



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**Análisis de la evolución
interanual de la playa “North
Beach” (Estado de Washington,
Estados Unidos) con modelos
estadísticos y numéricos**

Trabajo realizado por:
Salvador Berdún Delgado

Dirigido:
Fernando Méndez Incera
José Antonio Álvarez Antolínez

Titulación:
**Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Diciembre 2016

TRABAJO FINAL DE MASTER

Resumen

TITULO: Análisis de la evolución interanual de la playa "North Beach" (Estado de Washington, Estados Unidos) con modelos estadísticos y numéricos

TITULACION: Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: Salvador Berdún Delgado

DIRECTOR: Fernando Mendez Incera.

CODIRECTOR: José Antonio Álvarez Antolínez.

CONVOCATORIA: Diciembre 2016.

PALABRAS CLAVE: Ingeniería de Costas, modelos estadísticos y numéricos, balance de sedimento, Oneline, PCA.

El presente trabajo fin de máster consiste en el análisis de la evolución interanual de la playa North Beach, en el estado de Washington (EEUU) con modelos estadísticos y numéricos. Partiendo de una base de datos tomada sobre la costa, y también campos de presiones en el Océano Pacífico. Para el trabajo se han realizado diversos cálculos, con el software Matlab. En base al estudio del conocimiento, el objetivo de este estudio es mejorar la predicción de los cambios de la línea de costa a lo largo del tiempo. En definitiva, es definir en qué medida y con qué está relacionada la variabilidad de la línea de costa, así como la forma en planta que va adquiriendo a lo largo de los años. Se ha definido un modelo que permita estimar el balance de sedimento en la playa, en una escala temporal. Y se ha analizado la forma en planta de la línea de costa debido al balance de sedimento estimado en el modelo.

En el primer capítulo, analizamos la motivación del estudio, la ubicación, la problemática que existe en la playa, también se realiza un análisis de los estudios anteriores que tengan que ver con el presente trabajo, como distintos modelos de predicción de la línea de costa así como distintas hipótesis que se plantean para ejecutar los distintos modelos, por último se definen los objetivos del trabajo y se realiza una clara estructura de la organización del trabajo. Posteriormente, se definen todos los datos de partida que hemos tenido que utilizar para hacer posible este estudio de

investigación, así como su tratamiento, para poder realizar los cálculos convenientes, estos datos de partida son las campañas de campo, los índices climáticos y los campos de presiones. En el capítulo 3 se ha explicado, cual ha sido la metodología a seguir en el análisis apoyándonos en un diagrama de flujo, se ha definido el análisis en componentes principales de los campos de presiones, y también los cálculos realizados para realizar la calibración del modelo. Una vez definido el proceso de calibración del modelo, en el capítulo 4 se han representado, los resultados de la calibración y la validación.

En el penúltimo capítulo se muestran los resultados que se han calculado con ayuda de un modelo OneLine, donde podemos ver, la forma que adoptaría la línea de costa. Se han introducido unas condiciones de contorno, las cuales son resultado, de la calibración anterior.

En el sexto y último capítulo, se definen las conclusiones del trabajo realizado.

También se muestran en los anejos, algunos de los script que se han realizado para los cálculos con Matlab, para así poder llevar a cabo el trabajo.

Como conclusiones, con la calibración, y la posterior validación, se ha desarrollado un modelo capaz de estimar los caudales de sedimento mensuales en entran y salen de la playa. El perfil 2, ha mostrado una tendencia erosiva. Las tendencias estimadas, son de bastante utilidad para realizar predicciones ya que reflejan la evolución de la playa, además hemos podido constatarlo en la validación. Y por ultimo. se ha definido, que poner condiciones de contorno variable es un ejercicio numérico es fundamental para la representación de la línea de costa en el tiempo.

Abstract

TITLE: Analysis of the interannual evolution of the beach called "North Beach" (State of Washington, United States) with statistical and numerical models.

TITULATION: Master Degree in Civil Engineer

AUTHOR: Salvador Berdún Delgado

DIRECTOR: Fernando Mendez Incera.

CO-DIRECTOR: José Antonio Álvarez Antolínez.

DATE OF PRESENTATION: December 2016.

KEYWORDS: Coastal engineering, statistical and numerical models, sediment balance, oneline, PCA.

The present master`s thesis is the analysis of the interannual evolution of the beach called "North Beach" (State of Washington, United States) with statistical and numerical models. Firstly this information has been taken from a database on the coast and also pressure fields in the Pacific Ocean. Different calculations have been made for this paper with matlab . Based on the study of art, the objective of this thesis is to improve the prediction of changes in the shorelines in the time scale. We have defined which is the balance sediment, and which is the relation between the sediment variability and pressure fields in order to define the future coastline shape.

A model has been defined to estimate the sediment balance on the beach on a time scale. And we have analyzed the shape coastline caused by the sediment balance estimated in our model.

In the first chapter, we analyze the motivation of the study, the location, the problems existing on the beach, also an analysis of the previous studies related to this thesis such as different models of prediction of the shoreline and different hypotheses that are put forward to execute the different models, finally we have defined the different objective of the thesis and how we have organized the paper.

After this, we analyzed the datasets which we have used to do this thesis, together with its treatment to be able to make the appropriate calculations,

these datasets are the field campaigns, the climatic index and the pressure fields.

In chapter 3 we have explained what methodology has been followed to this analysis based on a flow diagram, we have defined the analysis in principal components of the pressure fields; we have also to carry out the calibration of the method. When the calibration has been done, in the chapter 4 we have represented the calibration and validation solutions.

The penultimate chapter shows the results have been calculated supporting a One Line model, where we can see the shape that would get the shoreline. We have introduced boundary conditions which are the results of the calibration. The sixth and final chapter we show the conclusions of the thesis, also we show in the appendixes, some of the script that have been done for the calculation have been done with Matlab, in order to carry out the work.

In conclusion, the calibration and the validation which we have developed is a model to estimate the sediment flows on the coast. The profile 2 have showed a erosive trend . the model has a lot of utility to do prediction and to define the beach evolution. Finally we have demonstrated to have boundary conditions is a important numerical exercise for representing the coastline in time.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor en este estudio de investigación, Fernando Méndez Incera, me ha dado la posibilidad de participar en el desarrollo de un trabajo como este, gracias a él he aprendido mucho sobre los comportamientos de una playa. También a Jose Antonio, el ha sido el codirector de mi trabajo y siempre ha estado a mi disposición cuando he tenido cualquier duda. Quiero agradecer también la disponibilidad de datos de campo al profesor Peter Ruggiero de Oregon State University. Yo habría sido incapaz de acabar este estudio sin la ayuda de ellos, con lo cual millones de gracias

Este Trabajo Fin de Máster representa el fin de mi etapa estudiantil, en la que las experiencias vividas, los nuevos amigos y la satisfacción de hacer algo que realmente me llena como persona, compensan todos aquellos momentos de tensión y agobio por los que cualquier estudiante que estudie pasa. Por todo ello, mi mayor agradecimiento a mis padres y hermano. Ellos me han dado un apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado y me han dado los mejores consejos para llevar a cabo mis estudios. También estoy muy agradecido a la Universidad de Cantabria y a la Escuela de Caminos en particular. En estos dos años he madurado académica y personalmente, y gracias a esta Escuela he podido vivir una grandísima experiencia.

Índice

LISTA FIGURAS.....	7
1. INTRODUCCION	10
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACION DEL ESTUDIO	10
1.3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	16
1.3.1 Modelos de evolución morfodinámico en el largo plazo.....	16
1.3.2 Modelos recientes de evolución de la línea de costa	18
1.3.3 Perfil de equilibrio	21
1.3.4. Modelado de la línea de costa considerando la variabilidad en el oleaje y el balance de sedimento a largo plazo	22
1.3.5 Conclusiones.....	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESINA	25
2. DATOS DE PARTIDA	27
2.1 CAMPAÑAS DE CAMPO	27
2.2 INDICES CLIMATICOS (PNA).....	31
2.3. CAMPOS DE PRESIONES	33
3. METODOLOGIA.....	36
3.1 PLANTEAMIENTO GENERAL	36
3.2 BALANCE DE SEDIMENTO.....	36
3.3 ANÁLISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES.....	41
3.4 CALIBRACION DEL MODELO	46
3.5 MODELO DE EVOLUCIÓN MORFODINAMICO.	49
4. MODELO DEL BALANCE SEDIMENTARIO	54
4.1 CALIBRACIÓN.....	54
4.3. VALIDACION	64
5. MODELO DE EVOLUCIÓN MORFODINAMICO.	67
6. CONCLUSIONES	76
Bibliografía	78
Anejos.....	82
Anejo1: Cálculos	82

LISTA FIGURAS

Ilustración 1: Diagrama conceptual de las unidades morfológicas y la variabilidad en escala temporal y espacial a lo largo de la plataforma de la costa. Fuente (Ruggeriro et al 2005)	11
Ilustración 2: Situación	11
Ilustración 3: Desembocadura Rio Columbia	12
Ilustración 4: Celda afectada por el rio Columbia	13
Ilustración 5: Transporte y sedimentación.....	14
Ilustración 6: Erosión y Progradación.....	15
Ilustración 7: Modelos evolución morfodinámica	17
Ilustración 8: Interacción de los elementos morfológicos	19
Ilustración 9: Perfil	21
Ilustración 10: GPS	27
Ilustración 11: North Beach.....	28
Ilustración 12: North Beach.....	28
Ilustración 13: Transectos tomados en la playa.....	29
Ilustración 14: Variabilidad de la costa	30
Ilustración 15: Índices climáticos	31
Ilustración 16:PNA , describe las variaciones en la circulación atmosférica sobre el Océano Pacífico y Norteamérica.	32
Ilustración 17: Campos de presiones en superficie.....	33
Ilustración 18: Campos de presiones	34
Ilustración 19: Diagrama Flujo	36
Ilustración 20: Saltación	38
Ilustración 21: Método del trapecio, aplicado en la costa.....	40
Ilustración 22: Análisis Componentes Principales.....	41
Ilustración 23:PCA	42
Ilustración 24: Calculo Condiciones Contorno	48
Ilustración 25: Condiciones de contorno	48
Ilustración 26: Entrada y salida de sedimento	50
Ilustración 27: Altura total considerada.....	54
Ilustración 28: Volúmenes.....	55
Ilustración 29: Diferencias de Volúmenes.....	55
Ilustración 30: Análisis PNA-AV	56
Ilustración 31: PNA-DIFVOLUMENES.....	57
Ilustración 32: PC1 - DIFVOLUMENES	58
Ilustración 33:PC2 - DIFVOLUMENES	58
Ilustración 34: PC3 - DIFVOLUMENES	59
Ilustración 35:PC1 INTEGRADA - DIFVOLUMENES	59
Ilustración 36:PC2 INTEGRADA - DIFVOLUMENES	60
Ilustración 37:PC3 INTEGRADA - DIFVOLUMENES	60
Ilustración 38: Calibración.....	61
Ilustración 39:Balance sedimento mensual debido a PCs.....	63
Ilustración 40:Calculo Condiciones Contorno	63

Ilustración 41: Validación	65
Ilustración 42: Cond Contorno	67
Ilustración 43: Dirección oleaje Gráficamente	68
Ilustración 44: Posición línea costa, transecto 2	69
Ilustración 45: Posición final Transecto 2	69
Ilustración 46: Posición-Tiempo, Dirección (N30W)	70
Ilustración 47: Posición-Tiempo, Dirección (N45W)	71
Ilustración 48: Variabilidad de la dirección del oleaje	72
Ilustración 49: Posición-Tiempo, Dirección variable	72
Ilustración 50: Posición final línea costa	73
Ilustración 51: Posición Línea de Costa (50meses)	73
Ilustración 52: Posición Línea de Costa (100meses)	74
Ilustración 53: Posición Línea de Costa (120meses)	74

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

Este documento se presenta como trabajo de investigación, el cual refleja todo lo llevado a cabo durante varios meses en el departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, en la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

El estudio del presente trabajo, ha sido realizado con la ayuda de mi director de trabajo de investigación, Fernando J. Mendez, y Jose Antonio Alvarez Antolinez, con el propósito de aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, realizando el Análisis de la evolución interanual de la playa "North Beach" (Estado de Washington, Estados Unidos) con modelos estadísticos y numéricos"

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACION DEL ESTUDIO

La complejidad de los sistemas morfodinámicos en playas se debe en gran medida a la multiplicidad de escalas espaciales y temporales y a la tridimensionalidad de los procesos involucrados.

El pasado nos ha enseñado que la franja costera y la línea de costa son altamente dinámicas y que presentan una variabilidad natural. Entender esta variabilidad, nos puede ayudar a interpretar y hacer un pronóstico de cómo podría cambiar la costa en el futuro.

El calentamiento global y la presión ejercida por el hombre están alterando y creando cambios y desequilibrios en muchas costas de Estados Unidos y también en la que es objeto de nuestra tesina, "North Beach". Entender estos cambios y planificarse para afrontarlos son cuestiones de gran importancia que necesitan una solución.

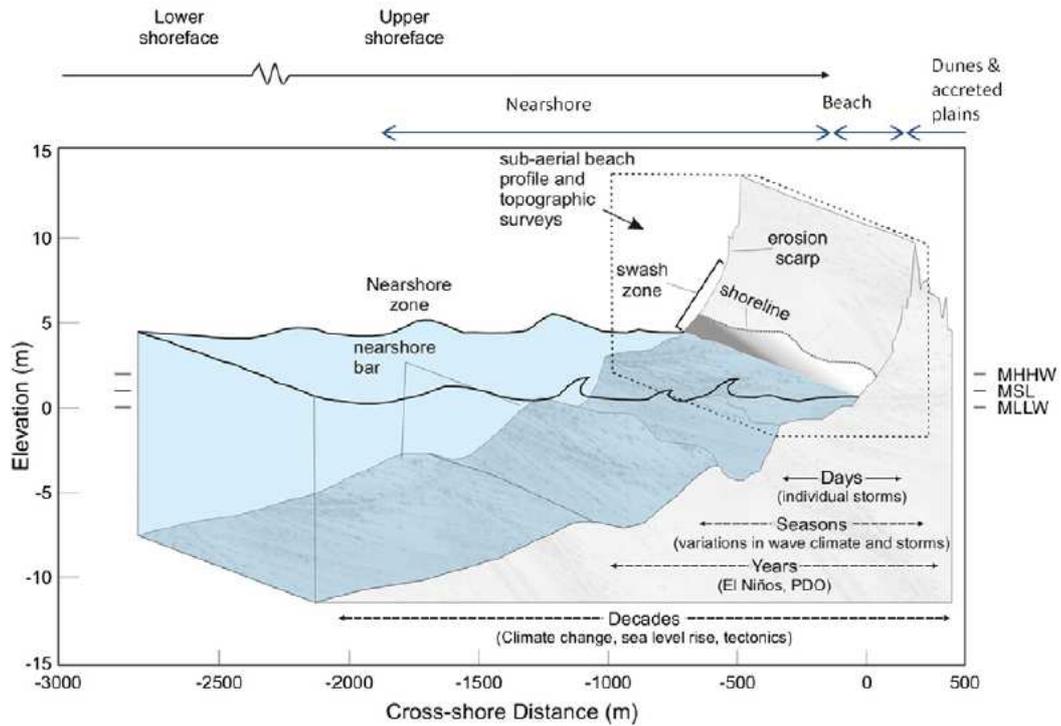


Ilustración 1: Diagrama conceptual de las unidades morfológicas y la variabilidad en escala temporal y espacial a lo largo de la plataforma de la costa. Fuente (Ruggeriro et al 2005)

El presente estudio, se realiza en la costa noroeste de Estados Unidos, en el estado de Washington, concretamente.



Ilustración 2: Situación

La zona en donde se va hacer el análisis, está afectada por el transporte de sedimento del Rio Columbia (Ilustración 3), pertenece a una región de Estados Unidos que se extiende aproximadamente unos 165 Km, limitada por "Tillamook Head" al sur y "Point Grenville" al norte.

Cuatro zonas bien identificadas son las que definen esta zona, Clatsop Plains, Long Beach, Grayland y Nortbeach (Ilustración 4).



Ilustración 3: Desembocadura Rio Columbia

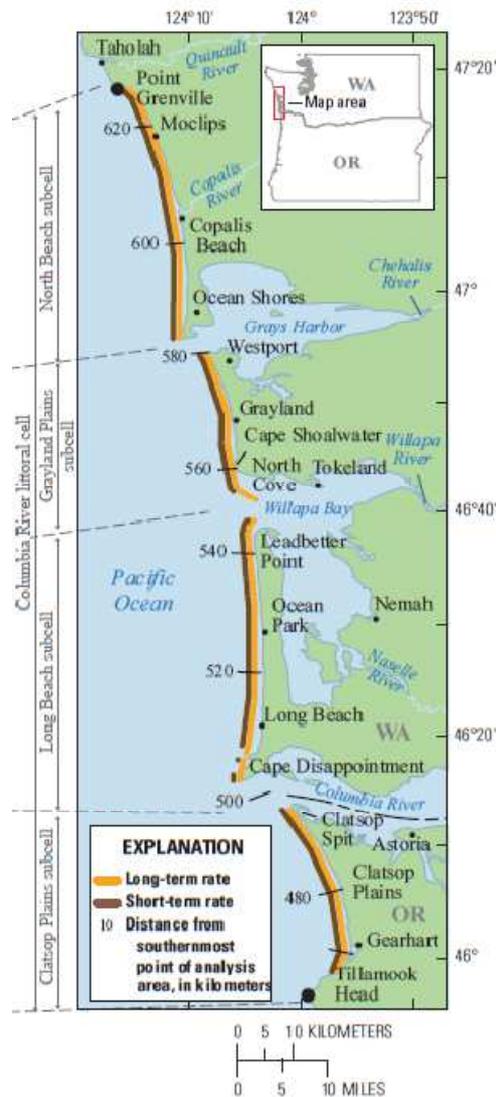


Ilustración 4: Celda afectada por el río Columbia

Estas cuatro zonas se conocen como CRLC ("Columbia Litoral River Cell"), están separadas por los distintos estuarios de los ríos, Columbia, Willapa Bay y Grays Harbor. El CRLC es la extensión geográfica en donde se deposita todo el sedimento procedente del río Columbia. En las partes más antiguas de la playa de North Beach se ha visto una acumulación de sedimento únicamente en los últimos 2500 años. El CRLC es el único tramo de costa en la costa PNW ("Pacific Northwest"), en el cual se ha acumulado naturalmente suficiente volumen de arena avanzando hacia el mar.

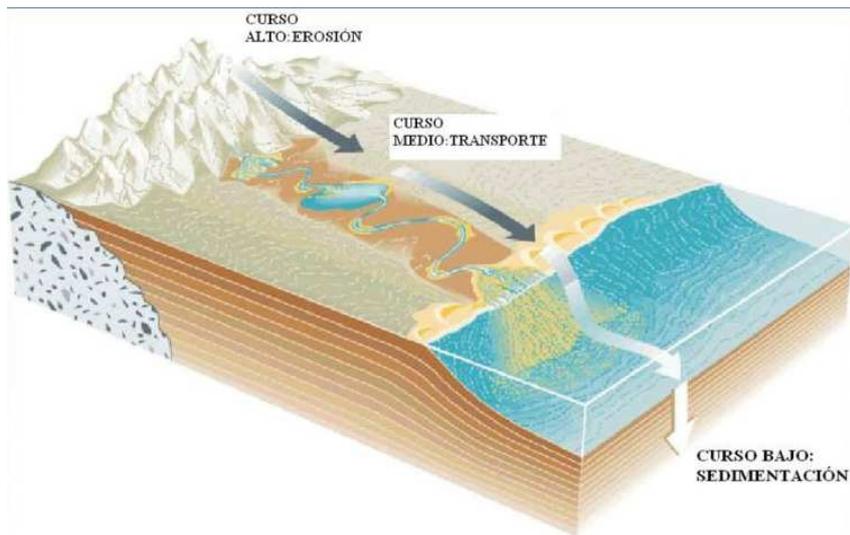


Ilustración 5: Transporte y sedimentación

Amplias playas de suave pendiente caracterizan a la región, con la arena derivada del río Columbia. Las playas están respaldadas principalmente por campos de dunas y terrenos pantanosos, y en el norte de "North Beach" en concreto por acantilados. La evolución de la CRLC desde finales de 1800 ha estado marcada por grandes variaciones del cambio litoral, batimétrico y grandes transferencias de arena. Estos cambios han sido acusados principalmente por la construcción de espigones en los accesos al río Columbia y "Grays Harbor", esto estableció unas nuevas condiciones de contorno por lo que se modificó el transporte local de sedimento y se indujo una respuesta morfológica de todo el sistema a lo largo de décadas.

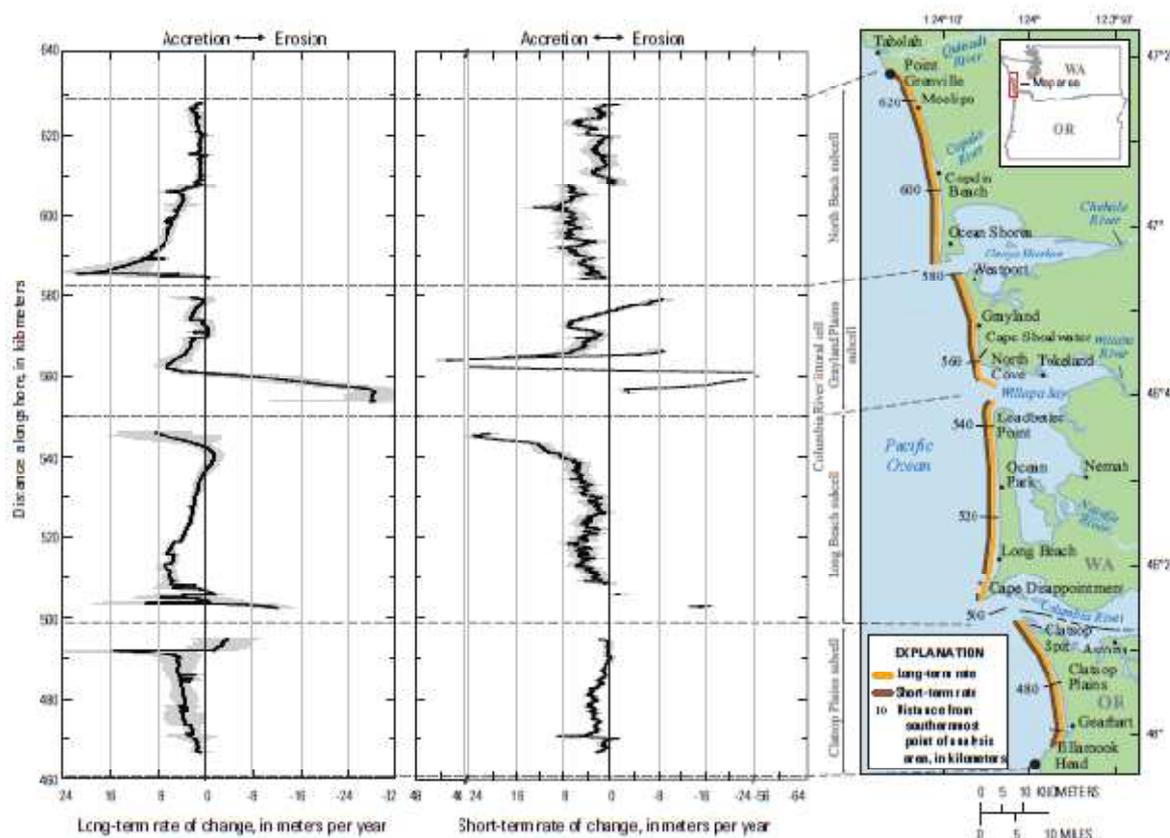


Ilustración 6: Erosión y Progradación

Centrándonos en la costa objeto de este trabajo, esta se extiende unos 50 km entre “Grays Harbor North Jetty” y “Point Grenville”. En Point Grenville se encuentra una pequeña playa que tiene la pendiente más inclinada de todo el CRLC, pero por lo general la zona del norte tiene unas pendientes más suaves que las del sur. La media del tamaño de grano es más grande en las proximidades de “Grays Harbor” y hacia el norte el tamaño de grano disminuye.

Las elevaciones máximas de las dunas, se encuentran en el extremo sur de North Beach y disminuyen en altura hacia el norte.

Analizando los datos históricos, se ha llegado a la conclusión de que, a **largo plazo**, la variación media de cambio de la línea de playa es de 4,4m/año, es la zona con más avance de playa de toda la PNW, con una velocidad máxima de 21,8m/año. Tan solo el 1% de los transectos analizados fueron erosionados durante ese período. En el **corto plazo** hay un gran avance de la playa, 4,2m/año aproximadamente, y solo el 3% de los transectos analizados son erosionados, en el corto y largo plazo hay una clara ruptura en el cambio

de tendencia en la costa del río Copalis, con grandes avances de playa en la costa del sur del río.

Este trabajo, tratará por tanto de realizar un estudio, para conocer cómo va a cambiar la línea de costa en el futuro, y cuáles serán las causas principales de estos cambios.

1.3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

La evolución de la línea de costa, siempre ha sido un análisis que los ingenieros han querido darle distintas soluciones.

Tras los años, se han planteado varios tipos de análisis para conocer el cambio de la línea de costa a largo plazo. El método mediante medidas y análisis de las líneas de costa históricas es el más preciso a la hora de caracterizar el cambio de la línea de costa, el problema es que no permite evaluar cambios en el sistema debido a obras, o cambios climáticos. La aplicación de modelos morfodinámicos costeros requiere un gran coste computacional, pero no reproduce correctamente la línea de costa, en escalas espaciales y temporales grandes. El empleo de los modelos físicos son adecuados a escalas locales, pero excesivamente caros para escalas muy grandes. Sin embargo los modelos de una línea son los más idóneos a la hora de conocer los cambios de la línea de costa, originados tanto por causas naturales como por efectos de la mano del hombre.

1.3.1 Modelos de evolución morfodinámico en el largo plazo.

El oleaje provoca un transporte del sedimento, transporte longitudinal y transversal, el primero es a lo largo de la costa y el segundo perpendicular a ella.

El transporte longitudinal es el más importante, en cuanto al análisis de cambio de la línea de costa a largo plazo. Es por esto que los modelos de una línea, se representan por el cambio de la línea de costa debido a variaciones de transporte longitudinal de sedimento.

Una de las hipótesis en este tipo de modelos es que el perfil de playa no cambia de forma y solo se traslada paralelamente a sí mismo, hasta la profundidad de cierre. Esto hace que no puedan ser utilizados en escalas

temporales más pequeños, en las que es necesario tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa.

Estos modelos parten de la ecuación de conservación de la masa de sedimento dentro del flujo turbulento (Abbot and Price, 1994).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q$$

Donde:

A: Área transversal del perfil de playa

Q: Transporte longitudinal de sedimento (volumen total por unidad de tiempo)

q: Aporte o pérdida de sedimento (volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo)

El modelo de una línea, es especialmente adecuado para determinar el efecto de espigones, aportaciones puntuales de sedimento, etc. Pero no está capacitado para describir la formación del perfil de playa, determinar los cambios estacionales, ni siquiera la erosión originada por muros de protección o cualquier otro cambio que involucre transporte transversal de sedimento.

Pernald – Considere (1956), fue quien diseñó el primer modelo analítico de evolución de línea de costa. Posteriormente y en base al mismo, se desarrollaron diversos modelos numéricos de una línea, entre los que se destacan el modelo GENESIS (Hanson and Kraus, 1989) y el modelo ONE LINE (Debees and Kamphuis, 1997, 1998; Kamphuis, 1993).

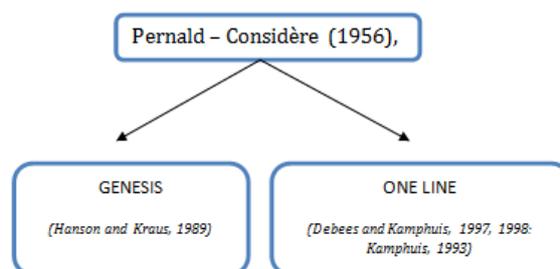


Ilustración 7: Modelos evolución morfoodinámica

Las hipótesis básicas, que comparten la mayoría de los modelos de una línea son las siguientes.

- El perfil de playa adopta una forma invariable en el tiempo y en el espacio, por lo que como se dijo anteriormente, este modelo no es adecuado para reproducir variaciones de la línea de costa a corto plazo. Es fundamental considerar la variabilidad espacial del perfil en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los predominantes para poder representarlos adecuadamente.
- Según Hanson and Kraus 1989, el límite de la costa viene marcado por la elevación de la berma y en el mar por las profundidades de cierre.
- La rotura del oleaje y las corrientes longitudinales, son las acciones por la que se produce un transporte del sedimento.
- No se tiene en cuenta la estructura detallada de la circulación costera.
- Existe suficiente cantidad de arena, asumiendo que el suministro de arena es infinito.

1.3.2 Modelos recientes de evolución de la línea de costa

Modelo GenCade

Es un modelo de una línea desarrollado para acoplar dos modelos de línea de costa previos, el modelos Cascade, de escala regional, el cual se utiliza para cálculos a nivel de planificación (Connell and Kraus, 2006; Larson and Kraus, 2003; Larson et al., 2006 a, b, 2003), y el modelo GENESIS para cálculos a nivel de diseño (Gravens et al., 1991; Hanson and Kraus, 1989), mejorando de esta manera las capacidades de ambos. Esto ha sido posible al introducir una malla de resolución variable.

Fueron únicamente Hanson and Kraus (1986a); Kraus et al. (1984); Kraus and Larson (1988) los que emplearon este tipo de modelos, para así predecir la evolución de la línea de costa en una playa real. Este modelo, fue posteriormente mejorado dando lugar al modelo numérico GENESIS (Hanson and Kraus 1989), haciendo posible poder predecir la línea de costa, en una playa abierta arbitraria.

En cuanto al modelo Cascade es un modelo numérico desarrollado para simular la evolución costera y el transporte de sedimento regional a largo plazo. Este modelo abarca diferentes escalas temporales y espaciales, que van respectivamente desde el largo plazo al corto plazo y desde escalas grandes a escalas pequeñas.

En definitiva, el modelo GenCade, se puede emplear en estudios tanto de escala regional como de escala local, y en escalas temporales que van desde los años a las centenas de años. De este modo se representan los efectos acumulativos a través de la interacción de los proyectos locales a una escala regional.

Uno de sus puntos fuertes es que, a diferencia de otros modelos de una línea, el modelo GenCade puede simular, gracias al acoplamiento del modelo Cascade, el bypass en ensenadas mareales y la evolución de los bajos, los cuales hacen de almacenamiento de arena. Además de simular la erosión y avance de la línea de costa de las playas adyacentes y el bypass entre ambos elementos. Concretamente, el modelo Cascade incorpora el modelo Inlet Reservoir Model (Kraus, 2000) para describir el depósito de sedimento y su transferencia en las ensenadas mareales.

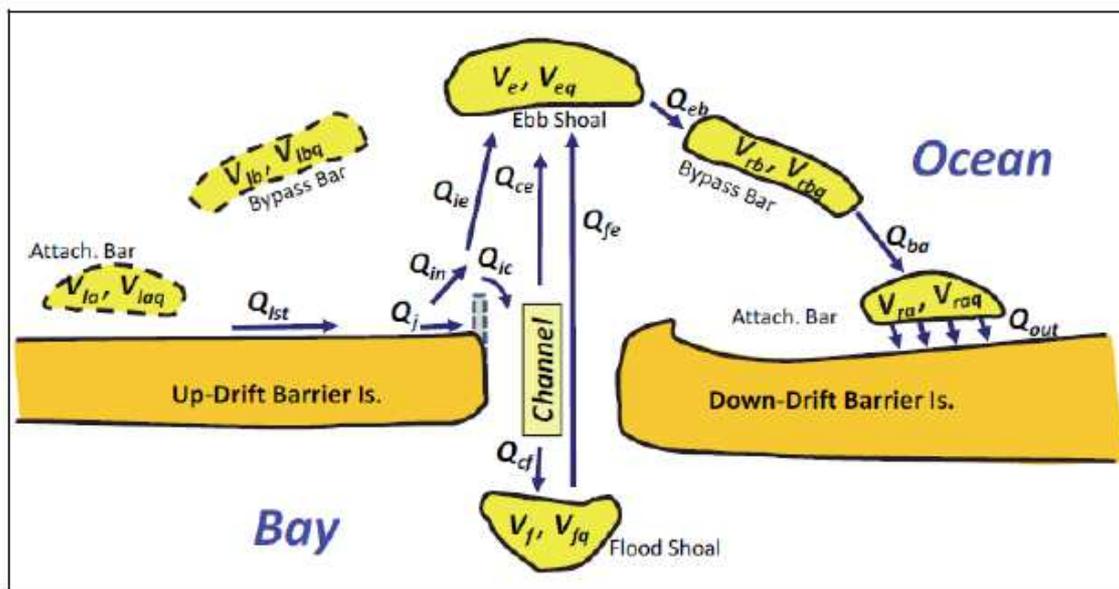


Ilustración 8: Interacción de los elementos morfológicos

Modelo híbrido MIKE21 FM y modelo de una línea

Posteriormente el Instituto Hidráulico Danés, sigue con la línea de investigación de los modelos híbridos, en este caso, se realiza un acoplamiento, por un lado de un modelo de una línea para el cálculo de evolución de la línea de costa, con otro modelo llamado 2DH para el cálculo de oleaje, corrientes y transporte de sedimento con el que describe la evolución morfológica de un área determinada. Gracias a este avance, el modelo resultante es capaz de tener en cuenta la variación de la batimetría en profundidades indefinidas y el efecto de las estructuras costeras en el oleaje y las corrientes.

El modelo de área empleado es el MIKE21 FM. En cada paso de tiempo morfológico, el oleaje espectral es propagado desde un contorno dado en profundidades indefinidas hasta la rotura, la cual origina las corrientes que, junto con el oleaje, generan el transporte de sedimento. El transporte de sedimento en este caso, se considera como una función de la corriente media integrada en vertical y de la altura de ola, periodo y profundidad del oleaje, siendo su dirección la dirección de la corriente media.

Posteriormente, se aplicó este modelo a un caso de estudio de un dique exento en profundidades indefinidas (Dronene et al. 2011). Los resultados mostraron un buen ajuste, tanto cualitativo como cuantitativo, con la morfología medida cuatro años después de la construcción del dique original. Los resultados obtenidos demuestran el potencial que tiene el modelo como herramienta para realizar estudios donde haya que evaluar los cambios experimentados por la línea de costa a largo plazo, por causas antropogénicas o naturales.

Modelo híbrido Delft3D y UNIBEST

En este sistema se integran diferentes técnicas y modelos existentes. De esta forma se podrán realizar los estudios de ingeniería de costera con un enfoque global, considerando de una manera continua las escalas apropiadas.

En primer lugar se desarrolló un modelo híbrido inicial, en el que se han acoplado el modelo de área de escala local Delft3D y el modelo de línea de costa UNIBEST. En el futuro se podrán incluir, además, modelos como el

XBeach, para tener en cuenta las tormentas en el desarrollo morfológico a largo plazo.

El modelo XBeach es un modelo que cubre periodos de tormenta en áreas del orden del kilómetro. Delft3D se aplica para periodos desde ciclos mareales a décadas y aéreas hasta varias decenas de kilómetros. Mientras que UNIBEST se enfoca en escalas temporales que abarcan desde estaciones a siglos y escalas espaciales que cubren todo un sistema costero.

1.3.3 Perfil de equilibrio

Se define perfil de playa como la variación de la profundidad, h , con la distancia a la línea de costa, x , en la dirección normal a ésta: $h = f(x)$ (ilustración 9). Todos los perfiles de playa presentan una forma cóncava hacia arriba. Esta regularidad ha permitido el desarrollo de diferentes expresiones matemáticas que describen el perfil y la introducción del concepto de perfil de equilibrio.

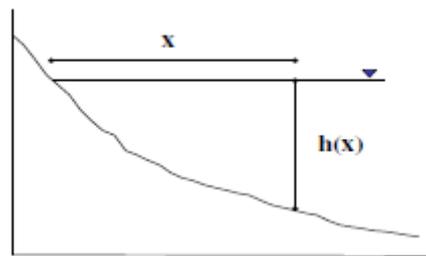


Ilustración 9: Perfil

El concepto de perfil de equilibrio ha sido definido por diferentes autores. La primera mención se debe a Fenneman (1902): Existe un perfil de equilibrio, al cual el agua dará lugar en último término, si se le permite completar su trabajo. Más recientemente, Larson (1991) describió el perfil de equilibrio como: Una playa con un tamaño de grano determinado, expuesta a unas condiciones constantes de oleaje, desarrollará una forma del perfil que no presentará ningún cambio neto con el tiempo. Por lo tanto, cuando un perfil alcanza el equilibrio, existirá un balance de fuerzas en cada punto del perfil, tal que el transporte neto sea nulo.

Según estas definiciones, la existencia de un perfil de equilibrio en la Naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes

de los distintos agentes dinámicos. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde las condiciones están controladas. Sin embargo, tal y como indicaba González (1995), las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, marea, tamaño de grano) en una playa están acotadas, por lo que la variabilidad del perfil está limitada, pudiéndose definir un estado modal o más frecuente, que consideramos como el perfil de equilibrio de la playa. Este concepto podrá aplicarse a cualquier línea de costa para describir las características generales del perfil de playa real. Por tanto, definirá el equilibrio dinámico que existe cuando el perfil de playa varía continuamente en respuesta a las condiciones de la zona de rompientes.

Actualmente, el modelo de perfil de equilibrio más utilizado es el conocido perfil de Dean, probablemente por su simplicidad matemática, además de por haber sido ajustado a un número elevado de perfiles de playa. Dean (1977) ajusta el perfil de una playa a través de una expresión potencial donde la única variable es el llamado parámetro A, que Dean (1987) definió como una función del tamaño de grano:

$$h = A * X^{2/3}$$

$$A = 0.51 * w^{0.44}$$

siendo h la profundidad respecto al nivel medio en reposo, x la distancia horizontal desde la línea de costa, A un parámetro dimensional de forma, dependiente de las características del sedimento y w la velocidad de caída de grano.

1.3.4. Modelado de la línea de costa considerando la variabilidad en el oleaje y el balance de sedimento a largo plazo

Un modelo aplicado en la misma costa de nuestro trabajo, consiste en un análisis integrado de datos y un esquema de modelización que define la evolución de la costa a lo largo de una celda litoral noroeste del Pacífico de los Estados Unidos, esta es altamente dependiente tanto del suministro de sedimentos como de la variabilidad del clima ondulatorio. En particular, las estimaciones precisas del suministro de sedimentos y la alimentación de

sedimentos de la parte baja de la costa son componentes críticas para equilibrar el balance de sedimentos de playa y, por lo tanto, son esenciales para hacer cambios y previsiones sensatas. Un simple modelo de cambio determinista de una línea de costa, aplicado de manera cuasi probabilística, permite evaluar la influencia de la oferta de sedimentos y la variabilidad del clima de las olas a través de la simulación del cambio histórico de la costa.

A través de la iteración, se desarrollan una serie de escenarios realistas para restringir las predicciones del cambio de la costa cada diez años. Los cambios de la costa son significativamente sensibles a los cambios direccionales en las ondas incidentes, y por lo tanto sensible a la ocurrencia de fluctuaciones climáticas interanuales como los principales eventos de El Niño. Un aumento previsto en la intensidad del clima de las olas del Pacífico oriental (aumento de 1,0 m d la altura de ola significativa en 20 años) afecta a los pronósticos en las posiciones de la costa sólo cuando este aumento ocurre durante la temporada de tormentas de invierno. Sin embargo, el efecto de este aumento en la fuerza de la tormenta durante un año dado es pequeño

En relación con el impacto de los principales eventos de El Niño. El modelo tiene habilidad significativa en hindcasts cada diez años, lo que sugiere que los gradientes en el transporte sedimentario dominan el cambio costero a esta escala en este sitio.

Sin embargo, tanto los datos como los resultados de los modelos sugieren que la alimentación neta en tierra de la parte baja de la costa es responsable de aproximadamente el 20% del cambio costero a escala de la costa. Las mediciones de campo y la escasa habilidad del modelo a escala anual indican que los procesos cruzados probablemente dominan el cambio costero en escalas de tiempo más cortas.

1.3.5 Conclusiones

Del análisis del estado del arte se deduce que la línea de investigación más idónea a la hora de desarrollar un modelo numérico aplicable en el medio-largo plazo, para evaluar cambios de la línea de costa debido a actividades ingenieriles, es el desarrollo de un modelo híbrido en el que se combinen varios modelos. De hecho, ésta es la línea que se está siguiendo en la actualidad en otras universidades y centros de investigación.

Hasta no hace mucho tiempo, las herramientas predictivas se desarrollaban para cubrir escalas espaciales y temporales muy específicas, con un rango de aplicación limitado. Sin embargo, la tendencia actual ya no se centra en mejorar los modelos individualmente, sino en desarrollar un sistema en el que se integren distintos modelos para, de esta manera, considerar los procesos de pequeña escala en escalas espacio-temporales grandes.

El modelo GenCade representa de una manera simplificada el oleaje en las zonas donde los procesos de refracción-difracción son importantes conjuntamente (diques exentos, salientes, cabos,...), dando lugar en estos casos a una predicción de la línea de costa no del todo acertada. Además, la versión actual de este modelo no puede simular el cambio de la línea de costa producido por transporte transversal de sedimento, aunque se podrá realizar en versiones futuras, ya que se está incluyendo el cálculo matemático de varios procesos transversales.

Por otra parte, el modelo híbrido Delft3D y UNIBEST es un modelo básico que sirve como punto de partida, por lo que aún quedan mejoras y procesos que implementar. Se ha visto que algunos parámetros requieren un estudio más exhaustivo, para comprobar si los resultados obtenidos en los casos de estudio son realistas. Además, para calcular las condiciones de oleaje cerca de la costa emplea el modelo de propagación de oleaje SWAN, el cuál no proporciona buenos resultados en geometrías complejas donde la difracción es el fenómeno predominante, puesto que no es capaz de reproducirla en un sentido estricto.

1.4 OBJETIVOS

En base al estudio del conocimiento, el objetivo de este estudio es mejorar la predicción de los cambios de la línea de costa a lo largo del tiempo.

En definitiva, es definir en qué medida y con qué está relacionada la variabilidad de la línea de costa, así como la forma en planta que va adquiriendo a lo largo de los años.

Para este análisis, se han definido los siguientes objetivos:

- Definición de un modelo que permita estimar el balance de sedimento en la playa, en una escala temporal.

- Analizar la forma en planta de la línea de costa debido al balance de sedimento estimado en el modelo.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESINA

Este trabajo de investigación, esta dividió en 6 Capítulos y un anejo, estructurados de la siguiente forma:

En el primer capítulo, analizamos la motivación del estudio, la ubicación, la problemática que existe en la playa, también se realiza un análisis de los estudios anteriores que tengan que ver con el presente trabajo, como distintos modelos de predicción de la línea de costa así como distintas hipótesis que se plantean para ejecutar los distintos modelos y por último se definen los objetivos del trabajo.

Posteriormente, se definen todos los datos de partida que hemos tenido que utilizar para hacer posible este estudio de investigación, así como su tratamiento para poder realizar los cálculos convenientes, estos datos de partida son las campañas de campo, los índices climáticos y los campos de presiones.

En el capítulo 3 se ha explicado cual ha sido la metodología a seguir en el análisis apoyándonos en un diagrama de flujo, se ha definido el análisis en componentes principales de los campos de presiones y también los cálculos realizados para realizar la calibración del modelo.

Una vez definido el proceso de calibración del modelo, en el capítulo 4 se han representado los resultados de la calibración y la validación.

En el penúltimo capítulo se muestran los resultados que se han calculado con ayuda de un modelo OneLine, donde podemos ver la forma que adoptaría la línea de costa. Para ello se han introducido unas condiciones de contorno, las cuales son el resultado de la calibración anterior.

En el sexto y último capítulo, se definen las conclusiones del trabajo realizado.

También se muestran en los anejos, algunos de los script que se han realizado para los cálculos con Matlab, y así poder llevar a cabo el trabajo.

2. DATOS DE PARTIDA

2. DATOS DE PARTIDA

2.1 CAMPAÑAS DE CAMPO

La toma de datos de la costa se ha tomado en 14 transectos desde 2004 a 2014, todas ellas son medidas estacionales usando GPS del tipo "Real Time Kinematic" (RTK). Esta es una técnica usada para topografía y navegación marina, basada en el uso de medidas de fase de navegadores con señales GPS, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo así una exactitud submétrica.

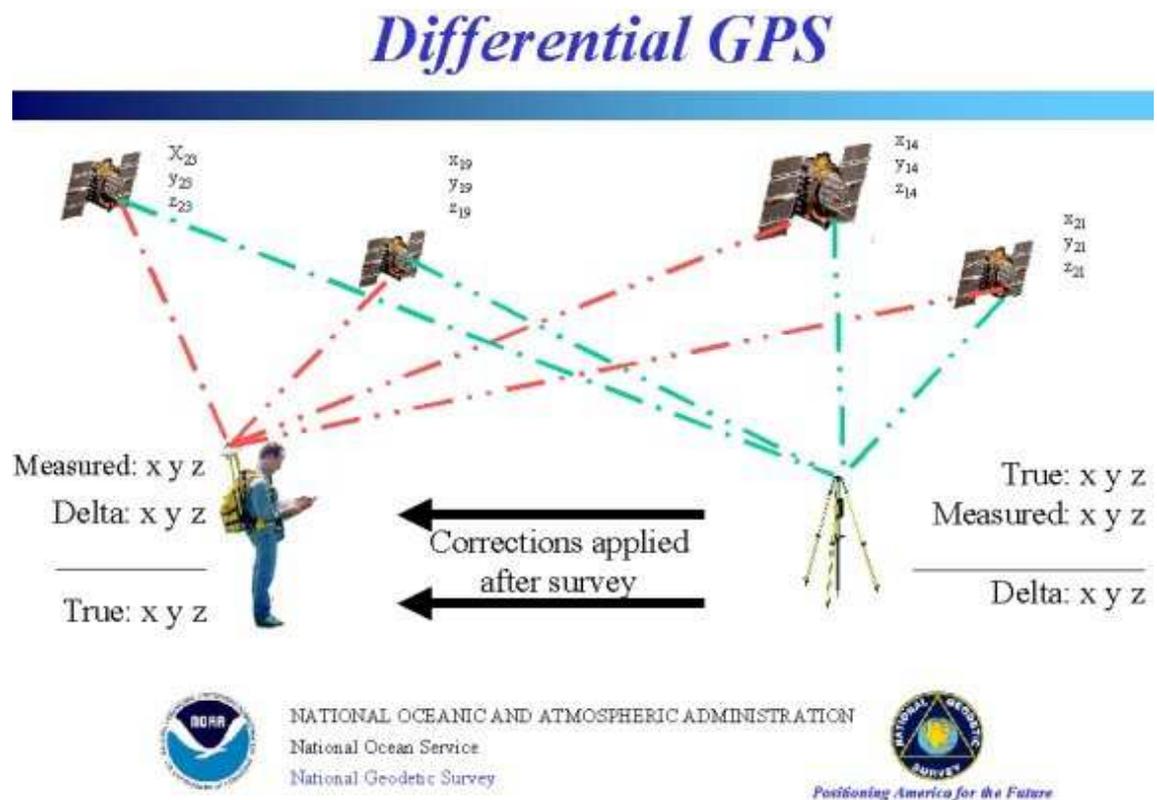


Ilustración 10: GPS

La playa donde se han tomado las campañas de campo es la citada playa "North Beach", la cuál podemos ver en la siguiente ilustración.

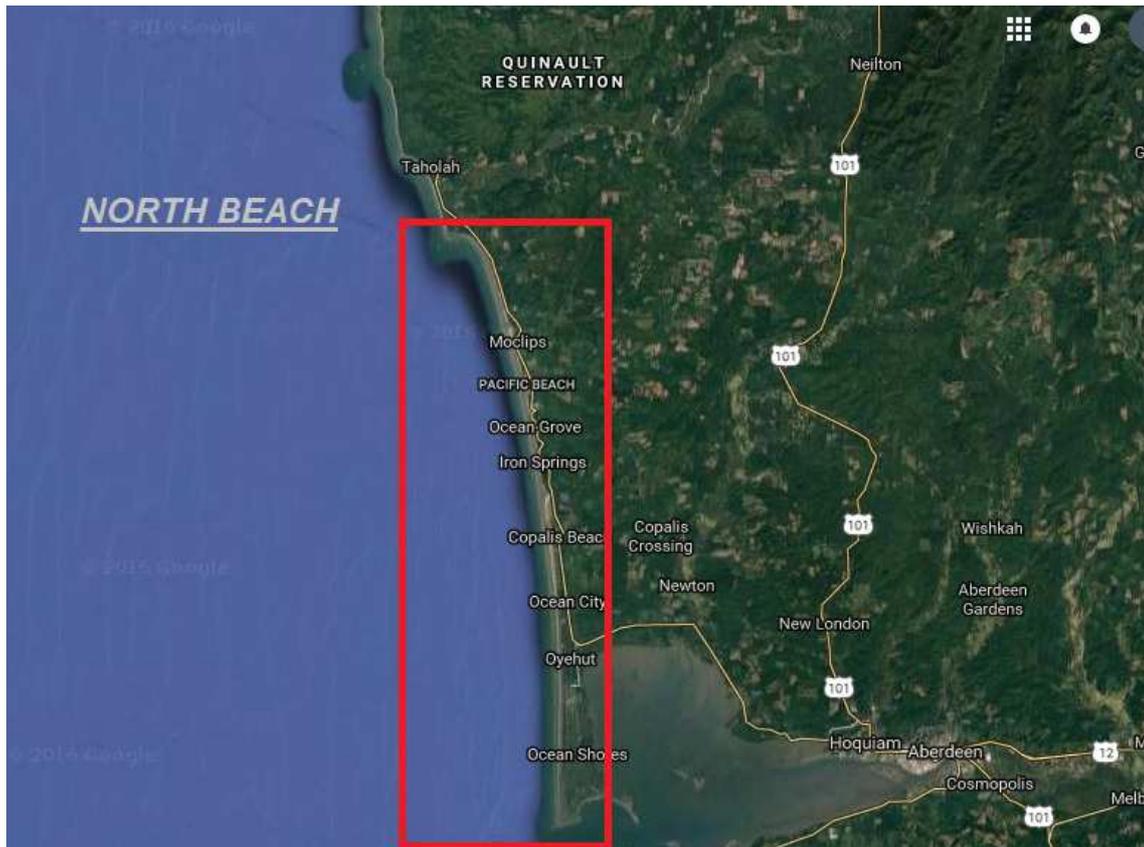


Ilustración 11: North Beach



Ilustración 12: North Beach

Tras el tratamiento de los datos tomados en las campañas, se han representado las variaciones de línea de costa en el tiempo, como puede verse en las ilustraciones 13 y 14. Así se puede ver de forma más intuitiva las variaciones de la línea de costa entre campañas.

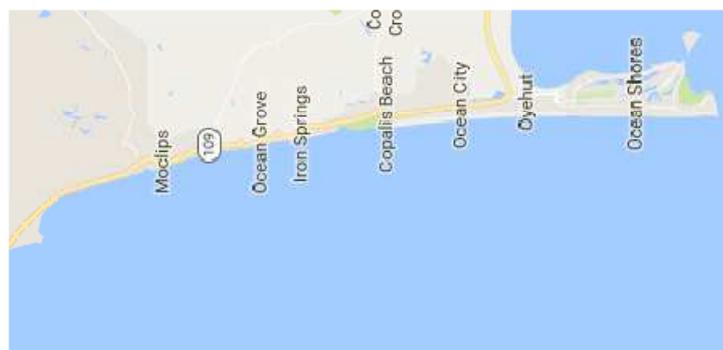
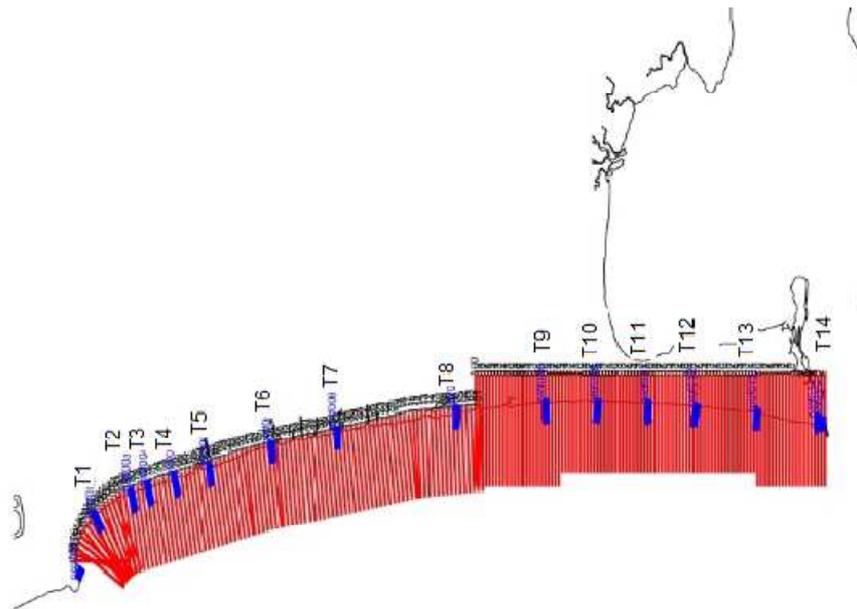


Ilustración 13: Transectos tomados en la playa

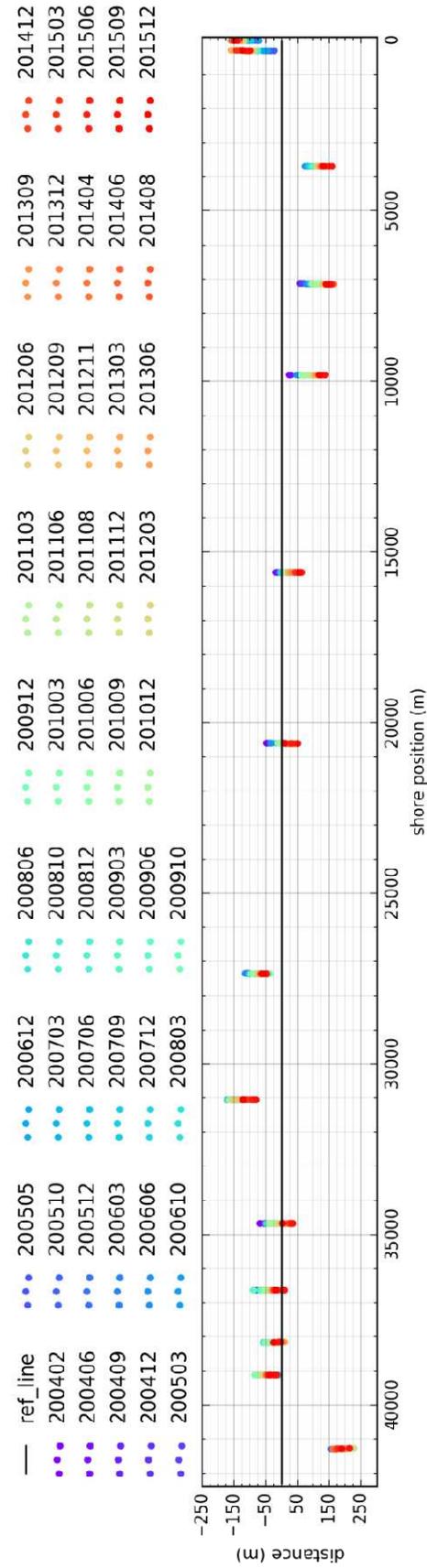


Ilustración 14: Variabilidad de la costa

2.2 INDICES CLIMATICOS (PNA)

Un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático (ilustración 15). El clima de un sitio en particular es el estado promedio de la atmósfera durante un período prolongado de tiempo por lo que los cambios en el clima son mucho más lentos que los del estado del tiempo ya que éste puede cambiar bruscamente día con día. Los primeros índices climáticos se definieron hace aproximadamente un siglo, como es el caso de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), el primer patrón de teleconexión detectado. Los índices climáticos permiten realizar análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias.



Ilustración 15: Índices climáticos

El proceso utilizado para el cálculo de los índices diarios de teleconexiones PNA, está basado en las "Rotated Principal Component" (RPCA) utilizados por Barnston y Livezey (1987, Mon. Wea. Rev., 115, 1083-1126). Este procedimiento aísla los patrones primarios de teleconexión para todos los meses y permite que se construyan series temporales de los patrones.

Los patrones mensuales de teleconexión ahora se interpolan linealmente al día en cuestión, y por lo tanto representan la estacionalidad inherente en el PNA. Hoy en día se calculan las anomalías estandarizadas basadas en la media diaria y la desviación estándar climatológica.

Wallace y Gutzler (1981) definieron el índice como resultado de la siguiente ecuación:

$$PNA = 0.25 * [Z(20^{\circ}N,160^{\circ}O) - Z(45^{\circ}N,165^{\circ}O) + Z(55^{\circ}N,115^{\circ}O) - Z(30^{\circ}N,85^{\circ}O)]$$

Donde Z son los valores estandarizados de la altura geopotencial de 500 hPa.

- Fase positiva: La altura geopotencial sobre el oeste de EE.UU. se encuentra por arriba de lo normal en tanto que sobre el este, está por debajo de ese valor, lo que produce una elevación sobre el oeste y una profunda depresión sobre el este. El resultado neto de este patrón es que el aire frío que se encuentra en Canadá es desplazado hacia el suroeste, lo que resulta en temperaturas por debajo de lo normal sobre el este de EE.UU. y por arriba de ese valor sobre el oeste de EE.UU.

- Fase negativa: Se caracteriza porque la altitud geopotencial sobre el oeste de EE.UU. es inferior a la normal y por lo tanto, por arriba de lo normal sobre el este de ese país. Como resultado las temperaturas promedio en el oeste están debajo de lo normal y por arriba, en el este de EE.UU.

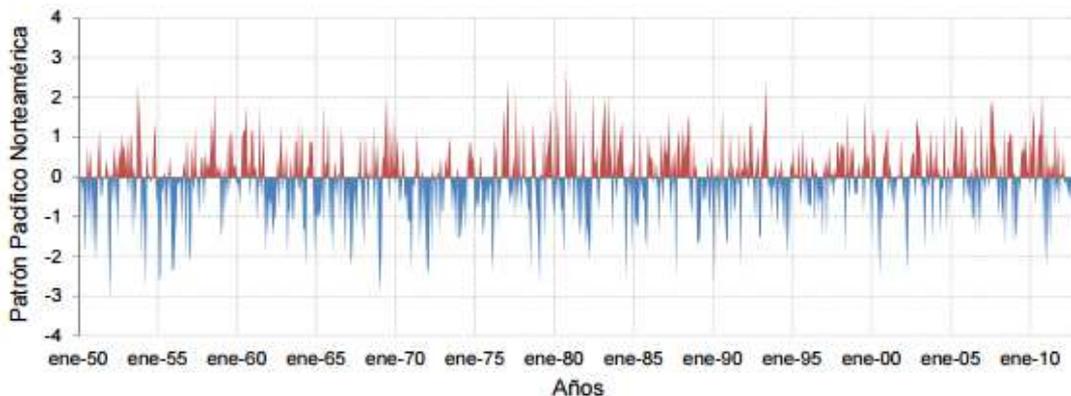


Ilustración 16:PNA , describe las variaciones en la circulación atmosférica sobre el Océano Pacífico y Norteamérica.

Los índices climáticos utilizados en este trabajo se han obtenido del centro de predicción climática.

2.3. CAMPOS DE PRESIONES

Las variaciones de la presión atmosférica diarias en superficie no son tan perceptibles, como lo es por ejemplo la temperatura, la precipitación, la humedad relativa o el viento. Sin embargo, la presión tiene muchísima importancia en las variaciones diarias del tiempo, ya que genera los vientos, que a su vez producen variaciones de la temperatura y cambios en el estado de mar.

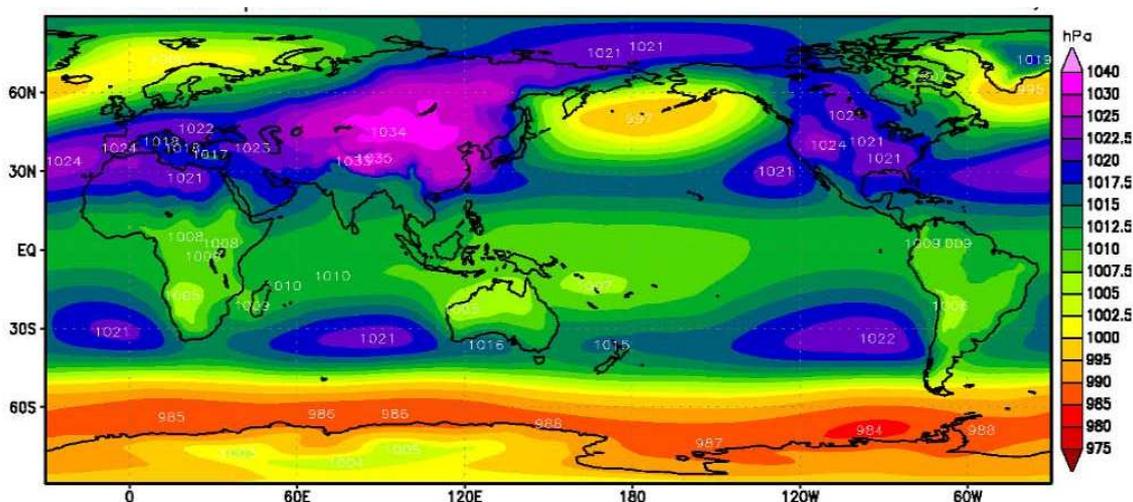


Ilustración 17: Campos de presiones en superficie

Cuando el aire está frío, desciende haciendo aumentar la presión y provocando un anticiclón, esto se define como una zona atmosférica de alta presión, en la cual la presión atmosférica es superior a la del aire circundante. El aire de un anticiclón es más estable que el aire que le circunda y desciende sobre el suelo desde las capas altas de la atmósfera produciéndose un fenómeno denominado subsidencia. La circulación del aire en el interior de un anticiclón, es en el hemisferio norte, en el sentido de las manecillas del reloj, y en el hemisferio sur en sentido contrario a las manecillas del reloj. El sentido de giro del aire es pues inverso al que se da en un ciclón o borrasca. El ciclón por el contrario, se atribuye a áreas del planeta en las cuales la presión atmosférica es baja.

Los ciclones y anticiclones tienen una importancia fundamental en la generación de los vientos o corrientes atmosféricas. En efecto, un área de

bajas presiones genera vientos al atraer las masas de aire atmosférico desde las zonas de altas presiones o anticiclónicas.

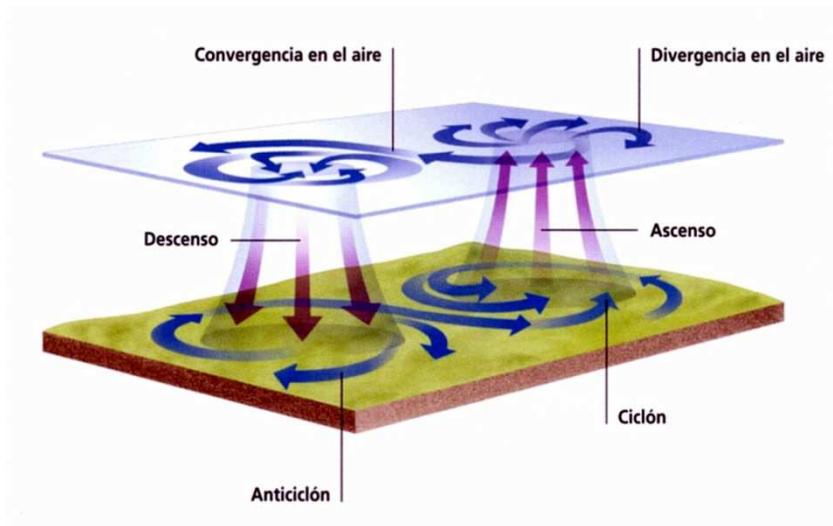


Ilustración 18: Campos de presiones

Los campos de presiones en el Océano Pacífico, han tenido un papel fundamental para el presente estudio. Este conjunto de datos, se ha obtenido a partir de un análisis 20CR (Compo, G.P. & coauthors, 2011). Consiste en definir un conjunto de datos sobre la circulación atmosférica en el siglo XX, teniendo en cuenta la presión superficial, la temperatura mensual y las distribuciones de hielo marino como condiciones de contorno. La principal intención es la necesidad de proporcionar un conjunto de datos de observaciones con incertidumbre cuantificadas para las validaciones de simulaciones de modelos climáticos en todas las escalas de tiempo, pero si principalmente en las estadísticas del clima diario.

El conjunto de datos 20CR proporciona las primeras estimaciones de la variabilidad troposférica global y de la calidad que varía en el tiempo del conjunto de datos, desde 1871 hasta nuestros días, con resoluciones temporales de 6 horas 2^0 espaciales. Este reanálisis se puede obtener, de la "Earth System Research Laboratory" (ESRL), perteneciente a "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA).

3. METODOLOGIA

3. METODOLOGIA

3.1 PLANTEAMIENTO GENERAL

La metodología del estudio del presente trabajo, parte de una selección y pretratamiento de las bases de datos, para la calibración y validación con modelos estadísticos y numéricos

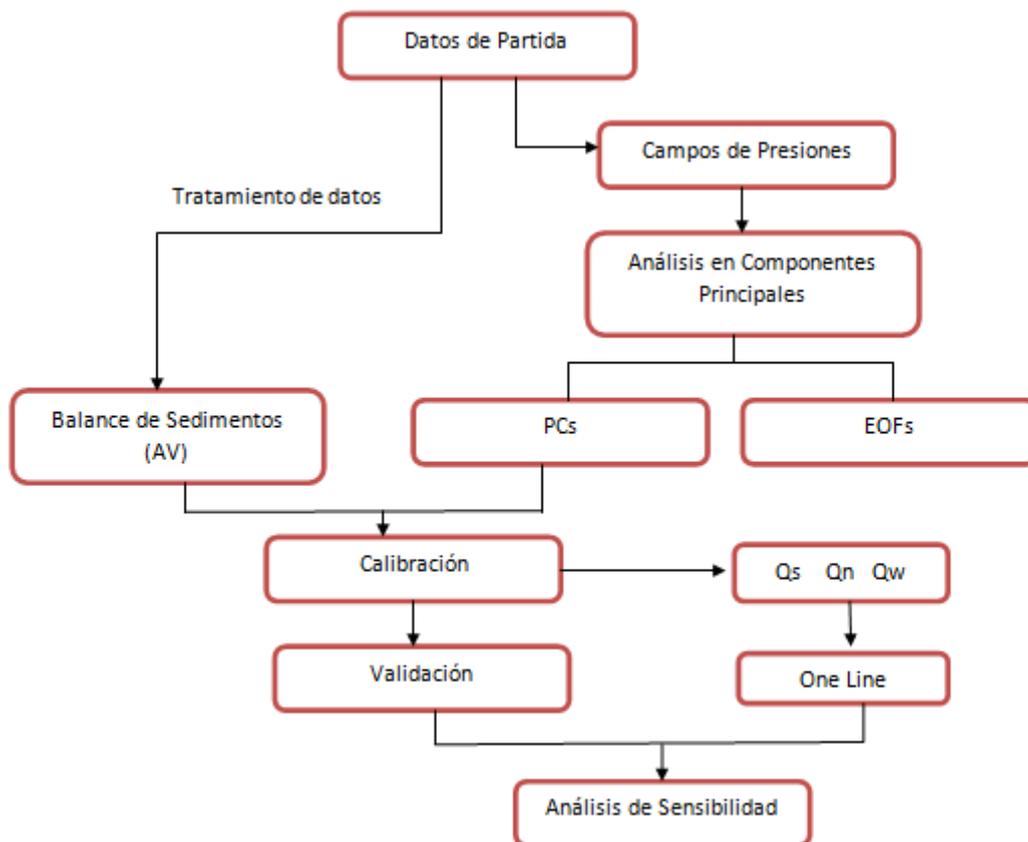


Ilustración 19: Diagrama Flujo

3.2 BALANCE DE SEDIMENTO

El establecimiento del balance sedimentario de una playa es fundamentalmente desde el punto de vista del desarrollo de los sistemas dunares costeros, puesto que permiten determinar si el sistema es regresivo, está en equilibrio o es progradante. En el caso de un sistema regresivo, la costa se verá sometida a un proceso de retroceso, con una erosión

progresiva durante los temporales y las mareas vivas. En el caso que este en equilibrio se mantendrá una playa seca con un transporte eólico hacia las dunas, compensado por periodos de erosión de temporales. Y en el caso de un balance sedimentario positivo, la continua aportación de sedimento a la playa seca combinado con el transporte eólico en la misma, va produciendo un avance de la línea de costa hacia el mar.

El balance sedimentario es un computo en términos de macro escala, de los aportes y perdidas existentes en la zona de estudio. Este cómputo ha de ser tal que permita establecer condiciones de contorno de los modelos de evolución, en el caso de playas abiertas.

Las fuentes de sedimento que producen una progradación en la playa pueden ser:

- Erosión de acantilados
- Aportes fluviales
- Aportes de plataforma continental
- Aportes debidos al viento
- Aportes humanos

Entre los sumideros usuales:

- Sedimentación en estuarios, puertos y otras estructuras.
- Sedimentación en el trasdós de la playa por el viento y/o por oleaje.
- Transporte hacia la plataforma continental
- Descomposición de la arena.
- Extracción por el hombre.

Los mecanismos de transporte fundamental a considerar son:

- Transporte longitudinal debido al oleaje
- Transporte transversal debido al oleaje
- Transporte debido a la acción de corrientes de marea y viento
- Transporte eólico
- Transporte por el hombre

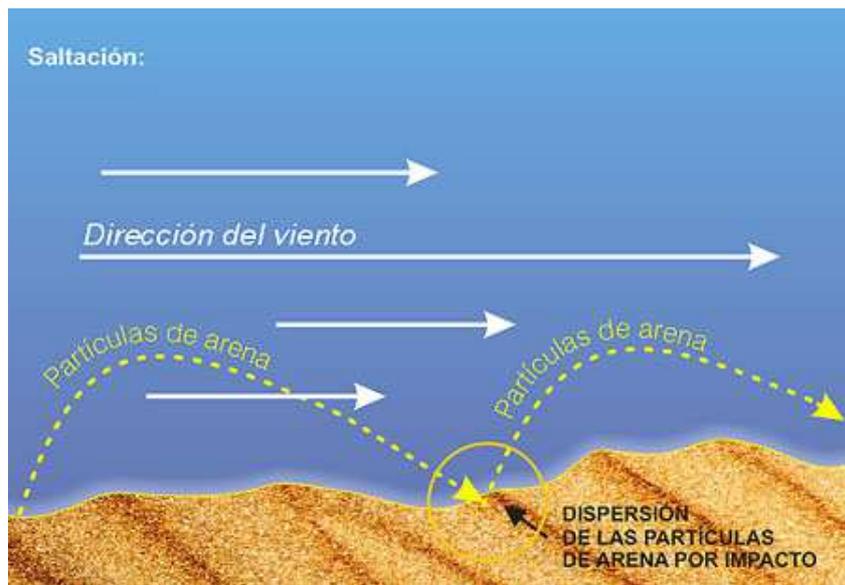


Ilustración 20: Saltación

Es importante definir, cual es el mecanismo del transporte longitudinal del sedimento (Komar 1971), ya que es fundamental para entender cómo funciona la playa.

Para la predicción de tasas de transporte de sedimentos se tiene en cuenta la tasa potencial de transporte de peso sumergido, I_l , y la tasa potencial de transporte volumétrica, Q_l , que es la empleada en aplicaciones ingenieriles.

La tasa de transporte potencial de sedimento sumergido se define como:

$$I_l = (\rho_s - \rho)g(1 - n)Q_l$$

Donde,

ρ_s : Densidad del sedimento

ρ : Densidad del agua del mar

g : Aceleración gravitacional

n : Porosidad

$(1-n)Q_l$: volumen solido de transporte

La ecuación del CERC (Coastal Engineering Research Center), relaciona la tasa de transporte de peso sumergido con la componente longitudinal del flujo de energía por unidad longitudinal de playa, P_l .

$$P_l = (E * c_g)_b * \sin\alpha_b * \cos\alpha_b$$

Donde E_b es la energía evaluada en la línea de rotura:

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8}$$

Y C_{g_b} es la celeridad de grupo en la línea de rotura, relacionada con la celeridad C , utilizando la teoría de onda lineal para pequeñas profundidades, de la forma:

$$C_{g_b} = \sqrt{g * h_b}$$

El término $(E * c_g)_b$ es el flujo de energía del oleaje evaluado en zonas de rotura.

La tasa de transporte de sedimento sumergido, I_l , tiene las mismas unidades que el flujo de energía por unidad de longitud de playa, con lo que se obtiene la siguiente relación, denominada "ecuación del CERC"

$$I_l = K * P_l$$

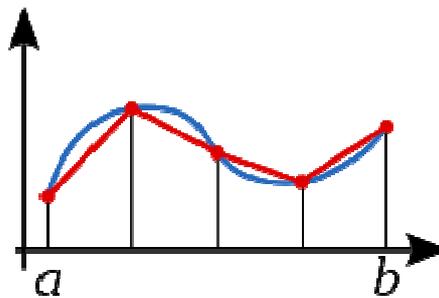
Que deriva en:

$$Q = K_1 * \frac{\rho \sqrt{g}}{16 \sqrt{\frac{H_{bs}}{h_b}} (\rho_s - \rho) (1 - n)} H_{brms}^{5/2} * \sin(2\alpha_b)$$

Siendo K_1 un coeficiente empírico tratado como un parámetro de calibración, H_{bs} la altura de ola significativa en rotura, H_{brms} , la altura de ola cuadrática media en rotura, ρ_s la densidad del sedimento, ρ la densidad del agua, n la porosidad del sedimento, g la aceleración debida a la gravedad y α_b el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa.

El cálculo que se ha llevado a cabo para obtener el balance de sedimentos entre diferentes campañas se ha realizado mediante la ayuda del software Matlab, se han calculado por la regla del trapecio compuesto.

La regla del trapecio compuesto o regla de los trapecios es una forma de aproximar una integral definida utilizando n trapecios. En la formulación de este método se supone que $Y(x)$ es continua y positiva en el intervalo $[a, b]$.



De tal modo la integral definida representa el área de la región delimitada por la gráfica de $Y(x)$ y el eje x , desde $x=a$ hasta $x=b$. Primero se divide el intervalo $[a,b]$ en n subintervalos, cada uno de ancho $\Delta x = (b - a)/n$.

$$Area = \int_a^b Y(x)dx$$

En definitiva, se han calculado las distintas áreas, limitadas, por la propia línea de costa, los transectos, y una línea de referencia.

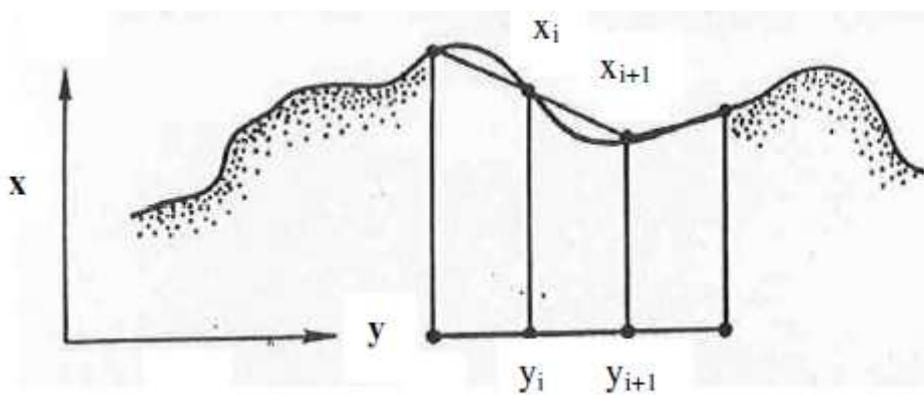


Ilustración 21: Método del trapecio, aplicado en la costa

Teniendo las distintas coordenadas de la línea de costa en cada transecto en el tiempo, se ha calculado la integral de la coordenada "Y" con respecto a la coordenada "X".

Hecho esto, se han obtenido las diferentes medidas de área de esta subcelda para cada campaña, y posteriormente se ha calculado la diferencia entre estas áreas en el tiempo, para así definir el balance de sedimento, teniendo en cuenta la altura de la berma y la profundidad de cierre.

Se ha tenido en cuenta, no solamente los intercambios de sedimento por los contornos de nuestra subcelda litoral, sino también las variaciones de sedimento interna entre unidades morfológicas de menor escala, las cuales intercambian sedimento con el frente de playa (transporte eólico hacia dunas, variabilidad estacional de las barra).

3.3 ANÁLISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES

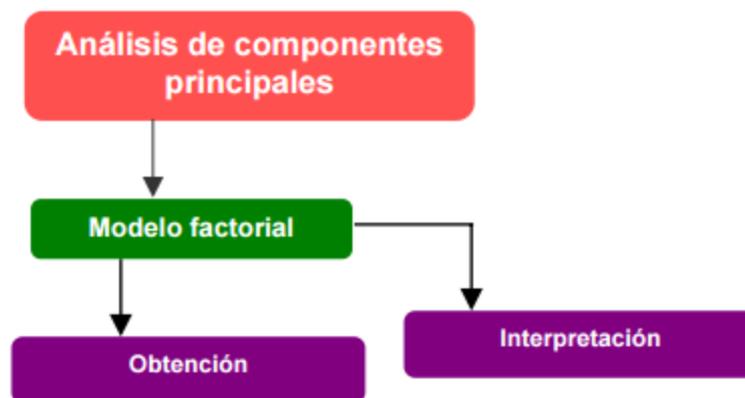


Ilustración 22: Análisis Componentes Principales

Se aplica un Análisis en Componentes Principales (PCA) a los campos de presiones en la superficie (Sea Level Pressure "SLP"), basados en el reanálisis 20CR. Con el PCA se pretende obtener la variabilidad espacial significativa, es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. Este análisis en componentes principales muestra los llamados "Empirical Orthogonal Function" (EOF) y sus correspondientes coeficientes temporales (PCs). El PCA es una técnica, la cual permite:

- Eliminar la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad posible.
- Comprimir datos
- Proyectar los datos, en un nuevo espacio de dimensión menor que el original.

Gracias al análisis en componentes principales, se ha podido reducir la dimensionalidad de los campos de presiones mientras se mantiene la máxima varianza de datos, esto ha sido una gran ventaja cuando hemos analizado la correlación con el balance de sedimento calculado por las campañas, ya que en un principio se utilizó el PNA, y el ruido de éste no nos permitía ver la relación.

El PCA construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal (PC1)), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales.

En la siguiente imagen podemos ver la PCA de una distribución normal multivariante. Los vectores muestran los autovectores de la matriz de correlación escalados mediante la raíz cuadrada del correspondiente autovalor, y desplazados para que su origen coincida con la media estadística.

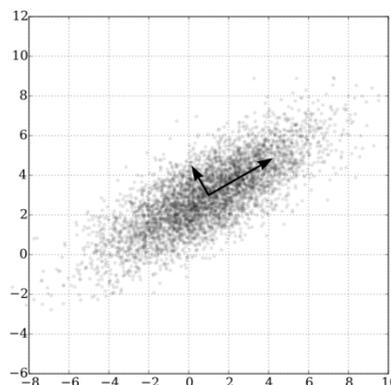


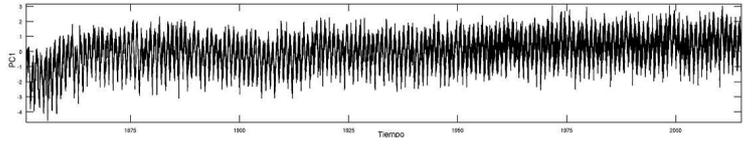
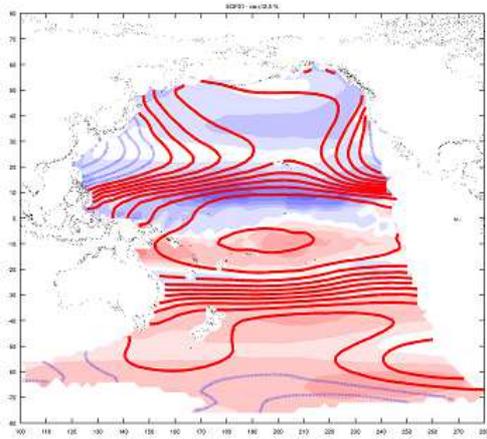
Ilustración 23:PCA

En nuestro trabajo los primeros **26** modos del análisis (explican el 55% de la varianza), son seleccionados como un predictor para el balance de sedimento. La covariable que asociada al primer modo se expresa matemáticamente como PC1, ésta es normalmente la PC más significativa.

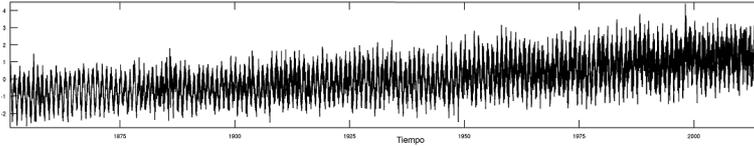
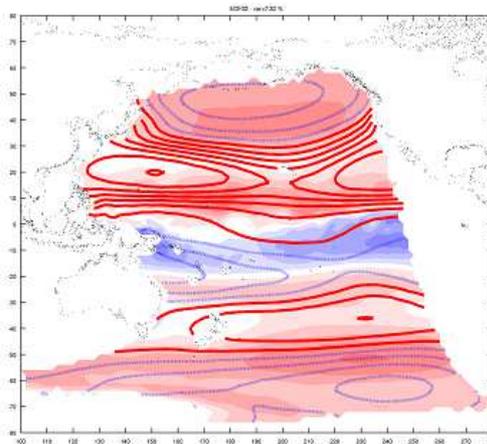
Los EOF, son los autovectores de la matriz de covarianza y son estructuras espaciales y ortogonales en el espacio. Cada EOF pertenece a una PC. EOF1 a PC1, EOF2 a PC2 y así sucesivamente.

$$X(x, y, t) = \sum PC(t) * EOF(x, y)$$

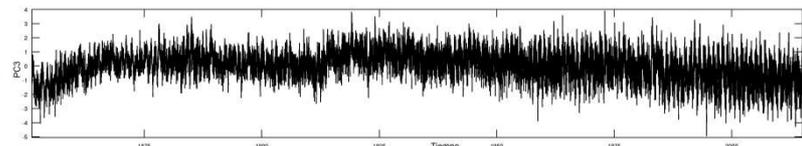
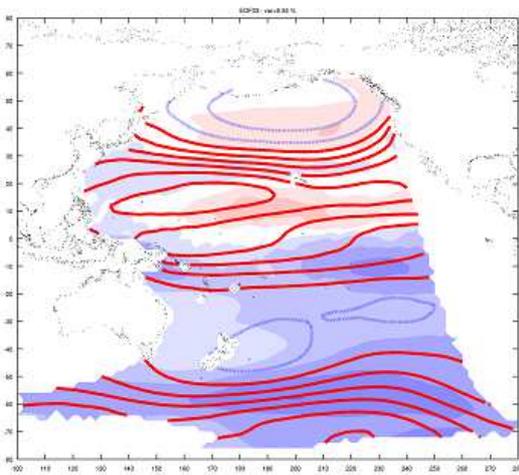
En las siguientes imágenes, podemos ver de una forma más gráfica, en qué consiste la operación anterior ($\sum PC(t) * EOF(x, y)$), la cuál nos da como resultado la variabilidad espacial significativa.

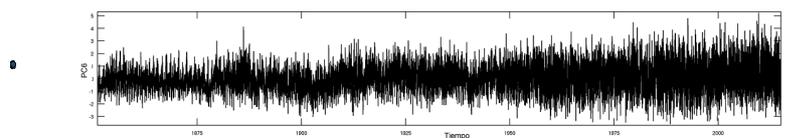
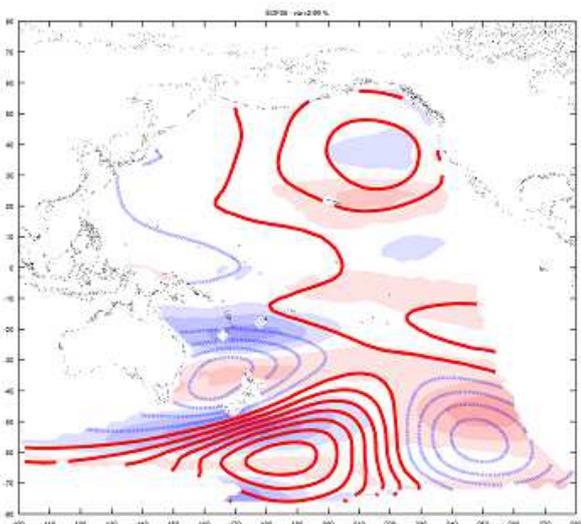
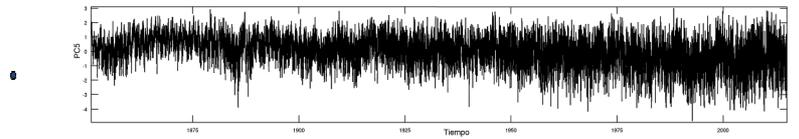
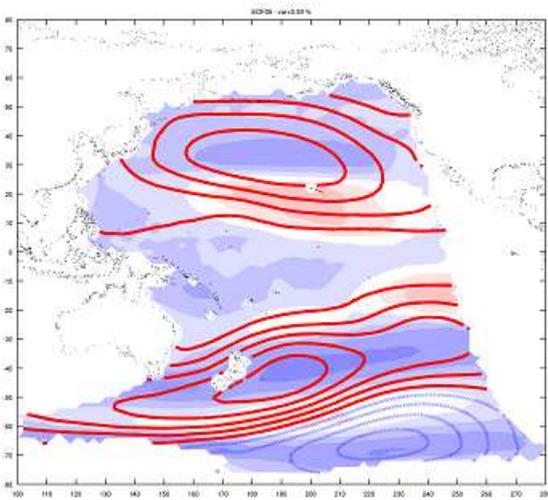
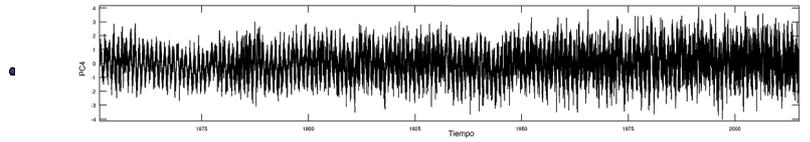
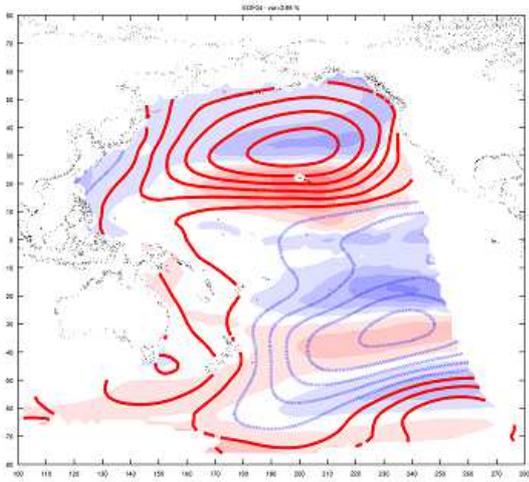


+



+





3.4 CALIBRACION DEL MODELO

El objetivo de este modelo es obtener una tendencia significativa de la línea de costa a lo largo de los años, fundamentados en los índices predictivos, que expliquen una gran variabilidad, para así poder caracterizar el balance de sedimento adecuadamente.

La parametrización del modelo consiste en realizar una estimación con los datos de partida, como son las PCs y el balance de sedimento en el tiempo.

El modelo, se definió finalmente con las PCs integradas, ya que tras largas comprobaciones con las PCs sin integrar no se vio un resultado que pudiera interpretar la predicción de forma adecuada.

En cuanto al predictor, la integración de las PCs se ha realizado entre campañas, es decir, se han integrado todas las PCs en un intervalo de tiempo delimitado por dos campañas consecutivas.

$$X = \int_i^{i+1} PCS(x)dx$$

Donde:

i= campaña de datos.

Posteriormente, se han calculado unos coeficientes de regresión, los cuales son los coeficientes que afectan a las PCs del modelo. Sabiendo estos coeficientes de regresión, ya está la calibración del modelo definida.

Se han tenido en cuenta varios errores, los cuales definiremos a continuación:

Bias: Define cuan de desviados están los datos de nuestro trabajo

RMS: Error Medio Cuadrático. Siendo la suma residual de cuadrados, dividida por el numero de grados de libertad.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(X - Y)^2}{n}}$$

Rho: Coeficiente de correlación, índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

$$rho = \sqrt{\frac{\sum(X - Ym)^2}{\sum((Y - X)^2 + (X - Ym)^2)}}$$

SI: Índice de Dispersión (Scatter Index), muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos.

$$SI = \frac{RMS}{Xm}$$

Donde:

X: PCs

Y: Balance de sedimento

En definitiva, tras hacer todos los cálculos anteriores, se define el modelo de regresión multivariable.

$$\Delta V = a_0 + a_1 * PC_1 + a_2 * PC_2 + a_3 * PC_3 \dots + a_n * PC_n$$

Una vez, hecha la calibración, se validara el modelo, para ver que la calibración es adecuada.

Posterior a la validación se han calculado la diferencia de volumen mensual de sedimento que hay en la playa (ΔV), y con esto las distintas aportaciones de sedimento procedentes del sur, norte y oeste a partir del ΔV .

Para el cálculo del balance de sedimento que llega a la playa, nos hemos basado en el modelo de condiciones de contorno que ha sido definido a partir de la integración del aporte de sedimento definido por Kaminsky (2001).

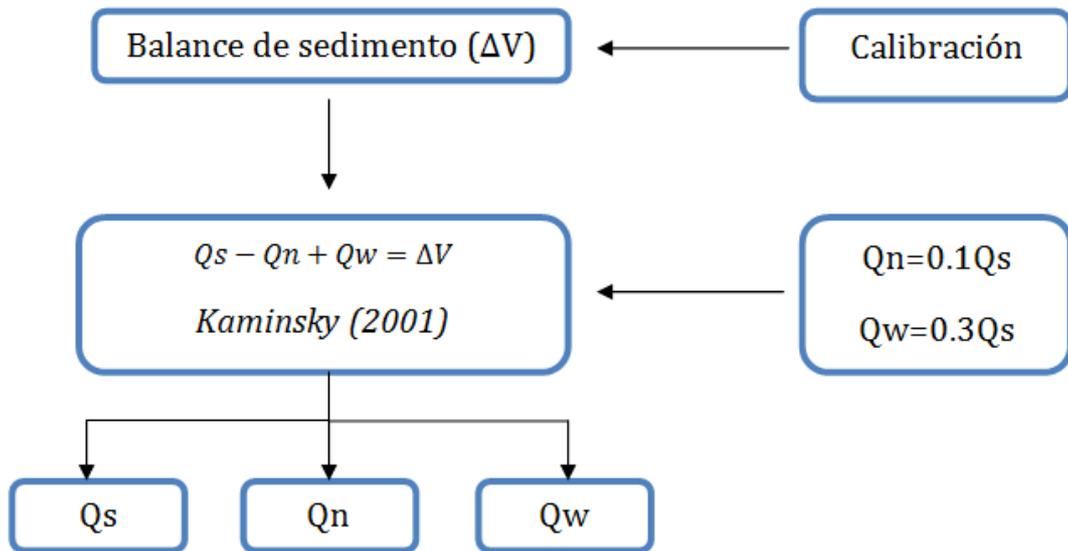


Ilustración 24: Calculo Condiciones Contorno



Ilustración 25: Condiciones de contorno

3.5 MODELO DE EVOLUCIÓN MORFODINAMICO.

Un modelo de línea de costa es un modelo de predicción numérica basado en la ecuación de continuidad del sedimento y en una ecuación para el transporte longitudinal de sedimentos. Se denomina también Teoría de Una Línea (One Line Theory, OLT) para la predicción de la línea de costa, donde "Una Línea" se refiere a la línea de costa.

El movimiento de sedimentos causado por el oleaje puede ser clasificado en dos tipos, según su dirección: Transporte longitudinal, a lo largo de la línea de costa, y transporte transversal, perpendicular a ella. Salvo en determinados casos como puede ser la caída del sedimento en cañones submarinos, o el transporte de sedimento hacia tierra por el viento, a largo plazo, el transporte transversal está confinado en una franja de costa. Esta franja está limitada entre la línea de máximo ascenso en el período invernal (cuando la playa se encuentra en estado disipativo) y la zona donde el oleaje ya no es capaz de poner en movimiento el sedimento. Para predicciones a largo plazo, la mayor parte de la información del cambio de la línea de costa viene dada por el transporte longitudinal de sedimentos.

Como se ha dicho antes, la ecuación de conservación de la masa de sedimento dentro del flujo es la base de todos los modelos de línea de costa a largo plazo. Tras la ecuación de conservación y tras una serie de simplificaciones, se puede definir la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q$$

Donde:

A: Área transversal del perfil de playa

Q: Transporte longitudinal de sedimento (volumen total por unidad de tiempo)

q: Aporte o pérdida de sedimento (volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo)

Para hacer el estudio morfodinámico a largo plazo, el eje x está orientado de forma paralelo a la costa y el eje y, perpendicular a la misma, el sentido positivo, es hacia el mar, todo esto considerando un sistema de coordenadas cartesianas.

Este modelo, asume que el perfil de playa no cambia de forma ni en el tiempo ni en el espacio, sino que se traslada, a lo largo de una sección de costa, paralelamente a sí mismo hasta la profundidad de cierre, es decir, hasta que el perfil no sufre modificación por el balance de sedimento. El cambio en la posición de la línea de costa es Δy , la longitud del segmento de la línea de costa es Δx y el perfil se traslada dentro de una distancia vertical definida por la altura de la berma (D_B) y la profundidad de cierre (D_C), ambas medidas respecto a una misma referencia vertical.

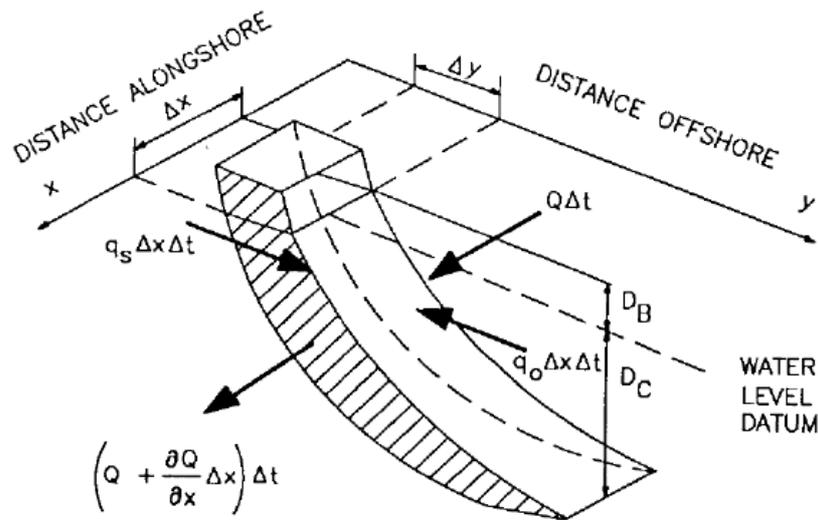


Ilustración 26: Entrada y salida de sedimento

Con esta hipótesis, se fundamenta la variación del área transversal de la playa, en función de la posición de la línea de costa.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D \frac{\partial y}{\partial t}$$

Donde:

D: Distancia vertical en la cual se asume que el perfil de playa sufre cambios, se compone de dos profundidades distintas, la de cierre y la de la berma.

Combinando las dos ecuaciones anteriores.

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

Cinco parámetros hay que tener en cuenta para resolver esta ecuación, la posición inicial de la línea de costa en todo el dominio, las condiciones de contorno en cada extremo de la playa, el transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa, los aportes o pérdidas puntuales de sedimento y la distancia vertical en la que se traslada el perfil de playa.

Los gradientes del transporte longitudinal de sedimento son la función que define la evolución de la línea de costa en el tiempo.

Para el cálculo del transporte longitudinal de sedimento se pueden emplear distintas expresiones, nosotros emplearemos, la que hemos definido en el apartado 3.2, la fórmula del CERC.

El criterio de rotura que se ha empleado en nuestro modelo, es el dado por Mc Cowan (1891) quien determinó, que el oleaje rompe cuando la altura de ola alcanza aproximadamente el 78% de la profundidad de rotura.

Se han establecido varias hipótesis en el modelo:

El perfil de playa adopta una forma de equilibrio, es decir, invariable en el tiempo y en el espacio, por lo que, como ya se ha indicado, estos modelos no se pueden emplear en escalas de medio plazo al no considerar la variabilidad experimentada por el perfil. Por esta razón, no se pueden reproducir las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros fenómenos. Estos modelos son, por tanto, aplicables en zonas de estudio donde el perfil de playa se ajusta a su forma de equilibrio. También es fundamental, considerar la variabilidad espacial del perfil en

zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los predominantes, para poder representarlos adecuadamente.

Según Hanson and Kraus (1989), el límite en la costa viene marcado por la elevación de la berma (Db) y en el mar por la profundidad de cierre (Dc). Las consecuencias de esta hipótesis son las mismas que en el punto anterior.

Los cambios de la playa son producidos por la arena, la cual es transportada a lo largo de la costa por la acción de la rotura del oleaje y las corrientes longitudinales.

La acción del oleaje, que da origen al transporte longitudinal de sedimento, y las condiciones de contorno son los principales factores que controlan el cambio de la línea de costa a largo plazo. Se asume que el suministro de arena es infinito.

4. MODELO DE BALANCE SEDIMENTARIO.

4. MODELO DEL BALANCE SEDIMENTARIO

4.1 CALIBRACIÓN

En primer lugar se ha realizado un tratamiento de los datos para poder dibujar las líneas de costa en las diferentes campañas, con las líneas de costa se ha calculado el volumen de sedimento existente en cada campaña tal y como se ha explicado en capítulo 3.2 (Ilustración 28), con lo cual haciendo la diferencia de estos volúmenes, se deduce lo que se ha perdido o ganado de sedimento en el transcurso de una campaña a otra (ilustración 29). Para el cálculo del volumen se ha considerado una profundidad de cierre y una altura de la berma de 12 y 2 m respectivamente.

$$H=B+h^*$$

Donde:

B: Altura de berma

h^* : Profundidad de cierre

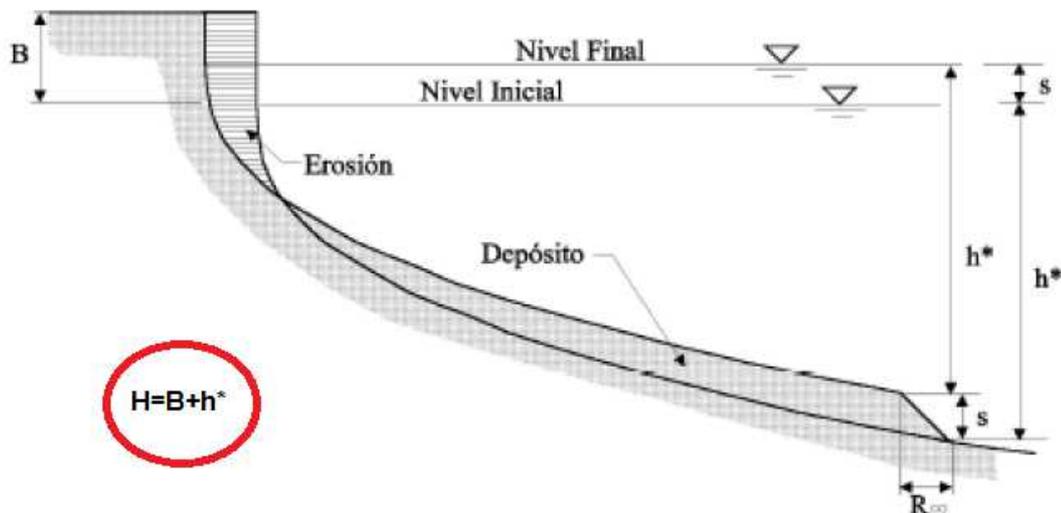


Ilustración 27: Altura total considerada

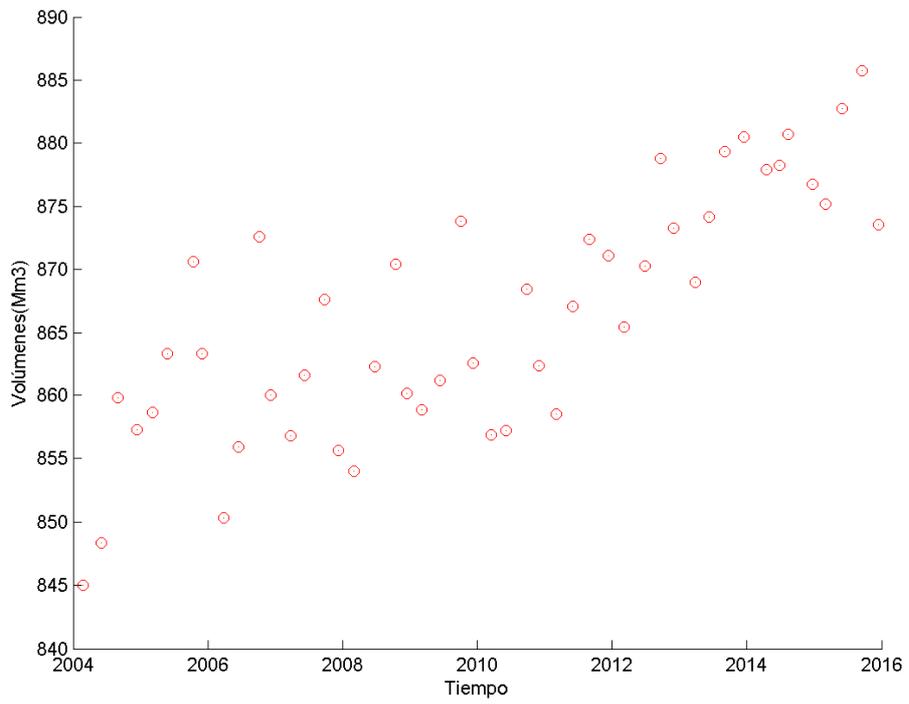


Ilustración 28: Volúmenes

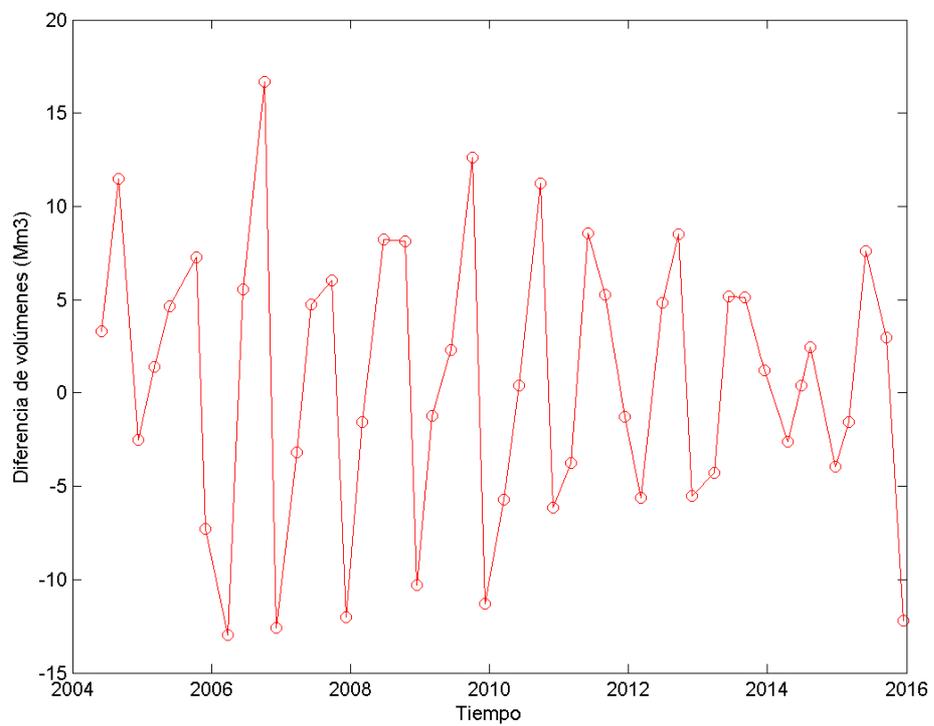


Ilustración 29: Diferencias de Volúmenes

A continuación se ha realizado un estudio exhaustivo de los índices climáticos (PNA), el estudio ha consistido en analizar estos índices, normalizados y sin normalizar, desestacionalizados y sin desestacionalizar, viendo así la posible relación con el balance de sedimento entre campañas. Pero tras un largo trabajo, se ha apreciado que estos índices de presiones no definen una clara relación con el balance de sedimento que hemos definido. En la siguiente ilustración puede verse esta relación con los índices de presiones sin normalizar y sin desestacionalizar (ilustración 31). Se puede ver que la correlación que existe no nos va a permitir hacer una parametrización adecuada.

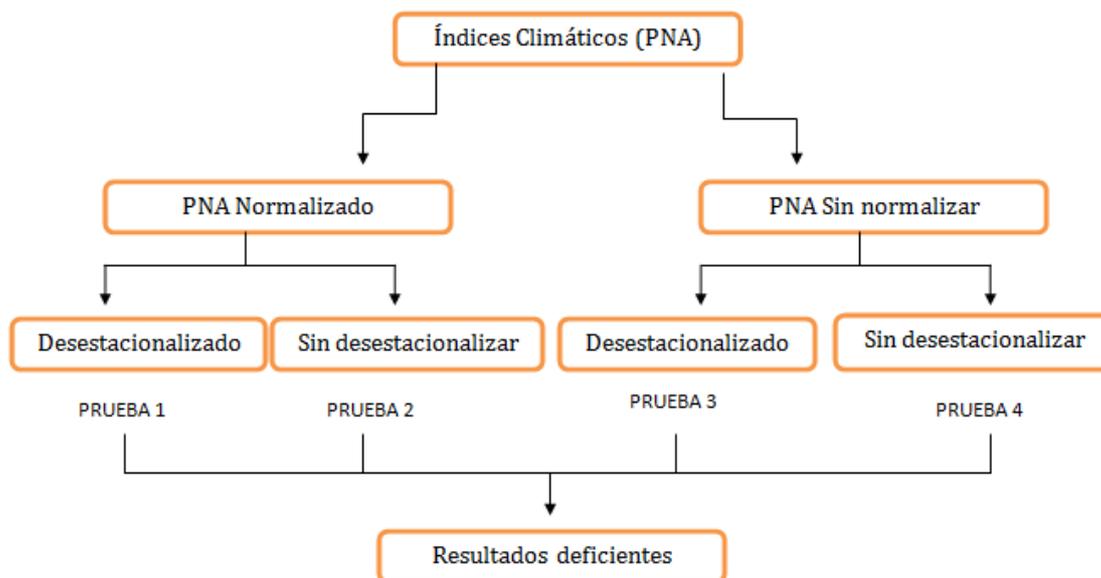


Ilustración 30: Análisis PNA-AV

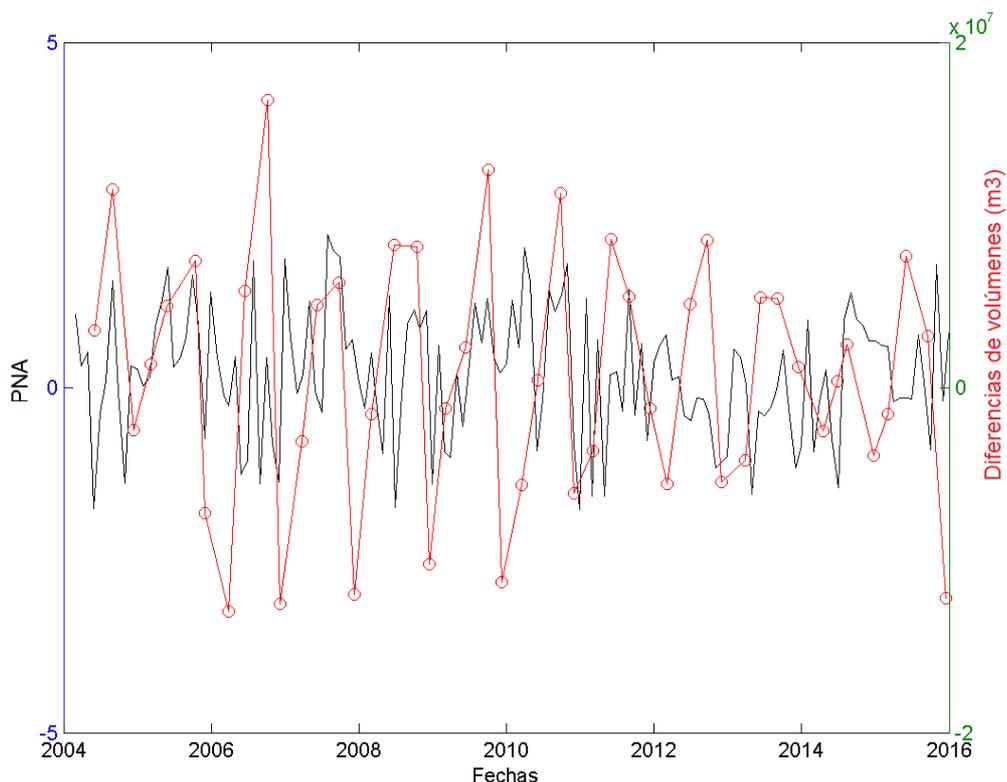


Ilustración 31: PNA-DIFVOLUMENES

Posteriormente, se ha decidido realizar el mismo análisis pero en componentes principales (PCA). Debido a este análisis, se ha podido reducir la dimensionalidad de los campos de presiones a la vez que se mantiene la máxima varianza de datos. Esto ha sido una gran ventaja, ya que así puede verse una correlación mejorada en comparación con la obtenida en el PNA. Como se ha explicado en el apartado 3.3 del presente trabajo, mediante el análisis en componentes principales hemos calculado las PCs y EOFs. En principio se pensó que analizando estas PCs y dibujándolas, para así ver la relación con el balance de sedimento, se iba a poder definir el modelo, pero no fue así, ya que seguía sin verse una correlación clara.

A continuación podemos ver esta representación con la PC1 (ilustración 32), PC2 (ilustración 33) y PC3 (ilustración 34).

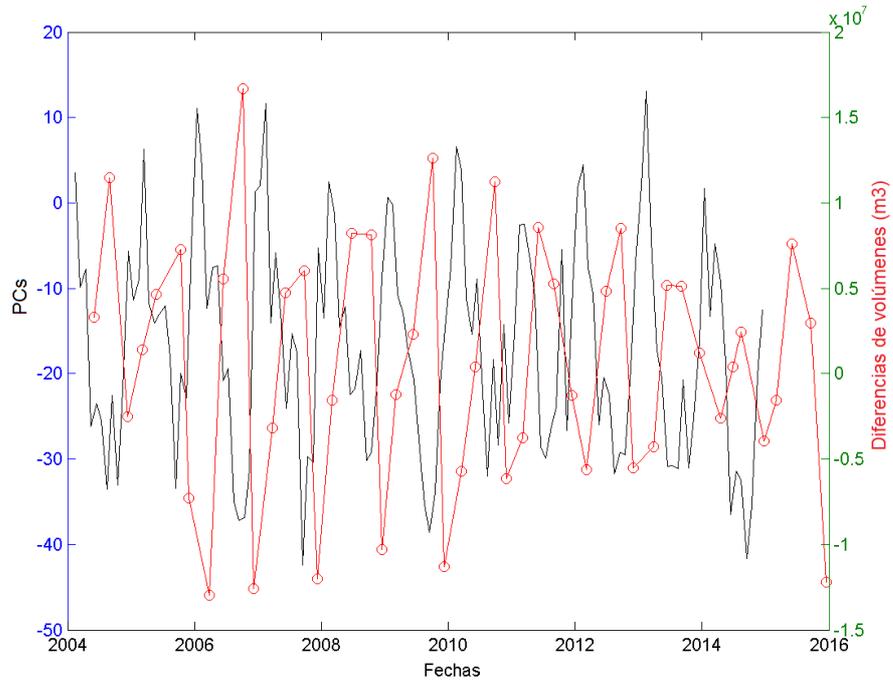


Ilustración 32: PC1 - DIFVOLUMENES

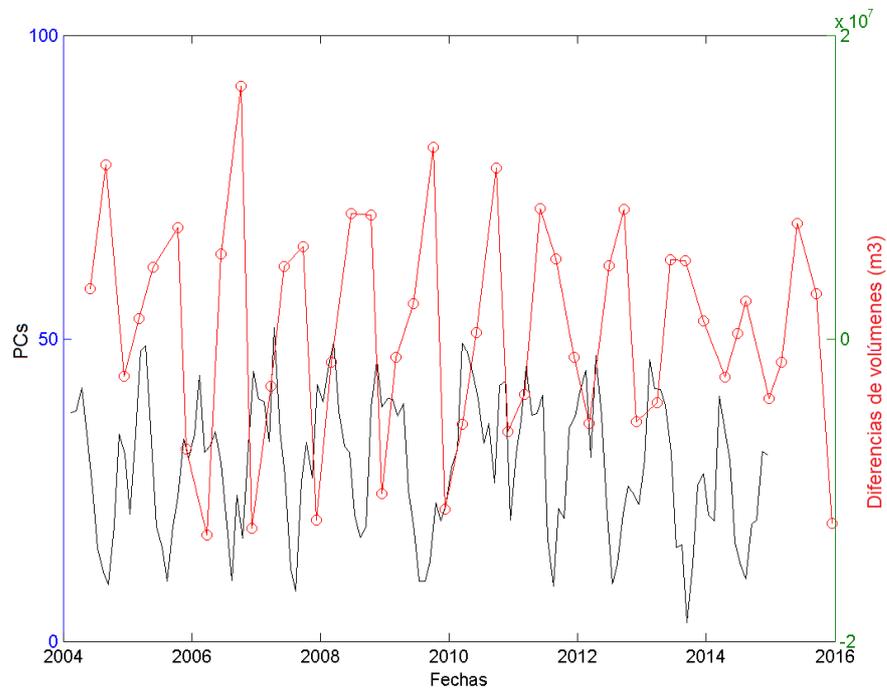


Ilustración 33: PC2 - DIFVOLUMENES

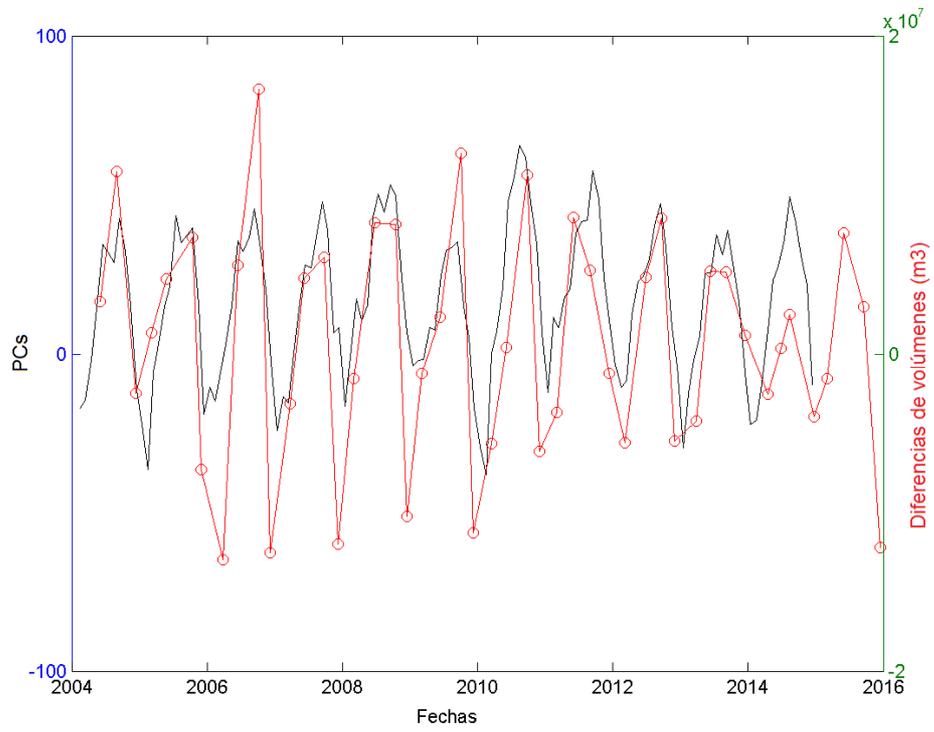


Ilustración 34: PC3 - DIFVOLUMENES

Al no verse una clara relación, se decidió hacer el modelo con las diferencias de las PC3 integradas entre campañas, tal y como se explica en el capítulo 3.4.

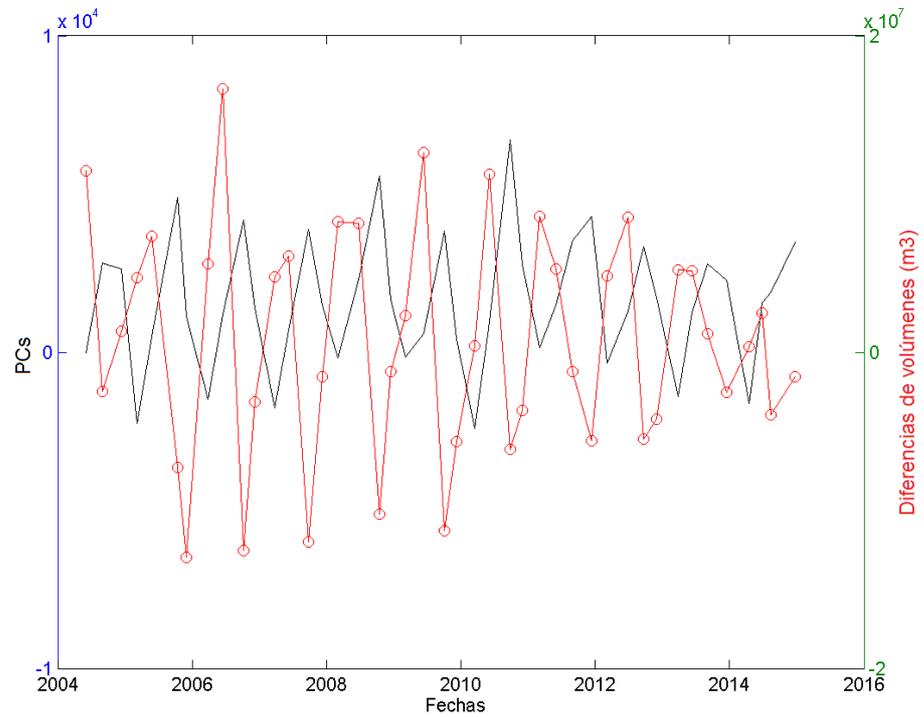


Ilustración 35: PC1 INTEGRADA - DIFVOLUMENES

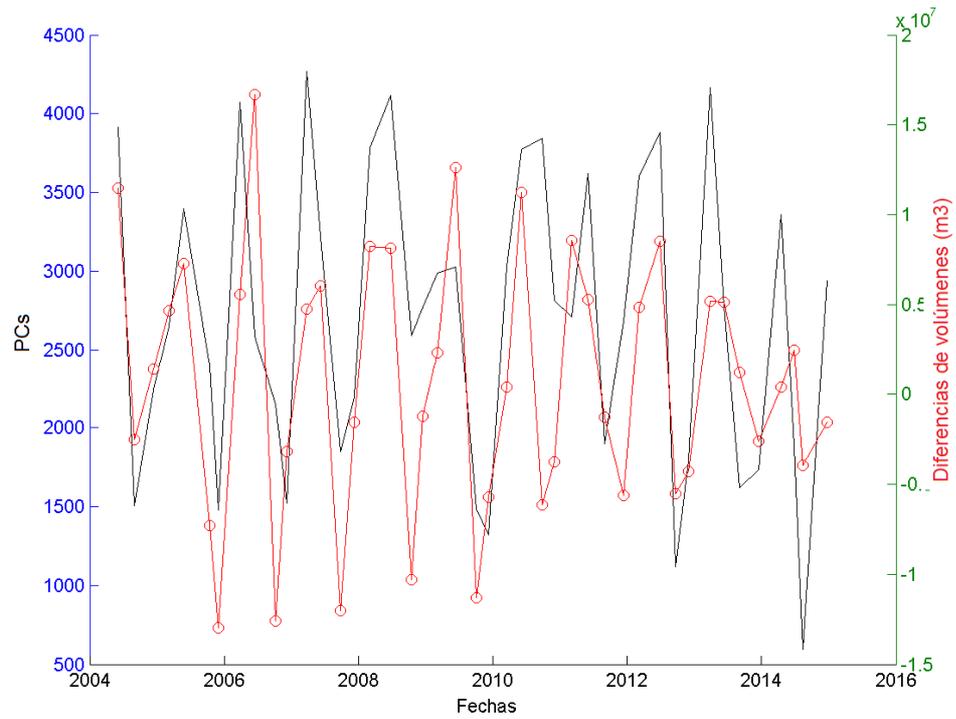


Ilustración 36:PC2 INTEGRADA - DIFVOLUMENES

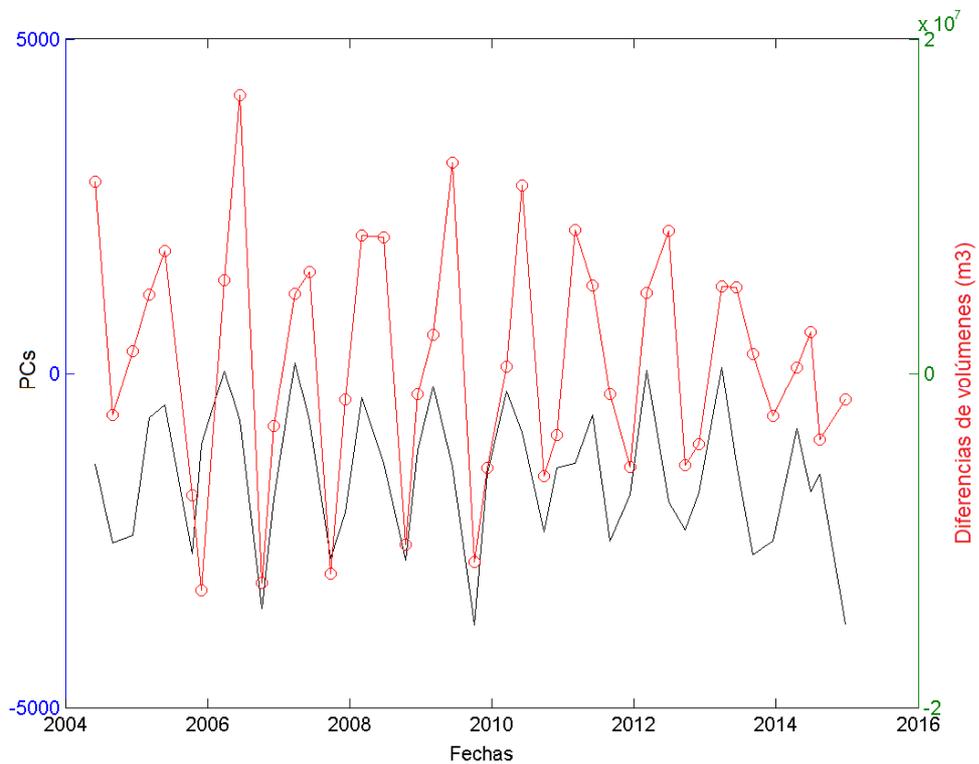


Ilustración 37:PC3 INTEGRADA - DIFVOLUMENES

Se puede apreciar que cuando hay un aumento del balance de sedimento, existe un aumento considerable de la PC (condiciones normales), sin embargo cuando existe un temporal, se produce una pérdida de sedimento, y la PC también disminuye.

Habiendo realizado estos cálculos, ya podemos estimar que al hacer la regresión para así hacer una estimación del sedimento de la playa, va a dar unos resultados bastante coherentes.

Con los datos históricos en todas las campañas se aplica un modelo de regresión multivarial entre el balance de sedimento entre campañas (predicando) y las PCs integradas en el mismo intervalo de tiempo (predictor). Los datos desde 2004 hasta 2010 definen el periodo de calibración del modelo estadístico. Y los datos desde 2011 hasta 2014, definen el periodo de validación, esto último lo veremos en el siguiente apartado.

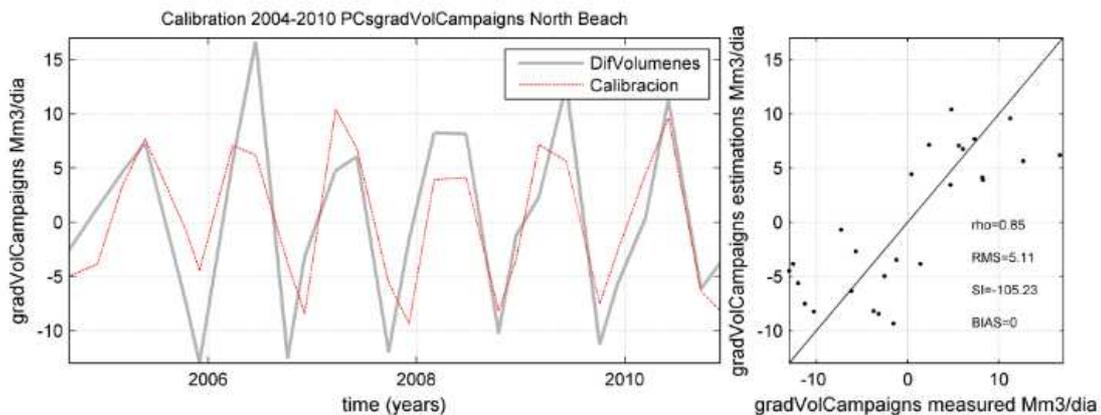


Ilustración 38: Calibración

Para calcular el número de predictores significantes, se basa en un procedimiento de avance. Es decir, el primer predictor, se obtiene del mejor ajuste (la suma más pequeña del error al cuadrado SSE) entre todos los predictores se ajusta un único predictor (siendo n el número de todos los predictores potenciales, en este caso $PC_i=1, \dots, n$). El segundo predictor, se elige entre el resto de predictores (n-1, excepto el seleccionado anteriormente) teniendo en cuenta, el mejor ajuste, entre el modelo n-1 y otros dos predictores, es decir el mejor predictor seleccionado en el modelo

anterior más uno del restante predictor. Así, sucesivamente, hasta que un modelo más complicad no produce una mejora significativa para el ajuste de regresión multivariada (Wang et al. 2004).

El modelo de regresión multivariado, se ajusta a diferentes datos históricos del predictor en la costa del estado de Washington. Se calculan varios indicadores que definen la calidad en el periodo de calibración para seleccionar el óptimo temporal del predictor. Los indicadores que afirman cuan de buena es la calibración, son como hemos indicado en el capítulo 3, el coeficiente de correlación (rho), el error cuadrático medio (RMS), el bias y el índice de dispersión (SI). En nuestro estudio, tiene un valor de:

Rho	0.85
Bias	0
RMS	5.11
SI	105.23

Tabla 1: Errores Cal

Como puede verse en la ilustración 38, la variabilidad estacional e interanual del balance de sedimento está bien representada. El modelo estadístico queda definido con una combinación línea de las PCs más importantes entre campañas.

$$\Delta V = a_0 + a_1 * PC_1 + a_3 * PC_3 + a_4 * PC_4$$

Donde:

a_0	8.47
a_1	0.097
a_3	0.415
a_4	0.359

Tabla 2: Coeficientes Parametrización

A continuación, podemos ver la entrada y salida de sedimento (ΔV), la cual hemos calculado de la calibración que se produce en la sub-celda de North Beach en una escala mensual.

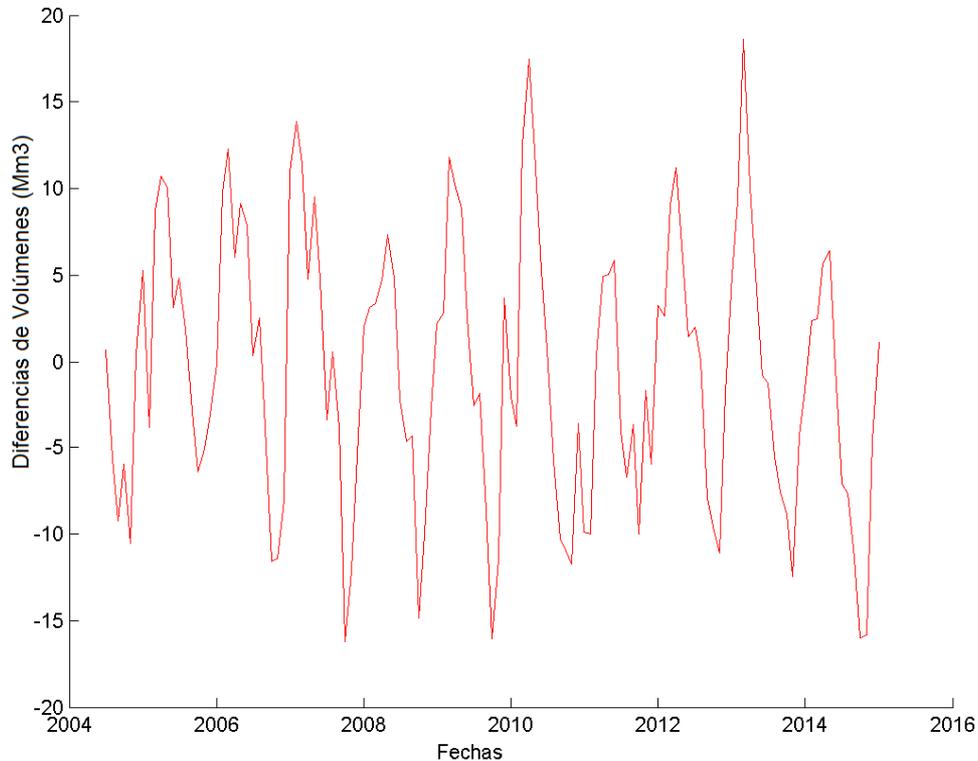


Ilustración 39: Balance sedimento mensual

Con los balances de sedimento mensuales, podremos definir las condiciones de contorno para introducir al modelo One Line.

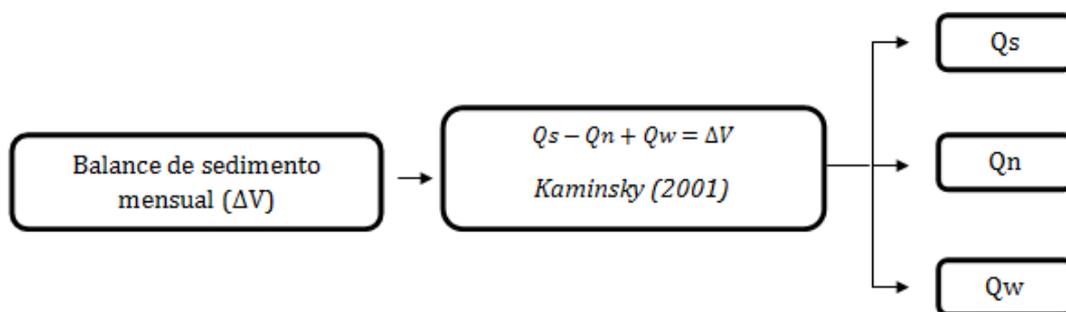


Ilustración 40: Calculo Condiciones Contorno

4.3. VALIDACION

Como se ha señalado con anterioridad el periodo de calibración del modelo corresponde únicamente a los años desde 2004 a 2010. Sin embargo se dispone de tres años completos (2012, 2013 y 2014) de posiciones medidas entre campañas de la línea de costa, que han sido empleadas para validar la anterior calibración.

En la ilustración 41 se muestra la evolución del balance de sedimento en la costa para todo el periodo de validación. Se puede apreciar que el modelo, estima medianamente bien el balance de sedimento que se produce a lo largo de la costa durante el periodo de validación. También se han calculado varios indicadores de calidad en el periodo de validación, al igual que en el periodo de calibración, para así seleccionar el óptimo temporal del predictor. Los indicadores que afirman cuan de buena es la validación, son como hemos indicado en el capítulo 3, el coeficiente de correlación (ρ), el error cuadrático medio (RMS), el bias y el índice de dispersión (SI). En nuestro estudio, tiene un valor de:

Rho	0.7
Bias	2.89
RMS	5.55
SI	5.34

Tabla 3: Errores Validación

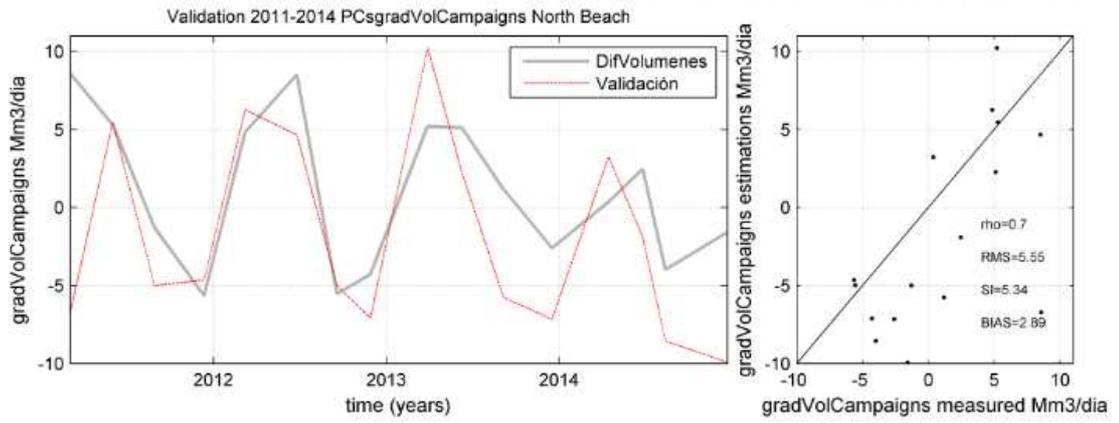


Ilustración 41: Validación

5. MODELO DE EVOLUCIÓN MORFODINAMICO

5. MODELO DE EVOLUCIÓN MORFODINAMICO.

Del modelo de calibración, se ha calculado el transporte de sedimento que se produce en la playa, tal y como se indicado en capítulo 3.4.

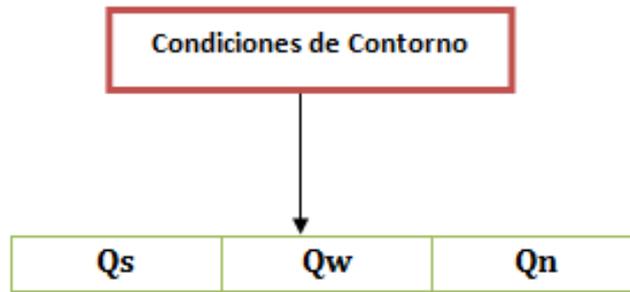


Ilustración 42: Cond Contorno

Se han hecho varias pruebas, para así hacer un análisis de sensibilidad adecuado, y saber cómo reproduce el modelo los giros de la playa con olas procedentes en distintas direcciones. Cada prueba tiene una dirección de oleaje diferente.

Prueba1	Prueba2	Prueba3
S60W	S45W	Dirección variable (±15°)

Tabla 4: Dirección oleaje

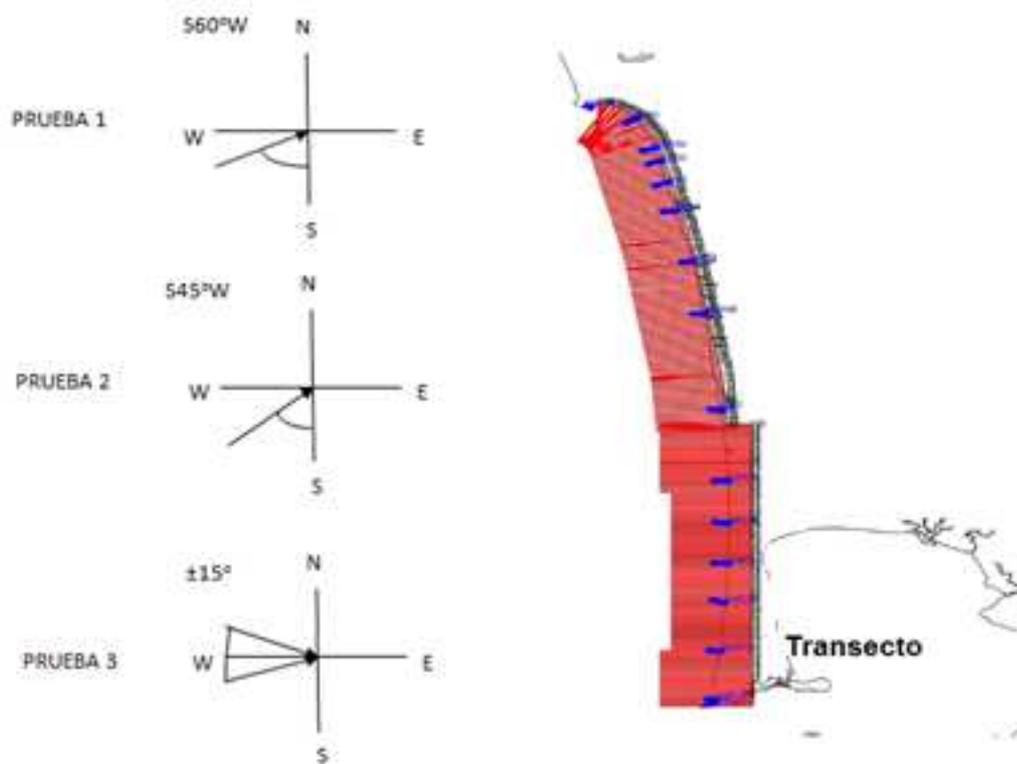


Ilustración 43: Dirección oleaje Gráficamente

En cada una de las pruebas, se ha representado la posición de la línea de costa en el transecto 2 en el tiempo: Con Condiciones de contorno nulas (Azul), condiciones de contorno constantes (Rojo), condiciones de contorno Variables (Verde). Se ha seleccionado el transecto 2 ya que en él se puede apreciarla acreción o erosión de la línea de costa en ese lugar, si cogiésemos un transecto más centrado, el giro no estaría tan acusado, por lo que no podrían verse los cambios con total claridad.

PERFIL 2

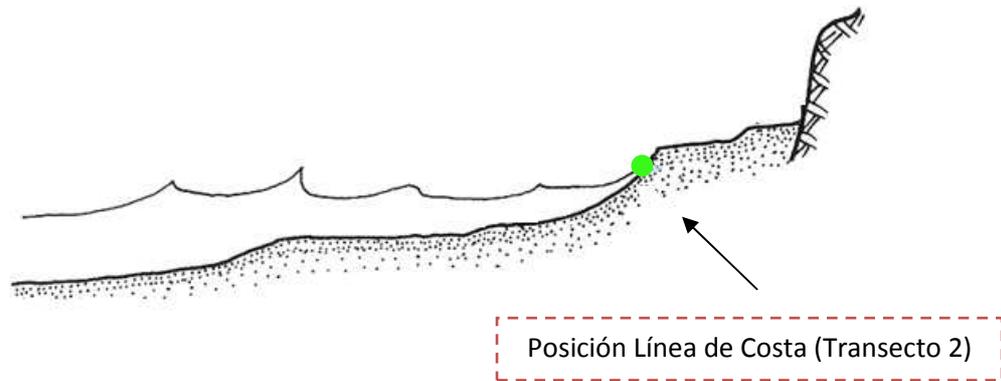


Ilustración 44: Posición línea costa, transecto 2

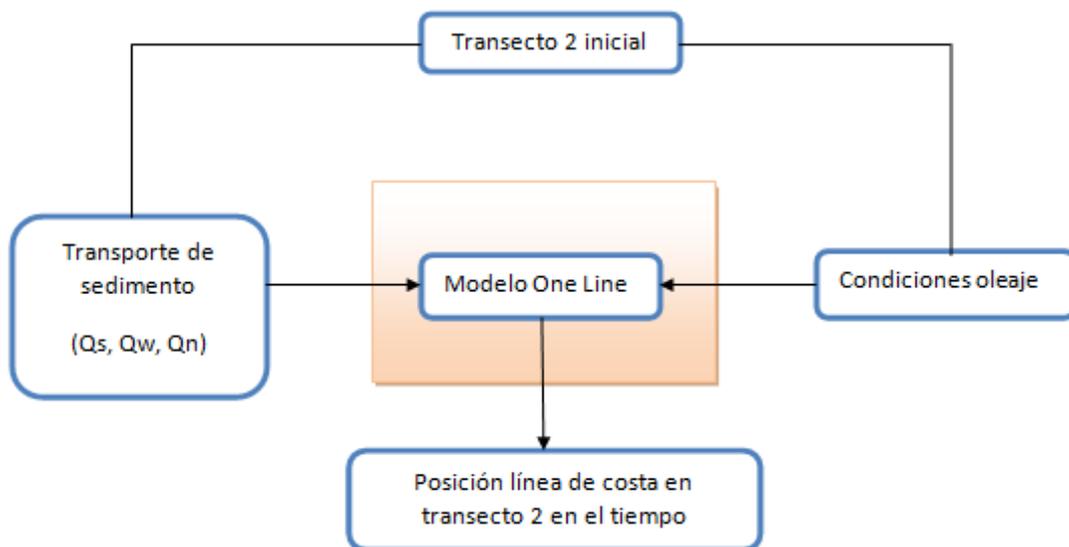


Ilustración 45: Posición final Transecto 2

PRUEBA 1

Como hemos indicado, la primera prueba ha sido con ángulo constante, con olas procedentes de S60W (ilustración 46), aquí se puede apreciar la tendencia de rotación de la playa, y las variaciones debidas a la presencia de condiciones de contorno variables, que es entorno a un 10% a los efectos de un cambio, como podría ser en la dirección durante mucho tiempo, estas condiciones de contorno variables, han sido las condiciones calculadas por nuestro modelo.

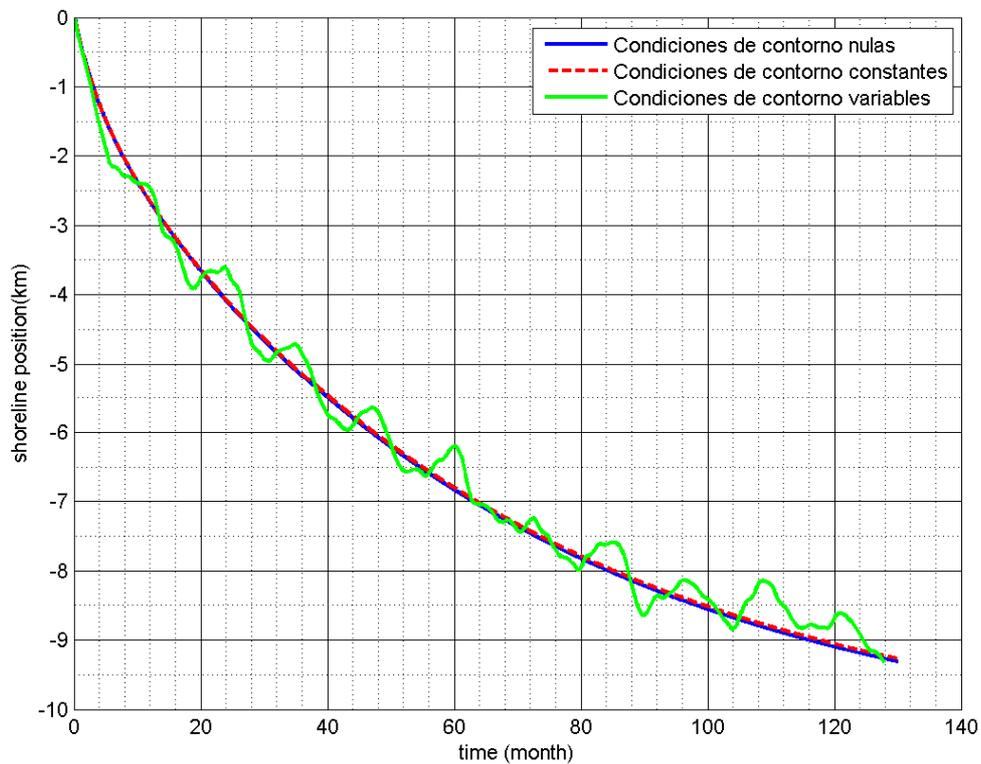


Ilustración 46: Posición-Tiempo, Dirección (N30W)

PRUEBA 2

Otra prueba, ha sido con un ángulo constante de 45º (S45W), aquí pasa parecido al caso anterior, pero la dirección de las olas con respecto a la posición inicial de la playa es mayor y por tanto, la tendencia de rotación es mayor. Es de gran importancia, que en las pruebas, al principio la pendiente es mayor que al final de la simulación, eso es porque a medida que avanza la simulación, la playa ya no está en tan desequilibrio como al principio con respecto al ángulo de incidencia de las olas y por tanto ya no hay tanto

transporte. Lo que se ve claramente, es que se aprecia una tendía erosiva en el transecto 2.

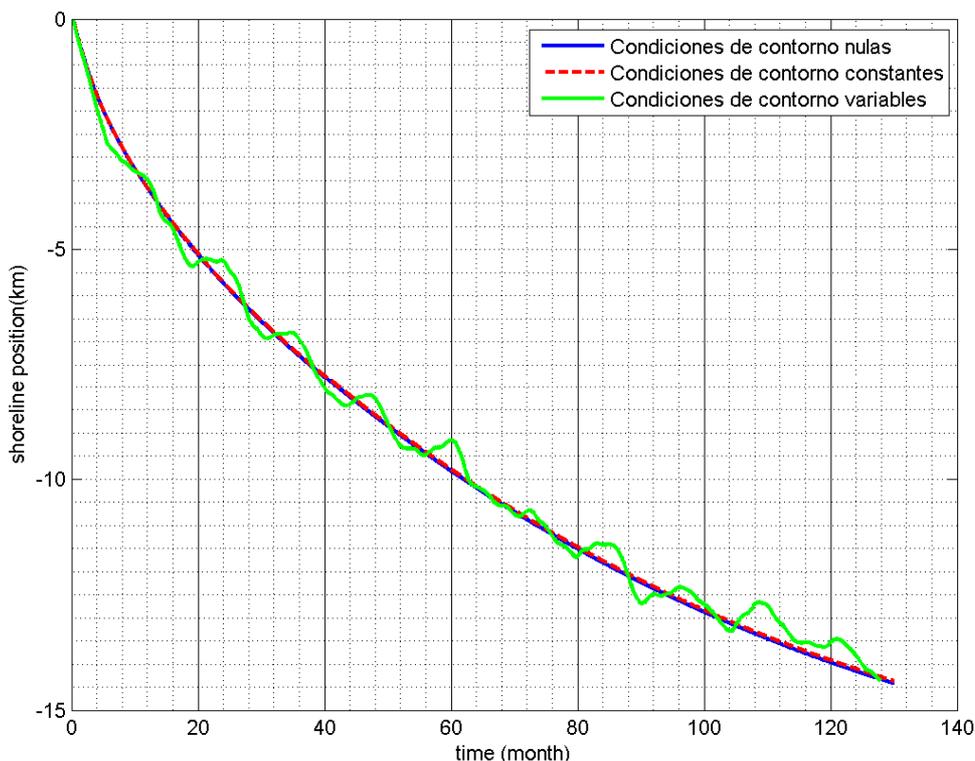


Ilustración 47: Posición-Tiempo, Dirección (N45W)

Ambas pruebas son casos teóricos, es decir, se ve una tendencia, pero no quiere decir que esas medidas de posición de línea de costa, sean estrictamente las que van a sucederse.

PRUEBA 3

También, se ha realizado una prueba, con direcciones diferentes de oleaje en el tiempo. Esta prueba, simula mejor una playa real con bastante variabilidad de oleaje y demuestra que las condiciones de contorno pueden amortiguar las rotaciones de la playa o agravar el desequilibrio. Es importante apreciar que existe una variabilidad interanual.

Hemos definido, cuales son las direcciones de oleaje, en cada instante (ilustración 48). Y posteriormente, apreciamos, esa variabilidad interanual en cuanto a la posición de la línea de costa, en el transecto 2 concretamente (ilustración 49).

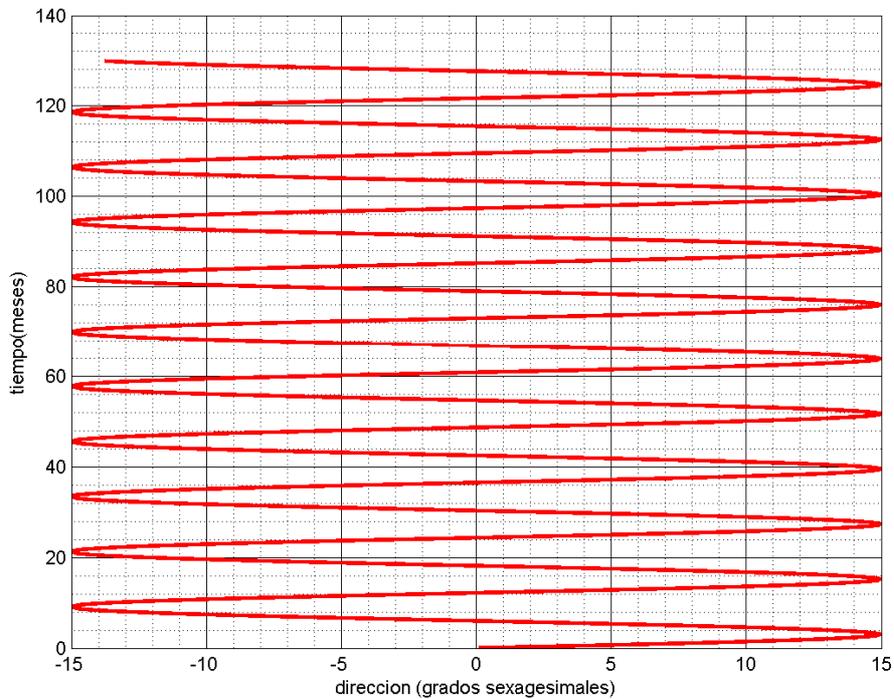


Ilustración 48: Variabilidad de la dirección del oleaje

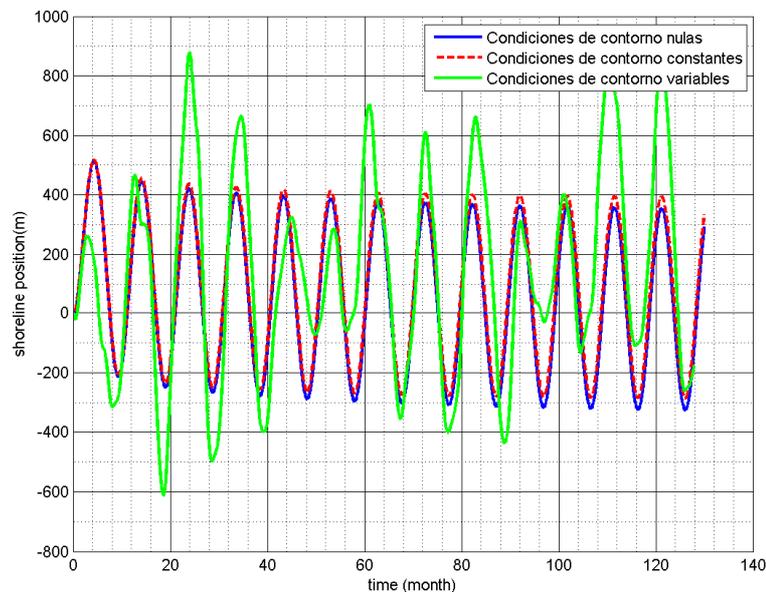


Ilustración 49: Posición-Tiempo, Dirección variable

Con estas tres pruebas, definimos que poner condiciones de contorno variable es un ejercicio numérico fundamental para la representación de la

línea de costa en el tiempo. Podemos verificar, que la erosión del transecto en la playa sometida a un oleaje con una dirección constante, está mucho más acusada, que con una dirección variable en el tiempo.

También se ha representado la línea de costa en planta, para así ver la forma que adopta dependiendo de los meses que hayan pasado y consecuentemente el oleaje que haya incidido sobre ella. Se puede apreciar que la playa gira en función de la dirección de oleaje que reciba.

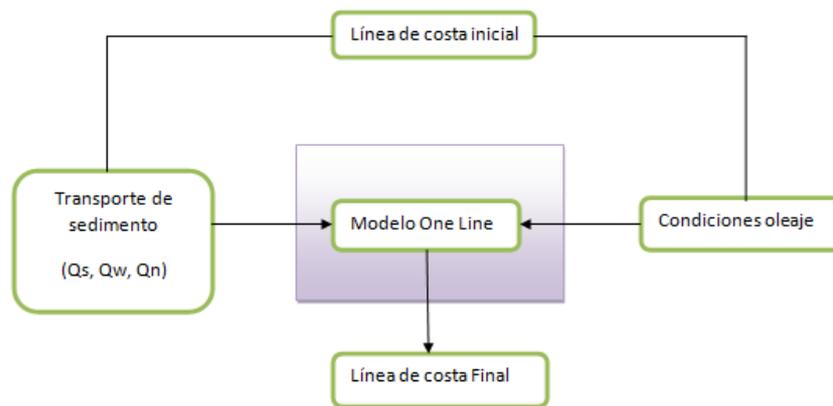


Ilustración 50: Posición final línea costa

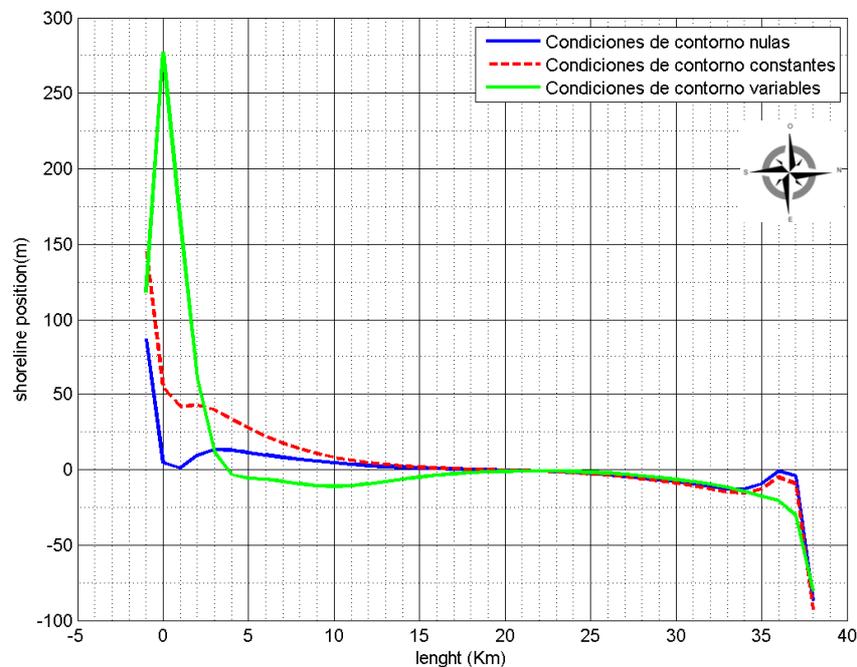


Ilustración 51: Posición Línea de Costa (50meses)

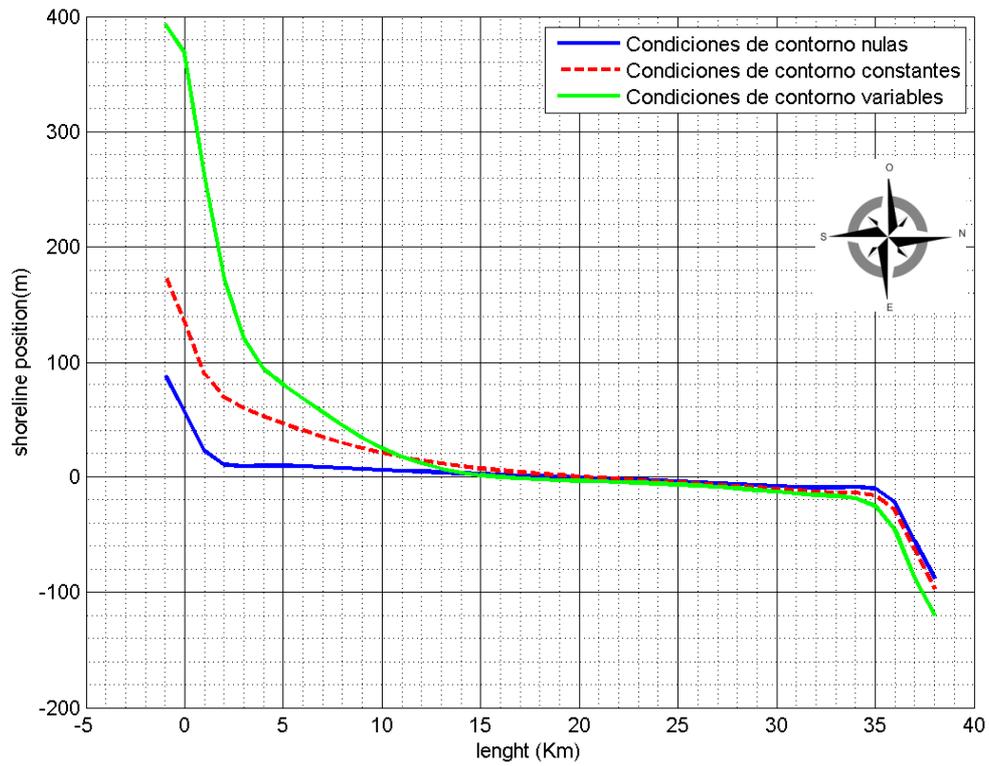


Ilustración 53: Posición Línea de Costa (100meses)

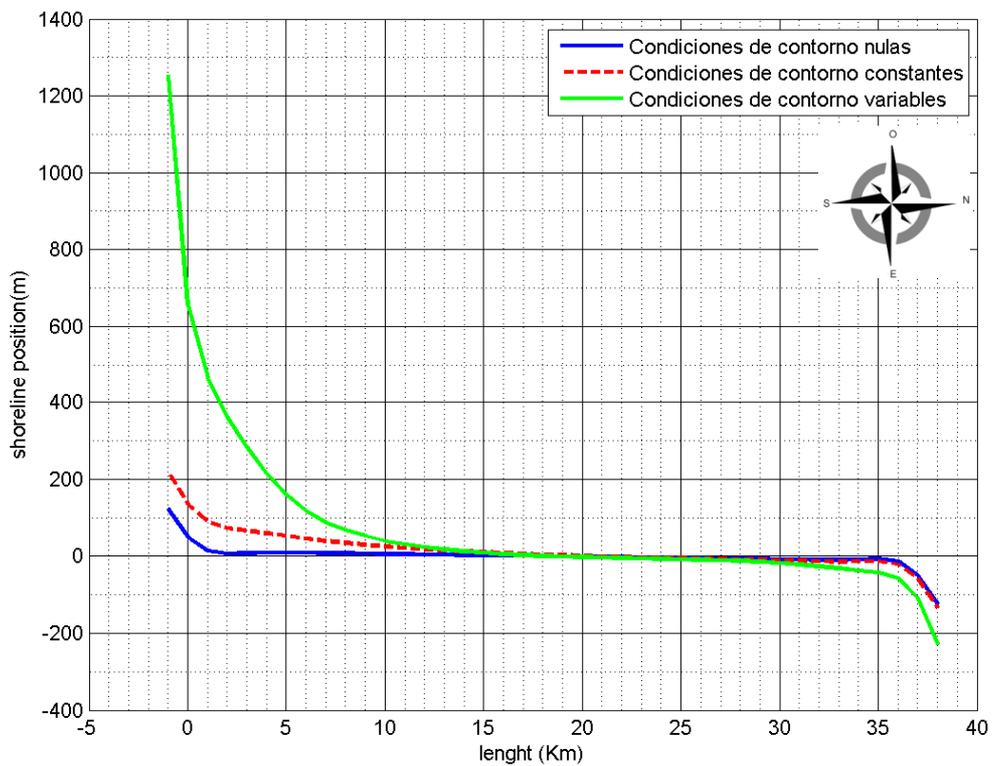


Ilustración 52: Posición Línea de Costa (120meses)

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

En esta tesina se ha realizado un análisis para así ver cuál puede ser el futuro comportamiento de la línea de costa, concretamente en la playa de "North Beach", en el suroeste del estado de Washington, se ha realizado el análisis de la evolución interanual con modelos estadísticos y numéricos. Partiendo de una base de datos tomada sobre la costa, y también campos de presiones en el Océano Pacífico.

En el presente apartado se recogen las conclusiones derivadas del desarrollo de la tesina.

Se ha partido de una serie de campañas de campo, sobre las cuales se han definido las diferentes líneas de costa, gracias a este tratamiento de datos, se ha establecido el balance de sedimento entre campañas.

Se ha estimado que los índices climáticos (PNA), no reproducen correctamente el balance de sedimento de la costa, por lo que se ha decidido realizar un análisis en componentes principales para así poder reducir la dimensionalidad de los campos de presiones con la máxima varianza posible.

Tampoco ha sido posible, estimar el modelo con las PCs sin integrar ya que tampoco reproduce adecuadamente el balance de sedimento, por lo que se decidió finalmente integrarlas entre campañas.

Con el balance de sedimento y las PCs acumuladas entre campañas, se ha definido finalmente un modelo para predecir el balance de sedimento en la playa. Además, se ha podido validar este modelo, para así ver que efectivamente reproduce bien los cambios entre campañas del volumen de sedimento.

Con el modelo definido, se ha podido calcular el balance de sedimento mes a mes. Esto ha sido fundamental para el cálculo de las condiciones de contorno y así poder reproducir la línea de costa.

En cuanto al modelo de evolución morfodinámico, se ha realizado un análisis de sensibilidad del cual definimos que poner condiciones de contorno variable es un ejercicio numérico fundamental para la representación de la línea de costa en el tiempo. Podemos verificar, que la erosión del transecto en la playa sometida a un oleaje con una dirección constante, está mucho más

acusada que a una dirección variable en el tiempo, siendo esta última condición, la que mejor reproduce una playa real.

Es importante destacar que una determinación incorrecta de las características del oleaje en rotura influye fuertemente en la estimación de la línea de costa, siendo tan importante la determinación de la altura de ola y la dirección en rotura que ciertas características de la línea de costa, como la forma en planta de equilibrio, no van a poder ser representadas empleando un método erróneo de propagación, independientemente de la calibración que se lleve a cabo.

Bibliografía

- <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- Laura Ruiz González. Modelos de Evolución Morfodinámica de Zonas costeras en Escalas de Medio a Largo Plazo.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change.
- Paul D. Komar, 1971. The Mechanics of Sand Transport on Beaches.
- George M. Kaminsky, Peter Ruggiero, Maarten C. Buijsman, Diana McCandless, Guy Gelfenbaum 2010. Historical evolution of the Columbia River littoral cell.
- Peter Ruggiero, Meredith G. Kratzmann, Emily A. Himmelstoss, David Reid, Jonathan Allan, and George Kaminsky, 2013. National Assessment of Shoreline Change: Historical Shoreline Change Along the Pacific Northwest Coast.
- Peter Ruggiero, Maarten Buijsman, George M. Kaminsky, Guy Gelfenbaum, 2010. Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change.
- Peter Ruggiero, George M. Kaminsky, Guy Gelfenbaum, Nicholas Cohn, 2016. Morphodynamics of prograding beaches: A synthesis of seasonal-to century-scale observations of the Columbia River littoral cell.
- N. van den Berg, A. Falqués, and F. Ribas, 2011. Modeling large scale shoreline sand waves under oblique wave incidence.
- Paula Camus, Fernando J. Méndez & Inigo J. Losada, Melisa Menéndez, Antonio Espejo, Jorge Pérez, Ana Rueda, Yanira Guanche, 2014. A method for finding the optimal predictor indices for local wave climate conditions.

- Lindsay I Smith, 2002, A tutorial on Principal Components Analysis.
- Antolinez, J.A.A, Fernando J. M_endez, Paula Camus, Sean Vitousek, E. Mauricio Gonzalez, Peter Ruggier, and Patrick Barnard, 2015. A multiscale climate emulator for long-term morphodynamics (MUSCLE-morpho).
- Pelnard-Considère, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. 4ème Journées de l'Hydraulique, les Energies de la Mer, Question III, Reporte nº 1, pp. 289-298.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Report 1, Reference Manual and Users Guide. Technical Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers.
- Dabees, M.A., Kamphuis, J.W., 1997. Numerical modelling and coastal processes: Overview of a modelling system for simulating shoreline change. Proc. Canadian Coastal Conference 1997 , pp. 161-175.
- Kamphuis, J.W., 1993. Effective modelling of coastal morphology. 11th Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering: Coastal Engineering a Partnership with Nature; Preprints of Papers , 173 pp.
- Connell, K.J., Kraus, N.C., 2006. Cascade Version 1: User 's guide. ERDC TN-SWWRP-06-5. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.
- Larson, M., Kraus, N.C., 2003. Modeling regional sediment transport and coastal evolution along the Delmarva Peninsula. Proc. Coastal Sediments'03, ASCE .
- Larson, M., Kraus, N.C., Connell, K.J., 2006a. Cascade Version 1: Theory and model formulation. ERDC TN-SWWRP-06-7. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center .
- Gravens, M.B., Kraus, N.C., Hanson, H., 1991. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Report 2, Workbook and User's Manual. Instruction Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Hanson, H., Kraus, N.C., 1986a. Forecast of shoreline change behind multiple coastal structures. *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 29, pp. 195-213.
- Kraus, N.C., Hanson, H., Harikai, S., 1984. Shoreline change at Oarai Beach: Past, present and future. *Proc. 19th Coastal Engineering Conference, ASCE* , pp. 2107- 2123.
- Kraus, N.C., Larson, M., 1988. Prediction of initial profile adjustment of nourished beaches to wave action. *Proc. Annual Conference on Shore and Beach Preservation Technology, Florida Shore and Beach Preservation Association* , pp. 125-137.
- Kraus, N.C., 2000. Reservoir model of ebb-tidal shoal evolution and sand bypassing. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 126(6), pp. 305-313.
- Dronen, N., Kristensen, S., Taaning, M., Elfrink, B., Deigaard, R., 2011. Long term modeling of shoreline response to coastal structures. *Coastal Sediments 2011* , pp. 965-978.
- G.P.Compo, J.S. Whitaker,P.D. Sardeshmukh, N.Matsui, R.J.Allan, X.Yin, B.E. Gleason, R.S. Vose, G.Rutledge, P.Bessemoulin, S.BRonnimann, M. Brunet, R.I. Crouthamel, A.N Grant, P.Y. Groisman, P.D.Jones, M.C. Kruk, A.C. Kruger, G.J.Marshall,M. Maugeri, H.Y.Mok,T.F. Ross, R.M Trigo, X.L.Wang, S.D.Woodruff, S.J. Worley, 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project.
- McCowan, J., 1891. On the solitary wave. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 32, nº 5 , pp. 45-48.
- Apuntes de clase.

7. ANEJOS

Anejos

Anejo1: Cálculos

Calculo volumen sedimento y comparación con índices climáticos (PNA)

```

clear all,close all,clc
Guard='C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\Matlab\Calculo_a
reas_sedimento_PNA'
pathd='C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\shorelineData'
fid=fopen(fullfile(pathd,'Shores_Contour_2.10.csv'));%abrimos el
archivo
fid1=fopen(fullfile(pathd,'Shores_RefLine_2.10.csv'));
header=fgetl(fid);%leemos el encabezadoo
header1=fgetl(fid1);
m=textscan(fid,'%f %f %f %f %f %f %f %f','Delimiter',' ');
m1=textscan(fid1,'%f %f','Delimiter',' ');
x_ref=m1{1,1};
y_ref=m1{1,2};
transect=m{1,1};
year=m{1,2};
month=m{1,3};
day=m{1,4};
dist_ref=m{1,5};
s_ref=m{1,6};
x_shore=m{1,7};
y_shore=m{1,8};
fclose(fid);%Cerramos el archivo
fclose(fid1);
mx_ref=[4.11*10^5,4.11*10^5]
my_ref=[5.25*10^6,5.195*10^6]
hold on
plot(x_ref,y_ref,'red')
plot(mx_ref,my_ref,'green')
hold on
join=[year,month,day];
s=unique(join,'rows');
for i=1:length(s);
    pos = find(join(:,1)==s(i,1) & join(:,2)==s(i,2) &
    join(:,3)==s(i,3));
    dates(i).x_shore = x_shore(pos);
    dates(i).y_shore = y_shore(pos);
    plot(x_shore(pos),y_shore(pos))
    xlabel('X Shore')
    ylabel('Y Shore')
end
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig1',' .png'])))
figure
hold on
for i=1:length(dates)

    area=trapz(-dates(i).y_shore,4.11*10^5-dates(i).x_shore);
    dates(i).area=area
    plot(datenum(s(i,:)),dates(i).area,'or')
    datetick
    xlabel('Dates')

```

```

        ylabel('Areas(m2)')
        saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig2','png'])))
    end
    difAreas=diff([dates(:).area])
    figure
    plot(datenum(s(2:end,:)),difAreas,'or-')
    datetick
    xlabel('Dates')
    ylabel('Diferencia de areas (m2)')
    saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig3','png'])))

%
%CALCULO DE VOLUMENES
%

Dc=12
Hb=2
Volumen=dates(i).area*(Dc+Hb);

figure
hold on
for i=1:length(dates)

    volumen=(Dc+Hb)*trapz(-dates(i).y_shore,4.11*10^5-
    dates(i).x_shore);
    dates(i).volumen=volumen
    plot(datenum(s(i,:)),dates(i).volumen,'ok-')
    datetick
    xlabel('Fechas')
    ylabel('Volúmenes(m3)')
    saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig90','png'])))
end
difvolumenes=difAreas*(Dc+Hb)
figure
plot(datenum(s(2:end,:)),difvolumenes,'ok-')
datetick
xlabel('Fechas')
ylabel('Diferencia de volúmenes (m3)')
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig5','png'])))

%
%PNA Dayly
%

l=load('norm.daily.pna.index.b500101.current.ascii.txt');

pos_i=find(l(:,1)==s(1,1) & l(:,2)==s(1,2));
pos_e=find(l(:,1)==s(end,1) & l(:,2)==s(end,2));
b=l(pos_i:pos_e,:);
fechas=b(:,1:3);
PNA=b(:,4);
figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(2:end,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','c')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))

```

```

datetick(AX(2))
xlabel('Fechas')
ylabel('PNA')
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig6',' .png'])))

%% difvolumen
%
%PNA Monthly
%

l=load('C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\PNA\norm.pna.mo
nthly.b5001.current.ascii.txt');

pos_i=find(l(:,1)==s(1,1) & l(:,2)==s(1,2));
pos_e=find(l(:,1)==s(end,1) & l(:,2)==s(end,2));
b=l(pos_i:pos_e,:);
m=ones(143,1)*30
f=b(:,1:2);
fechas=[f,m]
PNA=b(:,3);

figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(2:end,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
xlabel('Fechas')
ylabel('PNA')
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig7',' .png'])))

%
%PNA Monthly NORMALZADO
%

desvtipicV=std(difvolumenes);
mediaV=mean(difvolumenes);
[r, c] = size(b)
normV=((difvolumenes-mediaV)/desvtipicV)
figure
[AX,H1,H2] = plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(2:end,:)),normV);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
grid on
grid minor
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig8',' .png'])))

```

```

% DESESTACIONALIZACION DIFVOLUMENES.

datos_deses=difvolumenes
meanmonth=zeros(12,1);
for i=1:12
    pos=find(s(2:end,2)==i)
    meanmonth(i)=mean(difvolumenes(pos));
    datos_deses(pos)=difvolumenes(pos)-meanmonth(i);

end

figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(2:end,:)),datos_deses);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))

grid on
grid minor

saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig9',' .png'])))

%
%DESESTACIONALIZACION DIFVOLUMENES NORMALIZADO
%

desvtipicdatos_deses=std(datos_deses);
mediadatos_deses=mean(datos_deses);
[r, c] = size(b)

normdatos_deses=((datos_deses-mediadatos_deses)/desvtipicdatos_deses)
figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(2:end,:)),normdatos_deses);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))

grid on
grid minor
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig10',' .png'])))

%% volumen
%PNA Monthly

%
%
for i=1:length(dates)
difvolumenes(i)=dates(i).volumen
end

```

```

l=load('norm.pna.monthly.b5001.current.ascii.txt');

pos_i=find(l(:,1)==s(1,1) & l(:,2)==s(1,2));
pos_e=find(l(:,1)==s(end,1) & l(:,2)==s(end,2));
b=l(pos_i:pos_e,:);
m=ones(143,1)*30
f=b(:,1:2);
fechas=[f,m]
PNA=b(:,3);
figure
[AX,H1,H2] = plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(:,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig11'],'.png'))))

grid on
grid minor

%
%PNA Monthly NORMALZADO
%

desvtipicV=std(difvolumenes);
mediaV=mean(difvolumenes);
[r, c] = size(b)

normV=((difvolumenes-mediaV)/desvtipicV)

figure
[AX,H1,H2] = plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(:,:)),normV);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
grid on
grid minor
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig12'],'.png'))))

% DESESTACIONALIZACION VOLUMENES.
datos_deses=difvolumenes
meanmonth=zeros(12,1);
for i=1:12
    pos=find(s(:,2)==i)
    meanmonth(i)=mean(difvolumenes(pos));
    datos_deses(pos)=difvolumenes(pos)-meanmonth(i);
end

```

```

figure
[AX,H1,H2] = plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(:,:)),datos_deses);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))

grid on
grid minor

saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig13','png'])))

%
%DESESTACIONALIZACION VOLUMENES NORMALIZADO

desvtipicdatos_deses=std(datos_deses);
mediadatos_deses=mean(datos_deses);
[r, c] = size(b)
normdatos_deses=((datos_deses-mediadatos_deses)/desvtipicdatos_deses)
figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PNA,datenum(s(:,:)),normdatos_deses);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
grid on
grid minor
saveas(gcf,(fullfile(Guard,['Fig14','png'])))
  Calculo Volumen sediment (PCA)

```

Análisis (PCA) con volumen sedimento

```

%
%PCA dayly

pcs=load('C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\PCA\PCS100.mat'); pcs = pcs.a;
eofs=load('C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\PCA\EOF100.mat'); eofs = eofs.a;
datespc=load('C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\PCA\Dates.mat'); datespc = datespc.a;
varian=load('C:\Users\SALVADOR\Desktop\TFM_Salva_NorthBeach\PCA\variance.mat'); varian = varian.a; varian = varian./sum(varian);

datespcs=[datespc,pcs];
pos_i=find(datespcs(:,1)==s(1,1) & datespcs(:,2)==s(1,2));
[r,c]=size(datespcs);
pos_e=r;
b=datespcs(pos_i:pos_e,:);
fechas=b(:,1:3);
for i=7:16
f(i)=figure
PCS=b(:,i);
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(fechas),PCS,datenum(s(2:end,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k');
set(H2,'Marker','o','Color','r');
xlim(AX(1),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(fechas)) max(datenum(fechas))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
saveas(f(i),fullfile(Guard,['FigPCA_',num2str(i,'%02d'),' .png']))
end

%PCA monthly

PCS=b(:,7:end);
dates_m=unique(b(:,1:2),'rows');
k=ones(131,1)*15;
dates_m=[dates_m,k];
PCS_m=zeros(size(dates_m,1),size(PCS,2));
for j=1:size(dates_m,1);
pos=find(fechas(:,1)==dates_m(j,1) & fechas(:,2)==dates_m(j,2));
PCS_m(j,:)=mean(PCS(pos,:),1);
end

for i=1:10(PCS_m)
M=PCS_m(:,i);
f(i)=figure
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(dates_m),M,datenum(s(2:end,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k');
set(H2,'Marker','o','Color','r');
xlim(AX(1),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))

```

```

saveas(f(i),fullfile(Guard,['FigPCA_m_',num2str(i,'%02d'),' .png']))

end

sa=s(:,1:2);
f=ones(48,1)*15;
sa=[sa,f];
pos=[];
for i=1:length(s);
    try
        pos(i) = find(dates_m(:,1)==sa(i,1) & dates_m(:,2)== sa(i,2)
& dates_m(:,3)== sa(i,3));

        end
end
dates_m=dates_m(pos,:);
w=PCS_m(pos,1);
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(dates_m),w,datenum(sa(2:end,:)),difvolumenes);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))
difvolumenes2=difvolumenes(1,1:44);
sa=s(1:44,1:2);
f=ones(44,1)*15;

sa=[sa,f];
pos=[];

for i=1:length(s);
    try
        pos(i) = find(dates_m(:,1)==sa(i,1) & dates_m(:,2)== sa(i,2)
& dates_m(:,3)== sa(i,3));

        end
end
dates_m=dates_m(pos,:);
w=PCS_m(pos,10);
[AX,H1,H2] =
plotyy(datenum(dates_m),w,datenum(sa(:, :)),difvolumenes2);
set(H1,'LineStyle','-','Color','k')
set(H2,'Marker','o','Color','r')
xlim(AX(1),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
xlim(AX(2),[min(datenum(dates_m)) max(datenum(dates_m))]);
datetick(AX(1))
datetick(AX(2))

```