

Modellistica meteo-marina e previsione operativa

- studi ed implementazioni
- applicazioni
- didattica

Andrea Orlandi - ENEA SSPT-CLIMAR

Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

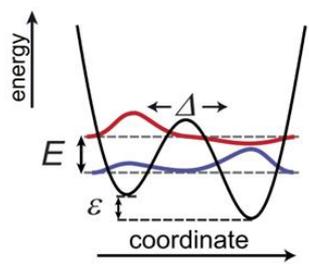
Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- Assimilazione Dati in RAMS e Validazione
- Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali
- Dinamica Navale et al.
- Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati
- Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima

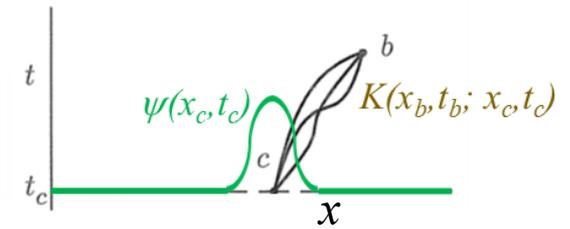
Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots

Meccanica Quantistica Computazionale applicata a Nanostrutture in Semiconduttore

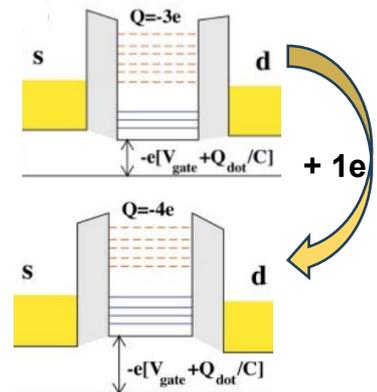
- **Tesi di Laurea in Fisica (1997, Uni-Fi): calcolo di energie e funzioni d'onda di singolo elettrone, con effetto tunnel, mediante Path Integral (R. P. Feynman)**



$$\psi(x_b, t_b) = \int_{-\infty}^{\infty} K(x_b, t_b; x_c, t_c) \psi(x_c, t_c) dx_c$$



- **Tesi di Dottorato in Fisica (2001, Uni-MoRe): calcolo di energie e funzioni d'onda di un sistema di elettroni interagenti, mediante Teoria dei Campi**



$$\hat{H} = \sum_{a\sigma} \epsilon_a \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{a\sigma} + \frac{1}{2} \sum_{abcd\sigma\sigma'} \underline{V_{abcd}} \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{b\sigma'}^\dagger \hat{c}_{c\sigma'} \hat{c}_{d\sigma}$$

Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots

Meccanica Quantistica Computazionale applicata a Nanostrutture in Semiconduttore

- **Tesi di Laurea in Fisica (1997, Uni-Fi): calcolo di energie e funzioni d'onda di singolo elettrone, con effetto tunnel, mediante Path Integral (R. P. Feynman)**

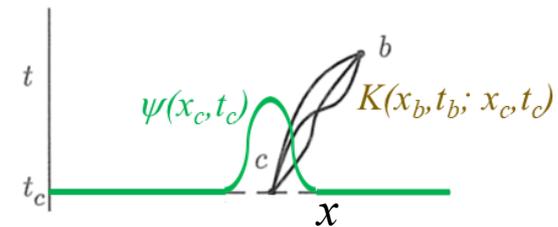
$$\psi(x_b, t_b) = \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{K(x_b, t_b; x_c, t_c)}_{\text{Path Integral}} \underbrace{\psi(x_c, t_c)}_{\text{Wavefunction}} dx_c$$

“La Meccanica Classica è l’Ottica Geometrica della Meccanica Quantistica”
 ↔ Hamilton 1830’s, Schrödinger 1920’s

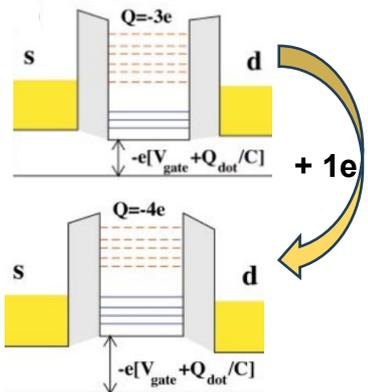
$$K(b, c) = \int_c^b e^{(i/\hbar)S[b,c]} \mathcal{D}x(t)$$

$$S[b, c] = \int_{t_c}^{t_b} L(x, \dot{x}, t) dt$$

Meccanica classica:
 ↔ **Minima Azione** $J=S/\hbar$



- **Tesi di Dottorato in Fisica (2001, Uni-MoRe): calcolo di energie e funzioni d'onda di un sistema di elettroni interagenti, mediante Teoria dei Campi**



$$\hat{H} = \sum_{a\sigma} \epsilon_a \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{a\sigma} + \frac{1}{2} \sum_{abcd\sigma\sigma'} \underline{V_{abcd}} \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{b\sigma'}^\dagger \hat{c}_{c\sigma'} \hat{c}_{d\sigma}$$

Rotazione di Wick:

$$t \leftrightarrow -i t$$

Equazione di Schrödinger

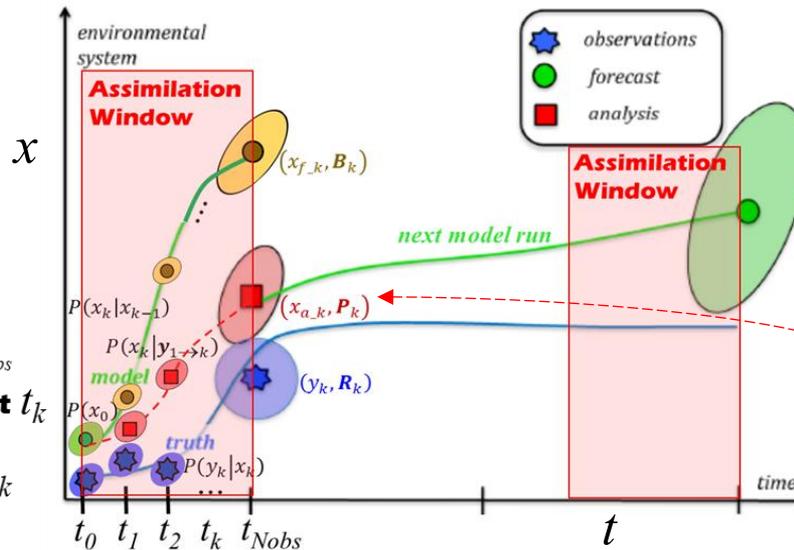


Equazione di Fokker-Planck

$$\psi(x_{N_{obs}} | \mathbf{y}_{1 \rightarrow N_{obs}}) \propto \prod_k K(x_k | x_{k-1}) \psi(x_a)$$

$$P(x_{N_{obs}} | \mathbf{y}_{1 \rightarrow N_{obs}}) \propto \prod_k P(y_k | x_k) \overbrace{P(x_k | x_{k-1}) P(x_0)}^{\text{Prior pdf}}$$

↑ **Posterior pdf**
↑ **Observations likelihood at t_k**
↑ **Prior pdf**
Markov sequence: transition probability i.e. propagator $t_{k-1} \rightarrow t_k$



A time sequence of observations $k = 1, 2, \dots, N_{obs}$

- $x_k =$ **unknown state at t_k**
- $y_k =$ **observations at t_k**

$$P(x_{N_{obs}} | \mathbf{y}) \propto \exp(-J)$$

*Analysis state through variational methods:
Max[P] ↔ Min[J]*

Fig. modified from: A. Carrassi, M. Bocquet, L. Bertino, G. Evensen, "Data Assimilation in the Geosciences. An overview on methods, issues and perspectives"

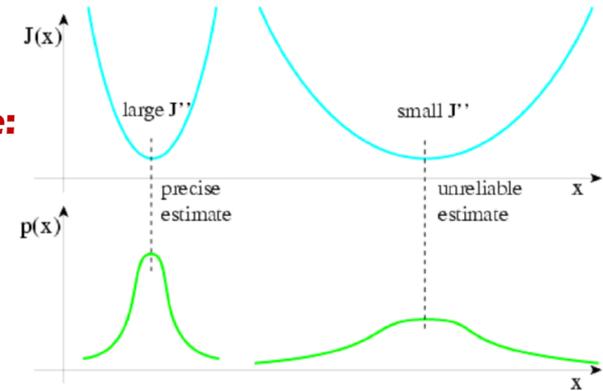
Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots



Data assimilation concepts and methods

- Assimilazione dati:

Assimilazione Variazionale:
 ↔ **Minima Azione J**



Meteorological Training Course Lecture Series

© ECMWF, 2002

38

- Tesi di Dottorato in Fisica (2001, Uni-MoRe):
 calcolo di energie e funzioni d'onda di un sistema di elettroni interagenti,
 mediante Teoria dei Campi

energia di un sistema di onde interagenti

$$\hat{H} = \sum_{a\sigma} \epsilon_a \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{a\sigma} + \frac{1}{2} \sum_{abcd\sigma\sigma'} \underline{V_{abcd}} \hat{c}_{a\sigma}^\dagger \hat{c}_{b\sigma'}^\dagger \hat{c}_{c\sigma'} \hat{c}_{d\sigma}$$

quantistica

classica

$$E = \int dx \mathcal{E} = \int dk_1 \omega_1 a_1 a_1^* + \int dk_1 dk_2 dk_3 \delta(k_1 - k_2 - k_3) \underline{V_{1,2,3}} [a_1^* a_2 a_3 + c.c.] + \text{LOT} + O(a^4)$$

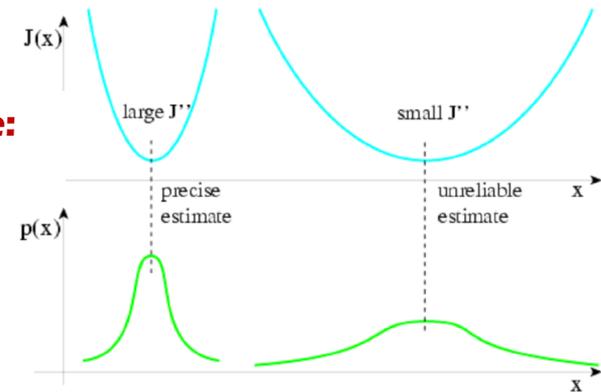
Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots



Data assimilation concepts and methods

- Assimilazione dati:

Assimilazione Variazionale:
 ↔ **Minima Azione J**



Meteorological Training Course Lecture Series

© ECMWF, 2002

38

- Modelli di terza generazione per la previsione del moto ondoso:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla \cdot \mathbf{v}_g N = \left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{\text{wind}} + \left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{\text{nonlin}} + \left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{\text{dissip}}$$

The wave model
 May 1995



By Peter Janssen

Meteorological Training Course Lecture Series

© ECMWF, 2003

REVIEWS OF
 GEOPHYSICS
 VOLUME 4 FEBRUARY 1966 NUMBER 1

$$\frac{\partial}{\partial t} a_1 + i\omega_1 a_1 = -i \int dk_2 dk_3 V_{1,2,3} a_2 a_3 \delta(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) + \dots +$$

$$-i \int dk_2 dk_3 dk_4 W_{1,2,3,4} \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) a_2^* a_3 a_4$$

Feynman Diagrams and Interaction Rules of Wave-Wave
 Scattering Processes

K. HASSELMANN

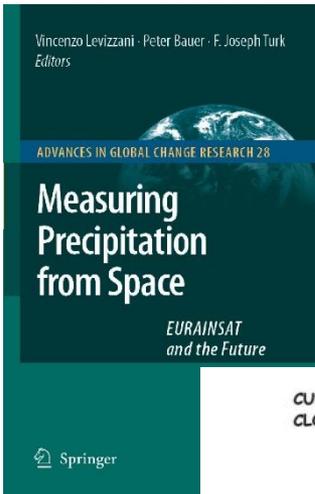
Institute of Geophysics and Planetary Physics,
 University of California, San Diego
 Institute of Naval Architecture, University of Hamburg

Indice

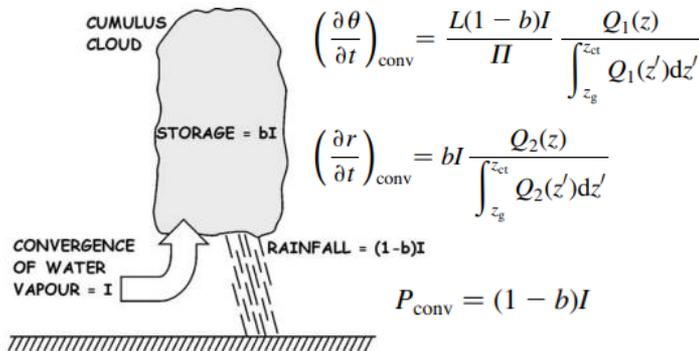
- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

Assimilazione Dati in RAMS e Validazione

Assimilazione dati in RAMS



EURAINSAT EU project (2001-2003)



Available online at www.sciencedirect.com



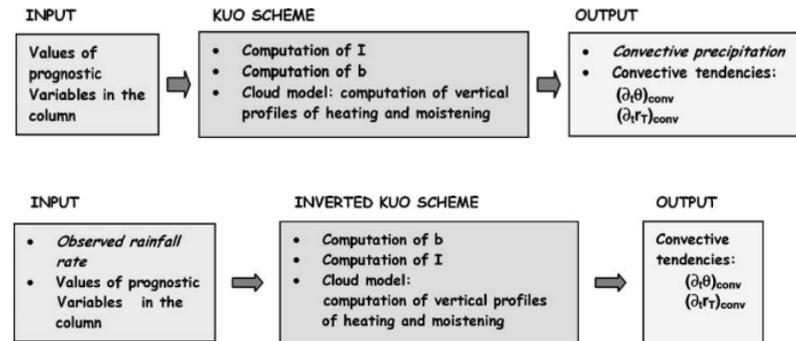
Journal of Hydrology 288 (2004) 20–35

Journal of Hydrology

www.elsevier.com/locate/jhydrol

Rainfall assimilation in RAMS by means of the Kuo parameterisation inversion: method and preliminary results

A. Orlandi^{a,b,*}, A. Ortolani^{a,b}, F. Meneguzzo^{a,b}, V. Levizzani^c, F. Torricella^c, F.J. Turk^d



Validazione

- Multicategorical Contingency Table → Statistical Skill Scores
- Model VS Observing Stations: representativeness problem

Operativo Onde LaMMA

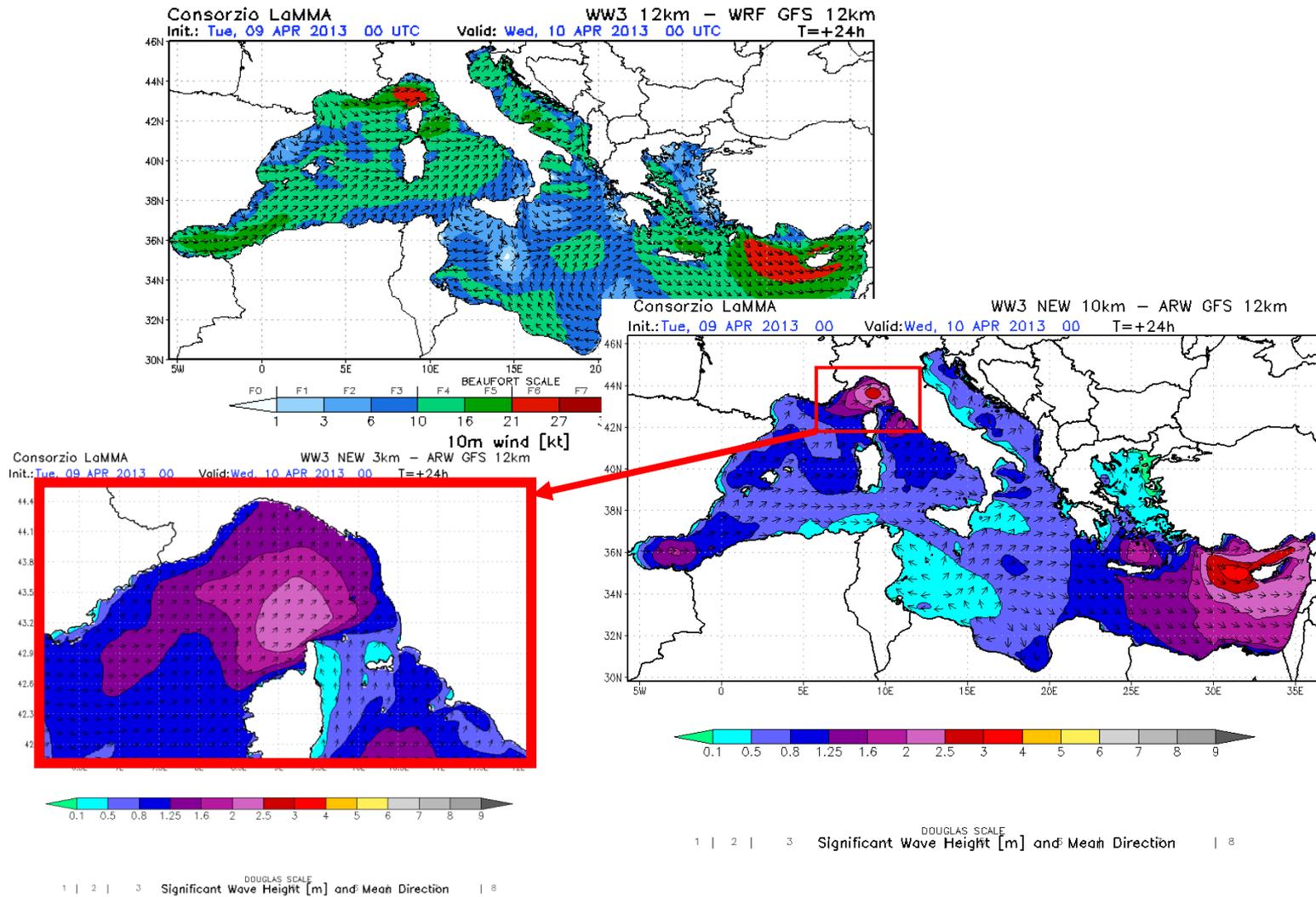
- Atmo-Waves-Ocean models on Med in CLEOPATRA FP5 project (2003-2005)

Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali

- Catena operativa LaMMA di previsione onda: Wavewatch III (~ 2004-2024)



Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali

- Catena operativa LaMMA di previsione onda: Wavewatch III (~ 2004-2024)

OPERATIONAL METEO-MARINE FORECASTING SERVICES

Pagine Web "Vento e Mare"

WAVES

Consorzio LaMMA ARW 12km - (ECM 25km)
 Iniz: Mon, 12 Oct 2015 00 UTC Valid: Thu, 15 Oct 2015 06 UTC T=+78h

Consorzio LaMMA WW3 3km - WRF ECMWF 3km
 Iniz: Sun, 11 Oct 2015 12 UTC Valid: Tue, 13 Oct 2015 13 UTC T=+49h

Consorzio LaMMA WW3 12km - WRF GFS 12km
 Iniz: Mon, 12 Oct 2015 00 UTC Valid: Fri, 16 Oct 2015 00 UTC T=+96h

Significant Wave Height [m] + Mean Wave Direction

Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali

Catena operativa LaMMA di previsione onda: Wavewatch III (~ 2004-2024)

Implementation of a Meteo-Marine Forecasting Chain and Comparison between Modeled and Observed Data in the Ligurian and Tyrrhenian Seas

A. Orlandi, C. Brandini, F. Pasi, S. Taddei, B. Doronzo, G. Brugnoli, G. Rossini, R. Benedetti, B. Gozzini, A. Ortolani, F. P. Vaccari

Marine Research at CNR", edito da E. Brugnoli, G Cavarretta, S. Mazzola, F. Trincardi, M. Ravaioli, R. Santoleri (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 2011), vol. DTA/06-2011, pp. 2301-2313

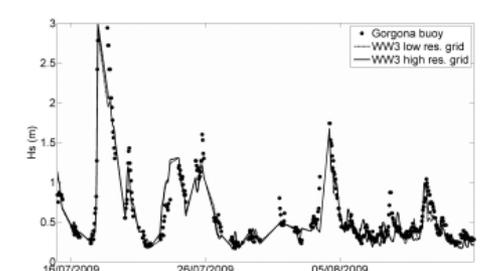
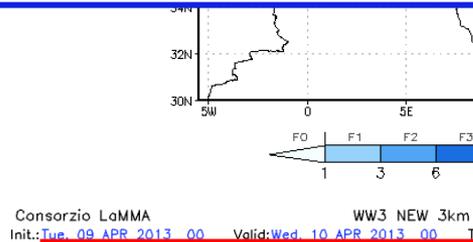


Figure 4: Time series of modelled and observed (Gorgona buoy) significant wave heights from 15 Jul 2009 to 15 Aug 2009.

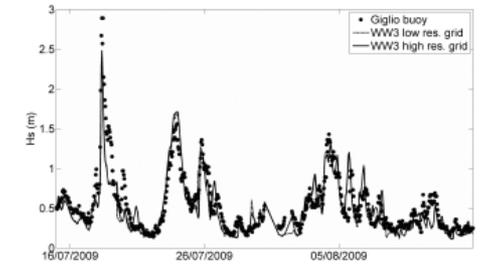
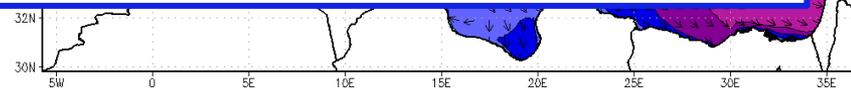
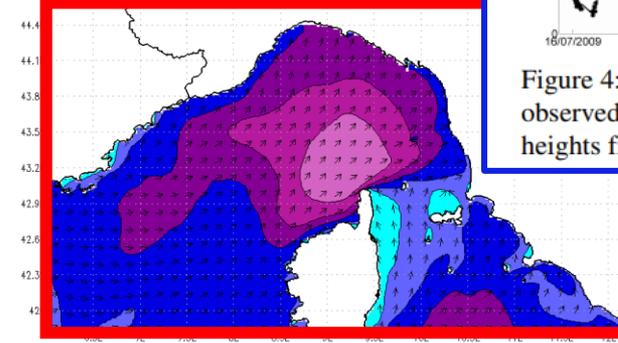


Figure 6: Time series of modelled and observed (Giglio buoy) significant wave heights from 15 Jul 2009 to 15 Aug 2009.



DOUGLAS SCALE
1 | 2 | 3 Significant Wave Height [m] and Mean Direction | 8

DOUGLAS SCALE
1 | 2 | 3 Significant Wave Height [m] and Mean Direction | 8

Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali

- Catena operativa LaMMA di previsione onda: Wavewatch III (~ 2004-2024)

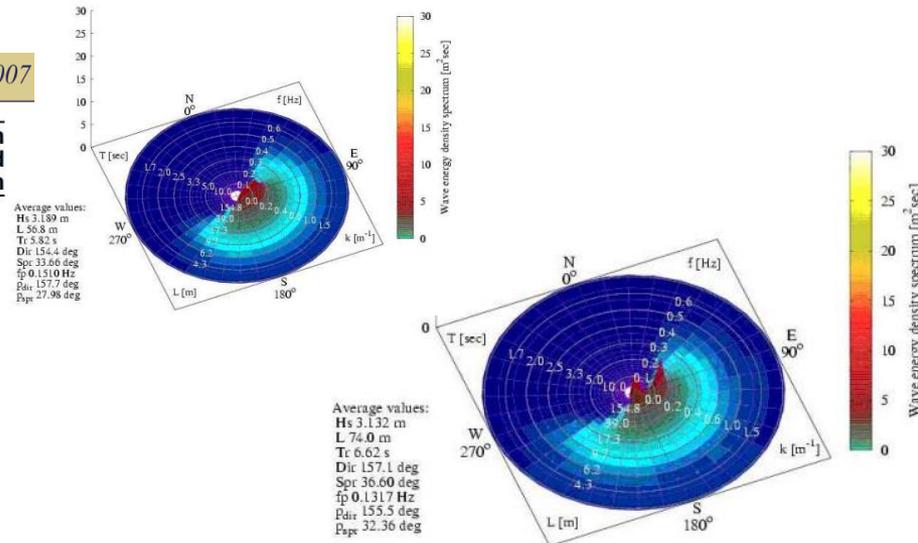
7th EMS Annual Meeting and 8th European Conference on Applications of Meteorology 2007

Adv. Sci. Res., 2, 107–112, 2008
 www.adv-sci-res.net/2/107/2008/
 © Author(s) 2008. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 3.0 License.



An observational and numerical case study of a flash sea storm over the Gulf of Genoa

A. Orlandi¹, F. Pasi¹, L. F. Onorato², and S. Gallino²



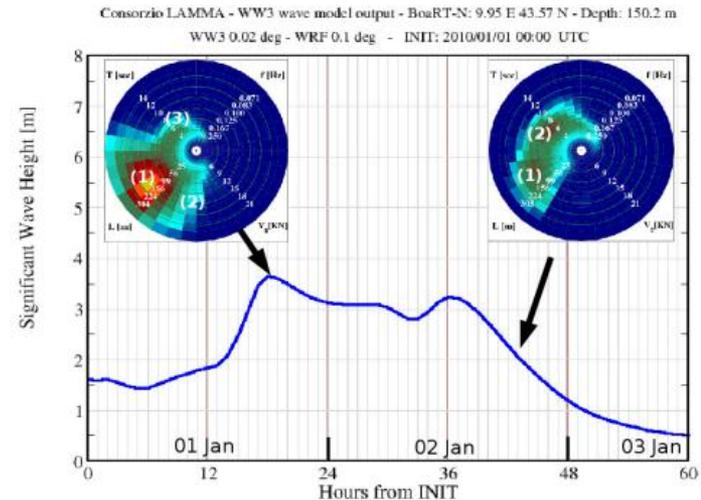
10th EMS Annual Meeting and 8th European Conference on Applied Climatology (ECAC) 2010

Adv. Sci. Res., 6, 109–115, 2011
 www.adv-sci-res.net/6/109/2011/
 doi:10.5194/asr-6-109-2011
 © Author(s) 2011. CC Attribution 3.0 License.



A study of the 1 and 2 January 2010 sea-storm in the Ligurian Sea

F. Pasi^{1,2}, A. Orlandi^{1,2}, L. F. Onorato³, and S. Gallino³



Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali

- Catena operativa LaMMA di previsione onda: Wavewatch III (~ 2004-2024)

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (Volume: 11, Issue: 1, January 2014)

X-Band Marine Radar System for High-Speed Navigation Purposes: A Test Case on a Cruise Ship

G. Ludeno, A. Orlandi, C. Lugni, C. Brandini, F. Soldovieri, and F. Serafino

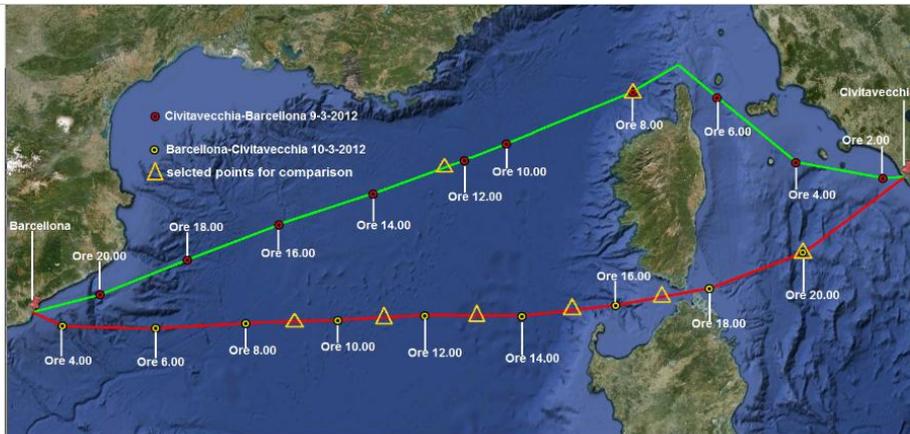
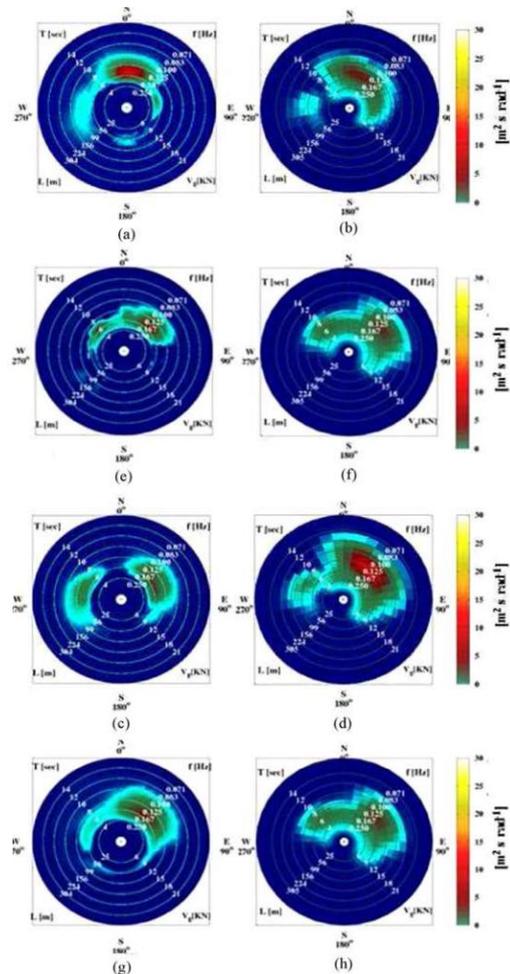


Figure 3: Ship position of the Grimaldi Cruise Roma during the 9th and 10th March 2012 navigation; the red dots indicate the route from Civitavecchia to Barcelona, while the yellow dots indicate the return; the yellow triangles indicate the selected points for comparison between Remocean system and WW3 model.



REMOCEAN

WW3 LaMMA



Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

Dinamica Navale et al.

“Manual” Route Design

METEOROLOGICAL NAVIGATION

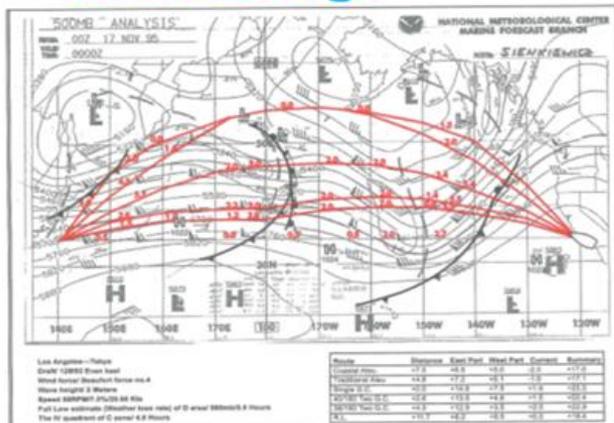
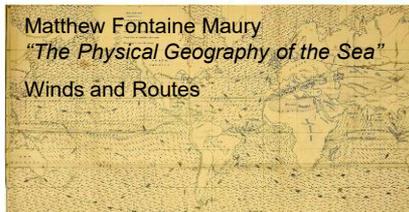


Fig. by: Chen, Chesneau, *Heavy Weather Avoidance and Route Design*



Matthew Fontaine Maury
“The Physical Geography of the Sea”
Winds and Routes

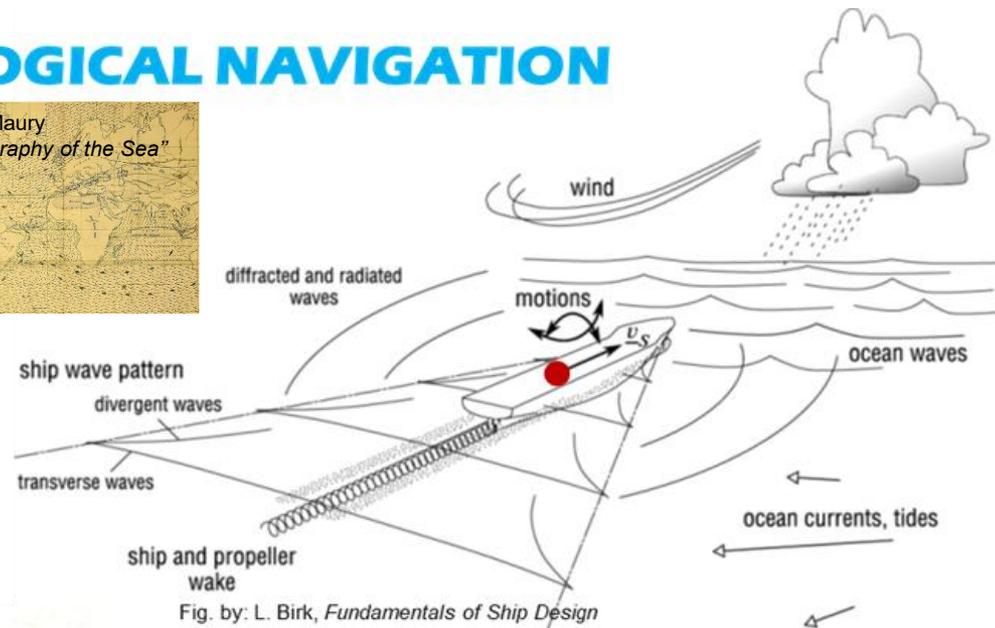


Fig. by: L. Birk, *Fundamentals of Ship Design*

Computer Aided Route Optimization

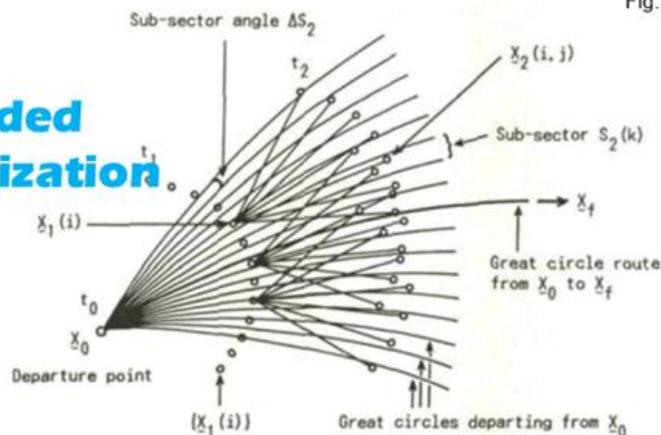


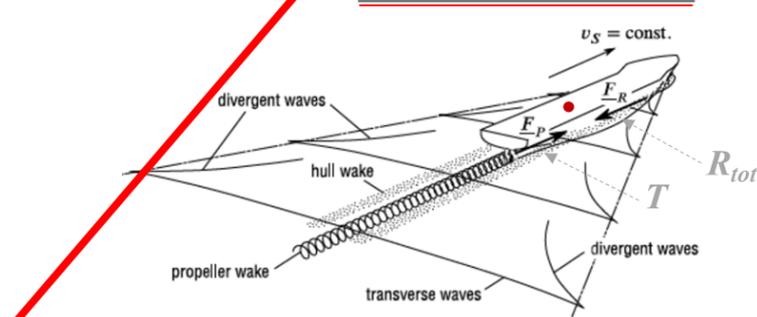
Fig. by: Hagiwara, *Weather Routing of Sail-Assisted Motor Vessels*

- **Minimal Time**
- **Minimal Fuel**
- **Heavy Weather Avoidance**
- **Safety**

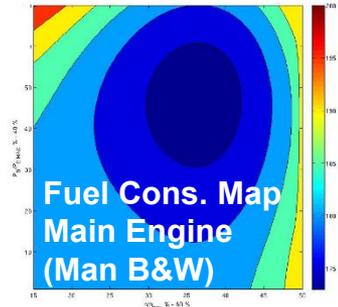
Dinamica Navale et al.

SHIP PERFORMANCE: POWERING

$$R_{tot} = R_{hull} + \Delta R$$

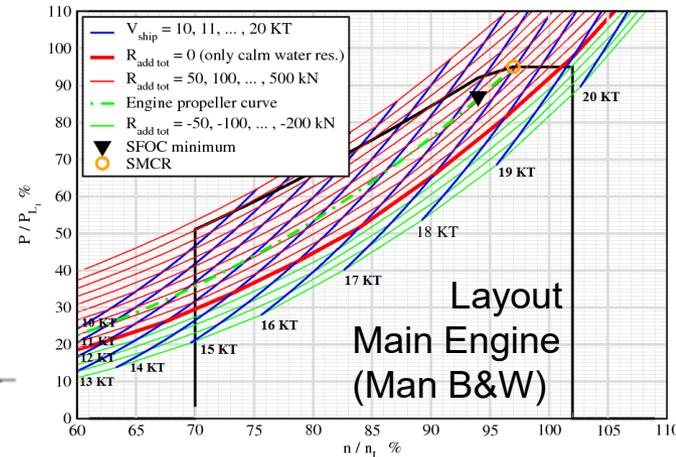
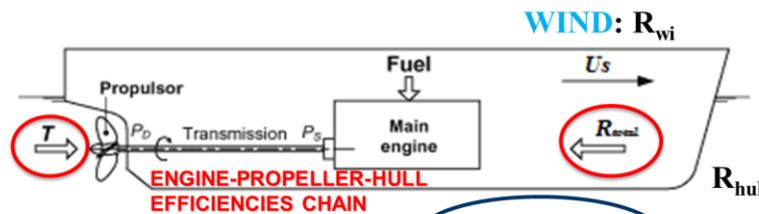
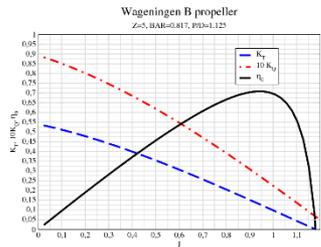


DEPENDS «ALSO» ON METEO-MARINE CONDITIONS



DEPENDS «ONLY» ON:

- SHIP HULL AND APPENDAGES
- SHIP SPEED TROUGH WATER (STW)



RESISTANCE COMPONENTS

$$R_{total} = R_{hull}(U_s) + R_{AW}(U_s, \mu_s, [S_\zeta]) + R_{wi}(U_{rwi}, \mu_{rwi})$$

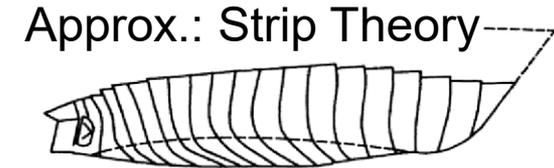
CALM WATER

WAVES

WIND

TERMS DEPENDENT ON METEO-MARINE CONDITIONS

Dinamica Navale et al.

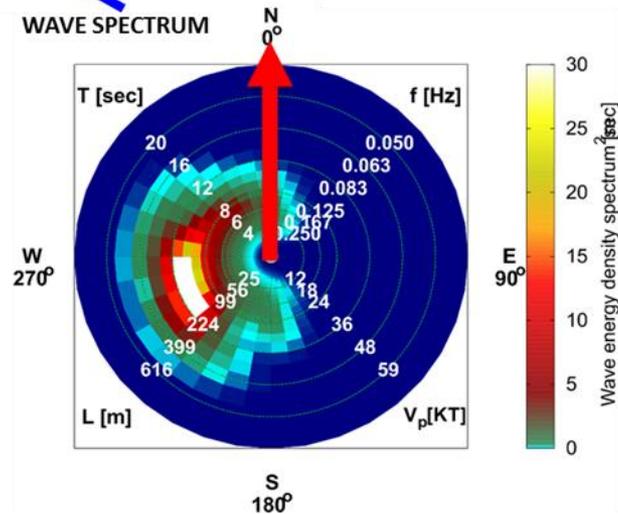
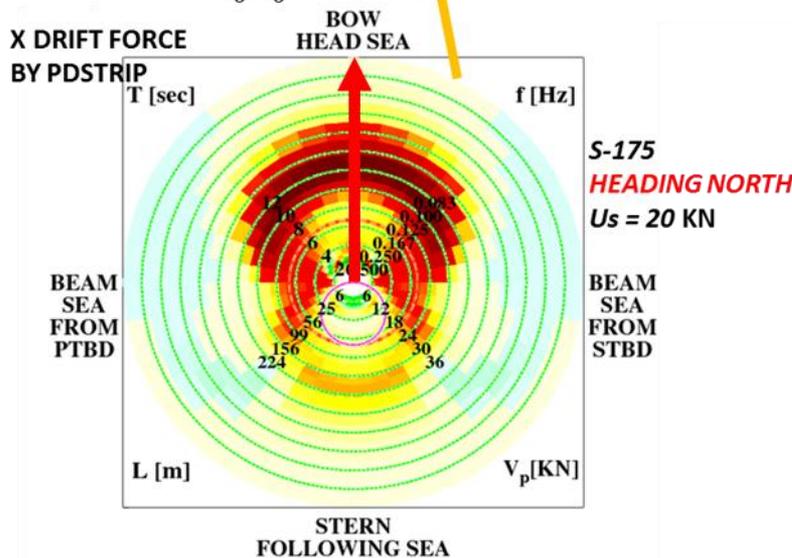


ADDED RESISTANCE IN WAVES

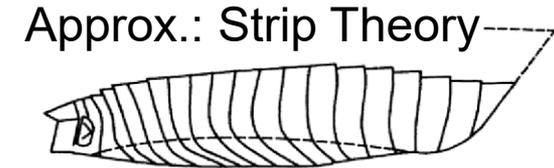
$$R_{total} = R_{hull}(U_s) + R_{AW}(U_s, \mu_s, [S_\zeta]) + R_{wi}(U_{rwi}, \mu_{rwi})$$

$$R_{aw} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} RAO_{aw}(\omega_e(\omega, \theta_r), \theta_r, U_s) S_\zeta(\omega, \theta_r) d\theta_r d\omega$$

LOW R_{aw}



Dinamica Navale et al.

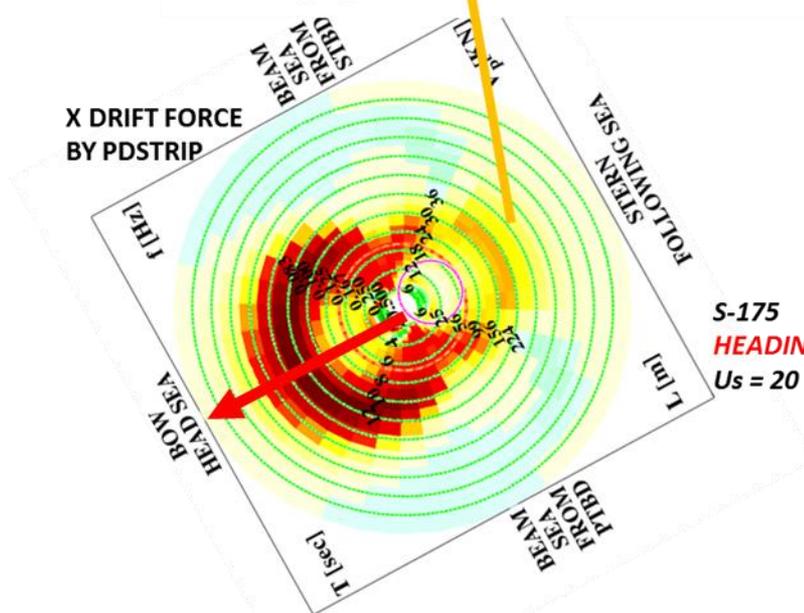


ADDED RESISTANCE IN WAVES

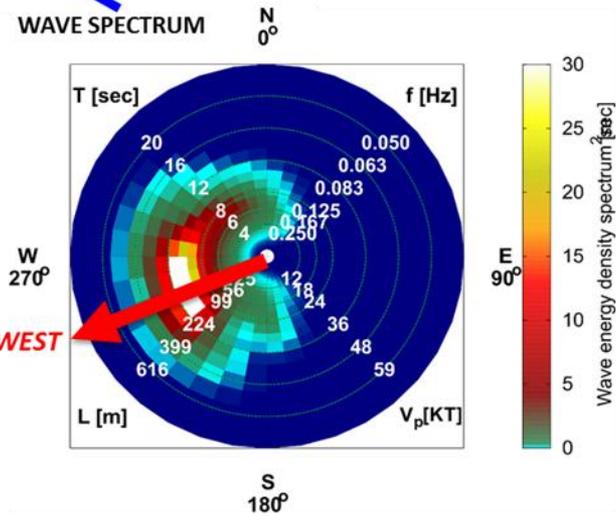
$$R_{total} = R_{hull}(U_s) + R_{AW}(U_s, \mu_s, [S_\zeta]) + R_{wi}(U_{rwi}, \mu_{rwi})$$

$$R_{aw} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} RAO_{aw}(\omega_e(\omega, \theta_r), \theta_r, U_s) S_\zeta(\omega, \theta_r) d\theta_r d\omega$$

HIGH R_{aw}



S-175
HEADING SOUTH-WEST
 $U_s = 20$ KN



Dinamica Navale et al.

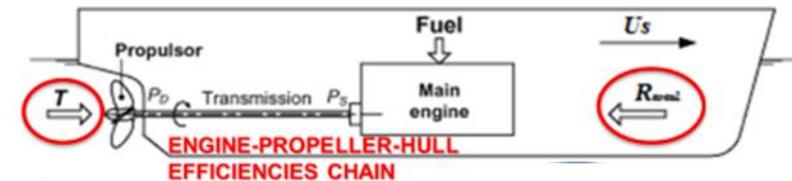
IMAM 2015 *Towards Green Marine Technology and Transport – Guedes Soares, Dejhalla & Pavletić (Eds)*
 © 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02887-6

Powering and seakeeping forecasting for energy efficiency:
 Assessment of the fuel savings potential for weather routing
 by in-service data and ensemble prediction techniques

A. Orlandi
 Consorzio LaMMA—CNR Area di Ricerca di Firenze, Florence, Italy

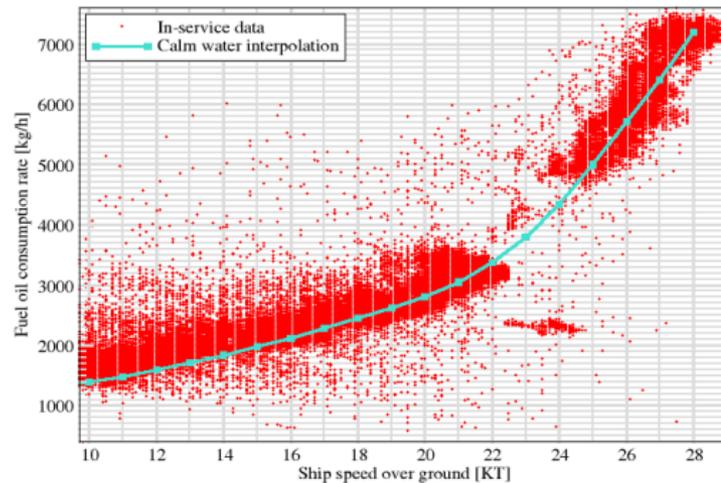
F. Pasi & V. Capecchi
 Consorzio LaMMA and CNR-IBIMET, Florence, Italy

A. Coraddu & D. Villa
 Department of Electrical, Electronic, Telecommunications Engineering and Naval Architecture,
 Polytechnic School, University of Genoa, Genoa, Italy



In-service data:

- ship performance
- fuel cons. VS ship speed
- environmental data



Progetti LaMMA:

COSMEMOS, PROFUMO, PROFUMO Demo

Finanzamento: ESA

Dinamica Navale et al.

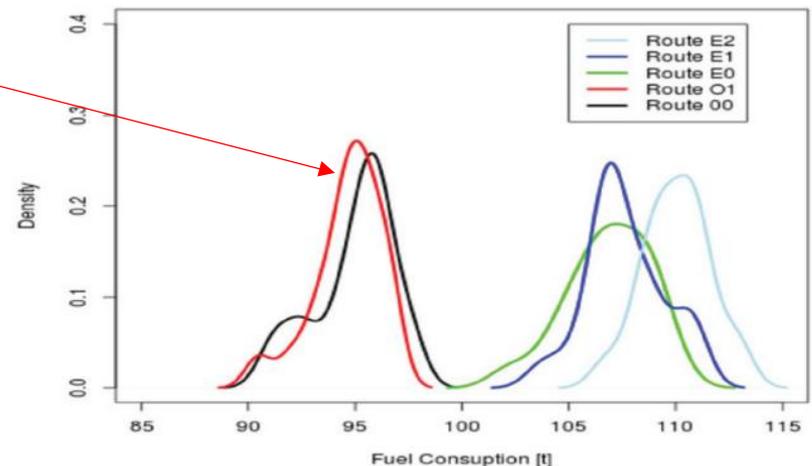
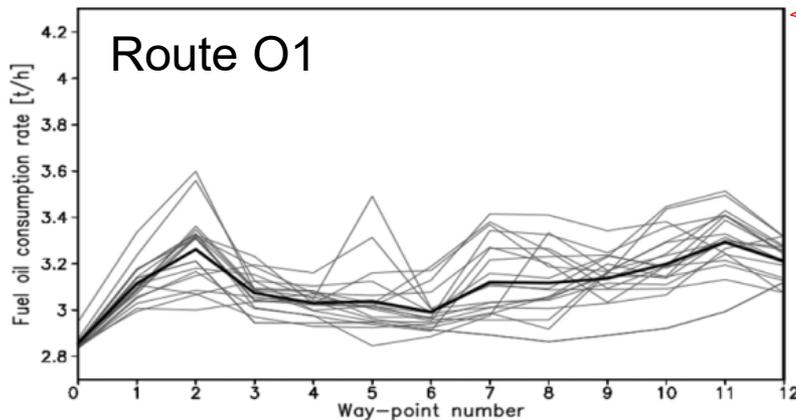
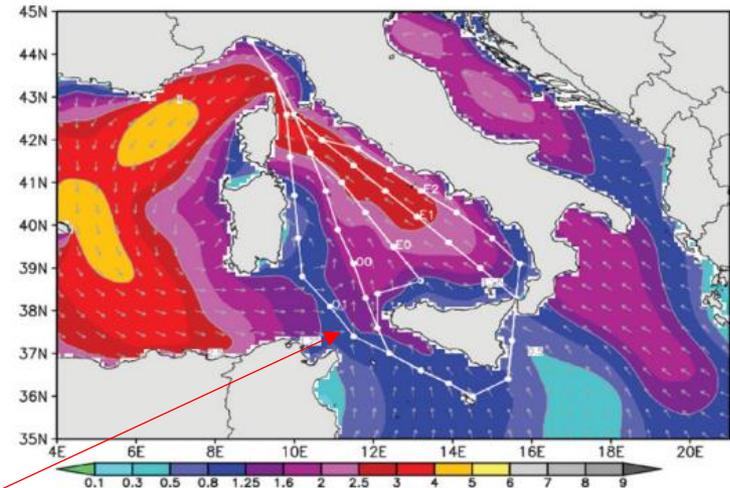
IMAM 2015 *Towards Green Marine Technology and Transport – Guedes Soares, Dejhalla & Pavletić (Eds)*
 © 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02887-6

Powering and seakeeping forecasting for energy efficiency:
 Assessment of the fuel savings potential for weather routing
 by in-service data and ensemble prediction techniques

A. Orlandi
 Consorzio LaMMA—CNR Area di Ricerca di Firenze, Florence, Italy

F. Pasi & V. Capecchi
 Consorzio LaMMA and CNR-IBIMET, Florence, Italy

A. Coraddu & D. Villa
 Department of Electrical, Electronic, Telecommunications Engineering and Naval Architecture,
 Polytechnic School, University of Genoa, Genoa, Italy



Dinamica Navale et al.



Proceedings of the 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, 7-11 June 2021, Glasgow, Scotland, UK

Operational measures in second generation intact stability criteria: effect of source of environmental data

Gabriele Bulian, *University of Trieste*, gbulian@units.it

Andrea Orlandi, *Consorzio LaMMA*, orlandi@lamma.toscana.it

Dynamic stability failure modes (IMO-MSC):

- dead ship in waves
- excessive accelerations
- pure loss of stability
- parametric rolling and surf-riding/broaching

Studied: parametric rolling

Tested wave datasets:

- Global Waves Statistics (BMT)
- Medatlas (Cavaleri et al.)
- LaMMA Med (12 Km res.)
- Copernicus CMEMS-MED
- KNMI ERA-40 Wave Atlas



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng



Effect of environmental data uncertainty in the framework of second generation intact stability criteria

Gabriele Bulian^{a,*}, Andrea Orlandi^b

^a Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Via A. Valerio 10, 34127, Trieste, Italy

^b Consorzio LaMMA, c/o CNR-IBE, Florence Research Area, Via Madonna del Piano n.10, Edificio D, 50019, Sesto Fiorentino, FI, Italy

Dinamica Navale et al.



OrCa EPD



Special Issue: Ship Routing

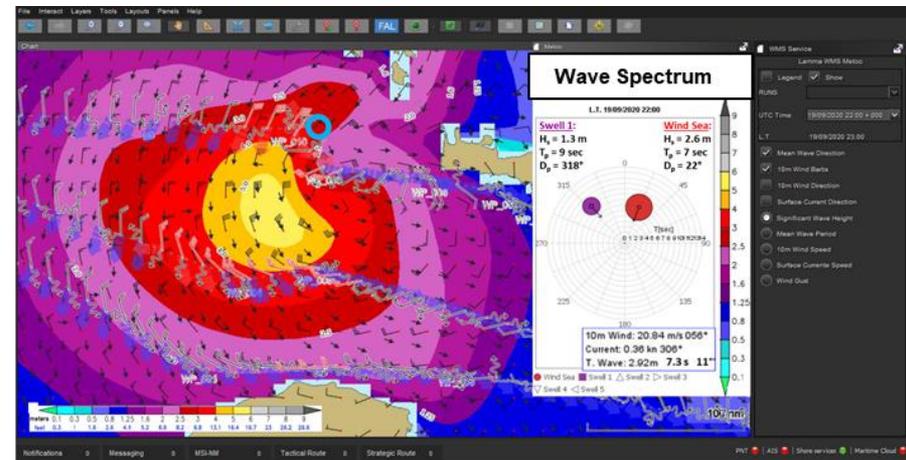


J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9(5), 502 - 07 May 2021

Article

Meteorological Navigation by Integrating Metocean Forecast Data and Ship Performance Models into an ECDIS-like e-Navigation Prototype Interface

Andrea Orlandi ^{1,*}, Andrea Cappugi ², Riccardo Mari ^{1,3}, Francesco Pasi ^{1,3} and Alberto Ortolani ^{1,3}



21th Conference on
Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries

COMPIT'22

Pontignano / Italy, 21-23 June 2022

Meteorological Navigation by an ECDIS-Like System: Discussing the Algorithms and Demonstrating the Functionalities for Conventional Propulsion and for Sail-Assisted Ships

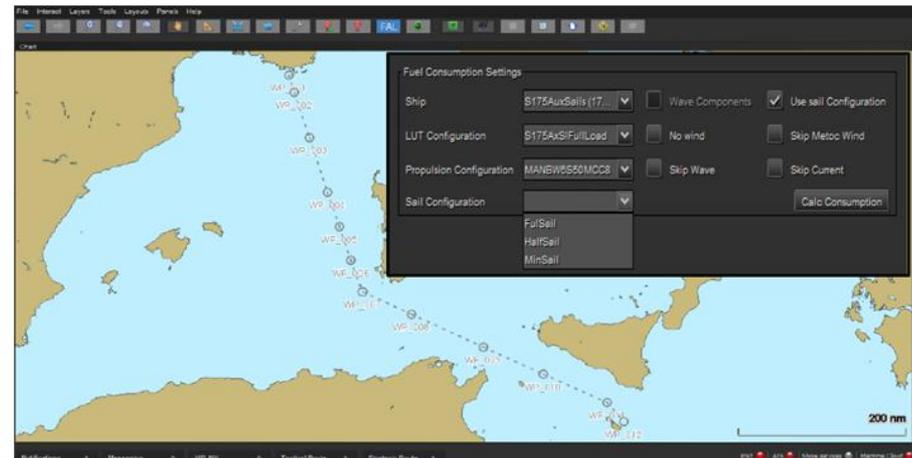
Andrea Orlandi, Consorzio LaMMA, Florence/Italy, orlandi@lamma.toscana.it

Andrea Cappugi, Tate, Florence/Italy, andrea@tate.it

Riccardo Mari, CNR-IBE and Consorzio LaMMA, Florence/Italy, mari@lamma.toscana.it

Francesco Pasi, CNR-IBE and Consorzio LaMMA, Florence/Italy, pasi@lamma.toscana.it

Alberto Ortolani, CNR-IBE and Consorzio LaMMA, Florence/Italy, ortolani@lamma.toscana.it



Dinamica Navale et al.

Ocean Engineering 291 (2024) 116464



Contents lists available at ScienceDirect

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng



Air quality forecasting of along-route ship emissions in realistic meteo-marine scenarios

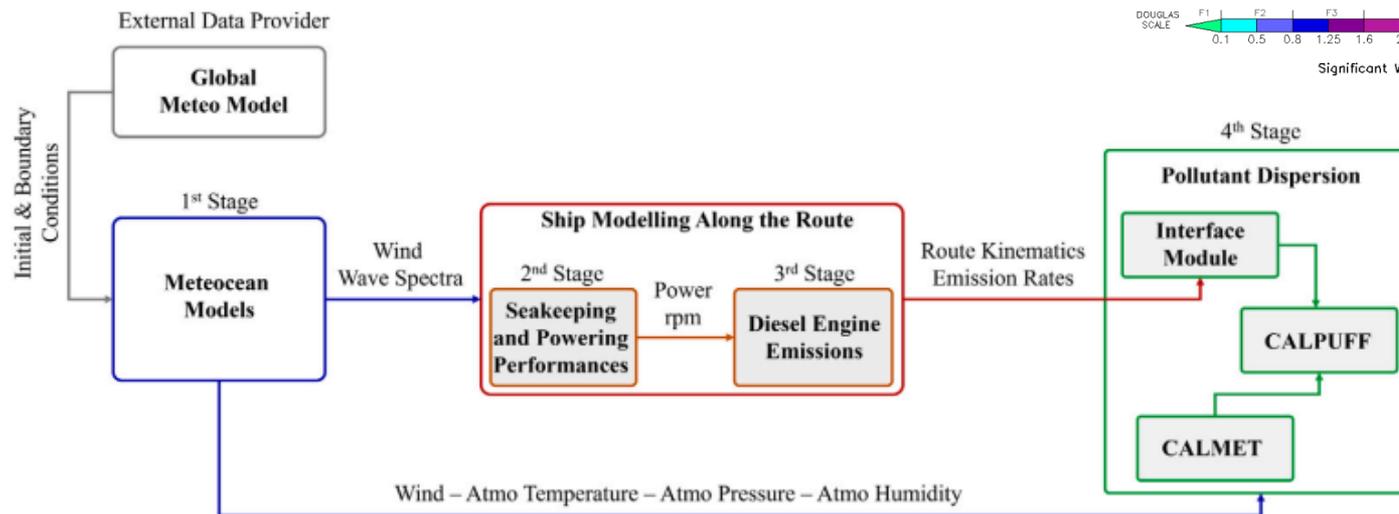
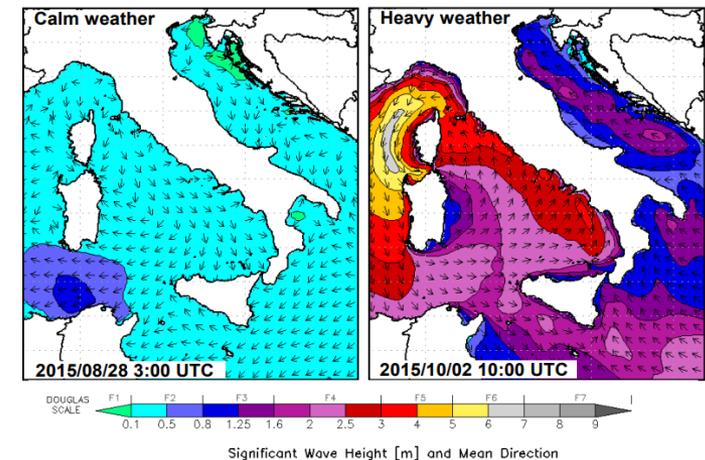
Andrea Orlandi ^a, Francesca Calastrini ^b, Miltiadis Kalikatzarakis ^c, Francesca Guarnieri ^a, Caterina Busillo ^a, Andrea Corradu ^{d,*}

^a Consorzio LaMMA, Florence, Italy

^b CNR-IBIMET, Florence, Italy

^c University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

^d Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands



Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati

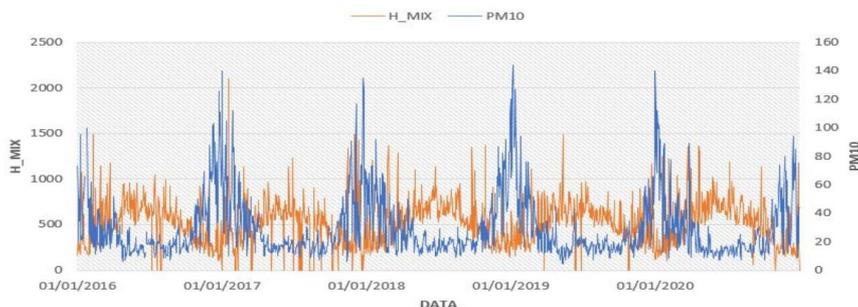
• Tesi Triennale in Fisica ed Astronomia



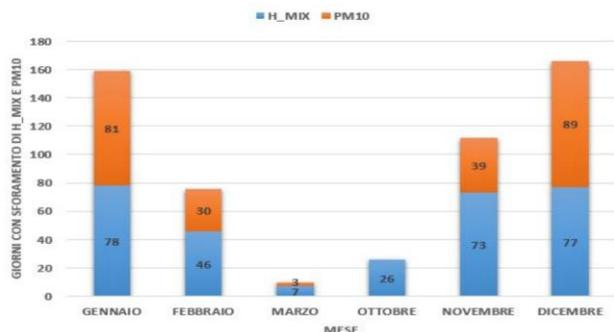
Leonardo SALVINI
 Scuola di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali
 Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica
 Anno Accademico: 2020/2021

Regimi di turbolenza e dispersione degli inquinanti nello strato limite atmosferico: analisi degli andamenti di concentrazione del particolato PM10

CONFRONTO H_MIX E PM10 2016-2020



SFORAMENTO H_MIX E PM10 SEMESTRE FREDDO 2016-2020



• Poster ad AISAM 2022



Le dinamiche atmosferiche all'origine di condizioni favorevoli ad elevati valori di concentrazione di PM10

A. Orlandi^{1*}, F. Calastri^{1,2}, F. Guarnieri¹, C. Busillo¹, G. Messeri^{1,2}, L. Salvini³
¹Consorzio LaMMA, Scalo Fiorentino, 50113 - Email: orlandi@consorzio.lam.ma.it
²Istituto di BioEconomia IBE-CNR, Firenze, 50145
³Dip. Fisica, Unifi

L'intensità delle dinamiche turbolente nello strato limite atmosferico determina l'evoluzione giornaliera e stagionale dell'altezza dello strato di rimescolamento (mixing layer height). Questa è a sua volta strettamente legata ai processi di diluizione o di accumulo di inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera e perciò risulta uno dei parametri meteorologici più rilevanti per la qualità dell'aria.

IL SISTEMA MODELLISTICO

WRF-CALMET
 Per questo motivo, presso il LaMMA tale grandezza è valutata quotidianamente grazie ad una catena operativa di modellistica numerica che copre tutto il territorio della Regione Toscana.

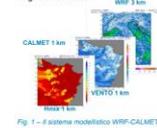


Fig. 1 - Il sistema modellistico WRF-CALMET

ANALISI DATI HMIX-PM10 periodo 2016-2020

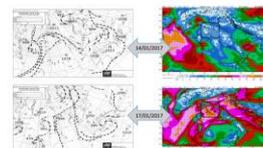
I dati di Hmix prodotti nei recenti cinque anni di attività di tale catena di modelli, sono analizzati in concomitanza con le rilevazioni ARPAT dei livelli di concentrazione del particolato PM10. Lo studio è focalizzato su un'area caratterizzata da rilevanti criticità connesse ai livelli di concentrazione di PM10 (Capannori, Lucca).



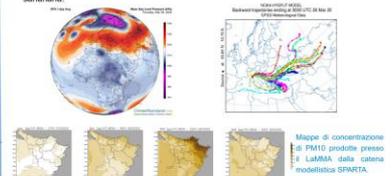
I risultati ottenuti mostrano la rilevante correlazione delle stime modellistiche dei valori di Hmix con i corrispondenti valori misurati della concentrazione del PM10. Gli andamenti correlati delle due grandezze sono in accordo con quanto atteso in base alla fisica della turbolenza nello strato limite atmosferico e testimoniano l'utilità e l'efficacia della catena modellistica per l'implementazione di dispositivi operativi per la prevenzione di episodi acuti di inquinamento nelle aree urbane.



Nella prima, l'instaurarsi di condizioni meteorologiche associate vento particolarmente intenso, produce una veloce diluizione e riduzione della concentrazione di PM10, pur parlando da livelli di concentrazione elevati.



Nella seconda, si analizza un evento caratterizzato da un improvviso ed estremamente rilevante innalzamento dei livelli di concentrazione del PM10, connesso con il trasporto di polveri desertiche ad opera dei venti prodotti dalla configurazione barica a larga scala. Tale situazione è particolarmente peculiare ed insolita, poiché l'area di provenienza delle polveri desertiche è risultata essere ubicata nell'estremo Est Europeo (Mar Caspio), a differenza dei molto più frequenti (nell'area Mediterranea) eventi di provenienza saharana.



In entrambi i casi il comportamento correlato dell'altezza di rimescolamento e della concentrazione del PM10 consente di descrivere dettagliatamente l'evoluzione degli stati di qualità dell'aria e dei concomitanti fattori meteorologici di rilievo.

Qualità dell’Aria ed Assimilazione Dati

Bulletin of Atmospheric Science and Technology (2024) 5:12
 https://doi.org/10.1007/s42865-024-00077-8

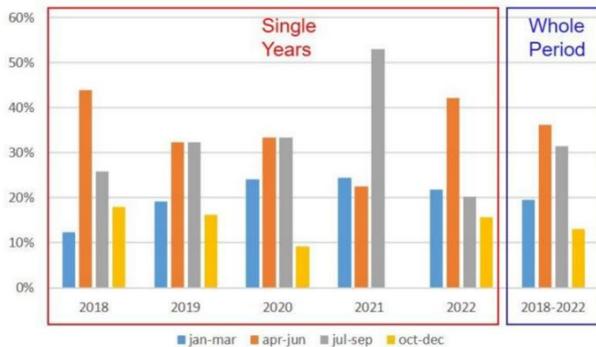
RESEARCH



Mediterranean dust outbreaks, dynamic meteorological patterns and weather types

Andrea Orlandi¹ · Gianni Messeri^{1,2} · Francesca Calastrini^{1,2}

Received: 29 December 2023 / Accepted: 14 August 2024
 © The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2024



Analyzed period	5 years 2018–2022
Dust intrusions	62 episodes, 235 days
Dust days per year	47 days
Dust intrusions per years	10–15 episodes, 2–6 days
Most frequent in	Spring, Summer

Table 1 Description of the nine classes (centroids) of PCT09 classification

Circulation Types	Description
CT1	High pressure over central-northern Italy, weak low over Ionian sea with easterly flow
CT2	Orographic low pressure over Adriatic sea with strong north-easterly flow
CT3	High pressure with maximum values over northern-eastern Italy with no pressure flow
CT4	Orographic low pressure over Ligurian or northern Tyrrhenian sea with strong southerly flow
CT5	High pressure with maximum values over north-western Italy, weak low over Ionian sea with no pressure flow
CT6	High pressure over central-southern Italy, low pressure over Alps with westerly zonal flow
CT7	Orographic low pressure over northern Italy, with strong westerly or north-westerly flow
CT8	High pressure with light southerly flow
CT9	High pressure over northern Italy, weak low over central-southern Italy with easterly flow



Newsletter

Numero 19 – Settembre 2024

Polveri desertiche: aspetti generali e trend recenti

A. Orlandi, F. Calastrini, G. Messeri

Le polveri minerali di origine desertica sono una componente rilevante dell'aerosol atmosferico a scala globale (Ginoux et al., 2012; Kinne et al., 2006 and Wu et al., 2020). Presenti con differenti granulometrie e composizione chimica, sono coinvolte in numerosi processi fisici atmosferici ed oceanici: contribuiscono alla formazione di nubi e precipitazione, partecipano al trasferimento radiativo, sia mediante interazione diretta con la radiazione, sia tramite effetti indiretti prodotti dalle dinamiche che le coinvolgono. Le polveri desertiche risultano pertanto rilevanti nello sviluppo e nella modulazione di dinamiche meteorologiche ed in alcuni importanti meccanismi di feedback su scala climatologica (IPCC, AR6 WGI, Chps 6, 7, Mahowald et al. 2024, Skeie et al. 2024). Inoltre, esse hanno un ruolo importante nella biogeochimica del sistema terra, influenzando le dinamiche di molti ecosistemi sia terrestri che oceanici, e contribuendo, in certi casi in modo rilevante, alla qualità dell'aria. Per una panoramica generale si vedano i report annuali WMO sul tema, al link:

<https://wmo.int/publication-series/wmo-airborne-dust-bulletin>.

La presenza di particolato desertico, a differenti quote in atmosfera ed in specifiche aree terrestri, è legata all'instaurarsi di una ben precisa sequenza di processi: caricamento in atmosfera; trasporto, anche a lungo raggio; deposizione al suolo.

Il caricamento in atmosfera di ingenti quantitativi di polveri richiede meccanismi di sollevamento, la cui efficienza è legata all'intensità dei venti nei bassi strati ed alla conseguente turbolenza da essi indotta nello strato limite, associata alla presenza di convezione sufficientemente intensa e profonda, in modo da portare le polveri a quote elevate. Fenomeni estremi legati a queste dinamiche sono rappresentati da tempeste di sabbia e haboob, che producono il sollevamento dal suolo di grandi quantitativi di polvere minerale, con importanti impatti nelle aree direttamente colpite (Ginoux et al., 2012). La disponibilità al suolo di ingenti quantitativi di polvere è specifica di alcune regioni del globo, che si qualificano come le aree sorgenti d'elezione. Queste aree sono caratterizzate da condizioni climatiche aride, con una storia geologica particolarmente favorevole all'accumulo di polveri e sedimenti, come ad esempio in corrispondenza di laghi e fiumi prosciugati o effimeri (Prospero et al., 2002, Ginoux et al., 2012). Tali condizioni, fortemente dipendenti dall'umidità del terreno, e anche, per alcune aree sorgenti, dalla copertura nevosa,

risentono delle variazioni stagionali e dell'evoluzione climatica.

Le aree sorgenti che contribuiscono maggiormente all'immissione di polvere minerale in atmosfera sono prevalentemente ubicate entro le zone desertiche delle fasce subtropicali. La principale di esse è l'area Sahariana e le zone limitrofe (Prospero et al., 2002, Ginoux et al., 2012, Gavrrouzou et al., 2021(a)), come visibile in Figura 1(b). Altre importanti aree sorgenti si trovano in Arabia, in Asia Centrale, nel Sud-Ovest degli Stati Uniti ed in Australia (Prospero et al., 2002, Ginoux et al., 2012). Ad esse si aggiungono, inoltre, le zone aride di alta latitudine

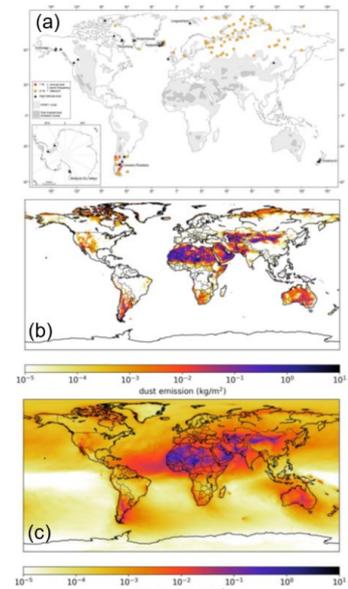


Figura 1. (a) Grigio chiaro: zone aride (indice di aridità < 0.65); Grigio scuro: principali aree sorgente. Circoletti in colore e triangoli neri: aree sorgente delle alte latitudini in relazione alla frequenza di tempeste di sabbia osservate (da ref. Bullard et al. 2016). (b) e (c) risp. risultati di simulazione da modello numerico SILAM dei processi di emissione e deposizione di polveri minerali (da ref. Meinander et al. 2022).

Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati



XI Convegno Nazionale sul Particolato Atmosferico PM2024



PM 2024



Torino 28 – 31 Maggio 2024



XI Convegno Nazionale sul Particolato Atmosferico PM2024



PM 2024



Torino 28 – 31 Maggio 2024

Le intrusioni desertiche sul Mediterraneo: analisi di un intenso episodio di trasporto di polvere desertica non sahariana

F. Calastrini^{1,2}, C. Busillo³, F. Guarnieri⁴, A. Orlandi⁵, G. Messeri^{1,2}, F. Lucarelli³, S. Nava⁶, A. Calzolari¹, F. Giardi¹, R. Traversi³, S. Becagli⁷, T. Giordano⁸, G. Gualtieri¹, A. Cavaliere⁹, A. Zaldei¹⁰

¹ Istituto per la BioEconomia IBE- CNR, Firenze, S0145 - ² Consorzio LaMMA, Sesto Fiorentino, S0019 - ³ UNIFI, Dip. Fisica e Astronomia - ⁴ INFN, Sezione di Firenze - ⁵ UNIFI, Dip. Chimica - ⁶ CNR-ISP, Istituto di Scienze Polari - ⁷ Corresponding author: Tel: +39 055 5226053, E-mail: calastrini@lamma.toscana.it

Il trasporto long-range delle polveri desertiche può causare episodi caratterizzati da elevati valori di concentrazione di PM10 in regioni molto distanti dalle aree di origine delle polveri. Questi episodi sono il risultato di una sequenza di eventi dinamici, che iniziano nelle aree desertiche con il sollevamento in troposfera di rilevanti quantità di polvere, che poi vengono trasportate su lunghe distanze dai forti venti in quota, e terminano con processi di deposizione al suolo in regioni remote rispetto alle aree di origine. Nel bacino del Mediterraneo, e in particolare in Italia, si registra ogni anno un numero significativo di eventi legati alle intrusioni desertiche, perlopiù di provenienza sahariana [1]. Tuttavia, nel marzo 2020 si è verificato un anomalo ed intenso trasporto di polvere desertica non sahariana, attribuibile alle aride regioni ad est del mar Caspio. In particolare si è trattato di un episodio formato in seguito ai quasi totali prosciugamenti del Mar d'Arak (Aralkum) [2]. A seguito della desertificazione dell'area, che rappresenta uno dei più gravi disastri ambientali causati dall'uomo negli ultimi decenni, notevoli quantitativi di polvere salata e tossica (pesticidi, fitofarmaci, idrocarburi, etc.) vengono risvoltati e trasportati dal vento [3]. L'episodio del marzo 2020 ha interessato anche l'area mediterranea, provocando il superamento del valore limite previsto dalla normativa EU per il PM10 in molte centrali di monitoraggio della qualità dell'aria in tutta Italia [4].

CONFIGURAZIONE METEOROLOGICA E DINAMICHE DI TRASPORTO

L'episodio di trasporto di polvere non sahariana si è verificato in Italia dal 27 al 30 marzo 2020. Nella Fig.1a è mostrata un'immagine satellitare composta (Terra MODIS Corrected Reflectance – true color) [5] del 28 marzo, dove la presenza di polvere è visibile sulla maggior parte dell'Europa. Questo episodio di trasporto long-range trae origine da una rilevante tempesta di polvere sviluppata nei giorni precedenti, a partire dal 21-22 marzo 2020, nelle regioni desertiche dell'Asia centrale, in particolare nell'Aralkum [2, 4], Fig.1b, Fig. 2.

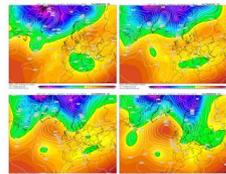


Fig. 1 - Mappa GIS noon, 500 hPa geopot. (26-29 Marzo 2020)

Nella figura 4 sono riportate le back-trajectories ottenute da HYSPLIT [6] per il 28 marzo, ore 13. In particolare, le linee rosse e blu relative a quote più basse si possono ricondurre al trasporto di dust asiatico, mentre a quote superiori si evidenzia un trasporto di provenienza sahariana (linea verde), senza deposizione al suolo, come confermato in letteratura [2, 4]. Le dinamiche di trasporto e deposizione sono confermate dalle mappe di concentrazione di dust colomare e superficiale riportate nella Figura 5a, 5b, derivanti da MERRA-2 [7].

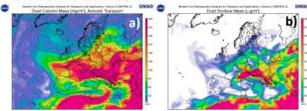


Fig. 5 - Mappa MERRA-2: a) dust column mass (mg/m2), b) dust surface mass (µg/m3), relative al 28 Marzo 2020, 00 UTC.

LE STAZIONI DELLA RETE AIRQINO

L'analisi dei dati registrati da alcune stazioni low-cost della rete AirQino [8] presenti lungo il percorso del plume di polveri desertiche permette una ricostruzione del tracking spazio-temporale, grazie alla risoluzione oraria delle misure di concentrazione di PM10 e di PM2.5. Il rapporto tra PM2.5 e PM10 decresce sensibilmente con il contributo della polvere desertica.

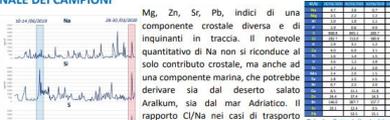


Fig. 6 - Concentrazione oraria di PM10 e PM2.5 in quattro stazioni della rete AirQino (Emilia Romagna, Toscana).

Il successivo sviluppo di una fascia di alte pressioni, centrata a latitudini medio-alte e molto estesa in direzione zonale, ha determinato una sequenza di circolazioni con venti diretti prevalentemente verso ovest, nella media e bassa troposfera. Quindi, il sollevamento prodotto dalla tempesta è stato seguito da fenomeni di trasporto e depositi di polvere desertica su lunghissime distanze dalla regione asiatica all'Europa centrale e occidentale. La situazione barica è riportata in Figura 3, per le 12 UTC del 26, 27, 28 e 29 marzo. La mappa del 29 marzo documenta l'attenuazione del trasporto orientale a lungo raggio, ma la configurazione continua a favorire una rilevante deposizione di polvere desertica in Italia.

ANALISI COMPOSIZIONALE DEI CAMPIONI

L'analisi di dati osservati in situ in alcune stazioni di campionamento presenti sul territorio italiano, in particolare alla stazione di Capannori in Toscana (Progetto PATOS2, 27/03/2019-07/04/2020), consente di approfondire aspetti rilevanti ricorrendo all'analisi composizionale. I campioni di PM10 sono stati analizzati con diverse tecniche (cromatografia ionica, analisi termo-ottica, PIXE, ICP-AES), permettendo così di ottenere informazioni sulla composizione chimica del PM10 ed in particolare sulla componente desertica. L'analisi PIXE dei campioni relativi all'intrusione desertica del 28-30 marzo 2020 evidenzia una maggiore concentrazione di alcuni elementi, in particolare Na, S, Ca, rispetto a quanto riscontrato nei campioni con polveri sahariane, come mostrato in Fig. 8, in cui è evidenziato l'episodio sahariano di giugno 2019 (fascia blu) e l'episodio di marzo 2020 (fascia rossa). A valori equivalenti di S corrispondono valori molto maggiori di Na, S, Ca. In Tab.1 sono riportati i fattori di arricchimento rispetto al S nei due episodi desertici. Nell'episodio di marzo sono più alti anche



Mg, Zn, Sr, Pb, indici di una componente crostale diversa e di inquinanti in traccia. Il notevole quantitativo di Na non si riconduce al suo contributo crostale, ma anche ad una componente marina, che potrebbe derivare sia dal deserto salato Aralkum, sia dal mar Adriatico. Il rapporto Cl/Na nei casi di trasporto marino fresco si attesta intorno a 1.8 w/w (punti in azzurro in Fig.9), mentre nei giorni 28 e 30 marzo il rapporto molto basso indica una perdita significativa di Cl, dimostrando la presenza di un aerosol marino invecchiato che confermerebbe la sorgente del deserto salato di Aralkum.

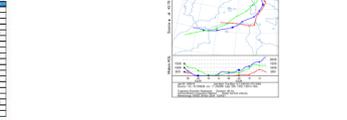


Fig. 8 - Serie temporale delle concentrazioni medio giornaliere (µg/m3) di Na, S, Ca.

Fig. 9 - Fattore di arricchimento rispetto al S nei due episodi.

Fig. 10 - Scattering Cl/Na.

Le potenzialità dell'uso di misure ad alta risoluzione temporale di PM10 e PM2.5 da rete di stazioni low-cost AirQino nello studio degli episodi di trasporto desertico

F. Calastrini^{1,2}, A. Orlandi⁵, G. Messeri^{1,2}, R. Benedetti¹, A. Zaldei¹, B. Gioti¹, G. Gualtieri¹, A. Cavaliere⁹, T. Giordano⁸, C. Vagnoli³, S. Putzoli³, F. Carotenuto¹, L. Brill¹

¹ Istituto per la BioEconomia IBE- CNR, Firenze, S0145 - ² Consorzio LaMMA, Sesto Fiorentino, S0019 - ³ CNR-ISP, Istituto di Scienze Polari - ⁴ Corresponding author: Tel: +39 055 5226053, E-mail: calastrini@lamma.toscana.it

Negli ultimi anni lo sviluppo e le applicazioni di sensori low-cost in campo ambientale sono aumentati notevolmente, in risposta ad una sempre crescente richiesta di valutazioni inerenti all'inquinamento atmosferico in specifici contesti (es. traffico in aree densamente abitate, impatto di porti, aeroporti, siti industriali), al microclima in ambito urbano (es. ondate di calore, benessere urbano), all'impatto del verde urbano sul bilancio netto di CO2. In questo contesto, presso l'Istituto per la BioEconomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche sono state sviluppate le stazioni low-cost AirQino [1], per la rilevazione dei principali inquinanti atmosferici. Tali stazioni sono impiegate per la creazione di reti di monitoraggio su larga scala. La disponibilità di dati rilevati su base oraria e l'elevato numero di punti di misura della rete AirQino, che garantisce un'ampia copertura spaziale in area mediterranea, consentono di studiare l'evoluzione temporale e spaziale della concentrazione di PM10 e PM2.5, in relazione agli episodi di trasporto di polvere desertica.

LE STAZIONI DELLA RETE AIRQINO

Le stazioni low-cost per la qualità dell'aria AirQino, progettate presso il CNR-IBE, dopo i numerosi studi eseguiti per testarne la validità, sono state impiegate per la creazione di reti di monitoraggio in molteplici ambiti. Le stazioni integrano sensori per la rilevazione dei principali inquinanti atmosferici (CO, O3, NO2, PM2.5, PM10), di gas serra (CO2) e di parametri meteorologici (temperatura, umidità dell'aria, velocità e direzione del vento). La rete AirQino è organizzata in una piattaforma web dedicata [2]. Le stazioni della Esee garantiscono una notevole copertura del territorio italiano, attualmente oltre 300 unità.



Fig. 2 - Stazione AirQino, modalità di installazione.

Alcune stazioni sono operative in Francia (Cannes, Marsiglia), Ungheria (Budapest e Debrecen), Romania (Bucarest), Spagna (Barcellona), oltre che in Niger.

STAZIONE FIRENZE-XIMENIANO

Presso l'Osservatorio Ximeniano, nel centro storico di Firenze, è installata una stazione AirQino, operativa da agosto 2021. La serie temporale pluriennale della concentrazione giornaliera di PM10 e di PM2.5 fornisce informazioni sull'andamento dell'inquinamento atmosferico (Fig. 3a). La differenza tra PM10 e PM2.5, molto piccola soprattutto in inverno, aumenta bruscamente in presenza di un evento desertico. Ad esempio,



Fig. 4 - Osservatorio Ximeniano, Firenze, in 4 casi di intrusioni desertiche, individuate da satellite, la concentrazione oraria di PM10 e PM2.5 (Fig.3b,d,e,f) permette di confermare l'effettiva ricaduta a terra del dust, oltre che l'inizio e la fine dell'episodio. In Fig.3c un picco di concentrazione non desertica, con alti valori di PM2.5.

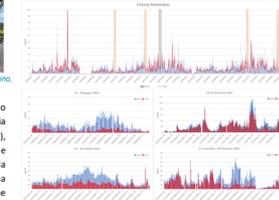
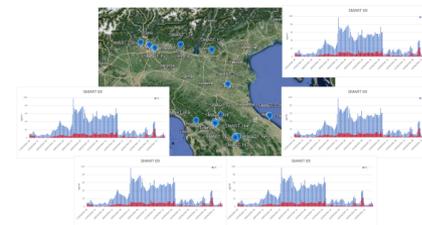


Fig. 3 - Mappa delle stazioni della rete di monitoraggio AirQino in Europa.

CASO STUDIO 29 MARZO – 1 APRILE 2024

Caratterizzazione dell'evento da inizio a fine con mappe meteo. Mappa satellitare e back-station AirQ su Italia con orari diversi grafici 8hri orari come sopra



CONCLUSIONI

La Rete AirQ può servire come valore aggiunto nello studio delle intrusioni desertiche perché è estesa territorialmente e la risoluzione oraria permette una migliore comprensione dell'evento e possibilità di tracking. Al più serve in prospettiva per una classificazione degli eventi con caratterizzazione meteo e ricadute al suolo. Tema che diventa importante con aumento e intensità di eventi dust in relazione al cambiamento climatico e per gli effetti sanitari non trascurabili.

[1] Gairolazzo M. et al. A Climatological Assessment of Intense Desert Dust Episodes over the Broader Mediterranean Basin Based on Satellite Data. Remote Sens. 2021, 3, 2895. DOI: 10.3390/rs11312895.
 [2] Mikić B. et al., Intense Desert Dust Event in the Northern Adriatic (March 2020). Insights From the Numerical Model Application and Chemical Characterization Results. Earth and Space Science. 2023. DOI: 10.1029/2023EA002879.
 [3] Orlandi A. et al., Dust storm as a factor of atmospheric air pollution in the Adriatic (C. A. Biobio) (Edineo, 2004) NPT Web. www.edineo.com. ISBN 1-85312-722-1.
 [4] Smith L. et al., Development and evolution of an anomalous Asian dust event across Europe in March 2020. Atmos. Chem. Phys. 22, 4047-4073, 2022. DOI: 10.5194/acp-22-4047-2022.
 [5] https://worldagroforestrycentre.org/ifa/
 [6] https://www.aq-cnr.it/aria/airqino/
 [7] https://geo.glo.noaa.gov/reanalysis/MERRA-2/
 [8] https://www.airqino.it

[1] Sensors 2018, 18, 2843; DOI:10.3390/s18092843.
 [2] https://www.airqino.it

Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di
Scienze Matematiche
Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Scienze
Fisiche e Astrofisiche

Anno Accademico: 2020/2021

Assimilazione dati adattiva
tramite metodo di breeding:
esperimenti numerici su modelli
caotici di bassa dimensionalità

Adaptive data assimilation
through breeding method:
numerical experiments on low
dimensional chaotic models

Relatore:
Andrea Orlandi

Correlatore:
Franco Bagnoli

Low Order Models (LOMs)

- Lorenz '63 Model**

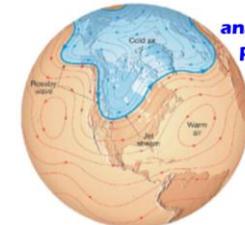
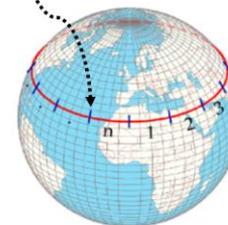


L63 Model

- Lorenz-Emanuel '96 Model**

$$\frac{dX_n}{dt} = \underbrace{-X_{n-2}X_{n-1}}_{\text{advection}} + \underbrace{X_{n-1}X_{n+1}}_{\text{damping}} - X_n + \underbrace{\Phi}_{\text{"external" forcing}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, K.$$

periodic boundary conditions



analogy with
planetary Rossby waves

LE96 Model

Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati

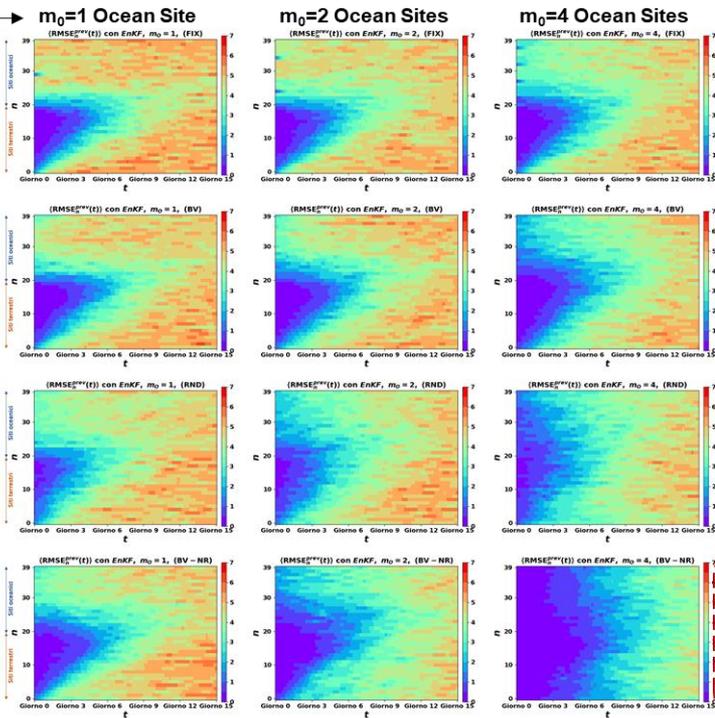
Numerical Experiments: BD-ADA on LOMs

➤ 3°

Ensemble Kalman Filter (EnKF)

Experiments on Land-Ocean LE96: BD-ADA in the spatial domain

Assimilation on 20 Land sites and m_0 Ocean sites



Not adaptive assimilation strategy:

FIX: fixed positions

m_0 Ocean sites on fixed equi-spaced positions

Adaptive assimilation strategies:

BV: Bred Vector driven

m_0 Ocean sites with max BV growth rate

RND: Random

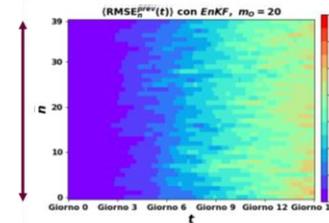
m_0 Ocean sites random selected

BV-NR: Bred Vector driven with No Repetition

m_0 Ocean sites with max BV growth rate
no repeated assimilation
on the same sites in nearest timesteps

Bred Vector Driven Adaptive Data Assimilation: better to assimilate where the BV growth rate is greater

↔ VS To be compared with assimilation on all the 40 sites



Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati

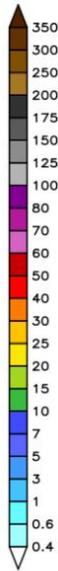
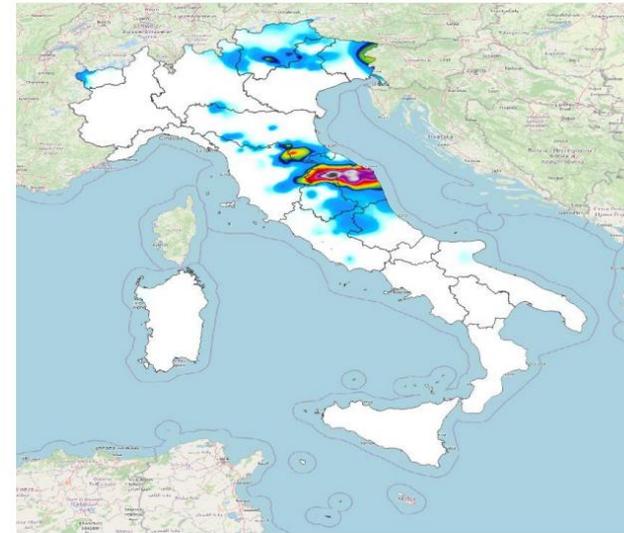
Spazializzazione della pioggia cumulata nelle precedenti 6 ore alle 21UTc del 15 settembre 2022

Impatto dell'assimilazione di dati a terra su una catena modellistica con WRF per le previsioni operative attraverso simulazioni ensemble

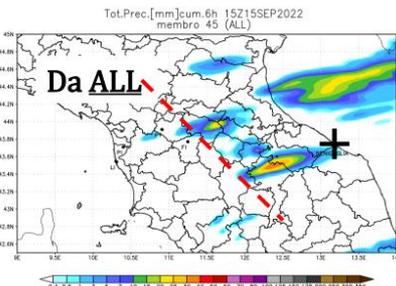
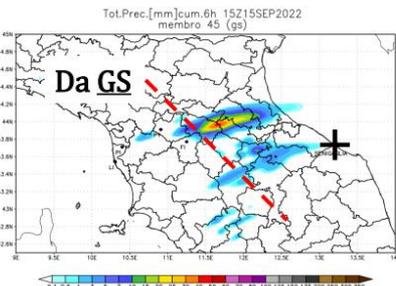
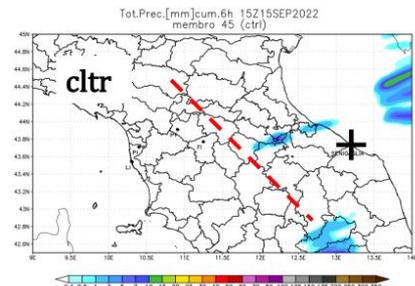
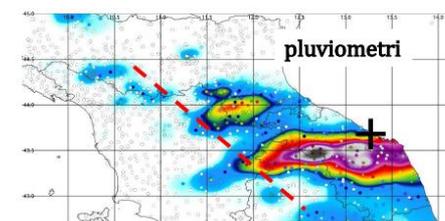
Luca Rovai^{1,2}, Andrea Antonini², Luca Fibbi^{1,2}, Valerio Capecci²,
Samantha Melani^{1,2}, A. Orlandi², Alberto Ortolani^{1,2}, Bernardo Gozzini^{1,2},

¹ National Research Council – Institute of BioEconomy (CNR-IBE), Sesto F.no (FI), Italy

² LaMMA Consortium – Laboratory of Monitoring and Environmental Modelling for the sustainable development, Sesto F.no (FI), Italy



 linea appenninica
 Senigallia



Indice

- **Prologo: Meccanica Quantistica e Quantum Dots**
- **Assimilazione Dati in RAMS e Validazione**
- **Modellistica del Moto Ondoso e Spettri Direzionali**
- **Dinamica Navale et al.**
- **Qualità dell'Aria ed Assimilazione Dati**
- **Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima**

Didattica: Fisica dell'Atmosfera, Oceanografia, Clima

1. **Lezioni divulgative e corsi meteo-mare per associazioni ed enti (e.g. CAI, Lega Navale, Gruppi Trekking, Meteo Regione Umbria)**
2. **Lezioni divulgative per ragazzi delle elementari, medie, medie superiori (visite di scolaresche al LaMMA, eventi tipo “Notte della Ricerca”)**
3. **Lezioni Singole presso Università (e.g. Scuola Superiore IANUA, Modulo Blue Growth Università di Genova, cadenza circa biennale da A.A. 2014-2015 ad A.A. 2023-2024)**
4. **Corso di Fisica dell'Atmosfera, Università di Firenze, Dip. Fisica ed Astronomia, Modulo di GFD (laurea magistrale, secondo semestre, da A.A. 2018-2019 ad A.A. 2023-2024)**
5. **Università di Firenze, PNRR per Orientamento attivo nella transizione Scuola-Università: La scienza nello studio del cambiamento climatico**