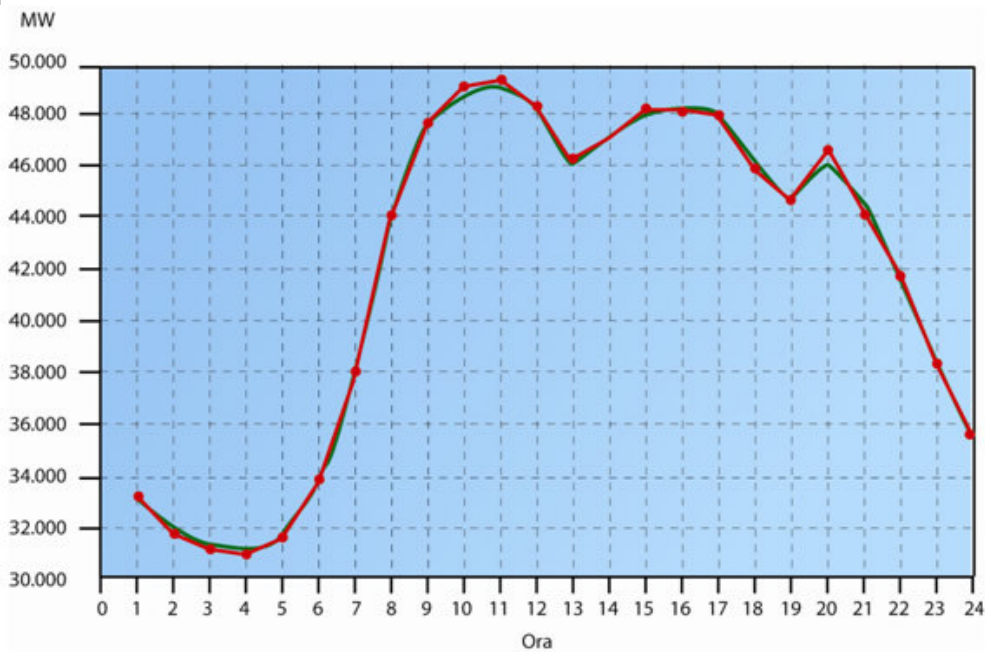


Figura 7  
Andamento medio orario della domanda di energia elettrica in Italia.

producono delle emissioni sonore rilevanti e tali da recare disturbo alla popolazione o agli animali. Per questo motivo, è opportuno che gli aerogeneratori vengano installati ad alcune centinaia di metri dalle abitazioni. Per quanto riguarda gli animali, inoltre, gli aerogeneratori, soprattutto se di grosse dimensioni, possono rappresentare un ulteriore pericolo per i volatili, in particolare per i volatili notturni. Va comunque ricordato che anche le normali abitazioni finestate, le vetture o i tralici e cavi degli elettrodotti rappresentano un analogo pericolo per i volatili ed anzi, proprio a causa della maggior presenza di abitazioni e vetture rispetto ai generatori eolici, queste rappresentano la principale causa di morte dei volatili. Si stima infatti che negli Stati Uniti solo lo 0.02 % dei volatili morti per collisione sia associabile ai generatori eolici. Ovviamente, qualora il posizionamento dei generatori eolici dovesse aver luogo nei pressi di aree popolate da specie animali protette, la loro pericolosità dovrà sicuramente essere presa in considerazione nella progettazione dell'impianto. Va comunque ricordato che sia l'impatto acustico che sui volatili diminuisce rapidamente con le

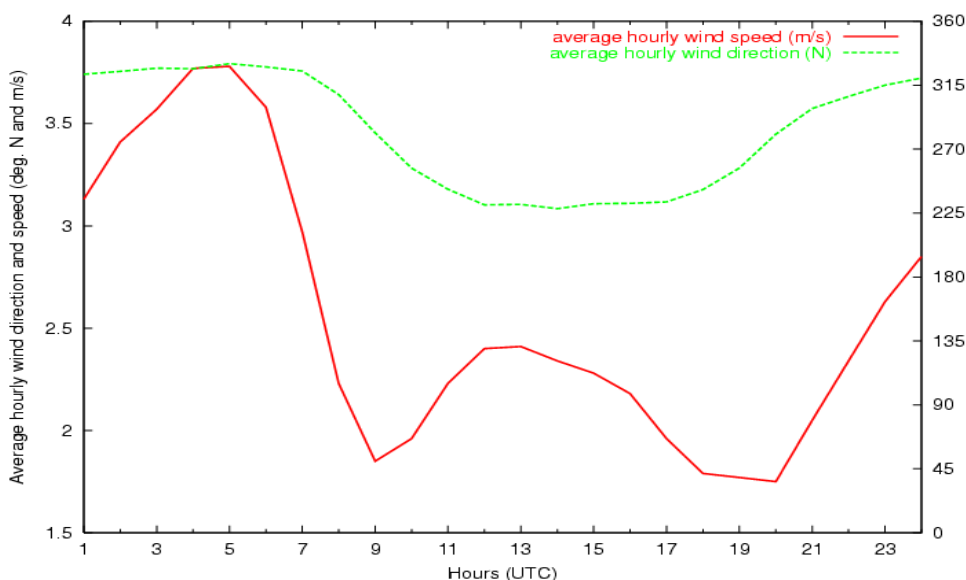


Figura 8  
Andamento medio orario della direzione (curva verde) e della velocità (curva rossa) del vento a Gemona del Friuli (anni 2000-2009).

dimensioni degli aerogeneratori stessi. Piccoli impianti, con una potenza nominale dell'ordine dei 3 kW o inferiore, adibiti solitamente all'autoproduzione di energia elettrica, hanno infatti sia un ridotto impatto acustico ed una ridotta pericolosità se confrontati con impianti da 1500 kW di potenza nominale destinati alla produzione commerciale di energia elettrica, i quali hanno dei rotori con pale lunghe una cinquantina di metri, posizionate su pali con un'altezza che va dagli 80 ai 100 m.

Per quanto riguarda gli svantaggi degli impianti eolici, un discorso a parte deve essere fatto relativamente all'impatto paesaggistico. Questo tema, infatti, è molto controverso e tuttora argomento di fervide discussioni anche tra gli addetti ai lavori. Se infatti è innegabile che un grosso impianto destinato alla produzione commerciale di energia elettrica abbia un impatto sul paesaggio, alcuni architetti ed urbanisti ritengono che questo impatto non sia negativo ma solo inusuale. Anche i mulini a vento olandesi, la cui diffusione massiccia ha avuto inizio nel 600, inizialmente hanno



rappresentato un cambiamento radicale del paesaggio preesistente. Con il tempo, però, questo cambiamento è diventato caratteristico e, al giorno d'oggi, attrazione turistica. Seguendo questo tipo di pensiero, alcuni architetti attualmente sostengono che non si debba cercare di mascherare i grossi generatori eolici con delle colorazioni mimetiche, ma che anzi essi debbano essere lasciati di colore bianco ma disposti lungo linee e secondo geometrie che si inseriscano sulle linee e geometrie preesistenti nel territorio. Una sorta di nuovo elemento, chiaramente distinto, ma integrato nel territorio, come una cravatta rossa su un vestito blu.

Benché questo non sia un vero e proprio svantaggio, ma piuttosto una caratteristica, va comunque sottolineato anche il fatto che la produzione di energia elettrica mediante generatori eolici, proprio in quanto distribuita sul territorio, richiede di reti di

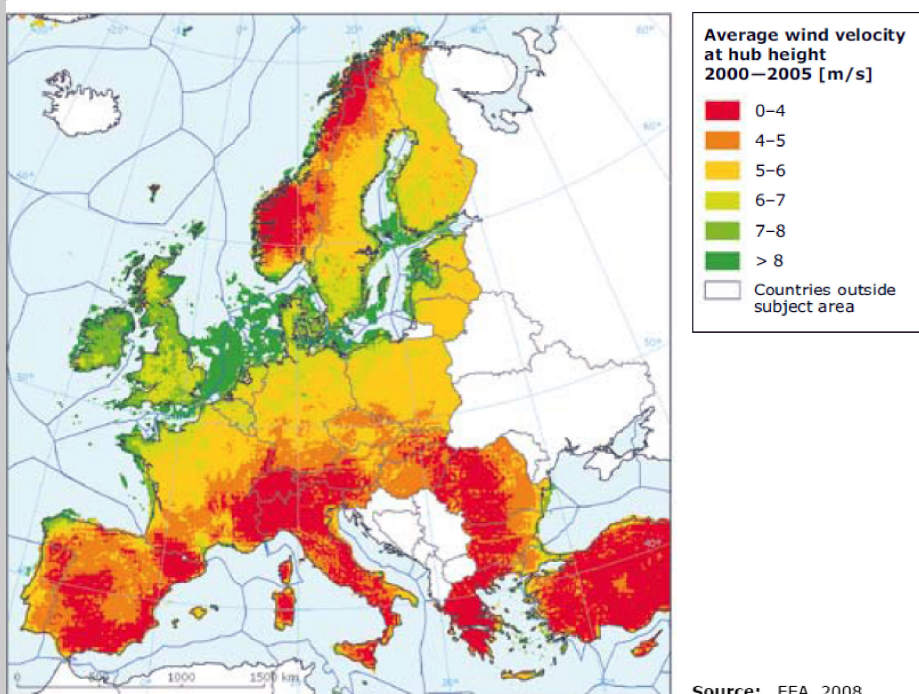


Figura 9  
La distribuzione spaziale delle diverse velocità medie annuali del vento in Europa. I dati sono riferiti alla media degli anni 2000-2005. Fonte European Environmental Agency.



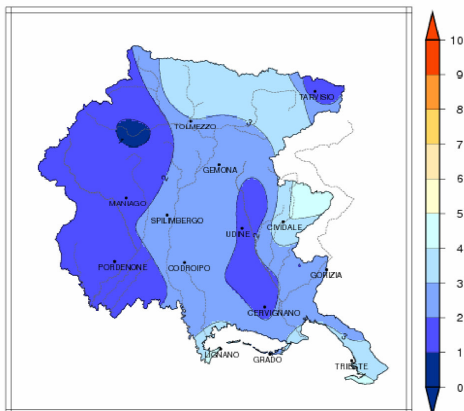
trasporto e distribuzione diverse da quelle che devono essere utilizzate quando la corrente elettrica è prodotta da pochi grossi impianti, quali le centrali idroelettriche, a combustibile fossile o nucleari. Queste reti, chiamate spesso "smart grid" per la loro capacità di auto-regolarsi, sono tuttora un argomento di punta nella ricerca del settore, in quanto sono un elemento indispensabile se la strategia adottata per la produzione della corrente elettrica è quella legata alle fonte rinnovabili e a ridotte emissioni di gas "climalteranti".

### **LE POTENZIALITÀ DELL'EOLICO IN EUROPA, ITALIA E FRIULI VENEZIA GIULIA**

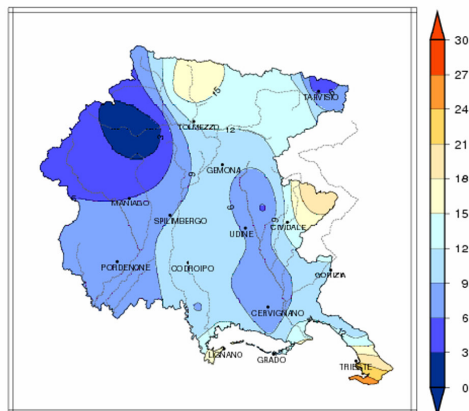
Per quanto riguarda le potenzialità eoliche nel vecchio continente, i paesi dell'Europa del nord e che si affacciano sull'atlantico sono decisamente avvantaggiati rispetto ai paesi dell'area mediterranea. I primi, infatti, sia per la vicinanza all'oceano, sia per la ridotta orografia, consentono al vento sinottico e zonale di svilupparsi in tutte le sue potenzialità, per questo motivo le velocità medie raggiunte dal movimento delle masse d'aria sono molto maggiori di quelle osservabili nei paesi che si affacciano nel mediterraneo. I paesi mediterranei, al contrario, sia per la presenza dei rilievi orografici, sia per la maggior variabilità geografica, penalizzano il vento sinottico ma favoriscono, localmente, il fenomeno delle brezze. In assoluto, l'area italiana meno vocata alla produzione di energia elettrica mediante l'eolico è proprio la pianura padana in quanto, per conformazione e posizione, favorisce al contrario il ristagno delle masse d'aria (Figura 9). Questo svantaggio dell'area padana, comunque, è vero nel complesso ma localmente si possono avere delle zone dove, proprio grazie alla conformazione dei rilievi, si possono sviluppare venti orografici sufficientemente intensi da consentire sicuramente l'utilizzo dei generatori eolici per l'autoproduzione di energia elettrica e, in alcuni casi, anche per la produzione commerciale. Non va inoltre dimenticato che, attualmente, la produzione di energia elettrica mediante fonti rinnovabili è sostenuta economicamente da quasi tutti i paesi dell'Europa, tra cui l'Italia.

Per quanto riguarda il Friuli Venezia Giulia, dato che quest'area si colloca al margine orientale della pianura padana, non è certamente una zona particolarmente adatta alla produzione di energia elettrica mediante l'eolico. Ciò nonostante, vi sono alcune zone del territorio regionale dove la velocità media del vento risulta essere sufficientemente elevata da poter prendere in considerazione l'installazione di aerogeneratori. Queste zone a maggiore ventosità

average 2000–2009 – daily average wind speed at 10m (m/s)



max\_val 2000–2009 – daily average wind speed at 10m (m/s)



f\_sup 2000–2009 – daily average wind speed at 10m (m/s)

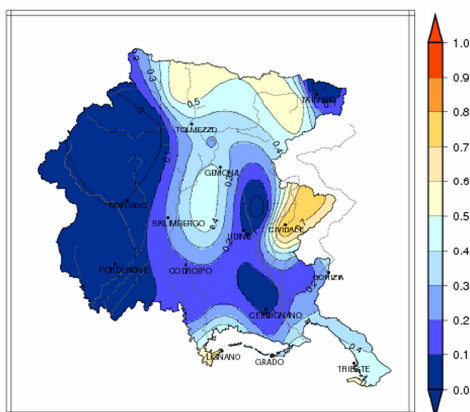


Figura 10  
Pannello in alto a sinistra: velocità media giornaliera del vento

pannello in alto a destra: velocità massima giornaliera media

pannello in basso a sinistra: frequenza di giornate con vento medio superiore a 3 m/s (soglia di "cut-in").

Dati relativi al periodo 2000-2009.  
Fonte Arpa-Osmer.

sono solitamente posizionate allo sbocco delle principali vallate. Un discorso a parte merita l'area di Trieste in quanto, se da un lato la velocità media del vento in questa zona è piuttosto elevata se confrontata con il resto del territorio, è anche vero che questa velocità elevata è il risultato di episodi fortemente ventosi nei quali la velocità delle masse d'aria è spesso superiore a quella indispensabile per la gestione in sicurezza degli impianti. Il vento di Bora, inoltre, per sua natura risulta piuttosto turbolento, quindi non particolarmente adatto alla produzione di energia eolica (Figura 10).

Per quanto riguarda lo sfruttamento dell'energia eolica in Europa, il paese con la maggior produzione risulta essere la Germania (14 GW al 2004, 22 GW nel 2007), seguita dalla Spagna (6 GW al 2004, 15 GW nel 2007) e dalla Danimarca (3 GW nel 2004 e analogo valore nel 2007). Per quanto riguarda lo sfruttamento dell'eolico in Italia, nel 2007 la nostra nazione risulta essere al quarto posto con una potenza raggiunta di 2.7 GW, in particolare tramite gli impianti installati in meridione e nelle isole. A tutt'oggi non risulta che in Friuli Venezia Giulia siano stati mai installati dei generatori eolici, nemmeno per scopi di autoproduzione.

#### **BIBLIOGRAFIA**

Renaël, 2004. AA.VV. Energia Eolica. Vademecum delle Fonti Rinnovabili. Ministero dello Sviluppo Economico.

*EEA Technical Report n. 6/2009. Europe's onshore and offshore wind energy potential.* Agenzia Europea Per l'Ambiente ([www.eea.eu](http://www.eea.eu))

Gladich I., Giaiotti D. B., Stel. F., 2010. *On the onset of deep moist convection in the southern side of the Alps, analyzed through cloud-to-ground data.* Atmos. Res.

S. Clifford. 2008, *Delivering Energy and Climate Solutions.* EWEA report 2007, 50 pp.

## L'acqua batte dove il vento vuole

Vento e livello marino nell'Adriatico settentrionale

**Fabio Raicich**<sup>(1)(2)</sup>

(1) CNR, ISMAR — Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Marine, Trieste

(2) UMFVG — Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia

### INTRODUZIONE

Le variazioni del livello marino rappresentano un argomento importante nel contesto degli attuali studi sul cambiamento climatico, poiché il loro impatto è potenzialmente dannoso per la vita e le attività umane in molte regioni costiere del mondo. Bisogna tuttavia distinguere tra gli aspetti di carattere generale, cioè a scala globale, e quelli che interessano specifiche aree di limitata estensione (scala locale o regionale). Nel corso dell'ultimo secolo si è osservato un generale aumento del livello medio globale di 10-20 cm complessivamente, che ha comportato la crescente vulnerabilità delle aree costiere situate a piccola altezza, come gli atolli dei mari tropicali; se nei prossimi anni il comportamento del livello aumenterà ulteriormente, come generalmente previsto, quelle situazioni non potranno che aggravarsi. Su scala regionale le aree costiere, oltre a risentire delle variazioni del livello medio globale, subiscono l'influenza delle variazioni indotte da fattori locali, quali i movimenti verticali del suolo e il verificarsi di eventi estremi di livello marino connessi con il forzante atmosferico.

Qui trattiamo in particolare la relazione tra livello marino e vento. L'azione del vento sul mare consiste nel produrre onde superficiali, dette proprio onde di vento, delle quali non ci occuperemo in questa sede, e correnti, che interessano anche l'interno della massa d'acqua, e alle quali sono collegate anche le variazioni del livello marino. Come ulteriore limitazione consideriamo le scale temporali fino a quella sinottica, ossia fino a qualche giorno.

Ci occupiamo in particolare dell'Adriatico settentrionale, che costituisce un'area molto sensibile ai cambiamenti di livello marino,

essendo gran parte della zona costiera bassa e soggetta ad allagamenti, e dove il regime dei venti è caratterizzato da notevole variabilità.

Parlando di livello marino, occorre precisare che in questa sede ci interessiamo del livello relativo, ossia quello misurato rispetto a un caposaldo terrestre. Nel Nord Adriatico i movimenti del suolo sono prevalentemente caratterizzati da un abbassamento per subsidenza, che avviene con velocità variabile lungo l'arco costiero, con massimi lungo la costa romagnola di oltre 5 mm/anno. Accanto alla subsidenza naturale va ricordata quella indotta dalle attività estrattive verificatesi dagli anni '30 agli anni '70 dello scorso secolo, che ha interessato soprattutto le costa occidentale del bacino.

### RELAZIONE TRA FORZANTE ATMOSFERICO E LIVELLO MARINO

La risposta del livello marino alla pressione atmosferica e al vento, sulla scala temporale sinottica può essere descritta per mezzo delle equazioni del moto integrate lungo la verticale. Sotto ipotesi semplificative ragionevoli per la fenomenologia qui trattata e per l'Adriatico settentrionale, che non vengono discusse, si possono ottenere relazioni relativamente semplici tra livello e pressione e tra livello e vento, rispettivamente. Se definiamo  $s$  la coordinata lungo una direzione data, queste sono:

$$\Delta \eta = -\frac{1}{g\rho} \Delta p_a \quad (1) \qquad \frac{\Delta \eta}{\Delta s} = \frac{\tau_s}{g\rho h} \quad (2)$$

dove  $\Delta \eta$  è l'anomalia di livello marino rispetto alla media di lungo periodo,  $\Delta p_a$  è l'anomalia di pressione atmosferica,  $\Delta \eta / \Delta s$  è la variazione media di livello per unità di distanza (gradiente medio),  $\tau_s$  è la componente dello stress del vento nella direzione di  $s$ ,  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho$  la densità dell'acqua ( $1025\text{-}1029 \text{ kg/m}^3$ ), e  $h$  è la profondità media del bacino ( $20\text{-}30 \text{ m}$ ). Lo stress è la forza di trascinamento per unità di superficie che il vento esercita sulla superficie marina, ed è approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità scalare. L'equazione (1) rappresenta l'effetto barometrico inverso, secondo il quale  $\Delta \eta$  è inversamente proporzionale a  $\Delta p_a$ ; la teoria prevede un rapporto di circa  $-1 \text{ cm/hPa}$ , ma nella pratica, a seconda della stagione, in Alto Adriatico si osservano valori tra  $-2$  e  $-0.5 \text{ cm/hPa}$ . In Figura 1, nella pagina seguente, si può notare l'anticorrelazione tra le fluttuazioni del livello e della pressione su scala giornaliera in diverse località. L'equazione (2) mostra che  $\Delta \eta / \Delta s$  è proporzionale a  $\tau_s$ .

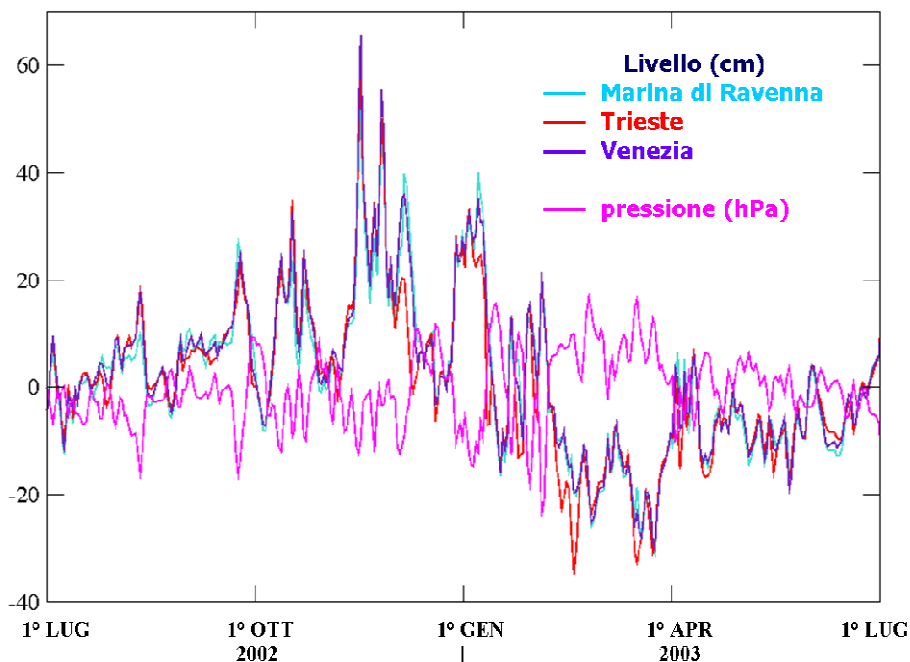


Figura 1  
Confronto tra le anomalie di pressione atmosferica (curva magenta) e del livello marino di Marina di Ravenna (azzurra), Trieste (rossa) e Venezia (blu). I dati sono medie giornaliere da luglio 2002 a giugno 2003

## I REGIMI DEL VENTO NEL NORD ADRIATICO

I principali regimi del vento sull'Adriatico settentrionale sono caratterizzati dallo Scirocco e dalla Bora. Lo Scirocco soffia da Sud-Est, lungo l'asse longitudinale dell'Adriatico, ed è di solito associato a un ciclone situato sul Mediterraneo occidentale e sul Tirreno. La Bora soffia per lo più da Nord-Est fino a Est, attraversa il bacino settentrionale, ed è collegata a un anticiclone sull'Europa centrale od orientale oppure a una circolazione ciclonica sul bacino centrale del Mediterraneo e sulla penisola italiana.

La corrente di Scirocco è canalizzata dall'orografia che circonda il bacino adriatico, cioè dalla catena degli Appennini lungo la penisola italiana e da quella delle Alpi Dinariche lungo la costa della Dalmazia. Essendo l'Adriatico aperto solo verso lo Ionio, lo Scirocco tende ad accumulare l'acqua verso l'estremità settentrionale, causando un aumento del livello marino in

quell'area. Il fenomeno in cui si ha un notevole aumento del livello è noto come storm surge o "acqua alta", ed è caratteristico della stagione autunnale e invernale, quando sono più frequenti e intensi i cicloni. Va ricordato che al vento meridionale normalmente è associata una bassa pressione atmosferica sul Nord Adriatico, elemento che contribuisce ad accentuare l'aumento del livello tramite l'effetto barometrico inverso.

In caso di forte Scirocco il livello aumenta in tutto l'Adriatico settentrionale, tuttavia l'effetto locale è accentuato o ridotto a seconda dell'esposizione al vento; a questo proposito, la penisola istriana scherma parzialmente il Golfo di Trieste, mentre il resto del litorale del Friuli Venezia Giulia è esposto in pieno allo Scirocco, come avviene anche per il litorale del Veneto. L'effetto del vento di Scirocco è ben illustrato dalla Figura 2. Sono confrontati la differenza di livello tra Trieste e Bari e la componente della velocità media del vento lungo l'Adriatico: il livello è relativamente alto a Trieste in corrispondenza a valori positivi della velocità media, che indicano un vento che spira da Sud-Est, ossia una corrente da Scirocco.

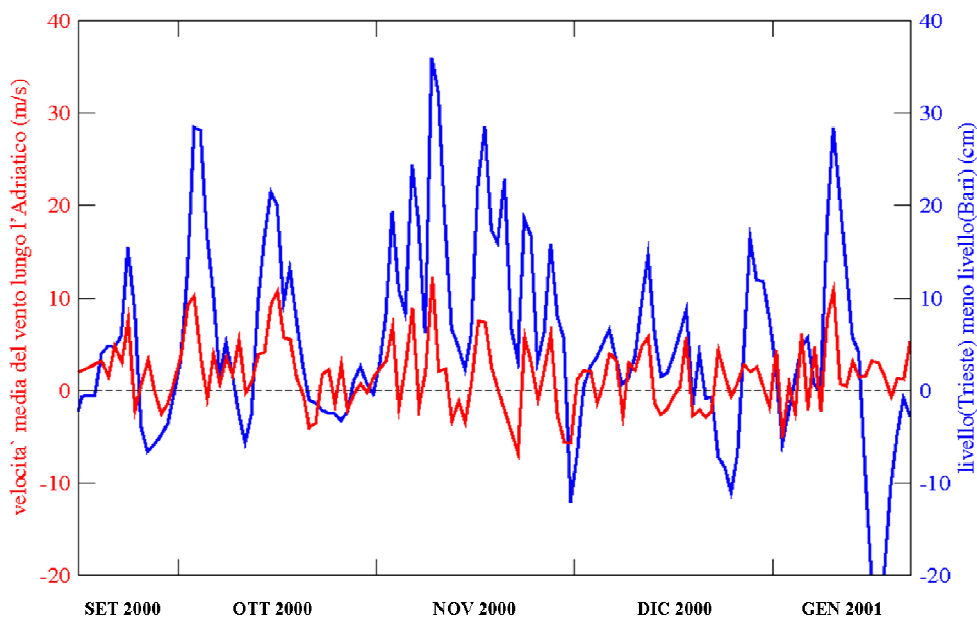


Figura 2  
Confronto tra velocità media del vento lungo l'Adriatico (Scirocco, curva rossa) e differenza di livello marino tra Trieste e Bari (blu). I dati sono medie giornaliere da settembre 2000 a gennaio 2001.

Negli ultimi dieci anni la massima differenza di livello tra Trieste e Bari, rispetto a una media di lungo periodo, è stata di circa 50 cm, corrispondente a un gradiente medio di 1 mm/km, osservata il 16 novembre 2002, con Scirocco in media a 10 m/s. Si deve tuttavia tener presente che una parte di questa differenza è da attribuirsi all'effetto barometrico inverso.

Se il centro del ciclone a cui si associa lo Scirocco passa a Nord del Golfo di Trieste, al passaggio del fronte freddo si osserva la rotazione del vento a Libeccio, che investe il Golfo direttamente, e accumula acqua verso la costa. Questa è la condizione più favorevole all'acqua alta a Trieste.

L'effetto della Bora è quello di accumulare l'acqua verso la costa occidentale del Nord Adriatico, ossia quella veneta e romagnola. Al contrario, il livello marino si abbassa nel Golfo di Trieste e lungo la costa istriana.

La Figura 3 mostra il comportamento del livello in caso di Bora sul Nord Adriatico. Esiste una corrispondenza inversa tra la differenza di livello tra Trieste e Marina di Ravenna e lo stress del

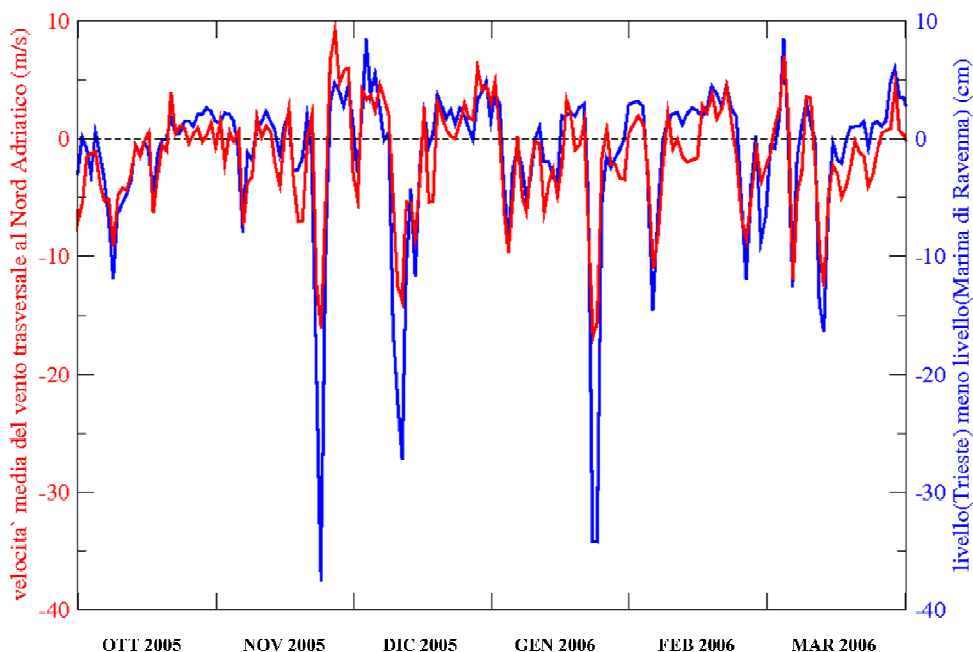


Figura 3

Confronto tra velocità media del vento trasversale all'Adriatico settentrionale (Bora, curva rossa) e differenza di livello marino tra Trieste e Marina di Ravenna (blu). I dati sono medie giornaliere da ottobre 2005 a marzo 2006.



vento trasversalmente al bacino, ossia positivo verso Nord-Est: quando spira la Bora il livello è relativamente basso a Trieste e alto lungo la costa romagnola. A Venezia si verifica una situazione simile a quella di Marina di Ravenna, ma meno accentuata, poiché la Laguna viene interessata marginalmente dalla corrente di Bora.

Sempre negli ultimi dieci anni, la differenza di livello tra Marina di Ravenna e Trieste ha raggiunto il massimo di circa 40 cm il 14 novembre 2004, pari a 2 mm/km, con Bora in media a 22 m/s. Se il centro di un ciclone si trova sull'Italia centrale, si osserva Scirocco lungo la maggior parte dell'Adriatico, mentre nel Nord spira la Bora. Il risultato è dannoso per la Laguna di Venezia, specie la parte occidentale, e particolarmente per l'area costiera attorno la foce del Po, poiché là il livello marino aumenta come conseguenza della somma degli effetti dovuti ai due regimi di vento.

### L'ACQUA ALTA DEL 1° DICEMBRE 2008

In occasione di uno *storm surge* il livello marino può aumentare tanto da sommergere la fascia costiera. Il fenomeno presenta notevole variabilità nel tempo, a seconda delle fluttuazioni nel regime dei venti, rispetto sia alla frequenza sia all'intensità. Il 1° dicembre 2008 si è verificato un evento di grande entità, anche perché concomitante con il massimo di marea astronomica. A Trieste il fenomeno è stato il secondo più intenso da quando esistono osservazioni: in Figura 4 sono presentati il livello osservato, quello residuo e la marea astronomica, sulla base di dati misurati ogni minuto, dal 30

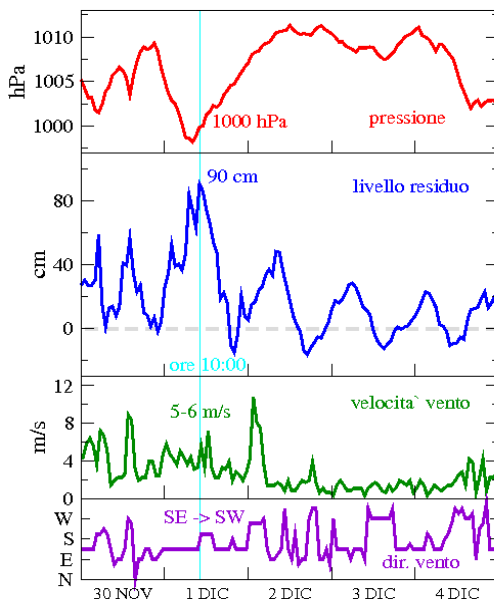


Figura 4  
Dati orari di pressione atmosferica (curva rossa), livello residuo (blu), velocità del vento (verde) e direzione del vento (viola) dal 30 novembre al 4 dicembre 2008. La linea verticale celeste indica l'ora del picco di livello. Le misure sono state effettuate presso le stazioni meteorologica e mareografica gestite dal CNR-ISMAR di Trieste.

novembre al 4 dicembre. Si noti che il piano del molo è stato superato due volte a distanza di circa 2 ore e mezza. La causa dell'acqua alta è rappresentata dalla tipica sequenza di eventi atmosferici, ossia un minimo di pressione in transito sul Nord Adriatico, Scirocco che precede un fronte freddo, quindi, al passaggio di quest'ultimo, la rotazione del vento da Libeccio. La Figura 5 mostra l'andamento dei vari parametri sulla base dei dati orari. La prima tracimazione corrisponde al minimo di pressione, mentre la seconda coincide con la rotazione del vento, peraltro debole in città e più forte al largo, da Scirocco a Libeccio.

Si noti che l'accumulo di acqua lungo un tratto di costa costituisce una deviazione della condizione di equilibrio. Al cessare del fattore forzante, appunto il vento, la massa d'acqua tende a riportarsi verso lo stato di equilibrio attraverso delle oscillazioni di sessa (Figura 4), che possono comportare notevoli escursioni di livello e possono durare per molti giorni.

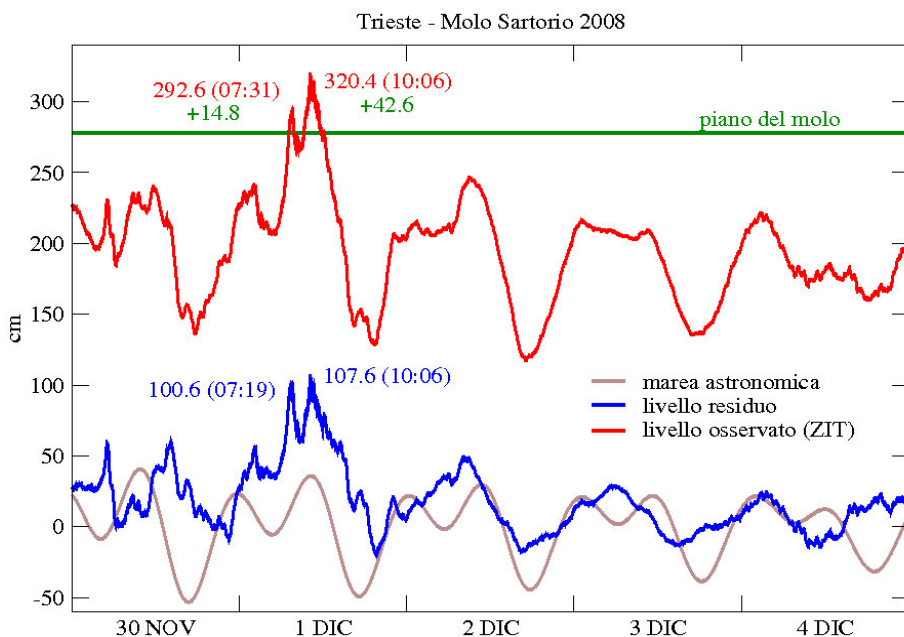


Figura 5

Dati rilevati ogni minuto per il livello marino osservato rispetto allo Zero Istituto Talassografico (curva rossa), livello residuo (blu) e marea astronomica (marrone) dal 30 novembre al 4 dicembre 2008. La linea verde mostra la posizione del piano del Molo Sartorio. Per ciascuna tracimazione sono indicati i valori di picco dei livelli e i relativi orari; sono inoltre indicate le altezze raggiunte dal mare sopra il molo. Le misure sono state effettuate presso la stazione mareografica gestita dal CNR-ISMAR di Trieste.

## CONCLUSIONI

Abbiamo messo in evidenza il ruolo del vento nel modulare l'andamento del livello marino nell'Adriatico settentrionale sulla scala temporale sinottica. Sono state illustrate le variazioni di livello indotte dai principali venti che interessano l'Adriatico, cioè lo Scirocco, che spira lungo il bacino, e la Bora, che spira trasversalmente ad esso.

Dato che le variazioni del regime del vento sul Nord Adriatico possono verificarsi repentinamente, soprattutto in occasione di eventi estremi, si deve sottolineare la criticità nella tempistica delle osservazioni. I dati orari di livello, che sono misurati al minuto zero, sottostimano il picco del livello residuo di circa 18 cm (90 contro 107.6, Figure 4 e 5) nonostante l'osservazione sia fatta solo 6 minuti prima. Aggiungiamo che la prima tracimazione, alle 7:31, non è rilevata dai dati orari, che alle ore 8 forniscono un massimo di 20 cm inferiore al valore di picco.

## Una vita nel vento

**Chiara Calligaris**

*Velista e geologo ricercatore*

Tutto ebbe inizio un pomeriggio di ottobre di tanti anni fa. Dopo un'estate trascorsa in montagna dove i miei genitori stavano costruendo la casa, mia madre decise che quella bambina minuta aveva bisogno di un po' di aria di mare, e così mi portò sulla spiaggia di Monfalcone, a Marina Julia, a fare una passeggiata. Era un pomeriggio strano: il cielo era plumbeo sopra il Carso bianco, la raffiche di Bora erano forti, scompigliavano i capelli e i pensieri. Il mare scuro era solcato da coloratissimi avventurieri del mare: i windsurfisti che andavano veloci da una parte all'altra della spiaggia. Rimasi affascinata. Avevo solo 8 anni, ma rimasi così colpita dai colori e dall'atmosfera che dissi a mia madre: "che bello, mi piacerebbe tanto!" Mia madre, voltandosi verso di me disse che il mare era pericoloso, che bisognava conoscere bene i venti e le correnti prima di affrontarlo. Ed io, innocente, risposi: "Ma se c'è una scuola, mi mandi?" E così, l'estate successiva, iniziai la mia avventura in barca a vela. I bambini iniziano con una "vasca da bagno" chiamata Optimist: un piccolo scafo lungo 2,3 m con una veletta di 3,25 m<sup>2</sup>. Le barche scuola alla SVOC di Monfalcone erano pesantissime, io ero magrissima e facevo tanta fatica, ma mi piaceva, mi piaceva tantissimo.

Ricordo come se fosse ora che durante le mie prime uscite mia madre si metteva in testa al pontile e mi controllava: lei era terrorizzata, io mi divertivo! Il corso mi piacque, ero bravina e l'istruttore, a fine corso, chiamò mia madre dicendole che alla fine di agosto avrei potuto prendere parte ad un corso premio di 3 giorni, dedicato a quei bambini che durante le 2 settimane di scuola vela si erano distinti per bravura e capacità. Mia madre era felice naturalmente, ma purtroppo avevano già prenotato le ferie, pertanto, anche se con rammarico, disse al mio istruttore che io non avrei partecipato. Non sono mai stata una bambina capricciosa, ma piansi a dirotto in quell'occasione! Il mio corso premio! Pur di



Figura 1  
*L'Optimist: una delle mie prime uscite con il vento.*

zittirmi i miei mi dissero di non preoccuparmi che saremmo andati in vacanza e che poi, al rientro, mi avrebbero comperato una barchetta. Fui una bambina modello durante le vacanze: niente capricci, sempre disponibile; insomma, in cuor mio volevo proprio quella barchina. Mi sentivo bene quando ero lì, sopra quel precario guscio di noce, non avevo paura, e mi piaceva da impazzire sentire il vento tra i capelli e avere l'amaro del sale sulle labbra. Tornammo dalle ferie. Attesi un po'... non potevo essere così sfacciata, era importante fare la richiesta nel momento giusto. Il momento arrivò ed io chiesi: "la mia barca... mi avevate promesso un Optimist?" I miei avevano sperato che me ne fossi dimenticata, io invece sapevo esattamente ciò che volevo. Per farla breve finì che mi comperarono questa barchetta di legno: si chiamava Ape Maia, azzurra

esternamente e laccatura su legno l'interno. Era la barca più bella del mondo, peccato però che non fosse per niente veloce. Era vecchia, anche se tenuta benissimo, pesante, le sue linee d'acqua erano ormai superate... non era la barca giusta per vincere. La usai per tutto l'inverno, uscendo saltuariamente e un giorno dell'estate successiva il mio istruttore, parlando al direttore sportivo della società, pensando di non essere sentiti da mia madre che era venuta a prendermi dopo un allenamento, chiese: "ma non abbiamo in società una barchetta migliore di quella che ha Chiara? Lei è così

brava, ma la barca che ha non è adatta a lei". Mia madre a quel punto salutò, si intromise nella conversazione e disse che non aveva intenzione di mandare sua figlia su una barca che non era per lei, e che quindi le consigliassero una barca nuova, ma che gliela consigliassero loro perché per lei erano tutte uguali! I miei genitori infatti non hanno mai avuto passione per la barca a vela. Sono stati travolti dalla mia, ma loro stavano finendo di costruire la casa in montagna... e così non andai in barca per un po' di mesi, fino a quando un ragazzino in società non cambiò la sua barca dopo che aveva partecipato ai campionati del mondo, e i miei la acquistarono. Era tutta in vetroresina, tutta bianca con i bordi azzurrini chiari, ma soprattutto era velocissima!



*Figura 2  
Banner e i difficili momenti per un velista in bonaccia.*

Con lei imparai ad essere un marinaio prima che un velista. Fino a questo momento, i miei incontri con il mare erano perlopiù frammentari, difficili anche se per me travolgenti. Con Banner iniziai



a far parte della squadra agonistica, ad allenarmi tutte le domeniche, a fare le prime regate, ad uscire in mare con tutti i tempi. Un aneddoto che ricordo sempre volentieri: fisicamente ero la più piccola del gruppo, molto minuta, apparivo fragile. Ma non era vero, ero così perché facevo tre allenamenti la settimana di danza classica, quindi non avevo un filo di grasso ed ero muscolarmente a posto. Il mio allenatore, Iginio Crosara, quando ci portava fuori a fare allenamento, quando il vento si alzava e sul mare apparivano le creste bianche, mi veniva vicino con il suo barchino giallo, mi legava al barchino, sfilava la randa dalla scassa e mi portava dentro. Io al traino e gli altri in barca a divertirsi e a planare. Lo odiavo profondamente in quei fragenti, mi sentivo sottovalutata, io ce la facevo, a me il vento forte piaceva, non mi faceva paura, anzi, mi divertivo proprio. Devo a lui però anche i primi rudimenti sulle geometrie del campo di regata, su come funziona il vento, su che cos'è questa cosa inafferrabile che è il motore della barca, sul perché una barca a vela avanza. E non è facile da

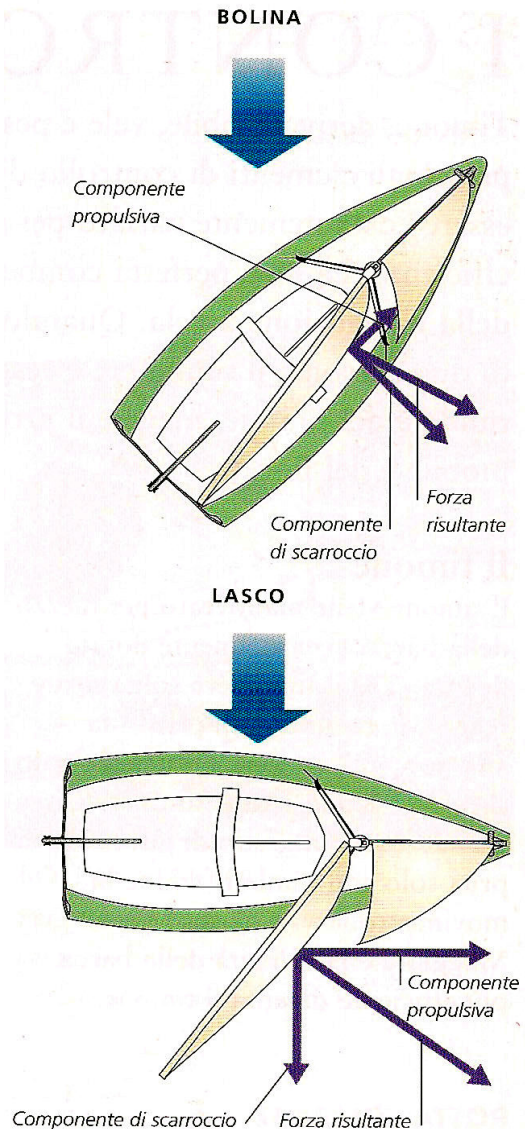


Figura 3  
I vettori del vento nelle diverse andature: bolina e traverso.

spiegare ad un bambino. Quando sei bimbo quello che fai in barca, i tuoi movimenti, le decisioni che prendi, sono tutto istinto. Poi inizi a capire e ad inquadrare le tue sensazioni. Leggi, studi, impari a conoscere questo fluido fantastico con cui poter giocare. Fare una regata, che sia di flotta o che sia in solitaria, parte sempre dal medesimo punto: conoscere il vento. Alla fine devi essere un buon meteorologo, o perlomeno un meteorologo applicato a quelle che sono le tue esigenze in quella giornata. Dopo la prima barchina in vetroresina c'è stata un'escalation, barche sempre più nuove e coppe che si moltiplicavano da sole. Sono stata fortunata. A Monfalcone dove sono nata velisticamente, le condizioni meteo sono difficili e, o impari, o questo sport non fa per te. La Bora, vento



Figura 4  
Il podio al Campionato del Mondo in Svezia.

catabatico per eccellenza, non dà tregua. E' un vento molto rafficato con differenze di intensità e direzione notevoli e questo ti fa diventare un osservatore acutissimo e un previsore attento. Nel bacino interno del cantiere di Monfalcone, dove costruivamo le navi, noi ci allenavamo anche quando la Bora a Trieste era ingestibile. Il gruppo di ragazzini era cresciuto, e nomi come Vittorio Rocchelli,



Furio e Gabriele Benussi, Vasco Vascotto, Martino Bolletti e tanti altri, erano i miei compagni di giochi. Paolo De Angelis è stato il nostro allenatore e sobillatore. Ci faceva allenare con tutti i tempi, gelo, pioggia, sole, "boron": c'era la giornata di allenamento e si usciva. La sua grinta contagiosa e, a posteriori, anche un po' la sua incoscienza, hanno fatto di noi un gruppo di velisti fortissimi a livello italiano ed internazionale. Allenarsi e fare il campionato sociale, per noi era come partecipare al campionato italiano. Ed era avvincente, una sfida continua, con te prima di tutto e con gli avversari poi. Tutti eravamo talentuosi, alcuni di questi nomi sono oggi tra i professionisti della vela più quotati in campo nazionale e non, tutti pensavamo di conoscere il vento e tutti volevamo vincere. E una volta vinceva uno, una volta l'altro. Ma chi sapeva interpretare meglio le condizioni del campo di regata, quello riusciva a sopravanzare gli altri. A Oxelésund, in Svezia, al Campionato del Mondo che io vinsi nel 1988, l'ultimo giorno di regate è stato decisamente stressante. Ero prima in classifica dal secondo giorno di Campionato, avevo 10 punti di vantaggio sulla seconda, ma su 120 barche partenti, 10 punti non sono niente.

La giornata era grigia, pochissimo vento che ruotava in continuazione. Eravamo nella zona di scontro tra 2 perturbazioni. La partenza era prevista per le 11. Tutti gli atleti in mare. Iniziamo ad aspettare. E' uno sport di pazienza il nostro, se il vento non c'è chiacchieri con l'amico, ti siedi sul gommone dell'allenatore... cerchi di far passare il tempo senza perdere la concentrazione. Il termine ultimo per la partenza erano le 15. Alle 14:30 danno il primo segnale di avviso. Alla partenza c'è un richiamo generale, tutti partono fuori dalla linea. Il Comitato di Regata alle 14:45 ci riprova: è l'ultima possibilità che hanno di far partire la regata. C'è una leggera brezzolina, per lo più il tratto di mare del nord in cui si regata sembra uno specchio. La linea di partenza è molto lunga. Mi accorgo che il vento sta ruotando a destra, pochi lo capiscono, facendo un'ulteriore *checkwind* (operazione con cui si misura la direzione del vento) mi rendo conto che ho ragione e tengo la destra della linea di partenza, vicino al Comitato di Regata. Sono nervosissima ma calma al tempo stesso. La mia allenatrice mi ha detto che se io sono agitata che ho 10 punti di vantaggio, devo pensare all'agitazione di chi quei 10 punti se li deve ancora guadagnare... pertanto, con queste parole, mi tranquillizzo, divento fredda come il marmo, in testa ho solo la rotazione del vento e la geometria del campo di regata. Faccio una bella partenza, dal mio lato ci sono poche barche, vado a chiudere il gruppo che sta allungando a sinistra... ma non c'è storia: il vento è ancora destro e

giro terza alla prima boa di bolina. Prima è un'altra ragazza italiana, non mi preoccupo, lei è cinquantesima in classifica generale, si vinca pure la sua regata che io ho il mondiale da conquistare. E così, stando sempre tra gli avversari e la boa, riesco a chiudere la mia prova in terza posizione. Non ci credo ancora, non posso essere io quella ragazzina che piccola piccola voleva a tutti i costi andare in barca a dispetto di tutto e di tutti, non può essere successo proprio a me! E invece, conoscere il vento, sapere i suoi movimenti, imparare a prevederli, non solo mi ha fatto vincere quel titolo iridato, ma ho avuto la fortuna di vincere molto altro e di arrivare a raggiungere il traguardo sportivo più ambito da ciascun atleta: l'Olimpiade.



Figura 5  
Le mascotte della XXIX Olimpiade a Beijing (Pechino) nel 2008.

## Bora di ieri, Bora di oggi

2000 anni raccontati dal più famoso vento triestino

**Renato R. Colucci<sup>(1),(2)</sup>, Arturo Pucillo<sup>(2),(3)</sup>**

- (1) CNR, ISMAR — Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Marine, Trieste
- (2) UMFVG — Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia
- (3) ARPA FVG, OSMER — Osservatorio Meteorologico Regionale

## Bora di ieri

### LA BATTAGLIA DEL FRIGIDO

Non vi parlerò qui di come la Bora nasca, e dopo aver attraversato passi e valichi del Carso sloveno, si getti poi sulla città di Trieste e sul suo golfo per sconvolgerne una certa parte del tempo durante il corso dell'anno. Lo fanno già in tanti e direi che, ormai, è cosa piuttosto nota a tutti.

Non vi snocciolerò nemmeno dati e numeri sulla sua intensità, media o massima che sia, nel goffo tentativo di comprendere se "xè vero che la Bora sufiava più una volta de ogi". E' già a volte così controverso sapere a quanto è arrivata la sua velocità nell'ultimo episodio di turno e "chi" ha registrato la sua velocità massima, che lascio quindi l'arduo compito a professionisti più preparati di me in questo campo, scappando vigliaccamente dal commento dell'onnipresente "qualcuno" pronto a dire che il "mio" anemometro "non misura bene", è "starato", è "messo in una posizione che non va bene"...

Preferisco cominciare così:

Era il 5 settembre del 394 d.C.: 1706 anni, 2 mesi e 8 giorni da oggi, giornata dedicata al decimo convegno di meteorologia del Friuli Venezia Giulia.

Stava terminando l'estate, o magari era già autunno inoltrato; sì perché con il "Global Warming" ormai abbiamo un po' perso il senso delle stagioni e della realtà... nel 394 d.C. doveva essere per forza già autunno inoltrato!!

Insomma, era il 5 settembre del 394 d.C., e dalle nostre parti

battaglia che avrebbe deciso i destini del mondo; la **Battaglia del Frigido**. Cerchiamo di mettere a fuoco qualche punto importante scoprendo intanto chi era Frigido. Luogo della imminente battaglia era l'attuale Valle del Vipacco, attualmente in territorio sloveno. Vipacco, o meglio *Vipava*, è, come spesso accade, il nome del fiume che percorre questa vallata per tutta la sua lunghezza; *Frigidum*, invece, l'antico nome di questo fiume che, per chi sa un po' di latino, significa "freddo" o "fresco"... certo, più freddo del Tevere e del Rubicone doveva esserlo sicuramente, ma in un significato più ampio probabilmente indicava che le sue acque erano buone e potabili.

La situazione politico-religiosa era un po' complessa in quel momento storico, ed anche questa non è una grossa notizia tutto sommato; su questo campo di battaglia nostrano, si trovarono di fronte due armate "romane": quella dell'Impero Romano d'Oriente e quella dell'Impero Romano d'Occidente. Ho messo volutamente le "virgolette" sulla parola *romane* in quanto è un po' eufemistico definirle in questo modo; in entrambi gli eserciti vi erano infatti numerose truppe di ausiliari non romani. Su tutti spiccano le figure di un certo Alarico con i suoi Visigoti (qualche anno dopo si sarebbe fatto conoscere un po' meglio!), e del suo comandante in quella battaglia,

il generale di origine germanica Stilicone. Ad est comandava l'imperatore Teodosio I, che rappresentava la cristianità dell'impero, mentre ad ovest, a capo dell'esercito pagano, c'era Flavio Eugenio. Quest'ultimo, oltre ad essere sostenuto dal Senato, era appoggiato dal *magister militum*<sup>(1)</sup> di origine germanica Arbogaste, sospettato di aver eliminato il precedente legittimo imperatore d'occidente Valentiniano, trovato impiccato il 15 maggio del 382 nella sua residenza in Gallia. Era stato lo stesso Arbogaste a dichiarare imperatore d'occidente

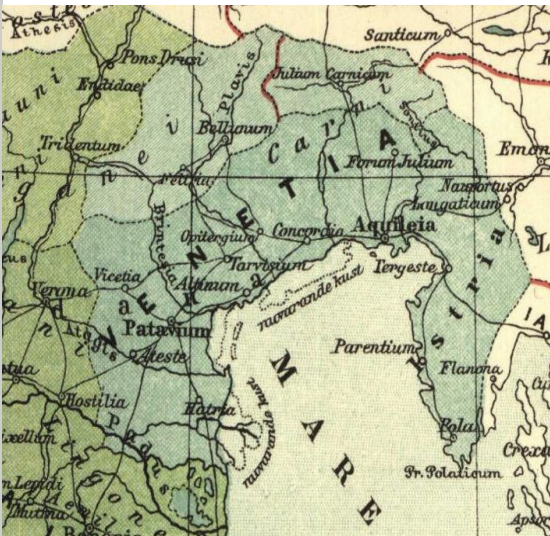


Figura 1  
L'assetto politico-amministrativo del nord est italiano nei primi secoli Dopo Cristo con la Regio Venetia et Histria.

(1) letteralmente "maestro dei soldati": era un grado usato nel tardo Impero romano entrato in uso dal regno di Teodosio I, equivalente romano dell'attuale generale di corpo d'armata.





Figura 2  
Particolare del Missorio di Teodosio con la raffigurazione dello stesso (a sx) e Siliqua (nome usato dai moderni numismatici per definire una moneta romana d'argento) raffigurante Flavio Eugenio (sopra).

Flavio Eugenio, e fu questo il motivo per il quale Teodosio I, non riconoscendone la legittimità, si mise alla testa del suo esercito e mosse da Costantinopoli nel maggio del 394, non prima di aver a sua volta nominato imperatore d'occidente il proprio figlio di 8 anni, Flavio Onorio. Alle legioni si unirono anche 20.000 Visigoti guidati da Alarico.

L'esercito non trovò alcuna resistenza attraversando la Pannonia e superando *Emona* (l'odierna *Ljubljana*) dove arrivò i primi di settembre. Era qui che avevano sede i *Claustra Alpium Iuliarum*<sup>(2)</sup>, e Teodosio si accinse a forzare il tratto di strada che si articolava attraverso le due importanti fortificazioni di *Nauportus* (attuale *Vrhnika*) e *Castra ad fluvium Frigidum* (*Ajdovščina*). Per raggiungere quest'ultima, e quindi la pianura friulana attraverso la valle del Vipacco, era necessario oltrepassare un valico presidiato dalla fortezza di *Castrum ad Pirum* (*Hrušica*), posta a circa ottocento metri di altitudine. Teodosio vi arrivò senza incontrare nemici, così come era nei piani di Arbogaste che nel frattempo aveva occupato *Ajdovščina* e sbarrato la Valle del Vipacco.

Secondo le cronache di Orosio, Teodosio si trovò "bloccato sulle vette delle Alpi, non potendo ricevere rifornimenti né rimanere a lungo sulle sue posizioni". Arbogaste infatti aveva nel frattempo mandato Arbizione, un suo ufficiale, a chiudere il passo alle spalle di Teodosio con un distaccamento per impedirne la ritirata. Teodosio decise di continuare l'avanzata. Dopo aver raggiunto una fortificazione 15 km

(2) I *Claustra Alpium Iuliarum* erano un sistema di fortificazioni a protezione dei passi alpini orientali dell'Italia romana, costruiti dopo il 284 sotto l'imperatore romano, Diocleziano (o Costantino I), tra la Pannonia superiore e l'Italia (tra l'attuale Slovenia e Croazia). Era formata da un insieme di torri di avvistamento, valli, forti e fortini ausiliari che da *Trsat* (*Tarsatica*) raggiungeva *Gradisca d'Isonzo*, poi *Hrušica* (*Ad Pirum*), attraverso *Vrhnika* (*Nauportus*) e *Logatec* (*Longaticum*), e poi fino ad *Ajdovščina* (*Castra ad Fluvium Frigidum*).

più ad ovest, nei pressi dell'attuale *Col*, il pomeriggio del 5 settembre attaccò frontalmente il nemico saldamente attestato a valle. Dei 20.000 ausiliari goti, mandati sostanzialmente al macello, ne rimasero 10.000; difficile pensare che questa scelta non sia stata dettata da convenienza politica e militare. Teodosio probabilmente contava in un indebolimento militare dei barbari per rafforzare l'impero; sempre Orosio scrive: "averli persi fu un gran bene e una vittoria il fatto che fossero vinti".

La notte seguente passò insonne per Teodosio che ottenne la diserzione di Arbizione, all'insaputa di Arbogaste ed Eugenio che invece già pregustavano la vittoria elargendo onorificenze.

All'alba del 6 settembre partì il secondo attacco, quello vero nelle strategie di Teodosio, affidato questa volta soprattutto alle truppe regolari romane. Malgrado l'effetto sorpresa e le perdite iniziali però, le truppe di Arbogaste erano ancora in grado di organizzare una difesa e tentare di recuperare il vantaggio, grazie alla posizione largamente favorevole sul campo di battaglia.

Fu a questo punto che si levò un improvviso ed impetuoso vento da est, che gettò lo scompiglio tra le fila dei pagani favorendo

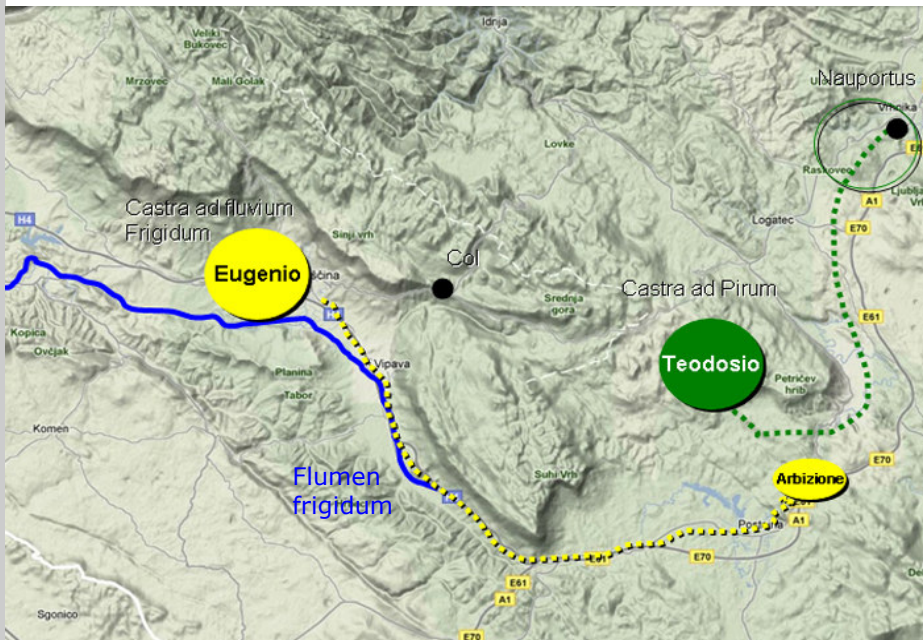


Figura 3  
Le fasi iniziali del conflitto con l'accerchiamento di Teodosio ed il suo isolamento sulle montagne della attuale Selva di Piro, presso Castra ad Pirum (Hrušica).

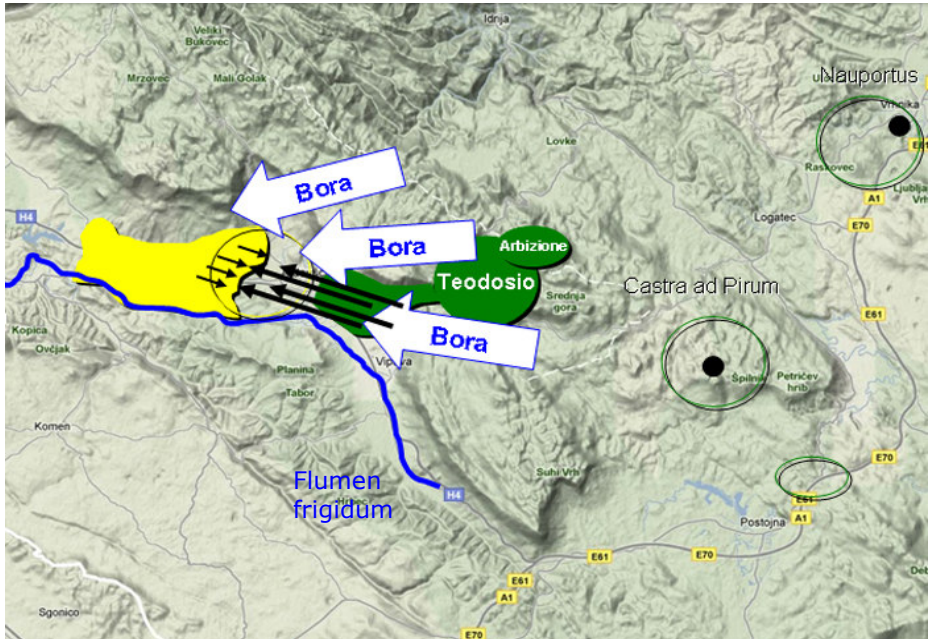


Figura 4

Le sorti della battaglia sono decise dall'innesco di una tempesta di Bora che favorisce grandemente l'esercito di Teodosio. Le frecce ed i giavellotti, a favore di vento, colpiscono in profondità, al contrario di ciò che accade all'esercito di Arbogaste che si trova a lottare contro la violenza delle raffiche e nell'impossibilità di gestire i grossi scudi di legno e metallo in balia del forte vento.

grandemente Teodosio. **Era l'inizio di una tempesta di Bora.** Le frecce ed i giavellotti scagliati dagli occidentali contro la violenza delle raffiche non riuscivano a raggiungere il nemico che invece, a favore di vento, godeva di un grande vantaggio. Sempre Orosio scrive: "I dardi scagliati per mano dei nostri ricevevano una spinta per aria superiore alle forze umane e non cadevano quasi mai, se non infliggendo colpi più profondi. Inoltre quel turbine di vento, strappando gli scudi, sferzava i volti e i petti dei nemici". La Bora fu talmente decisiva da decidere rapidamente le sorti della battaglia: Eugenio fu portato al cospetto di Teodosio il giorno stesso e decapitato sul campo; Arbogaste, invece, scappò sulle montagne vicine, ma braccato ed inseguito sembra che dopo pochi giorni si suicidò. Teodosio rimase padrone unico dell'impero romano e decretò un'amnistia generale nei confronti delle truppe che lo avevano combattuto; morì a Milano 4 mesi dopo.

Così i fatti raccontati da diversi storici e letterati contemporanei, tra i quali, oltre ad Orosio, anche Rufino ed il poeta romano di origine

greca Claudio Claudiano. Ma perché questo conflitto fu così importante, e quale il ruolo mistico della Bora in questa occasione?

Teodosio rappresentava l'Oriente e l'impero ormai cristianizzato, Eugenio e Arbogaste, invece, il vecchio senato di Roma, con ancora velleità di restaurazione del paganesimo. L'innescò di una tempesta di Bora nel mezzo della battaglia, proprio quando le sorti per Teodosio sembravano segnate, fu visto dai cristiani vincitori come un segno divino a loro favore: un aiuto di Dio che influenzò i destini della battaglia.

La "battaglia del Frigido", da molti considerato uno dei più singolari scontri terrestri della storia romana, battezzata in seguito anche "battaglia della Bora", rappresenta l'ennesimo scontro fra Oriente ed Occidente e fra due religioni, ma la peculiarità di fondo è che un evento meteorologico, allora quasi imprevedibile, quale l'inizio di una tempesta di Bora, possa aver influito in maniera così determinante sui destini del mondo.

Questa vittoria (o a seconda dei punti di vista, sconfitta) militare inferta (o subita) da parte del più famoso vento italiano, portò con sé altre conseguenze a lungo termine per le nostre terre. Fu la prima volta che intere bande di barbari furono arruolate nelle armate romane dando inizio a quella fase di "barbarizzazione" dell'esercito che a lungo andare si dimostrerà alquanto deleteria. L'accesso alle pianure della provincia *Venetia et Histria*, inoltre, rimase da quel giorno completamente indifeso: Claudiano scrive, infatti, che i *Claustra Alpium Iuliarum* furono demoliti nel corso della battaglia. Tale aspetto si dimostrerà determinante negli anni successivi con l'inizio delle invasioni barbariche, che sfoceranno nella distruzione della città di Aquileia ad opera di Attila nel 454.

Quanto appena narrato rappresenta sicuramente una delle prime cronache scritte riferite al vento simbolo del Friuli Venezia Giulia che, in tempi più recenti, ha visto crescere una moltitudine di modi alternativi per raccontarne le sue incursioni: cartoline, libri, articoli di giornale, documentari storici, arte, fotografie, letteratura, mostre e progetti di vario genere hanno disegnato la Bora tracciandone tutte le prospettive possibili, sempre con il fermo intento di trasmettere, a chi la Bora non la conosce, quale sia la vera anima di questo vento così particolare, e l'intimo rapporto che lo lega a chi è nato in queste terre.

#### **BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE**

Claudio Claudiano; *De Probino et Olybrio Consulibus* e *De Tertio Consulatu Honorii*

Alberto Magnani; *La battaglia del Frigido (5-6 settembre 394)*; *Rivista Italiana Difesa*, agosto 2001, pagina 94-97



## Bora di oggi

Come abbiamo appena visto, nella storia meteorologica della regione Friuli Venezia Giulia, le irruzioni fredde di origine continentale, accompagnate da improvvise tempeste di Bora e nevicata su parte del territorio regionale, meritano dei posti di tutto rilievo per l'importanza delle conseguenze sul territorio: ai disagi del vento, specialmente nella zona di Trieste, si sommano i disagi della neve, spesso accompagnata dal ghiaccio.

Una di queste circostanze si è verificata il 9 e 10 marzo 2010, che ha portato il vento di Bora a superare il record storico di raffica da quando vengono effettuate misurazioni alla stazione di Trieste molo Fratelli Bandiera dell'OSMER ARPA FVG: ben 152 km/h!

### ANALISI SINOTTICA DELL'EVENTO DEL 10 MARZO 2010

L'evento di Bora del 9-10 marzo 2010 ha trovato origine dalla discesa di una profonda depressione contenente aria artica verso le latitudini meridionali europee. Tale dinamica ha provocato una ciclogenesi mediterranea che, tra il 9 e il 10 marzo, è risalita verso nord-est portandosi sulla penisola italiana. Il forte gradiente barico ha determinato la genesi del forte vento di Bora, mentre il gradiente di temperatura equivalente potenziale, segno del fronte occluso sul settore di levante della depressione, ha determinato delle nevicata nel pomeriggio del 10. La configurazione non è nuova né inusuale, ma in quest'occasione il gradiente barico, l'estensione dell'area depressionaria, lo spessore della massa d'aria hanno sospinto il vento di Bora a velocità ben superiori alla norma.

Il vento di Bora ha soffiato con intensità eccezionale sia sul golfo di Trieste sia sul resto della costa ed in pianura, segnatamente sul Monfalconese e sul Cividalese.

Dalla figura 5 (pagina seguente) si notano le zone di maggiore intensità del vento, sul golfo e sulla fascia orientale allo sbocco delle Valli del Natisone, intervallate da una zona a bassa ventosità intorno a Cervignano, sulla Bassa. La raffica massima registrata dall'anemometro dell'OSMER ARPA FVG alle 6:30 UTC è stata di 152 km/h, valore ampiamente confermato dal vicino anemometro dell'ISMAR CNR che ha misurato 162 km/h. Anche quanto a velocità media oraria l'episodio si colloca ai vertici della statistica, con valori intorno ai 100 km/h per 3 ore consecutive. Andando a guardare i record del XX secolo, sono state comunque registrate raffiche anche superiori, su tutte i 173 km/h del 2 febbraio del 1954 sulla torre dell'allora Istituto Talassografico (oggi ISMAR CNR), valore immediatamente precedente la rottura dello strumento. Un altro caso di Bora degno di nota si ebbe il 10 febbraio 1956 in cui si raggiunsero i

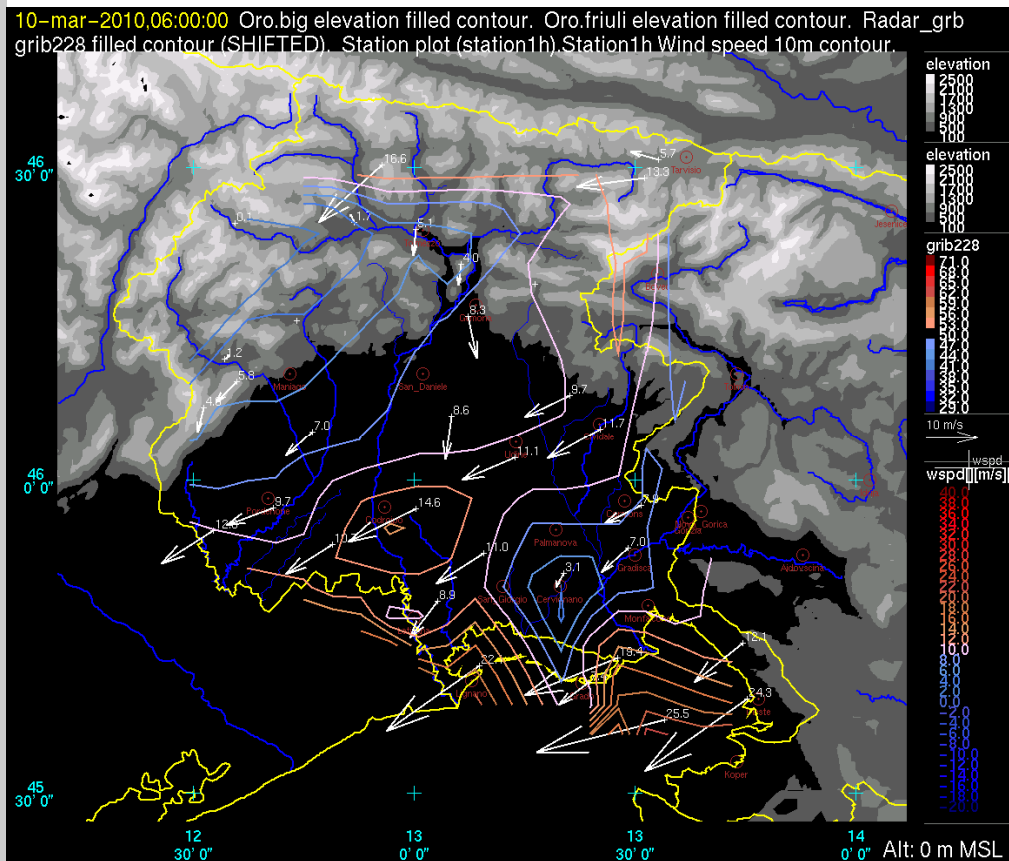


Figura 5

156 km/h associati a una temperatura di  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , evidentemente con una situazione ben più severa di quella di quest'anno, ove la temperatura si è sempre mantenuta intorno o al di sopra degli  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### ANALISI DI ALCUNE CARATTERISTICHE DELLA BORA

In presenza di un evento classificabile come "record", sorge subito il desiderio di proporre un raffronto ed una statistica che si estenda nel passato fino a grandezze "climatiche", per quanto possibile. La determinazione di un *trend* climatico relativo alla Bora è però di difficile elaborazione, in quanto nel corso degli anni le rilevazioni del vento sono cambiate sensibilmente per quanto concerne sia i punti di rilevamento sia le tecnologie di misura ed acquisizione

dei dati. Tuttavia è disponibile una serie temporale discretamente lunga (15 anni) presso la stazione meteorologica di Trieste Molo F.lli Bandiera dell'OSMER ARPA FVG, di cui 12 anni con uno strumento adeguato alla misura dei venti a raffiche quale è la Bora: si tratta di un anemometro sonico *Handar*, dotato di tre punti equidistanti di emissione-ricevimento di onde acustiche le quali, interagendo con l'aria che passa nel volume compreso tra tali punti, vengono distorte. Tale distorsione è proporzionale alla velocità del vento e quindi permette una misura precisa e, soprattutto, istantanea del vento, senza gli errori dovuti all'inerzia delle coppe degli anemometri tradizionali. Tale vantaggio è più evidente nella misura delle raffiche, che per il loro carattere "istantaneo" richiedono uno strumento il meno possibile affetto da distorsioni dovute all'inerzia della misura.

Andando a raggruppare in un diagramma tutti i dati di raffica massima registrati giorno per giorno e relativi a venti provenienti, nel primo quadrante, tra  $55^\circ$  e  $90^\circ$  (direzioni tipiche della Bora) si ottiene una cosiddetta "serie temporale" in cui in ascissa ci sono gli anni ed in ordinata la velocità di dette raffiche (in m/s, vedi figura 6). Le tre linee colorate rappresentano invece il vero e proprio trend. Ne sono disegnate tre perché una, quella verde più bassa, rappresenta il trend di tutti gli eventi di raffica con velocità inferiore a 20 m/s (quindi gli

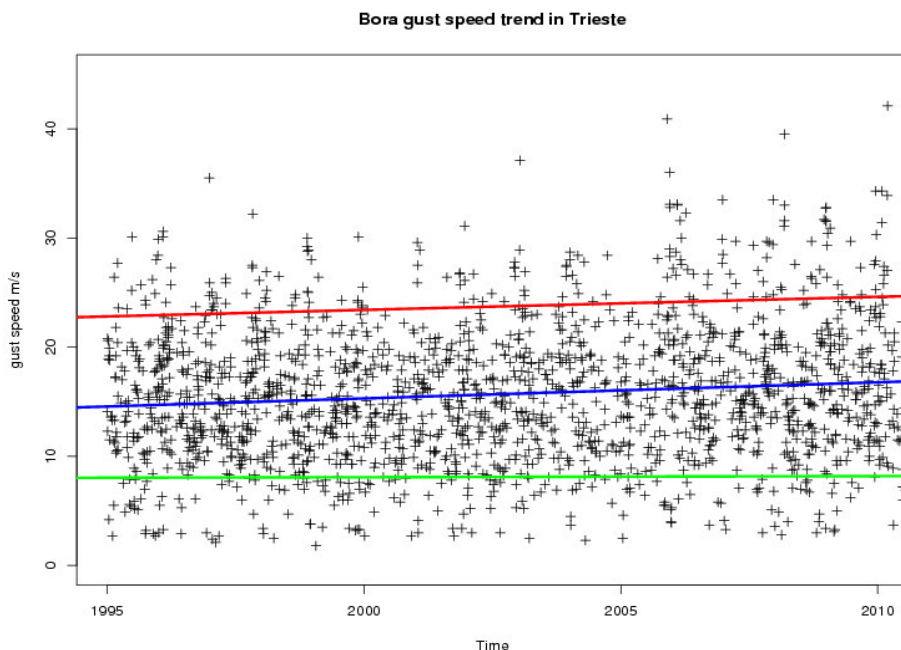


Figura 6

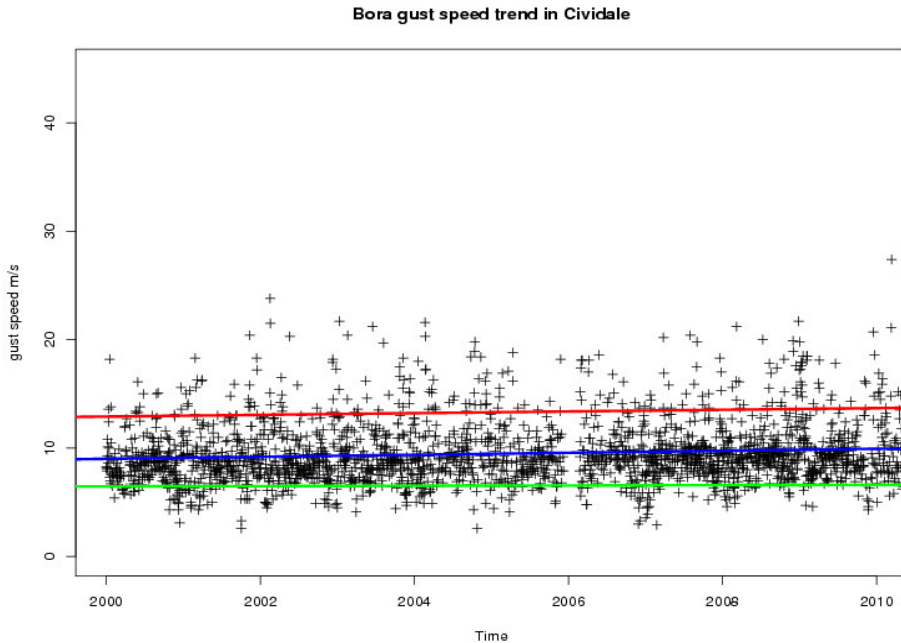


Figura 7

episodi di Bora moderata o in generale di Borino, tra cui le brezze estive che rinfrescano l'aria ma poco hanno a che fare con la Bora vera e propria); la linea superiore, di colore rosso, rappresenta il trend degli eventi con raffiche superiori a 20 m/s, quindi associati a Bora forte e molto forte, mentre la linea centrale, quella blu, rappresenta il trend di tutti gli eventi. Si nota come il trend delle "basse velocità" sia più o meno costante nel tempo, mentre il trend delle alte velocità sia crescente, tanto da condizionare il trend di tutto il campione. Significa che negli ultimi 15 anni gli episodi di Bora forte sono andati aumentando in frequenza e velocità.

Andando a creare la medesima serie temporale su un'altra stazione del Friuli Venezia Giulia, Cividale (figura 7), collocata allo sbocco delle valli del Natisone (la distribuzione della velocità della Bora sul territorio regionale ha due picchi, uno sul golfo di Trieste ed uno, secondario, sulle zone orientali della pianura, come si vede in figura 5), si nota che le linee di trend non manifestano differenti pendenze, pertanto non si può ricondurre un trend crescente alle sole raffiche più forti. Il discriminante è a 10 m/s in quest'ultimo caso, in quanto la velocità raggiunta dalla Bora a Cividale generalmente è alquanto inferiore che a Trieste.

Analizzando invece la distribuzione delle raffiche per classi di velocità, si ottiene come da figura 8 un istogramma che manifesta per Trieste frequenze elevate tra i 10 e i 20 m/s e poi frequenze via via calanti all'aumentare della velocità: il picco di frequenze può rappresentare i numerosi episodi di Bora moderata presenti in tutte le stagioni, a cui si sommano gli episodi di Borino caratteristici del semestre caldo e innescati da una forzante termica simile alle brezze, capace di spostare piccole masse d'aria localmente a velocità abbastanza contenute, mentre le raffiche più forti sono l'impronta della Bora vera e propria forzata da configurazioni sinottiche più rilevanti e con spostamenti di masse d'aria più consistenti a velocità maggiori.

La medesima analisi riferita alla stazione di Cividale (figura 9) mostra una distribuzione simile alla "gamma distribution" ma con un picco più stretto e centrato appena al di sotto dei 10 m/s, mentre vi è una distribuzione leggermente superiore alle attese di quella teorica per velocità crescenti, segno degli episodi di Bora più forte.

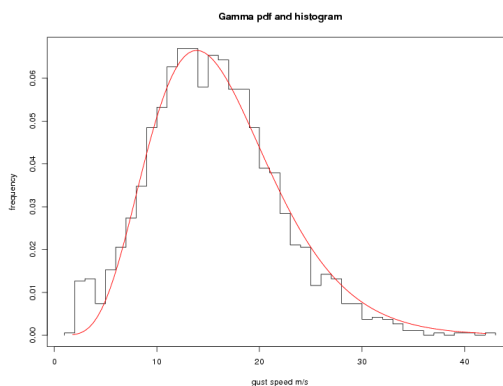


Figura 8

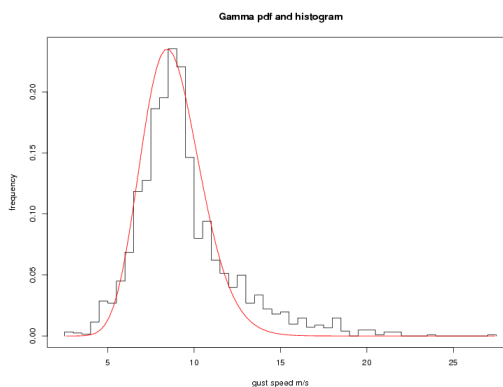


Figura 9

## Venti extraterrestri

Il vento su pianeti ed esopianeti

**Mauro Messerotti** <sup>(1)(2)</sup>

(1) *INAF – Osservatorio Astronomico di Trieste*

(2) *Dipartimento di Fisica – Università di Trieste*

### SOMMARIO

Il vento è un fenomeno che ha carattere universale. Si manifesta infatti non solamente nell'atmosfera terrestre, ma anche nelle atmosfere di altri pianeti del Sistema Solare e nelle atmosfere di esopianeti che fanno parte di sistemi planetari esterni. Spesso i venti planetari ed esoplanetari presentano caratteristiche estreme come indicano le più recenti osservazioni astronomiche, che forniscono indicazioni fisiche sulla meteorologia e sul clima di questi ambienti alieni.

### VENTI STELLARI

Le stelle sono sfere di plasma (gas altamente ionizzato, statisticamente neutro, ottimo conduttore di corrente elettrica, che esibisce un comportamento collettivo), la cui struttura è determinata dalla massa iniziale del loro nocciolo e dalla presenza di reazioni di fusione nucleare che vi avvengono via via che la stella evolve.

L'energia nucleare prodotta nel nocciolo determina la pressione del gas che si contrappone all'attrazione gravitazionale originata dalla massa del gas: quando si bilanciano la stella è in equilibrio stabile, quando prevale la prima la stella si espande verso l'esterno aumentando il raggio, mentre quando prevale la seconda la stella collassa verso il centro diminuendo il raggio.

Si osservano così, ad esempio, stelle nane stabili per miliardi di anni, che trasformano idrogeno in elio nel nocciolo come il nostro Sole, stelle giganti rosse, che hanno aumentato il loro raggio a molte volte quello del Sole per dissipare l'enorme quantità di energia prodotta nel nocciolo da combustibili nucleari come l'elio, fino ad espellere buona parte della loro atmosfera in modo esplosivo (le *supernovae*), nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri ossia

oggetti dove la materia è compattata a stati fisici particolari in uno spazio via via più ridotto ad opera del collasso gravitazionale, estremo nel caso dei buchi neri.

Il Sole emette nello spazio interplanetario un flusso continuo di particelle (protoni, elettroni e ioni) che si espande radialmente dalla corona solare, l'atmosfera esterna del Sole, a formare il "vento solare" con un tasso di 6,7 miliardi di tonnellate all'ora. Come risulta dalle misure effettuate dalla sonda interplanetaria NASA/ESA Ulysses (Figura 1), si tratta di un vento che assume velocità supersoniche comprese tra 360.000 e 3.600.000  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  quando il Sole è, rispettivamente, quieto e attivo. Nonostante la sua elevata temperatura cinetica (da 100.000 a più di 1 milione di gradi assoluti) e velocità, la bassissima densità (da 1 a 36 particelle per centimetro cubo) determina una pressione esercitata compresa tra 1 e 12 miliardesimi di pascal (sulla Terra un vento di 100  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  ha una pressione superiore a 400 pascal).

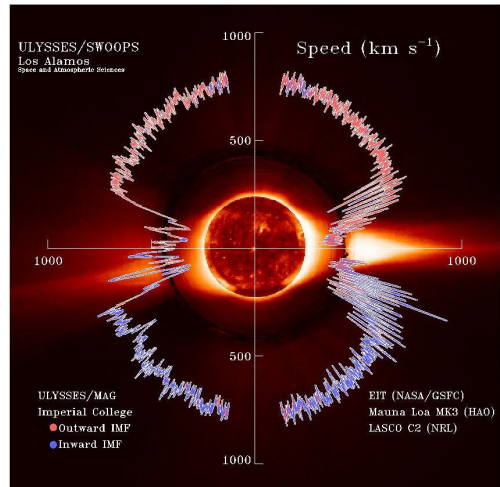


Figura 1

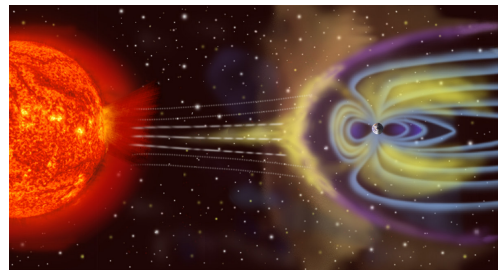


Figura 2

Le particelle elettricamente cariche del vento solare non possono attraversare le linee di forza di un campo magnetico ed esercitano quindi una pressione sulla magnetosfera dei pianeti, che viene compressa nella direzione di provenienza del flusso di particelle e si espande nella direzione opposta (Figura 2). Il vento solare scherma il Sistema Solare deviando i Raggi Cosmici, particelle di altissima energia accelerate, ad esempio, nelle esplosioni di *supernovae* che avvengono nella nostra galassia; la schermatura è più efficace quando il vento solare è più denso e veloce nella fase di massima attività solare. La regione di influenza



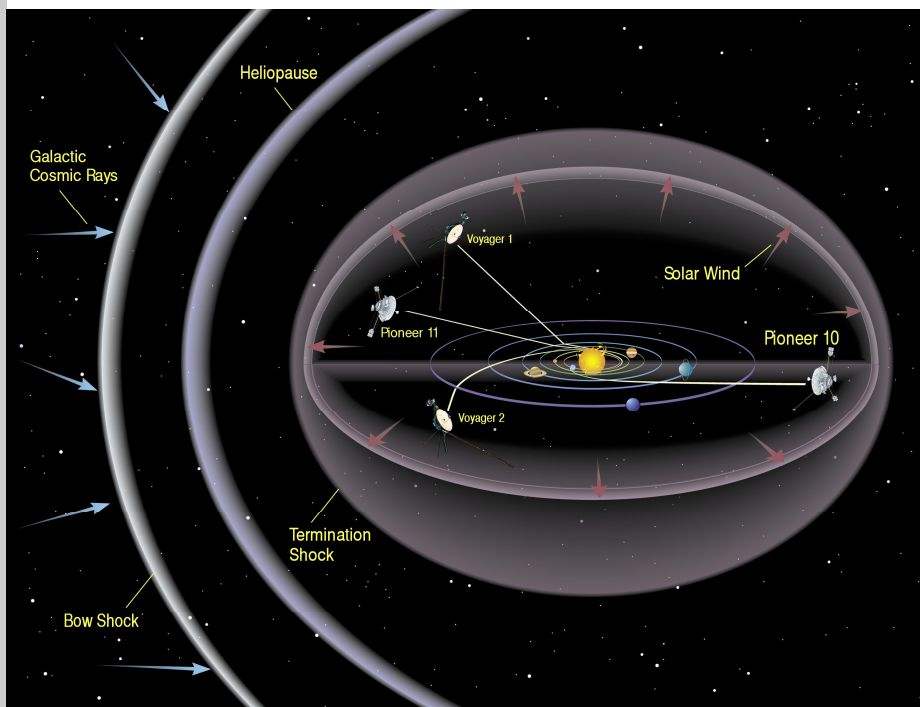


Figura 3

del vento solare è una specie di bolla chiamata "eliosfera" (Figura 3) che si estende fino ad 85 unità astronomiche di distanza (12,72 miliardi di chilometri, più di 1 anno — luce), dove l'espansione del vento solare viene arrestata dalla pressione del vento interstellare.

Stelle massicce molto luminose emettono tipicamente venti stellari con un tasso di perdita di massa inferiore a quello del Sole, ma con velocità anche superiori a  $7 \text{ milioni di km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

I venti stellari sono quindi fenomeni che si osservano a grandissima scala spaziale, trasportano campi magnetici ed hanno temperature cinetiche molto elevata, ma densità particolarmente basse, quindi la loro "forza" espressa dalla pressione che esercitano su una superficie è infinitesimamente piccola.

### VENTI PLANETARI

Il vento si manifesta in misura più o meno sensibile su ogni pianeta dotato di atmosfera. Venti sono stati osservati nelle

atmosfera di Venere, Marte, Giove, Saturno e la sua luna Titano, Urano e Nettuno.

Le sue caratteristiche (direzione, velocità, pressione, durata, tipologia) dipendono da vari fattori, quali la composizione chimica, la densità e la massa globale del volume di gas atmosferici, la dinamica atmosferica (a sua volta funzione delle caratteristiche orbitali del pianeta) e la geomorfologia del pianeta, che determinano la velocità delle variazioni locali e globali della pressione atmosferica alla base della generazione del vento.

L'atmosfera di Venere è costituita per la maggior parte (96,5%) da anidride carbonica ed ha una densità alla superficie di circa  $65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La velocità del vento rilevata alla superficie è piuttosto bassa ( $1,08\text{-}3,60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) come la sua pressione (circa  $3\text{-}33 \text{ Pa}$ ).

Oggi l'atmosfera di Marte è costituita per la maggior parte (95,32%) da anidride carbonica, ha una densità molto bassa ( $0,020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ed esercita una pressione da  $4,0 \text{ hPa}$  ad  $8,7 \text{ hPa}$ . La velocità misurata dai Viking lander era di  $7,2\text{-}25,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  in estate,  $18\text{-}36 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  in autunno e  $61,2\text{-}108 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  nelle tempeste di sabbia e nei "diavoli di polvere" simili ai tornado terrestri (Figura 4). Anche i venti di Marte esercitano una pressione molto bassa ( $0,04\text{-}9,00 \text{ Pa}$ ).

L'atmosfera di Giove è composta per la maggior parte da idrogeno molecolare (89,8%), con una densità di  $0,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  al livello corrispondente a  $1000 \text{ hPa}$  ed esercita una pressione alla superficie molto maggiore di  $1.000.000 \text{ hPa}$ . La velocità del vento arriva a  $540 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a latitudini inferiori a  $30$  gradi ed a  $144 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a latitudini superiori, mentre la Grande Macchia Rossa (GMR) (Figura 5), un anticiclone che si estende fino a  $40.000 \text{ km}$  in longitudine e fino a  $14.000 \text{ km}$  in latitudine, presenta velocità al bordo esterno di  $432 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Questi venti esercitano pressioni maggiori, comprese tra  $128$  e  $1.800 \text{ Pa}$  nelle fasce atmosferiche a

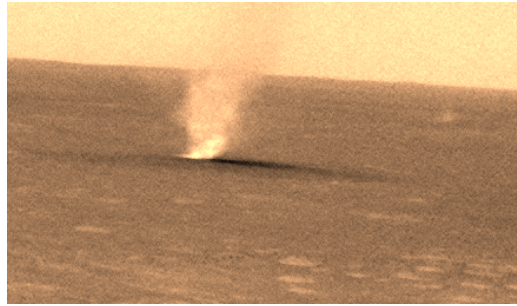


Figura 4

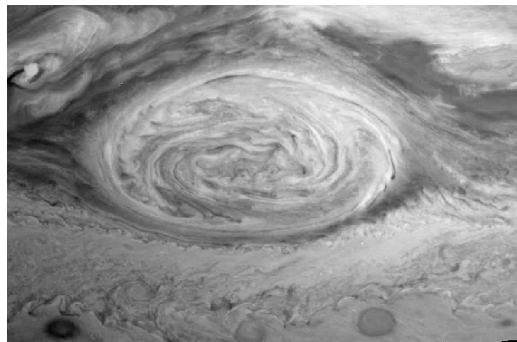


Figura 5

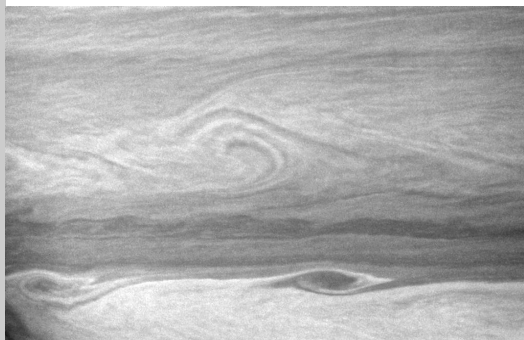


Figura 6

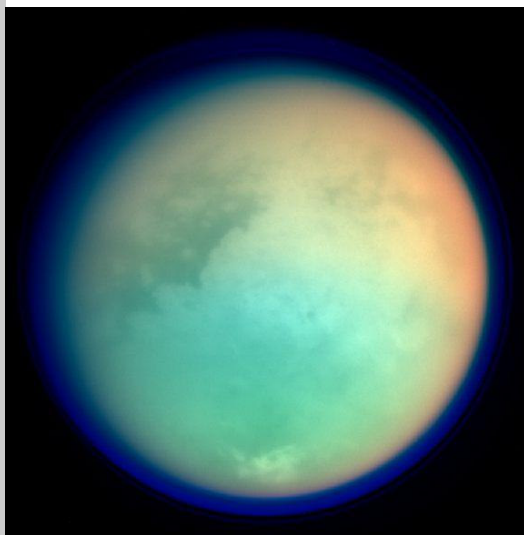


Figura 7

latitudine maggiore e, rispettivamente, minore di  $30^\circ$ , 800 Pa nei jet e negli anticloni e 1.152 Pa nella GMR.

L'atmosfera di Saturno (Figura 6) è costituita per la maggior parte da idrogeno molecolare (96,3%) con una densità di  $0,19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  al livello corrispondente a 1.000 hPa ed esercita una pressione alla superficie molto maggiore di 1.000.000 hPa. La velocità del vento arriva a  $1.440 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a latitudini inferiori a  $30^\circ$  ed a  $540 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a latitudini superiori, con pressioni esercitate molto elevate corrispondenti a 15.200 Pa e, rispettivamente, 2.137 Pa.

Titano, il più grande satellite di Saturno (2.575 km di raggio) possiede un'atmosfera estesa (Figura 7) composta per la maggior parte da azoto (98,4%), che esercita una pressione alla superficie di 1.467 Pa. Nel 2005 la sonda NASA/ESA/ASI Huygens ha attraversato l'atmosfera fornendo varie informazioni chimico-fisiche

prima di schiantarsi sulla superficie. La densità a 150 km di altezza è di circa  $0,001 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e la velocità del vento di  $360 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , mentre a 0 km è circa  $10,00 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e la velocità del vento di 3,60 km/h. La pressione esercitata da questi venti è di soli 5 Pa.

L'atmosfera di Urano è composta per la maggior parte da idrogeno molecolare (82,5%) con una densità di  $0,42 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  al livello corrispondente a 1.000 hPa ed esercita una pressione alla superficie molto maggiore di 1.000.000 hPa. La velocità del vento arriva a  $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  con una pressione di 13.125 Pa, quindi molto elevata.

L'atmosfera di Nettuno è composta anch'essa per la maggior parte da idrogeno molecolare (80,0%) con una densità di  $0,45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  al livello corrispondente a 1.000 hPa ed esercita una pressione alla superficie molto maggiore di 1.000.000 hPa. La velocità del vento arriva a  $2.088 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , ad esempio nella Grande Macchia Scura (Figura 8), con una pressione elevatissima di 75.690 Pa.

Nei pianeti di tipo terrestre, i venti non sono molto veloci e la loro "forza" è piuttosto bassa se confrontata con quelli terrestri. Venti significativi si osservano invece nei pianeti gassosi di tipo gioviano, che possono presentare velocità e pressioni anche molto elevate, in particolare nei fenomeni ciclonici ed anticiclonici maggiori.

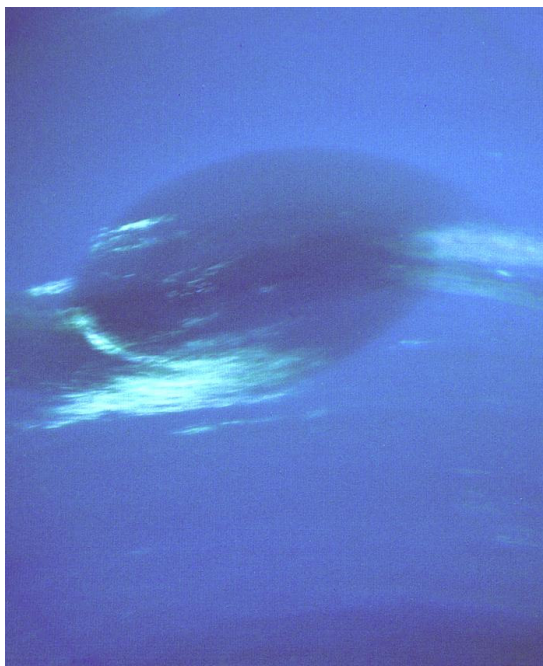


Figura 8

### VENTI ESOPLANETARI

Al 1 Novembre 2010 sono stati identificati con diverse tecniche osservative (velocità radiali e astrometria, microlenti, immagini, *timing*) 494 pianeti orbitanti intorno a 416 stelle relativamente vicine al Sole. Di questi 416 sistemi planetari esterni al nostro Sistema Solare (sistemi esoplanetari) solamente 50 sono sistemi di pianeti multipli. Inoltre, 106 tra tutti gli esopianeti identificati transitano davanti alla stella centrale; ciò consente l'applicazione di sofisticatissime tecniche spettroscopiche per scoprire la presenza di gas ovvero di un'atmosfera e di studiarne la composizione ed i moti a cui sono soggetti, le cui velocità si ricavano dall'effetto Doppler (spostamento verso il rosso, allontanamento dall'osservatore, o verso il blu, avvicinamento ad

esso) delle righe spettrali caratteristiche di ciascun elemento chimico.

Intorno alla stella HD209458, stella nana gialla simile al Sole e distante 153,22 anni-luce, che si trova nell'area di cielo associata alla costellazione di Pegaso, è stato scoperto nel 1999 il primo pianeta transitante, denominato informalmente "Osiris" e quindi classificato come "HD209458b". Orbita molto vicino alla stella (a poco più di 7 milioni di chilometri di distanza; Mercurio dista in media 58 milioni di chilometri dal Sole) e con elevata velocità orbitale (il periodo di rivoluzione è di circa 3,5 giorni); le stime indicano una massa dell'ordine del 64% di quella del pianeta Giove ed un raggio pari ad 1,38 volte quello di Giove. E' un pianeta gassoso, nella cui atmosfera sono presenti varie molecole come idrogeno, acqua, sodio e monossido di carbonio.

Studiando la variazione delle caratteristiche delle righe spettrali durante il transito dell'esopianeta davanti alla stella centrale (rappresentato artisticamente in Figura 9), un team di

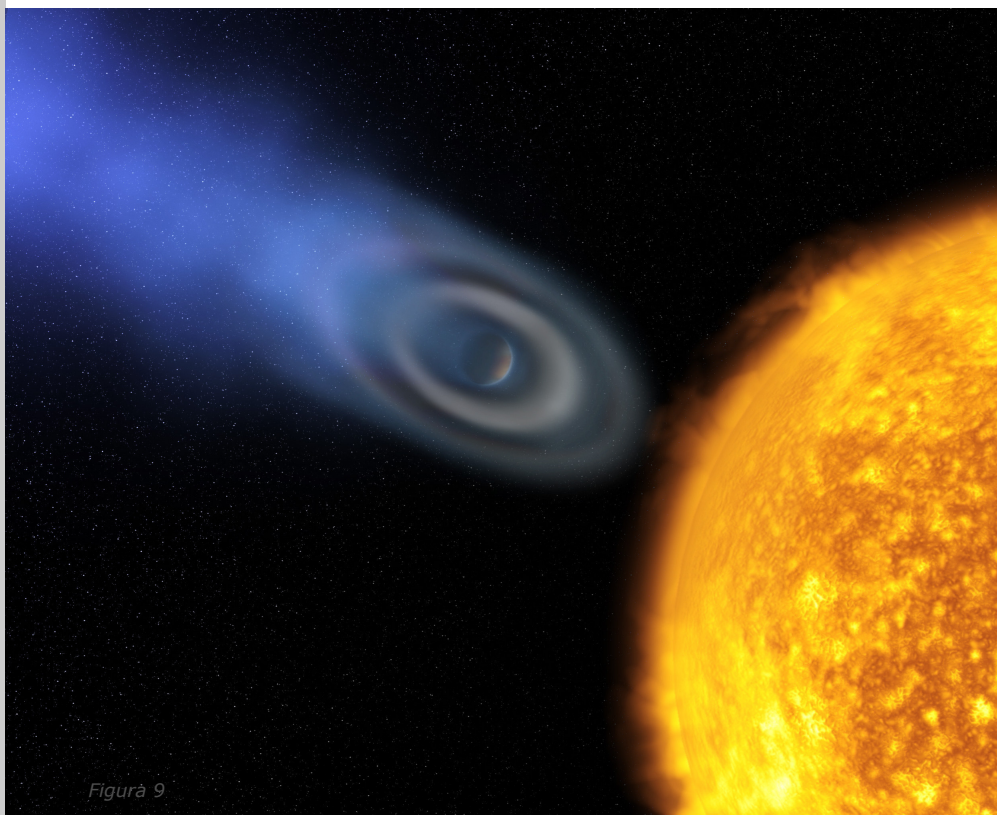


Figura 9

ricercatori ha potuto rilevare dei flussi di monossido di carbonio (CO) con elevatissime velocità ovvero venti fino a  $10.000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , la cui causa e la cui dinamica sono ancora ignote e richiedono ulteriori osservazioni ed approfondimenti. Si tratta infatti della prima osservazione dell'esistenza di venti in un esopianeta.

Si tratta di un primo tassello precursore della meteorologia e climatologia esoplanetarie, che si svilupperanno parallelamente al progredire delle tecniche osservative.



## Venti negli abissi

L'effetto del vento sui fondali del Mediterraneo: l'esempio del sud Adriatico.

**Fabio Trincardi**

CNR, ISMAR — Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Istituto di Scienze Marine

### RIASSUNTO

*Il Nord Adriatico, insieme al Golfo del Leone e all'Egeo, è una delle aree del Mediterraneo dove si formano acque particolarmente fredde e dense durante i periodi invernali. Queste acque fluiscono verso sud e, quando raggiungono la scarpata continentale pugliese, scendono per gravità fino a oltre 1000 m di profondità. Questo fenomeno è causato essenzialmente dal vento catabatico di Bora, e la presentazione ne analizza gli effetti sulla morfologia dei fondali (dove è possibile osservare con gli strumenti geofisici enormi dune di fango, comete ed aree di profonda erosione), e sugli ecosistemi marini profondi.*

### 1. INTRODUZIONE

Lungo i margini Mediterranei, in particolare nelle ampie piattaforme settentrionali del Golfo del Leone e dell'Adriatico, le acque dense si formano stagionalmente e fluiscono attraverso le adiacenti scarpate (Trincardi et al., 2007; Canals et al., 2009). Lo studio dei sedimenti trasportati da queste correnti, e delle strutture ad esse associate, ha permesso di analizzare la variazione nel tasso di formazione di acque dense in Mediterraneo in funzione di oscillazioni climatiche a scale che vanno dai cicli glaciali quaternari (Verdicchio et al., 2007) a quelle interannuali (Turchetto et al., 2007; Bignami et al., 2008).

La formazione di acque profonde è un aspetto sostanziale della circolazione marina globale (circolazione termoalina) e, quindi, dell'intero sistema climatico planetario (Broecker 1994). Essa avviene prevalentemente negli oceani, alle alte latitudini, attraverso meccanismi di convezione a grande scala o nelle aree di piattaforma



continentale a causa dell'aumento stagionale di densità delle acque, causato dal raffreddamento o dall'aumento di salinità (Civitarese et al., 2005; Bignami et al., 2008). Nel secondo caso, le acque fluiscono dalle piattaforme continentali, dove hanno origine, verso le aree più profonde dei bacini, attraversando le scarpate continentali e generando correnti profonde a *cascata* (dall'inglese *cascading currents*) che hanno massa e velocità tali da poter rimodellare il fondale. Variazioni nella frequenza e nell'intensità di queste correnti, legate a cambiamenti climatici a scala globale, possono influire drasticamente sulla presenza di ecosistemi e sulla quantità di carbonio immagazzinato nei bacini profondi (Canals et al. 2006).

Recenti studi in Adriatico Meridionale documentano l'impatto stagionale di acque di fondo dense che vengono generate sulla piattaforma continentale settentrionale a causa dei venti invernali e che fluiscono attraverso la scarpata apula fino a raggiungere il fondo del Sud Adriatico. Queste masse d'acqua dense trasportano grandi quantità di sedimento, materia organica e ossigeno verso le parti più profonde del bacino e promuovono lo sviluppo di complessi ecosistemi. La dinamica di formazione delle acque profonde è in stretta relazione con il sistema climatico e in particolare al forzante atmosferico e al bilancio idrologico. Lo studio delle strutture sedimentarie sulla scarpata (da 200 a 1200 m di profondità) permette di riconoscere variazioni nella direzione e velocità di queste correnti in relazione ai cicli climatici del Quaternario e fino a scale stagionali, contribuendo alla comprensione della dinamica di formazione delle acque dense in Mediterraneo.

## 2. EVOLUZIONE DI UNA CORRENTE A CASCATA ED IMPATTO SUL FONDO

L'analisi di una corrente a cascata e del suo impatto sul fondale può essere analizzato a diverse scale temporali: dal singolo evento, stagionale, all'avvicinarsi di numerosi eventi, per decine/centinaia di migliaia di anni. Alla scala di un singolo evento è possibile definire il ciclo di vita di una corrente a cascata in 3 fasi principali (Shapiro et al. 2003): 1) La formazione di acque dense sulla piattaforma, legata ad un intenso raffreddamento e/o evaporazione degli strati superficiali, e il conseguente sviluppo di un fronte di densità che le separa dalle acque circostanti; 2) Il trasporto delle acque dense attraverso un fondale inclinato (scarpata); 3) diffusione e mescolamento delle acque dense con quelle circostanti.

A differenza di altri processi nella colonna d'acqua, una corrente a cascata interagisce con la morfologia del fondo e, in caso di eventi particolarmente energetici, può modificarla sensibilmente.

Raggiungendo un'area di scarpata, le acque dense possono essere convogliate nella parte apicale di un canyon sottomarino, all'interno del quale fluiscono confinate in modo molto simile ad altri flussi gravitativi (noti in letteratura come *correnti di torbidità*). Nel suo percorso a contatto con il fondale, una corrente a cascata può erodere, trasportare e deporre sedimenti, formando depositi e strutture sedimentarie che rappresentano una sorta di prodotto statistico di numerosi eventi succedutisi durante un lungo intervallo di tempo (fino a decine/centinaia di migliaia di anni). Lo studio di questi depositi fornisce perciò importanti informazioni sulle variazioni delle correnti a cascata nel recente passato geologico.

### 3. CORRENTI A CASCATA IN ADRIATICO MERIDIONALE

Recenti studi, nell'ambito dei progetti europei EUROSTRATAFORM, HERMES e HERMIONE, hanno messo in evidenza come le correnti a cascata si formano nelle piattaforme del Golfo del Leone e del Nord Adriatico e, sulla base delle evidenze sedimentarie, come l'attività di queste correnti è variata durante il Quaternario, nel susseguirsi di lunghi periodi glaciali e interglaciali, simili all'attuale.

#### 3.1 *Generazione di Correnti a cascata in Adriatico*

Nell'ampia piattaforma Nord Adriatica, le acque subiscono intenso raffreddamento durante l'inverno dai forti venti catabatici di Bora. A causa della repentina diminuzione di temperatura le acque aumentano di densità e cominciano a fluire verso Sud lungo le coste italiane. Le Acque Dense Nord Adriatiche (NAdDW,  $\sigma = 29.9$ ), così formate, rappresentano le acque più dense di tutto il Mediterraneo. Verso la fine della stagione invernale, le NAdDW raggiungono il ciglio della scarpata adriatica meridionale, a sud del Gargano, e fluiscono obliquamente alla direzione di massima pendenza verso le parti più profonde del bacino (Figura 1). Il percorso delle NAdDW è evidenziato sul fondo da una serie di strutture sedimentarie grazie alle quali è possibile capire come le caratteristiche di questa massa d'acqua è variata nel corso del Quaternario (Trincardi et al., 2007).

Una parte di queste acque è intercettata dall'imboccatura del Canyon di Bari, un'incisione profonda oltre 400 m, che attraversa l'intera scarpata continentale. Qui le NAdDW vengono confinate, accelerate e convogliate verso le parti più profonde del bacino. Sulla scarpata dell'Adriatico è stato possibile osservare strumentalmente l'arrivo delle acque dense intercettate da una serie di correntometri e trappole di sedimento posizionate in prossimità del fondo per oltre

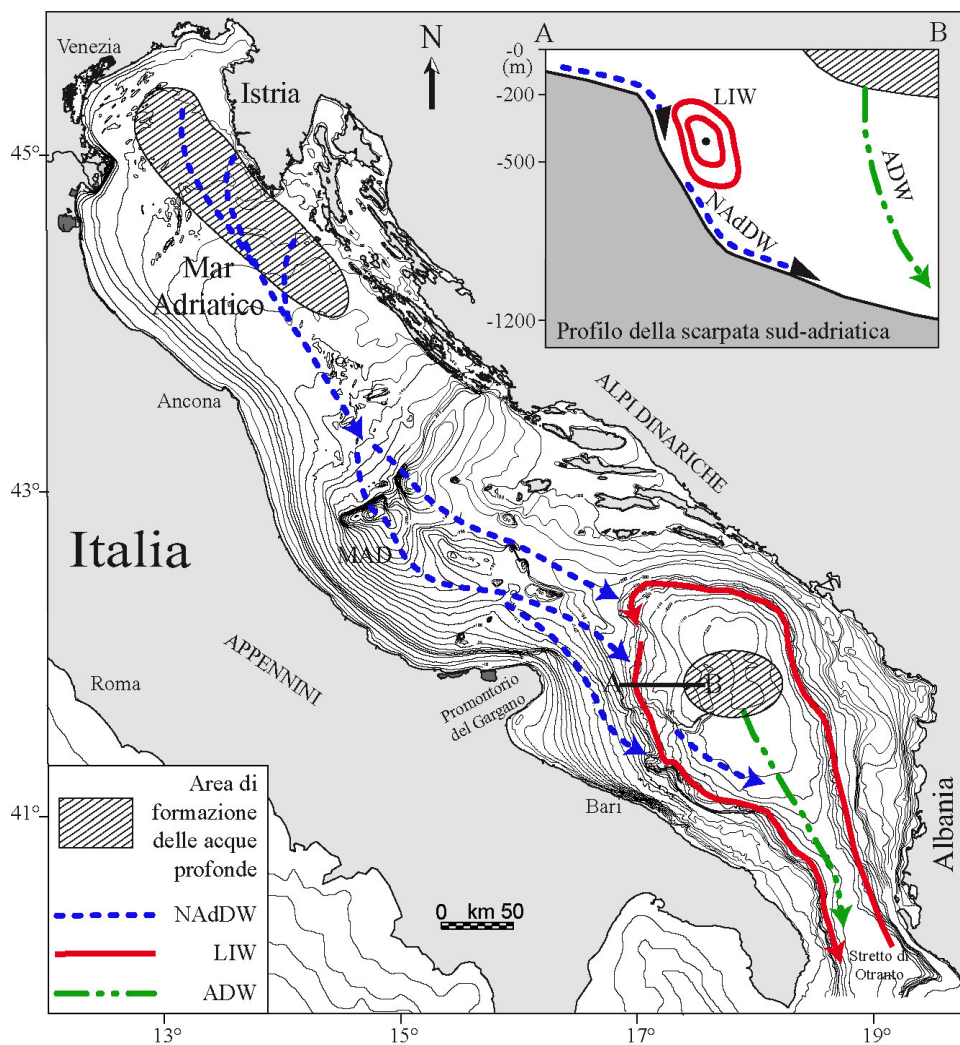


Figura 1

Morfologia e circolazione nel bacino adriatico. Le acque levantine intermedie (LIW) si muovono in senso antiorario tra 200 e 600 m di profondità. Le acque dense (NAdDW) si formano sulla piattaforma settentrionale per raffreddamento invernale e si immergono lungo la scarpata nel periodo di Marzo-Aprile con intensità variabile da un anno all'altro. Alle NAdDW si aggiungono le acque dense legate al processo di convezione oceanica nell'Adriatico meridionale che, con le prime, contribuiscono alla fuoriuscita di acque dense adriatiche (ADW). Le ADW procedono verso il fondo del Mediterraneo orientale controllandone la ventilazione (modificato da Verdicchio & Trincardi, 2006).

un anno (2004-2005), sulla scarpata e nel Canyon di Bari (Turchetto et al., 2007). La figura 2 documenta come, tra marzo e aprile, un aumento della componente della velocità delle correnti nella direzione di massima pendenza, corrisponde ad una diminuzione della temperatura della massa d'acqua. I picchi di velocità registrati superano i 60 cm/sec, ma lo studio fisico di particolari strutture sedimentarie (*furrows* e *comet marks*) fa supporre che alcuni eventi passati abbiano avuto intensità notevolmente maggiori di quelle registrate nel breve periodo (Verdicchio & Trincardi 2006).

### 3.2 Evidenze sedimentarie di correnti a cascata lungo la scarpata Sud Adriatica

Dati batimetrici e sismostratigrafici, oltre a numerosi campioni di sedimento, mostrano due registrazioni complementari dell'attività delle correnti dense sulla scarpata Sud Adriatica.

- Dove queste correnti hanno energia massima si osservano grandi strutture erosive quali: 1) lineazioni erosive (*furrows*) lunghe fino a 10km, parallele al flusso medio della corrente, 2) docce erosive di forma lunata (*scours*) profonde decine di metri e larghe più di 1 km e 3) strutture da ostacolo (*comet marks*) soprattutto in aree dove il fondo è particolarmente irregolare in presenza di frane

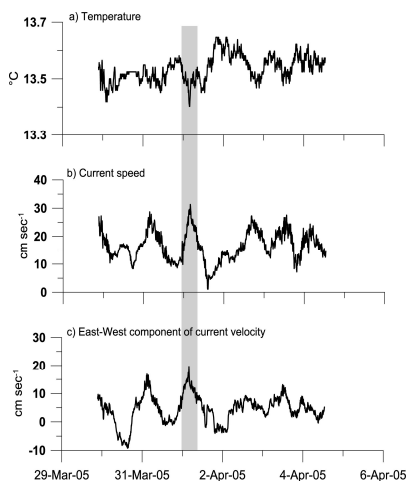


Figura 2  
diagramma con la  $T^{\circ}$  e la velocità delle acque di fondo al passaggio di una corrente a cascata sulla scarpata Adriatica Meridionale

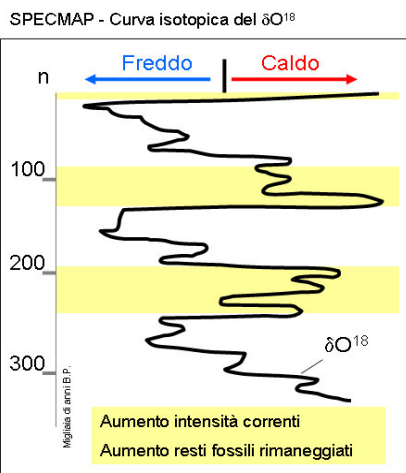


Figura 3  
curva degli isotopi dell'ossigeno per gli ultimi 300.000 anni con evidenziati i periodi interglaciali

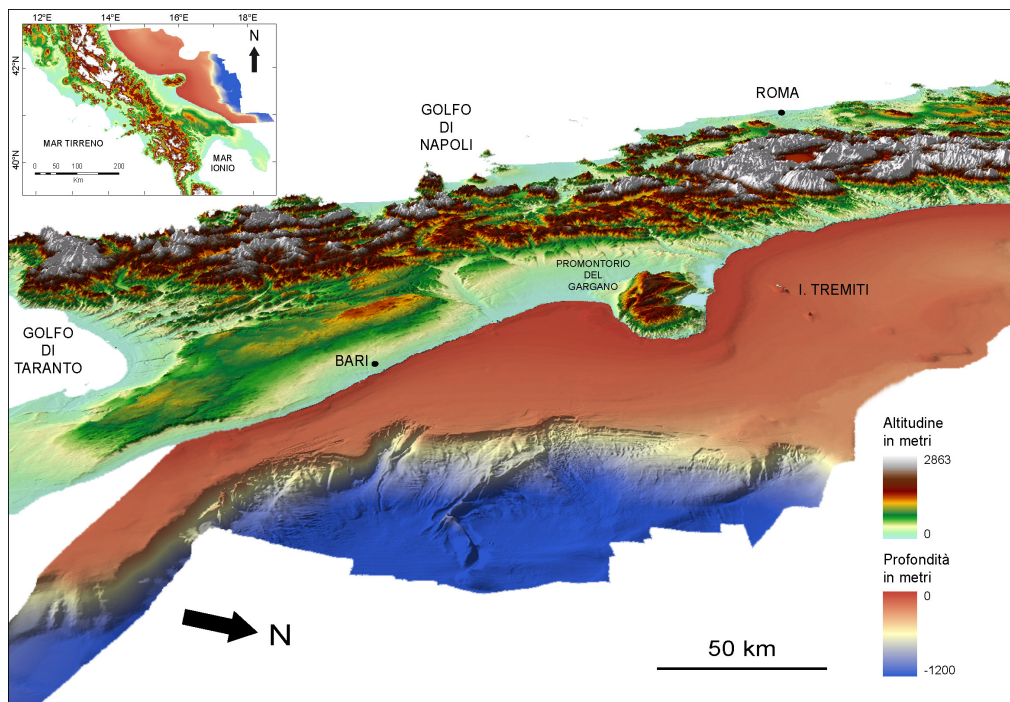


Figura 4  
Batimetria 3D, vista da est, della piattaforma e della scarpata continentale adriatica pugliese. Sullo sfondo il modello digitale del terreno della penisola italiana

a blocchi. Queste aree prevalentemente erosive danno informazioni sui processi nelle condizioni e lungo i percorsi di massima energia.

- Dove la corrente è debole, si depositano sedimenti fini che formano campi di dune di fango (*mud waves*) alte decine di metri e lunghe fino a diversi km. Queste dune tendono a migrare lentamente "in salita", cioè in senso opposto alla corrente. In pianta, le creste delle dune sono biforcute indicando che a scala di migliaia di anni le correnti variano non solo di intensità ma anche di direzione. Studi stratigrafici e sedimentologici di carote di sedimento, lunghe fino a 20m, prelevate su questi depositi hanno permesso una ricostruzione dell'intensità delle correnti durante gli ultimi cicli glaciali. Le curve isotopiche ottenute sui gusci di Foraminiferi appaiono in fase con quelle estratte dalle carote di ghiaccio della Groenlandia (GISP-GRIP), dove sono ben registrate le variazioni climatiche degli ultimi 100.000 anni. Durante gli interglaciali si osserva un significativo aumento di resti di

foraminiferi rimaneggiati dalla piattaforma e scarpata superiore che indica un'intensificata attività delle correnti rispetto ai periodi glaciali (Figura 3).

### *3.3 Evidenze sedimentarie di correnti a cascata nel Canyon di Bari*

Il canyon di Bari è una profonda incisione la cui storia è probabilmente cominciata più di 400 mila anni fa ed è continuata fino ai giorni nostri con la ricorrenza di fenomeni di trasporto legata a flussi gravitativi. Esso è formato da due rami con caratteristiche marcatamente erosive. Evidenze stratigrafiche, sedimentologiche e oceanografiche suggeriscono che attualmente le NAdDW vengono catturate e confinate entro il canyon dove raggiungono energia tale da erodere. Una volta uscite dal canyon perdono energia e depongono sedimento formando un campo di dune di fango a più di 1000 m di profondità (Figura 4).

## **4. CONCLUSIONI**

Gli studi condotti nell'ambito dei progetti europei EUROSTRATAFORM, HERMES e HERMIONE ha mostrato che:

1) durante i periodi glaciali l'impatto delle correnti dense sulla scarpata Adriatica fosse fortemente ridotto rispetto all'attuale, probabilmente perché l'ampia piattaforma nord adriatica era emersa per l'abbassamento eustatico (-120 m rispetto all'attuale)

2) durante l'attuale interglaciale le masse d'acqua dense attraversano la scarpata Adriatica generando correnti a cascata che hanno una forte variabilità stagionale (sono massime alla fine della stagione invernale) e interannuale (la stessa stagione in anni successivi è caratterizzata da grandi variazioni di velocità delle correnti)

3) nel breve periodo, i picchi di velocità misurati ( $60 \text{ cm sec}^{-1}$ ) corrispondono al passaggio delle acque più fredde (e dense) e presentano una direzione maggiormente trasversale alle isobate e in concordanza con gli assi delle strutture sedimentarie osservate.

Più in generale, lo studio combinato di aree prevalentemente erosive e deposizionali sui margini mediterranei consente rispettivamente di definire: 1) il rapporto tra correnti di fondo osservabili a scala annuale e possibili picchi di energia che lasciano evidenti impatti nel recente passato e 2) variazioni di crescita delle forme di fondo in aree di minore energia dov'è possibile ricostruire il regime delle correnti di fondo su scale di tempo geologiche (decine e centinaia di migliaia di anni). E' interessante osservare che i processi atmosferici che controllano la circolazione superficiale degli

oceani hanno, in questo caso, un effetto anche sul fondo marino determinando aree erosive o di accumulo preferenziale associato alla formazione di forme di fondo non dissimili da quelle osservabili nei deserti e causate dal vento.

## BIBLIOGRAFIA

- Broecker W.S. 1994. An unstable superconveyor. *Nature* Vol. 367: 414-415.
- Canals M, Puig P., deMadron X.D., Heussner S., Palanques A., Fabres J. 2006. Flushing submarine canyon. *Nature* Vol. 444: 354-357.
- Canals M., Danovaro R., Heussner S., Lykousis V., Puig P., Trincardi F., Calafat A.M., de Madron X.D., Palanques A., Sanchez-Vidal A., 2009. Cascades In Mediterranean Submarine Grand Canyons: *Oceanography*, Vol. 22/1, 26-43.
- Civitarese G., Gacic M., Cardin v., Ibello V. 2005. Winter convection continues in the warming Southern Adriatic. *Eos*, Vol. 86:445-451.
- Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V. 2003. Dense water cascading off the continental shelf. *J. Geoph. Res.* Vol. 108: 20/1-20/19.
- Trincardi F., Verdicchio G., Miserocchi S., 2007 Sea-floor evidence for the interaction between cascading and along-slope bottom-water masses. *J. Geophys. Res.* Vol. 112, F03011, doi:10.1029/2006JF000620.
- Trincardi, F., Foglini, F., Verdicchio, G., Asioli, A., Correggiari A., Minisini, D., Piva, A., Remia, A., Ridente, D., Taviani, M. 2007. The impact of cascading currents on the Bari Canyon System, SWAdriatic Margin (Central Mediterranean). *Mar. Geol.* Vol. 246: pp. 208-230.
- Turchetto M., Boldrin A., Langone L., Miserocchi S., Tesi T., Foglini F. 2007. The Bari Canyon System: interaction between mass-transport and along-slope processes on the SW-Adriatic Margin (Central Mediterranean). *Mar. Geol.*
- Verdicchio G. and Trincardi F. 2006. Short-distance variability in slope bed-forms along the Southwestern Adriatic Margin (Central Mediterranean). *Mar. Geol.* Vol. 234: 261-270.
- Verdicchio G., Trincardi F., Asioli A. 2007. Mediterranean bottom current deposits: an example from the Southwestern Adriatic Margin. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* Vol. 276: 199-224.
- Verdicchio G. and Trincardi F., 2008. Mediterranean shelf-edge muddy contourites: example from Gela and South Adriatic Basins. *Geo-Marine Letters*, Vol. 28: pp. 137-151. DOI 10.1007/s00367-007-0096-9.



Finito di stampare nel novembre 2010



