

TEMA 5: EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

José Santos López Gutiérrez

María Dolores Esteban Pérez

Vicente Negro Valdecantos

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

1 BALANCE SEDIMENTARIO. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

1.1 Introducción

Como paso previo a la definición del balance sedimentario de un tramo de costa conviene realizar un breve repaso de algunos conceptos relativos al transporte de sedimentos tanto en su escala espacial como temporal. En los apartados siguientes se recoge dicho repaso para finalmente describir los resultados del balance sedimentario. Por último, se enunciará la ecuación de continuidad que es el método por el cual se traduce las variaciones del transporte sólido longitudinal en movimiento en planta de la línea de orilla.

El tipo de costa sobre la que se analizan estos aspectos es aquella formada por depósitos de material no cohesivo, siendo los materiales más comunes las arenas y las gravas.

1.2 Zonas de movimiento: modos de transporte

1.2.1 Modos de transporte

Para el análisis de los procesos de movimiento de material no cohesivo por la acción de la rotura del oleaje en costas arenosas, primero se analiza el movimiento de las partículas de material como elementos discretos para finalizar con el análisis del conjunto de todas ellas. El esquema de la trayectoria de una partícula granular debido a las corrientes de rotura de oleaje oblicuo es según se muestra en la figura 1.

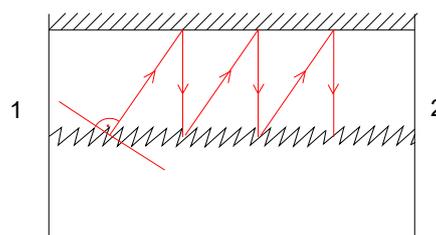


figura 1.- Esquema de la trayectoria de las partículas de arena

Si se considera el conjunto de partículas, se obtiene un volumen de material sedimentario moviéndose a lo largo de la playa y a su vez “barriendo” la zona activa de transporte (apartado 1.2.2).

Para simplificar los cálculos de transporte se opta por la descomposición de dichos movimientos en uno paralelo a la playa y otro perpendicular a la misma. El primero se denomina transporte longitudinal y el segundo transversal.

Otro factor a tener en cuenta es la escala temporal para los procesos de transporte. En el caso del transporte longitudinal la escala de tiempo es hiperanual. Esto determinará los movimientos de la línea de orilla a medio y largo plazo, tal y como se verá en apartados posteriores.

1.2.2 Zonificación del perfil. Límites de movimiento

Una vez vistos los modos de transporte que se verifican a lo largo de una playa, el siguiente paso es determinar las zonas dentro del perfil donde se mueven dichos volúmenes de sedimentos.

Para ello se puede optar por la descripción realizada por Hallermeier (1978). A partir del análisis batimétrico de cientos de perfiles deduce la existencia de tres zonas dentro del perfil de playa desde la línea de orilla hasta mar adentro y que son la primera de posibilidad real de movimiento del perfil, la siguiente de susceptibilidad de movimiento y la última de ausencia de movimiento. Estas tres zonas están delimitadas por la línea de orilla, la profundidad activa y la profundidad límite. Como resultado de este análisis, se obtienen unas fórmulas empíricas, tanto para la profundidad activa como para la límite, función de una altura de ola estadística cuyas expresiones son:

$$d_a = 2.28 H_{s\ 0.137} - 68.5 \frac{H_{s\ 0.137}^2}{g T_s^2}$$

$$d_l \cong 2 d_a$$

A partir de estas determinaciones se considera que el transporte longitudinal y el transversal se verifican en la zona de posibilidad real de movimiento (entre la línea de orilla y la profundidad activa), mientras que en la zona de susceptibilidad de movimiento (entre la profundidad activa y la límite) solamente se verifica el transporte sólido transversal, mientras que desde la profundidad límite ya no se produce movimiento del perfil por lo que se deduce que no existe transporte sólido en dicha zona.

Por tanto, la zona de interés para los procesos relacionados con los movimientos en planta de la orilla está entre la profundidad activa y la línea de orilla, en la cual se verifica el transporte sólido longitudinal.

1.3 Definición de balance sedimentario

Una vez hecho un repaso de los conceptos básicos relacionados con el transporte de sedimentos a lo largo de las costas arenosas, ahora es momento de describir el concepto de balance sedimentario del tramo de costa en estudio. Para ello, es

conveniente, primero, definir el dominio físico del tramo de costa a considerar, y posteriormente, las entradas y salidas de material sedimentario dentro de este dominio.

El resultado final de la consideración de todos estos volúmenes a lo largo del tramo será el balance sedimentario y permitirá a su vez establecer la situación de la playa estudiada en relación a su volumen de sedimentos a lo largo del tiempo.

1.3.1 Unidad fisiográfica

Se denomina unidad fisiográfica a aquel tramo de costa en cuyos extremos se verifica que el transporte sólido longitudinal es nulo, bien por causas naturales o por causas antropogénicas.

Este será el dominio físico donde se sitúa la playa a analizar y que permite establecer unas condiciones en sus extremos desde el punto de vista de movimiento de arenas que facilitan el cálculo de los transportes sólidos desde el principio del tramo hasta la playa.

1.3.2 Manantiales y sumideros de material sedimentario

El siguiente paso es la determinación de las entradas y de las salidas de material que se pueden producir en el tramo de costa que se ha definido como unidad fisiográfica. A continuación se citan aquellas variaciones del volumen de material más significativas:

- Erosión de las dunas y acantilados. Producen movimiento de material sedimentario que son arrastrados hacia el mar por la escorrentía superficial o los desprendimientos debidos a erosión. Las dunas aportan material al mar fundamentalmente por erosión eólica y durante los movimientos estacionales del perfil de la playa. Por estas causas, las obras de estabilización de acantilados y de dunas suponen un déficit de aportes al sistema litoral.
- Aportación orgánica de material sedimentario. La descomposición de los organismos vivos provistos de valvas, esqueletos, etc., produce un aporte de material sólido a la dinámica litoral.
- Erosión de las cuencas fluviales. Se consideran las erosiones ocasionadas por el arrastre de material producido por las aguas de escorrentía y que finalmente se concentran en los cauces fluviales que los transportan hasta el sistema litoral. En consecuencia, las causas de degradación de las cuencas como son la desertización, los incendios forestales, etc., contribuyen a la mejora del sistema litoral por un aumento de los volúmenes de material presentes en el

sistema; mientras que las medidas que luchan en contra de la degradación de los suelos como son las repoblaciones forestales causan déficit de aportes en el tramo de costa. Por otra parte, la regulación de los cauces fluviales mediante embalses supone una retención del material transportado y ocasiona un déficit de material sedimentario en el entorno litoral.

- Almacenamiento en la trasplaya. Las variaciones del perfil de playa en situaciones de equilibrio pueden producir la acumulación de sedimentos en las dunas situadas en la zona trasera de la playa. De esta forma, constituyen depósitos de material a disposición de la dinámica y que garantizan el equilibrio de la playa.
- Erosión eólica. El transporte eólico produce en general, el movimiento del sedimento en la playa seca, y, también, puede desplazar material procedente de zonas arenosas alejadas de la costa.
- Golas (inlets). Estas formaciones constituyen una interrupción a la corriente de transporte sólido longitudinal, así se produce la absorción de parte del material sólido.
- Cañones submarinos. Constituyen sumideros por los que se pierde el material sólido hacia profundidades desde las que no se pueden recuperar para el sistema litoral por estar fuera de la acción de los agentes que actúan sobre el tramo de costa.
- Alimentación artificial de playas. Como su propio nombre indica, se trata de un aporte de material por medios artificiales. Esta acción antrópica inyecta un volumen de sedimento necesario para restaurar el sistema a una posición anterior más estable.
- Dragados. Se trata de la extracción de material sedimentario del fondo marino bien con fines de ayuda a la navegación o bien con el objetivo de alimentar alguna playa. Dado que se trata de mover material de zonas activas dinámicamente en el primero de los casos, en los últimos tiempos, se intenta combinar ambas actuaciones –mantenimiento de canales de navegación y alimentaciones artificiales- para optimizar los impactos generados.

1.3.3 Resultado del balance sedimentario

Una vez definido el marco físico donde se ubica la playa a analizar y las entradas y salidas de material que se producen en el tramo, se está en condiciones de evaluar el balance sedimentario en el tramo considerado.

Se establecen dos secciones en las cuales se puede conocer el transporte sólido longitudinal debido a rotura de oleaje. Además se consideran los demás transportes debidos a aportes y extracciones del sistema. Conocidos todos los valores, se obtiene la suma algebraica de todos ellos desde la sección de entrada hasta la sección de salida.

El resultado final establece tres situaciones que se traducen en cambios en la posición de la línea de orilla. De esta forma, se obtiene:

$$\sum Q_i = Q_1 + q\Delta l - Q_2 < 0 \quad \text{Déficit (erosión)}$$

$$\sum Q_i = Q_1 + q\Delta l - Q_2 = 0 \quad \text{Equilibrio (dinámico)}$$

$$\sum Q_i = Q_1 + q\Delta l - Q_2 > 0 \quad \text{Superávit (acreción)}$$

Según se verá en el apartado siguiente, la variación del volumen se traduce en el movimiento de la línea de orilla, de tal forma, que cuando falta material se produce un retroceso de la línea y se dice que la playa está en una situación erosiva, cuando sobra material, se produce un avance de la línea y la playa está en acreción y cuando el cambio es nulo entonces la línea de orilla no cambia de posición en un plazo hiperanual y la playa se encuentra en equilibrio dinámico.

1.4 Ecuación de continuidad.

Una vez descritos los conceptos básicos relacionados con el balance sedimentario de los tramos costeros arenosos, se puede reducir la escala espacial hasta considerar solamente una sección de una playa. En esta sección se evaluará el balance de sedimentos. Con ello se formula la ecuación de continuidad. Esta ecuación será la base para la descripción de los modelos de evolución de la línea de costa que se describen en el apartado 3.

1.4.1 Descripción física

Se considera una sección de playa entre dos perfiles transversales paralelos separados una distancia Δx entre ellos, en la cual se conoce el valor de la corriente de transporte sólido longitudinal neto a lo largo de este tramo de costa, que valdrá Q . Como es sabido, ese valor es función de la coordenada longitudinal, x , por diferentes razones; es decir, será $Q = Q(x)$. Así, en este elemento diferencial de playa, entrará en la unidad de tiempo, Δt , un volumen de sedimento $Q\Delta t$, y saldrá un volumen $(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x) \Delta t$.

El tramo de costa avanzará, si el volumen que sale es menor que el que entra, es decir, si $(\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x) \Delta t > 0$ y retrocederá si $(\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x) \Delta t < 0$, puesto que ese volumen que se modifica en la celda se compensará con un avance o un retroceso de la línea de orilla en función del signo de esa variación de volumen. De esta forma, la variación del transporte se traduce en un movimiento de la línea de costa. Este es el concepto principal que da lugar a la ecuación de continuidad.

Para obtener la expresión de esta ecuación de continuidad se emplea un elemento diferencial de playa. En esta sección, el eje y se toma perpendicular a la línea de orilla, y el eje x es paralelo a ella. La cuña presenta una anchura Δx , y el avance hacia el mar es de Δy metros. Si se considera un cambio de volumen elemental, definido por la cuña de material sólido que avanza hacia el mar en un intervalo de tiempo Δt , se tendrá:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{(D_B + D_C)\Delta y \Delta x}{\Delta t}$$

Donde se tiene en cuenta la profundidad del perfil hasta la que se verifica movimiento del mismo. Esta variación de volumen ha de ser igual a la diferencia entre el transporte sólido entrante y saliente de la celda, es decir:

$$\Delta Q + \frac{(D_B + D_C)\Delta y \Delta x}{\Delta t} = 0$$

lo que se puede escribir, en términos diferenciales, como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + (D_B + D_C) \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

y si se incluye además cualquier aportación de material sólido, q , procedente tanto de tierra como del mar, se obtendrá, reorganizando la ecuación anterior:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0$$

La cantidad q puede incluir descargas de ríos, vertidos procedentes de dragado, extracciones de arena, etc. La ecuación anterior es la que se denomina “de continuidad” y gobierna el movimiento de la línea de orilla en base al gradiente de transporte sólido longitudinal, $\partial Q/\partial x$. Si volvemos a la notación incremental, y se denomina \overline{gradQ} al gradiente de transporte sólido en una celda diferencial, resulta el movimiento Δy de la línea de orilla en el intervalo de tiempo escogido, Δt :

$$\Delta y = \frac{(q - \overline{gradQ})}{(D_B + D_C)} \Delta t$$

Esta ecuación es mucho más intuitiva, y permite comprender perfectamente el movimiento de las playas en planta.

2 CLASIFICACIÓN DE FORMAS COSTERAS DE DEPÓSITO

2.1 Introducción

Para trabajar correctamente con las formas costeras hay que conocer y comprender perfectamente la clasificación de las formas costeras de depósito (Bores, 1.974). En los párrafos siguientes se describen los conceptos fundamentales en los que se ha basado P.S. Bores para la formulación de su clasificación genética de costas. También se enunciará dicha clasificación y por último se mostrarán algunos ejemplos ilustrativos.

2.2 Conceptos básicos sobre la génesis de las formas costeras de depósito

Las formas costeras de depósito son las formaciones funcionales que constituyen el relieve del borde del mar y están influidas por algunos de sus agentes, aunque no sea su acción preponderante. La clasificación genética de costas que se describirá en el apartado siguiente, analiza de forma fundamental el comportamiento en planta de las formas costeras. Además tiene en cuenta el perfil de las mismas, así como el tipo de transporte sólido que se verifica en la playa y la granulometría que la compone.

A continuación, se analizan dichos aspectos de forma que se pueda describir la clasificación genética en el apartado 2.3.

2.2.1 Alzado de una playa

La playa está constituida por dos superficies cóncavas cuya pendiente aumenta de mar a tierra. A su vez, se puede observar el perfil de la playa dividida en cuatro partes: playa seca, estrán, playa sumergida y plataforma costera. Las dos primeras están separadas por la orilla; la segunda y la tercera por el punto de rotura; y la tercera y la cuarta por el punto neutro o de Cornaglia.

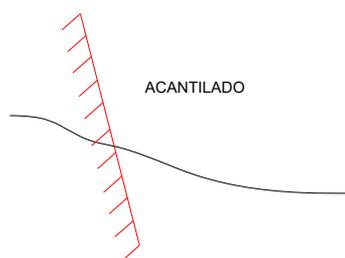
El punto neutro, también denominado de Cornaglia, se caracteriza por ser aquel en el que no se produce transporte de sedimentos. La forma de determinar dónde está situado este punto neutro es igualando la velocidad del agua del fondo a la velocidad del transporte de arena, pues, por la propia definición de este punto, está en equilibrio.

A la hora de determinar la velocidad del agua en el fondo es fundamental considerar la distribución de esta velocidad en función de la profundidad. Así, a mayor profundidad, menor velocidad. Este punto depende del estado del mar, ya que a períodos largos y grandes alturas, el punto neutro está a profundidades mayores.

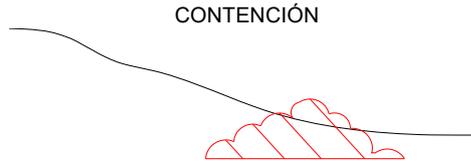
La playa sumergida es la parte de la playa situada por encima del punto neutro y siempre permanece cubierta por el mar. El punto de rotura, como su propio nombre indica, es donde rompe el oleaje. El estrán es la superficie colocada por encima de la playa sumergida y está caracterizada por estar a veces seca y a veces mojada, según el ciclo de mareas.

Cabe la posibilidad de que la playa no presente alguna de las partes anteriormente descritas. En este caso se encuentra ante el caso de una playa incompleta. Dentro de esta tipología se destacan dos casos fundamentales:

- Acantilados (les falta la parte superior)



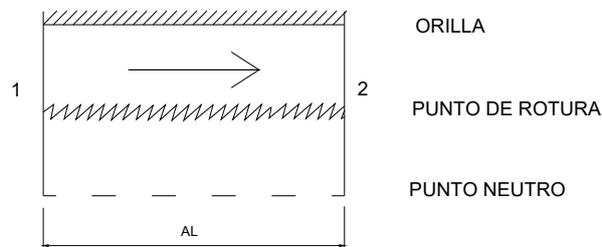
- Contención o afloramiento (les falta la parte inferior).



Otra tipología distinta a la completa y la incompleta es la de perfil hipercompleto, que se caracteriza por ser en un principio un perfil completo con materiales sueltos abundantes, y cuando aparece un temporal, se forma un nuevo perfil, quedando una barrera o cordón.

2.2.2 Transporte sólido

Otro aspecto fundamental es el transporte sólido que se verifica a lo largo de la playa. Se ha de destacar que prácticamente todo el transporte sólido se produce en el estrán.



Se considera que un tramo de costa, que puede comprender sólo una parte o toda la playa, está en equilibrio cuando los caudales sólidos que entran en el tramo son iguales a los que salen de él.

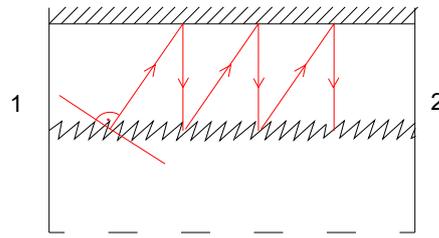
La relación entre $(Q1+q)$ y entre $Q2$ nos da otra forma de clasificar las costas. $Q1$ es el caudal sólido en la sección 1, $Q2$ es el caudal sólido en la sección 2, Δl es la longitud del tramo de costa considerado y q es la suma de todos los aportes y pérdidas en el tramo.

Como aporte se puede considerar la erosión de acantilados con cantos poco cementados, restos de organismos, transportes por animales y viento, y precipitados de algunas sales en el mar. Como pérdida se puede considerar el transporte de animales y viento.

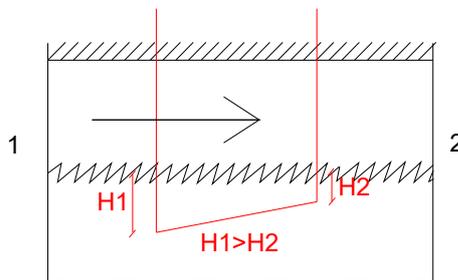
El caudal sólido en un punto se puede considerar como formado por dos sumandos:

- Q_i : transporte sólido litoral originado por incidencia oblicua del oleaje. En la figura siguiente se observa que el oleaje sube las partículas por la línea

perpendicular a la onda, siguiendo la trayectoria del oleaje, mientras que baja por la mayor pendiente de las costa.



- Q_s : transporte sólido litoral originado por el gradiente de sobreelevación. Se produce por la diferencia de cota como se aprecia en el siguiente esquema.



Se dividen las costas como:

- Estable $Q_1 + q\Delta l = Q_2$
- Inestable $Q_1 + q\Delta l > Q_2$
- Hiperestable $Q_1 + q\Delta l < Q_2$

Cuando los aportes son superiores a las pérdidas en el tramo de costa considerado, se considera hiperestable, con formación de depósitos, mientras que si ocurre lo contrario es inestable y se produce erosión.

2.2.3 Granulometría

Otro aspecto que sirve para clasificar las costas es la granulometría. Se distingue:

- Granulometría homogénea: posee una sola especie granulométrica (arenas o gravas), con variedad de tamaños.
- Granulometría heterogénea: con dos o más especies granulométricas (arenas y gravas por ejemplo).

2.3 Clasificación genética de costas

Esta clasificación genética tiene como aporte fundamental la descripción de los factores que originan la configuración en planta de todas las formas costeras de depósito. En los párrafos siguientes se enuncia dicha clasificación en su análisis en planta. Además se describirán otros factores como el perfil, el transporte sólido y la granulometría.

2.3.1 Análisis en planta. Singularidades.

El análisis en planta se basa en la descripción de los obstáculos que se oponen al transporte longitudinal de sedimentos. En función de estos obstáculos, que se denominan *singularidades*, se pueden explicar el comportamiento en planta de todas las formas costeras. Siguiendo este razonamiento, se denomina playa abierta a aquella que no presenta singularidades. A continuación se presentan las tres tipologías de singularidades en las que se ha dividido la génesis de las playas.

2.3.1.1. Singularidades másicas.

Son aquellas formaciones en las que la modificación al transporte de sedimentos viene determinada por la variación del volumen de material presente en el sistema litoral.

- Se denomina *positiva* si se produce un aporte de material, bien de forma artificial (regeneración de playas) o bien de forma natural (formaciones deltaicas).
- Se denomina *negativa* cuando se produce una extracción, artificial o natural, de arena del sistema. Los motivos pueden ser la presencia de cañones submarinos o las operaciones de dragado que extraen sedimentos del sistema.

2.3.1.2. Singularidades geométricas

En este caso, la modificación del transporte sólido se produce por un cambio abrupto de la dirección de la costa (borde litoral no arenoso).

- Se denomina *positiva* cuando el borde litoral es cóncavo. Dicho borde puede ser natural (cabos, promontorios, etc.) o artificial (espigones, diques, etc.)
- Se denomina *negativa* cuando el borde litoral es convexo. La formación costera representativa son las flechas litorales.

2.3.1.3. Singularidades dinámicas

Estas playas se originan por un cambio abrupto de la hidrodinámica costera. Las formaciones costeras más representativas son los tómbolos y hemitómbolos y las bahías. Se pueden producir por la presencia de obstáculos naturales, islas, o

artificiales, diques exentos. En la misma configuración en planta se presentan la singularidad dinámica *positiva* y la *negativa*.

2.3.2 Otros factores considerados en la clasificación

Una vez realizado el análisis en planta en el apartado anterior, a continuación se explica la nomenclatura que se emplea en la clasificación genética de costas y que incorpora otros aspectos a considerar como son el transporte, el perfil y la granulometría. La expresión de la tipología de la playa se presenta con la siguiente expresión:

$$X^{\sigma}_{\gamma,\pi}$$

siendo:

X un símbolo que representa la morfología en planta de la costa.

σ es función del transporte sólido.

γ es función de la granulometría.

π indica si el perfil es completo, incompleto o hipercompleto.

Siguiendo esta nomenclatura, resulta que la morfología de la costa en planta se puede indicar como:

- Playa abierta: **$X=O$** . La denominación de O ha sido dada por el Prof. Dr. Pedro Suárez Bores dado que tiene cero singularidades y por el nombre inglés "open beach".
- Singularidad másica positiva: **$X=M$**
- Singularidad másica negativa: **$X=m$**
- Singularidades geométricas positiva: **$X=G$**
- Singularidades geométricas negativa: **$X=g$**
- Singularidades dinámicas positiva: **$X=D$**
- Singularidades dinámicas negativa: **$X=d$**

En el caso del transporte sólido, se considera si la playa se encuentra en una situación de equilibrio, de erosión o de acreción. De esta forma, se indica si la situación es estable, inestable o hiperestable.

En relación con la granulometría, se consideran dos situaciones, una que todo el material sea de la misma *especie* granulométrica (homogénea) o de varias *especies* (heterogénea).

Por último, se puede añadir la información sobre el perfil de la playa. En este caso, el perfil puede ser completo, incompleto o hipercompleto. Dentro de los perfiles incompletos se encuentran los acantilados y los perfiles con sujeción al pie.

También hay que considerar que las formas costeras son combinación de todos los factores mencionados con anterioridad.

2.4 Ejemplos

A continuación, se muestran imágenes de playas que ilustran las descripciones de los apartados anteriores.

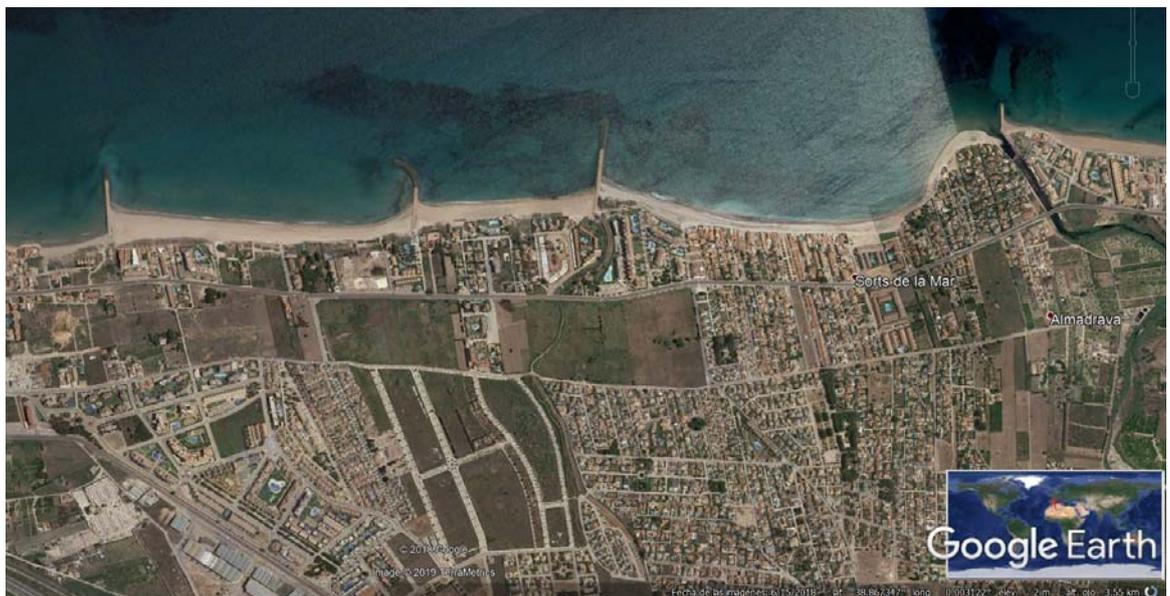


figura 2.- Tramo de costa al norte de Denia (Alicante). Singularidad geométrica.



figura 3.- Playa de las Teresitas (Tenerife). Singularidad geométrica

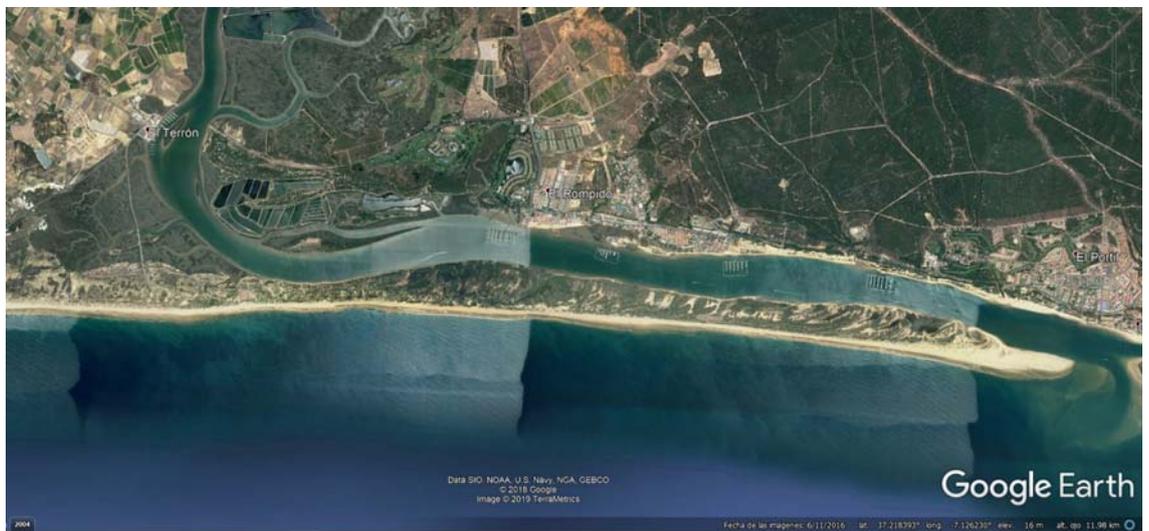


figura 4.- Flecha de El Rompido (Huelva). Singularidad geométrica.

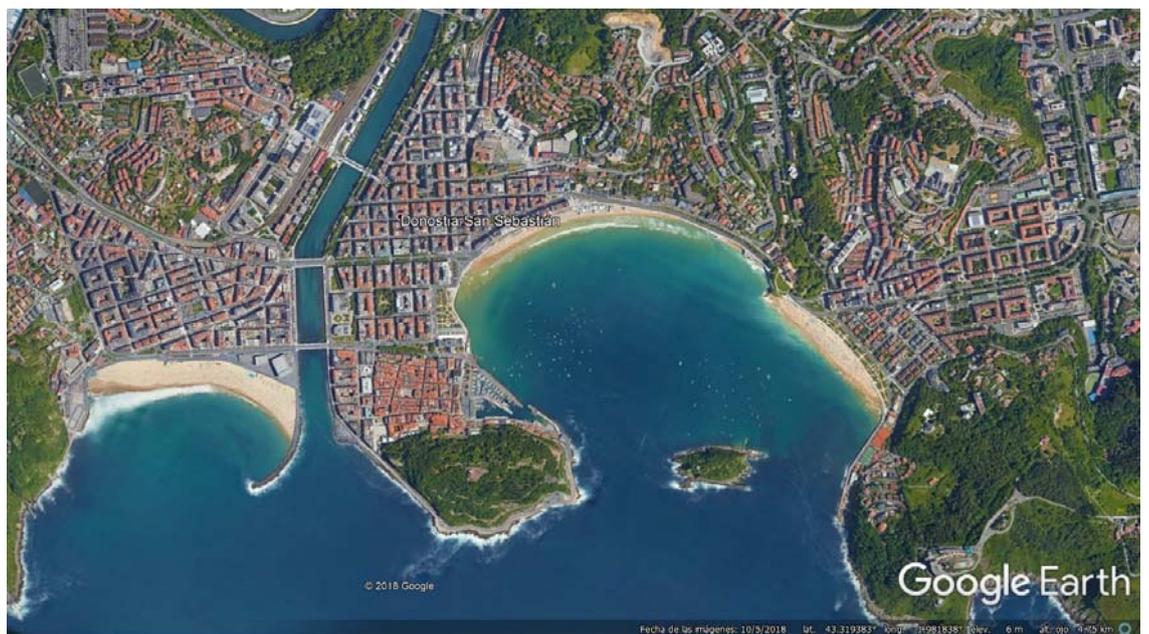


figura 5.- Playas de la Concha y la Zurriola (San Sebastián). Singularidad dinámica y singularidad compuesta geométrica y dinámica.

3 MODELOS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

3.1 Morfología a largo plazo

Dentro de la morfología a largo plazo se pueden distinguir como en todo los procesos litorales analizados en la literatura científica, dos componentes, planta y perfil. Por tanto, existen modelos de evolución del perfil y de la planta de la playa.

Este tipo de modelos son herramientas muy útiles para la planificación y diseño de obras de defensa de costas ya que representan los cambios de la línea de orilla producidos por la implantación de estas estructuras litorales.

En el presente epígrafe se describirán las características más destacadas de los modelos evolutivos de la línea de costa.

3.1.1 Bases de datos para la evolución de la línea de costa

No obstante, además de los modelos numéricos de evolución, existen otros procedimientos para la determinación de la posición de la línea de costa. Estos procedimientos se recogen en las bases de datos de evolución de la línea de orilla. En esencia, se basan en la recogida de datos sobre la posición de la línea de orilla en el tiempo, y la posterior restitución.

Los datos se pueden obtener a través de cartografía impresa (cartas náuticas, planos topográficos), o a partir de campañas de campo como son el seguimiento batimétrico de la zona en estudio bien por procedimientos clásicos o mediante sistemas láser (LIDAR). De esta forma, se obtienen planos de posiciones comparadas de la línea de orilla, que muestran la evolución real de la costa en plazos de tiempo largos.

Para que la calidad del plano sea buena es importante que los datos plasmados sean homogéneos, dado que la línea de orilla presenta movimientos que tienen un carácter estacional o periódico, como son las variaciones del perfil de playa o las oscilaciones debidas a la onda de marea. Por ello se considera conveniente que la toma de medidas se realice en condiciones similares de nivel de marea y de oleaje. De esta forma, hay que tener en cuenta que:

1. Las diferentes situaciones de viento y presión atmosférica pueden alterar el nivel del mar y por lo tanto, también la posición de la línea de orilla.
2. El nivel de marea astronómica ha de ser conocido, por las mismas razones expuestas en el punto anterior, en el momento de la toma del dato.
3. Las condiciones de oleaje reinantes en la zona pueden producir situaciones de *set-up* extraordinarias que alteran también el nivel del mar en la zona de rotura. A estos efectos, es conveniente conocer el historial de temporales previos sufridos por la playa a monitorizar, con objeto de conocer el tipo de perfil (reflexivo o disipativo) en el momento de la toma de datos.

Con todo esto, se está en condiciones de poder comparar datos tomados en diferentes momentos y en consecuencia establecer el desplazamiento real de la línea de costa durante el periodo de tiempo estimado.

3.2 Modelos de evolución de la línea de orilla

3.2.1 Primeras aplicaciones

Los primeros cálculos realizados con un modelo de línea de costa fueron realizados por Pelnard-Considère en 1.956, quien utilizó una solución analítica para la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{1}{(1-n)h_p} \frac{\partial Q}{\partial y / \partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Esta ecuación ya ha aparecido en el apartado 1.4. Recuérdese que en ella, las variables presentan el significado siguiente:

y: Coordenada transversal

x: Coordenada longitudinal

t: Tiempo transcurrido

Q: Transporte sólido

n: Porosidad del material

h_p : Profundidad de cierre

Este método puede ser utilizado para obtener una primera estimación del desarrollo morfológico de un tramo de costa para evaluar la modificación que ocasiona la presencia de un espigón.

3.2.2 Conceptos básicos

Para que los resultados que se obtengan de las simulaciones llevadas a cabo mediante modelos evolutivos de la línea de costa, es conveniente señalar algunas hipótesis y limitaciones a tener en cuenta a la hora de aplicar estas herramientas a los diferentes tramos de costa.

Estos modelos están indicados para la simulación de escenarios cuyo agente principal es la modificación de la tasa de transporte sólido longitudinal a lo largo de la playa. Estas situaciones representan procesos de largo plazo como es la evolución de la línea de orilla ante la implantación de un espigón o de un dique exento. Por tanto, no se consideran aquellos procesos cuya escala temporal es estacional, como puede ser la variación de la línea debida a la acción de un temporal determinado o a los cambios estacionales periódicos de paso de invierno a verano.

De acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior, los periodos de simulación conviene que sean lo más largos posible, en el entorno de varios años, ya que el objetivo es obtener una posición de equilibrio en planta de la playa analizada.

Con relación a la escala espacial, ésta puede variar desde la longitud de un playa determinada –centenares de metros- hasta análisis de tramos de costa con una longitud de decenas de kilómetros.

3.2.3 Tipos

A lo largo del tiempo y conforme se avanzaba en el desarrollo de las herramientas de cálculo, se han ido desarrollando diferentes etapas en la elaboración de los modelos numéricos de evolución de la línea de costa.

Los primeros son los que asumen que la forma del perfil no varía a lo largo de la playa y que los avances y retrocesos son siempre paralelos. De esta forma, solamente es necesario definir una línea representativa, normalmente la línea

de orilla, ya que el resto se mueven paralelamente. Estos modelos se denominan de una línea.

El siguiente paso han sido los modelos casi 3D. En este caso se considera que puede variar el perfil tanto en transversal como a lo largo de la playa. Sin embargo, todavía tenían algunas restricciones, el perfil debería cambiar siguiendo unas pautas determinadas, dando lugar a los modelos de n-líneas.

El último paso es el desarrollo de los modelos 3D. En ellos se tienen en cuenta los procesos sedimentarios transversales y longitudinales de la playa. Además son capaces de modificar la batimetría en función de los oleajes incidentes y de sus tasas de transporte sólido, volviendo a iniciar el ciclo de cálculo con un cambio de la batimetría.

3.2.4 Modelos de una línea

Para finalizar este capítulo, se describen los modelos de una línea debido a su sencillez y como introducción a los modelos de evolución más sofisticados.

3.2.4.1. Hipótesis básicas

Las hipótesis básicas que rigen los modelos de una línea son las siguientes:

- La forma del perfil de la playa es constante
- Los límites del perfil tierra adentro y mar adentro permanecen constantes
- El transporte sólido longitudinal es debido a la rotura del oleaje
- Simulación de escenarios evolutivos de largo plazo

3.2.4.2. Ecuaciones de gobierno

Como consecuencia de los conceptos básicos que manejan estos modelos, las ecuaciones de gobierno serán:

- Ecuación de continuidad (ver apartado 1.4)
- Tasa de transporte sólido longitudinal

La primera de ellas, como se ha indicado, se ha explicado con detalle en apartados anteriores.

En relación a la obtención de la tasa de transporte sólido longitudinal, la expresión más empleada es la siguiente:

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b$$

donde,

H	Altura de ola
C_g	Celeridad de grupo
b	Subíndice que indica condiciones en rotura
θ_{bs}	Angulo que forma el frente en rotura con la línea de orilla

Los parámetros a_1 y a_2 tienen las siguientes expresiones:

$$a_1 = \frac{K_1}{16((\rho_s/\rho) - 1)(1 - p)(1.416)^{5/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8((\rho_s/\rho) - 1)(1 - p) \tan \beta (1.416)^{7/2}}$$

donde,

K_1, K_2	Coefficientes empíricos. Parámetros de calibración
ρ_s	Densidad de la arena
ρ	Densidad del agua
p	Porosidad de la arena
$\tan \beta$	Pendiente media de la playa medida desde la línea de orilla hasta la profundidad activa

4 REFERENCIAS

1. Bores, P.S. 1974. *Génesis y clasificación genética de las formas costeras*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM.
2. Bores, P.S. 1978. *Clasificación de formas costeras*. Revista de Obras Públicas, nº 3158. Pp. 431-445
3. Esteban Pérez, M.D. 2006. *Clasificación genética de costas*. Documento de trabajo para programa de doctorado.
4. Hallermeier, R.J. 1983. *Sand transport limits in coastal structure design*. Proceedings of Coastal Structures '83. ASCE. Pp. 703-716
5. Hanson, H y Kraus, N.C. 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Technical report CERC-89-19. USACE.
6. Negro, V. y López, J.S. 2004. *Metodología para el estudio de costas. Teoría y práctica*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM.
7. Pelnard-Considere, R. 1956. *Essai de theorie de l'evolution des forms de rivage en plage de Sable et de Galets*. 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, nº 1, pp. 289-298.