

# Procesos Costeros y Herramientas Básicas

Gestión Integral de Puertos y Costas  
Curso 2013-2014

Grado en Ingeniería Civil  
Especialidad de Transporte y Servicios Urbanos

Alejandro López Ruiz  
alopezruiz@ugr.es



## Índice

1. Oleaje
2. Variaciones de nivel
3. Transporte de sedimentos y forma en planta
4. Perfil de playa y regeneraciones

1

Oleaje

D

Dinámica Ambiental

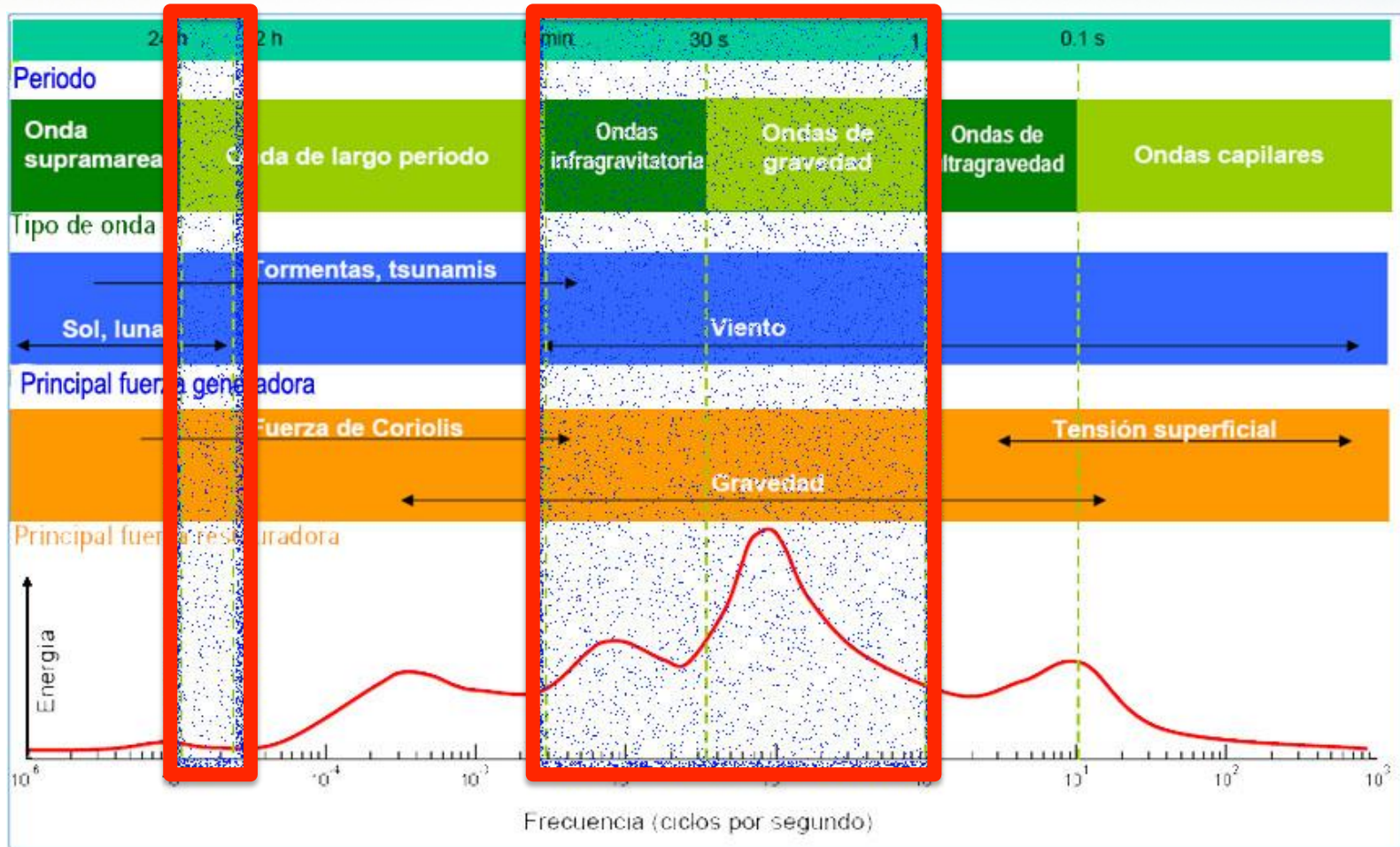
UNIVERSIDAD DE GRANADA

## 1. Introducción

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

En este curso nos vamos a centrar en el [oleaje](#) (periodos entre 3 y 30 s), ya 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**

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

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

# 1. Oleaje

## 2. Generación

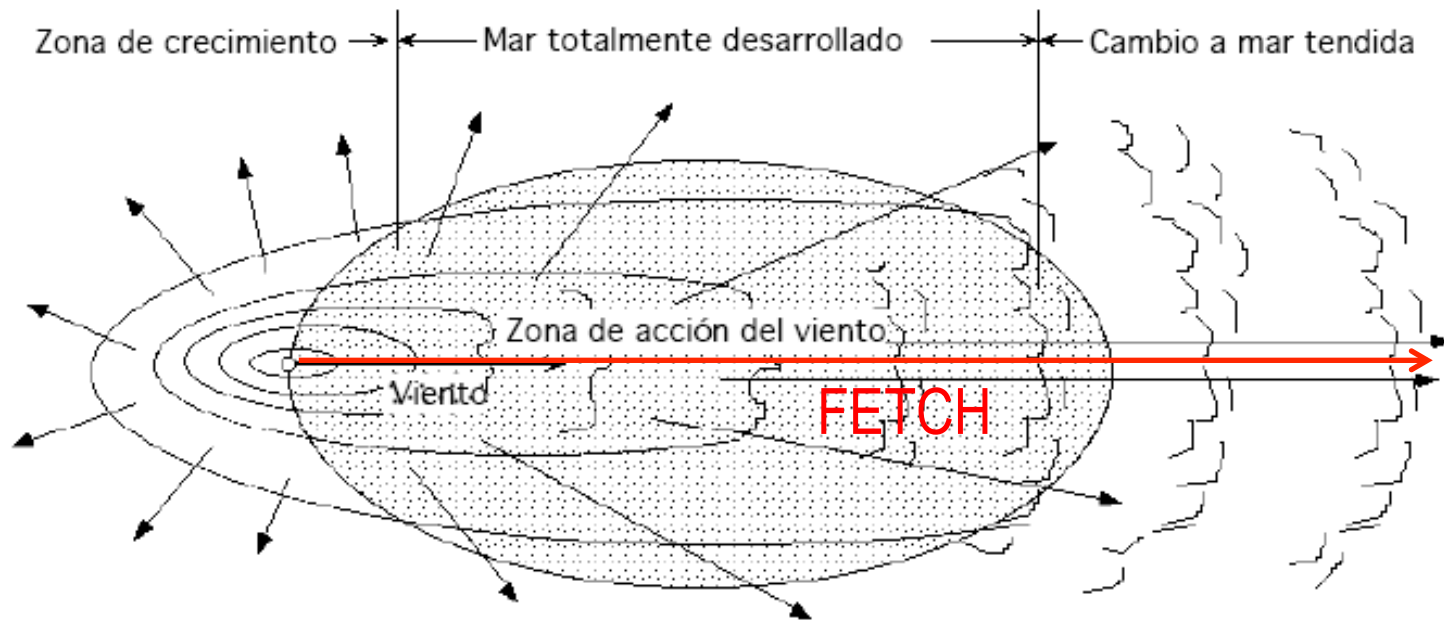


## 2. Generación





## 2. Generación



## 3. Procesos de transformación del oleaje

El oleaje se suele definir utilizando tres variables básicas:

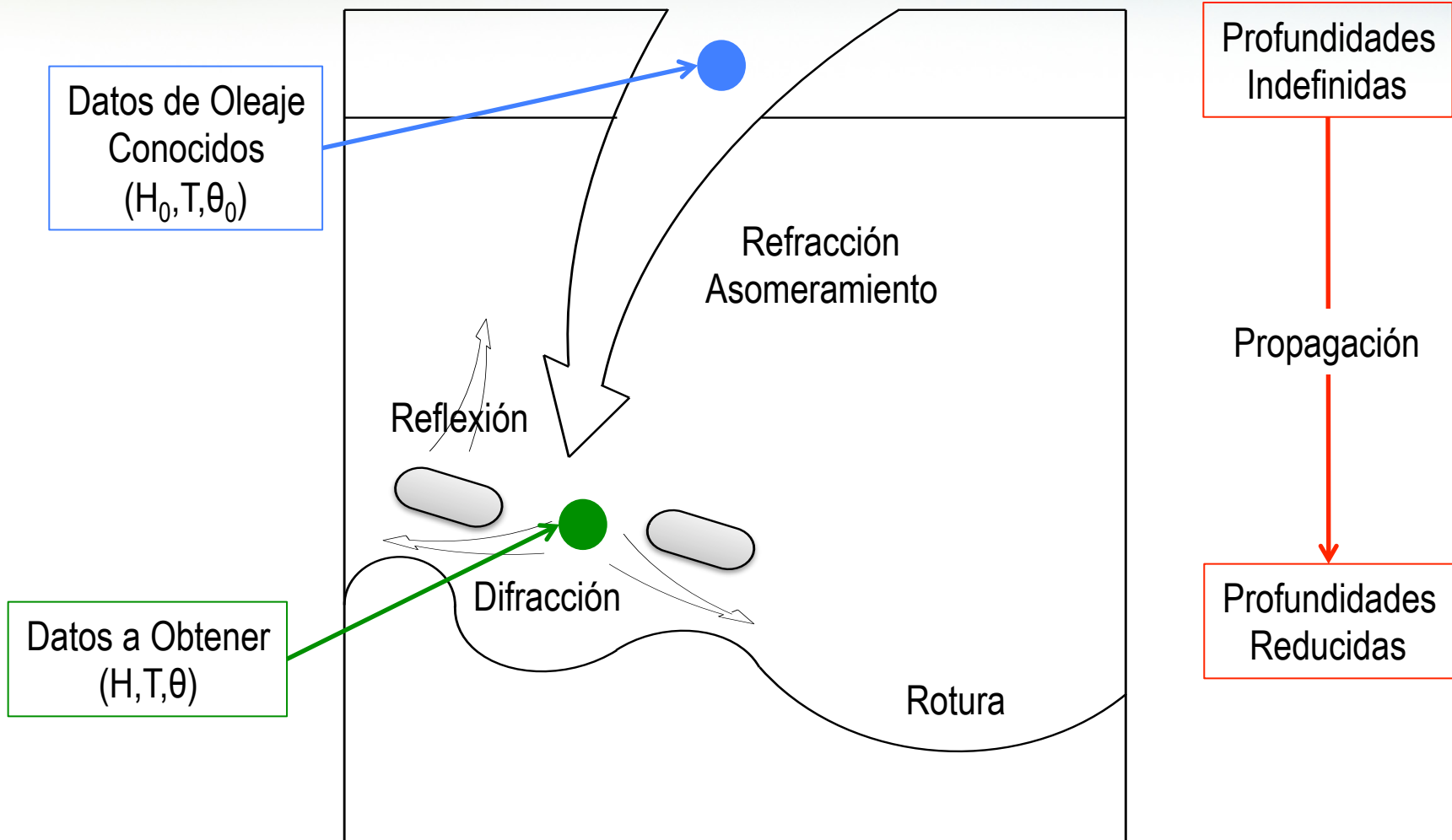
- **Altura de ola ( $H$ )**: diferencia de altura entre la cresta y el seno de la onda
- **Periodo ( $T$ )**: tiempo entre crestas o senos en un lugar fijo
- **Dirección ( $\theta$ )**: dirección que lleva el tren de ondas

Estas variables, fundamentalmente  $H$  y  $\theta$ , varían conforme el oleaje se **propaga** a 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  $h$** ).

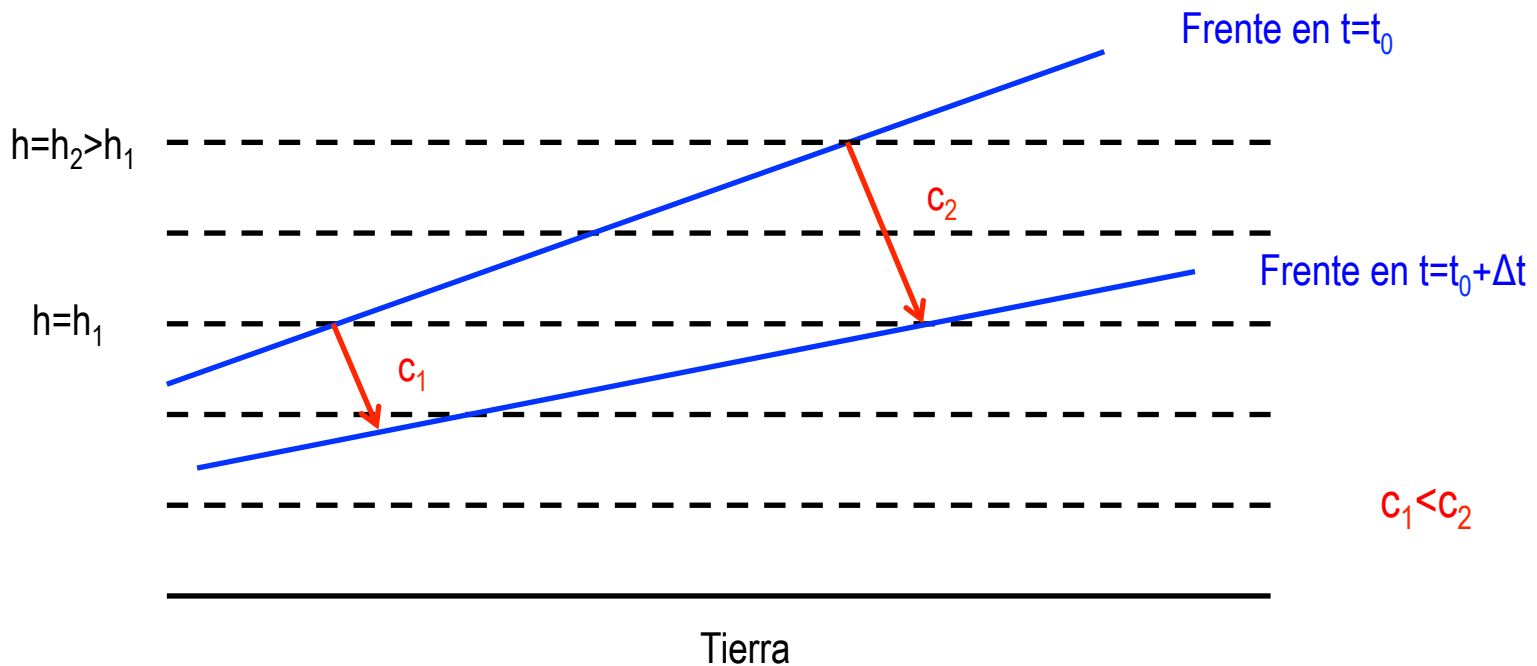
Las ecuaciones que se van a utilizar en este curso vienen de la **teoría lineal** → Se considera que  $T$  no varía en la propagación

## 3. Procesos de transformación del oleaje

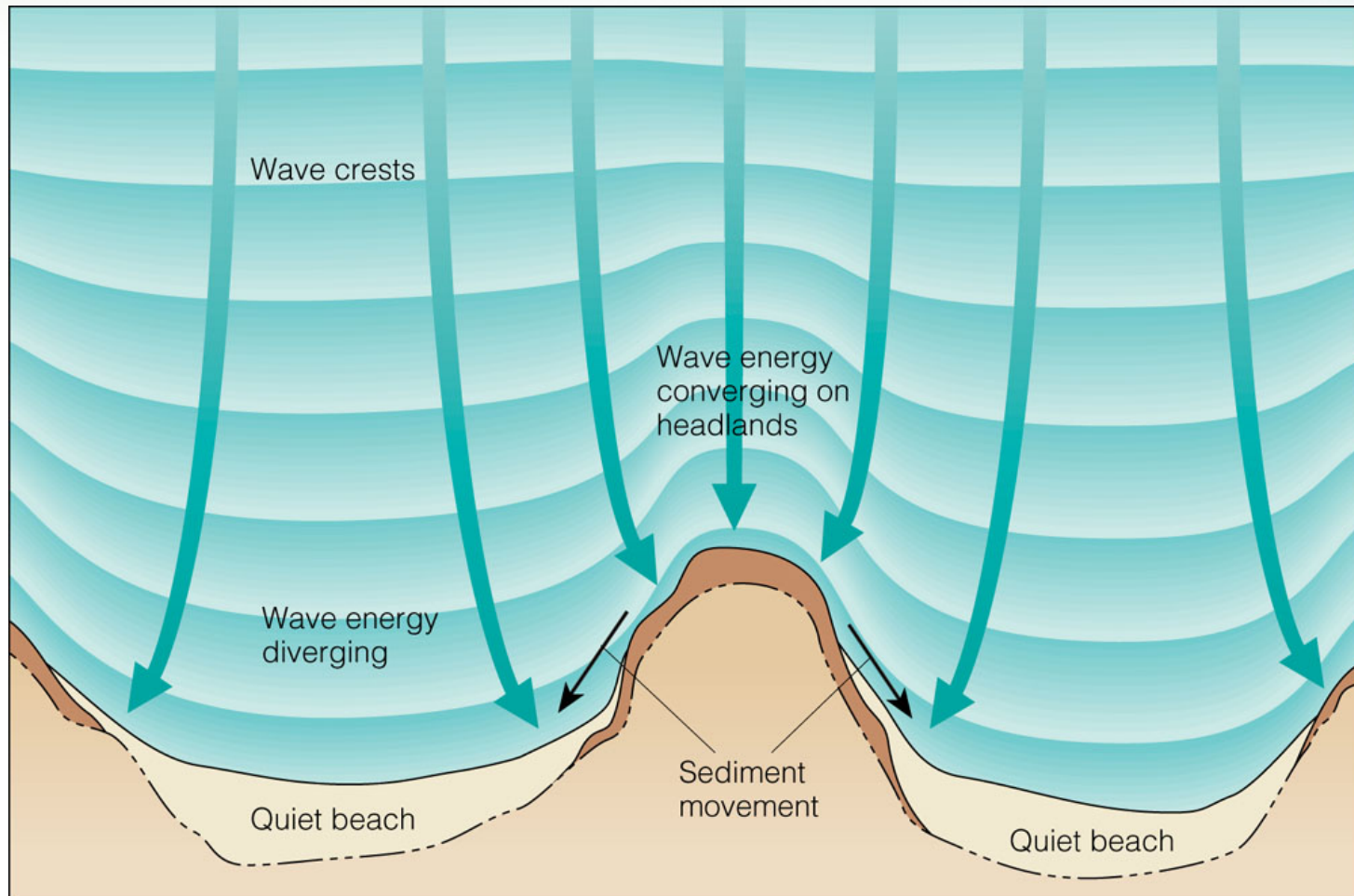


## 3.1 Refracción

“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:

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

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:

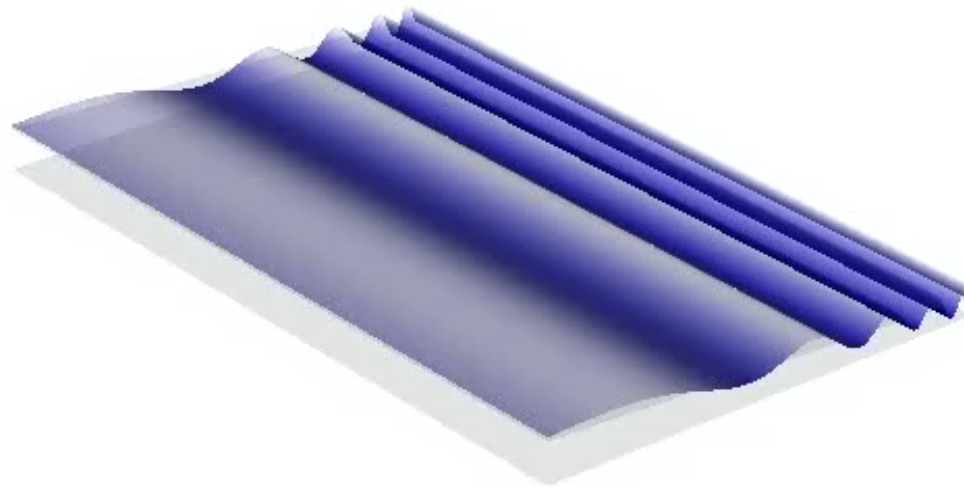
$$\theta = \arcsin \left( \sin \theta_0 \frac{c}{c_0} \right)$$

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 en frente se acerca a la costa





## 3.2 Asomeramiento

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

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** que viene dada por:

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

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 tren de ondas incidentes son reflejados por la presencia de un obstáculo (dique vertical) 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:

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

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

## 3.3 Reflexión



### 3.3 Reflexión



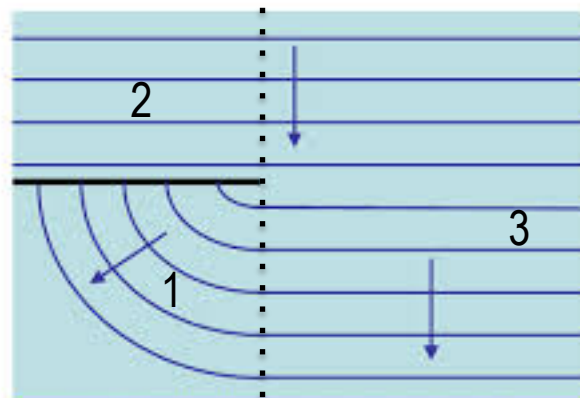
## 3.4 Difracción

**“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:

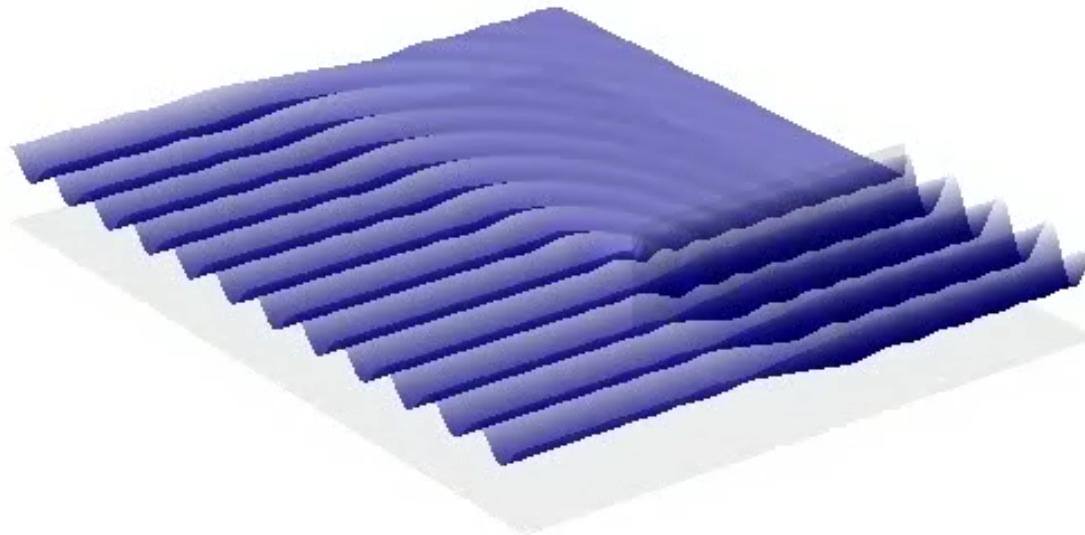
1. Zona de sombra, donde ocurre la difracción
2. Zona de reflexión, donde coexisten la onda incidente y la reflejada por el obstáculo
3. Zona no perturbada

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”**

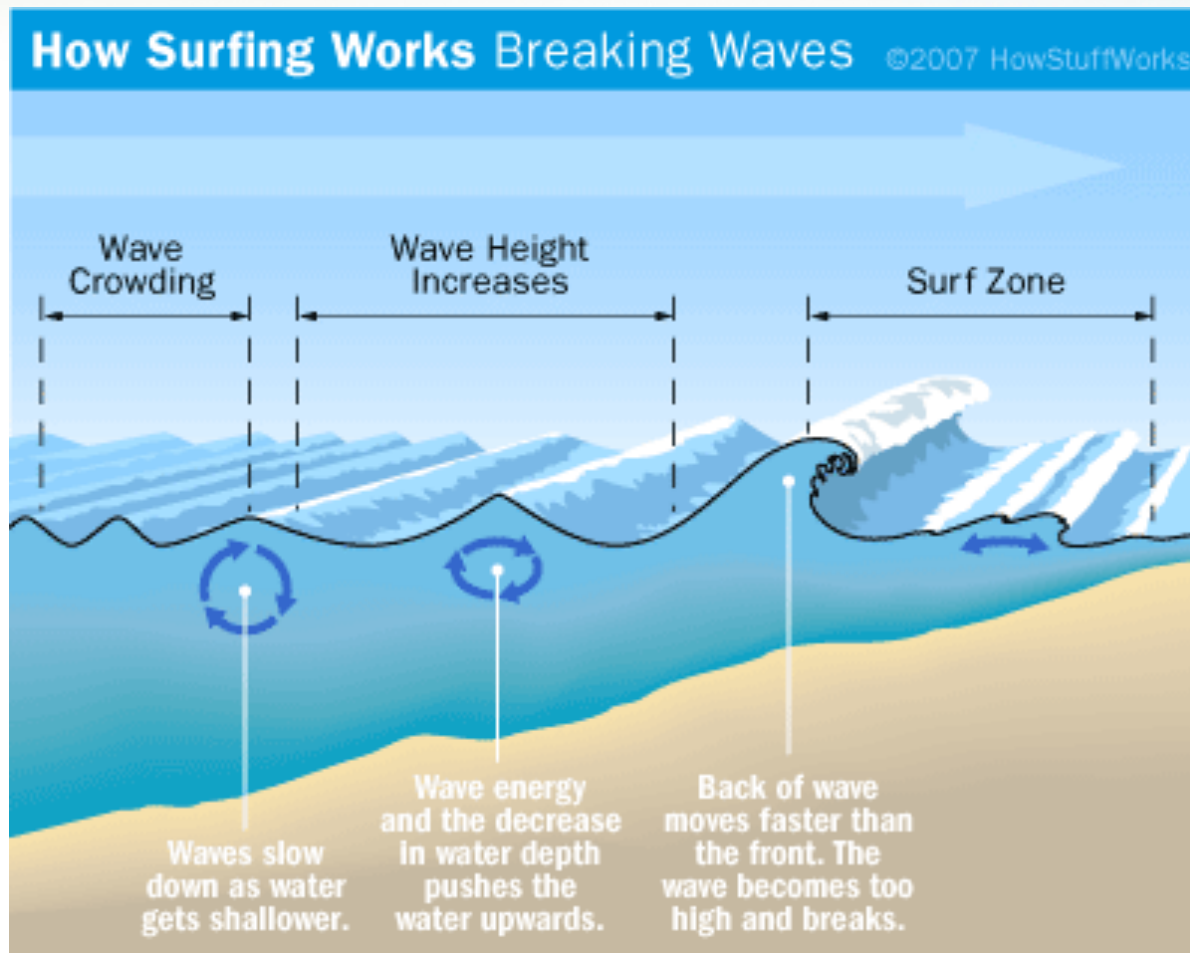
- Zona definida entre el inicio de la rotura y la línea de costa → **Zona de rotura**
- Este proceso viene acompañado de una gran disipación de energía que es empleada en la movilización del sedimento → En la zona de rotura se producen **los cambios morfológicos más importantes.**
- Como criterio de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

$$H = \gamma h$$

siendo  $\gamma$  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

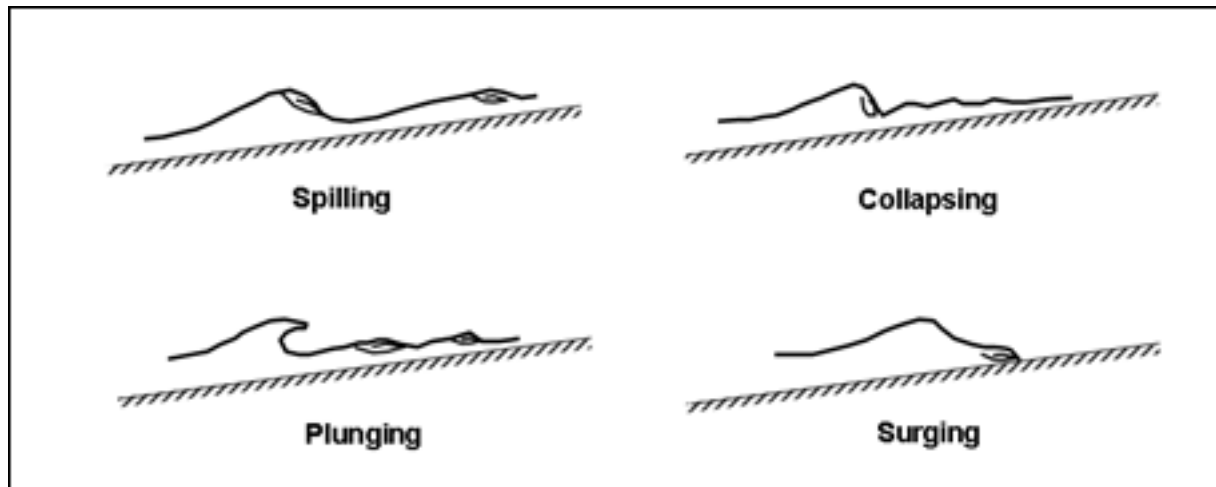




## 3.5 Rotura

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

- Decrestamiento (spilling)
- Voluta (plunging)
- Colapso (collapsing)
- En oscilación (surging)



## 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 → Cálculo 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.

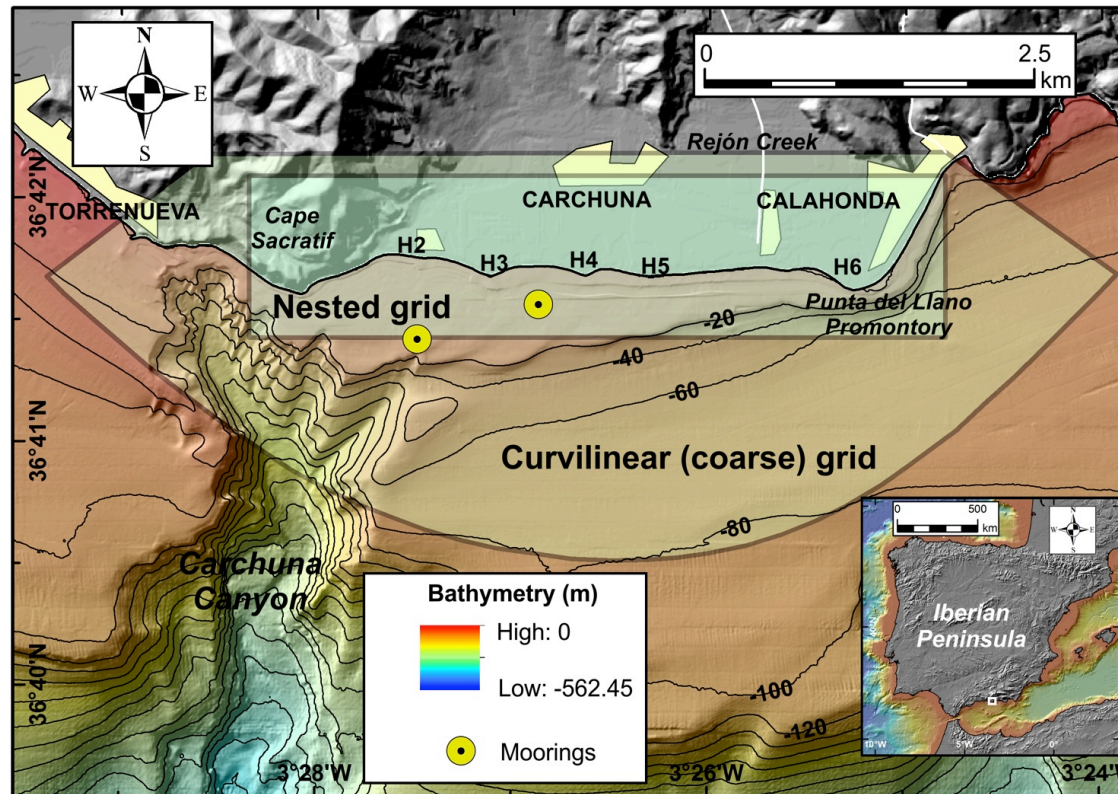
Estos modelos usan ecuaciones más complejas (y realistas) que la teoría lineal para obtener las variables como  $H$ ,  $T$ , ó  $\theta$ .

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

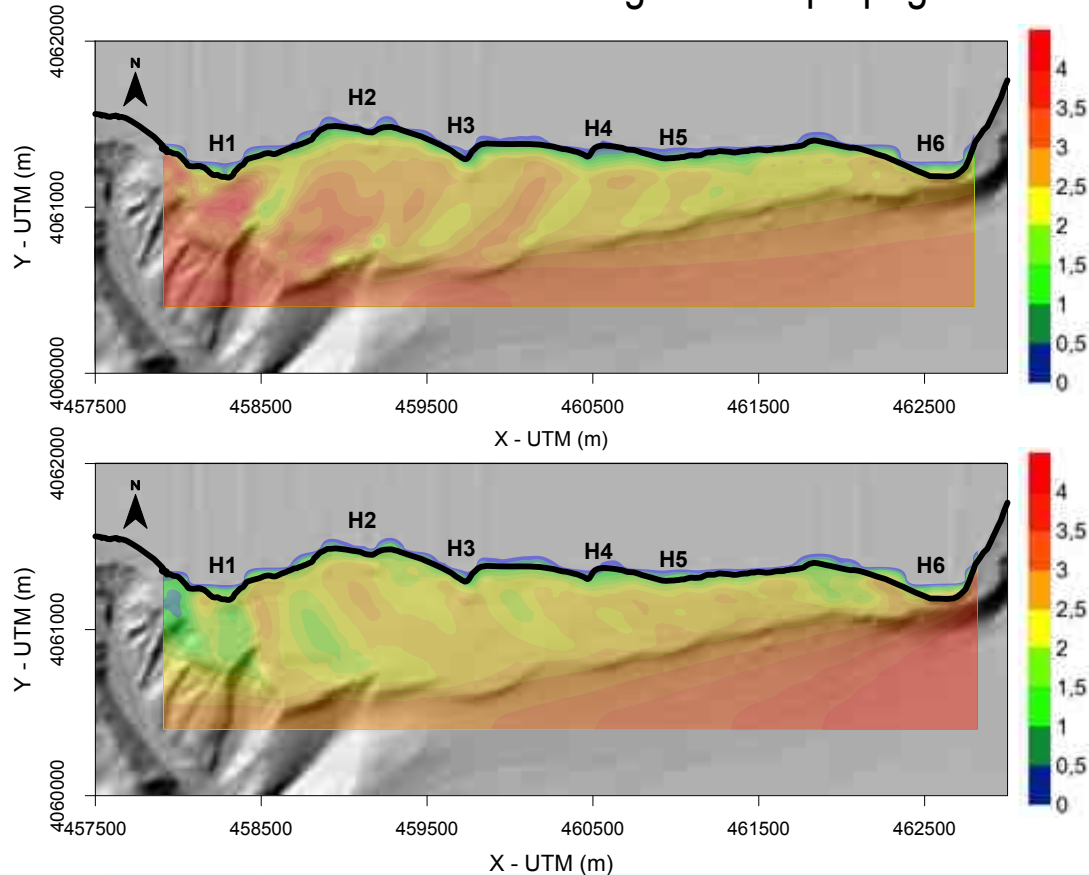
## 4.1 Ejemplo: playa de Carchuna (Granada)

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



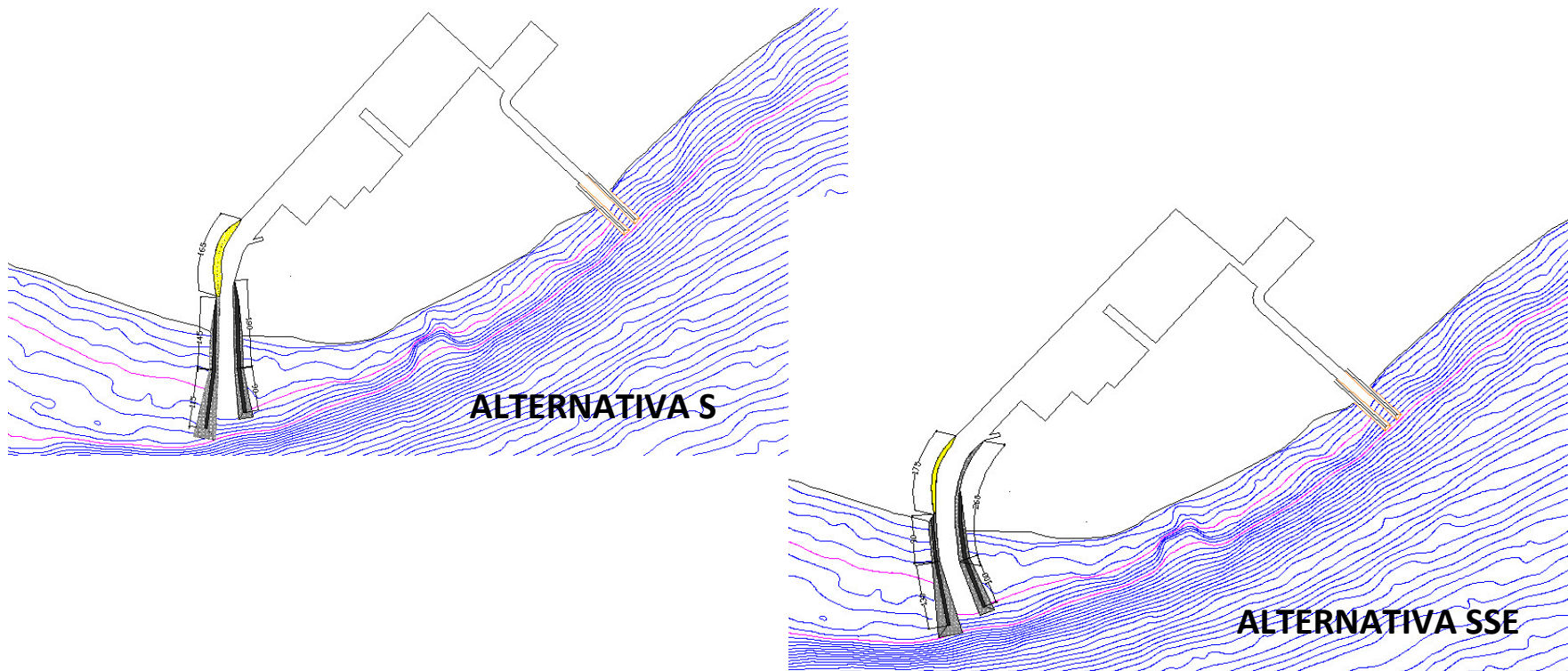
## 4.1 Ejemplo: playa de Carchuna (Granada)

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



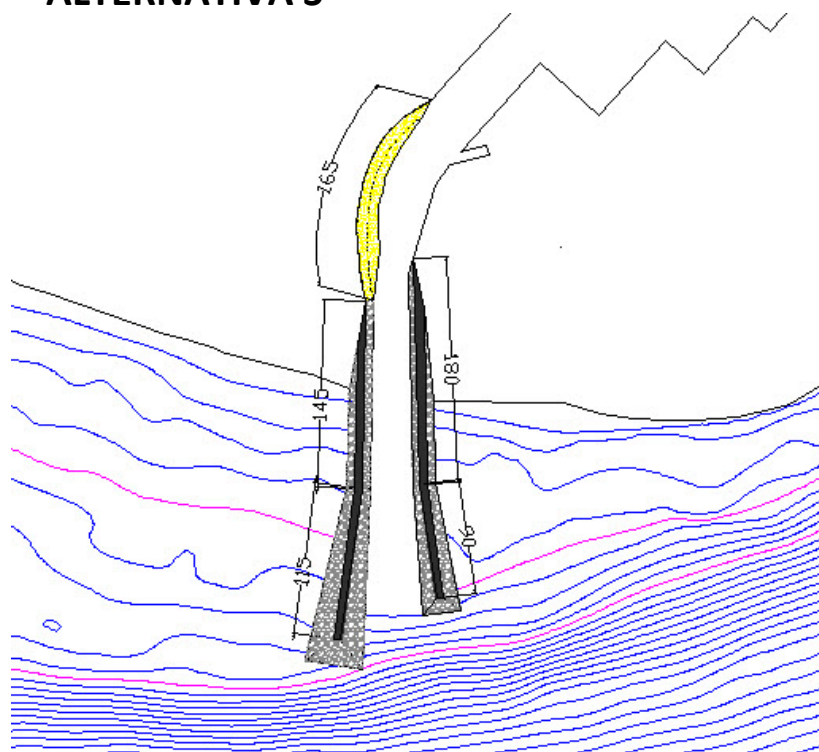
## 4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

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

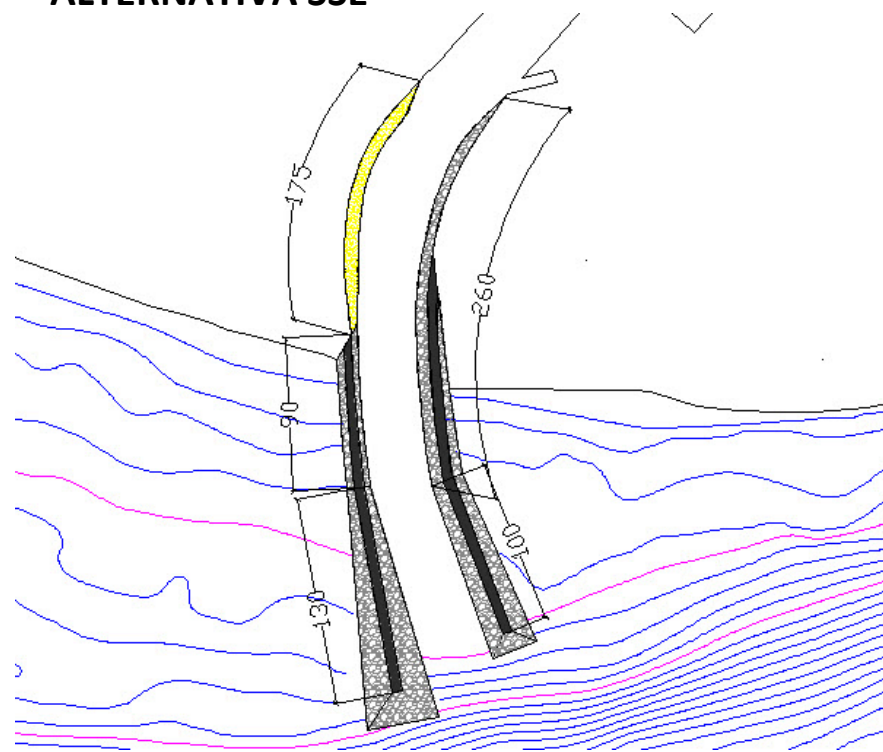


## 4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

**ALTERNATIVA S**

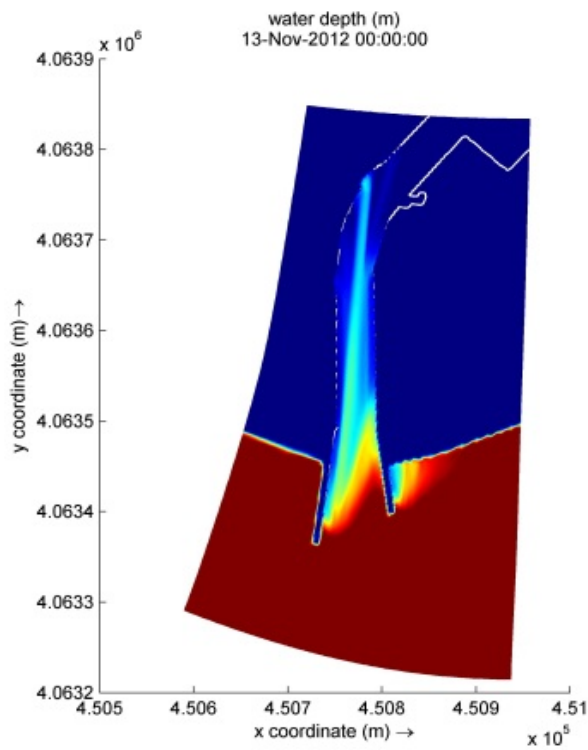


**ALTERNATIVA SSE**

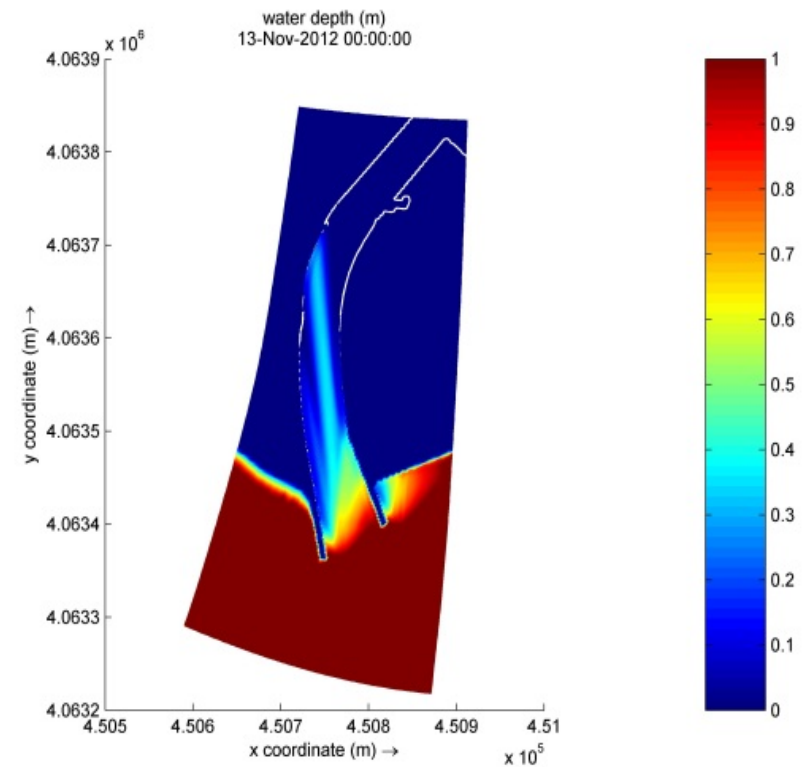


## 4.2 Ejemplo: Marina Playa Granada

### 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  $\theta$  que representa el oleaje en un intervalo de tiempo conocido como estado de mar (aprox. 3 horas).

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 ( $\theta_m$ )
- Dirección de pico ( $\theta_p$ )

2

# Variaciones de nivel



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 → Setup
- Variaciones a largo plazo (no se estudian aquí)

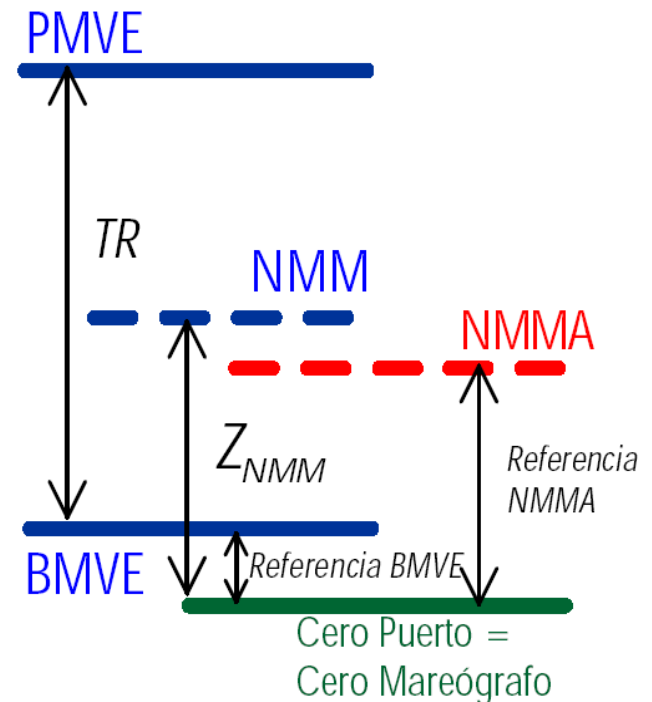
Su estudio es importante para:

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

## 2. Variaciones de nivel

### 2. Niveles de referencia

- Pleamar 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 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

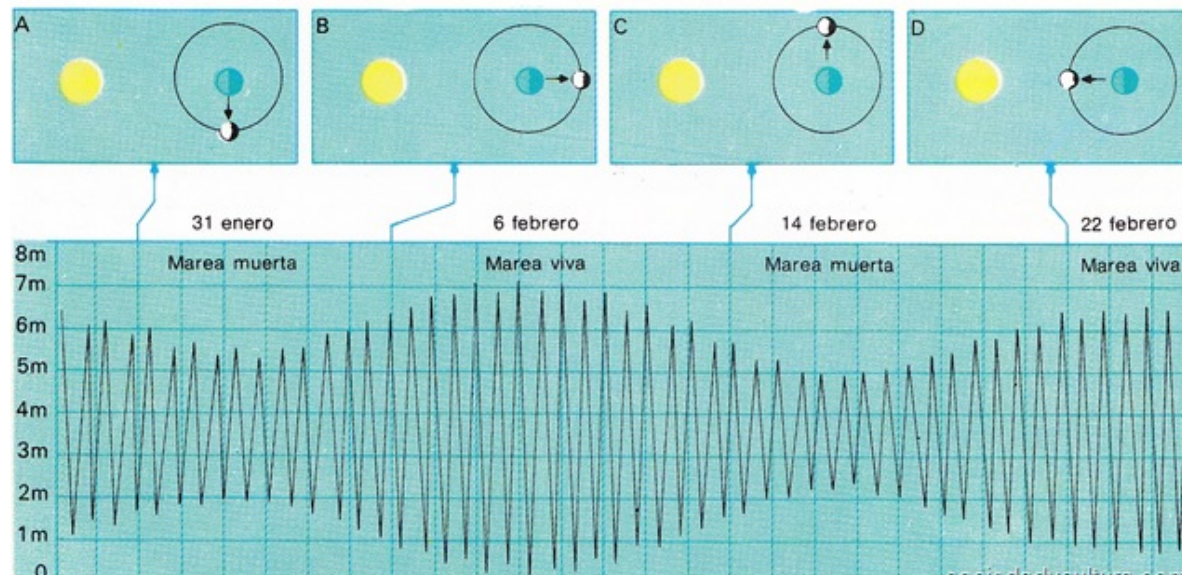


REFERENCIAR CADA MAGNITUD A SU CERO Y  
TENER EN CUENTA LA REFERENCIA NMMA

### 3. Marea astronómica

“Oscilación del nivel del mar forzada por los astros y sus movimientos”

- 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



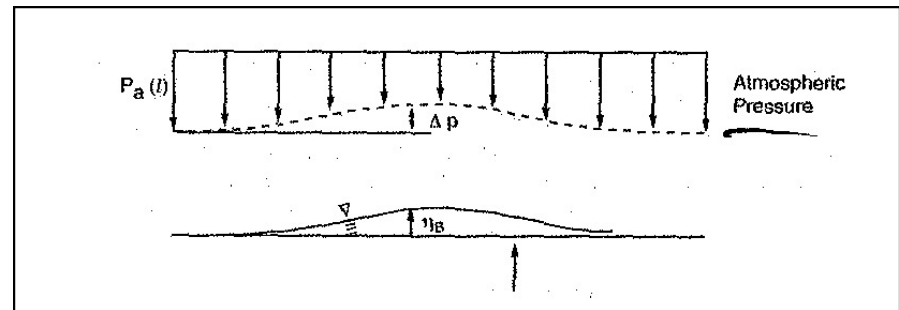
## 2. Variaciones de nivel

### 4. Marea meteorológica I: gradientes de presión

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

- Bajas presiones provocan un aumento del nivel
- Altas presiones provocan el efecto contrario

$$\Delta\eta_p = \frac{\Delta p}{\gamma}$$



$\Delta p$  = Diferencia de presión entre el punto en estudio y otro en el que la sobreelevación es nula respecto al nivel medio del mar (1024 mb) [1mb = 100N/m<sup>2</sup>]

$\gamma$  = Peso específico del agua  $\approx 10045$  N/m<sup>3</sup>

## 2. Variaciones de nivel

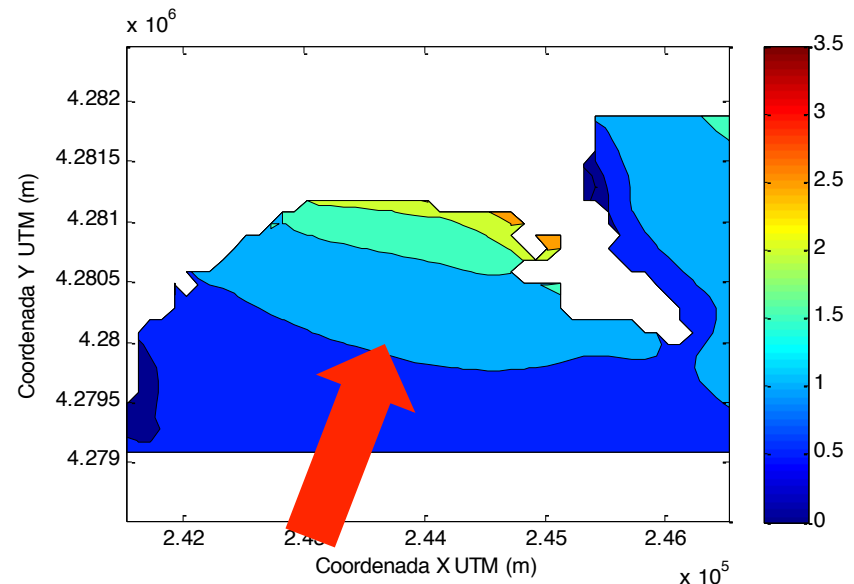
### 4. Marea meteorológica II: acción del viento

**“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





## 2. Variaciones de nivel

### 5. Setup

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

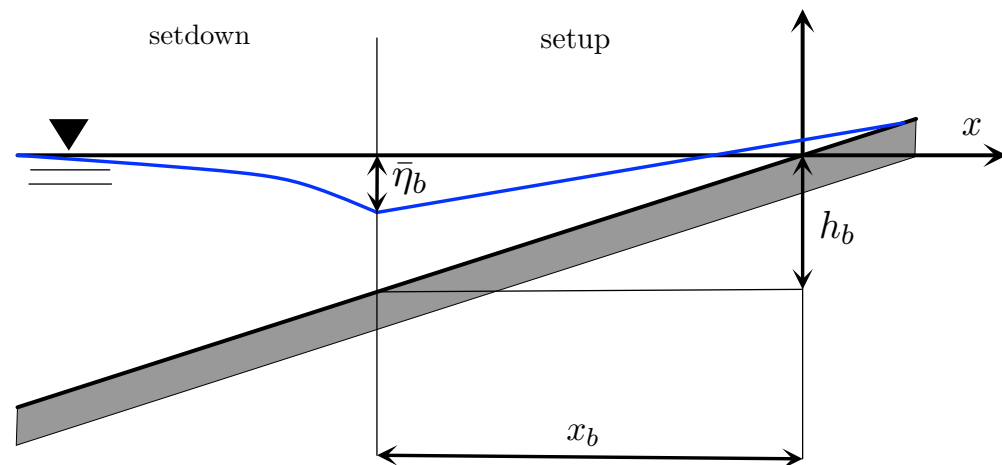
$$SU = 0.89 \tan \beta \sqrt{H_b L_0}$$

siendo:

$\tan \beta$  = pendiente de la playa

$H_b$  = altura de ola en rotura

$L_0$  = longitud de onda del oleaje  
en indefinidas



### 6. Cálculo de la 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.

$$CI = MA + MM + SU = MA + \Delta\eta_p + \Delta\eta_v + SU$$

siendo:

MA = nivel de la PMVE

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

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

SU = setup debido al oleaje

**¡CUIDADO CON LOS NIVELES DE REFERENCIA!**

## 2. Variaciones de nivel

### 7. Ejemplo: Calpe (Alicante)

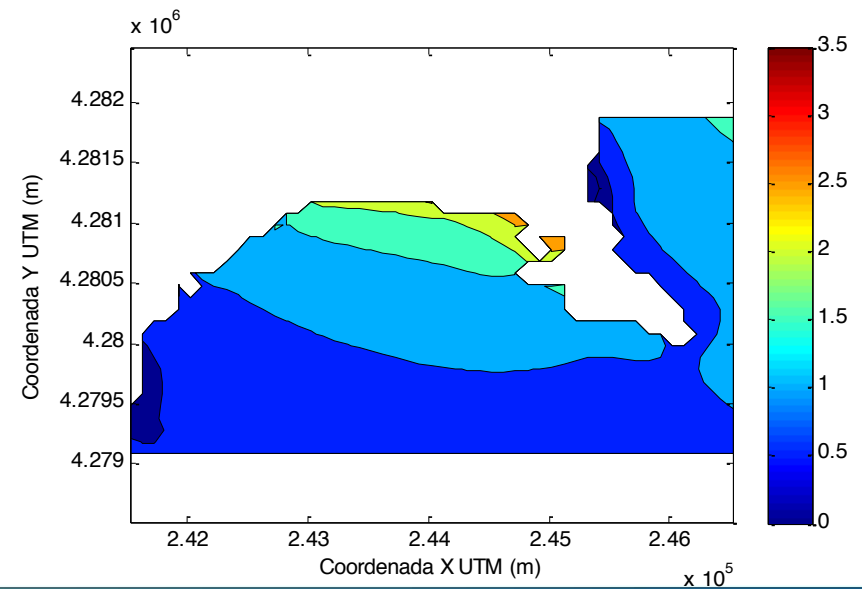
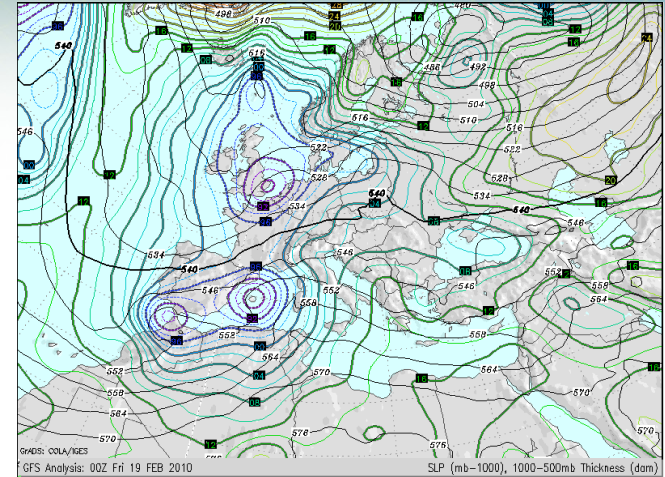
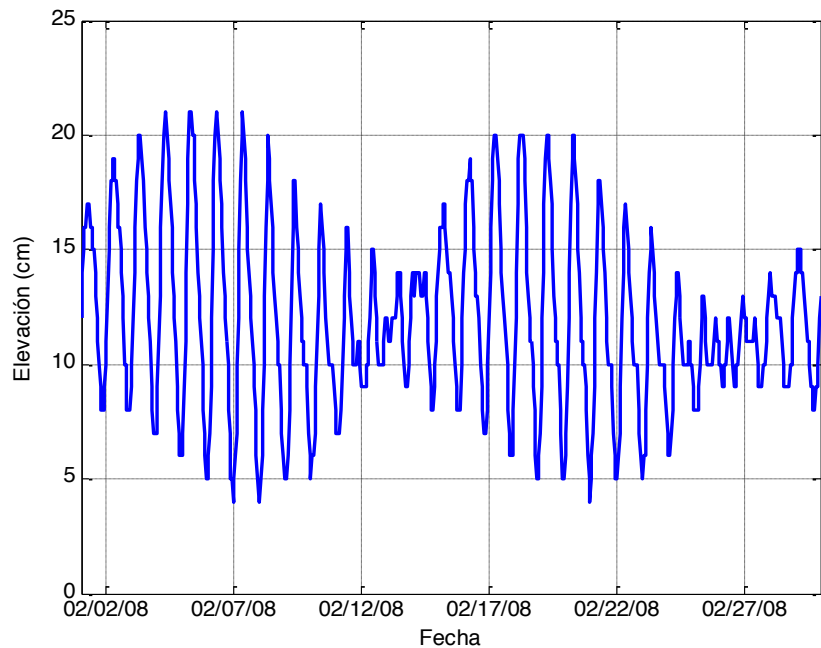
Objetivo: determinar cota de inundación para estudiar la inundabilidad de la laguna



## 2. Variaciones de nivel

### 7. Ejemplo: Calpe (Alicante)

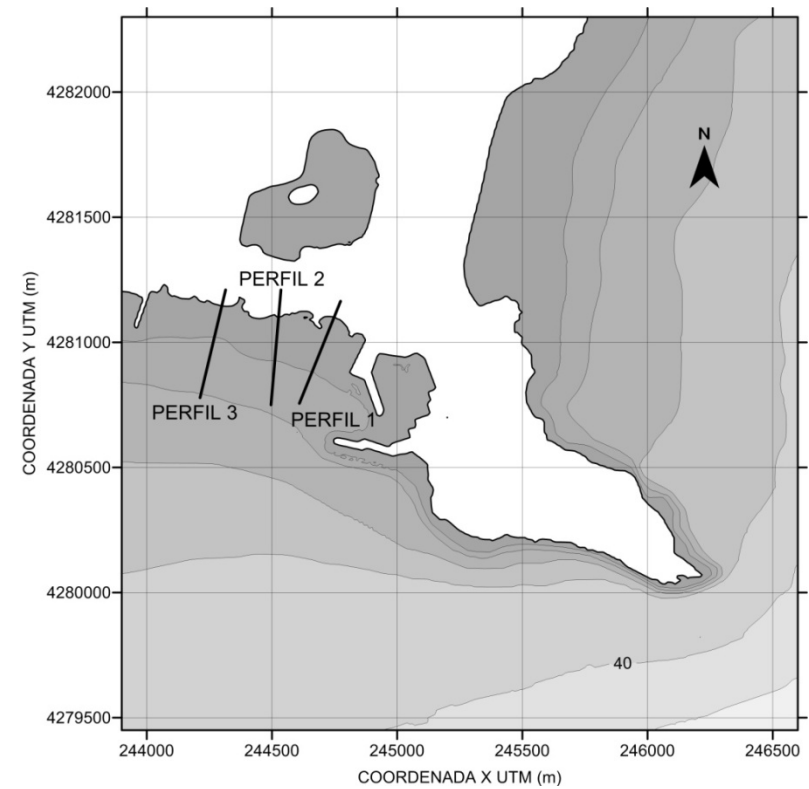
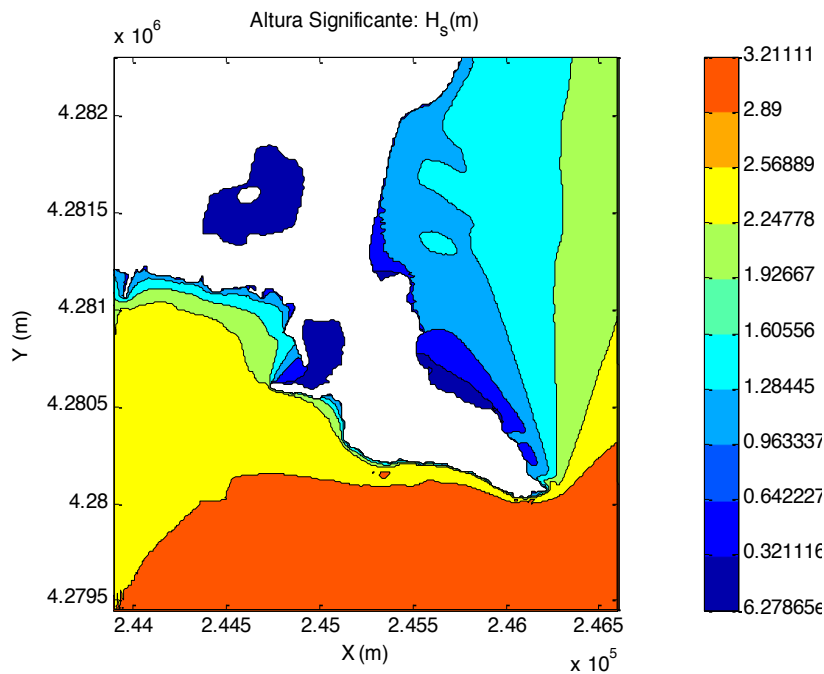
Marea astronómica y meteorológica



## 2. Variaciones de nivel

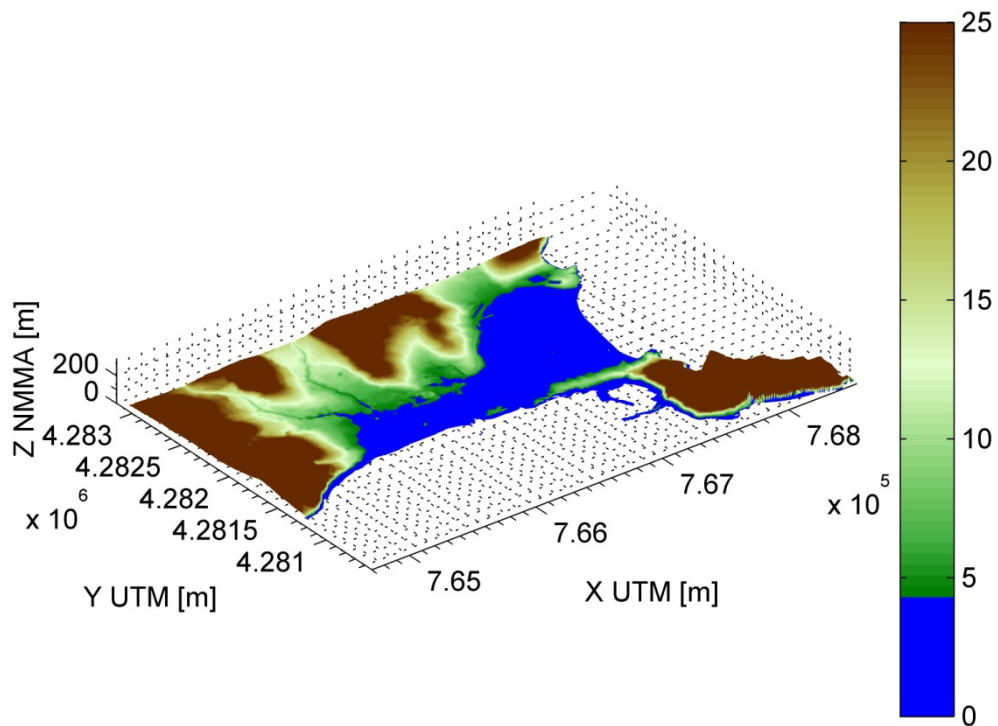
### 7. Ejemplo: Calpe (Alicante)

Obtención de altura de ola para el setup



### 7. Ejemplo: Calpe (Alicante)

Estudio de inundabilidad



A large, white, stylized letter 'D' logo. The letter has a thick, rounded top and a curved bottom, with a white, curved shape inside that resembles a stylized 'B' or a leaf.

# Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA

# Procesos Costeros y Herramientas Básicas

Gestión Integral de Puertos y Costas  
Curso 2013-2014

Grado en Ingeniería Civil  
Especialidad de Transporte y Servicios Urbanos

Alejandro López Ruiz  
alopezruiz@ugr.es





## Índice

1. Oleaje
2. Variaciones de nivel
3. Transporte de sedimentos y forma en planta
4. Perfil de playa y regeneraciones

3

# Transporte de sedimentos y forma en planta

D

Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA

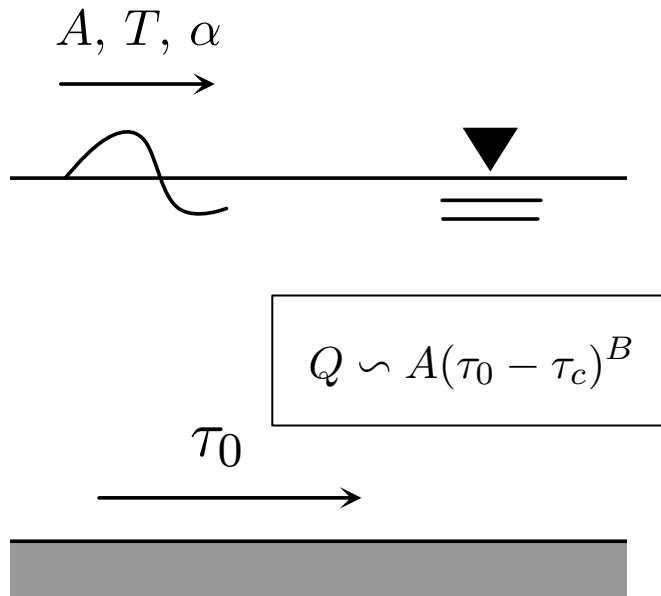
# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 1. Introducción

Definición:

**“Movimiento de las partículas de sedimento debido a la acción del flujo sobre ellas”**

Tasa de transporte:



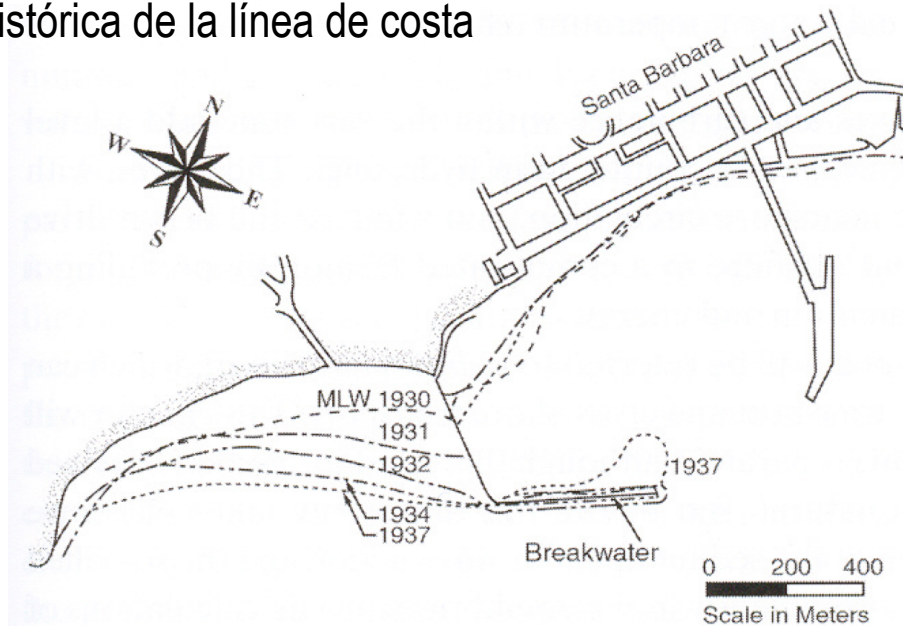
Aplicaciones:

- Evolución morfológica de la costa
- Erosión y aterramiento de estructuras submarinas
- Análisis del impacto de obras marítimas (operatividad y gestión de la costa)
- Erosión en pilas y estructuras

# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 2. Estudio de la dinámica del litoral

1. Descripción física de la zona de estudio
2. Clima marítimo (régimen medio y extremal)
3. Propagación de oleaje
4. Evolución histórica de la línea de costa

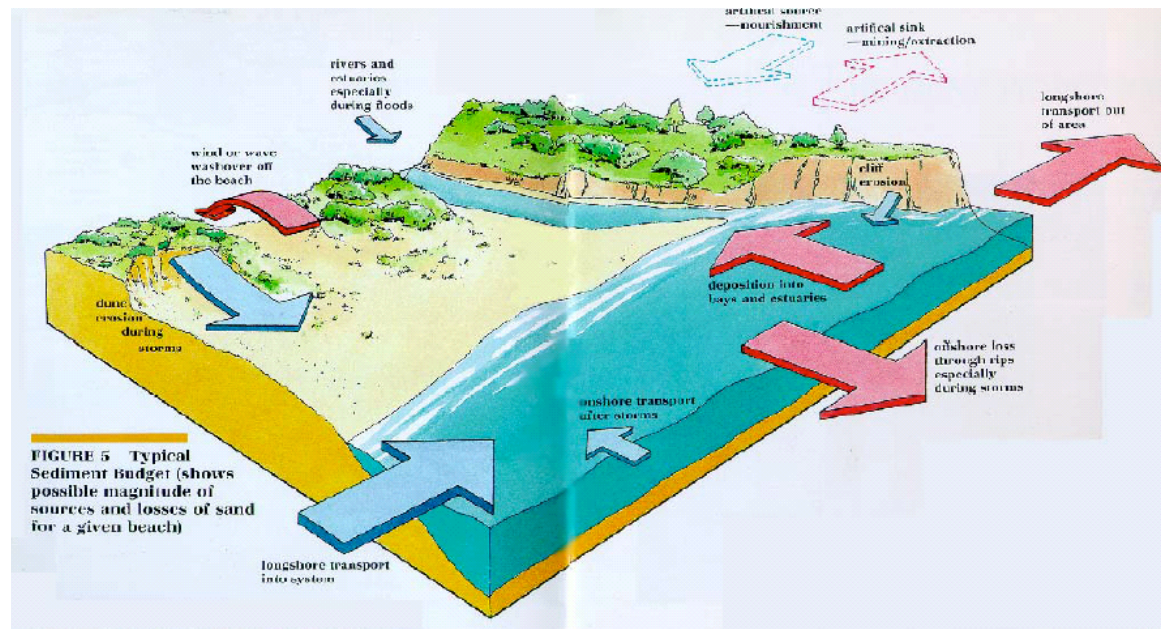


**Figure 8.1** Historical shorelines at Santa Barbara, California (from Johnson 1957). Leadbetter Beach is on the left.

# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 2. Estudio de la dinámica del litoral

### 5. Transporte de sedimentos



### 6. Diagnóstico de la situación (erosión, acreción, equilibrio)

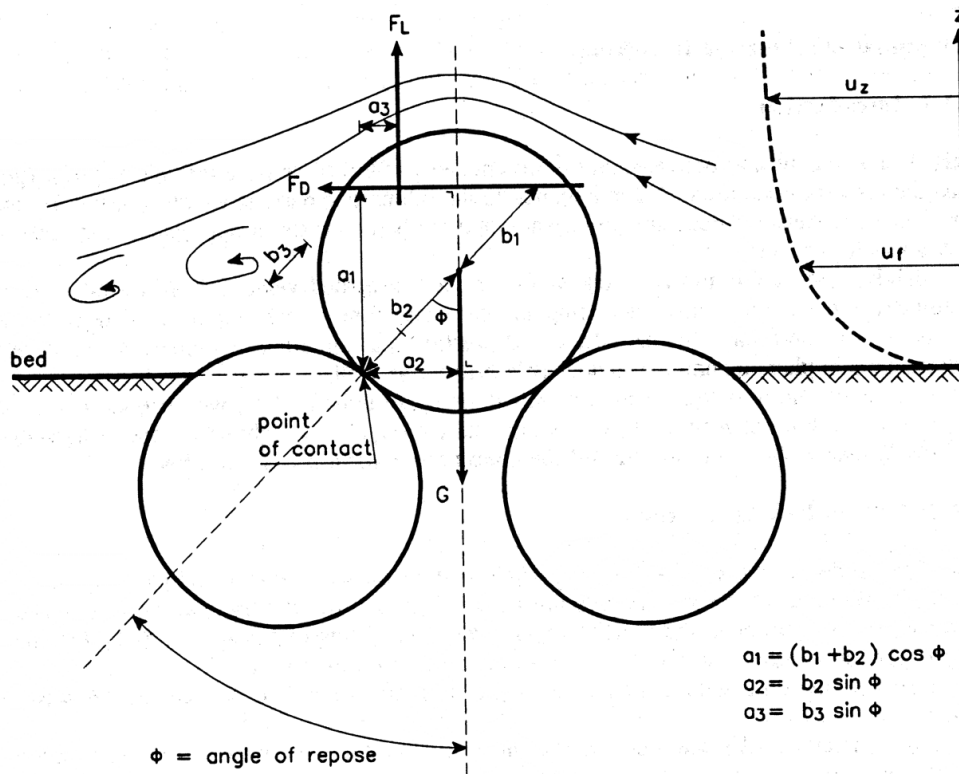
### 7. Propuesta de soluciones

### 8. Predicción de la evolución morfológica

# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 3. Inicio de movimiento

Fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento:



Para evaluar si hay movimiento



**Parámetro de Shields**

$$\theta = \frac{F_{DESESTABILIZADORAS}}{F_{ESTABILIZADORAS}}$$

Si  $\theta > \theta_{CR}$  se produce movimiento

$\theta_{CR}$  depende fundamentalmente del diámetro de la partícula

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 4. Modos de transporte

En cuanto se supera  $\theta_{CR}$  los sedimentos pueden ser transportados en tres modos:

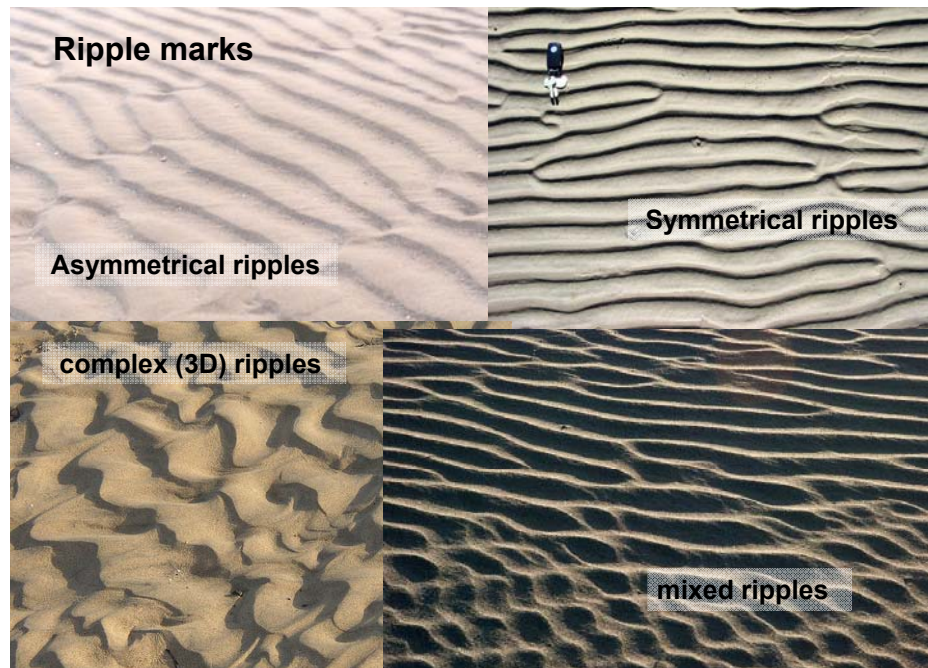
1. **Transporte por fondo:** partículas en contacto permanente o intermitente con el lecho. Movimiento limitado por el efecto de la gravedad: rodadura, deslizamiento o saltación.
2. **Transporte en suspensión:** las partículas son transportadas sin están en contacto con el lecho por efecto de las fuerzas turbulentas.
3. **Carga de lavado (“wash load”):** partículas muy finas transportadas por el flujo que no están presentes en el lecho.

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 5. Formas de lecho

Al iniciarse el movimiento, el lecho se deforma y aparecen las siguientes morfologías:

1. **Lecho plano:**  $\theta > \theta_{CR}$  y no se produce transporte de sedimentos
2. **Ripples:** rizaduras con longitudes de onda del orden de 10 cm y amplitudes del orden de cm.

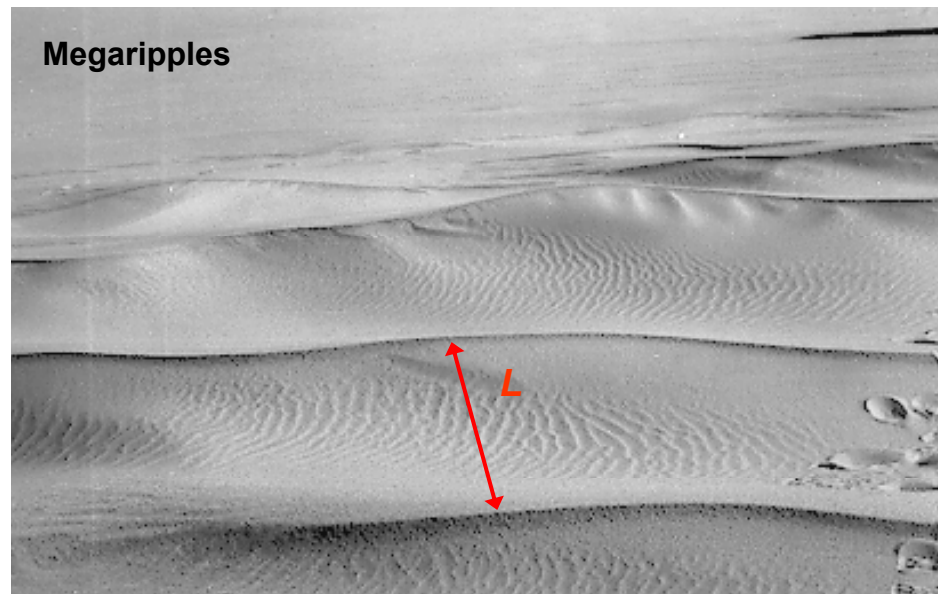




### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 5. Formas de lecho

3. **Megaripples**: si sigue aumentando la velocidad del fluido, se tienden a formar megaripples con longitudes de onda del orden de 100 cm y amplitudes del orden de 10 cm.



4. **Lecho plano**: si la velocidad sigue aumentando desaparecen las formas de lecho, el fondo se vuelve plano y se da lo que se denomina transporte en flujo de lamina (“sheet flow”).

# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 6. Cálculo de tasas de transporte

En la gestión del litoral, la tasa más importante es la de **transporte longitudinal** (paralelo a la costa), que es en la que nos vamos a centrar.

Formas de obtener esta tasa:

- 1. Adopción de tasas vecinas:** asignar el transporte de sedimentos conocido en un tramo de costa a otro que se encuentre relativamente cerca. → Poco preciso
- 2. Cálculo con distintas batimetrías:** La tasa media de transporte sería la diferencia de volumen entre el intervalo de tiempo entre la toma de datos batimétricos. → Muy costoso
- 3. Medidas de campo:** requieren instrumentación específica y mucha mano de obra. Las muestras se toman con una “trampa de sedimentos” que acumula el material transportado en una sección transversal. → Poco representativo
- 4. Fórmulas de cálculo:** relacionan parámetros del oleaje con el transporte de sedimentos. → Método más extendido

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 6. Cálculo de tasas de transporte

Fórmula del CERC:

$$Q_L = \frac{K \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma} (\rho_s - \rho) (1 - p)} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b)$$

K: coeficiente que depende del tamaño del sedimento  $\rightarrow K = 1,6e^{-2,5D_{50}}$

$H_b$ : altura de ola en rotura

$\alpha_b$ : ángulo del oleaje en rotura

$\gamma$ : índice de rotura (0.5 – 0.8)

$\rho$ : densidad del agua (1025 kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$ : densidad de las partículas sólidas (2650 kg/m<sup>3</sup>)

p: porosidad del material (0.5)

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 7. Interpretación física

El análisis del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de un tramo de playa nos da una idea de su estado morfodinámico, pudiendo identificar:

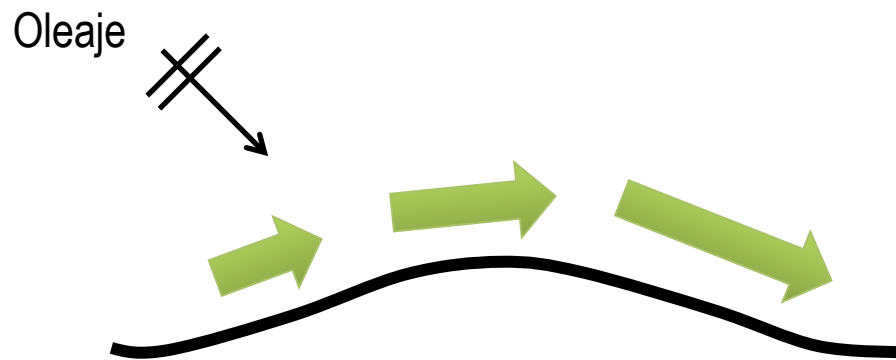
- **Zonas de erosión** → La línea de costa tiende a retroceder
- **Zonas de acreción** → La línea de costa tiende a avanzar
- **Zonas de equilibrio** → La línea de costa mantiene aproximadamente su posición



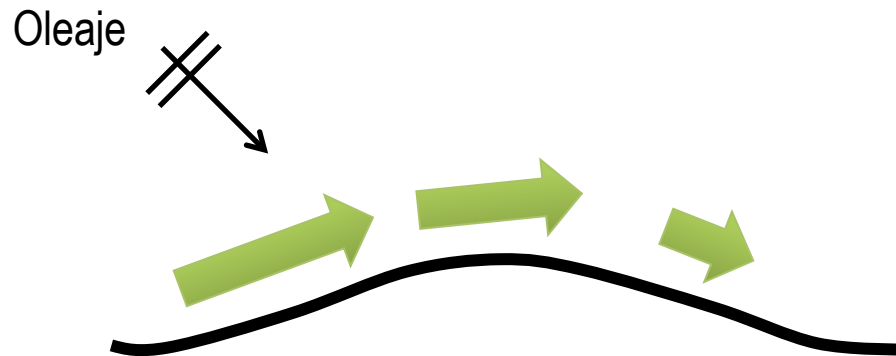
Todo depende del **gradiente de transporte longitudinal de sedimentos** a lo largo de la playa

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



**Erosión en la punta**

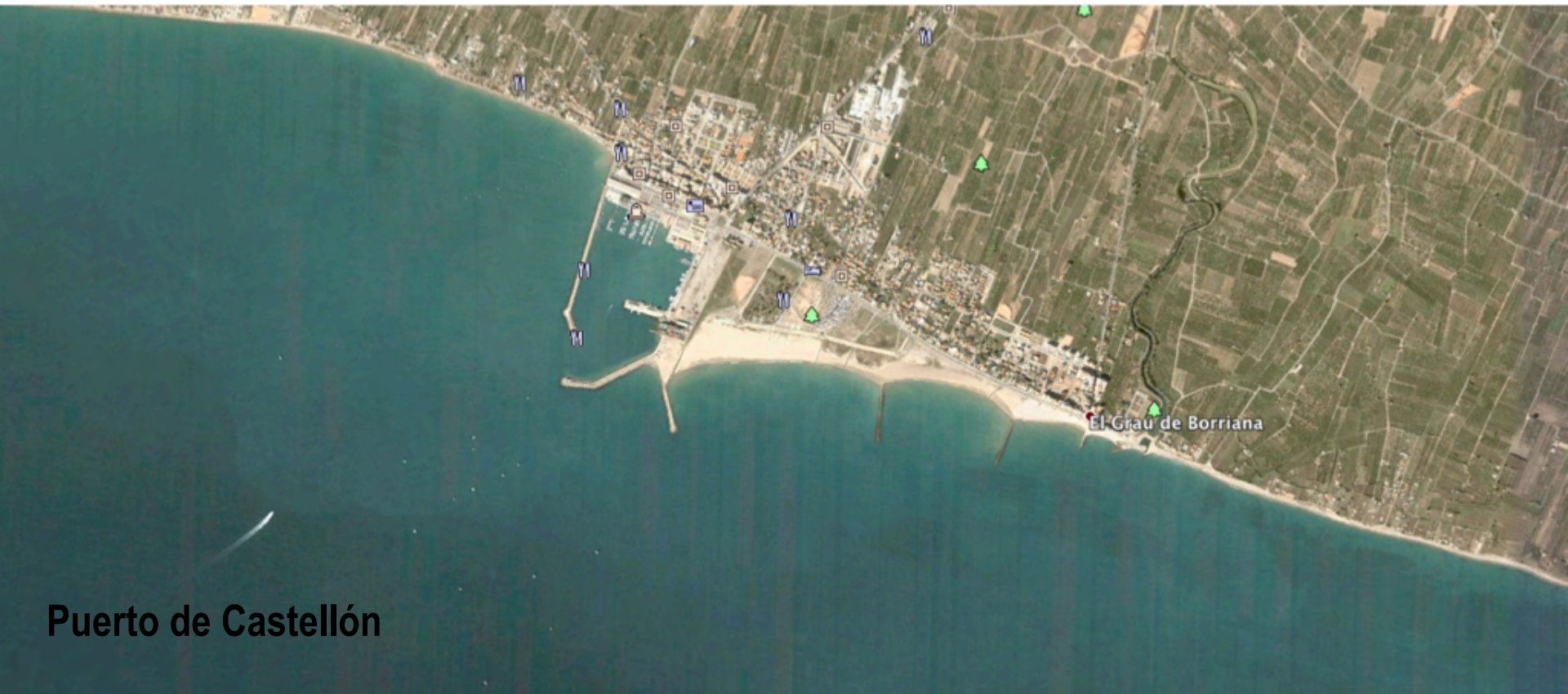


**Acreción en la punta**

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 7. Interpretación física

¿Qué pasa si el transporte de sedimentos encuentra un obstáculo?



Puerto de Castellón

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 7. Interpretación física

¿Qué pasa si el transporte de sedimentos encuentra un obstáculo?



**Puerto de Castellón**

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 7. Interpretación física

¿Qué pasa si el transporte de sedimentos encuentra un obstáculo?



San Pedro del Pinatar (Murcia)



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

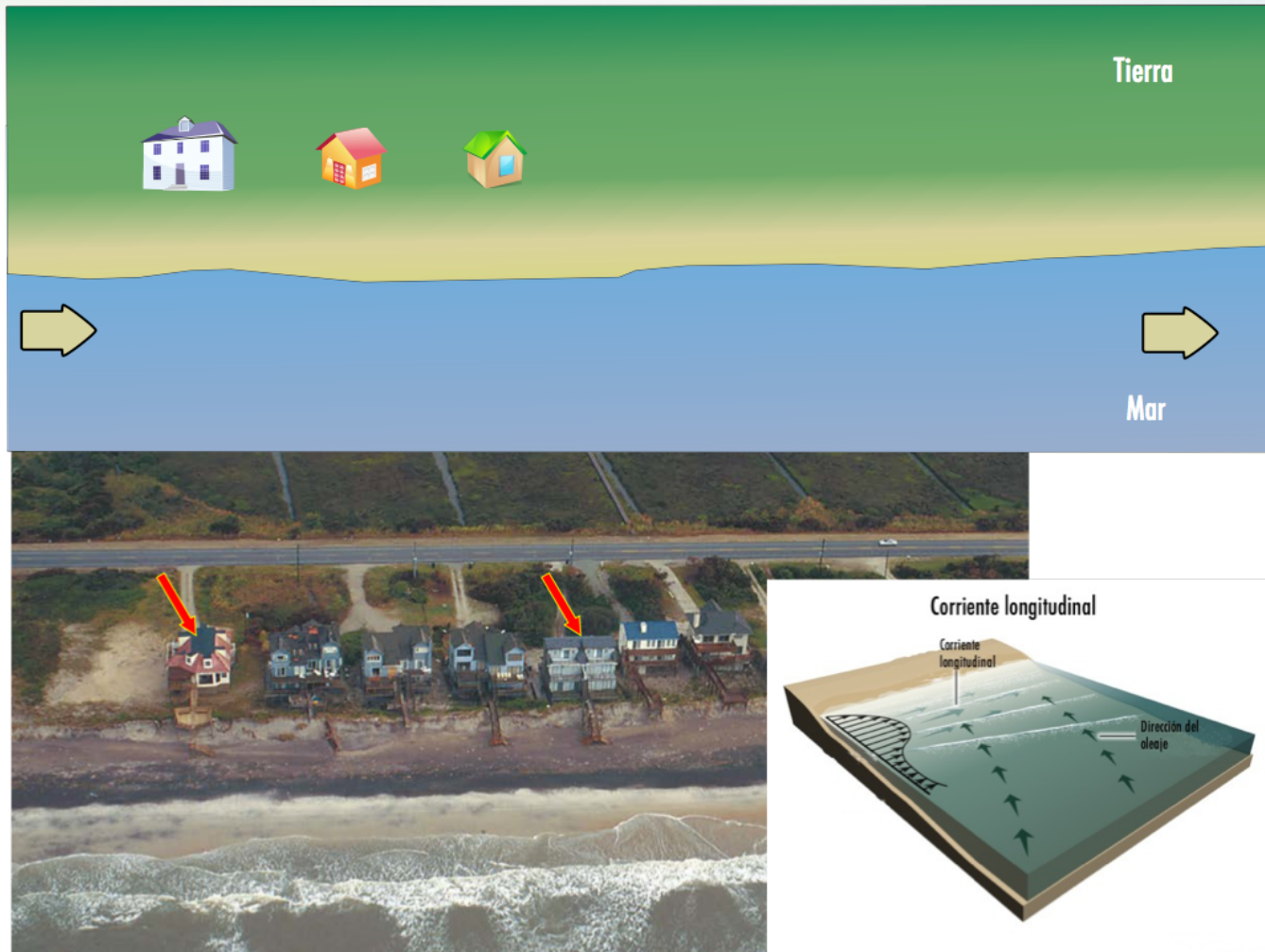
## 7. Interpretación física

¿Qué pasa si el transporte de sedimentos encuentra un obstáculo?



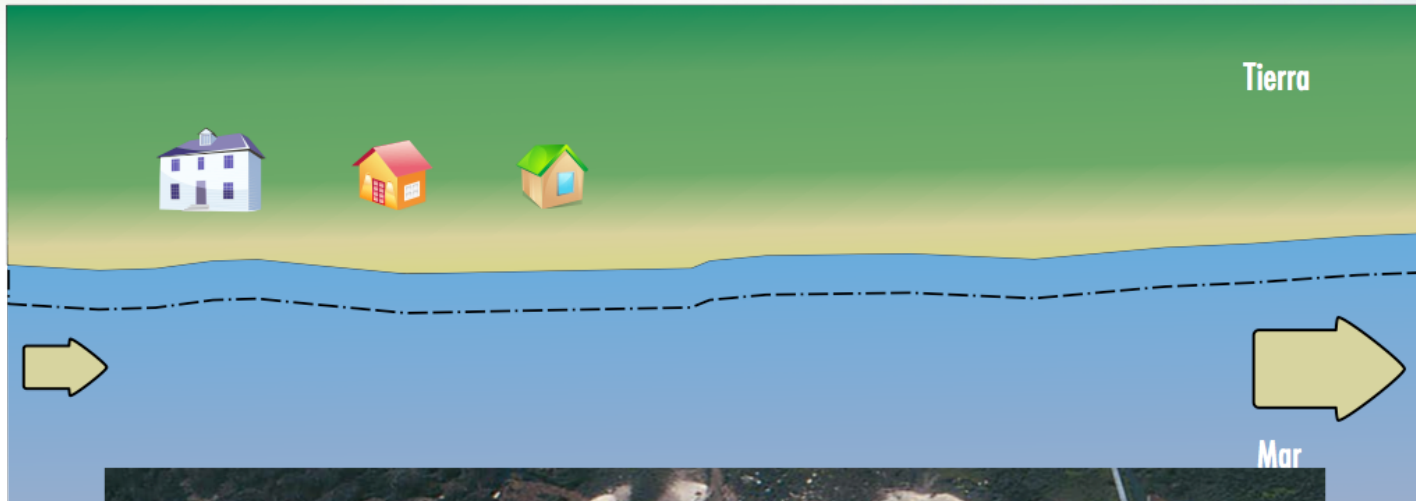
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



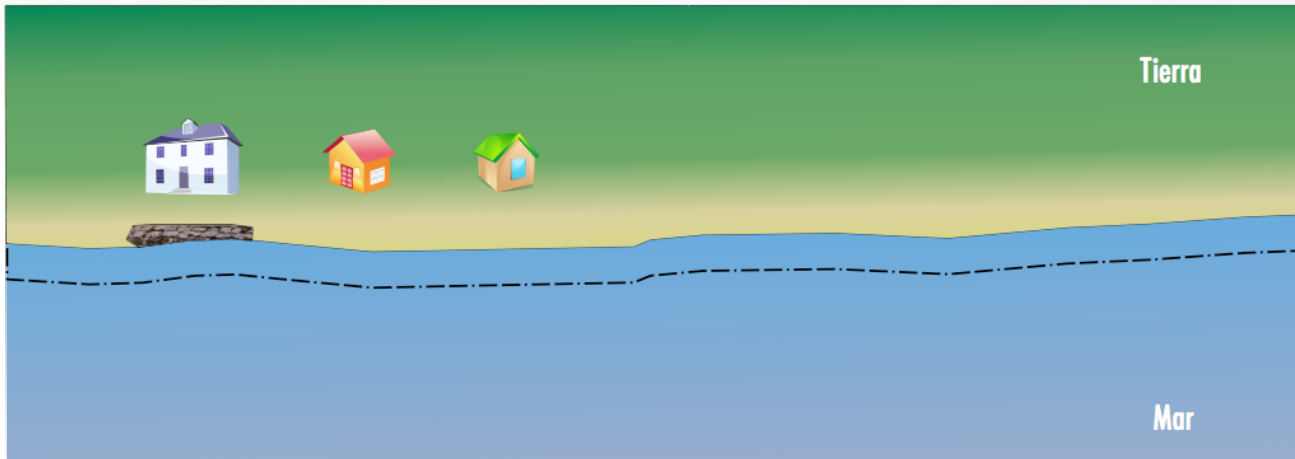
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



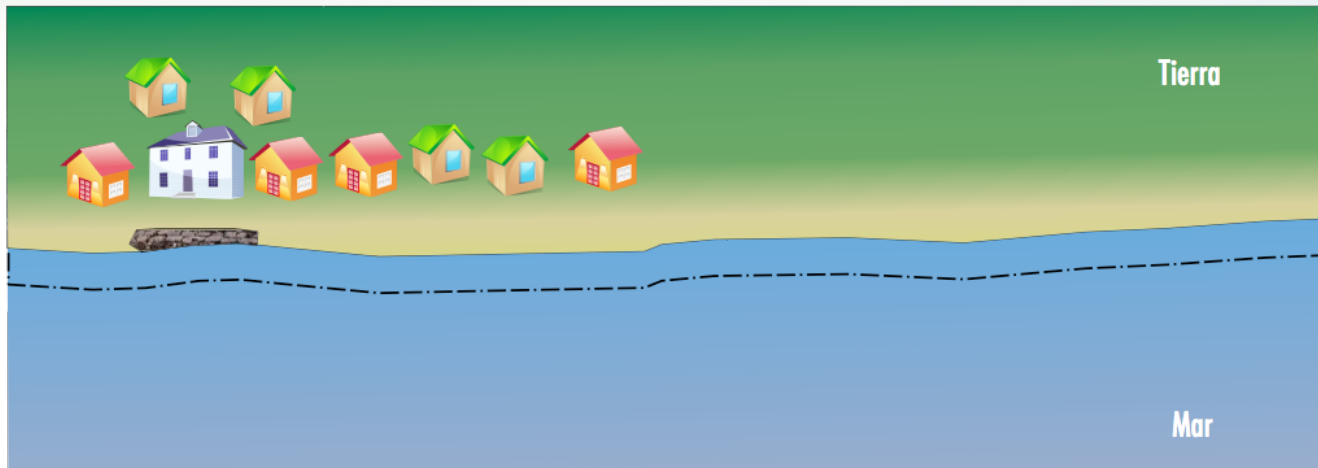
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



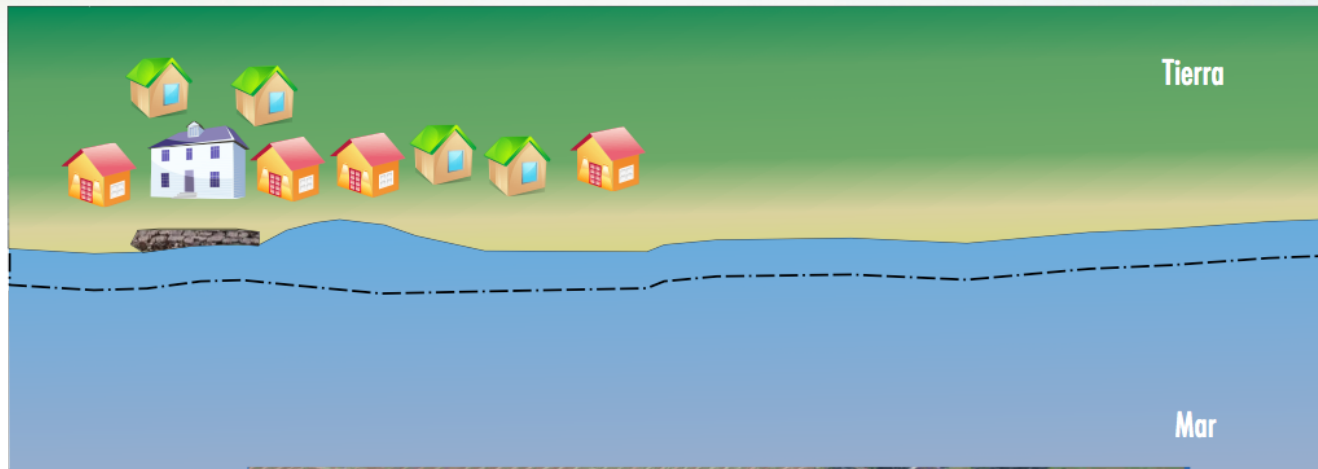
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



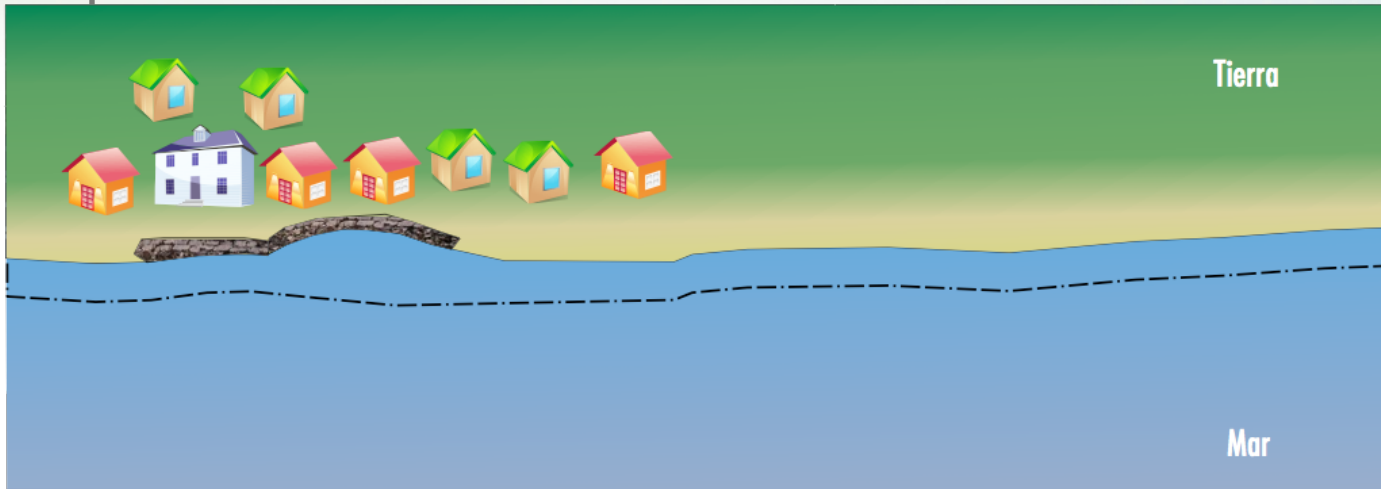
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 7. Interpretación física



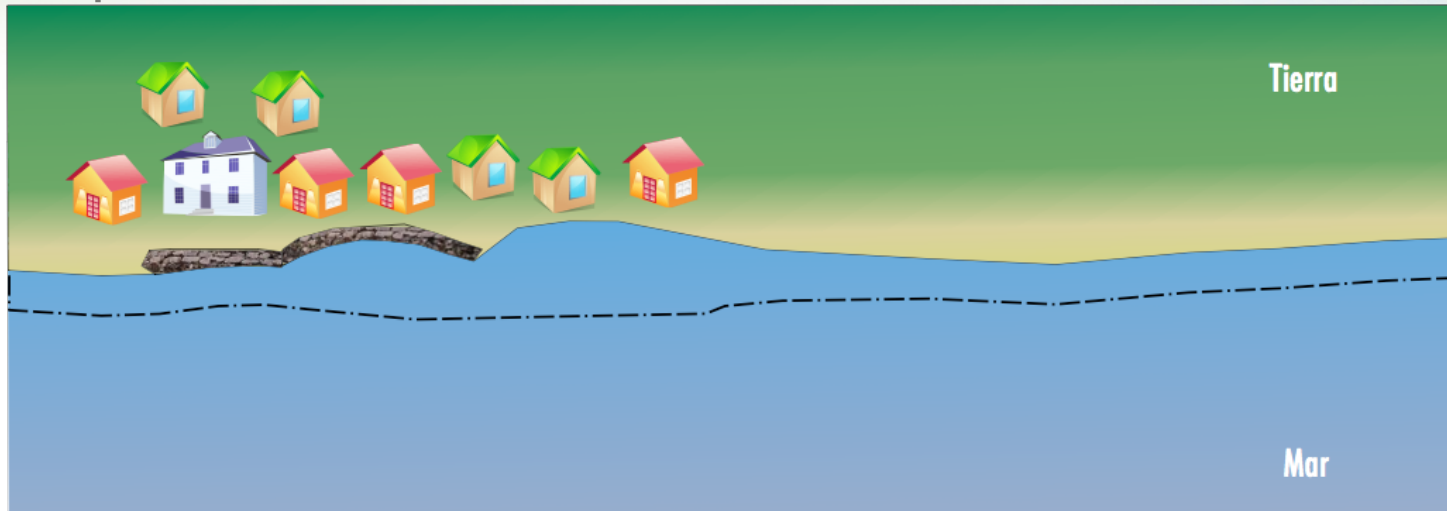
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 7. Interpretación física



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

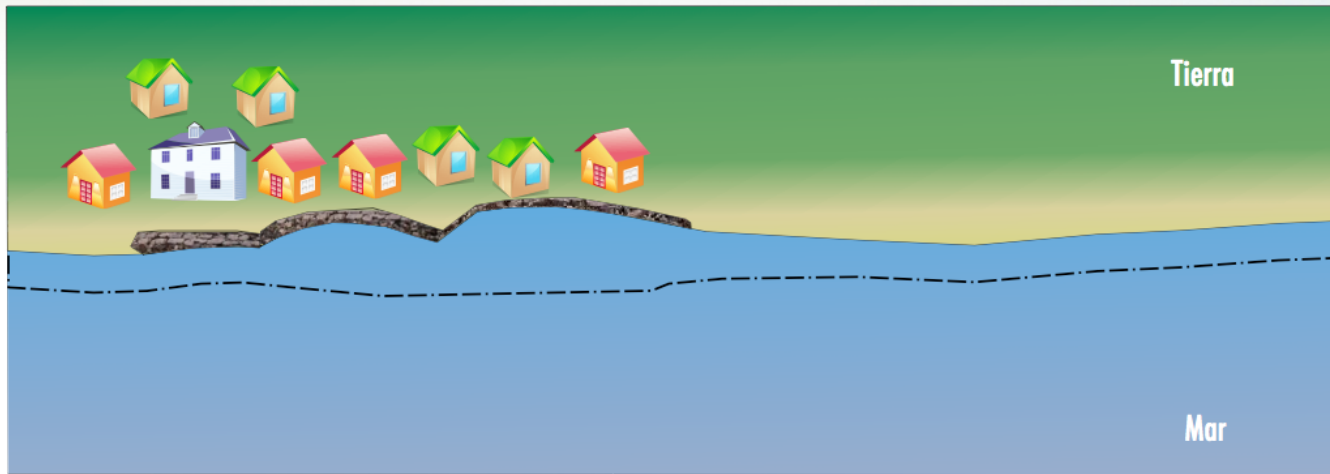
#### 7. Interpretación física





### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

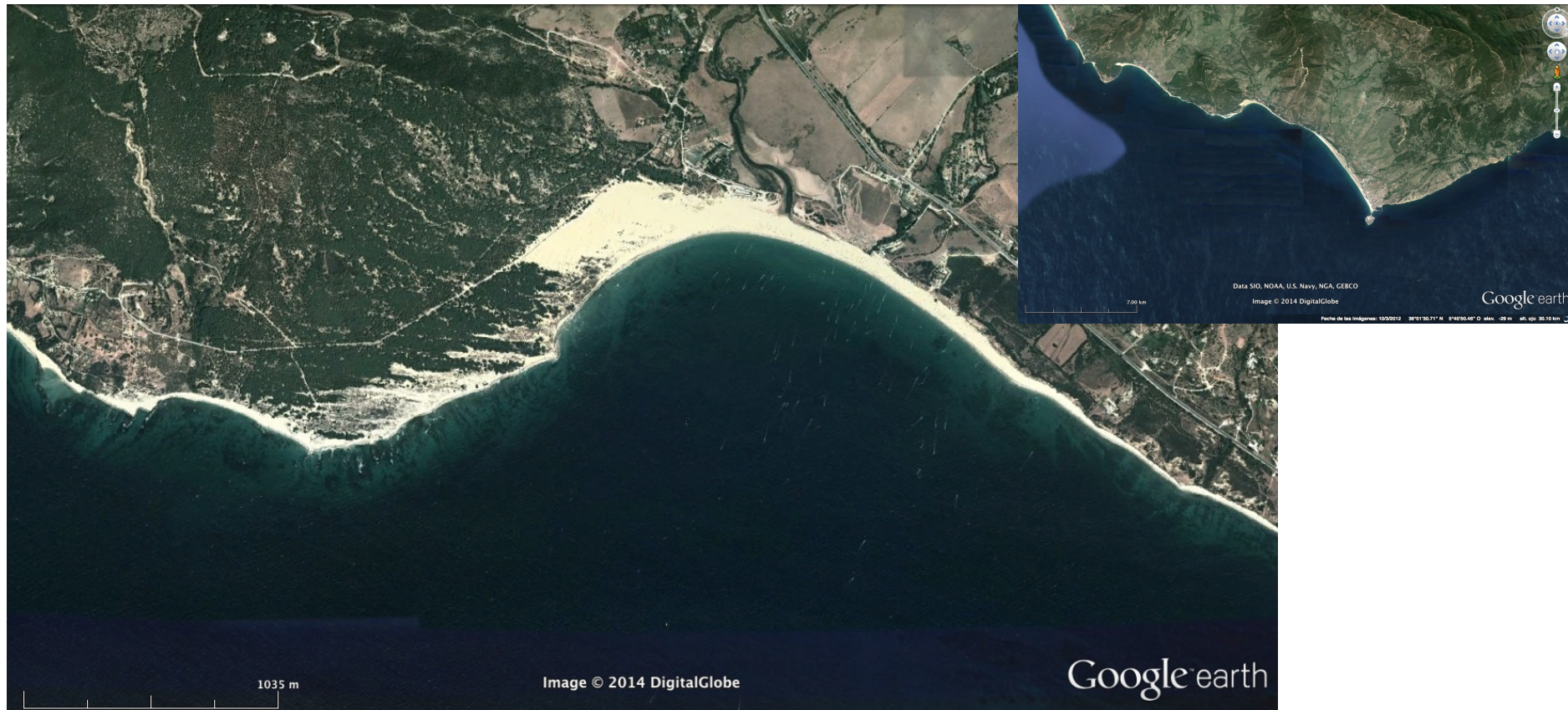
#### 7. Interpretación física



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

### 8. Otras aplicaciones

#### **Análisis del origen de la arena de la duna de Valdevaqueros (Cádiz)**

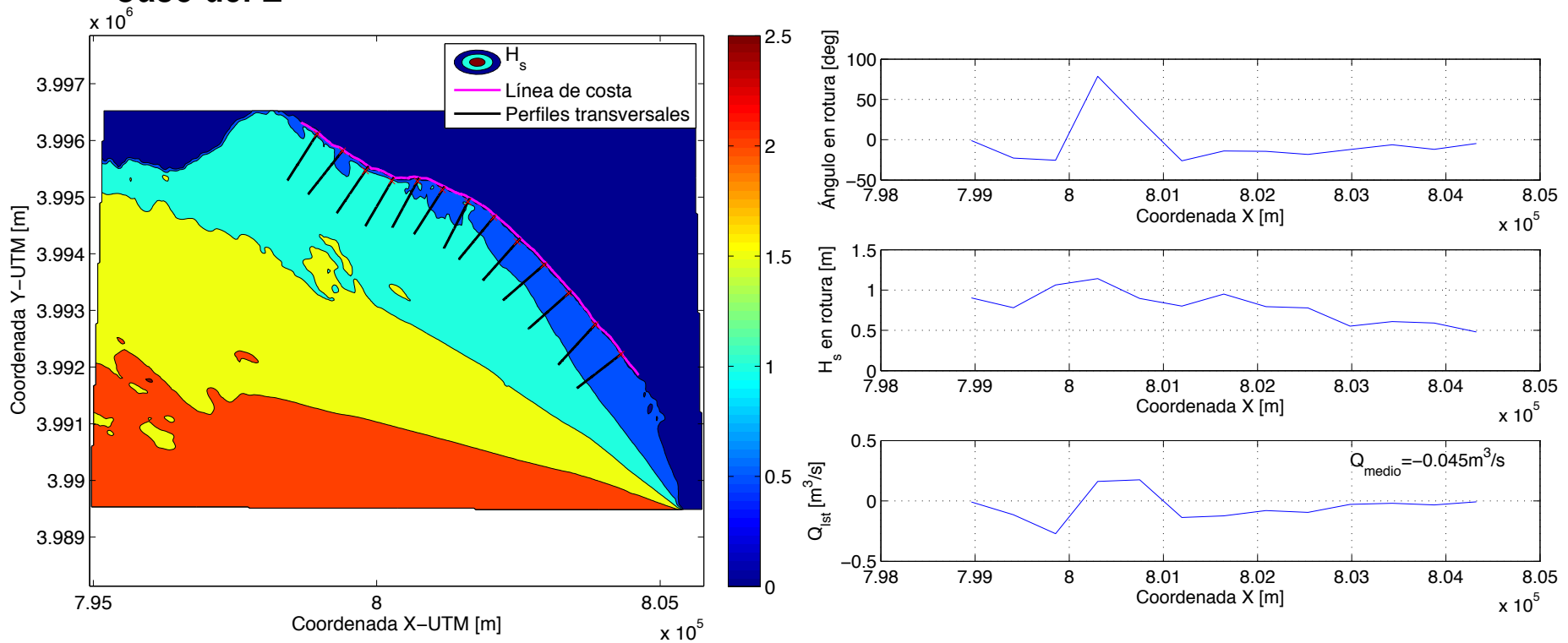


# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 8. Otras aplicaciones

### Análisis del origen de la arena de la duna de Valdevaqueros (Cádiz)

#### Caso del E

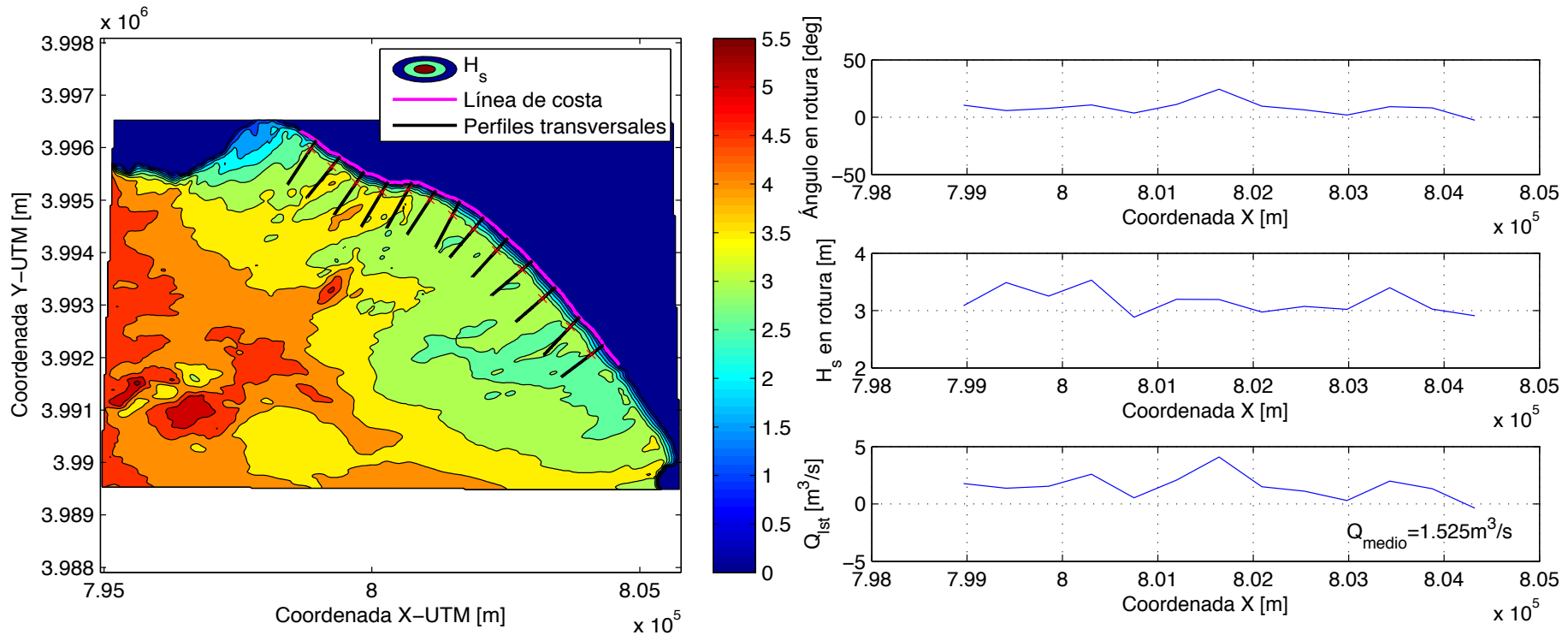


# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 8. Otras aplicaciones

### Análisis del origen de la arena de la duna de Valdevaqueros (Cádiz)

#### Caso del W



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

### 8. Otras aplicaciones

#### Análisis del origen de la arena de la duna de Valdevaqueros (Cádiz)



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

##### **“Modelo sencillo para la predicción de la posición de la línea de costa”**

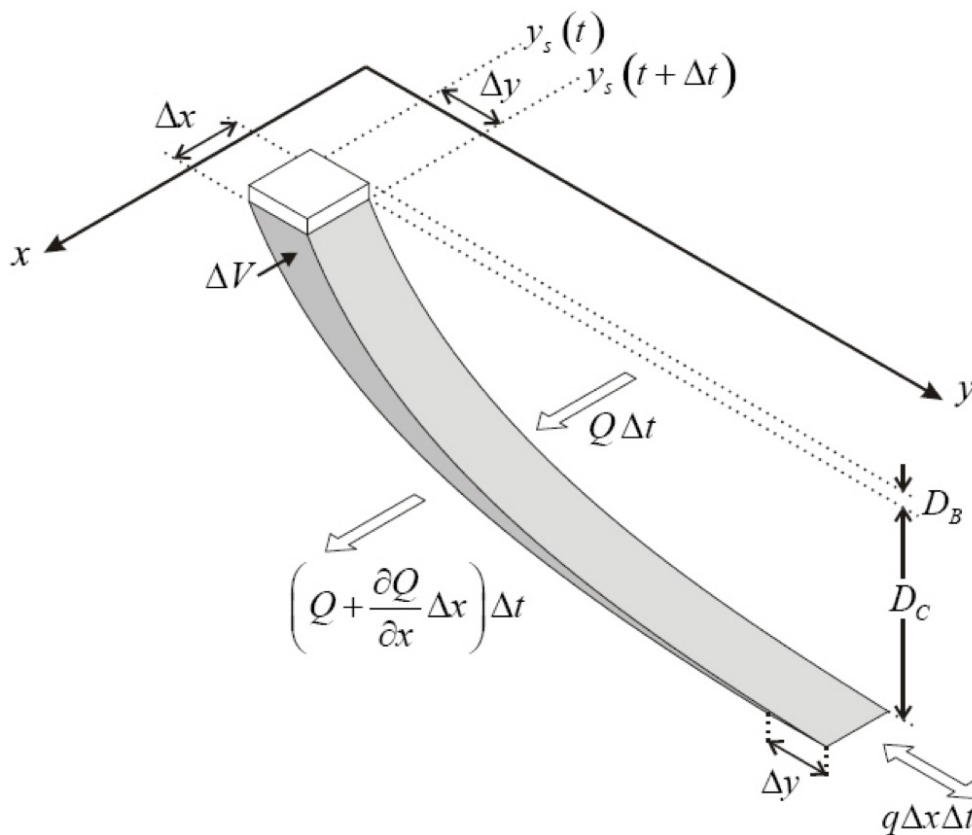
- Escala temporal: meses a decenas de años.
- Escala espacial: decenas de metros a kilómetros.

Principales hipótesis:

- El perfil de playa está en equilibrio (siguiente clase)
- Este perfil se mueve solidario con la línea de costa sin deformarse
- Las variaciones en la línea de costa son suaves
- Los cambios de posición de la costa se deben fundamentalmente al transporte longitudinal de sedimentos

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (I): modelos de una línea



Haciendo un balance de masa, la ecuación del modelo queda:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

donde  $D_c$  es la profundidad de cierre e  $y$  es la posición de la costa.

Si se usa la fórmula del CERC para  $Q$ :

$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

donde  $G$  es la difusividad

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

Algunas soluciones analíticas:

- Solución estacionaria:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad \rightarrow \quad y(x) = ax + b.$$

*Cualquier línea de costa que tenga una forma rectilínea se encuentra en equilibrio con el oleaje incidente no porque no se produzca transporte de sedimentos, sino porque la cantidad de material que se transporta es uniforme (la cantidad de material que entra en una sección es la misma que la que sale).*

#### Equilibrio dinámico

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \rightarrow Q = \text{cte}$$



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

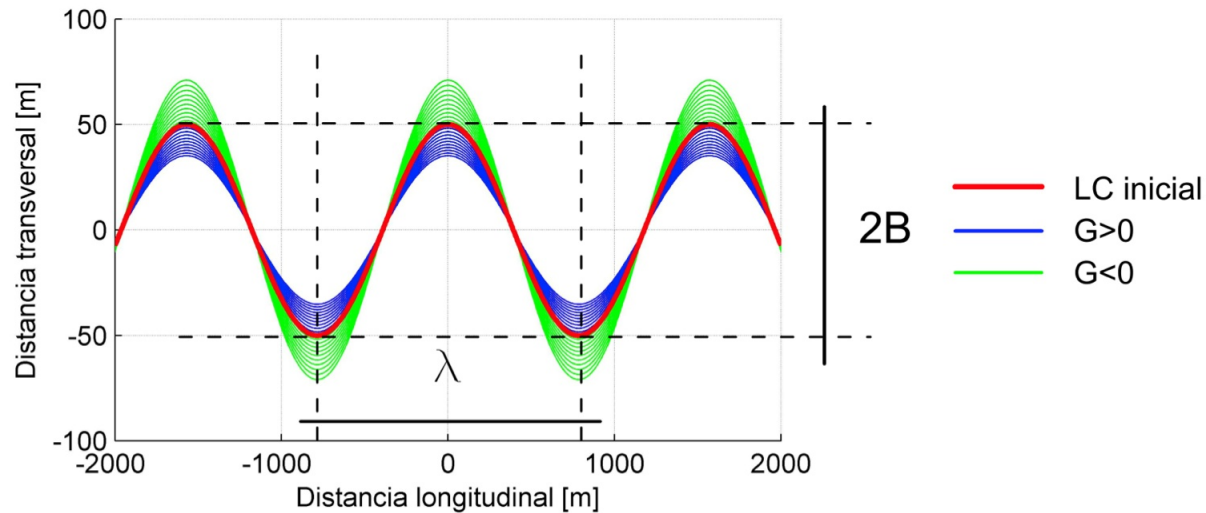
## 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

Algunas soluciones analíticas:

- Playa periódica:

Condición inicial:  $y(x, 0) = B \cos \lambda x$

Solución:  $y(x, t) = B e^{-G\lambda^2 t} \cos \lambda x$



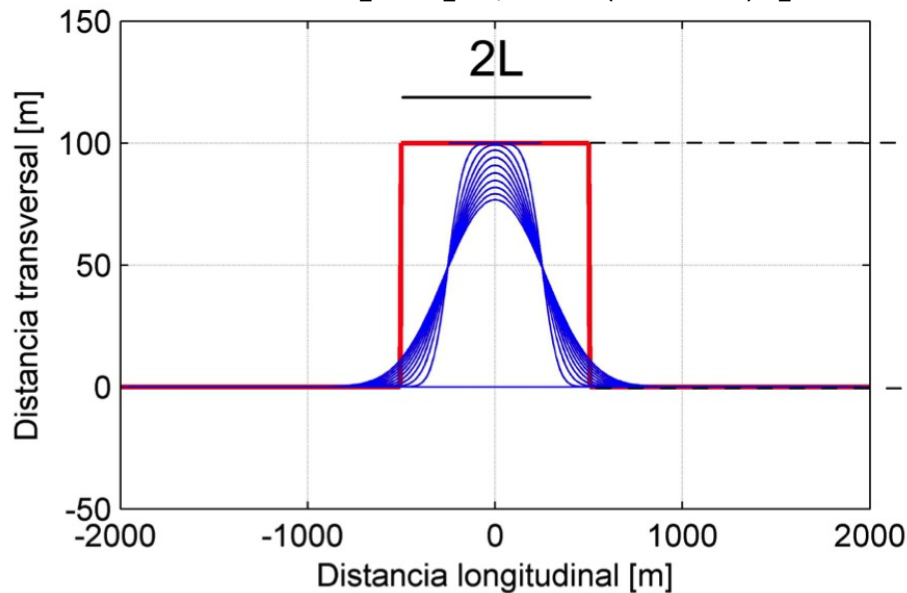
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

Algunas soluciones analíticas:

- Relleno rectangular:

Solución: 
$$y(x, t) = \frac{Y}{2} \left[ \operatorname{erf} \left[ \frac{l}{4\sqrt{Gt}} \left( \frac{2x}{l} + 1 \right) \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{l}{4\sqrt{Gt}} \left( \frac{2x}{l} - 1 \right) \right] \right]$$



Y

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$$

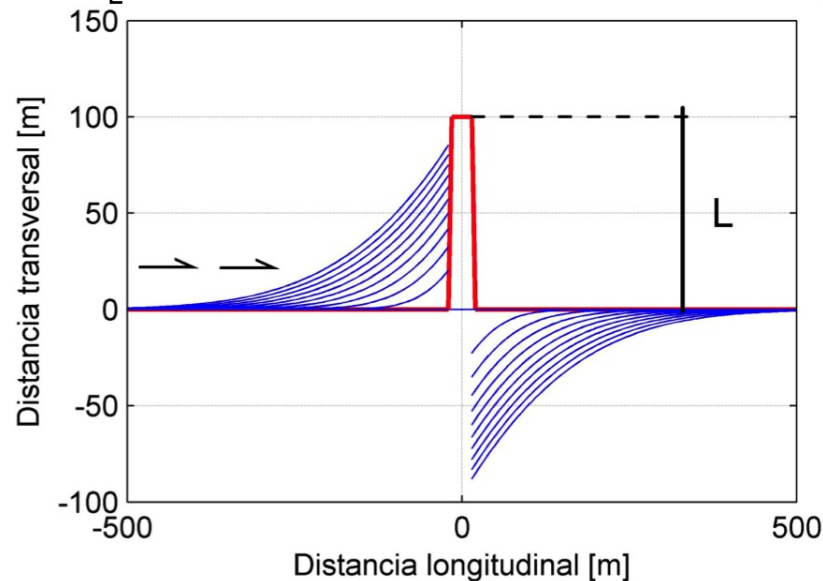
### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

Algunas soluciones analíticas:

- Barrera litoral:

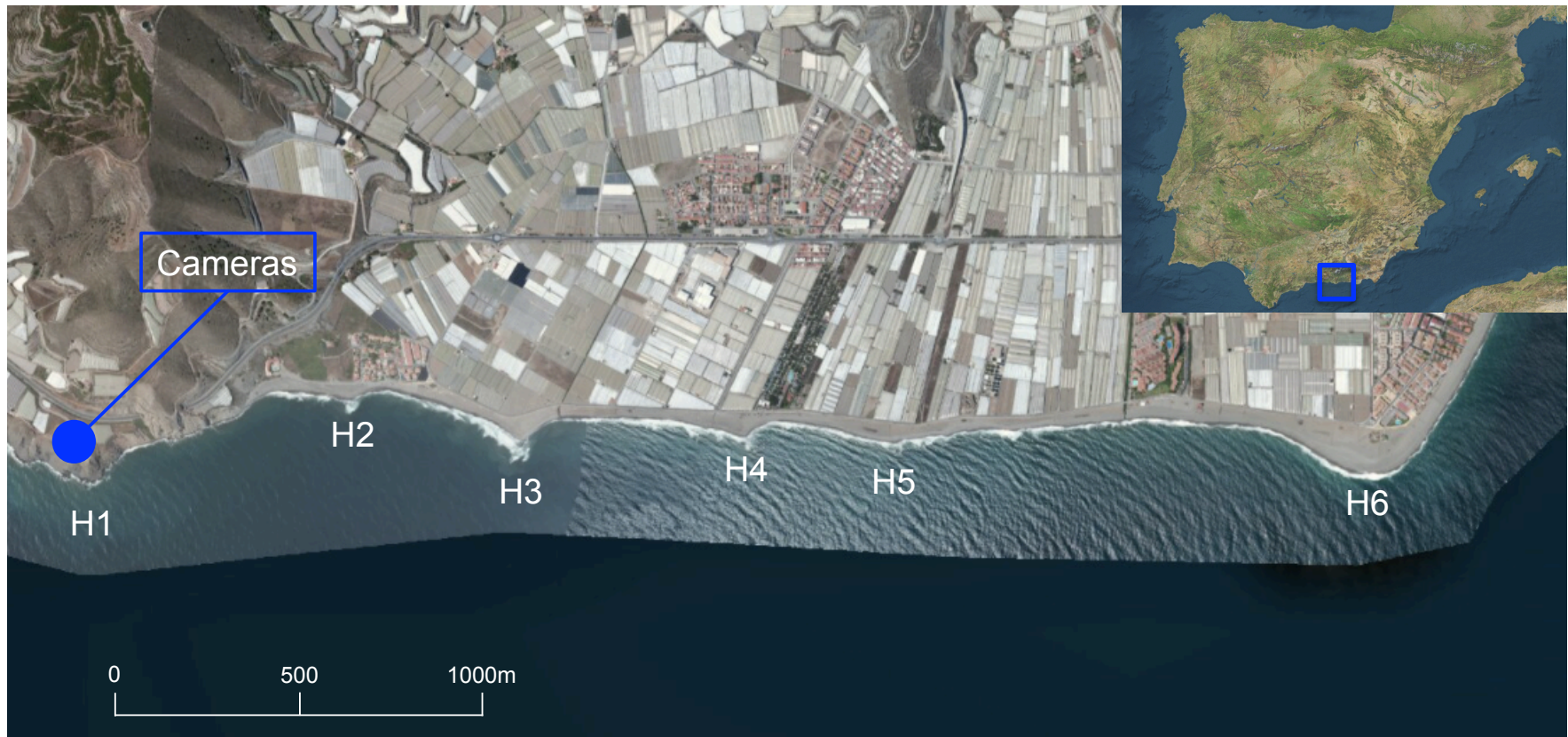
Solución: 
$$y(x, t) = \pm \left[ \sqrt{\frac{4Gt}{\pi}} e^{-x^2/(4Gt)} - |x| \operatorname{erfc} \left( |x|/\sqrt{4Gt} \right) \right] \tan \alpha_b$$



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

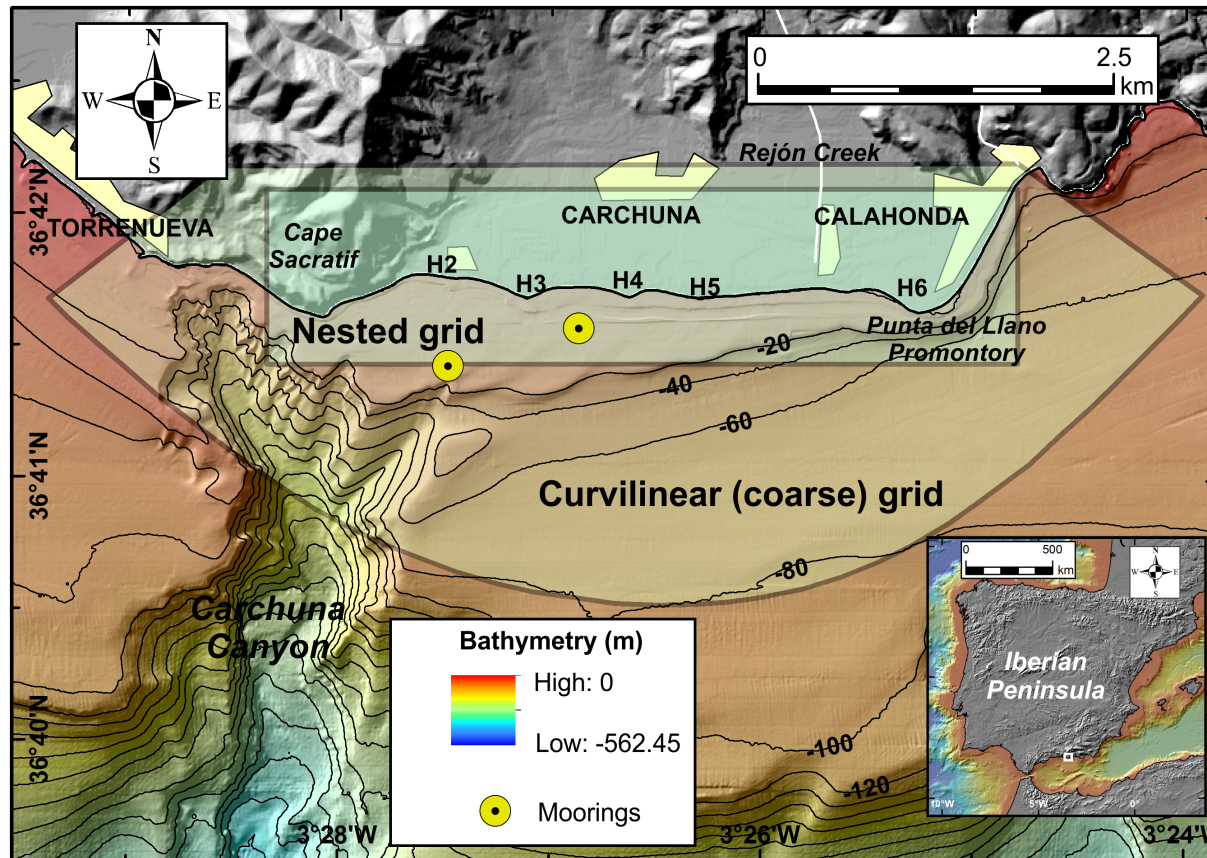
Una aplicación numérica: sistema punta-bahía de la playa de Carchuna (Granada)



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

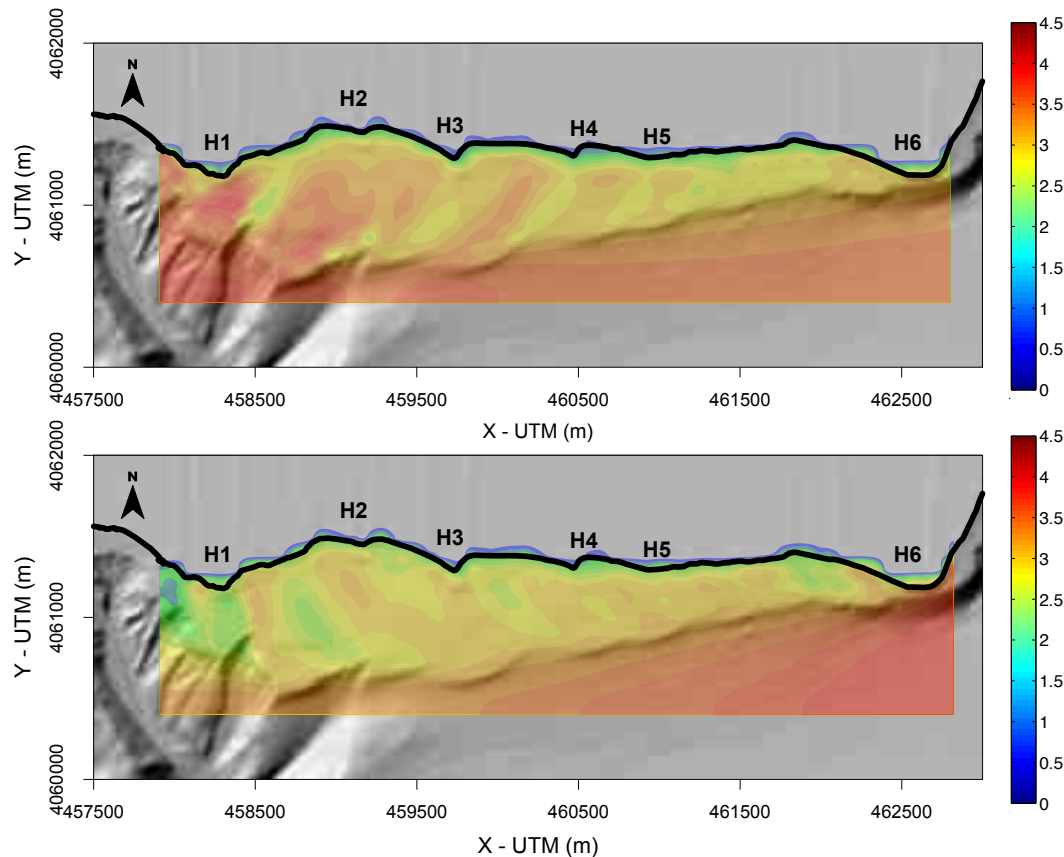
Una aplicación numérica: sistema punta-bahía de la playa de Carchuna (Granada)



# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

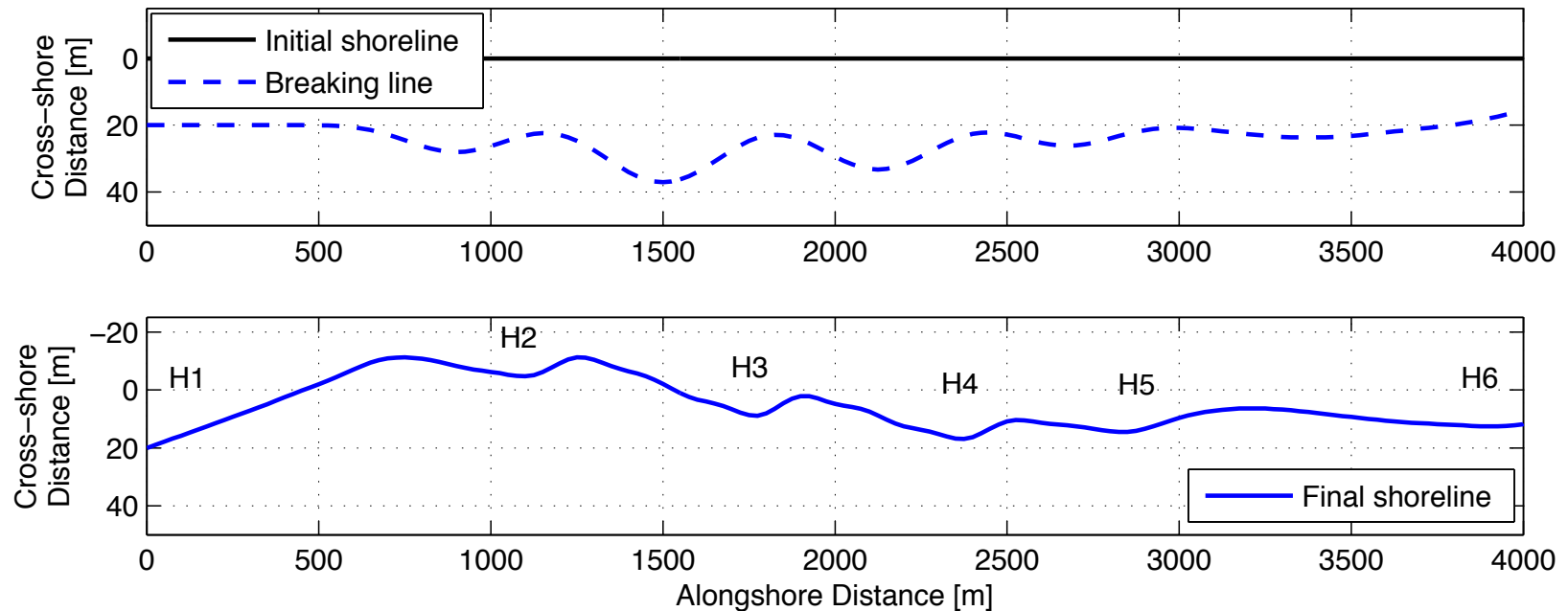
Una aplicación numérica: sistema punta-bahía de la playa de Carchuna (Granada)

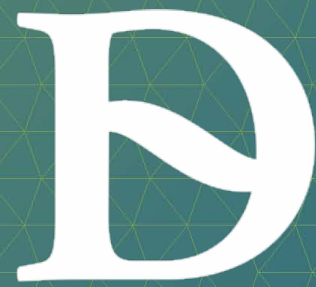


# 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (I): modelos de una línea

Una aplicación numérica: sistema punta-bahía de la playa de Carchuna (Granada)



A large, white, stylized letter 'D' logo. The letter has a thick, rounded top and a curved bottom, with a white, curved shape inside that resembles a stylized 'B' or a leaf. The background is a dark blue-green color with a light green grid pattern.

# Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA



# Procesos Costeros y Herramientas Básicas

Gestión Integral de Puertos y Costas  
Curso 2013-2014

Grado en Ingeniería Civil  
Especialidad de Transporte y Servicios Urbanos

Alejandro López Ruiz  
alopezruiz@ugr.es



## Índice

1. Oleaje
2. Variaciones de nivel
3. Transporte de sedimentos y forma en planta
4. Perfil de playa y regeneraciones

3

# Transporte de sedimentos y forma en planta



Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

### Playa encajada:

*“Su forma en planta y perfil se encuentran confinadas lateralmente por contornos impermeables naturales o artificiales y el fondo cubierto en su mayor parte por arena.”*

**Hipótesis:** las corrientes longitudinales, motor fundamental del transporte de sedimentos, se deben principalmente a la oblicuidad del oleaje con respecto a la orientación de la playa en la zona de rompientes y a la existencia de un gradiente longitudinal de altura de ola.

Si las playas encajadas son muy extensas, se disipa el efecto de los contornos y pasan casi a comportarse como playas rectas. Por ello, sus extensiones suelen ser de **cientos de metros** hasta como mucho **pocos kilómetros**

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### Ejemplos:



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### Ejemplos:



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### Ejemplos:



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### Ejemplos:





### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### **Equilibrio:**

*Se define como el estado morfodinámico que alcanza una playa en planta y perfil bajo la acción del oleaje incidente, constante en el tiempo, actuando sobre una geometría de playa inicial. Se alcanza ese estado cuando no cambia la forma en planta ni el perfil.*

**Eq. estático:** aquél que se alcanza cuando la forma de la playa permanece constante en el tiempo y el transporte litoral es nulo.

**Eq. dinámico:** aquél que se alcanza cuando la forma de la playa no varía bajo la presencia de transporte longitudinal de arena sin cambio en el volumen global de arena dentro de la playa.

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

- Existen varios modelos para predecir la forma en planta de playas encajadas en equilibrio.
- En este curso vamos a estudiar el modelo de González y Medina (2001).
- Este método supone que la playa adquiere una forma de espiral logarítmica.

### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

##### Situación inicial:

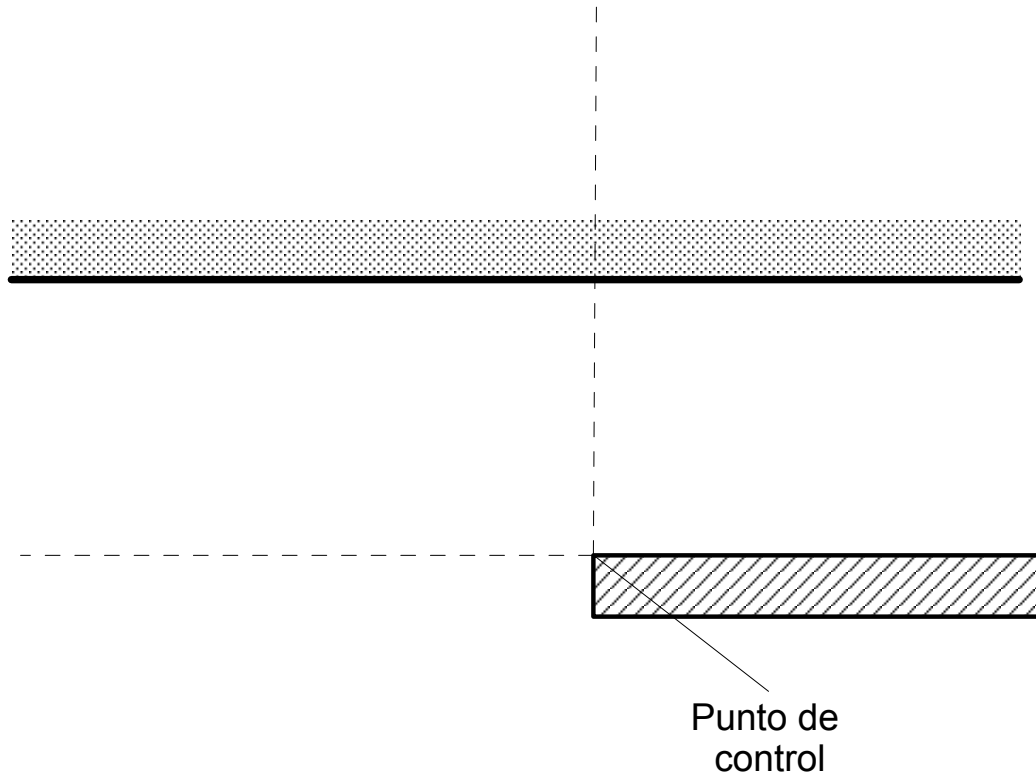
- Se construye un dique exento en una playa de alineación recta.
- Objetivo: conocer la forma que tendrá la playa cuando alcance el equilibrio.
- Para ello aplicaremos la metodología paso a paso.



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

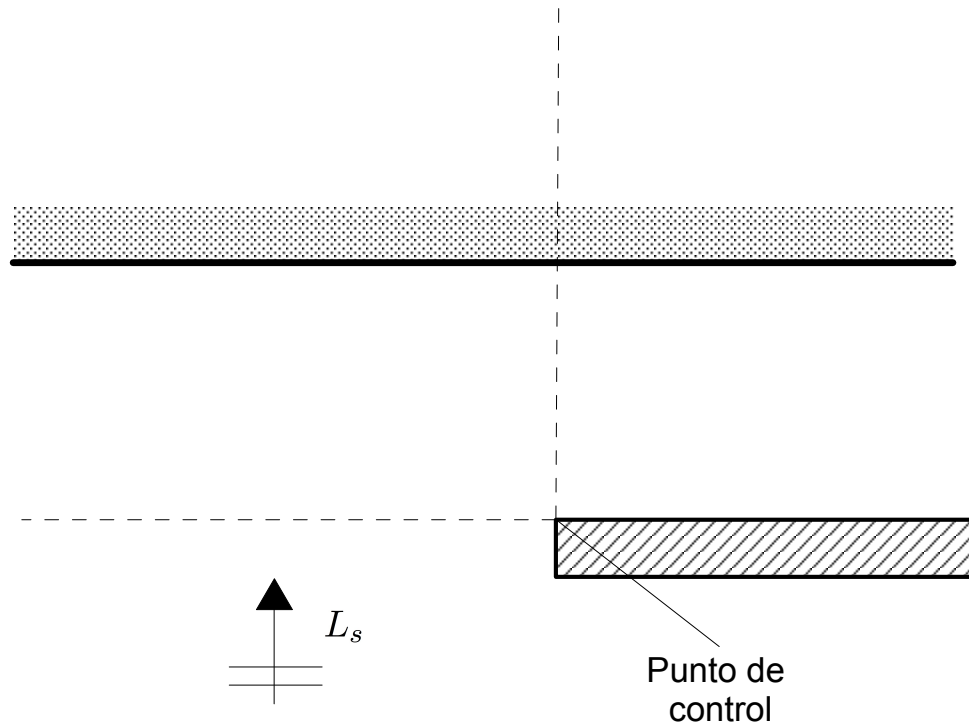
1. Identificación del punto de control: punto a partir del cual se produce la difracción



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

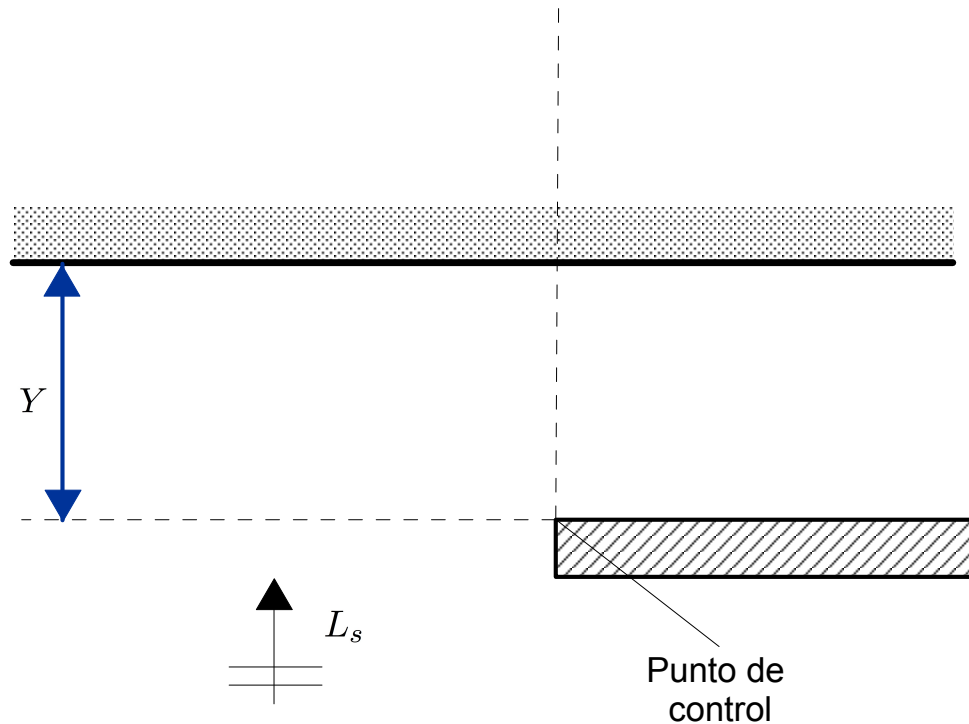
2. Definición del oleaje medio:  $H_{s,12}$ ,  $T_{s,12}$ ,  $h_{pc}$  →  $L_s$



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

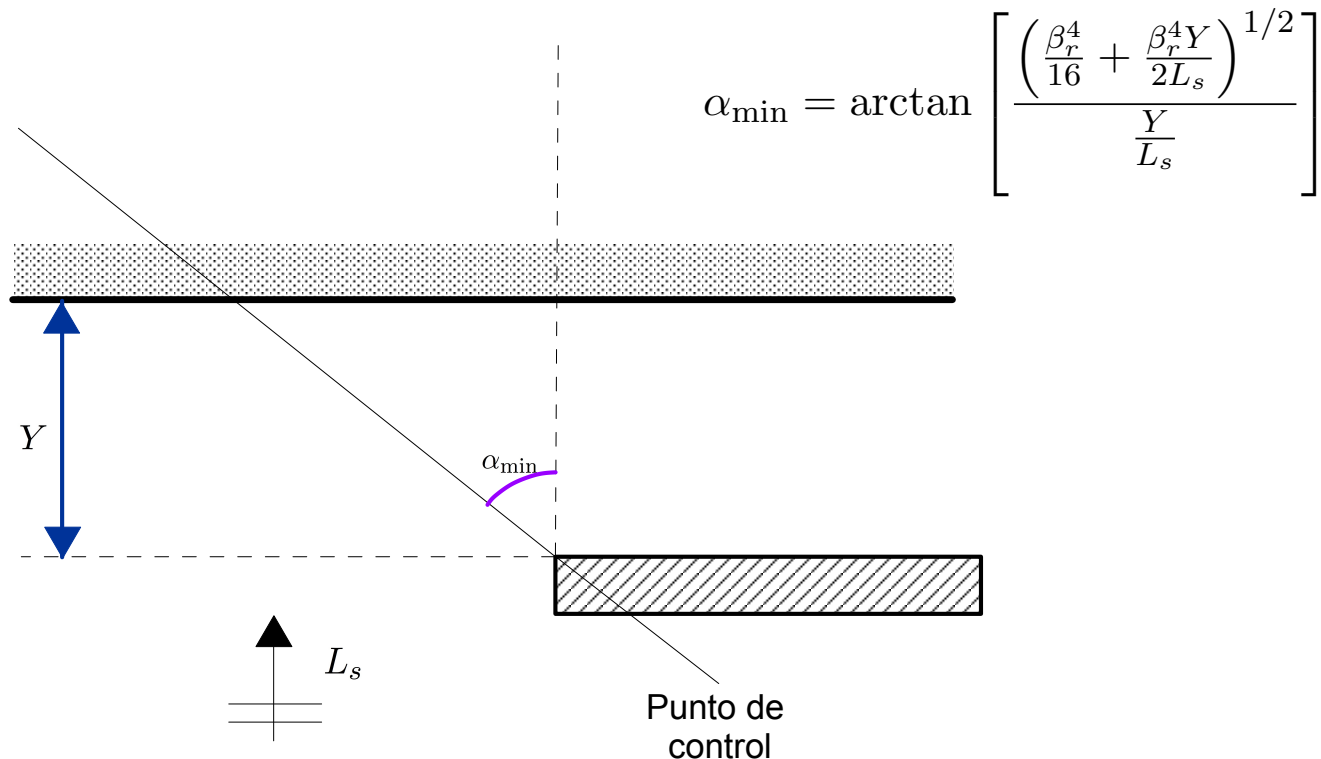
##### 3. Distancia entre la alineación de la costa inicial y el punto de difracción



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

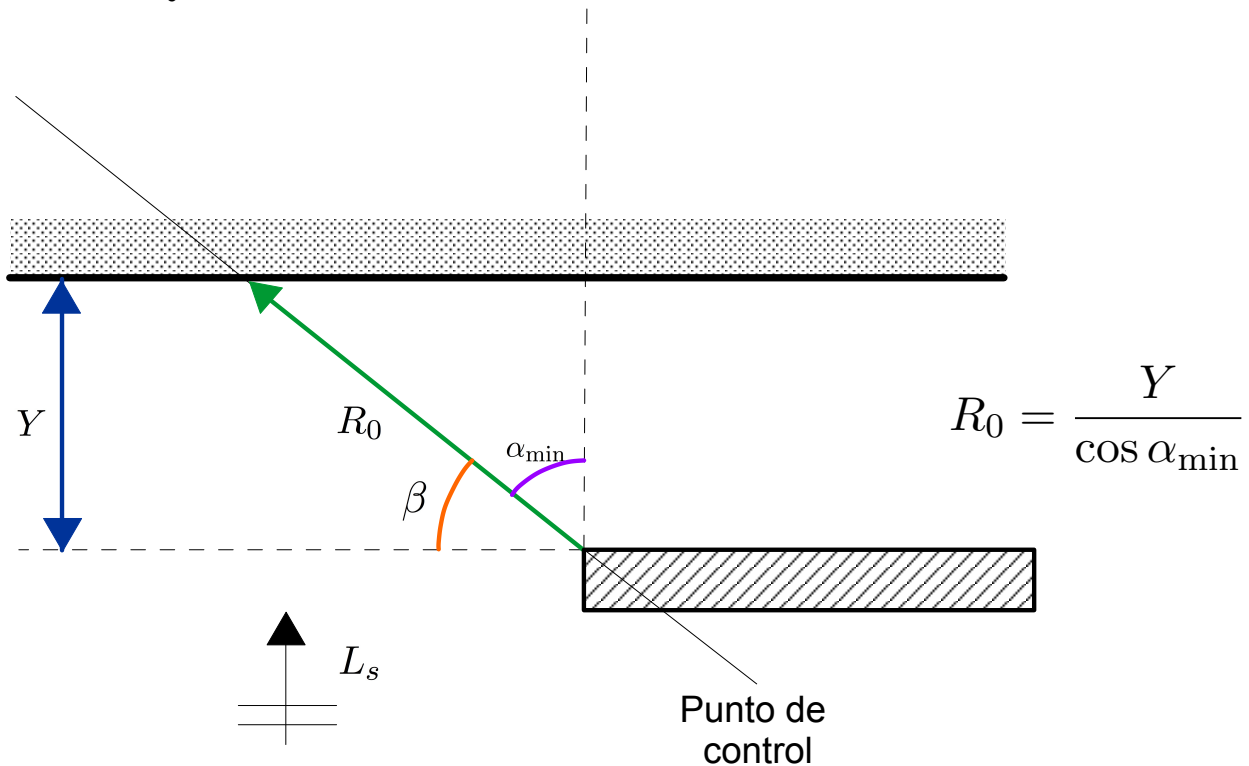
4. Cálculo del ángulo  $\alpha_{\min}$  utilizando el valor de  $L_s$  y  $\beta_r=2,13$



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

5. Cálculo de la distancia entre el punto de control y la intersección entre la línea de costa de equilibrio y la inicial  $R_0$

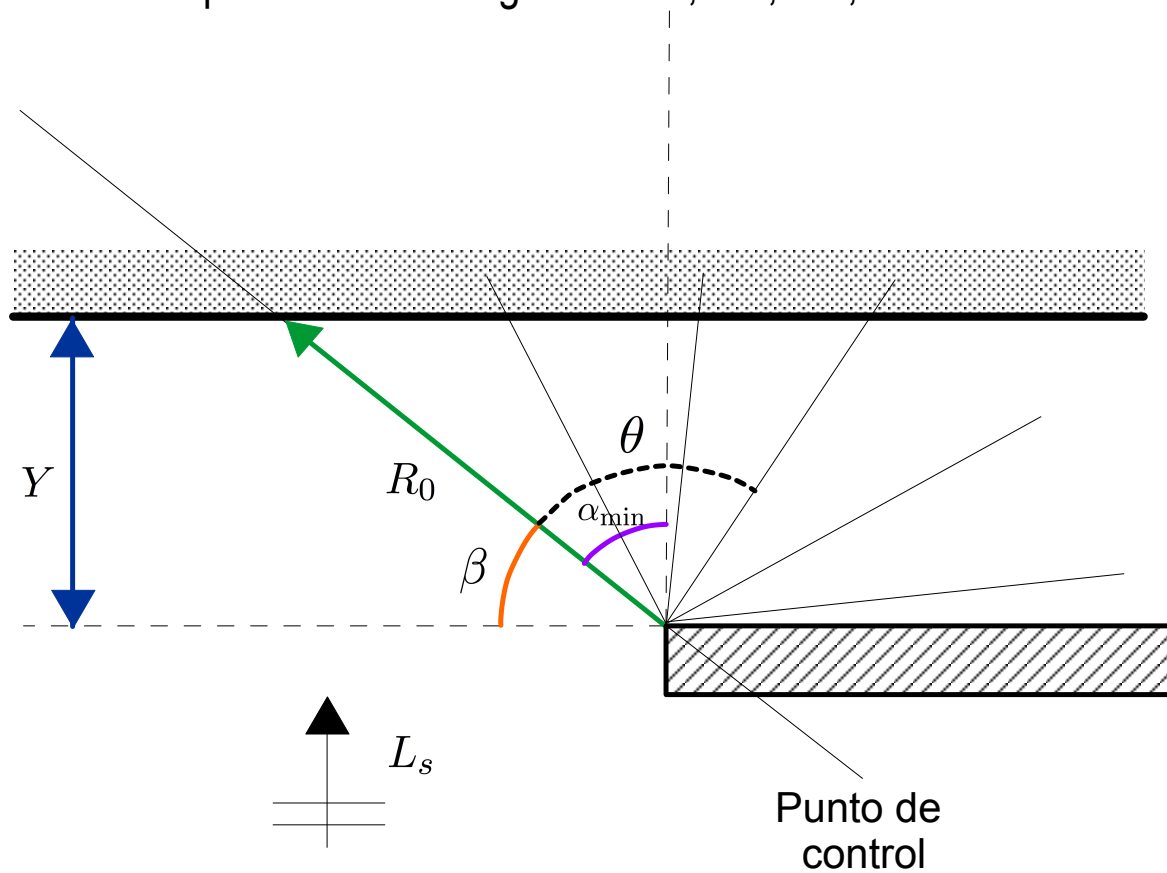




### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

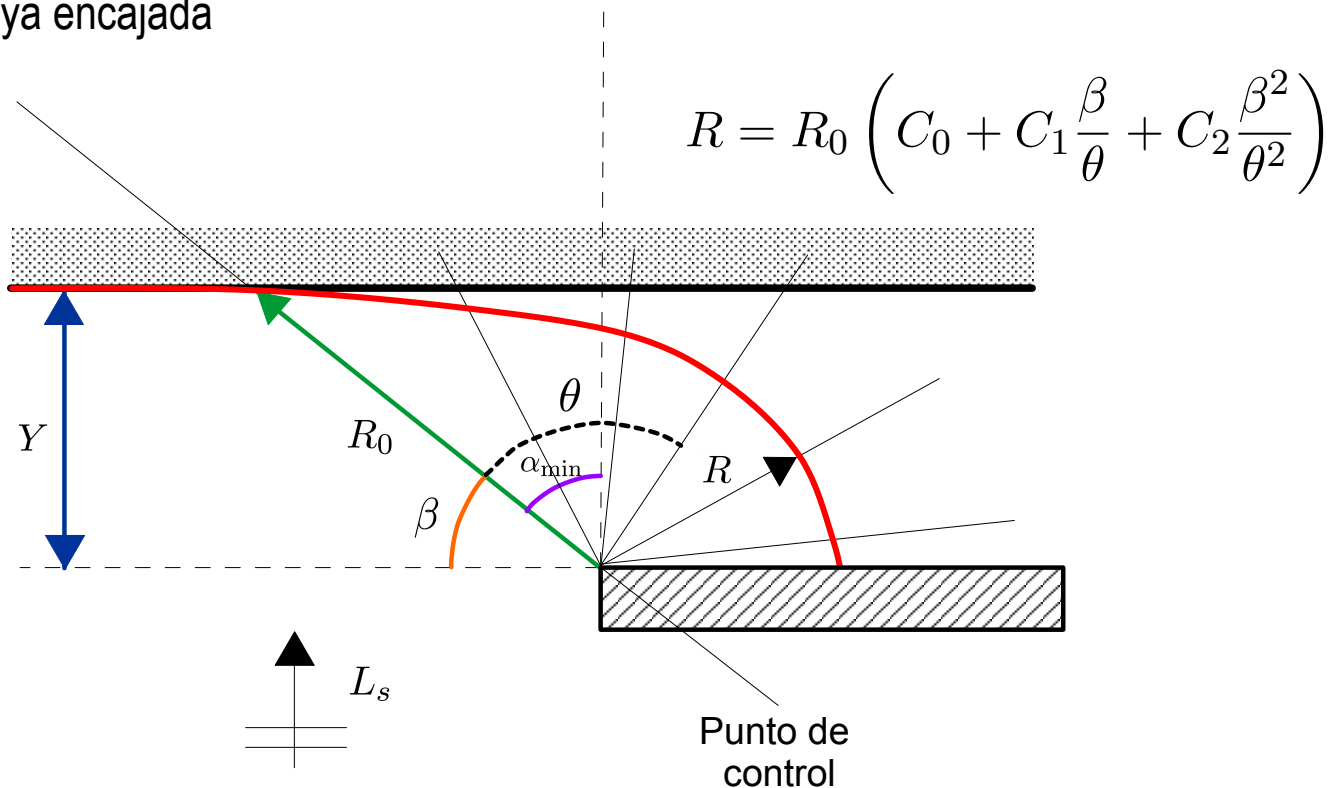
6. Definición de rectas que formen un ángulo  $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, \dots$



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

#### 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

7. Obtención del valor del radio de la curva  $R$  para cada valor de  $\theta$  y trazado de la línea de costa de la playa encajada



### 3. Transporte de sedimentos y forma en planta

## 9. Forma en planta (II): playas en equilibrio

Valores de las constantes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$

TABLA 3.1

$\beta^\circ$	Coeficientes			Valores de $R/R_0$ para $\theta^\circ =$							
	$C_0$	$C_1$	$C_2$	30	45	60	75	90	120	150	180
20	0.054	1.040	-0.094	0.705	0.497	0.39	0.324	0.280	0.225	0.191	0.168
22	0.054	1.053	-0.109	0.768	0.543	0.426	0.354	0.305	0.244	0.206	0.181
24	0.054	1.069	-0.125	0.829	0.588	0.461	0.383	0.330	0.263	0.222	0.194
26	0.052	1.088	-0.144	0.887	0.633	0.497	0.412	0.355	0.281	0.237	0.207
28	0.050	1.110	-0.164	0.944	0.677	0.532	0.442	0.379	0.300	0.251	0.219
30	0.046	1.136	-0.186	1.000	0.721	0.568	0.471	0.404	0.319	0.266	0.230
32	0.041	1.166	-0.210		0.763	0.603	0.500	0.429	0.337	0.280	0.242
34	0.034	1.199	-0.237		0.805	0.638	0.529	0.453	0.355	0.294	0.252
36	0.026	1.236	-0.265		0.845	0.672	0.558	0.478	0.373	0.307	0.262
38	0.015	1.277	-0.296		0.883	0.706	0.586	0.502	0.390	0.320	0.272
40	0.003	1.322	-0.328		0.919	0.739	0.615	0.526	0.407	0.332	0.281
42	-0.011	1.370	-0.362		0.953	0.771	0.643	0.550	0.424	0.344	0.289
44	-0.027	1.422	-0.398		0.983	0.802	0.670	0.573	0.441	0.356	0.297
46	-0.045	1.478	-0.435			0.832	0.698	0.596	0.457	0.367	0.304
48	-0.066	1.537	-0.473			0.861	0.724	0.619	0.473	0.378	0.311
50	-0.088	1.598	-0.512			0.888	0.750	0.642	0.489	0.388	0.317
52	-0.112	1.662	-0.552			0.914	0.775	0.664	0.505	0.398	0.322
54	-0.138	1.729	-0.592			0.938	0.800	0.686	0.520	0.408	0.327
56	-0.166	1.797	-0.632			0.960	0.823	0.707	0.535	0.417	0.332
58	-0.196	1.866	-0.671			0.981	0.846	0.728	0.549	0.425	0.336
60	-0.227	1.936	-0.710			1.000	0.867	0.748	0.563	0.434	0.339
62	-0.260	2.006	-0.746				0.888	0.768	0.577	0.441	0.342
64	-0.295	2.076	-0.781				0.908	0.787	0.590	0.449	0.345
66	-0.331	2.145	-0.813				0.927	0.805	0.603	0.456	0.346
68	-0.368	2.212	-0.842				0.945	0.823	0.615	0.462	0.348
70	-0.405	2.276	-0.867				0.963	0.840	0.627	0.468	0.349
72	-0.444	2.336	-0.888				0.981	0.857	0.638	0.473	0.349
74	-0.483	2.393	-0.903				1.000	0.874	0.649	0.478	0.348
76	-0.522	2.444	-0.912					0.891	0.660	0.482	0.347
78	-0.561	2.489	-0.915					0.909	0.670	0.486	0.346
80	-0.600	2.526	-0.910					0.927	0.680	0.489	0.343

4

# Perfil de playa y regeneraciones



Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA

## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 1. Perfil de equilibrio

#### **Perfil de equilibrio dinámico:**

*“Perfil medio que no se mueve en la dirección transversal.”*

El perfil de playa es capaz de soportar una cierta tasa de disipación de energía “crítica” sin modificarse:

- Si el oleaje que llega al perfil contiene un flujo de energía menor que esa disipación crítica no se producen cambios en el perfil.
- Si el flujo de energía es mayor, el perfil variará su forma tendiendo a adquirir una configuración en la que disipe más energía.

## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 1. Perfil de equilibrio

Matemáticamente:

$$h(x) = Ax^{2/3}$$

Donde  $x$  es la distancia a la costa y  $A$  se define como **factor de escala** y depende fundamentalmente del tamaño del sedimento y el oleaje.

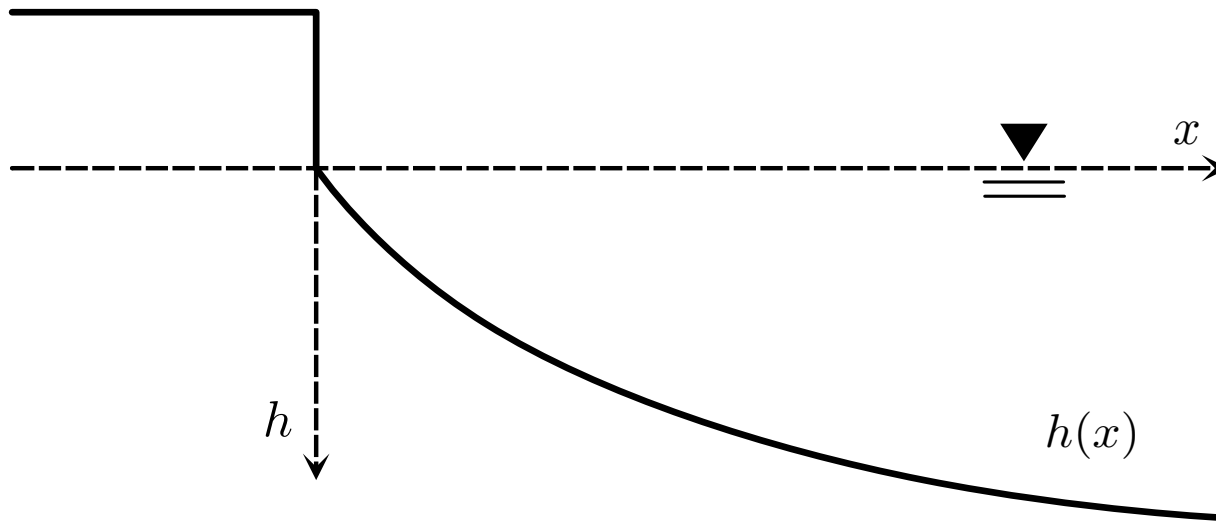
Este perfil llega a una profundidad máxima llamada **profundidad de cierre**:

$$h_* = 1,57H_{s,12}$$

donde  $H_{s,12}$  es la  $H_s$  superada sólo 12 horas al año.

## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 1. Perfil de equilibrio

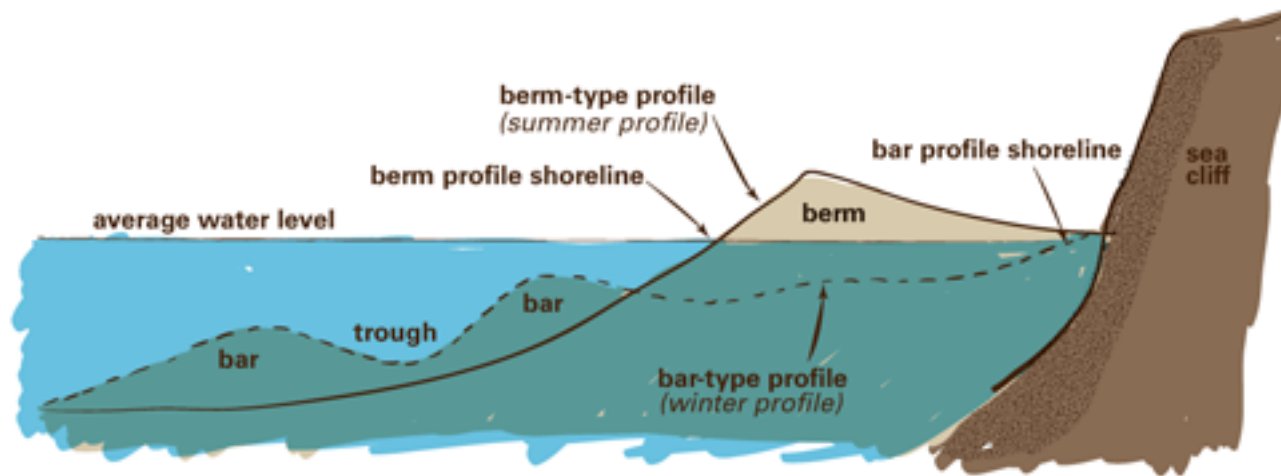


## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 2. Perfil de invierno y de verano

Ya que el perfil depende de la cantidad de energía que es capaz de disipar, su forma varía de invierno a verano:

- **Invierno:** más tendido y con presencia de barras
- **Verano:** más pendiente, puede tener berma





## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 3. Regla de Bruun

Estudio de la respuesta media de la playa a una subida del nivel medio del mar

Bruun estudió este problema utilizando el concepto de **perfil de equilibrio**.

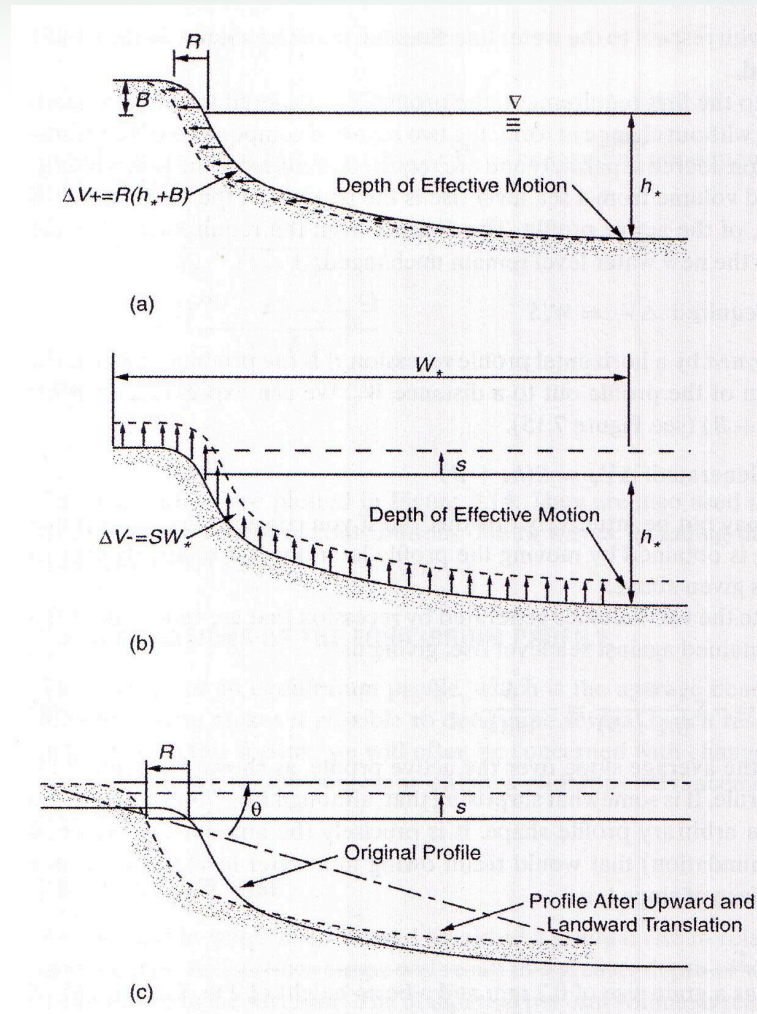
La hipótesis básica es que el *volumen que hace falta para mantener la forma del perfil después de una subida del nivel de mar  $S$  es el mismo que se pierde por el hecho de tener un retroceso de playa  $R$* .

$$R = \frac{S}{\tan \theta}$$

Siendo  $\theta$  la pendiente media del perfil activo.

# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 3. Regla de Bruun



# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

La regeneración de playas es un **aporte artificial de sedimento** con dos fines:

- Ganar playa seca en una zona que ha sufrido erosión, principalmente para uso recreativo.
- Proteger un tramo de costa frente al paso de temporales.

### Ventajas:

- Resultados inmediatos
- Más respetuosa con las zonas cercanas que la construcción de diques

### Inconvenientes:

- Vida útil reducida

# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

Durante esta vida útil, la regeneración pasa por distintas **fases**:

1. Se realiza la regeneración con una pendiente superior a la del perfil de equilibrio para las condiciones medias de la playa.
2. La pendiente disminuye y se acerca a la de equilibrio.
3. Se llega a la situación original.

Lo ideal es que las fases 1 y 2 duren mucho (normalmente unos 2 o 3 años). Para ello hay que calcular bien:

- El **material de aportación** a emplear, fundamentalmente su tamaño de grano.
- El **volumen de sedimento** a emplear.

# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

Para definir la regeneración se usa en **factor de escala del perfil** de:

- El sedimento nativo (el original de la playa):  $A_N$
- El sedimento de aportación:  $A_F$

**Table III-3-3**  
**Summary of Recommended A Values (Units of A Parameter are  $m^{1/3}$ )**

D(mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.084	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.153	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.161	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.167	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.173	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.179	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.185	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.194	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.198	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.202	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.206	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.210	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Notes:

(1) The A values above, some to four places, are not intended to suggest that they are known to that accuracy, but rather are presented for consistency and sensitivity tests of the effects of variation in grain size.

(2) As an example of use of the values in the table, the A value for a median sand size of 0.24 mm is:  $A = 0.112 m^{1/3}$ . To convert A values to feet<sup>1/3</sup> units, multiply by  $(3.28)^{1/3} = 1.49$ .

# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

Además se define el **factor de relleno**:

*“Número de  $m^3$  de aportación necesarios para que se retenga un  $m^3$  en la playa.”*

Este valor se mira en tablas y depende de la granulometría del material de aportación y el nativo.

Según la relación entre  $A_N$  y  $A_F$  se distinguen tres casos:

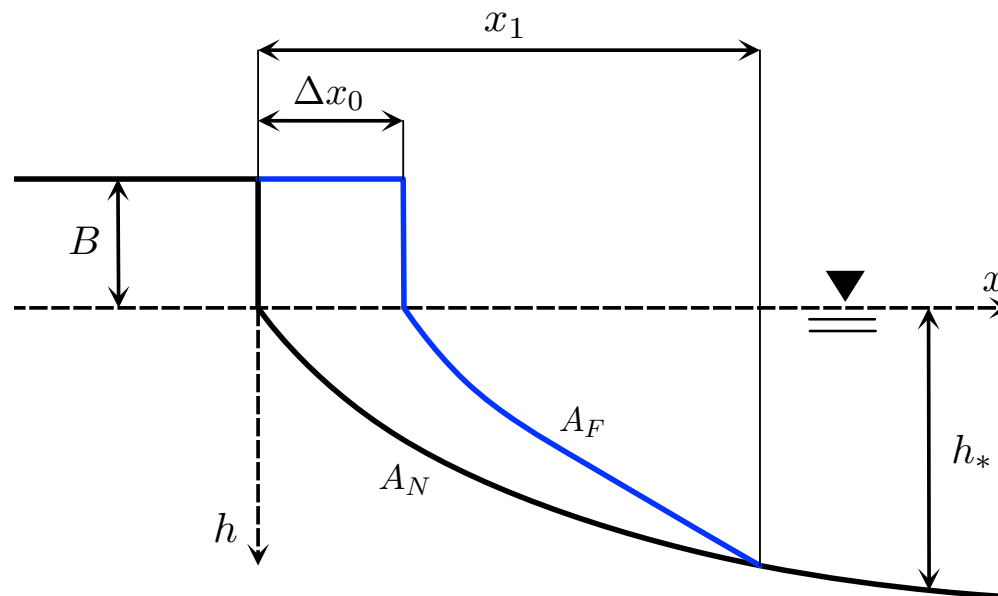
- Perfil con intersección
- Perfil sin intersección
- Perfil sumergido

# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

PERFIL CON INTERSECCIÓN ( $A_F > A_N$ )

El perfil que se adopta tras la regeneración es tal que el punto de **intersección** entre el perfil natural y el nuevo se produce **antes de la profundidad de cierre**. El resultado es una **ganancia significativa de playa seca**.



## 4. Perfil de playa y regeneraciones

### 4. Regeneraciones

PERFIL CON INTERSECCIÓN ( $A_F > A_N$ )

El **volumen de aportación** necesario para una ganancia de playa de  $\Delta x_0$ :

$$\text{Vol} = B\Delta x_0 + \left( \int_0^{x_1} A_N x^{2/3} dx - \int_{\Delta x_0}^{x_1} A_F x^{2/3} dx \right) = B\Delta x_0 + \frac{3}{5} A_N x_1^{5/3} - \frac{3}{5} A_F (x_1 - \Delta x_0)^{5/3}$$

Y el punto de intersección:

$$A_N x_1^{2/3} = A_F (x_1 - \Delta x_0)^{2/3} \Rightarrow x_1 = \frac{\Delta x_0}{1 - \left( \frac{A_N}{A_F} \right)^{3/2}}$$

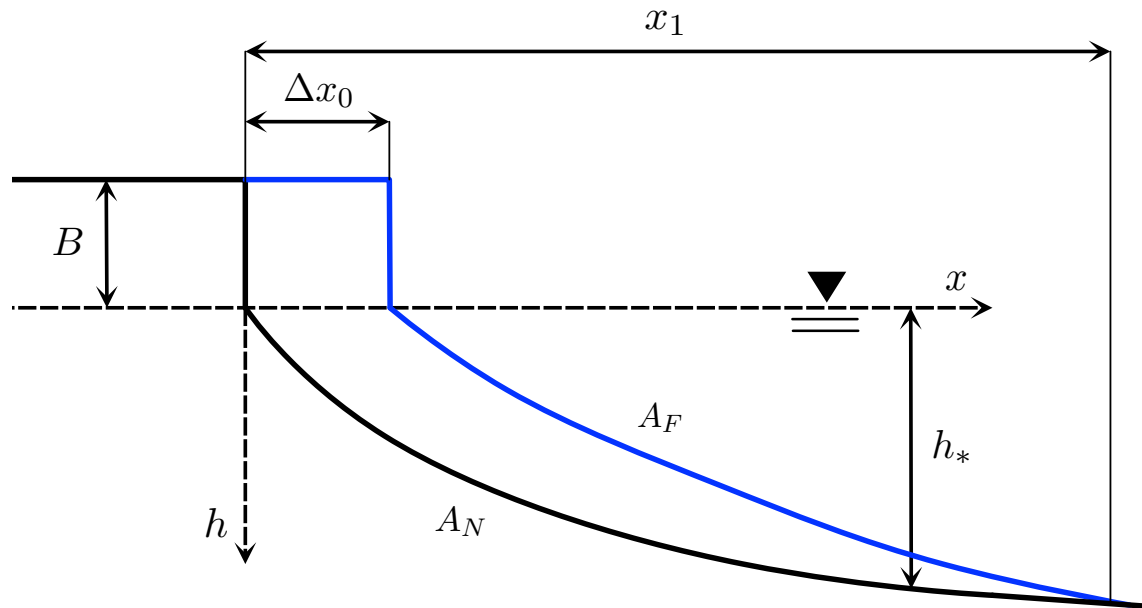


# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

PERFIL SIN INTERSECCIÓN ( $A_F \cong A_N$ )

La intersección se produce a una profundidad similar a la de cierre y la playa seca obtenida es menor, ya que gran parte del volumen vertido es necesario para rellenar el perfil con pendiente más tendida que el anterior.

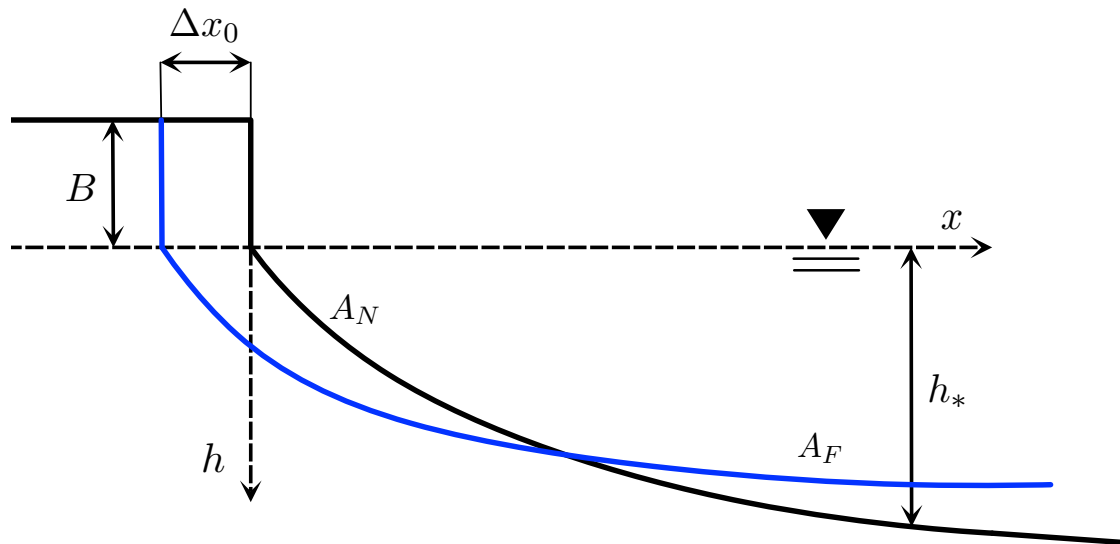


# 4. Perfil de playa y regeneraciones

## 4. Regeneraciones

PERFIL SUMERGIDO ( $A_F < A_N$ )

Se genera un perfil diferente, en tanto que se pierde playa seca y casi todo el material se dispone en la zona sumergida. La mayoría del volumen vertido se usa para formar un perfil con pendiente más tendida.



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

# Dinámica Ambiental

UNIVERSIDAD DE GRANADA