

Oleaje y nivel del mar

Gestión Integral de Puertos y Costas
Curso 2016-2017

Grado en Ingeniería Civil
Especialidad Transportes y Servicios Urbanos

Rafael J. Bergillos
rbergillos@ugr.es

ÍNDICE

1. Oleaje

1.1 Introducción

1.2 Generación

1.3 Procesos de transformación

1.4 Modelos numéricos de propagación. Ejemplos

1.5 Nociones básicas de teoría de oleaje

2. Variaciones de nivel

2.1 Introducción

2.2 Niveles de referencia

2.3 Marea astronómica

2.4 Marea meteorológica

2.5 Sobreelevación debida al oleaje: set-up / run-up

2.6 Cota de inundación. Ejemplo

1

Oleaje



Dinámica Ambiental

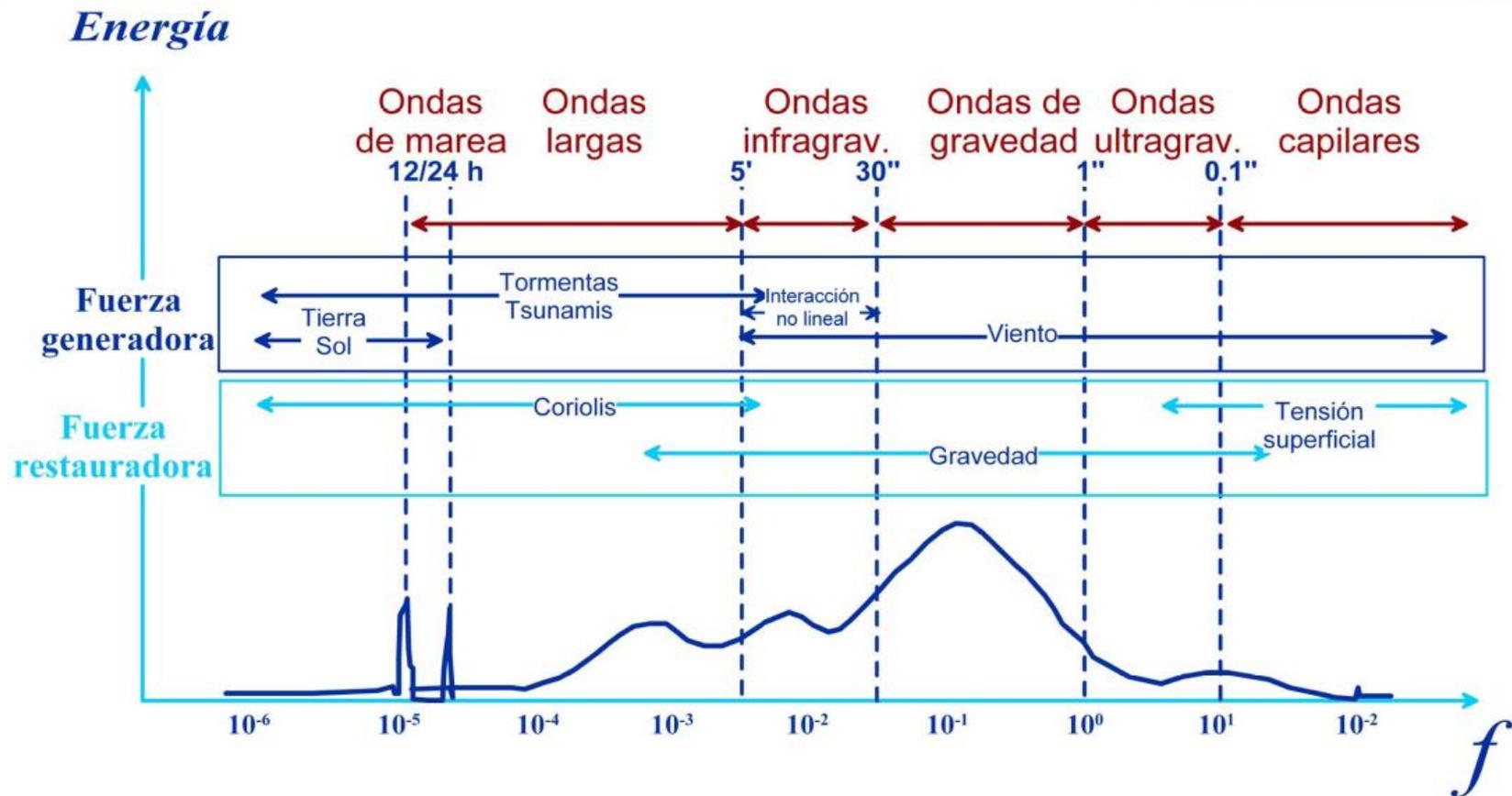
UNIVERSIDAD DE GRANADA

1. Introducción

En el fluido que forma el océano se generan multitud de ondas con distintas frecuencias.

En este apartado nos vamos a centrar en el oleaje (periodos entre 3 y 30 s), que es el principal agente a tener en cuenta en Ingeniería de Costas.

1. Introducción



2. Generación

El oleaje se genera por:

- Acción del viento sobre la superficie del agua.
- Movimiento de cuerpos flotantes (muy local, de poca importancia).

Las olas en la zona de generación son irregulares y presentan distintos periodos, direcciones, etc. → **Oleaje tipo SEA (mar de viento)**

Conforme se propagan (dispersión), se reorganizan en trenes de ondas con características similares → **Oleaje tipo SWELL (mar de fondo)**

La longitud del área en la que el viento genera el oleaje se conoce como **FETCH**

1. Oleaje

2. Generación – Oleaje tipo Sea



2. Generación – Oleaje tipo Swell



2. Generación



3. Procesos de transformación del oleaje

El oleaje se suele caracterizar utilizando tres variables básicas:

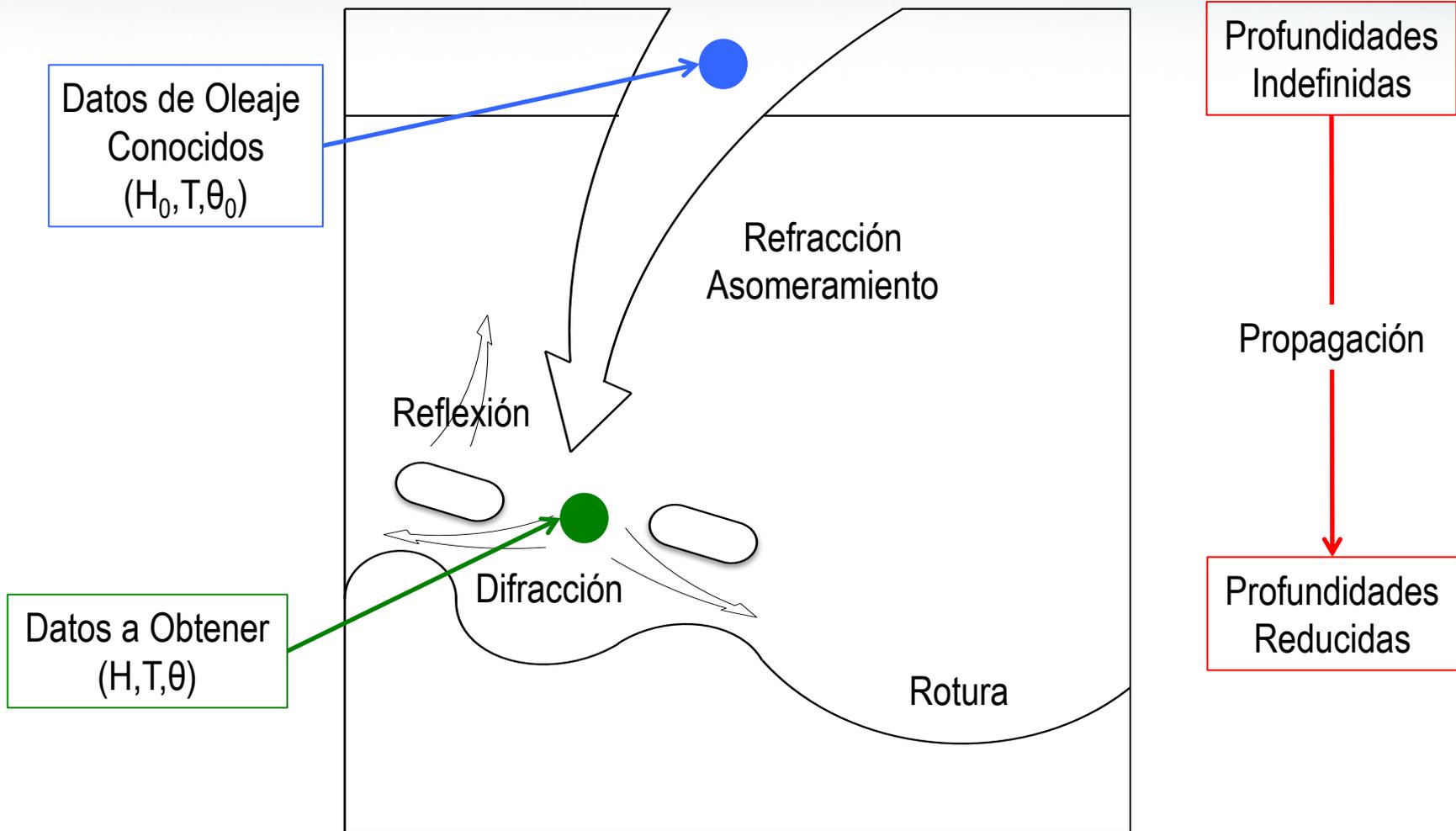
- **Altura de ola (H)**: diferencia de altura entre la cresta y el seno de la onda.
- **Periodo (T)**: tiempo entre crestas o senos en un lugar fijo.
- **Dirección (θ)**: dirección que lleva el tren de ondas.

Estas variables, fundamentalmente H y θ , varían conforme el oleaje se **propaga** hacia la costa desde profundidades indefinidas.

Las variaciones son más importantes cuanto más cerca de la costa se encuentren las ondas, ya que éstas “sienten” el fondo (cambios en la **profundidad h**).

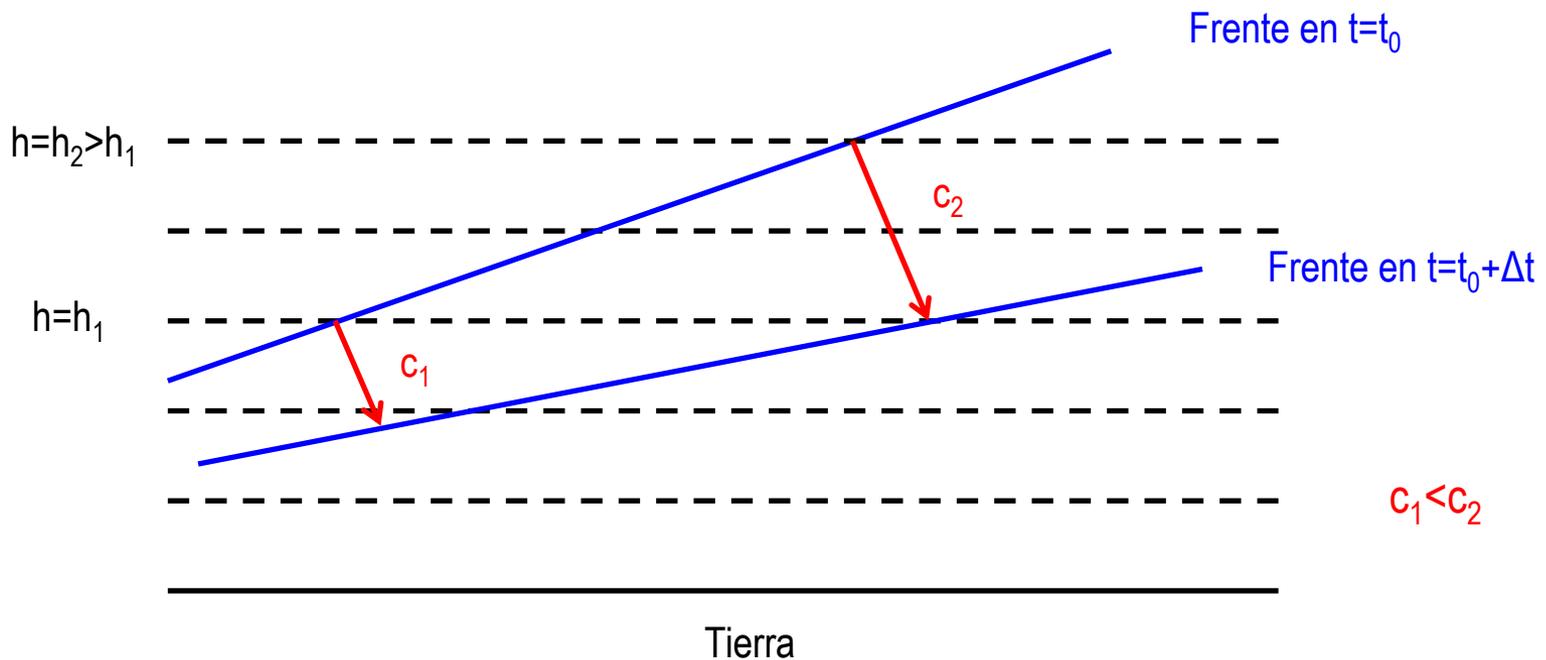
Las ecuaciones que se van a utilizar en este curso vienen de la ***teoría lineal*** → Se considera que T no varía en la propagación.

3. Procesos de transformación del oleaje

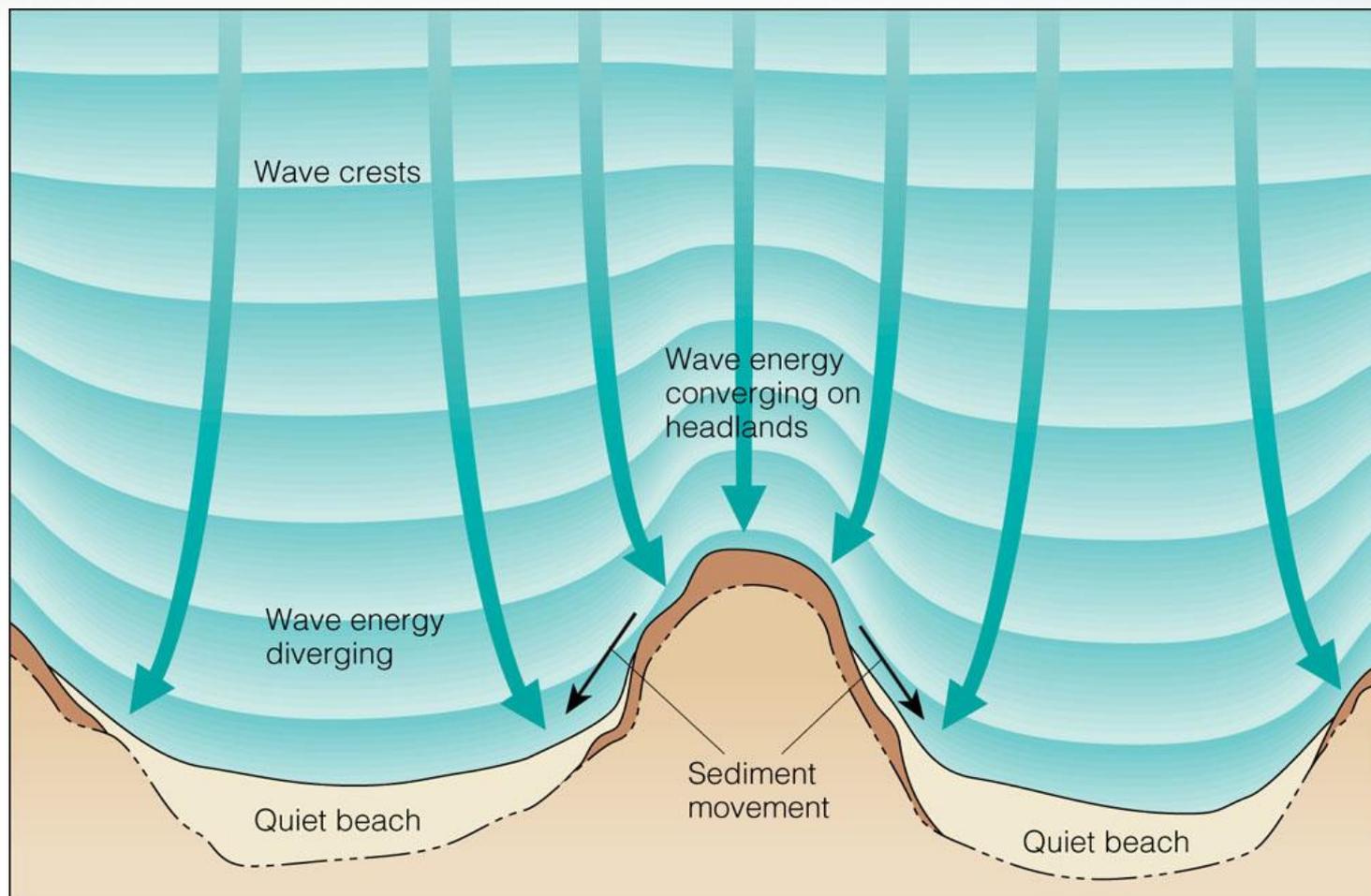


3.1 Refracción

“Cambio de dirección del oleaje debido a que los puntos en el frente de la onda se propagan a velocidades (celeridades) distintas” →
El frente de ola tiende a ponerse paralelo a la costa



3.1 Refracción



3.1 Refracción

Para cuantificar su efecto:

- Frecuencia (no varía): $\sigma = \frac{2\pi}{T}$
- N° de onda (varía con h): $k = \frac{2\pi}{L}$

siendo L la longitud de onda del oleaje.

Su relación – Ecuación de la dispersión:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

En profundidades indefinidas:

$$\sigma^2 = gk_0 = g \frac{2\pi}{L_0}$$

3.1 Refracción

Para la refracción se usa la ley de Snell:

$$\frac{\sin \theta_0}{c_0} = \frac{\sin \theta}{c}$$

siendo $c=L/T$ la **celeridad** de la onda.

Por tanto, el ángulo cerca de la línea de costa:

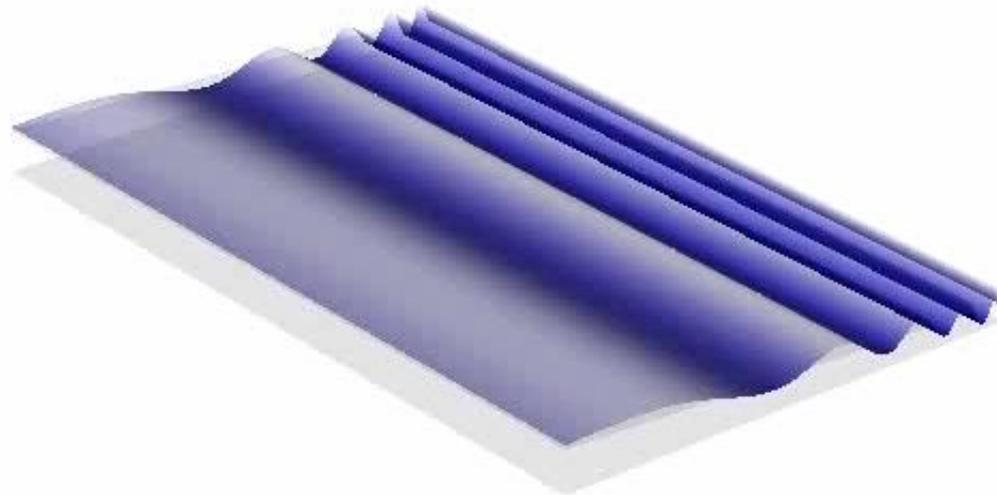
$$\theta = \arcsin \left(\sin \theta_0 \frac{c}{c_0} \right)$$

Y su efecto en la altura de ola se cuantifica con el **coeficiente de refracción** K_r :

$$K_r = \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^{1/2}$$

3.2 Asomeramiento

“Variaciones de la altura de ola debidas a la conservación de energía”
→ Generalmente, H suele aumentar conforme el frente se acerca a la costa.



3.2 Asomeramiento

“**Variaciones de la altura de ola debidas a la conservación de energía**”

Para cuantificar su efecto se usa el **coeficiente de asomeramiento (K_s)**:

$$K_s = \left(\frac{c_{g0}}{c_g} \right)^{1/2}$$

donde c_g es la **celeridad de grupo** (velocidad de transmisión de la energía asociada al movimiento oscilatorio). Viene dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad c_{g0} = \frac{c_0}{2} = \frac{gT}{4\pi}$$

Teniendo en cuenta refracción y asomeramiento, H a una profundidad h viene dada por:

$$H = H_0 K_r K_s = H_0 \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^{1/2} \left(\frac{c_{g0}}{c_g} \right)^{1/2}$$

3.3 Reflexión

“Fenómeno por el que los trenes de ondas incidentes son reflejados por la presencia de un obstáculo produciéndose una onda reflejada de características similares a la incidente pero con dirección opuesta”

- Muy importante en áreas portuarias.
- En zonas costeras sólo en playas con pendiente muy acusada.
- Se define el coeficiente de reflexión K como:

$$K = \frac{H_R}{H_I}$$

siendo H_R la altura de ola reflejada y H_I la altura de ola incidente.

3.3 Reflexión



3.3 Reflexión



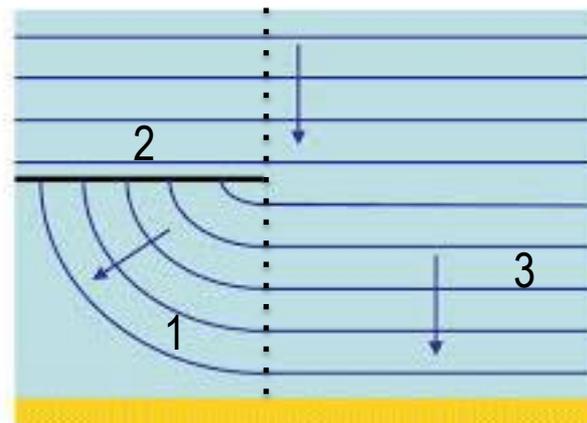
3.4 Difracción

“Cambios bruscos en la altura de ola provocados por la cesión lateral de energía que ocurre al encontrarse el tren de olas con un obstáculo”

Al producirse, se diferencian tres zonas:

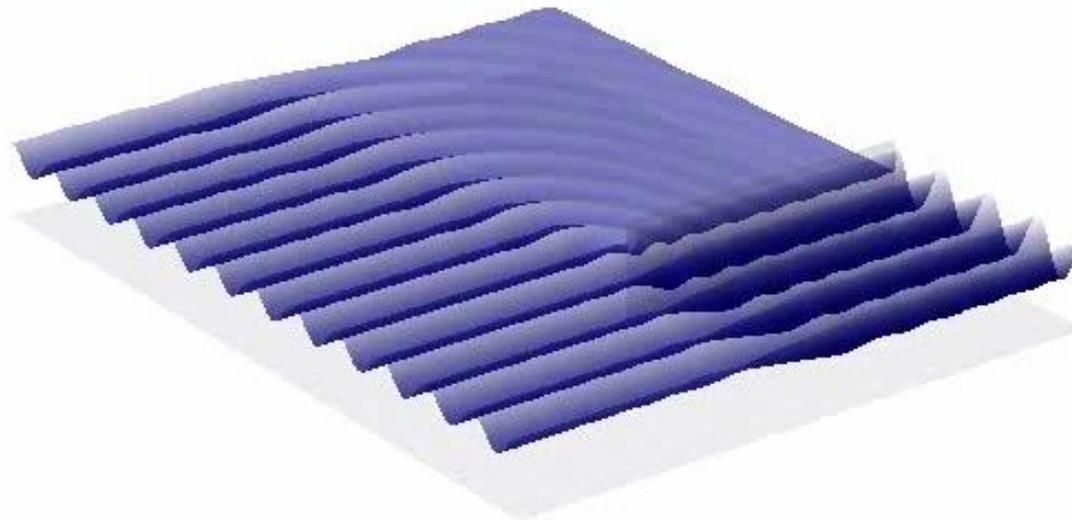
1. Zona de sombra, donde ocurre la difracción.
2. Zona de reflexión, donde coexisten la onda incidente y la reflejada por el obstáculo.
3. Zona no perturbada.

Es importante en zonas portuarias o cerca de obstáculos en zonas costeras.



3.4 Difracción

“Cambios bruscos en la altura de ola provocados por la cesión lateral de energía que ocurre al encontrarse el tren de olas con un obstáculo”



3.5 Rotura

“Descenso brusco de altura de ola provocado por la desestabilización de la ola”

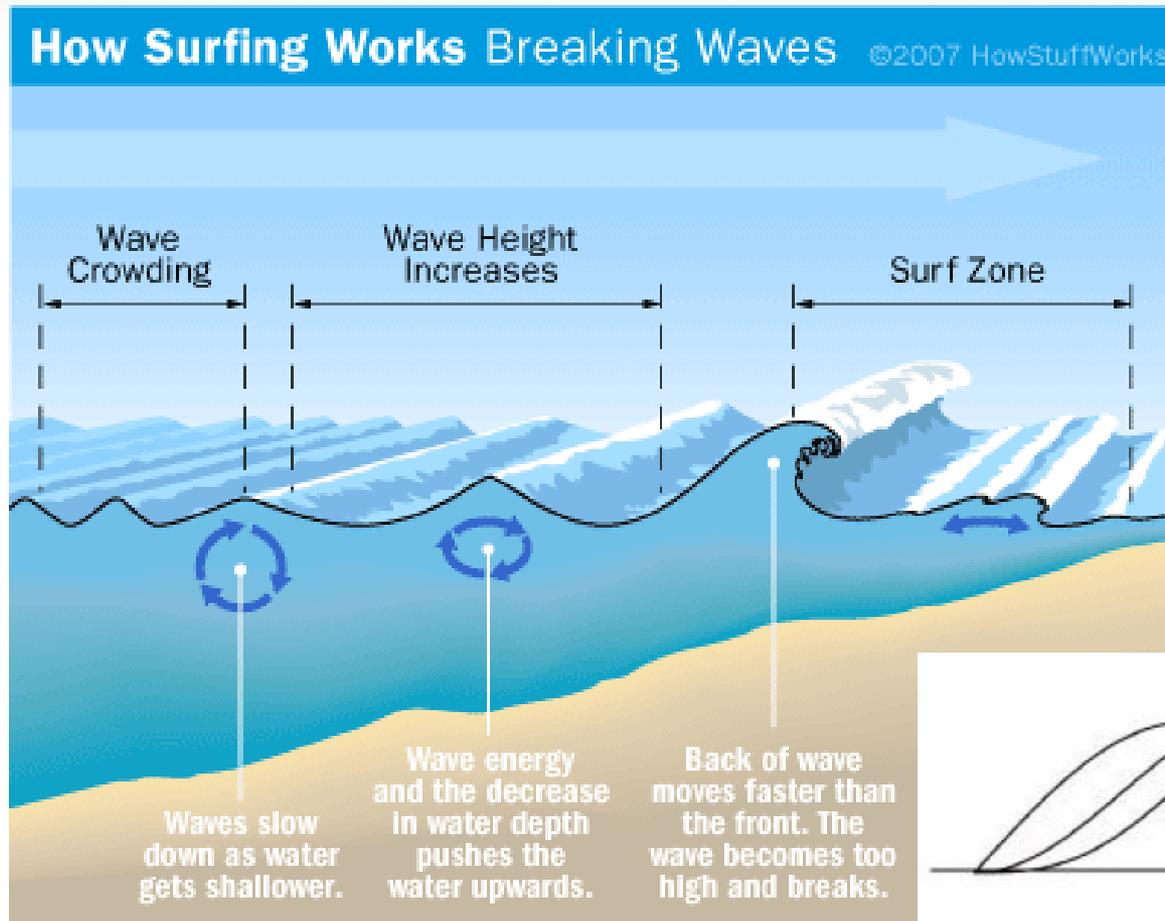
- Zona definida entre el inicio de la rotura y la línea de costa → Zona de rotura.
- Este proceso viene acompañado por una gran disipación de energía que es empleada en la movilización del sedimento → En la zona de rotura se producen los cambios morfológicos más importantes.
- Como criterio de rotura, en teoría lineal se emplea:

$$H = \gamma h$$

siendo γ el índice de rotura que toma valores entre 0.5 y 0.8

Siempre que se propague cerca de la costa → comprobar si el oleaje ha roto o no.

3.5 Rotura

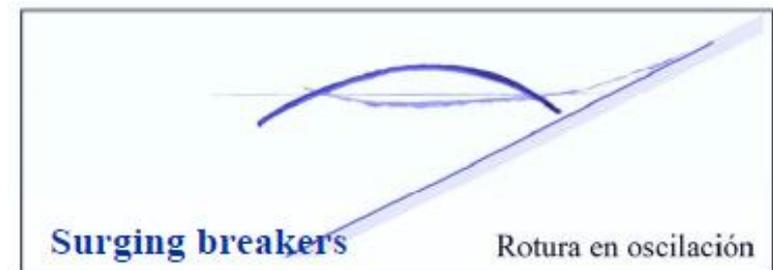
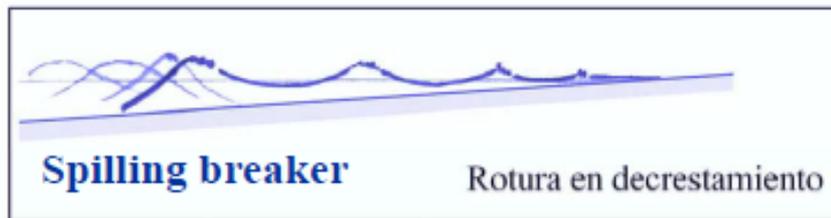


3.5 Rotura

Hay distintos tipos de rotura según el tipo de playa y las condiciones de oleaje. De menor a mayor pendiente:

- Decrestamiento (spilling): $I_r < 0.5$
- Voluta (plunging): $0.5 < I_r < 2.5$
- Colapso (collapsing): $2.5 < I_r < 3.5$
- Oscilación (surging): $I_r > 3.5$

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$



3.6 Energía del oleaje

¿Por qué es tan importante conocer el valor de altura de ola?

Energía del oleaje:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

- Es proporcional al cuadrado de H .
- Importante para el cálculo de:
 - Transporte de sedimentos → Principal responsable de la evolución morfológica de la costa.
 - Fuerzas sobre estructuras → Diseño de diques, espigones, pantalanés, etc.

4. Modelos numéricos de propagación de oleaje

En los trabajos de ingeniería y en investigación se utilizan modelos numéricos para la propagación del oleaje.

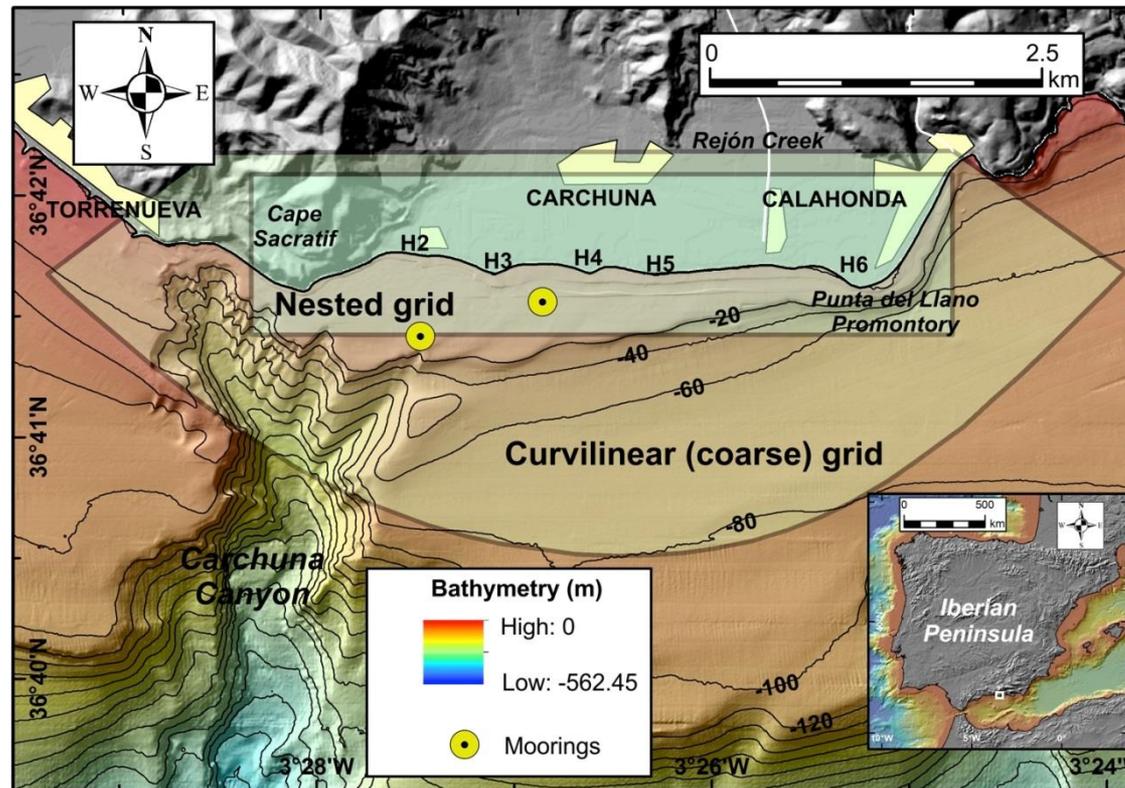
Estos modelos usan ecuaciones más complejas (y realistas) que la teoría lineal para obtener variables como H , T o θ .

Algunos de estos modelos son:

- **Ref-Dif:** refracción-difracción en áreas costeras. No contempla reflexión.
- **SWAN:** ecuación de acción de onda. Difracción y reflexión restringidas.
- **Artemis:** agitación en zonas portuarias.

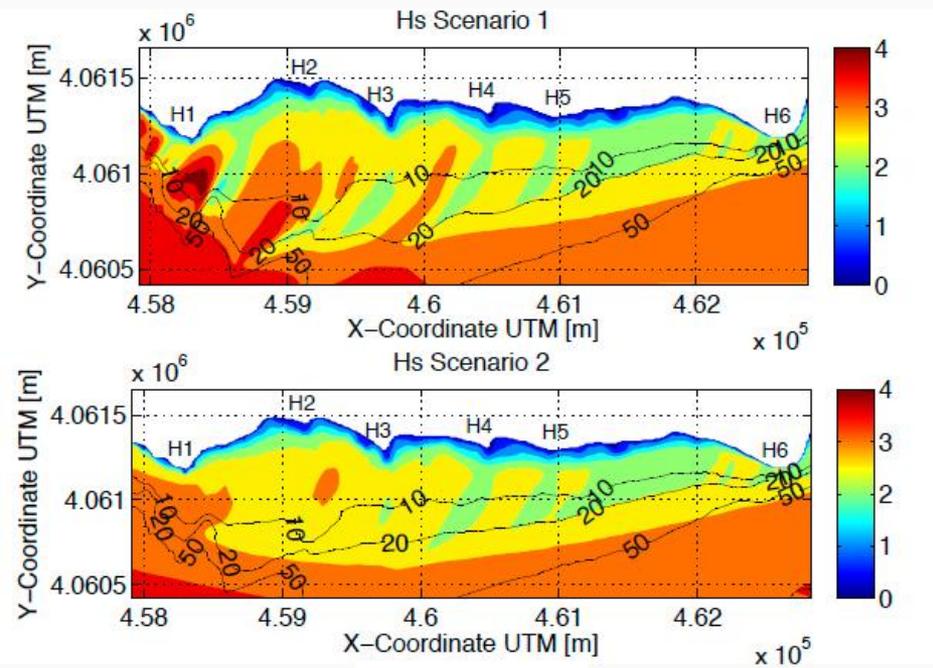
4.1 Ejemplo: playa de Carchuna (Granada)

Objetivo: caracterizar el efecto de un cañón sumergido en la propagación del oleaje.

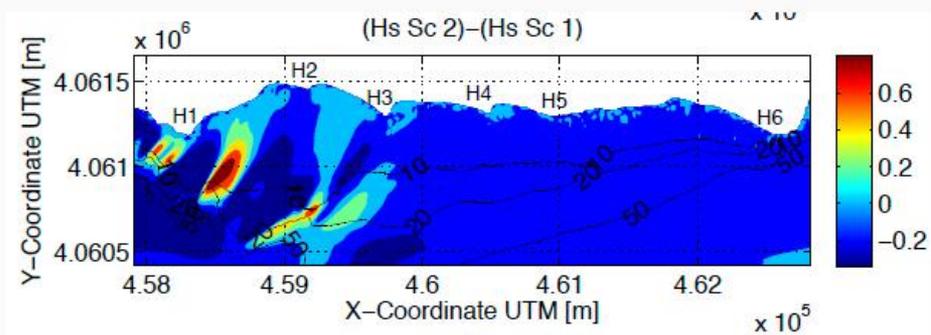


4.1 Ejemplo: playa de Carchuna (Granada)

Objetivo: caracterizar el efecto de un cañón sumergido en la propagación del oleaje.

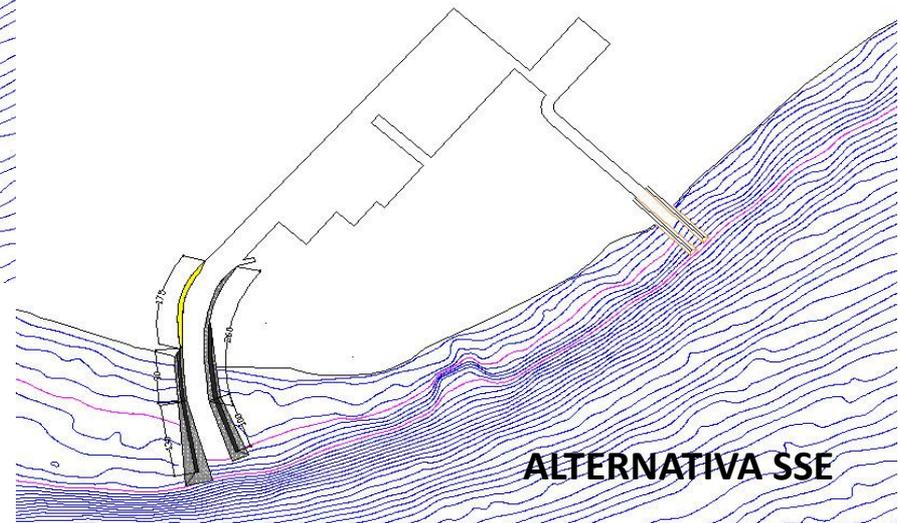
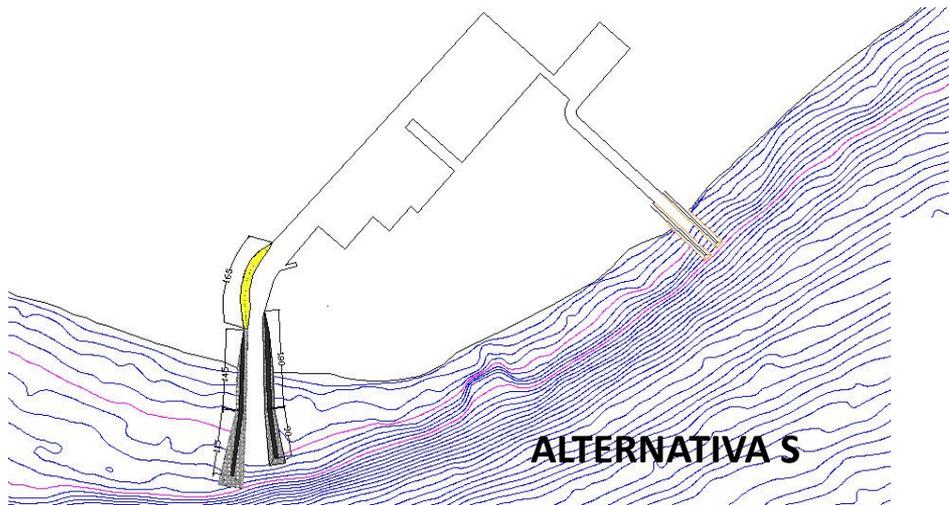


Scenario	Main Canyon	Western tributary	Eastern Tributary	IPW Undulations
SC1	✓	✓	✓	✓
SC2	✗	✗	✗	✓
SC3	✓	✗	✓	✓
SC4	✓	✓	✗	✓
SC5	✓	✗	✗	✓
SC6	✓	✓	✓	✗
SC7	✓	✗	✗	✗



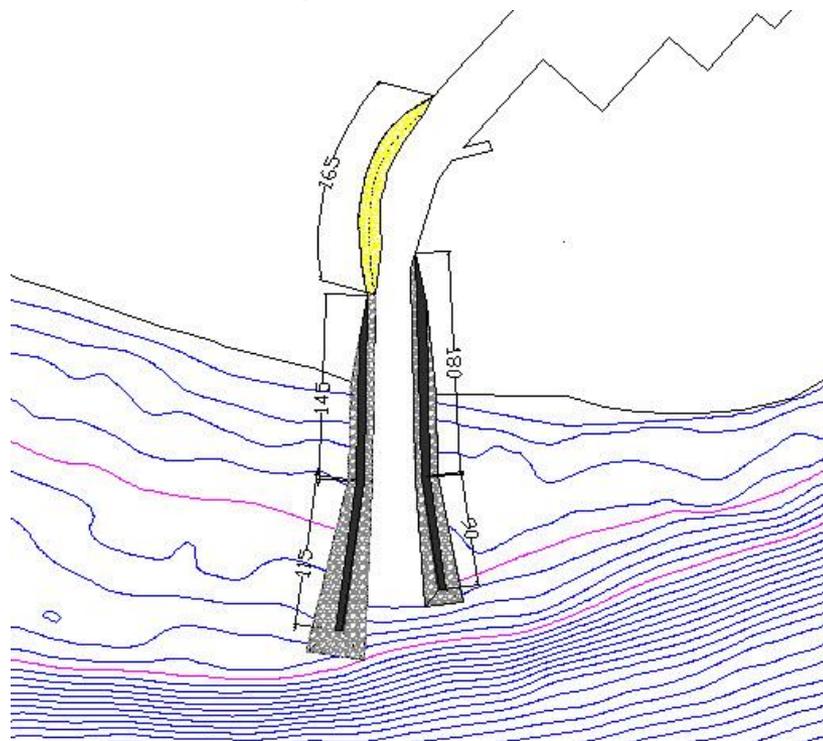
4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

Objetivo: estudiar los efectos en la navegabilidad de las distintas alternativas para un proyecto de construcción de una marina interior.

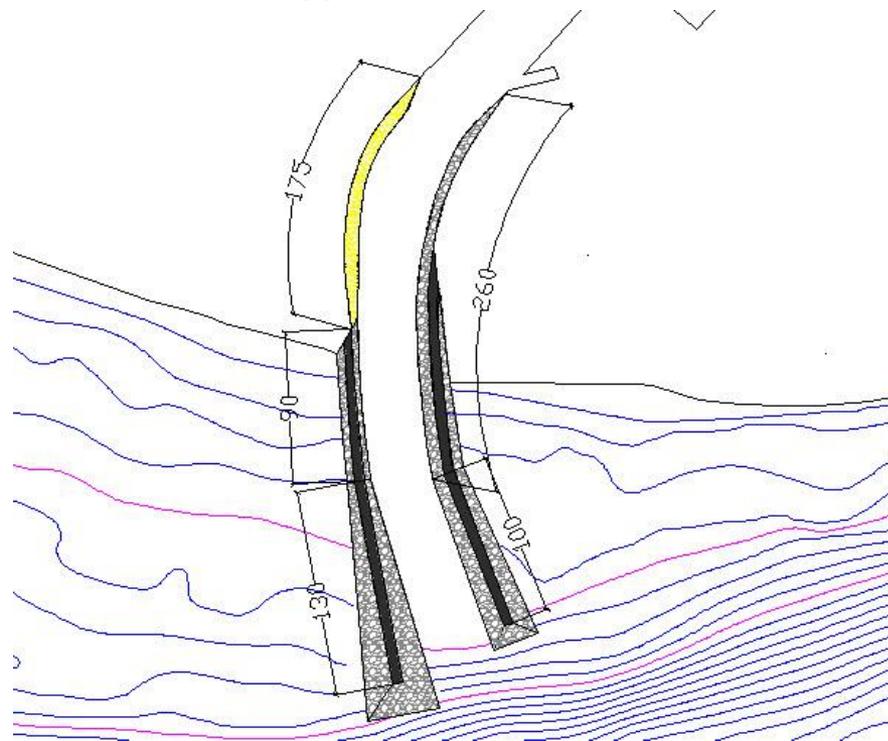


4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

ALTERNATIVA S

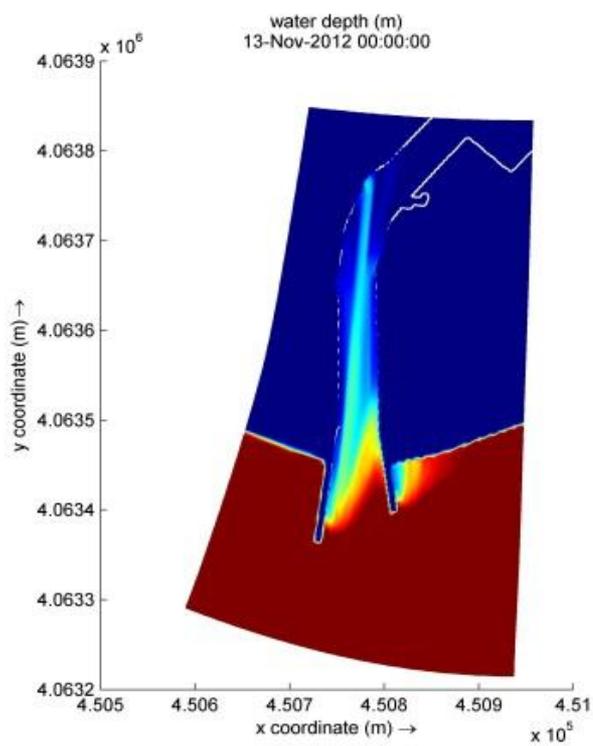


ALTERNATIVA SSE

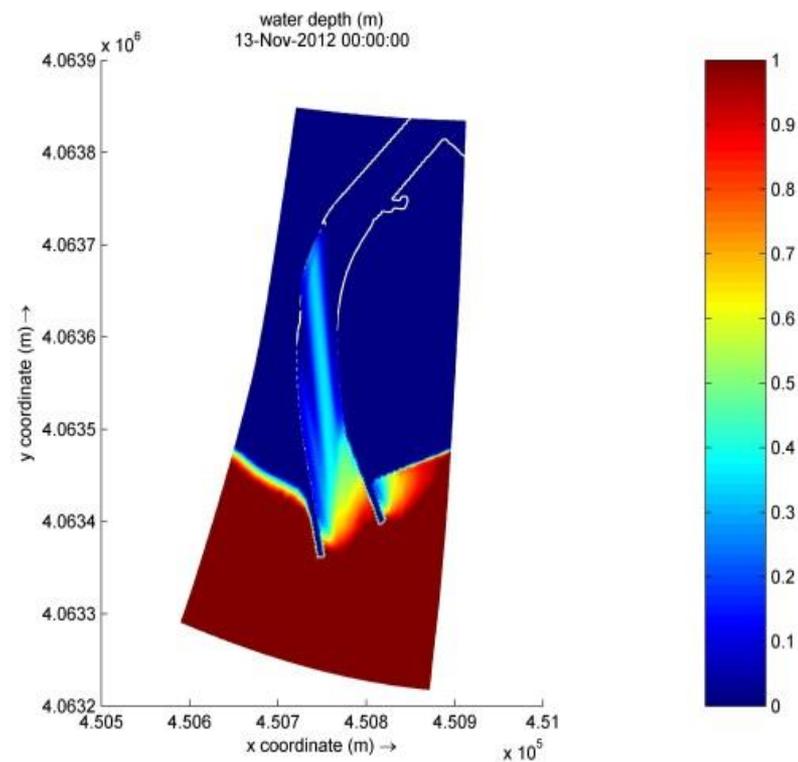


4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

ALTERNATIVA S



ALTERNATIVA SSE



5. Nociones básicas de teoría de oleaje

En ingeniería de Costas no se trabaja con olas individuales → Se utiliza un solo valor de H , T y θ que representa el oleaje en un intervalo de tiempo conocido como estado de mar (ejemplos: 3 horas, 1 hora).

Para ello se calculan estadísticos de las olas individuales durante el estado de mar. Algunos de los más comunes son:

- Altura de ola media cuadrática (H_{rms})
- Altura de ola significativa (H_s)
- Periodo medio (T_m)
- Periodo de pico (T_p)
- Dirección media (θ_m)
- Dirección de pico (θ_p)

2

Nivel del mar y sus variaciones



Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA

1. Introducción

El nivel medio del mar sufre variaciones temporales debidas a los siguientes factores:

- Campos gravitatorios de otros cuerpos celestes → Marea astronómica.
- Variaciones en la presión atmosférica.
- Efecto del viento soplando sobre la superficie del agua.
- Rotura del oleaje al llegar a la costa → Set-up / Run-up.
- Variaciones a largo plazo (vistas en el tema anterior).

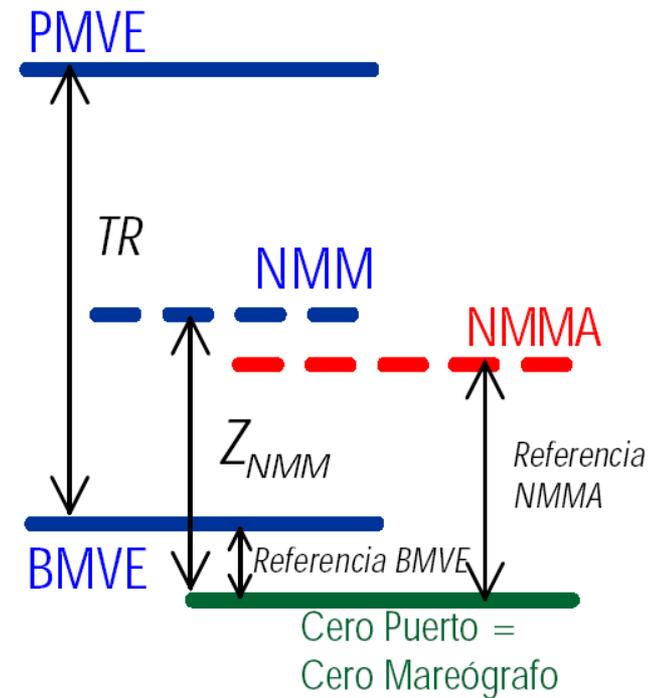
Su estudio es importante para:

- Cálculo de cota de inundación → Definición de proyectos de construcción y delimitación del DPMT.
- Cuantificación de su impacto en la morfodinámica de zonas como estuarios, llanuras mareales, etc.

2. Variaciones de nivel

2. Niveles de referencia

- Pleamar máxima viva equinoccial (PMVE): valor máximo del nivel debido a la onda de marea para mareas vivas cerca del equinoccio.
- Nivel medio del mar (NMM): nivel medio del mar en un cierto periodo en la zona de estudio.
- Nivel medio del mar en Alicante (NMMA): nivel de referencia nacional para topografía terrestre.
- Bajamar máxima viva equinoccial (BMVE): valor mínimo del nivel debido a la onda de marea para mareas vivas cerca del equinoccio.
- Cero puerto: nivel de la referencia batimétrica y del mareógrafo.



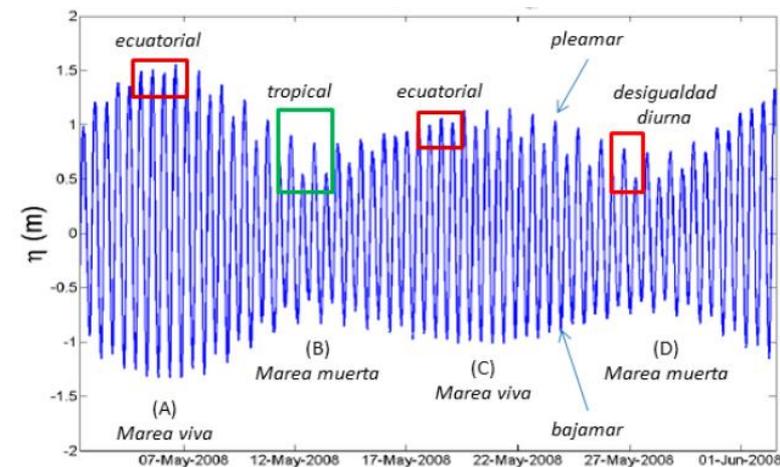
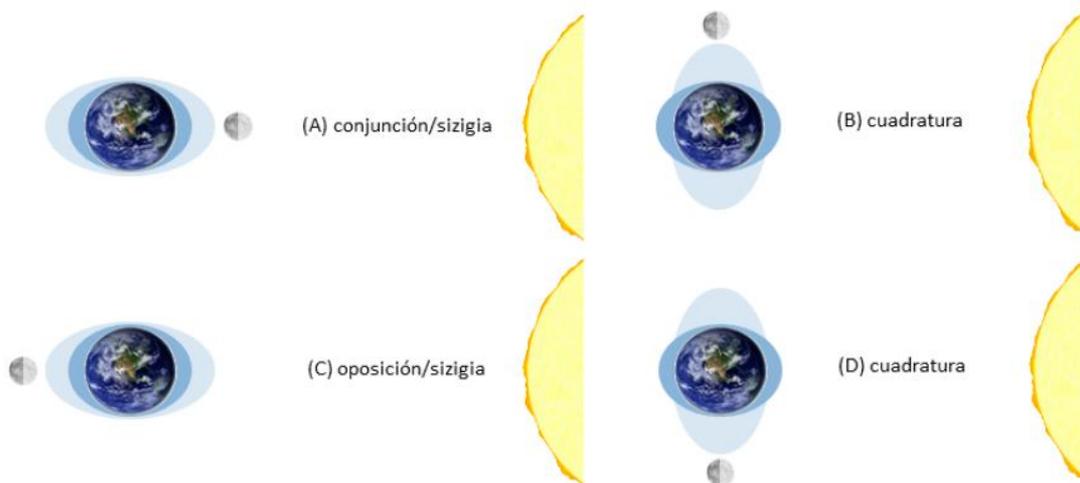
Referenciar cada magnitud a su cero y tener en cuenta la referencia NMMA

2. Variaciones de nivel

3. Marea astronómica

“Variación del nivel del mar debida a la acción gravitatoria de los astros”

- Se trata de una onda formada por multitud de componentes con periodos y amplitudes distintos.
- En España, su periodo principal es de 12 horas (semidiurna).
- La amplitud de la onda resultante varía a lo largo del año (vivas, muertas, equinoccios).



2. Variaciones de nivel

3. Marea astronómica



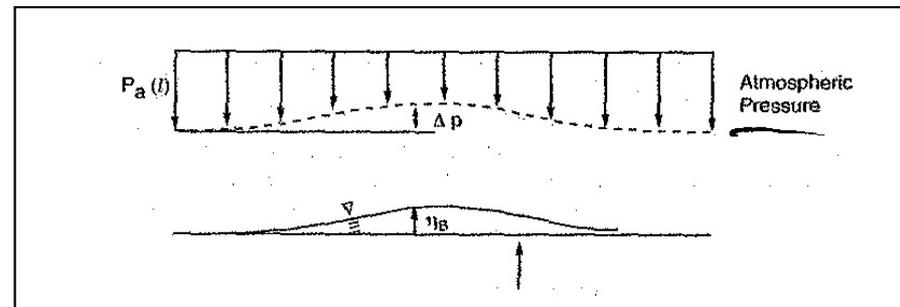
2. Variaciones de nivel

4. Marea meteorológica I: gradientes de presión

“Variaciones del nivel del mar provocadas por gradientes de presión atmosférica”

- Bajas presiones (borrascas) provocan un aumento del nivel.
- Altas presiones (anticiclones) provocan el efecto contrario.

$$Dh_p = \frac{Dp}{g}$$



Δp = Diferencia de presión entre el punto en estudio y otro en el que la sobre elevación es nula respecto al nivel medio del mar (1024 mb) [1mb = 100 N/m²]

γ = Peso específico del agua ≈ 10045 N/m³

2. Variaciones de nivel

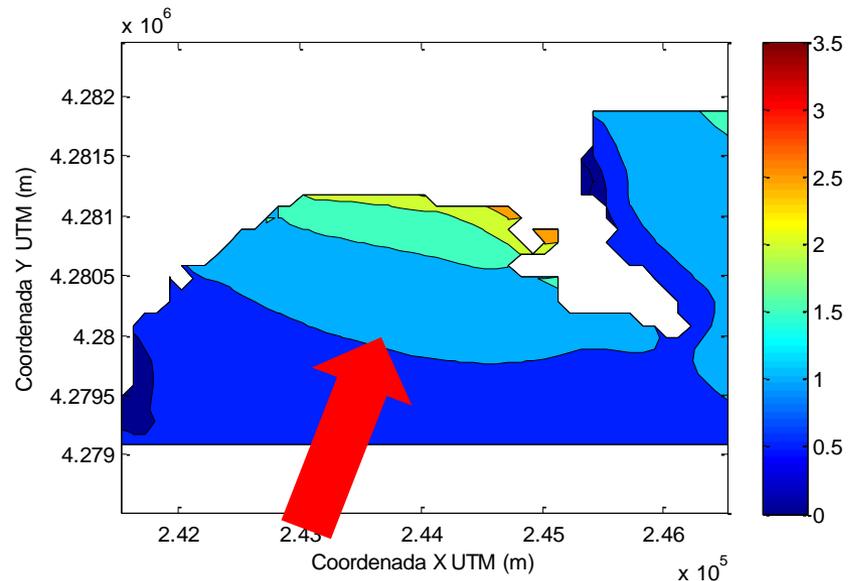
4. Marea meteorológica II: acción del viento

“Variaciones del nivel del mar por el apilamiento del agua provocado por el esfuerzo del viento sobre la superficie del agua”

Existen diferentes formulaciones para su cálculo, aunque suelen utilizarse modelos numéricos.

Depende fundamentalmente de:

- Longitud del fetch.
- Velocidad del viento cerca de la superficie.



5. Set-up / Run-up

“Sobreelevación del nivel medio en la zona de rompientes debido a la rotura del oleaje”

$$R_{2\%}^T = 0.36 \sqrt{g} \tan \beta \sqrt{H_0} T$$

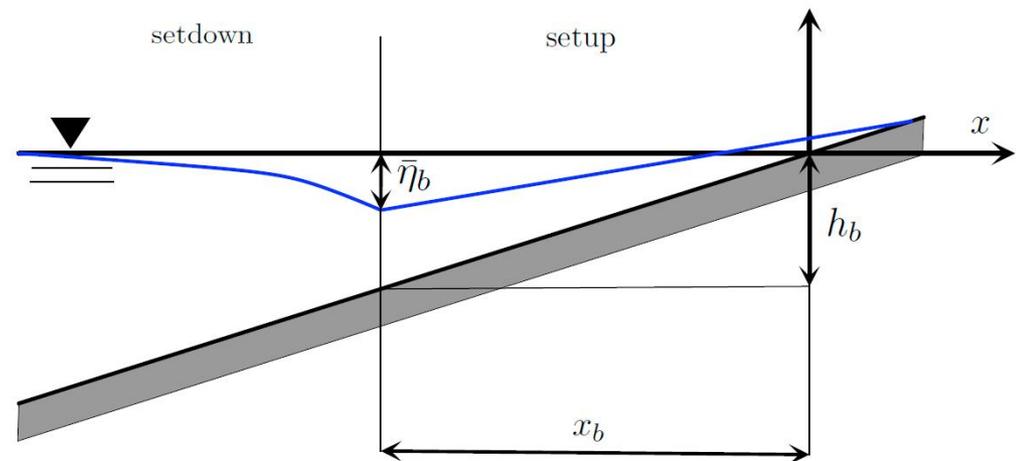
siendo:

g = aceleración de la gravedad

$\tan \beta$ = pendiente de la playa

H_0 = altura de ola en profundidades indefinidas

T = periodo del oleaje



6. Cota de inundación

“Cota máxima que puede alcanzar el mar en unas condiciones climáticas determinadas, normalmente condiciones extremas”

Se utiliza para estudiar la vulnerabilidad de estructuras a inundaciones y (debería) para la definición del DPMT.

$$CI = MA + MM + R_{2\%,T} (+ Q + S) = MA + \Delta\eta_p + \Delta\eta_v + R_{2\%,T} (+ Q + S)$$

donde:

MA = nivel de la PMVE.

$\Delta\eta_p$ = sobreelevación debido a gradientes de presión.

$\Delta\eta_v$ = sobreelevación por acción del viento.

$R_{2\%,T}$ = run-up (incluyendo el set-up) debido al oleaje.

Q = sobreelevación debida al caudal (en zonas próximas a desembocaduras).

S = variación del nivel del mar (a largo plazo).

¡CUIDADO CON LOS NIVELES DE REFERENCIA!

2. Variaciones de nivel

6.1 Ejemplo: Calpe (Alicante)

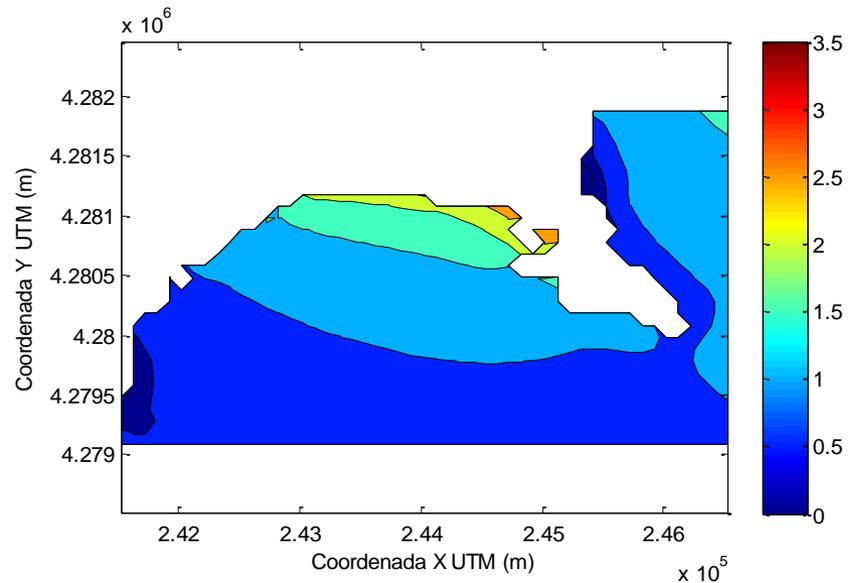
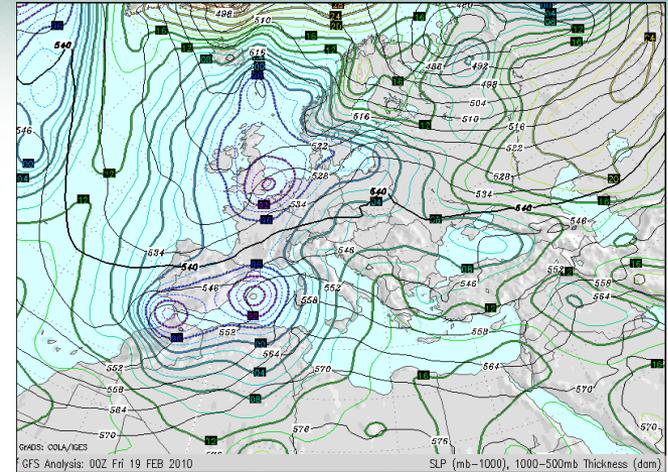
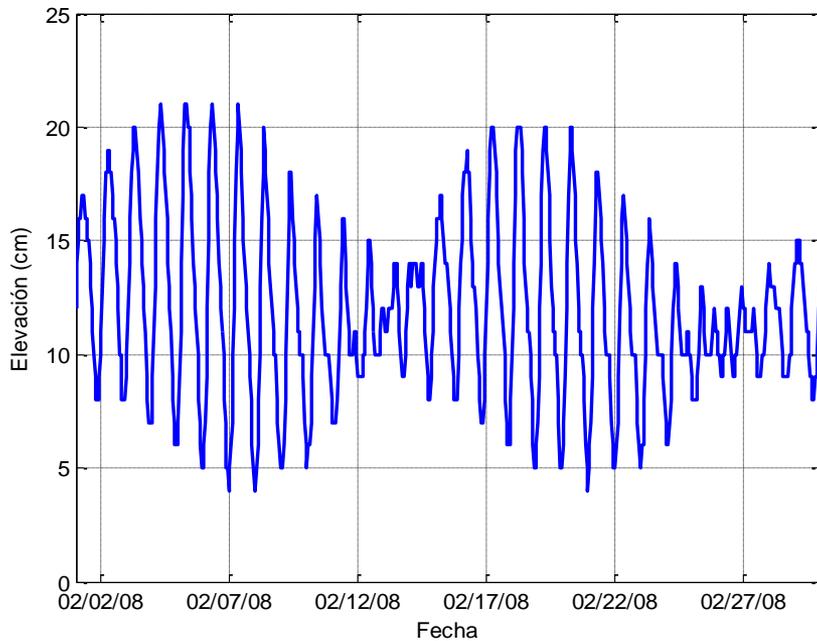
Objetivo: calcular la cota de inundación para estudiar la inundabilidad de la laguna y determinar el DPMT.



2. Variaciones de nivel

6.1 Ejemplo: Calpe (Alicante)

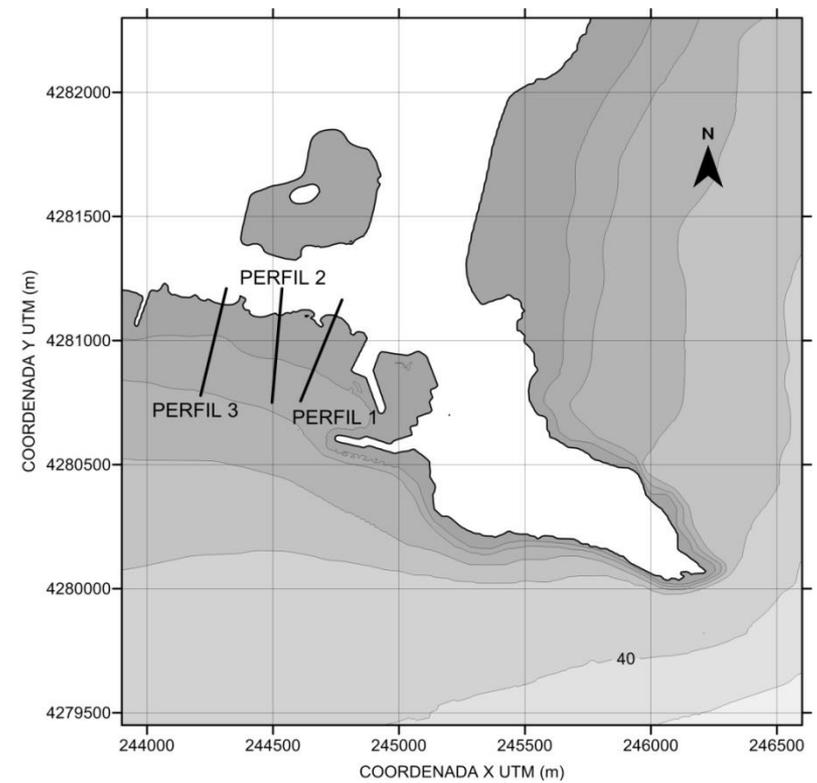
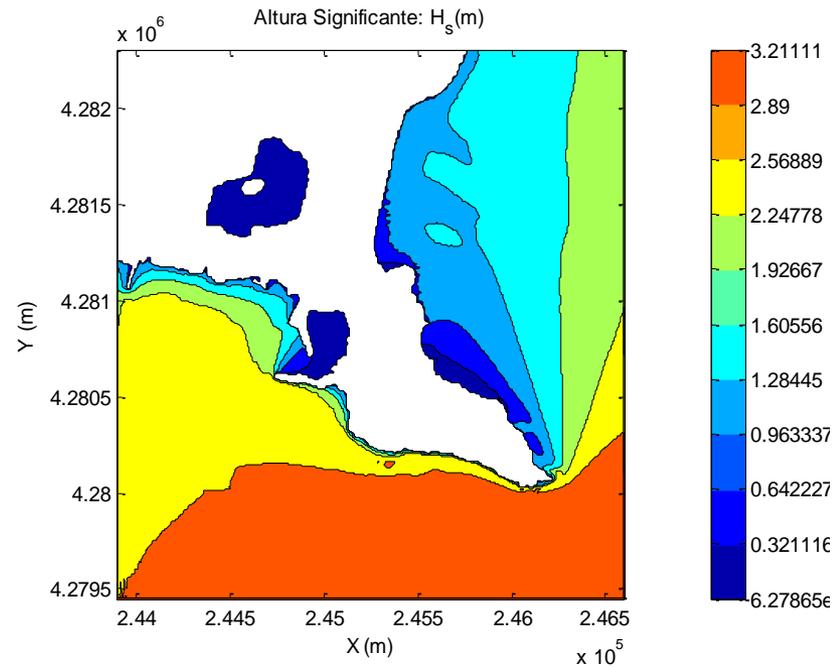
Marea astronómica y meteorológica



2. Variaciones de nivel

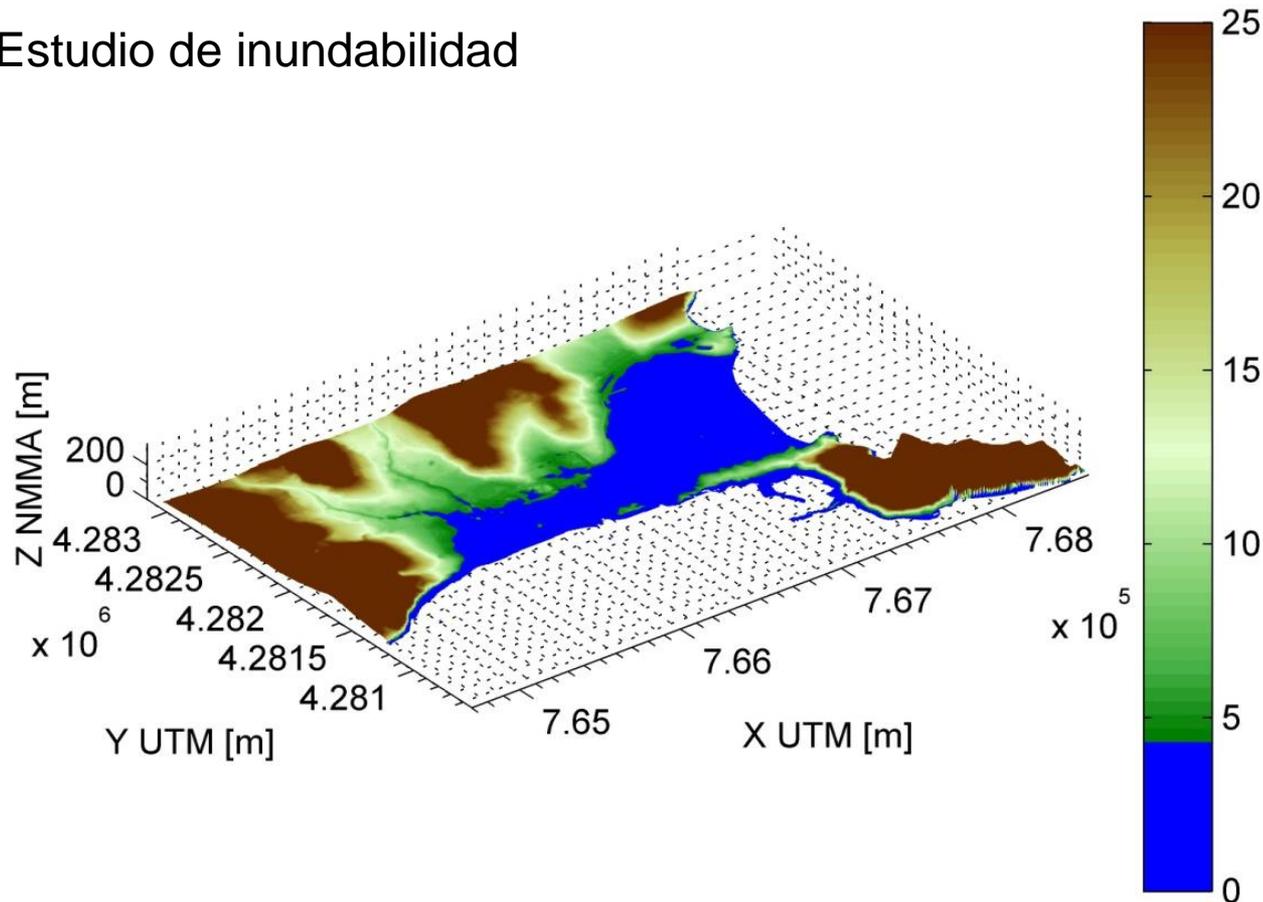
6.1 Ejemplo: Calpe (Alicante)

Obtención del run-up



6.1 Ejemplo: Calpe (Alicante)

Estudio de inundabilidad



A large, white, stylized letter 'D' logo, centered on the page. The 'D' has a thick, rounded top and a slightly curved bottom, with a white interior.

Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA