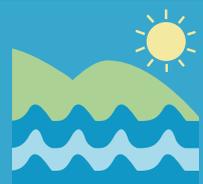


# NAP Costas

Plan Nacional de  
Adaptación Costera  
de Uruguay

Documento preparatorio

**Dinámica del Río de la Plata y de la costa oceánica.  
Simulación retrospectiva del nivel del mar,  
corrientes y oleaje**



**Informe de actividades en el marco del proyecto:  
URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en  
ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay**

## **Avance Entregables E.5.1-E.5.2**

<u>Documento:</u>	IMFIA_CCURU1_E-5.1y2	
<u>Versión</u>	1.0	
<u>Fecha:</u>	03/05/2019	
<u>Autores:</u>	Mónica Fossati Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR (Co-responsable) IMFIA-FING-UdelaR (Responsable)
<u>Contraparte:</u>	Magdalena Preve Myrna Campoleoni Mónica Gómez	PNUD PNUD Cambio Climático MVOTMA

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	3
2	Capacitación interinstitucional.....	4
2.1	Actividad 5. Generación de capacidades en las instituciones nacionales para explotar la información generada .....	4
2.2	Presentaciones .....	5

---

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye los entregables de la Actividad 5 (E.5.1 y E.5.2) del convenio firmado entre la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería; Udelar-FING) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) URU/18/002 **“Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”**.

Dicho proyecto se propone fortalecer las capacidades de las instituciones de Uruguay (academia e instituciones de Gobierno a nivel nacional y departamental) para la identificación de los impactos y las vulnerabilidades originadas por la variabilidad y el cambio climático en centros urbanos e infraestructuras costeras y zonas adyacentes. A su vez, se busca fortalecer las capacidades tanto de las instituciones de Gobierno como del resto de los actores involucrados en la definición de estrategias y acciones que posibiliten el incremento de la resiliencia ante los impactos generados por la variabilidad y el cambio climático en la zona costera.

En el primer entregable se incluyó el trabajo realizado en la Actividad 1, cuyo objetivo era la generación de bases de datos históricas de dinámica atmosférica, marítima y fluvial. Esta información fue transferida a diversas instituciones uruguayas, las cuales serán capacitadas para su uso en el marco de la actividad 5, así como al IH-Cantabria, que la está utilizando para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en la costa.

En el segundo entregable se incluyó el trabajo realizado en la Actividad 2, cuyo objetivo era caracterizar para las variables marinas la variabilidad y los cambios esperables bajo distintos escenarios de cambio climático. Para esto, se realizó un análisis mediante modelación numérica de la interacción entre el aumento del nivel medio del mar y la generación y propagación de oleaje y las ondas de marea.

En este entregable se informan las tareas vinculadas con la Actividad 5 del convenio, cuyo objetivo es la generación de capacidades en las instituciones nacionales para explotar la información generada en las investigaciones del IMFIA y de IH-Cantabria. En el marco de la misma se llevaron a cabo a fines de abril de 2019 dos instancias de capacitación por docentes del IMFIA. En este documento se presentan las principales características de dicha capacitación y se incluye el material gráfico entregado a los participantes.

---

## 2 CAPACITACIÓN INTERINSTITUCIONAL

### 2.1 *Actividad 5. Generación de capacidades en las instituciones nacionales para explotar la información generada*

A fines de abril 2019 el IMFIA realizó las instancias de capacitación planificadas en el proyecto. El público objetivo del curso fueron los profesionales y técnicos de los Ministerios e Intendencias Departamentales costeras, y el objetivo fue presentar los conceptos necesarios para entender y utilizar los resultados de los estudios de riesgo y vulnerabilidad costera frente al cambio climático, en particular aquellos generados por el IMFIA.

La capacitación se dividió en dos módulos: Módulo I de capacitación sobre aspectos básicos de dinámica marina y costera necesarios para comprender el tipo de información generada con los hindcast y los ATLAS; y Módulo II de capacitación técnica de mayor profundización en aspectos vinculados al uso de la información generada en dicha base de datos. La duración de cada módulo fue de dos días, con tres horas y media de curso cada día.

La capacitación básica (Módulo I) estuvo dirigida a profesionales y técnicos de los Ministerios e Intendencias costeras, sin necesidad de contar con formación previa en dinámica costera. La capacitación de profundización (Módulo II) estuvo dirigida principalmente a profesionales con perfil de ingeniero y afines de los Ministerios, Intendencias costeras y entidades privadas que presentan proyectos o están a cargo de obras en la zona costera. La convocatoria fue un éxito y participaron de ambas instancias casi 40 técnicos, lo cual redundó en una dinámica muy fructífera en ambos talleres.

A continuación, se presenta el programa de ambos módulos de capacitación:

- 1) Módulo I - Conceptos Básicos - 25 y 26 de abril 2019, 13:00 a 16:30hs
  - Forzantes en la costa: caudales fluviales, marea astronómica y marea meteorológica, oleaje.
  - Características principales de la dinámica del Río de la Plata y costa oceánica uruguaya.
  - Conceptos generales de la dinámica de playas.
  - Síntesis y cierre.
  
- 2) Módulo II – Profundización – 29 y 30 de abril 2019, 13:00 a 16:30hs
  - Conceptos básicos sobre modelación numérica hidrodinámica y de oleaje.
  - Principales características de los hindcast de nivel de mar, corrientes y oleaje, generados por el IMFIA.
  - Información disponible en los ATLAS generados con la información de los hindcast.
  - Síntesis y cierre.

En el Anexo a este informe se presentan las presentaciones realizadas durante cada jornada.

---

## **2.2 Presentaciones**



# Módulo I: Jueves y Viernes 13:00 a 16:30hs

## Contenido Temático

- Forzantes en la costa. Caudales fluviales, marea astronómica y marea meteorológica, oleaje
- Principales características de la dinámica del Río de la Plata y costa oceánica uruguaya
- Conceptos generales de las dinámicas de playas
- Otros

Generando capacidades para la planificación y la adaptación al cambio climático

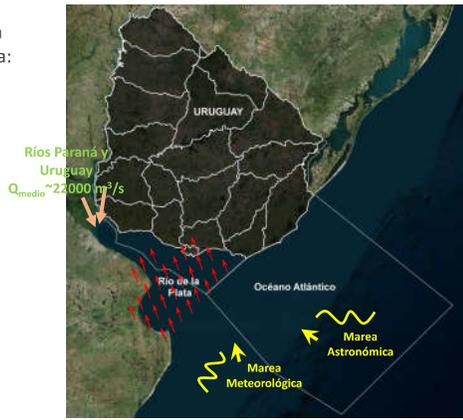
### MÓDULO 1 DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA Y DE LA COSTA OCEÁNICA

DOCENTES: Mónica Fossati & Sebastián Solari

Principales forzantes de la costa uruguaya:



Principales forzantes de la costa uruguaya:



### FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO ESTUARIOS



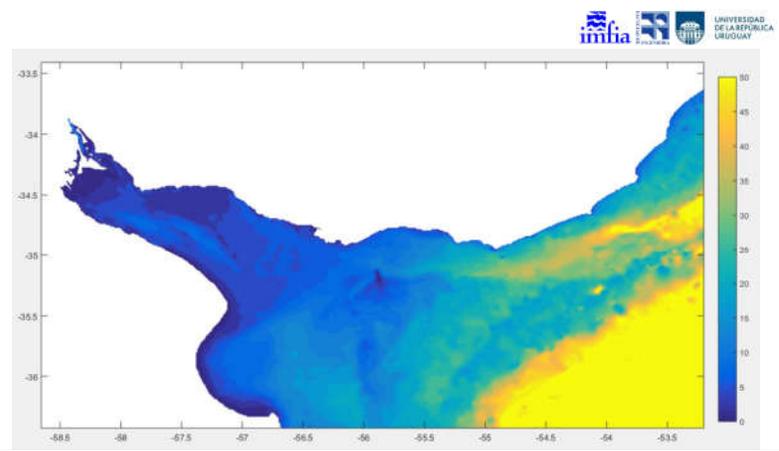
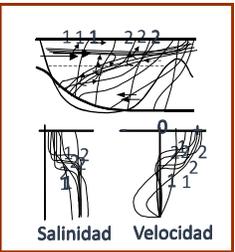
#### ESTUARIOS

Regiones de transición entre el océano y los ríos

Movimientos de marea forzados desde el océano y ingreso caudal fluvial desde los ríos.  
Gradientes de salinidad y densidad. Corrientes inducidas por densidad.

#### CLASIFICACION

- Cuña salina
- Altamente estratificado
- Parcialmente mezclado. (Circulación gravitacional)
- Mezclado



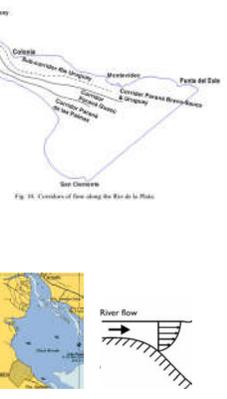
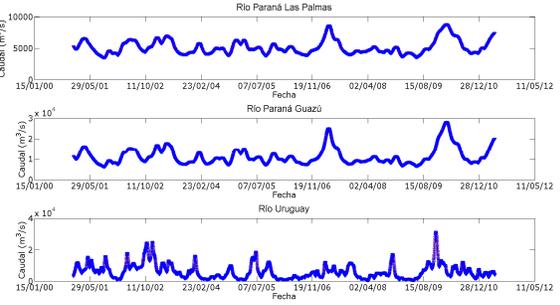
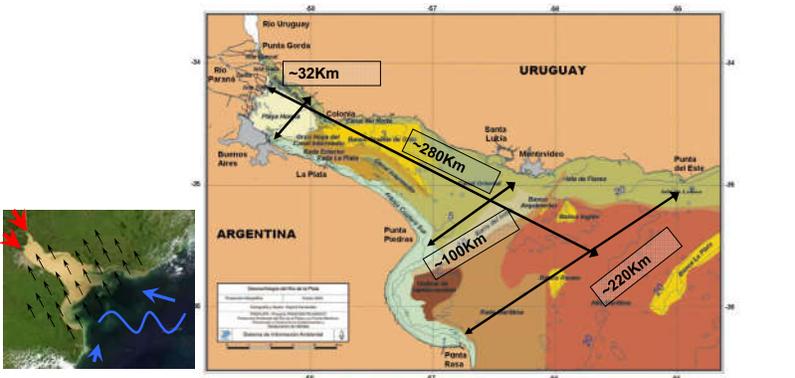
### FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO ESTUARIOS



### FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO ESTUARIOS



#### Descarga Fluvial: Ríos Paraná y Uruguay





**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

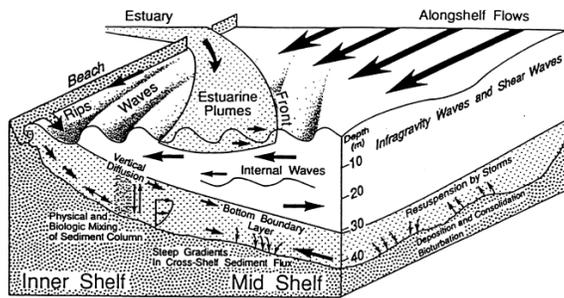


Figure 3.1.1 Hydrodynamic processes in the coastal zone (after Wright et al, 1994)

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

Los procesos físicos de corto plazo que actúan sobre las costas incluyen **olas**, **mareas**, y las **corrientes** generadas por ambas, a través de las cuales ingresa la mayor energía del sistema, y son las que generan la modificación de la costa a través del transporte, erosión y deposición de Las ondas (**olas**) son perturbaciones de un determinado fluido a través de las cuales se mueve la energía.

Nos interesan las ondas que viajan en la superficie del océano, en la interfase entre el agua y la atmósfera.

El oleaje o las ondas son fluctuaciones del nivel del mar acompañadas de **corrientes** locales, **aceleraciones** y fluctuaciones de presión.

- Procesos hidrodinámicos principales en la zona costera:**
1. Ondas inducidas por marea y por viento
  2. Corrientes inducidas por marea, vientos, densidad y oleaje

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

**ONDAS**

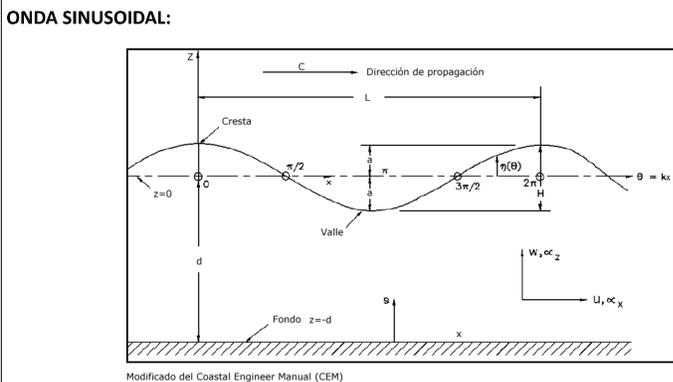
Para que se genere una ola se requiere que exista una **fuerza de energía** que, al transmitir al agua en reposo una cantidad determinada de energía, produce un **movimiento oscilatorio** de las partículas del líquido sin que haya un transporte importante de masa.

Cuando dicha superficie es perturbada se produce una onda y otra fuerza trata de recomponer el estado original.

**Principales fuerzas generadoras de ondas:**

- Fuerza del viento.
- Atracción gravitacional entre Sol, Luna y Tierra, mareas.
- Tormentas.
- Sismos o terremotos.

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

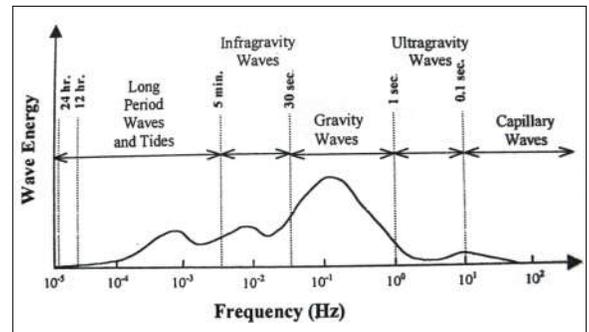


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

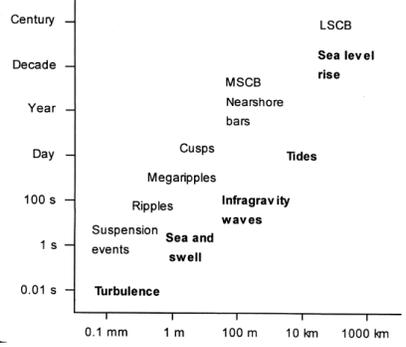
Clasificación de las ondas según la **frecuencia**. Kamphuis 2000.



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



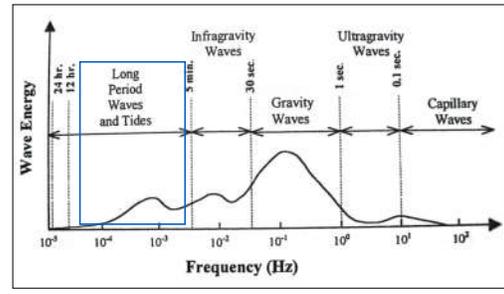
**Escala y procesos:**



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



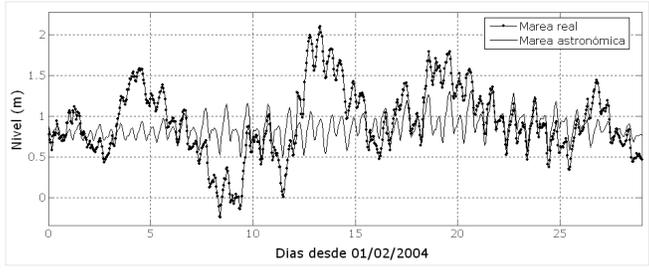
**ONDAS LARGAS**



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**EJEMPLO DE MAREA EN MONTEVIDEO – REGISTRO DE NIVELES (HORARIO)**



**MAREA ASTRONÓMICA Y MAREA METEOROLÓGICA**

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Astronómica**

Las mareas son generadas por la atracción gravitacional entre la luna, el sol y la tierra.  
Las corrientes de marea se producen en respuesta a las fluctuaciones en el nivel del mar generadas por las mareas.

La altura de marea es una función de la posición relativa de la tierra y del sol con respecto a la tierra, y varía en cada ubicación.

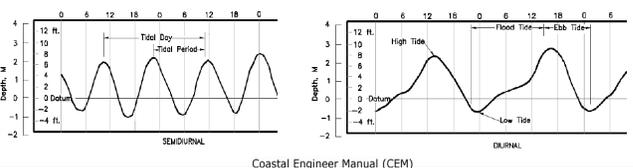
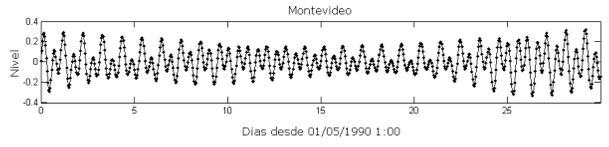
Symbol	Period, hr	Symbol	Period, hr
M <sub>2</sub>	12.421	M <sub>m</sub>	661.765
S <sub>2</sub>	12.000	S <sub>sa</sub>	4390.244
N <sub>2</sub>	12.659	S <sub>a</sub>	8790.488
K <sub>1</sub>	23.935	M <sub>sf</sub>	354.680
M <sub>4</sub>	6.2103	M <sub>f</sub>	327.869
O <sub>1</sub>	25.819	P <sub>1</sub>	26.724
M <sub>6</sub>	4.140	O <sub>2</sub>	26.870
(MK) <sub>3</sub>	8.177	T <sub>2</sub>	12.017
S <sub>4</sub>	6.000	R <sub>2</sub>	11.984
(MN) <sub>4</sub>	6.269	(2O) <sub>1</sub>	28.007
γ <sub>2</sub>	12.626	P <sub>1</sub>	24.067
S <sub>3</sub>	4.000	(2SM) <sub>2</sub>	11.607
μ <sub>2</sub>	12.872	M <sub>3</sub>	8.280
(2N) <sub>2</sub>	12.906	L <sub>2</sub>	12.192
(OO) <sub>1</sub>	22.306	(2MK) <sub>3</sub>	8.386
A <sub>2</sub>	12.222	K <sub>2</sub>	11.967
S <sub>1</sub>	24.000	M <sub>6</sub>	3.105
M <sub>1</sub>	24.834	(MS) <sub>4</sub>	6.103
J <sub>1</sub>	23.099		

Modificado del Coastal Engineer Manual (CEM)

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



- Régimen de mareas semidiurno con desigualdades diurnas
- Otras componentes importantes N<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>



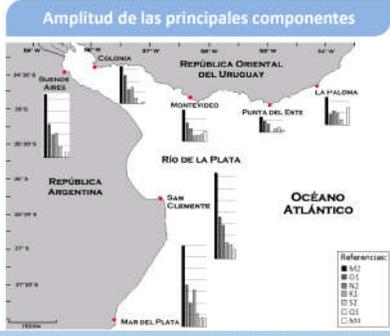
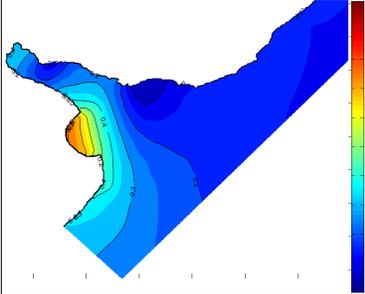
Coastal Engineer Manual (CEM)

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Astronómica**

M2 es la componente astronómica de mayor amplitud en la costa uruguaya



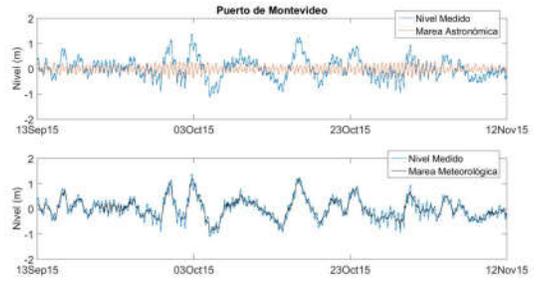
La componente astronómica es más relevante sobre la costa argentina del Río de la Plata

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

La marea meteorológica es generada por ondas que viajan desde aguas profundas generadas por tormentas y perturbaciones atmosféricas en la plataforma oceánica.

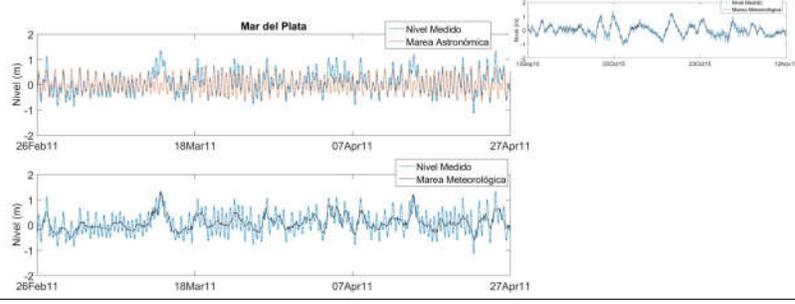


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mayor relevancia sobre la costa uruguaya del Río de la Plata



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



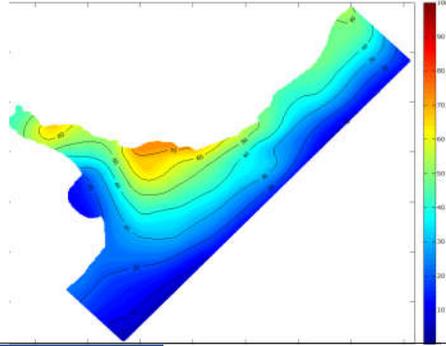
**Marea Meteorológica**

Varianza de las series originales de niveles, de la serie de marea astronómica y relación entre ellas

Estación	Varianza serie original (m)	Varianza marea astronómica (m)	Relación (%)
Mar del Plata	0.178	0.100	56%
La Paloma	0.116	0.027	23%
Punta del Este	0.117	0.005	5%
San Clemente	0.192	0.108	56%
Musevadero	0.192	0.018	9%
Torre Charvát	0.234	0.080	34%
Pilote Norden	0.218	0.041	19%
Colonia	0.237	0.034	14%
Buenos Aires	0.289	0.069	24%

Variance of the observed SDE series, the meteorological tide series and their ratio at each station:

Meteorograph station	Variance (m <sup>2</sup> )		Ratio: Met./Obs. (%)
	Observed series	Meteorological tide series	
Mar del Plata	0.19	0.07	36.3
La Paloma	0.12	0.09	74.1
Punta del Este	0.12	0.00	77.8
Musevadero	0.17	0.12	69.8
Torre Operario	0.23	0.11	48.6
Pilote Norden	0.22	0.13	56.4
Colonia	0.22	0.13	55.8
Buenos Aires	0.29	0.14	48.8



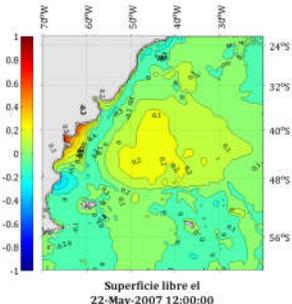
**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

- Correlación de la serie simulada en la estación Pilote Norden con las series simuladas en el resto de los puntos del dominio para diferentes lag's temporales.
- Permite tener una idea a cerca de la región donde se originan las señales más fuertes y el tiempo que tardan en propagarse.

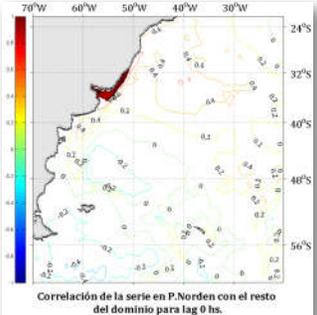


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

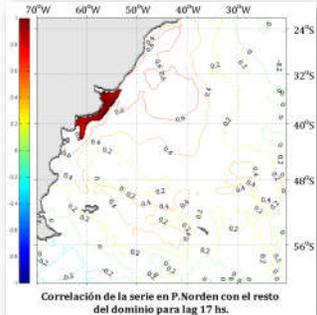


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

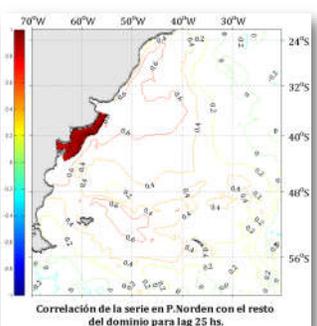


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

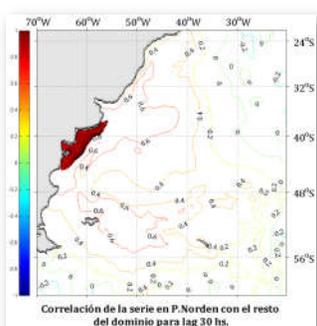


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

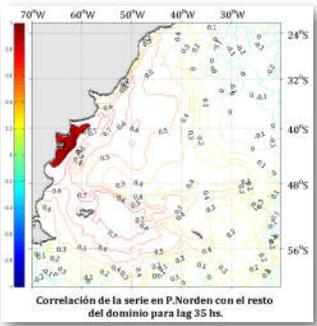


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación

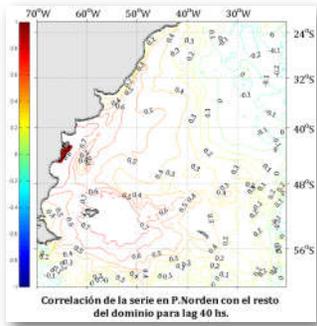


**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Marea Meteorológica**

Mapas de correlación



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**Corrientes de marea:**

Las oscilaciones de marea astronómica y meteorológica del nivel del mar generan corrientes.

Longitudes de ondas grandes orden 100 km comparadas con profundidades de metros vale la ecuación de aguas poco profundas ( $d/L < 0.05$ ) para la celeridad.

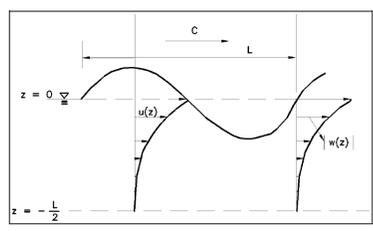


Figure II-6-2. Variation of particle velocity with depth (Ippen 1966) Coastal Engineer Manual (CEM)

**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

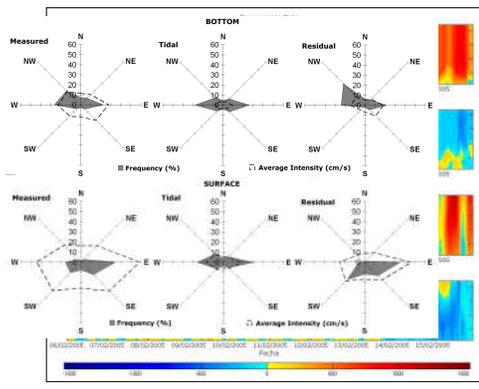


**Corrientes en Montevideo**



Predominan direcciones de flujo Este y Oeste

Intensidad astronómica aproximadamente 30% intensidad medida



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.

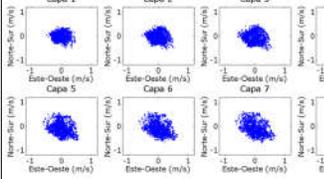
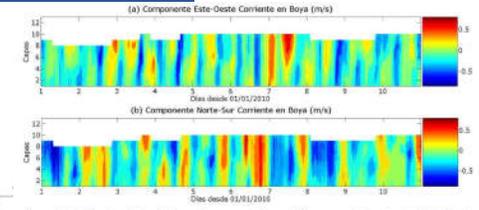
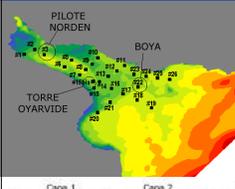


Figura A.4: Ejemplo del perfil de corrientes medido en la BOYA con referencia a fondo fijo, (a) componente Este-Oeste y (b) componente Norte-Sur obtenida para el periodo del 1/01/2010 al 10/01/2011.

Figura A.6: Ejemplo de diagramas de la corriente medida desde el fondo (capa 1) hacia la superficie, medidos entre el 10 al 15 de diciembre de 2009

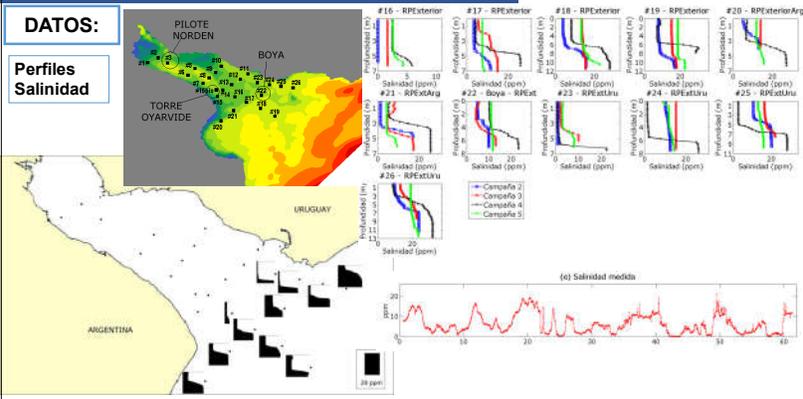
**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Mareas, ondas de tormenta, oleaje y corrientes inducidas.



**FORZANTES DEL SISTEMA COSTERO**  
Dinámica de Estuarios



**DATOS:**  
Perfiles Salinidad



# Oleaje

¿Qué es el oleaje?

- Superficie libre ≠ Ola
- Definición de ola

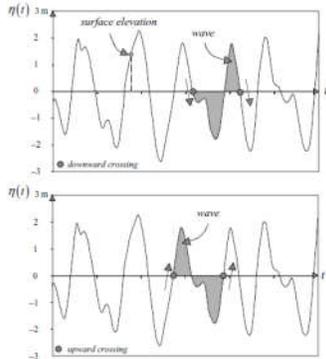


Figure 3.1 The definition of a 'wave' in a time record of the surface elevation with downward zero-crossings (upper panel) or upward zero-crossings (lower panel).

- Oleaje local (sea)
- Mar de fondo (swell)

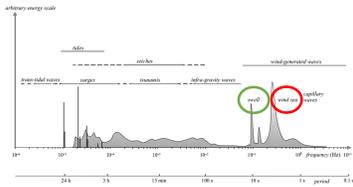
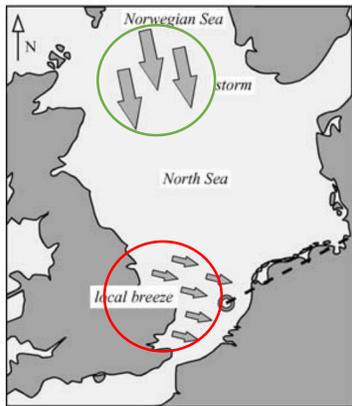


Figure 1.1 Frequencies and periods of the vertical motions of the ocean surface (after Munk, 1950).



¿Por qué nos interesa el oleaje?

## Playas

Una playa, es un ambiente de transición terrestre – marino, condicionado por el continuo transporte de arena entre el mar y las dunas generado por el oleaje y el viento. La playa se puede definir como la zona de sedimento no consolidado (sedimento suelto, en general arena) que se extiende desde la zona más alta que alcanza el oleaje en temporal hasta la profundidad en donde el oleaje ya no produce movimientos del sedimento.

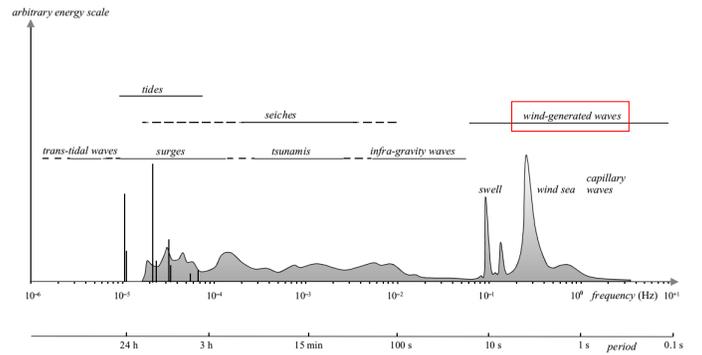
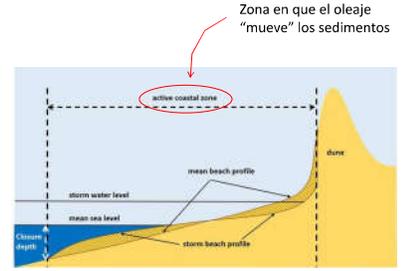


Figure 1.1 Frequencies and periods of the vertical motions of the ocean surface (after Munk, 1950).

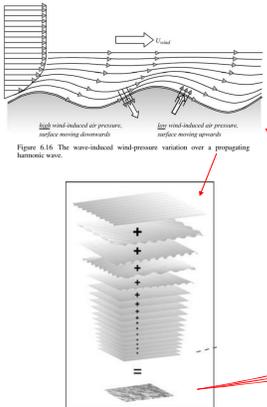
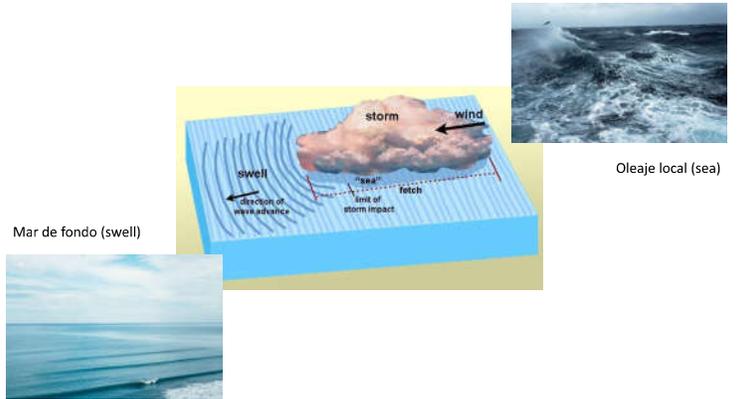


Figure 6.16 The wave-induced wind-pressure variation over a propagating harmonic wave.

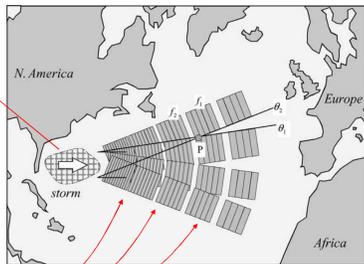


Figure 6.13 The frequency-direction dispersion of ocean waves transforms irregular, short-crested wind-sea waves in a storm into regular, long-crested swell outside the storm.

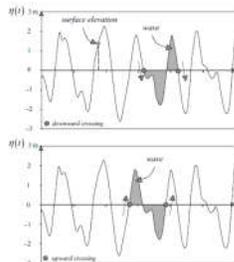
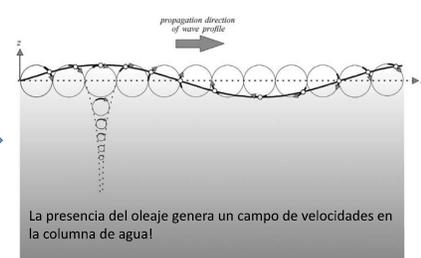
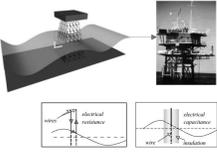


Figure 3.1 The definition of a 'wave' in a time record of the surface elevation with downward zero-crossings (upper panel) or upward zero-crossings (lower panel).

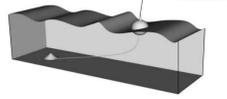


La presencia del oleaje genera un campo de velocidades en la columna de agua!

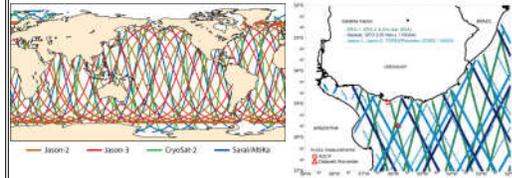
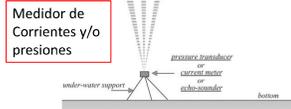
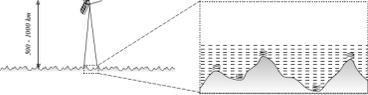
¿Cómo se mide el oleaje?  
Medir oleaje ≠ medir marea



Boya



Información satelital



Boyas

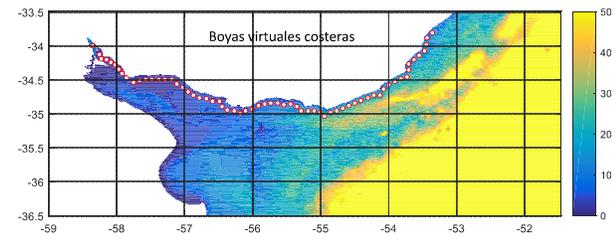
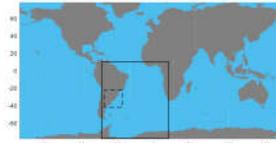
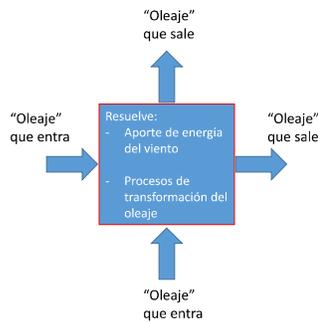
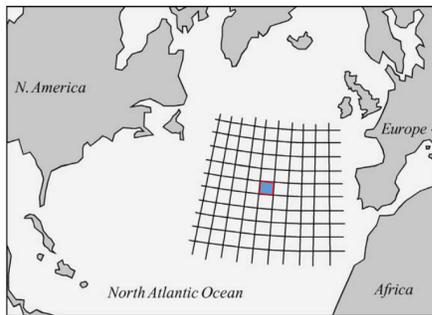
Campañas puntuales con perfiladores de corriente

Campaña puntual con boya

Campañas puntuales con perfiladores de corriente



Ante la escases de datos la alternativa son los modelos numéricos!



• Características de ola individual: (H,T)<sub>i</sub>

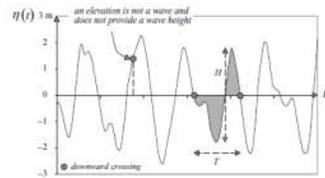


Figure 3.2 The definition of wave height and wave period in a time record of the surface elevation (the wave is defined with downward zero-crossings).

• ¿Cómo caracterizo el oleaje? → Estado de mar

• Estado de mar: condiciones representativas de 1 – 3 hrs (tiempo de registro mínimo 15 – 30 min)

• ¿Cómo caracterizo un estado de mar?

Mínimo tres parámetros: una altura de ola, un período y una dirección

• i → posición en secuencia temporal

• j → posición en secuencia jerárquica (H<sub>1</sub>>H<sub>2</sub>>...>H<sub>N</sub>)

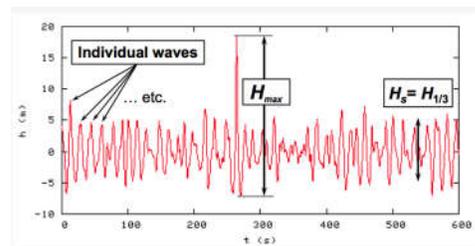
$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

$$\text{significant wave height} = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j$$

$$H_{msl} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2}$$

$$H_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} H_j$$

• Distribución de crestas y alturas individuales máximas



$$\text{mod}(H_{max}) \approx H_{msl} \sqrt{\frac{1}{2} \ln N}$$

$$H_{max} \approx 2H_s$$

- $i \rightarrow$  posición en secuencia temporal
- $j \rightarrow$  posición en secuencia jerárquica ( $T_1 > T_2 > \dots > T_N$ )

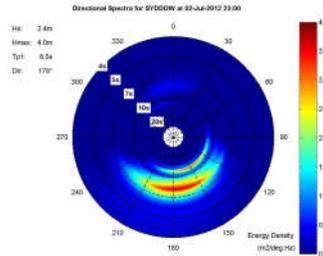
$$\text{mean zero-crossing wave period} = \bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i}$$

$$\text{significant wave period} = T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_{0,j}$$

$$T_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} T_{0,j}$$

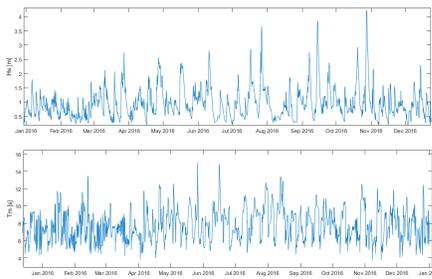
- ¿Cómo caracterizo un estado de mar?
- Mínimo tres parámetros: una altura de ola, un período y una dirección

**Espectro de oleaje** (da la caracterización completa del estado de mar)

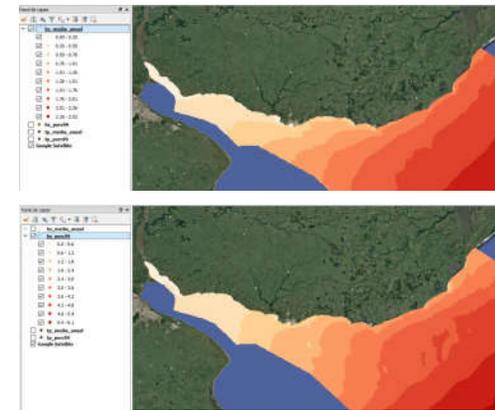
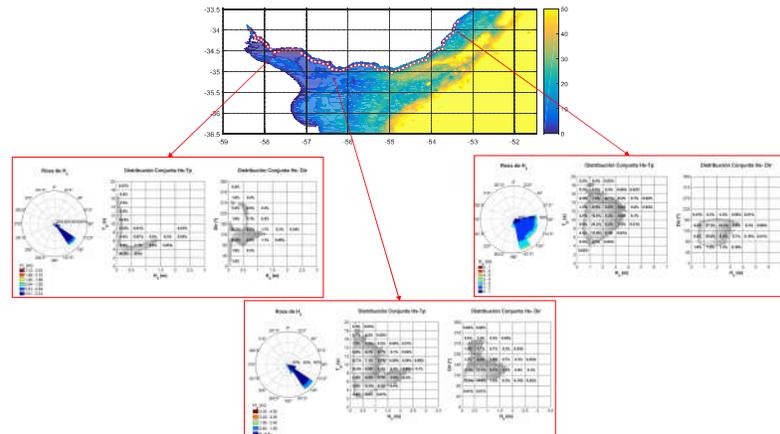
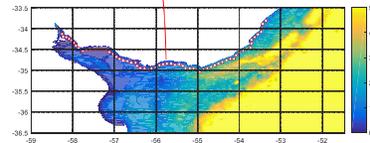


En general se usa convención náutica: se indica de donde viene el oleaje, en grados medidos desde el norte en sentido horario.

El espectro permite identificar una dirección pico ( $D_p$ ) y un período pico ( $T_p$ ), así como calcular una dirección media ( $D_m$ ).



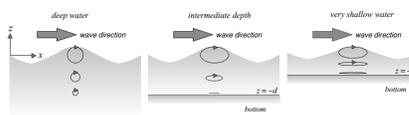
En cada boya virtual se tienen los espectros de oleaje (uno por hora) y la serie de parámetros que caracterizan el estado de mar:  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ,  $D_m$ , ...



Hs Media

Hs 99%

El oleaje se transforma al propagarse hacia la playa

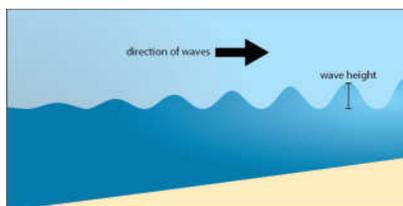


Procesos de transformación del oleaje:

- Asomeramiento
- Refracción
- Difracción
- Reflexión
- Disipación

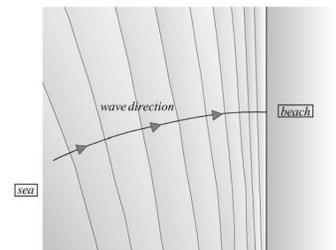
Procesos de transformación del oleaje

- Asomeramiento
- Cambio en la longitud de onda y la altura de ola del oleaje a medida que disminuye la profundidad.



Procesos de transformación del oleaje

- Refracción
- Cambio en la dirección de propagación del oleaje por efecto de las variaciones de profundidad...

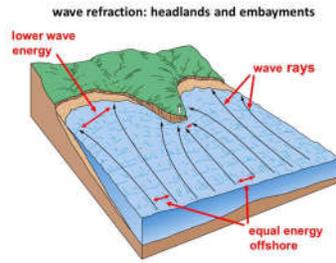


## Procesos de transformación del oleaje

- Refracción

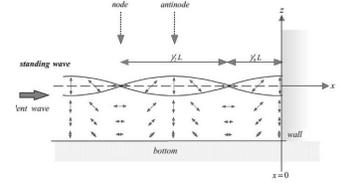
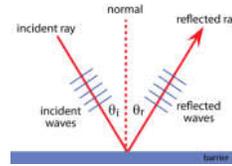
Cambio en la dirección de propagación del oleaje por efecto de las variaciones de profundidad...

...pero además de cambiar la dirección, cambia la altura de ola.



## Procesos de transformación del oleaje

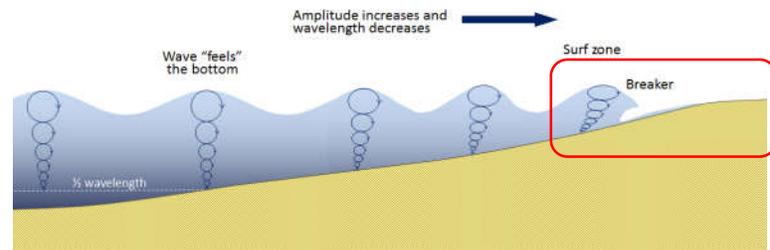
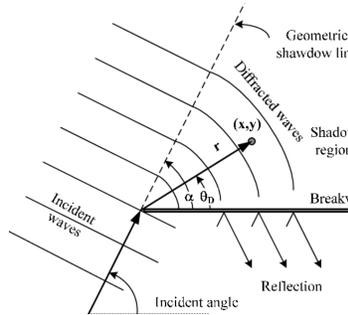
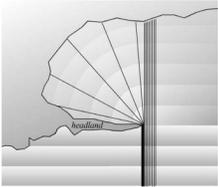
- Reflexión



## Procesos de transformación del oleaje

- Difracción

Es la transmisión de energía en dirección normal a la de propagación de la ola





Generando capacidades para la planificación y la adaptación al cambio climático

## MÓDULO 1 DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA Y DE LA COSTA OCEÁNICA

DOCENTES: Mónica Fossati & Sebastián Solari

### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



Proyecto URU/18/002 'Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay'

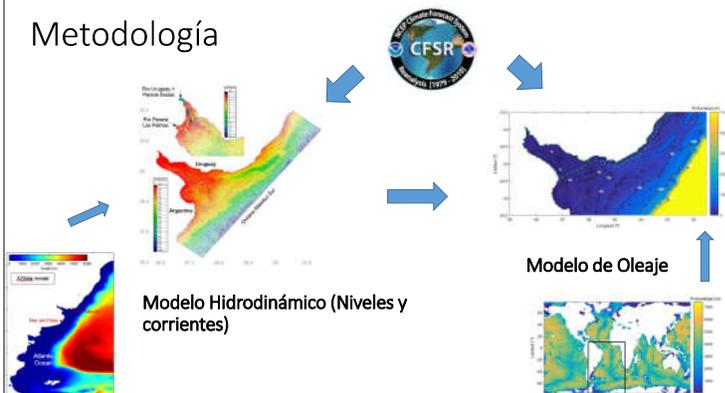
Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar y de oleaje en la costa uruguaya

Modelación numérica

### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



#### Metodología

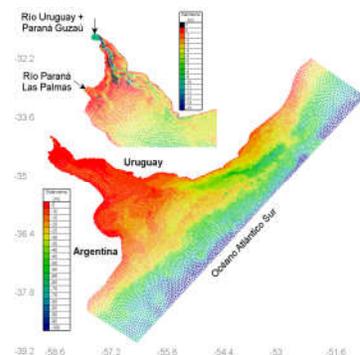


### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



#### Nivel de mar y corrientes

- Se implementó, calibró y validó el modelo Telemac-2D en el Río de la Plata y la plataforma continental
- Calibrado con datos de niveles en Colonia, Montevideo y La Paloma. Validado con datos de niveles en Pilote Norden, Juan Lacaze y Punta del Este
- Malla de 7km de lado en el océano y 1km de lado en la costa
- Modelo forzado por vientos CFSR+CFSv2
- Periodo 1985-2016

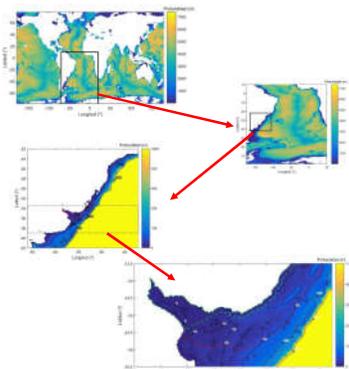


### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



#### Oleaje

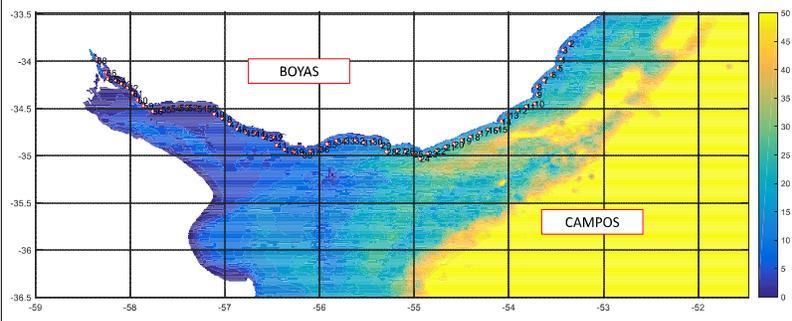
- Modelación anidada desde escala global hasta local
- Forzado con vientos CFSR+CFSv2
- Incluye niveles y corrientes obtenidas previamente en mallas locales
- Calibrado con datos altimétricos (satelitales) y validado con datos altimétricos y medidos in situ
- Periodo 1985-2016



### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



#### Vientos, niveles, corrientes y oleaje



### HINDCAST NIVELES Y OLEAJE



Series temporales horarias en boyas virtuales en toda la costa uruguaya durante 31 años (1985 a 2016):

- Nivel de mar
- Parámetros característicos del oleaje
- Corrientes integradas en vertical
- Vientos de Reanálisis



## Procesos de transformación del oleaje

### • Refracción

Cambio en la dirección de propagación del oleaje por efecto de las variaciones de profundidad...

...pero además de cambiar la dirección, cambia la altura de ola.

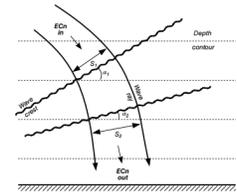
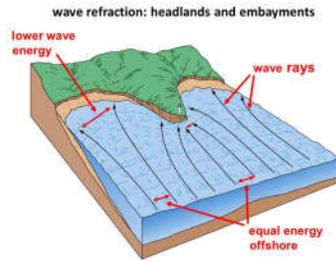
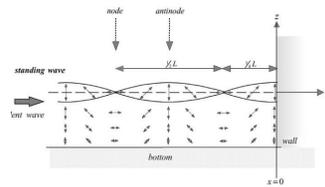
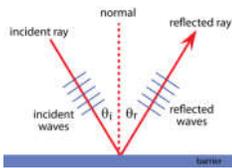


Fig. 4.11 Schematic diagram of depth-based wave refraction. Wave rays are lines perpendicular to the wave crest, which indicate the direction of wave propagation. See text for further explanation.

## Procesos de transformación del oleaje

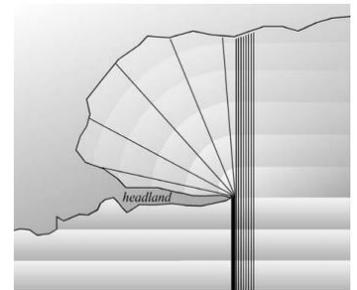
### • Reflexión



## Procesos de transformación del oleaje

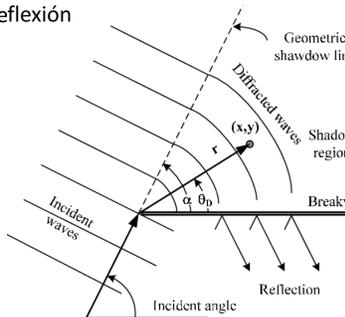
### • Difracción

Es la transmisión de energía en dirección normal a la de propagación de la ola



## Procesos de transformación del oleaje

### • Difracción / Reflexión



## Procesos de transformación del oleaje

### • Rotura

Figura 24. Esquema característico del perfil de una playa (resueta).



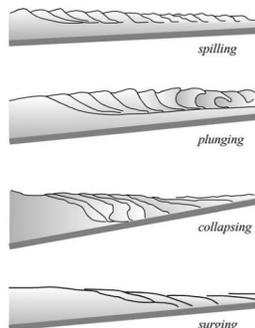
Fuente: Guzmán-Estrada y Marnett, Ley (2006). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10261/138874/1/articulo2458.html>

## Procesos de transformación del oleaje

### • Rotura

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_{\infty}}$$

spilling: if  $\xi_{\infty} < 0.5$   
 plunging: if  $0.5 < \xi_{\infty} < 3.3$   
 collapsing or surging: if  $\xi_{\infty} > 3.3$

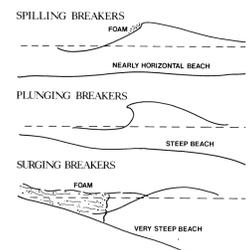


## Procesos de transformación del oleaje

### • Rotura

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_{\infty}}$$

spilling: if  $\xi_{\infty} < 0.5$   
 plunging: if  $0.5 < \xi_{\infty} < 3.3$   
 collapsing or surging: if  $\xi_{\infty} > 3.3$



## Hidrodinámica de la zona de rompientes

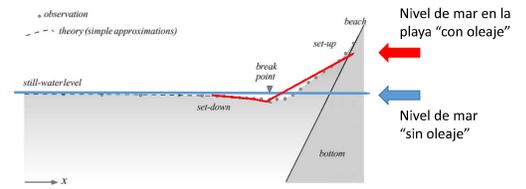
Figura 24. Esquema característico del perfil de una playa (resaca).



Fuente: Gutiérrez-Extremera y Montaña, Ley (2006). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10469/10469/1/tesis258.pdf>

## Hidrodinámica de la zona de rompientes

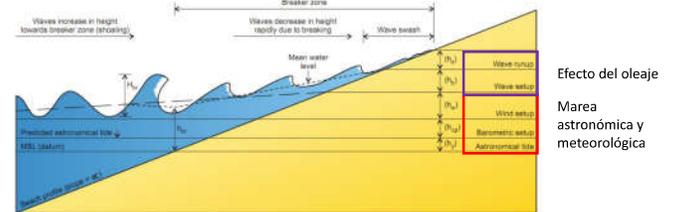
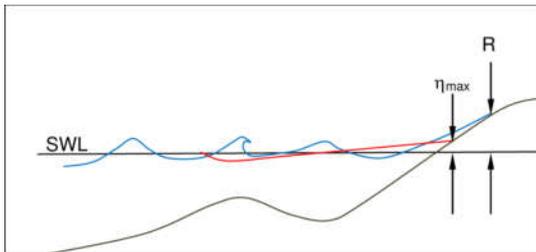
- Set-up



$$set - up \sim \sqrt{(L_0 H_0)}$$

## Hidrodinámica de la zona de rompientes

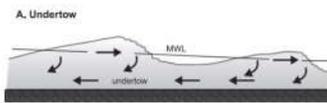
- Swash y Run-up (ascenso de la ola)



Efecto del oleaje  
Marea astronómica y meteorológica

## Hidrodinámica de la zona de rompientes

- Corriente de resaca (undertow)

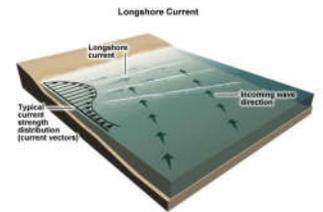


$$u \sim cm s^{-1}$$

## Hidrodinámica de la zona de rompientes

- Corriente litoral (longshore current)

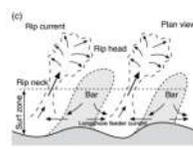
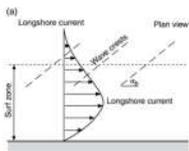
- Por incidencia oblicua del oleaje



$$u \sim m s^{-1}$$

## Hidrodinámica de la zona de rompientes

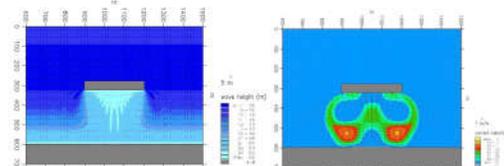
- Corriente de retorno (rip current)



## Hidrodinámica de la zona de rompientes

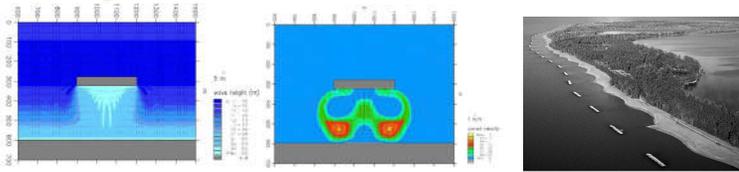
- Corriente litoral

- Por incidencia oblicua del oleaje
- Por gradiente en la energía del oleaje



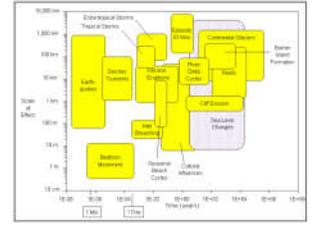
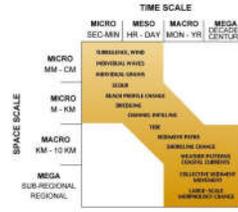
# Hidrodinámica de la zona de rompientes

- Corriente litoral
- Por incidencia oblicua del oleaje
- Por gradiente en la energía del oleaje



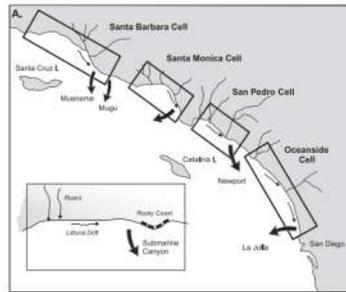
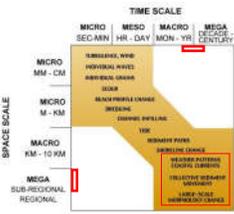
# Dinámica de playa

- ¿Cómo interactúa la playa (los sedimentos) con el oleaje y las corrientes?



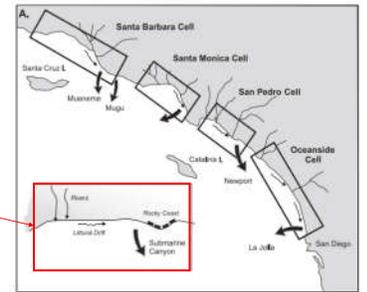
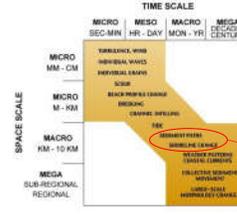
# Dinámica de playa

- Gran escala: celdas litorales



# Dinámica de playa

- Escala "macro"



# Dinámica de playa

- Transporte litoral y modelos de evolución de línea de costa

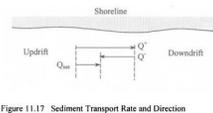
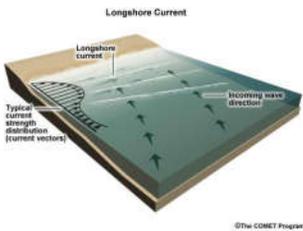
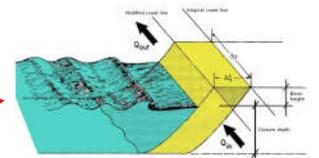
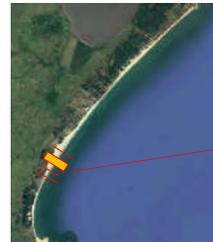


Figure 11.17 Sediment Transport Rate and Direction

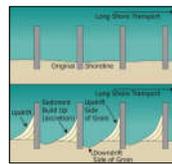
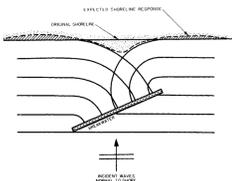
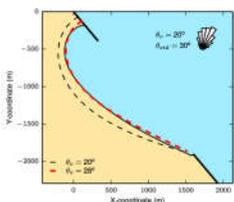
# Dinámica de playa

- Transporte litoral y modelos de evolución de línea de costa



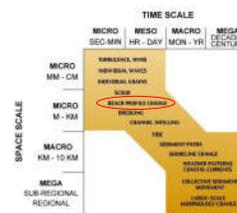
# Dinámica de playa

- Transporte litoral y modelos de evolución de línea de costa

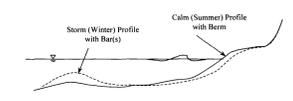


# Dinámica de playa

- Escalas "meso" y "micro": perfil de playa



(a) Ciclo anual

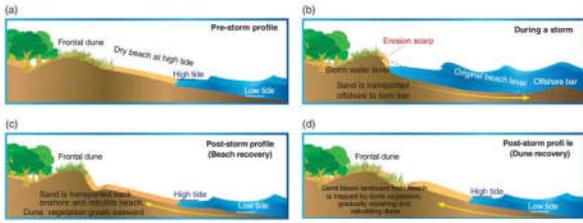


(b) Respuesta a eventos



# Dinámica de playa

- Escalas “meso” y “micro”: perfil de playa



# Dinámica de playa

- Modelos → información para calibración y validación

Modelos de una línea: Tasa de transporte litoral

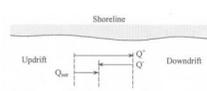


Figure 11.17 Sediment Transport Rate and Direction

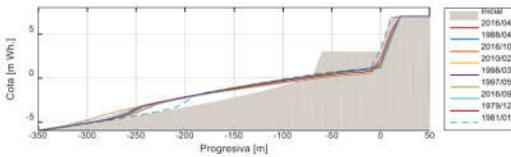


# Dinámica de playa

- Modelos → información para calibración y validación

Modelos de perfil de playa:

- Verificación de erosión durante temporal
- Tasa de recuperación post temporal (migración de bancos)

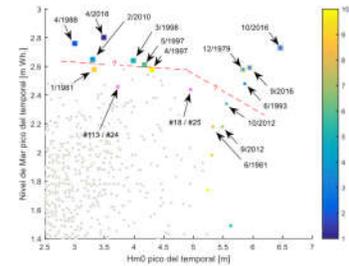
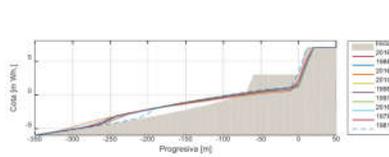


# Dinámica de playa

- Modelos → información para calibración y validación

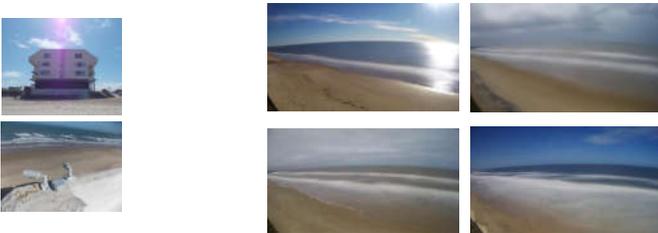
Modelos de perfil de playa:

- Verificación de erosión durante temporal
- Tasa de recuperación post temporal (migración de bancos)



# Dinámica de playa

- Modelos → información para calibración y validación





Generando capacidades para la planificación y la adaptación al cambio climático

## MÓDULO 2 SIMULACIÓN RETROSPECTIVA (HINDCAST) DEL NIVEL DEL MAR, CORRIENTES Y OLAJE

DOCENTES: Mónica Fossati & Sebastián Solari

### Introducción

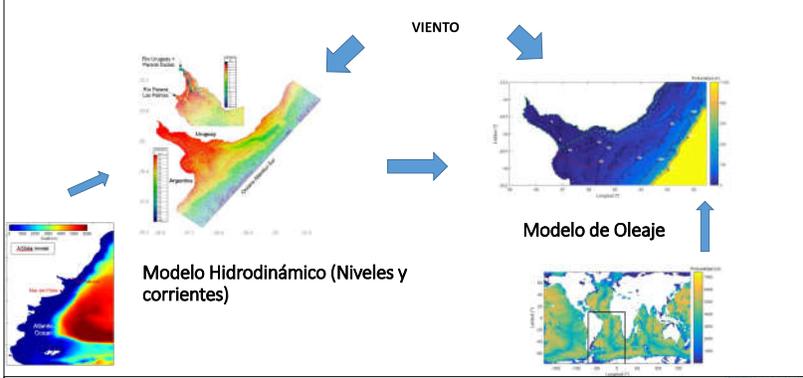
Proyecto URU/18/002 'Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay'

Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar y de oleaje en la costa uruguaya

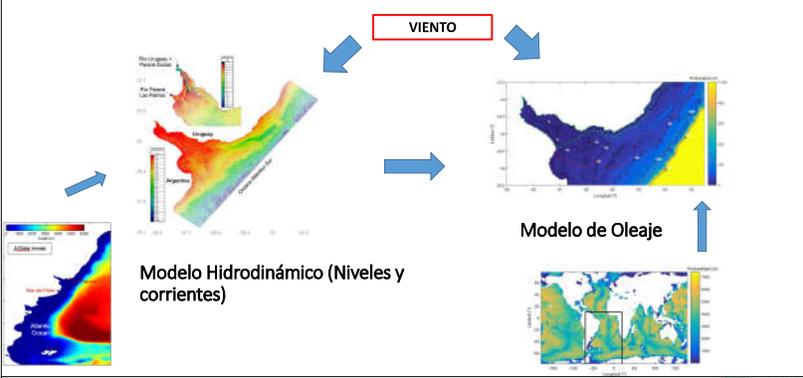
Michelle Jackson, Rodrigo Alonso, Pablo Santoro  
Mónica Fossati, Sebastián Solari

IMFIA\_CCURU1\_E.1.1.pdf

### Metodología



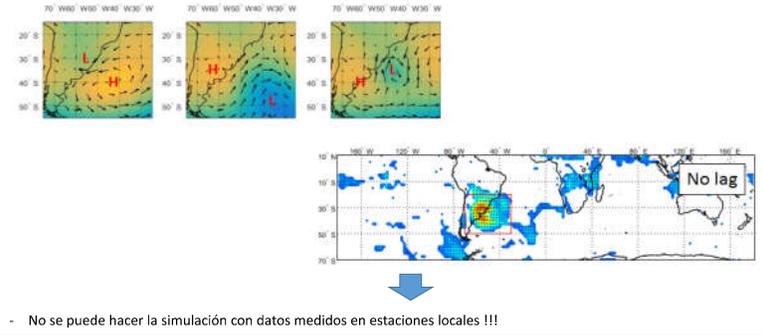
### Viento



### Viento

¿Qué datos de viento se necesitan forzar los modelos de niveles, corrientes y oleaje?

- Viento en superficie en la zona de generación de la marea meteorológica y el oleaje

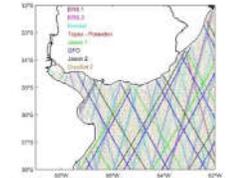
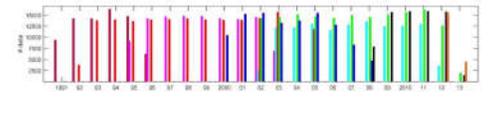


- No se puede hacer la simulación con datos medidos en estaciones locales !!!

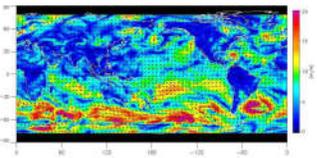
### Viento

¿Qué datos de viento en superficie hay disponibles en la zona de generación de la marea meteorológica y el oleaje?

- Datos satelitales (altimétricos)



- Datos de reanálisis



### Viento

¿Qué datos de viento en superficie hay disponibles en la zona de generación de la marea meteorológica y el oleaje?

- Reanálisis atmosféricos:

Combina modelos numéricos con asimilación de datos para generar una serie temporal de estados atmosféricos pasados.

Requieren una importante infraestructura para recibir la información a asimilar, ejecutar los modelos numéricos y almacenar la información generada.

Los de uso más habitual son los generados en centros de investigación de Europa y E.E.U.U.:



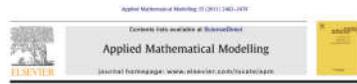
ERA-40 / ERA-Interim / ERA-5



+ CFSR v2

### Viento

Antecedentes de uso de datos de reanálisis



Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata  
P. Santoro, M. Fernández, M. Fossati, C. Carré, E. Terra, L. Piedra-Cuerva\*

Wave energy resource assessment in Uruguay  
Rodrigo Alonso\*, Sebastián Solari, Luis Teixeira

### Viento

Validación de datos de reanálisis

(1) + CFSR v2 vs. Modelo local WRF (IMFIA) forzado con CFSR

↓

No presenta mejoras significativas en la zona de interés y no tiene continuidad temporal equivalente

(2) + CFSR v2 vs. datos medidos (estaciones y satelitales)

### Viento

Validación de datos de reanálisis

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - E) (O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - E)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}$$
 and
 
$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((E_i - E) - (O_i - O))^2}}{\theta}$$

### Viento

Validación de datos de reanálisis

Total de datos  $\times 10^4$

Total de estaciones

### Viento

Validación de datos de reanálisis

CFSR fine. BIAS (m/s)

CFSR fine. RMSE (m/s)

CFSR fine. Correlation coefficient

### Viento

Validación de datos de reanálisis

CFSR fine

NDObs= 2515  
 Mean ObsMod= 6.016, 28  
 Std ObsMod= 2.852, 5  
 BIAS= 0.383  
 RMSE= 2.333  
 SI= 38.3  
 r= 0.635

### Viento

Validación de datos de reanálisis

CFSR fine

NDObs= 1906  
 Mean ObsMod= 10.016, 19  
 Std ObsMod= 3.016, 19  
 BIAS= -0.211  
 RMSE= 2.411  
 SI= 47.2  
 r= 0.809

### Viento

Validación de datos de reanálisis

Todos los datos

Extremos sospechosos

Todos los datos

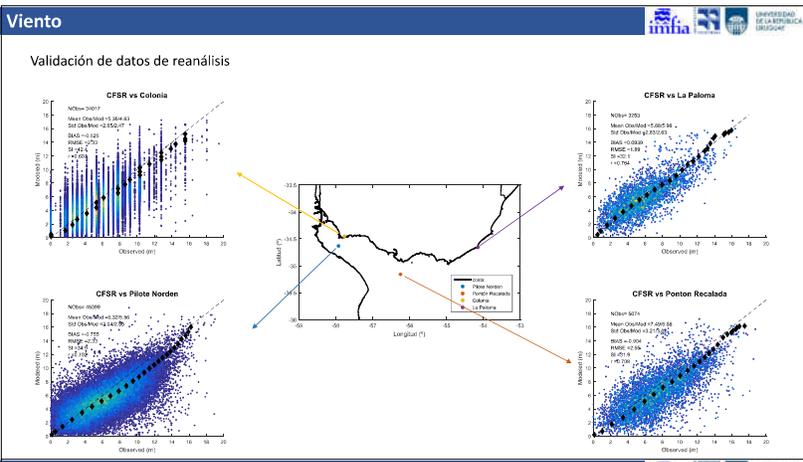
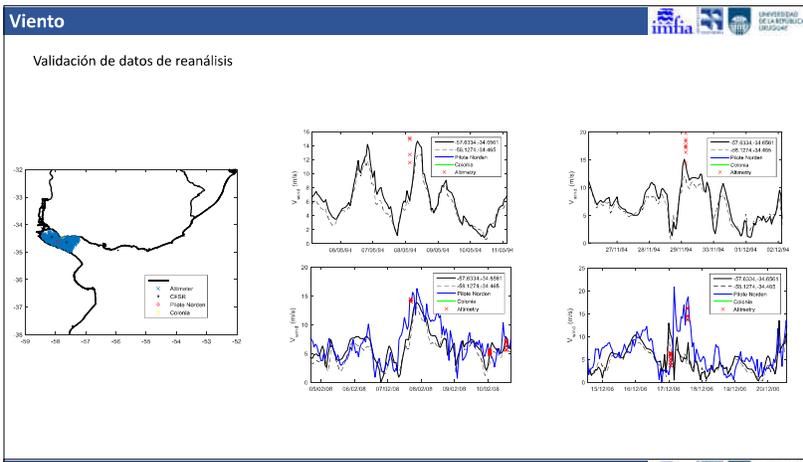
Sin SatID 2

### Viento

Validación de datos de reanálisis

Sin SatID 2

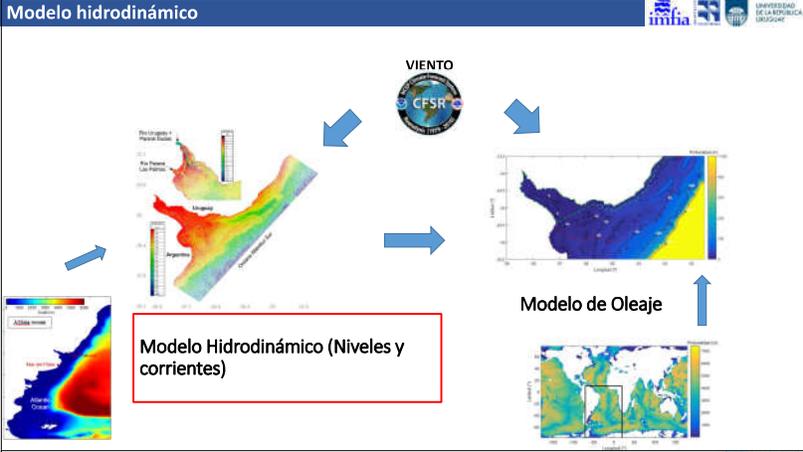
NDObs= 1774  
 Mean ObsMod= 10.016, 18  
 Std ObsMod= 3.016, 18  
 BIAS= -0.211  
 RMSE= 2.411  
 SI= 47.2  
 r= 0.809



### Viento

#### Conclusiones respecto a los vientos

- Tomando como referencia datos altimétricos de velocidad del viento sobre el mar, los datos obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR en su mayor resolución presentan en términos generales un buen desempeño en el dominio analizado.
- Para el Río de la Plata exterior y las regiones correspondientes a la costa atlántica se obtuvieron los mejores ajustes.
- En el Río de la Plata interior es donde se cuenta con menos datos altimétricos y donde se constató el peor desempeño del CFSR. De todas formas se considera aceptable y no se dispone de registros de eventos extremos independientes suficientes para confirmar sesgos y ensayar una corrección estadística.
- Analizando casos particulares en esta región se encontraron eventos extremos de viento que no son captados en el reanálisis.



### Modelo Hidrodinámico

Los niveles de la superficie libre son un insumo fundamental para la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los riesgos de erosión e inundación en la costa Uruguaya.

Generación de una base de datos de nivel de mar homogénea que cubra toda la costa de Uruguay, con alta resolución temporal y espacial y de larga duración.

Implementación de un modelo hidrodinámico, apropiadamente calibrado y validado en base a la información de campo disponible, para luego realizar simulaciones retrospectivas (hindcast) cubriendo un período de más 30 años.

### Modelo Hidrodinámico

#### Metodología

Se utilizó el modelo numérico **TELEMAC-MASCARET** (Hervouet, 2007): módulo hidrodinámico bidimensional **TELEMAC2D**, que considera los principales forzantes de la hidrodinámica del sistema

- Calibración
  - En función de dos parámetros
    - Coefficiente de fricción de fondo (número de Manning,  $n$ )
    - Coefficiente de arrastre del viento ( $C_p$ )
- Validación
  - Evaluación de los resultados mediante RMSE, BIAS, gráficos de dispersión y gráficos cuantil-cuantil. Distribución de picos de tormenta medidos y modelados.
  - Hindcast cubriendo el periodo de 1985-2016 (32 años)

### Modelo Hidrodinámico

## TELEMAC-MASCARET

open TELEMAC-MASCARET  
The mathematically superior suite of solvers

- Sistema de código abierto ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org))
- TELEMAC-2D: Resuelve ecuaciones gobernantes para cuerpos de agua someros promediadas en la vertical (ecuación de balance de masa o continuidad, ecuaciones de balance mecánico y ecuación de transporte) bajo hipótesis de fluido incompresible y distribución de presiones hidrostática.
- Método de elementos finitos (malla no estructurada)

### Modelo Hidrodinámico

#### Descripción del Modelo

- Dominio y malla
  - Comprende zona delimitada entre Mar del Plata (Arg.) y Río Grande (Brasil) y se extiende 170 km hacia la plataforma oceánica.
  - Batimetría: Cartas SOHMA
  - Malla no estructurada
  - Elementos triangulares de 7 Km en la frontera oceánica hasta 1 km en la costa uruguaya
  - Aproximadamente 37500 nodos y 73700 elementos

## Descripción del modelo

- Forzantes
  - Aportes de **caudal** de los ríos Uruguay y Paraná (valor medio diario). Datos INA, Salto Grande, UTE.
  - Campos de **viento y presión** obtenidos del reanálisis de NCEP-CFSR (Saha et al., 2010).
  - Mareas** provenientes del Astide en fronteras abiertas con el O. Atlántico.

**Astide** (Martínez et al., 2015): implementación calibrada del modelo MOHID (Mateus & Neves, 2013) forzado con marea astronómica en frontera oceánica y vientos y presiones de reanálisis del NCEP-CFSR en superficie



## Calibración

La calibración del modelo se realizó en función de dos parámetros: el coeficiente de fricción de fondo (en este caso el número de Manning,  $n$ ) y el coeficiente de arrastre del viento ( $C_{fr}$ ).

$$\tau_{fondo} = \frac{1}{2} \rho_{agua} C_{fr} U |\vec{U}|$$

siendo  $\rho_{agua}$  la densidad del agua,  $U$  la corriente integrada en vertical, y  $C_{fr}$  un coeficiente de fricción, que para el caso de la formulación de Manning es:

$$C_{fr} = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}$$

siendo  $n$  el número de Manning,  $g$  la gravedad y  $h$  la altura de la columna de agua

$$\tau_{viento} = C_D \rho_{aire} |\vec{W}| |\vec{W}|$$

siendo  $C_D$  el coeficiente de arrastre,  $\rho_{aire}$  la densidad del aire y  $W$  la velocidad del viento en 10m.

- $C_D$  constante
- $C_D$  variable (función de la velocidad de viento), se calibra un parámetro de escala que mayor (o menor) el valor de  $CD$  no uniforme a partir de la formulación de Flather (1976):

$$C_D = \begin{cases} 0.565 \times 10^{-6} & \text{si } |\vec{W}| < 5 \text{ m/s} \\ (-0.12 + 0.137 \times 0.565 |\vec{W}|) \times 10^{-6} & \text{si } 5 < |\vec{W}| < 19.22 \text{ m/s} \\ 2.5131 \times 10^{-6} & \text{si } |\vec{W}| > 19.22 \text{ m/s} \end{cases}$$

## Simulaciones

- Se realizó un total de 40 simulaciones de calibración
- Cd Fijo
  - Cd entre 0.75E-6 y 4E-6
  - Manning entre 0.0075 y 0.03
- Cd Variable
  - Coficiente de escala entre 0.85 y 1.3
  - Manning entre 0.0075 y 0.03
- Cd Variable y numero de Manning variable en el dominio

SUMA													
BIAS (m)					RMSE (m)								
Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4
0.0075	1.14						0.0075	6.05					
0.009	0.15	0.14	0.14	0.14			0.009	2.72	2.77	2.87	2.80		
0.01		0.11	0.10	0.09	0.08	0.01		0.67	0.68	0.85	1.09		
0.0125			0.15	0.15		0.0125		0.63	0.64	0.67	0.92		
0.015				0.19	0.11	0.19	0.015		0.64	0.67	0.92		
0.02		0.24	0.24	0.30	0.30	0.02		0.72	0.68	0.73			
0.03			0.33		0.34	0.03		0.80					0.89

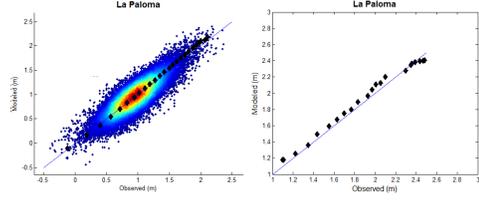
Simulaciones con n variable en el dominio						
	1	2	3	4	5	6
n interior	0.009	0.009	0.009	0.007	0.007	0.007
n intermedio	0.01	0.009	0.015	0.015	0.0125	0.0175
n exterior	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

## Resultados

- Configuración escogida:

n	C <sub>fr</sub>
Zona interior	0.007
Zona intermedia	0.015
Zona exterior	0.015

Variable (Flather, 1976)

## Información disponible

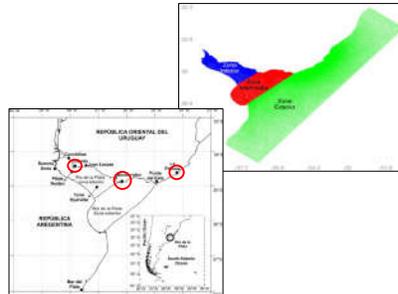


Estación	Período
La Paloma	1934-2016
Punta del Este	1971-2017
Montevideo	1969-2017
Juan Lacaze	1979-2014
Conchillas	2007-2009
Colonia	2006-2017
Pilote Norden	2003-2014

Frecuencias de medición desde cinco minutos hasta diarias.

## Calibración

- Tres configuraciones diferentes:
  - Cof. Fricción de fondo uniforme en el dominio y coeficiente de arrastre del viento constante.
  - Cof. Fricción de fondo uniforme en el dominio y coeficiente de arrastre del viento variable dependiente de la intensidad del viento según formulación de Flather (1976).
  - Cof. Fricción de fondo no uniforme en el dominio, y coeficiente de arrastre del viento variable dependiente de la intensidad del viento según formulación de Flather (1976).
- 3 estaciones utilizadas: La Paloma, Montevideo y Colonia.
- Años con pocos datos faltantes y ocurrencia de eventos severos: 2002, 2003 y 2004.

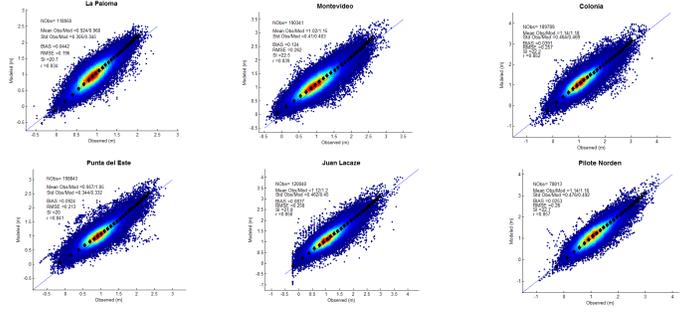


## Simulaciones

	LA PALOMA				MONTEVIDEO				COLONIA			
	BIAS	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4
Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4
0.0075	0.47						0.21					0.46
0.009	0.01	0.00	0.01	0.01			0.04	0.04	0.03	0.02		0.09
0.01		0.02	0.01	0.01	0.02	0.04		0.06		0.01	0.03	0.02
0.0125			0.03	0.01	0.01	0.04		0.07	0.06		0.08	0.04
0.015				0.01	0.00	0.02		0.08	0.06	0.05		0.10
0.02		0.00	0.00	0.01	0.00	0.02		0.11	0.10	0.13		0.14
0.03			0.01		0.00			0.13		0.11		0.19
0.03				0.01				0.13		0.11		0.19

## Validación

La validación del modelo se realiza comparando todos los datos medidos exceptuando los utilizados para calibrar.



### Modelo Hidrodinámico

## Validación

La validación del modelo se realiza comparando todos los datos medidos exceptuando los utilizados para calibrar.

Estación	BIAS (m)	RMSE (m)
La Paloma	0.04	0.20
Montevideo	0.12	0.26
Colonia	0.04	0.26
Punta del Este	0.09	0.21
Juan Lacaze	0.08	0.26
Pilote Norden	0.03	0.26

### Modelo Hidrodinámico

## Aplicaciones

- Proyectos relacionados al cambio climático: evaluación de riesgos de erosión e inundación y otros
- Forzante de un modelo de reanálisis de oleaje
- Análisis de niveles en toda la costa Uruguaya
- Resolución de problemas de ingeniería costera en zonas con escasez de datos de nivel

### Modelo Hidrodinámico

## Conclusiones

- A partir de la calibración del modelo TELEMAC 2D para un dominio que abarca toda la costa uruguaya, se obtiene un hindcast de nivel de mar de 31 años (1985-2016).
- La calibración se realiza con las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia, según coeficiente de arrastre de viento y coeficiente de arrastre del fondo.
- Ante la dificultad de poder representar el nivel correctamente en todo el dominio manteniendo un coeficiente de arrastre de fondo constante en el espacio, se prueba variando el mismo según zona interior, intermedia y exterior.
- Se alcanza una configuración del modelo que no supera los 26 cm de RMSE en ninguna estación de validación ni los 12 cm de BIAS
- Con gráficos cuantil-cuantil de extremos se concluye que el modelo representa correctamente los eventos de niveles altos sobrestimando por no mas de 30 cm los cuantiles mas altos

### Modelo de oleaje

### Modelo de oleaje

### Modelo de oleaje

**WAVEWATCH III**

$$N(k, \theta) \equiv F(k, \theta) / \sigma$$

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db}$$

Ecuación de acción de oleaje (Wave Action Equation)

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}$$

- Interacción oleaje-atmósfera
- Interacción oleaje-oleaje
- Rotura en aguas profundas
- Interacción oleaje-fondo
- Rotura por efecto del fondo

### Modelo de oleaje

**WAVEWATCH III**

$$N(k, \theta) \equiv F(k, \theta) / \sigma$$

**VIENTO**

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db}$$

**BATIMETRÍA ± NIVELES**

- Interacción oleaje-atmósfera
- Interacción oleaje-oleaje
- Rotura en aguas profundas
- Interacción oleaje-fondo
- Rotura por efecto del fondo

**CORRIENTES**

### Modelo de oleaje

#### Implementación

Grilla	Batimetría
Grilla 1	ETOPO1
Grilla 2	ETOPO1
Grilla 3	ETOPO1 + SOHMA
Grilla 4	SOHMA
Grilla 5	SOHMA

### Modelo de oleaje

Calibración

Datos de calibración: Hs (altimetría satelital)

Período de calibración:

- Año 2002
- Mayor número de datos
- Mayor cantidad de datos "severos" (Hs mayor a q95%)

Parámetros de calibración:

Aporte de energía por viento      Disipación de energía por fondo

$$S = S_{in} + S_{in} \Gamma + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db}$$

Interacción oleaje-atmósfera  
 Interacción oleaje-oleaje  
 Rotura en aguas profundas  
 Interacción oleaje-fondo  
 Rotura por efecto del fondo

### Modelo de oleaje

Calibración: resultados

- Resultados muy sensibles a  $\Gamma$
- Se fija  $\beta_{max}$  en un valor tal que asegura buen resultado en eventos extremos
- Se ajusta  $\Gamma$  para disminuir el sesgo (BIAS).

### Modelo de oleaje

Calibración: resultados

- Resultados muy sensibles a  $\Gamma$
- Se fija  $\beta_{max}$  en un valor tal que asegura buen resultado en eventos extremos
- Se ajusta  $\Gamma$  para disminuir el sesgo (BIAS).

### Modelo de oleaje

Validación

### Modelo de oleaje

Validación

All data  
 NObs= 847259  
 Mean Obs/Mod = 2.02/2.07  
 Std Obs/Mod = 1.01/0.99  
 BIAS = 0.04  
 RMSE = 0.4  
 S1 = 19.4  
 r = 0.92

### Modelo de oleaje

Validación: datos satelitales

### Modelo de oleaje

Validación: datos medidos in situ

### Modelo de oleaje

Validación: datos medidos in situ

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Análisis de sensibilidad

Table 3.- Experiments carried out to analyze the sensitivity of the model to different processes and forcings.

Name	Description
Experiment E1	Sensitivity to local winds. Wind input is deactivated in grids 4 and 5.
Experiment E2	Sensitivity to non-stationary water level. Non-stationary water level input is substituted by a stationary one defined as the time-average water level at each node.
Experiment E3	Sensitivity to currents. Currents are not considered in the model.
Experiment E4	Sensitivity to dissipation by bottom friction ( $S_{ob}$ ). $S_{ob}$ is turned off.
Experiment E5	Sensitivity to depth-induced breaking ( $S_{db}$ ). $S_{db}$ is turned off.

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Análisis de sensibilidad

Name	Description
Experiment E1	Sensitivity to local winds.
Experiment E2	Sensitivity to non-stationary water level
Experiment E3	Sensitivity to currents
Experiment E4	Sensitivity to dissipation by bottom friction ( $S_{ob}$ ).
Experiment E5	Sensitivity to depth-induced breaking ( $S_{db}$ ).

Figure 13.- Experiment E1. Normalized Bias of  $H_s$  (top panel) and maximum negative difference of  $H_s$  (low panel).

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Análisis de sensibilidad

Name	Description
Experiment E1	Sensitivity to local winds.
Experiment E2	Sensitivity to non-stationary water level
Experiment E3	Sensitivity to currents
Experiment E4	Sensitivity to dissipation by bottom friction ( $S_{ob}$ ).
Experiment E5	Sensitivity to depth-induced breaking ( $S_{db}$ ).

Figure 14.- Experiment E2. RMSE of  $H_s$  (low panel) and time series of  $H_s$  at 57.67W-34.51S (top panel).

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Análisis de sensibilidad

Name	Description
Experiment E1	Sensitivity to local winds.
Experiment E2	Sensitivity to non-stationary water level
Experiment E3	Sensitivity to currents
Experiment E4	Sensitivity to dissipation by bottom friction ( $S_{ob}$ ).
Experiment E5	Sensitivity to depth-induced breaking ( $S_{db}$ ).

Figure 15.- Experiment E3. RMSE of  $H_s$ .

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Análisis de sensibilidad

Name	Description
Experiment E1	Sensitivity to local winds.
Experiment E2	Sensitivity to non-stationary water level
Experiment E3	Sensitivity to currents
Experiment E4	Sensitivity to dissipation by bottom friction ( $S_{ob}$ ).
Experiment E5	Sensitivity to depth-induced breaking ( $S_{db}$ ).

Figure 16.- Bias and MPD of  $H_s$  obtained on Experiment E4 (left panels) and E5 (right panels).

### Modelo de oleaje

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Conclusiones respecto a oleaje

- El *hindcast* de oleaje obtenido presenta un buen desempeño cuando se lo compara con datos altimétricos, aunque tiende a sobrestimar los extremos en las zonas más próximas a la costa cuando se lo compara con medidas in situ, en particular en el Río de la Plata.
- El análisis de sensibilidad muestra que no todos los procesos son igual de relevantes en todo el dominio:
  - El nivel de mar variable es importante en el RDP pero no en el océano.
  - Las corrientes son importantes en las zonas donde hay mayores concentraciones de flujo, aunque su efecto sobre la altura de ola significativa es moderado.
  - El efecto de los vientos locales y de la interacción con el fondo es particularmente importante en el RDP y, para los eventos extremos, también en la zona más próxima a la costa en el océano.

### Hindcast Niveles y Oleaje

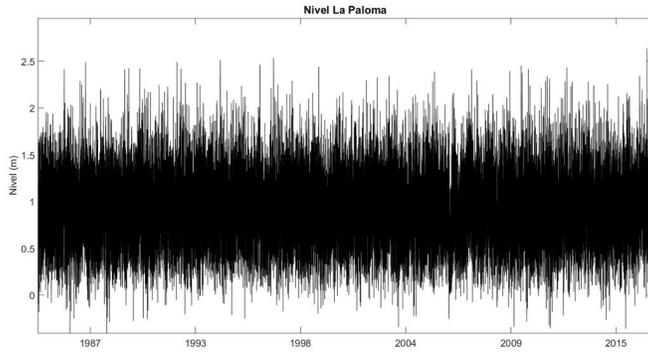
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

#### Vientos, niveles, corrientes y oleaje

Series temporales horarias en boyas virtuales en toda la costa uruguaya durante 32 años (1985 a 2016):

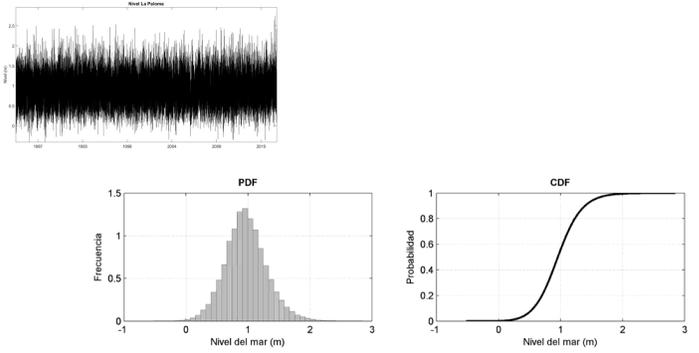
- Nivel de mar
- Parámetros característicos del oleaje
- Corrientes integradas en vertical
- Vientos de Reanálisis

### Hindcast Niveles y Oleaje

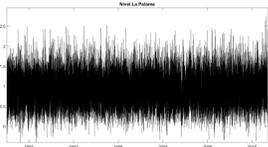


Histogramas de distribución de frecuencias

### Hindcast Niveles y Oleaje



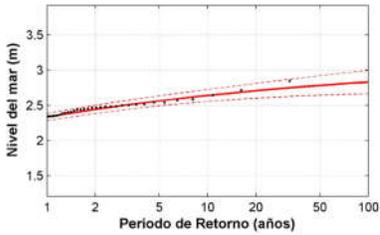
### Hindcast Niveles y Oleaje



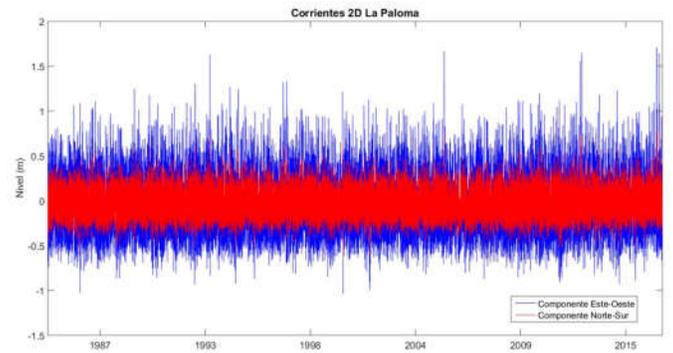
#### Función de distribución GEV

$$Nivel(T_r; \mu, \psi, \xi) = \mu - \frac{\xi}{\left(1 - \left(\frac{T_r}{Tr}\right)^{-\xi}\right)}$$

	u	$\mu$	$\psi$	$\xi$
Tr (años)	10	20	50	100
Nivel (m)	2.64	2.71	2.78	2.83
-Cl <sub>95%</sub> (m)	2.56	2.60	2.64	2.66
+Cl <sub>95%</sub> (m)	2.73	2.81	2.92	3.00

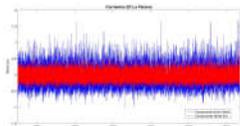


### Hindcast Niveles y Oleaje

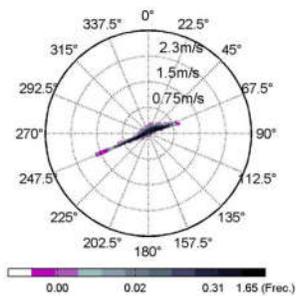


Histograma de distribución de frecuencias direccional

### Hindcast Niveles y Oleaje



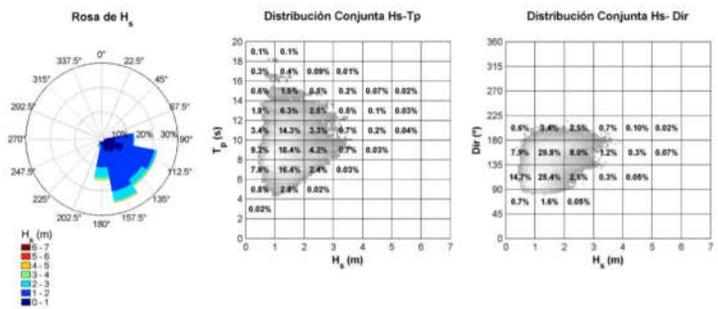
#### Rosa de probabilidades de Corriente



### Hindcast Niveles y Oleaje



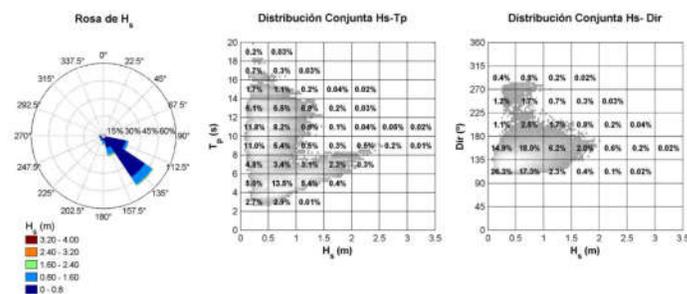
### REGIMEN MEDIO OLAJE – LA PALOMA



### Hindcast Niveles y Oleaje



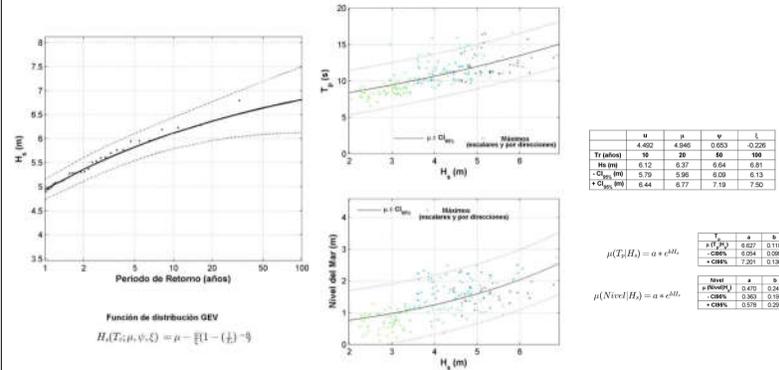
### REGIMEN MEDIO OLAJE – MONTEVIDEO

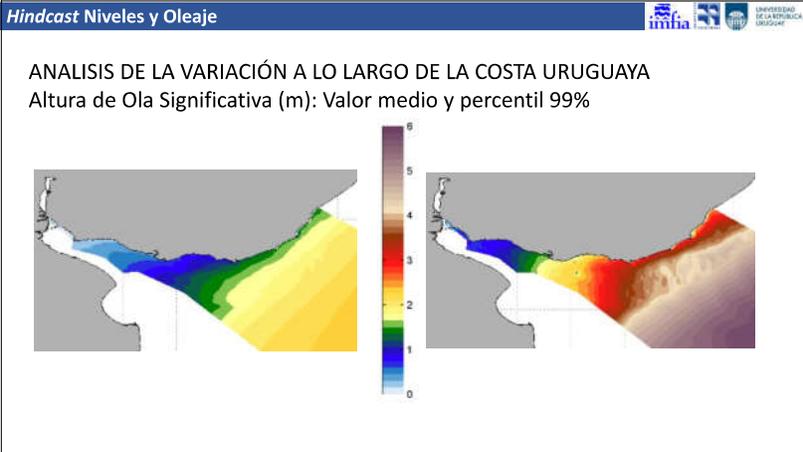
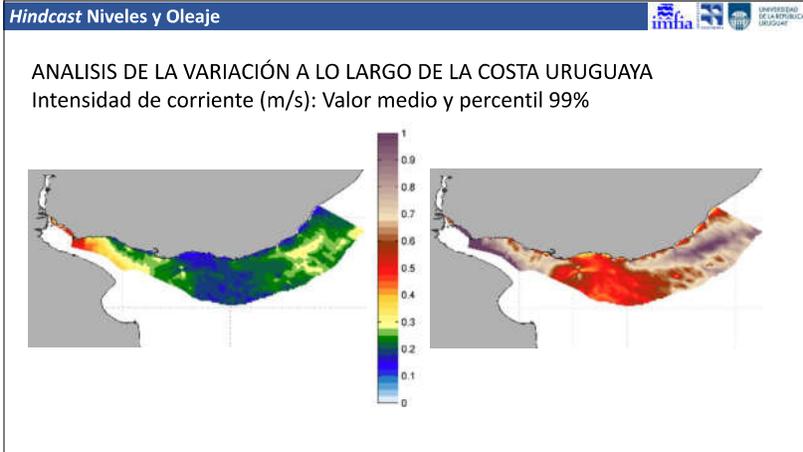
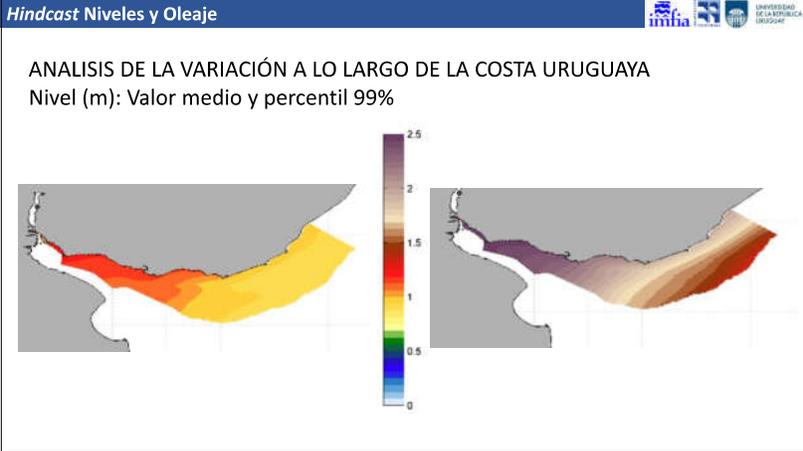
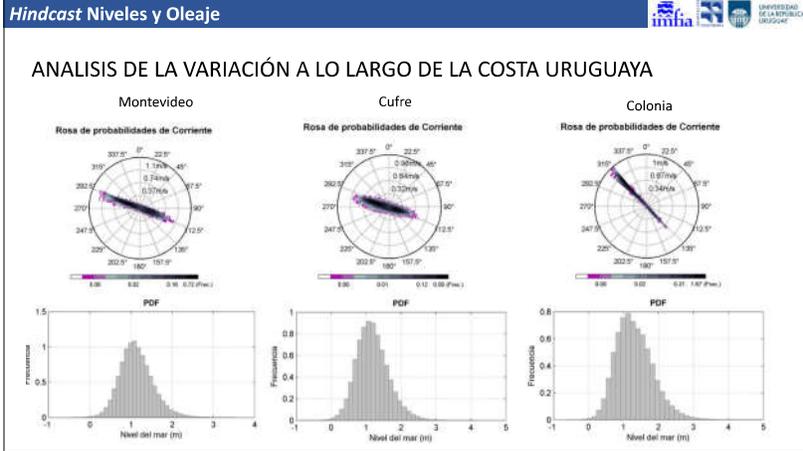
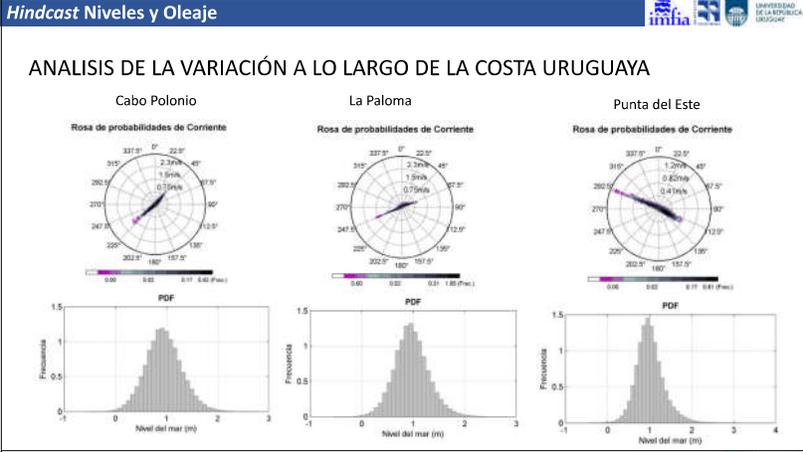
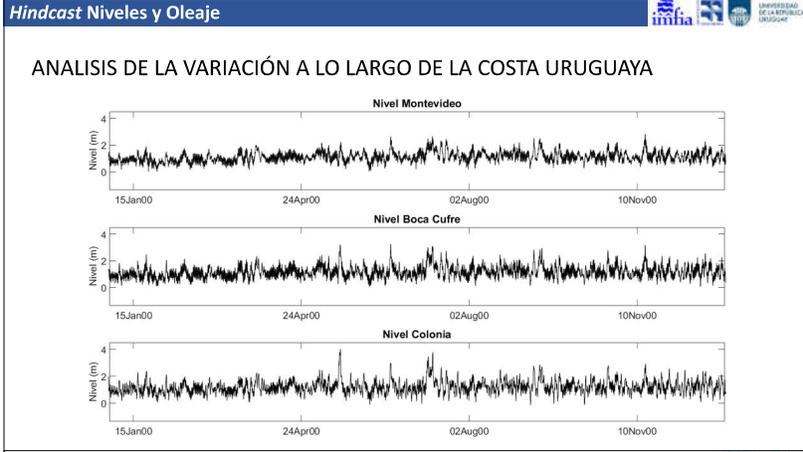
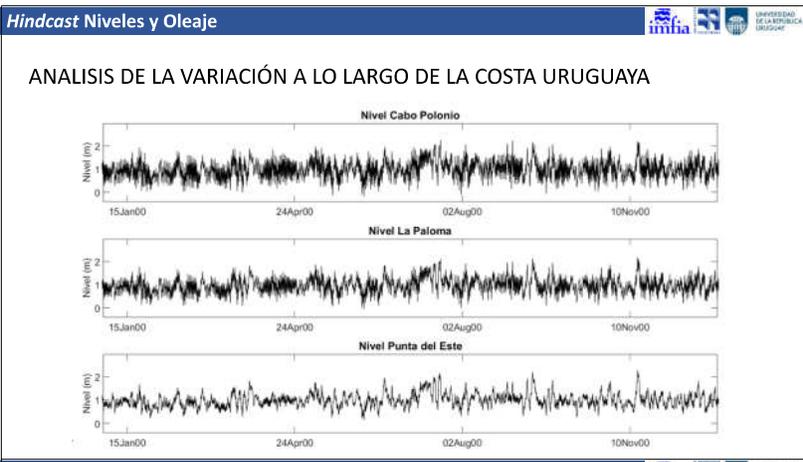
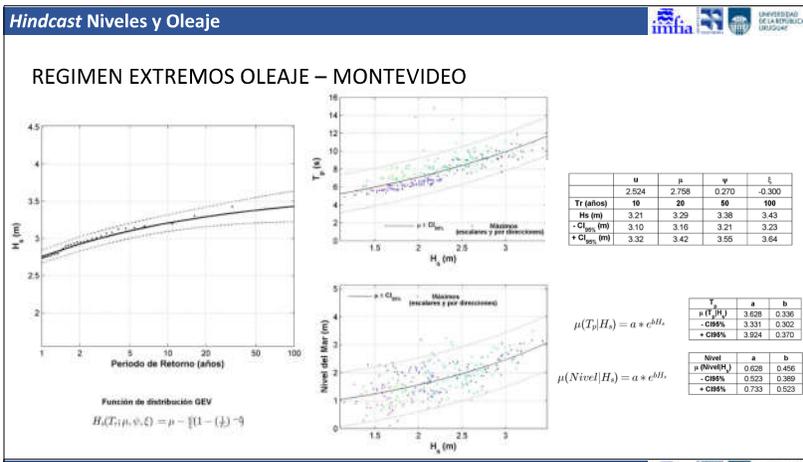


### Hindcast Niveles y Oleaje

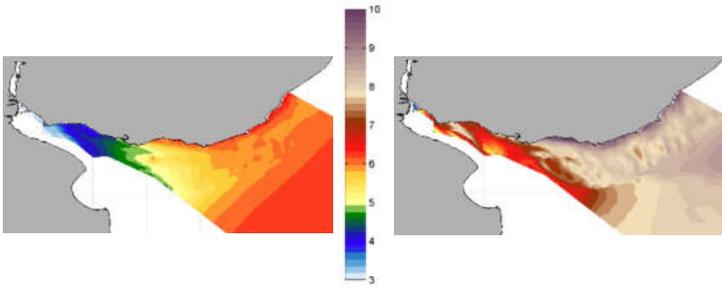


### REGIMEN EXTREMOS OLAJE – LA PALOMA





ANALISIS DE LA VARIACIÓN A LO LARGO DE LA COSTA URUGUAYA  
 Periodo Medio (seg): Valor medio y percentil 99%



ANALISIS DE LA VARIACIÓN A LO LARGO DE LA COSTA URUGUAYA  
 Periodo pico (seg): Valor medio y percentil 99%

