



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA

BENJAMÍN EDUARDO HERNÁNDEZ ALFARO

Diciembre 2012

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA

Benjamín Eduardo Hernández Alfaro

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Matías Quezada Labra
Profesor guía

Patricio Monárdez Santander
Integrante comisión

Cristóbal Pantoja Bonati
Integrante comisión

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Autor: Benjamín Hernández Alfaro

Profesor Guía: Matías Quezada Labra

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Karina Brevis, por el tiempo y cariño invertido durante el desarrollo de esta memoria y en cada iniciativa en la cual me he embarcado. Mis pequeños logros no serían posibles sin su incondicional apoyo.

Al señor Matías Quezada, por toda la enorme ayuda entregada tanto en el presente documento, como a lo largo de toda mi formación como futuro ingeniero.

A los señores; Patricio Monárdez, Cristóbal Pantoja, Hugo Acuña, Claudio Meza y Rodrigo Muñoz, por los aportes entregados en el desarrollo de esta memoria.

A Baird & Associated por la ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente a los docentes; Pedro Espoz, Patricio Winckler, Matías Quezada, Jorge Rojas, Jaime Serrano, entre otros. Los cuales me brindaron mucha diversión durante mi aprendizaje en las materias de la ciencia e ingeniería.

A TOÑITO

CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	11
1.2 MOTIVACIÓN.....	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1 EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA EN PLAYAS.....	15
3.1.1 <i>MODELACIÓN DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA</i>	17
3.1.2 <i>MODELOS DE RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA</i>	18
3.1.3 <i>PARTICULARIDADES DE LA MORFOLOGÍA EN LAS COSTAS DE CHILE</i>	23
3.2 OLEAJE.....	23
3.2.1 <i>GENERALIDADES</i>	23
3.2.1.1 DESCRIPCIÓN OLEAJE REGULAR.....	24
3.2.1.2 DESCRIPCIÓN OLEAJE IRREGULAR.....	26
3.2.2 <i>TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE</i>	31
3.2.2.1 MODELOS DE TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	31
3.2.2.2 MODELACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	33
3.2.3 <i>ROTURA DEL OLEAJE</i>	38
3.2.3.1 DEFINICIONES FÍSICAS DE LA ROTURA DEL OLEAJE.....	38
3.2.3.2 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL ÍNDICE DE ROTURA DEL OLEAJE.....	39
3.2.3.3 DIFERENCIAS ENTRE LA ROTURA PARA OLEAJE REGULAR E IRREGULAR.....	39
3.2.4 <i>MODELACIÓN DEL OLEAJE PARA MODELOS DE EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA</i>	40
3.2.5 <i>CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE EN LAS COSTAS DE CHILE</i>	41
3.3 CORRIENTES Y VARIACIONES DEL NIVEL MEDIO INDUCIDAS POR OLEAJE.....	43
3.3.1 <i>MOMENTO DEL OLEAJE Y TENSORES DE RADIACIÓN</i>	43
3.3.2 <i>INDUCCIÓN DE SET-UP Y SET-DOWN POR OLEAJE</i>	45
3.4 CORRIENTES.....	45
3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	47
3.5.1 <i>MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</i>	48
3.5.2 <i>MODELO ENERGÉTICO PROPUESTO POR BAILARD (1981)</i>	51
4. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL MODELO	54
4.1 DOMINIO ESPACIAL DE RESOLUCIÓN Y PARÁMETROS DE ENTRADA.....	55
4.2 MÓDULO DE OLEAJE PARAMÉTRICO.....	56
4.2.1 <i>ASOMERAMIENTO Y REFRACCIÓN</i>	56
4.2.2 <i>DISIPACIÓN POR ROTURA</i>	57
4.2.2.1 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BATTJES & JANSSEN (1978), BJ78.....	60
4.2.2.2 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BATTJES & STIVE (1985), BS85.....	62
4.2.2.3 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE SOUTHGATE & NAIRN (1993), SN93.....	62
4.2.2.4 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE THORNTON & GUZA (1983), TG83.....	63
4.2.2.5 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE WHITFORD (1988), WH88.....	65
4.2.2.6 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RATTANAPITIKON Y SHIBAYAMA (1998), RS98.....	65
4.2.2.7 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RATTANAPITIKON ET AL. (2003) RK03.....	66
4.2.2.8 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BALDOCK ET AL. (1998), BHV98.....	67
4.2.2.9 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RUESSINK ET AL. (2003), RWS03.....	68

4.2.2.10	APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE JANSSEN & BATTJES (2007), JB07	68
4.2.2.11	APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE TAJIMA & MADSEN (2004), TM04.....	69
4.2.2.12	APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE KURIYAMA (2012), YK12	70
4.3	MÓDULO DE OLEAJE ESPECTRAL	71
4.3.1	DISIPACIÓN POR ROTURA	72
4.3.2	INTERACCIÓN NO LINEAL OLA A OLA	73
4.4	MÓDULO INCLUSIÓN DEL ROLLER	75
4.4.1	APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE STIVE & DE VRIEND (1994).....	75
4.4.2	APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE LIPPMANN ET AL. (1996).....	76
4.4.3	APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE TAJIMA & MADSEN (2004).....	76
4.4.4	APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE KURIYAMA (2012)	78
4.5	MÓDULO DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO	79
4.6	MÓDULO DE CORRIENTES NETAS EN EL FONDO	80
4.6.1	APROXIMACIÓN DE VRIEND & STIVE (1987)	80
4.6.2	APROXIMACIÓN DE TAJIMA & MADSEN (2004).....	82
4.6.3	APROXIMACIÓN DE KURIYAMA (2010)	82
4.7	MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	83
4.7.1	APROXIMACIÓN DE RANASINGHE ET AL. (1999).....	83
4.7.2	APROXIMACIÓN DE KURIYAMA (2012)	86
4.8	MÓDULO DE TRANSPORTE EN LA ZONA DE ASCENSO-DESCENSO	87
4.9	MÓDULO DE EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA	88
5.	VALIDACIÓN DE LOS MÓDULOS MEDIANTE DATOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO.....	90
5.1	VALIDACIÓN MÓDULOS DE OLEAJE PARAMÉTRICOS.....	90
5.1.1	APROXIMACIONES BASADAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH TRUNCADA.....	92
5.1.2	APROXIMACIONES BASADAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH COMPLETA	95
5.1.3	APROXIMACIONES DE ENERGÍA LÍMITE	98
5.1.4	APROXIMACIONES BASADAS EN LA APLICACIÓN DE UNA FUNCIÓN DELTA DE DIRAC A LA DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH PARA OLEAJE NO SATURADO	101
5.1.5	ANÁLISIS DEL ERROR	103
5.2	VALIDACIÓN MÓDULO DE OLEAJE ESPECTRAL	107
5.3	VALIDACIÓN MÓDULO VARIACIONES DEL NIVEL MEDIO.....	111
5.4	VALIDACIÓN MÓDULO DE CORRIENTES	116
6.	COMPARACIÓN DEL MODELO CON DATOS DE CAMPO.....	121
6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES PARA LA COMPARACIÓN.....	123
6.2	COMPARACIÓN DIRECTA CON DATOS DE CAMPO	125
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
8.	REFERENCIAS.....	135

Anexo A: Detalle de la comparación entre los datos simulados y medidos para los esquemas de disipación presentados en el módulo de oleaje paramétrico.

Anexo B: Detalle error relativo en porcentaje para los esquemas de disipación presentados en el módulo de oleaje paramétrico.

Anexo C: Comparaciones del modelo con datos de campo para los casos no considerados

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Resumen de las características y capacidades del modelo para su comparación realizado por Schoonees & Theron (1995).	22
Tabla 3.2: Comparación de la capacidad de los modelos para simular los procesos de transformación del oleaje.	32
Tabla 3.3: Variables calculadas por los modelos de transformación de ondas.	32
Tabla 3.4: Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje.....	37
Tabla 5.1: Casos validación módulo de olas	90
Tabla 5.2: Coeficientes empleados en la validación de los modelos de disipación.....	91
Tabla 5.3: Error relativo para el esquema de disipación BJ78, sin calibrar.	103
Tabla 5.4: Resumen resultados módulos paramétricos de oleaje.....	106
Tabla 6.1: Casos para las comparaciones con datos de campo.....	126
Tabla 6.2: Resumen de los errores cuadráticos medios para los casos considerados.	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Comparación invierno-verano, Playa Acapulco, Viña del Mar.....	15
Figura 3.2:	Comparación variación de la porción emergida de un muro.	16
Figura 3.3:	Procesos según escalas espaciales y temporales.	17
Figura 3.4:	Esquema básico de un modelo de respuesta del perfil de playa.....	19
Figura 3.5:	Esquema mega escala de la morfología en las costas de Chile	23
Figura 3.6:	Comparación entre oleaje regular e irregular.....	24
Figura 3.7:	Descripción de oleaje regular en el espacio y en el tiempo.....	24
Figura 3.8:	Validez de las teorías de oleaje.....	25
Figura 3.9:	Descripción estadística de oleaje irregular.....	26
Figura 3.10:	Espectro de superficie de amplitud y de fase.....	28
Figura 3.11:	Esquema eje y perfil de propagación.....	33
Figura 3.12:	Análisis de refracción.	35
Figura 3.13:	Excedencia Altura Significativa media para 3 [m] en (días/años).....	42
Figura 3.14:	Estados <i>peak</i> de las tormentas más severas en los 30 últimos años en Chile..	43
Figura 3.15:	Esquema variables involucradas en los flujos asociados a la zona de surf.....	47
Figura 4.1:	Discretización dominio espacial del perfil.	55
Figura 4.2:	Esquema del bore.	58
Figura 4.3:	Esquema fundamento de modelos de energía límite.....	59
Figura 4.4:	Esquema de onda lineal equivalente	69
Figura 4.5:	Esquema del término sumidero; disipación debido a rotura inducida por la interacción con el fondo.	73
Figura 4.6:	Esquema de la forma del término fuente; interacción no lineal ola a ola mediante triadas.....	74
Figura 4.7:	Esquema de la sección transversal del <i>roller</i> de superficie.....	78
Figura 4.8:	Esquema distribución vertical de velocidades en el modelo de Kuriyama.....	78
Figura 4.9:	Esquema aplicación del transporte en la zona de lavado.	88
Figura 4.10:	Esquema derivación ecuación de conservación del sedimento.	89
Figura 5.1:	Resultados comparación perfil sin barra con BJ78, sin calibrar.	92
Figura 5.2:	Resultados comparación perfil sin barra con BJ78, calibrado.....	92
Figura 5.3:	Resultados comparación perfil con barra con BJ78, calibrado.....	93
Figura 5.4:	Resultados comparación perfil con y sin barra con BS85, sin calibrar.	94
Figura 5.5:	Resultados comparación perfil con y sin barra con SN93, sin calibrar.	94
Figura 5.6:	Resultados comparación perfil sin barra con TG83 Ex1, sin calibrar y calibrado.	95
Figura 5.7:	Resultados comparación perfil con barra para TG83 Ex1 y Ex2, calibrados.	96
Figura 5.8:	Resultados comparación perfil sin barra con WH88, sin calibrar y calibrado. ...	97
Figura 5.9:	Resultados comparación perfil sin barra con YK12, sin calibrar y calibrado.	97
Figura 5.10:	Resultados comparación perfil con barra con YK12, calibrado.	98
Figura 5.11:	Resultados comparación perfil sin barra con RS98, sin calibrar y calibrado.	99
Figura 5.12:	Resultados comparación perfil con barra con RS98, calibrado.	99
Figura 5.13:	Resultados comparación perfil con y sin barra con RK03, sin calibrar.	100
Figura 5.14:	Resultados comparación perfil con barra con TM04, sin calibrar.....	101
Figura 5.15:	Resultados comparación perfil con y sin barra con BHV98, sin calibrar.....	101
Figura 5.16:	Análisis del error para los esquemas revisados.....	105
Figura 5.17:	Ejemplo Espectro direccional de oleaje.	107
Figura 5.18:	Validación Espectral $H_s = 2.11m$ a $8m$ de profundidad.	109
Figura 5.19:	Validación Espectral $H_s = 1.35m$ a $8m$ de profundidad.	110

Figura 5.20: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Stive & De Vriend (1999)....	112
Figura 5.21: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Tajima & Madsen (2004). ...	113
Figura 5.22: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Y. Kuriyama (2012).	114
Figura 5.23: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Stive & De Vriend (1999)....	115
Figura 5.24: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Tajima & Madsen (2004) ...	115
Figura 5.25: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Y. Kuriyama (2012)	116
Figura 5.26: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Rodríguez et al. (1994).	117
Figura 5.27: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Roelvink & Stive (1989a) ...	118
Figura 5.28: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Roelvink & Stive (1989b) ...	119
Figura 5.29: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Guza & Thornton (1985)	120
Figura 6.1: Ubicación FRF.....	121
Figura 6.2: Configuración de los instrumentos empleados en los experimentos asociados a los distintos grupos de investigación.....	122
Figura 6.3: Disponibilidad espacial de datos: (1) Muestras de Sedimento, (2) Sonares para determinar profundidades, (3) Mediciones de presión, (4) Sensores de velocidad.	123
Figura 6.4: Tamaño del sedimento a lo largo del perfil.	124
Figura 6.5: Tormenta medida a 8[m] de profundidad	125
Figura 6.6: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 01, 04 y 07.....	128
Figura 6.7: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 10, 13 y 16.....	129
Figura 6.8: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 19 y 22.....	130

RESUMEN

Modelar de forma numérica la respuesta del perfil transversal de una playa ante la acción de una tormenta, implica determinar los principales agentes responsables de las variaciones en la morfología. Éste documento presenta de manera extensiva la revisión, evaluación y recomendación de algunas formulaciones y aproximaciones para lograr dicho propósito.

Se determina que el agente más dominante responsable de accionar el transporte de sedimento es el oleaje, y éste debe ser determinado antes, durante y después de rotura, siendo este proceso el más importante en el decaimiento de la energía dentro de la zona de *surf*. La propagación del oleaje en el presente documento se realizó mediante dos enfoques; paramétrico y espectral.

La propagación del oleaje mediante el enfoque paramétrico se realizó implementando 13 aproximaciones para estimar la tasa de disipación por rotura, estos esquemas fueron validados con mediciones de laboratorio para un amplio rango de condiciones hidrodinámicas. Los resultados mostraron en general que para los perfiles sin presencia de barra, el error es inferior al 5% para todos los esquemas probados, mientras que los casos con barra el error está en torno al 10% para los esquemas de energía límite, aumentando para el resto de los casos. El enfoque espectral se realizó para una sola tasa de disipación y los resultados indicaron una buena correspondencia entre los espectros simulados y los medidos en terreno, de las comparaciones con mediciones de campo se concluyó como adecuada la modelación del oleaje para los datos probados mediante el enfoque paramétrico.

Se desarrolló un análisis cualitativo de algunas de las expresiones disponibles para la estimación de las variaciones del nivel medio y corrientes, además se evaluó el efecto del *roller*. Se concluyó que incluir el *roller* implica una mejora en las comparaciones con datos de laboratorio y es necesario para aumentar la precisión en la estimación de la variación del nivel medio del mar, así como también de las corrientes.

Para evaluar la efectividad en la estimación del transporte de sedimentos y los esquemas numéricos disponibles para resolver la ecuación de balance del sedimento, se probaron algunas expresiones, encontrando que estas son capaces de modelar las variaciones en la morfología producto de la acción de una tormenta. Se efectuó un análisis cuantitativo del error entre los perfiles medidos y los resultantes de la modelación, obteniéndose en el mejor de los casos un error cuadrático medio de 0.2 m, valor adecuado en este tipo de modelaciones.

Como conclusión general se determinó que la simulación de la evolución del perfil de playa ante la acción de tormentas es un proceso complejo, sin embargo, se puede representar de manera adecuada mediante un enfoque numérico si los agentes principales (oleaje, corriente, transporte de sedimentos y conservación de la cantidad de sedimentos) son bien representados.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES

Predecir la evolución morfodinámica del perfil de playa ha sido un desafío para la ingeniería de costas durante las últimas décadas. Caracterizar el comportamiento de la playa ante el ataque de un temporal, la interacción con una obra, o simplemente su variación ante la acción del oleaje, es determinante para soluciones de ingeniería en diversas tipologías estructurales, dispuestas a contribuir en las actividades donde interactúa el hombre con la costa.

Los primeros estudios de respuesta de playas se remontan a fines de la década 1970 y fueron desarrollados de forma paralela por Wright et al. (1979) y Short (1979), posteriormente ambos avances se unen en 1984 resultando en un modelo de evolución de la costa, donde se explica la variación morfodinámica en la zona de rompientes como una función de la energía incidente. El problema generalmente se aborda desacoplando los efectos en dos componentes; longitudinal y transversal para luego integrar ambos y explicar las variaciones reales que sufre la costa, y por lo tanto se abren líneas de estudio de la evolución en planta y perfil de la playa. En la presente memoria se abordará el estudio de la respuesta del perfil transversal de playa ante la acción de una tormenta.

Predecir cómo se moverán los sedimentos debido a la acción del oleaje implica caracterizar su propagación, la generación de corrientes y el transporte de sedimentos a lo largo del perfil. Uno de los mayores desafíos es tratar de representar la rotura y posterior propagación de las ondas en la zona de *surf*. Para las corrientes se deben establecer condiciones en las cercanías del fondo, y en el caso de los sedimentos son muchos los desafíos para caracterizarlos, definir sus variaciones espacio-temporales y su interacción con los agentes anteriormente descritos, generalmente se considera un parámetro de resumen de la distribución granulométrica para caracterizar el comportamiento del sedimento.

En la actualidad, existe un conjunto de modelos numéricos capaces de resolver la evolución morfodinámica del perfil de playa ante la acción de una tormenta, sin embargo, la variabilidad de las magnitudes físicas que resuelven el problema es en muchos casos alta y a veces se alejan de la realidad, debido a que estos están desarrollados para ciertas condiciones que usualmente son distintas a las de las costas chilenas. Es por este motivo y sumada la importancia de estudiar estos fenómenos, se hace necesario evaluar la capacidad de representar correctamente los escenarios chilenos, ya que éstos presentan singularidades que hacen que las condiciones locales tomen importancia en la predicción de los fenómenos involucrados en el proceso de evolución de la morfología en playas.

1.2 MOTIVACIÓN

Se debe reconocer que el oleaje es el agente clave en la evolución morfodinámica de corto plazo estudiada en el presente documento. Hasta hoy, no se cuenta con una teoría que resuelva la física de la rotura y post-rotura de éste, debido a que es altamente no lineal, caótico y turbulento. Estas características hacen que los principios y supuestos que soportan las teorías que representan la mecánica del oleaje no sean válidos, A pesar de lo anterior la ingeniería de costas ha creado diversos criterios empírico teóricos capaces de representar el fenómeno en condiciones específicas. El presente estudio pretende desarrollar una herramienta capaz de simular este fenómeno mediante los criterios utilizados en el estado de la técnica, con miras a esclarecer la correcta aplicabilidad de estos, y efectuar recomendaciones para el ejercicio en las costas chilenas. Para ello la herramienta será capaz de resolver la propagación del oleaje irregular, la rotura y post-rotura de éste.

Los modelos disponibles en la actualidad, que son capaces de resolver la propagación de oleaje irregular, rompiente y evolución post-rotura, actúan promediando la energía completa del estado de mar para evaluar las condiciones de rotura y post-rotura. El modelo que se desarrollará pretende incorporar tanto la propagación y saturación espectral producto de la rompiente.

Una vez estudiado el comportamiento del oleaje se pueden predecir las condiciones de circulación del perfil, el cual es de vital importancia en la caracterización de las corrientes tanto a lo largo de la playa (*longshore current*), como las transversales (*cross-shore current*), siendo más importantes las corrientes transversales a la línea de costa para efectos de modelar las variaciones del perfil ante la acción de una tormenta.

Luego de caracterizar el oleaje y circulación de la playa es posible estimar el transporte de sedimentos en el perfil. Esta materia posee un grado de incertidumbre mayor que las anteriores, debido a que este fenómeno es complejo y aún no se tiene una total claridad del comportamiento del flujo y por tanto de las fuerzas que gobiernan la mecánica de estas partículas, a pesar que algunos autores han hecho grandes avances en su entendimiento, todavía una estimación adecuada del transporte de sedimentos tiene asociado un error aproximado de un 200% según la experiencia de diversos ingenieros de costas.

Existe gran variabilidad en los resultados cuando se comparan modelos numéricos con la capacidad de predecir la evolución morfodinámica. Esto se debe a que además de contener distintos criterios adoptados por los autores, las formulaciones que se emplean muchas veces poseen parámetros de calibración no editables, lo cual sucede frecuentemente en modelos comerciales. Sólo en los de código abierto, los cuales generalmente son desarrollados por universidades extranjeras, los coeficientes pueden ser ajustados libremente. Este estudio pretende recoger los esquemas de cálculo más comunes, y evaluar el comportamiento de estos.

La bondad del modelo respecto del módulo de oleaje será probada mediante datos de laboratorio para dos tipos de perfiles. El primero un perfil típico de playa en acreción, en el cual no hay presencia de barras y generalmente se da una sola zona de rompiente, el segundo posee una barra fija para obtener más de una zona de rompiente, por lo que es necesario considerar oleaje en rotura, reformado y progresivo. Esto permitirá evaluar el

comportamiento de los modelos de energía límite, y sus diferencias con los de disipación de *bore*.

Para efectos de probar la bondad de los módulos de corriente, transporte de sedimento y su evolución en el tiempo se requiere una gran cantidad de datos de campos. Efectuar tales mediciones es muy costoso debido al valor de los instrumentos, fondeo, retiro y post-proceso de estos. Realizar una campaña de terreno que satisfaga las necesidades de este proyecto de título es impracticable para efectos de esta memoria debido a su alto costo, sin embargo, se utilizarán datos obtenidos del *US Army Corps of Engineers: Engineer Research & Development Center, Field Research Facility*. Ésta entidad mantiene desde 1980 el monitoreo de una playa en Carolina del Norte donde existe la facilidad de obtener datos con el fin de validar los módulos restantes y el comportamiento global del modelo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la correcta modelación numérica de la evolución morfodinámica de las playas, y efectuar recomendaciones acerca de las formulaciones disponibles en la actualidad para caracterizar los agentes responsables de la dinámica de la costa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos se listan a continuación:

- Resolver numéricamente las ecuaciones que permiten predecir la propagación, la rotura y post propagación del oleaje mediante técnicas espectrales y de parámetros de resumen, caracterizar las corrientes inducidas por el oleaje, el transporte de sedimentos y la variación del perfil transversal de la playa debido a la acción de una tormenta.
- Realizar un análisis de sensibilidad de las formulaciones y modelos disponibles en la actualidad, efectuar recomendaciones acerca de su uso, evaluar la calidad de los resultados y calificar su capacidad de ajustarse a realidad empleando datos medidos de campo y laboratorio.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA EN PLAYAS.

Cuantificar cómo evoluciona la topobatimetría de una playa, es una de las muchas interrogantes a resolver en ingeniería de costas. En este contexto que durante las últimas décadas se ha producido un especial interés por comprender los fenómenos que gobiernan estas variaciones, y por consiguiente, lograr predecir cuanto cambiará la playa si es sometida a la acción de una tormenta.

Un ejemplo de esta evolución morfodinámica se muestra en la Figura 3.1 donde se observa la Playa Acapulco ubicada en Viña del Mar, zona centro de Chile. Las fotografías de la izquierda (A y C) muestran la playa en condición de invierno, mientras que las de la derecha (B y D) muestran la condición de verano. Se aprecian diferencias importantes tanto en la superficie de playa emergida como en las condiciones del oleaje incidente.



Figura 3.1: Comparación invierno-verano, Playa Acapulco, Viña del Mar.
(Fuente: Archivo Personal)

Las variaciones más importantes del perfil transversal de la playa, ocurren cuando ésta es sometida a la acción de eventos cuya energía es significativamente mayor a las condiciones reinantes propias de la localidad. En las costas chilenas se pueden apreciar dos tipos de tormentas; las que arriban a la costa presentando solo condiciones severas de oleaje, en éste caso las tormentas se desarrollan lejos de la costa. El otro caso corresponde a cuando estas tormentas pasan por la costa, en donde además del fuerte oleaje se observan fuertes vientos y variaciones de presión atmosférica.



Figura 3.2: Comparación variación de la porción emergida de un muro.
(Fuente: Archivo personal)

La acción de estos agentes en la playa, provocan que ésta varíe significativamente, siendo estos cambios difíciles de cuantificar y aún más de predecir, sin embargo, este ejercicio es obligatorio cuando se pretende proyectar una obra. En la Figura 3.2 se puede observar a la izquierda (A) un muro cuya porción emergida es de tan solo unos centímetros en condiciones de verano, en contraste con la foto de la derecha (B), luego de la acción de una tormenta se aprecia que la porción emergida es mucho mayor, al igual que el oleaje que incide sobre estos. Para evaluar la estabilidad y dimensiones de estos muros necesariamente se debe tomar en cuenta estas variaciones, luego se hace evidente que poseer información acerca de la evolución morfodinámica es un factor de diseño.

Se debe reconocer que el oleaje es el fenómeno que induce al resto de los agentes relevantes en las variaciones del perfil. Considerando lo anterior es de especial cuidado representar adecuadamente las características de éste, incluyendo en la transformación procesos que aún no son totalmente comprendidos, como por ejemplo la rotura y su posterior propagación hasta la cara de la playa, la turbulencia y la aparición de vórtices los cuales influyen en el inicio del movimiento del sedimento, y la mecánica de los sedimentos en presencia de estos campos de velocidades. Además existen procesos muy difíciles de cuantificar físicamente como Run-Up, formación de formas de fondo, la velocidad de caída de los sedimentos, entre otros.

Lo anterior apunta a que se tiene un conocimiento parcial de lo que ocurre con el flujo, lo que hace muy difícil la estimación de cuanto sedimento se moverá ante el ataque de un temporal. En la práctica es aún más complejo, debido a que existen una distribución de tamaños del sedimento, así como de su peso dependiendo de la configuración mineralógica de las partículas, su geometría, por lo que en ningún caso se estará en presencia de partículas perfectamente esféricas como lo asumen la mayoría de las teorías, los granos también se agrupan dificultando al flujo que trata de ponerlas en movimiento, además se encuentra la ayuda de agentes biológicos que se presentan frecuentemente en las playas lo que aumenta la porosidad y D_{50} por la cementación. Por último, no es posible saber exactamente como se moverá una partícula ideal aún en presencia de un flujo idealizado, ni la interacción entre el sedimento y el flujo. Todo esto se debe solucionar de cierta forma, para que estas herramientas sean capaces de predecir la evolución del perfil.

3.1.1 MODELACIÓN DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA

El estado de la técnica de la modelación de los fenómenos responsables de la variación de la topobatemetría, tal como el oleaje, las corrientes inducidas por éste, mareas y el transporte de sedimento, han llegado a un punto sin precedentes, donde las súper computadoras son capaces de aproximar soluciones numéricamente que cada vez se acercan más a la realidad, sin embargo, no se debe perder de vista los objetivos y los costos que implica realizar estos cálculos, versus la aplicabilidad de los modelos en tiempos razonables para el proyecto y el grado de precisión necesario en la cuantificación del fenómeno. En este punto cobra importancia la utilización de modelos cuyos resultados tengan sentido para el ejercicio del análisis de la playa, y cuyos gastos computacionales, sean adecuados para los plazos del proyecto.

La modelación de los fenómenos está estrechamente relacionada con la escala espacio temporal en la que éstos ocurren. En morfología cada proceso puede simplificarse suponiendo que ocurre a una escala distinta, lo cual facilita la caracterización y cuantificación de estos. Sin embargo es necesario tomar en cuenta que estos procesos no son independientes y sólo se separan para facilitar su comprensión.

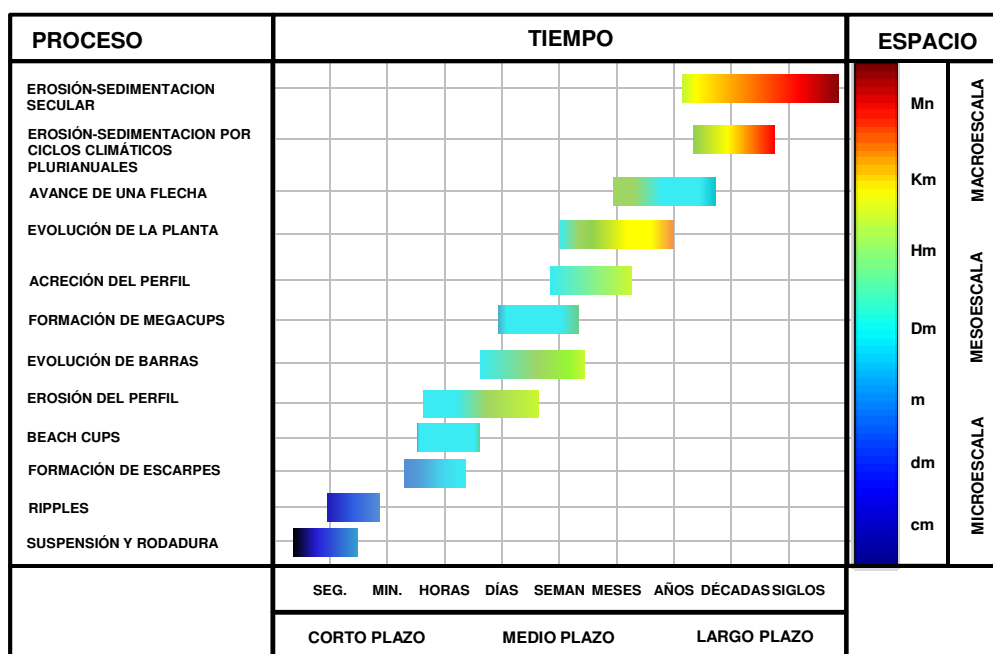


Figura 3.3: Procesos según escalas espaciales y temporales.
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3.3 se puede observar un resumen de los procesos comúnmente estudiados para comprender como evolucionan las playas, y las escalas a las cuales estos ocurren. Se puede apreciar que algunos deben ser estudiados en escalas del orden de segundos y centímetros, y otros abarcan cientos de kilómetros y ocurren en tiempos equivalentes a los siglos. Esto implica que dependiendo de la disciplina correspondiente, será el interés de estudiar ciertos procesos, es decir, para ingeniería por ejemplo, las escalas de los procesos

considerados estarán de acuerdo a la vida útil y el área de influencia de la obra a materializar.

Modelar la evolución de una playa se torna una tarea complicada, ya que se reconoce que los procesos que ocurren en la realidad no podrán ser totalmente representados en un solo modelo, el cual abarque todas las escalas e integre todos los procesos, en cambio se debe seleccionar cual proceso se quiere cuantificar y luego seleccionar el modelo con las capacidades deseadas, considerando que éste debe simular los agentes que son relevantes en esta escala.

En ingeniería de costas generalmente son necesarios modelos que representen la evolución morfodinámica en el corto (horas a días) y largo plazo (años a decenas de años).

Se debe reconocer además la tridimensionalidad de los fenómenos, y por lo tanto, las variaciones de los agentes que actúan sobre la playa se deben resolver considerando el espacio. Al analizar estos fenómenos, se encuentra que dependiendo del proceso que se está simulando, muchas veces las variaciones en uno o más ejes es despreciable con respecto las demás, lo que permite la reducción de las dimensiones de análisis del fenómeno, por ejemplo el oleaje generalmente se resuelve integrando en la vertical, reduciendo el problema a dos dimensiones.

Para estudiar la evolución de corto plazo de una playa producto de un temporal, generalmente se utilizan dos tipos de modelos que comúnmente se denominan 2DV y 2DH, estos separan los fenómenos relevantes en el perfil y en la planta de la playa, respectivamente. En la presente memoria se desarrollará un modelo de respuesta del perfil de playa sin considerar los efectos en planta.

3.1.2 MODELOS DE RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA

Los modelos de perfil generalmente son empleados para caracterizar la erosión en la cara de la playa y la formación de barras en la playa sumergida, debido al ataque de un temporal. El agente más determinante en estos modelos es el oleaje, éste induce la mayoría los procesos que hacen que finalmente exista una variación del perfil.

La forma como estos modelos resuelven la evolución morfodinámica, es independizando cada agente, de esta manera se hace posible la resolución de éstos a lo largo del perfil. Se debe reconocer que los agentes interactúan entre si y separarlos implica una simplificación del problema.

Todos los modelos de respuesta del perfil de playa consideran cuatro módulos fundamentales que actúan a lo largo del dominio; condiciones iniciales y de borde, hidrodinámica, transporte de sedimentos y evolución morfodinámica, éstos se resuelven para cuantificar como varía el perfil ante la acción de las condiciones de tormenta. La Figura 3.4 presenta un esquema básico que muestra como es la estructura y el ciclo más elemental de este tipo de modelos.

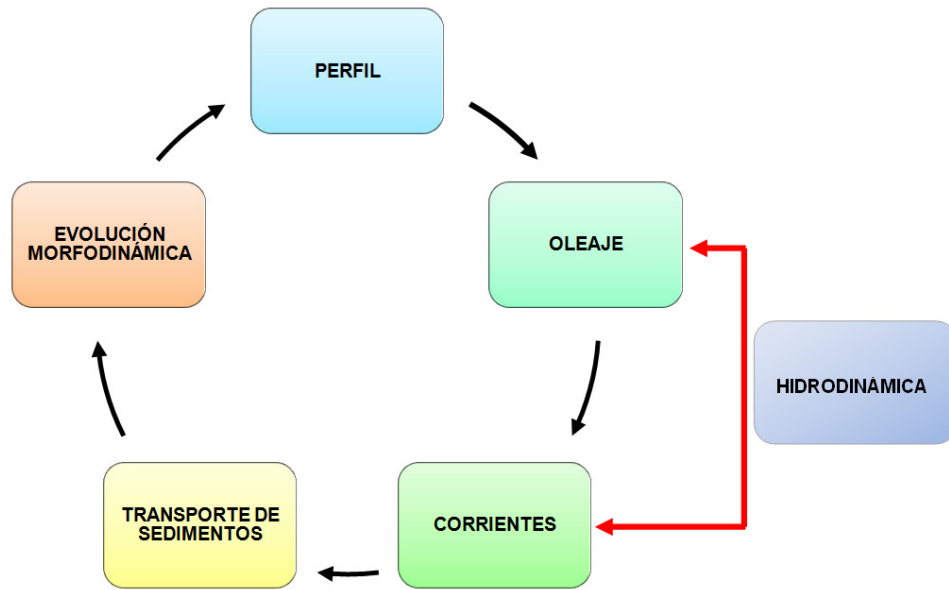


Figura 3.4: Esquema básico de un modelo de respuesta del perfil de playa.
(Fuente: Elaboración propia)

I. Bøker (1992) realiza una revisión de las características y capacidades de seis diferentes modelos de corto plazo de respuesta del perfil, estos son:

- LITCROSS, *Danish Hydraulic Institute*; considera la propagación post rotura acorde a la relación empírica sugerida por Andersen & Fredsøe (1983). La contribución de la turbulencia proviene de la pérdida de energía del oleaje y del *roller* de superficie, la cual es calculada por la ecuación de transporte vertical de Deigaard et al. (1986). Las corrientes son determinadas considerando lo descrito por Longuet-Higgins (1953). El transporte de sedimentos neto es calculado separando cargas por fondo y suspendidas, la distribución vertical de la concentración de sedimento en suspensión es calculada mediante la ecuación vertical de difusión de Deigaard et al. (1986). La evolución del perfil está determinada por la ecuación de continuidad del sedimento, para obtener una solución estable se emplea una modificación del esquema Lax-Wendroff. Mayores detalles acerca del LITCROSS pueden ser encontrados en I. Bøker (1991).
- UNIBEST, *Delft thydraulics*; este modelo proviene del modelo OSTRAN (Stive & Battjes, 1984). El oleaje es caracterizado acorde a Battjes & Janssen (1978). Las corrientes transversales son descritas conforme al desarrollo de De Vriend & Stive (1989). El transporte de sedimentos se basa en el enfoque energético propuesto por Bailard (1981). La evolución del perfil se realiza mediante un esquema completamente implícito.
- NPM, *Hydraulic Research*; El oleaje descrito considerando transformación por refracción inducida por variaciones de profundidad y corrientes, asomeramiento, variaciones por efecto Doppler, fricción de fondo y rotura acorde con Battjes & Janssen (1978). Se incluyen corrientes longitudinales inducidas por mareas y oleaje. Las corrientes transversales son cuantificadas empleando el método de tres capas propuesto por De Vriend & Stive (1987). La tasa de transporte de sedimentos

longitudinal y transversal es tomada utilizando la aproximación energética de Bailard (1981) y Stive (1986). La evolución del fondo se realiza mediante el esquema de Lax-Wendroff. NPM es descrito en detalle en Southgate & Nairn (1993a) y Nairn & Southgate (1993b).

- WATAN 3, *University of Liverpool*; WATAN 3 emplea un sub-modelo de oleaje propuesto por Watanabe & Dibajnia (1988), éste comprende dos ecuaciones equivalentes a una versión dependiente del tiempo de la ecuación de pendiente suave, incorporando un término adicional que permite la disipación de energía en la zona de surf. El transporte de sedimentos es calculado mediante un sub-modelo propuesto por Ohnaka & Watanabe (1990), basado en la tasa de transporte de sedimentos dada por la acción del oleaje.
- SEDITEL, *Laboratoire National d`Hydraulique*; considera la transformación de oleaje incluyendo refracción, asomeramiento y decaimiento por rompiente en la zona de surf. Incluye efectos no lineales de aguas someras en el cálculo del flujo de energía acorde con Pechon (1987). Las corrientes inducidas por la rotura del oleaje son obtenidas mediante el modelo tridimensional TELEMAC 3D descrito en Lepeintre et al. (1991). El transporte de arena es obtenido mediante la fórmula de Bailard (1981), modificando el factor de eficiencia del transporte en suspensión, para tener en cuenta el incremento de éste en la zona de surf debido a los efectos de la rotura.
- REPLA, *SOGREAH*; en su módulo de oleaje promediado en la fase considera; amplitud finita, asomeramiento y refracción, detalles acerca de la formulación pueden ser encontrados en Fornerino et al. (1992). Para valores pequeños del número de Ursell este modelo emplea teoría de Stokes de tercer orden y para valores grandes de Ursell utiliza teoría cnoidal de segundo orden. La rotura es considerada empleando el criterio de Weggel (1972). Para oleaje irregular es posible elegir entre una aproximación paramétrica de Battjes & Janssen (1978) o una aproximación probabilística utilizando el método ola a ola de Mase & Iwagaki; Mizuguchi (1982).

Bøker (1992) observa grandes diferencias en cada uno de estos modelos, además en base a las comparaciones que realiza con datos de laboratorio, encuentra que en general los modelos tienden a subestimar el transporte de sedimento offshore, ningún modelo considera los procesos que ocurren en la duna, ni los efectos que ésta tiene en la playa sumergida.

Es necesario destacar que además de los modelos comentados Bøker (1992), existe una herramienta de uso ampliamente difundido que fue desarrollada por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE) en 1981 conocida como SBEACH. Sin embargo, este modelo se diferencia de los anteriores ya que la solución de la ecuación de la evolución morfodinámica del fondo es forzada haciéndola tender a una forma pre-definida; conocida como “perfil de equilibrio”.

Roelvink & Bøker (1993) hacen nuevamente una recopilación de modelos de respuesta de perfil de playa, poniendo énfasis en la determinación de la tasa de transporte de sedimento, y además revisando conceptos históricos en la modelación de la evolución morfodinámica de la costa.

Schoonees & Theron (1995), realizan una revisión de 10 modelos de respuesta del perfil transversal, en este documento se recogen algunos aspectos fundamentales que deben poseer este tipo de herramientas, los cuales son mencionados por Larson et al. (1990^a):

- Simulación de la variación del perfil suficientemente precisa y confiable, considerando los inputs típicos disponibles en un proyecto de ingeniería.
- Representación del transporte de sedimentos y cambios en la playa en las escalas espacio temporales de interés para la ingeniería.
- Adecuada representación de condiciones de borde producto de obras y configuraciones costeras.
- Cálculos robustos, que impliquen que las incertezas típicas presentes en los proyectos de ingeniería, no signifiquen predicciones absurdas.
- Economía en los tiempos de ejecución del modelo.

Otros criterios acerca del modelo ideal de respuesta del perfil, pueden encontrarse en el trabajo de Birkemeier (1991).

Según Schoonees & Theron (1995) las características esenciales de un modelo de repuesta del perfil deben ser:

- El modelo debe ser teóricamente robusto y no considerar supuestos inapropiados.
- El modelo debe ser calibrado y validado mediante datos con un amplio rango de condiciones.
- El modelo debe ser capaz de representar eventos de acreción y erosión, que permita la generación de una envolvente de la respuesta del perfil de playa.
- La dinámica del perfil a nivel macro, para procesos como crecimiento, movimiento y decaimiento de barras y valles, deben ser simulados poniendo énfasis en las recomendaciones propuestas por Birkemeier (1991).

Tomando estas características Schoonees & Theron (1995) ordenan los modelos candidatos en tres clasificaciones denominadas; “bueno”, “aceptable” y “menos adecuado”.

Los modelos revisados por Schoonees & Theron (1995) fueron los siguientes:

- Bailard (B)
- Steetzel (St)
- DHI (L)
- Watanabe (W)
- Larson & Kraus (L&K)
- Nishimura & Sunamura (N&S)
- Shibayama (Sh)
- Swart (Sw)
- Dally & Dean (D&D)
- Kriebel & Dean (K&D)

Schoonees & Theron (1995) generan una tabla comparativa de las capacidades de los modelos estudiados, en función de los procesos que resuelven.

Tabla 3.1: Resumen de las características y capacidades del modelo para su comparación realizado por Schoonees & Theron (1995).

Aspectos	Modelo número y nombre									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Sw	D&D	B	K&D	Sh	W	N&S	St	L&K	L
Simulación de erosión y acreción	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
Barras (macro cambio perfil)	0	2	2	0	2	2	2	2	2	2
Disminución de duna	0	0	2	2	?	2	2	0	2	1
Sobre paso duna	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0
Revestimiento/muros, perfil de roca	2	0	2	2	0	0	0	2	2	0
Ondas largas	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Profundidad de cierre	2	0	0	0	0	2	0	0	1	0
Variaciones del nivel de agua	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

2= si/puede simular esto/tiene en cuenta este aspecto.

1= posiblemente/toma en cuenta esta aspecto en algún grado.

0=no/no puede simular esto/no toma en cuenta este aspecto.

?= no existe suficiente información disponible.

(Fuente: Elaboración propia Schoonees & Theron (1995))

Finalmente Schoonees & Theron (1995) clasifican dentro de los tres grupos anteriormente mencionados los 10 modelos considerados. Los resultados son los siguientes:

1. Mejor grupo:
 - Bailard (B)
 - Steetzel (St)
 - DHI (L)
2. Grupo aceptable:
 - Watanabe (W)
 - Larson & Kraus (L&K)
 - Nishimura & Sunamura (N&S)
 - Shibayama (Sh)
3. Grupo con una base teórica menos adecuada:
 - Swart (Sw)
 - Dally & Dean (D&D)
 - Kriebel & Dean (K&D)

Se puede observar luego de lo comentado que existe una gran diversidad de modelos disponibles, lo que significa que aún no existe una convención acerca de que es lo más adecuado al momento de evaluar las variaciones del perfil producto de una tormenta. Revisiones del estado del arte de la modelación de estos procesos serán necesarias, en la medida que la ingeniería adopte nuevos desafíos que exijan mejoras en las predicciones actuales.

Cabe destacar que estas revisiones y comentarios realizados a los modelos disponibles, han constituido la base de los desarrollos futuros de herramientas numéricas. En la actualidad

existen algunos modelos más robustos, tal es el caso del modelo XBEACH desarrollado en conjunto por la Universidad de Miami, Delf *University of technology* y UNESCO-IHE, para mayor detalle de este modelo se sugiere ver Roelvink et al. (2010).

3.1.3 PARTICULARIDADES DE LA MORFOLOGÍA EN LAS COSTAS DE CHILE

Chile presenta algunas particularidades en su costa, las cuales influyen en los agentes que provocan la respuesta de la geomorfología. Observando a nivel de mega-escala, la costa del Sur-Oeste del Pacífico presenta una zona de convergencia de las placas tectónica Sudamericana y de Nazca del tipo subducción, muy cercana a la costa (Ver Figura 3.5, línea roja), lo que implica un talud continental pequeño y de pendiente fuerte producto de las grandes profundidades de la fosa oceánica. Este es uno de los motivos por los cuales la modelación del oleaje utilizando modelos basados en la teoría de ondas, que poseen limitaciones de profundidad, serán difíciles de aplicar en algunas localidades en Chile y necesitan ser evaluados.



Figura 3.5: Esquema mega escala de la morfología en las costas de Chile
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a lo anterior, el uso de modelos lineales en Chile permite acercar adecuadamente el oleaje hasta la zona de los proyectos.

3.2 OLEAJE.

Es uno de los factores más relevantes en los modelos de respuesta del perfil de playa, ya que es el punto de partida de la caracterización hidrodinámica, debido a la configuración morfológica del perfil.

A continuación se presentan algunos tópicos básicos necesarios para comprender la caracterización del oleaje y los fenómenos que ocurren en la zona de surf.

3.2.1 GENERALIDADES

Las oscilaciones en el océano son un tema complejo y ampliamente estudiado, detalles acerca de esta materia escapan de los objetivos de esta memoria y se asumen conocidos por el lector, sin embargo algunos conceptos básicos importantes se revisan en este apartado con el objeto de que el lector pueda manejar adecuadamente las ideas expuestas. Para profundizar los conocimientos básicos no tratados en este documento se sugiere la

lectura de documentos de Referencia como los son; el escrito por la Universidad de Cantabria, Coastal Engineering manual ó Shore Protection Manual.

Dos grandes tipos de ondas han sido las columnas centrales del desarrollo teórico de la descripción del oleaje gravitacional; el oleaje que se acerca más a las condiciones ideales para la descripción matemática y teórica, denominado oleaje regular, y el que se observa en el océano, más caótico y difícil de caracterizar, denominado oleaje irregular.

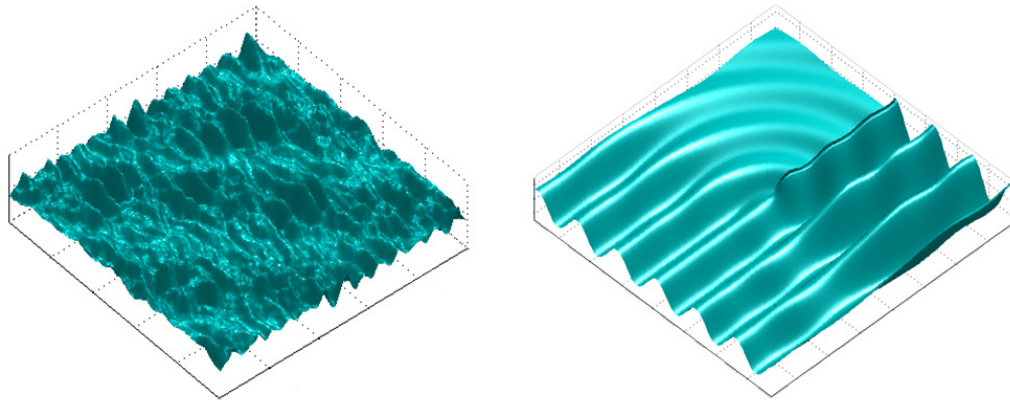


Figura 3.6: Comparación entre oleaje regular e irregular.
(Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en la Figura 3.6, es evidente que tratar de representar las oscilaciones presentes en el oleaje irregular implica un desafío mayor en términos matemáticos y físicos. Sin embargo, este es el que afecta las costas, por lo que los modelos de evolución del perfil deben poseer la capacidad de resolver la hidrodinámica considerando éstas condiciones.

3.2.1.1 DESCRIPCIÓN OLEAJE REGULAR

La descripción del oleaje regular es más simple y ampliamente aceptada producto de su similitud con la descripción más elemental de las ondas.

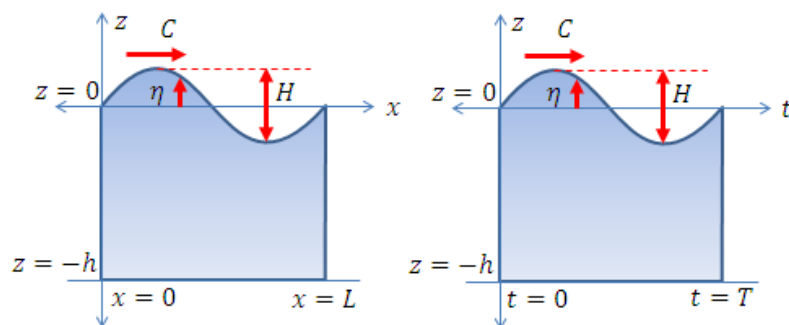


Figura 3.7: Descripción de oleaje regular en el espacio y en el tiempo.
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3.7 se muestran las variables más comunes empleadas para caracterizar un tren de olas regulares, en donde:

H : Altura de ola, es la distancia entre la cresta y el valle de la oscilación.

T : Período temporal (en adelante período), es el tiempo que transcurre para que un punto vuelva a tener la misma posición luego de realizar una oscilación.

L : Período espacial (en adelante longitud de onda), es la distancia que existe entre dos puntos de igual elevación separados por el desarrollo de una oscilación.

h : Es la profundidad del agua considerando que no existe perturbación.

η : Superficie libre o desnivelación; es una función que determina la forma que tiene la perturbación en el tiempo y el espacio de la superficie del agua.

x, z, t : Son las dimensiones del sistema de referencia en dos dimensiones, para la representación del oleaje.

Estas variables pueden ser relacionadas aplicando una teoría de oleaje, la cual resuelve la mecánica de las partículas al paso de la ola. Dependiendo de los valores de estas variables, se puede realizar la aplicación de una teoría en particular, siguiendo por ejemplo la recomendación que se muestra en la Figura 3.8 presentada por Kamphuis (2000).

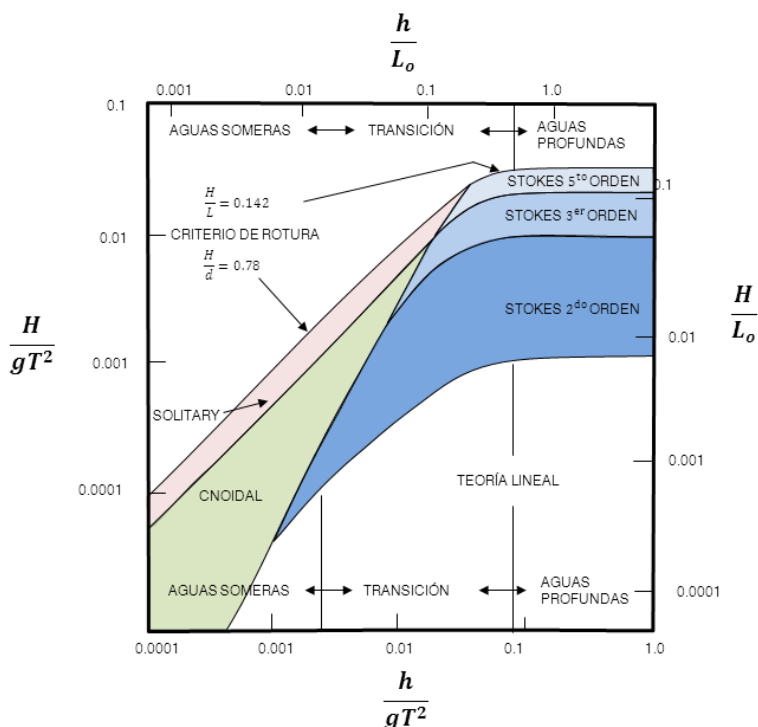


Figura 3.8: Validez de las teorías de oleaje.
(Fuente: Kamphuis (2000))

De todas las teorías que aparecen en la Figura 3.8, la más importante para la modelación del oleaje es la teoría lineal, ya que al considerar que el proceso obedece a estas características, puede aplicarse el principio de superposición, lo que significa la posibilidad de caracterizar fenómenos complejos como la suma de muchas componentes simples. La mecánica de las ondas regulares según la teoría lineal propuesta por George Biddell Airy (1845), aplica la conservación de la energía y masa, asumiendo el agua como un fluido irrotacional e incompresible. El resultado de estos supuestos implica que el fenómeno queda gobernado por la ecuación de Laplace, la cual es resuelta imponiendo condiciones de borde e iniciales, siendo las más trascendentales la de fondo horizontal y presión constante en la superficie libre, esto último supone la inexistencia del viento, que es el agente generador de las oscilaciones estudiadas.

3.2.1.2 DESCRIPCIÓN OLEAJE IRREGULAR

El oleaje irregular presenta como fenómeno una determinada inercia, la cual significa que durante un intervalo de tiempo (estado de mar), las variables básicas permanecerán constantes, además se deben reconocer la naturaleza aleatoria del fenómeno. Esta descripción se denomina análisis de oleaje de corto plazo y se apoya en la hipótesis de ergodisidad, la cual acota la estacionariedad estadística temporal y la homogeneidad espacial de los procesos aleatorios.

Las variables básicas que describen el oleaje irregular, generalmente son tres; altura, período y dirección. La longitud de tiempo en el cual estas variables pueden ser asumidas como constantes es típicamente tres horas. Se debe recordar que existen además variables instantáneas como la altura de ola individual, período, desnivelación, etc.

Dos enfoques son empleados para describir las variables básicas de un estado de mar, el primero se trata del enfoque estadístico, que describe el proceso aleatorio mediante el análisis de una serie temporal de las variables instantáneas, para obtener sus modelos de probabilidad y momentos estadísticos.

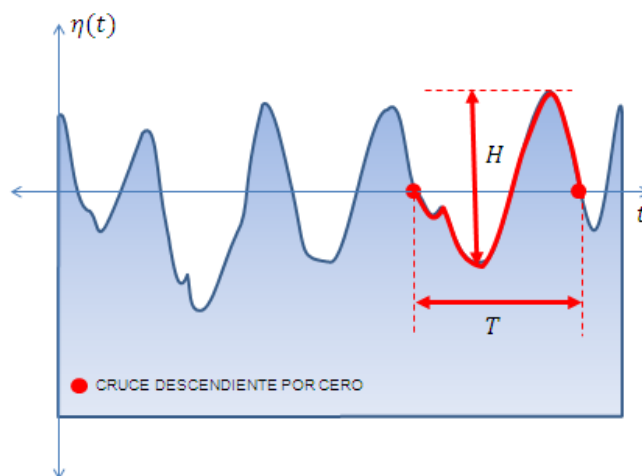


Figura 3.9: Descripción estadística de oleaje irregular.
(Fuente: Elaboración propia)

Como se muestra en la Figura 3.9, a partir de las variables instantáneas es posible mediante diversas técnicas como cruces ascendentes o descendentes por cero, coleccionar una muestra de las variables de altura de ola y período. Luego las variables de estado pueden ser obtenidas a partir de esta muestra.

Algunas comúnmente utilizadas son:

Altura promedio:
$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (3.1)$$

Altura cuadrática media:
$$H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Altura significativa:
$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (3.3)$$

Este último parámetro es relevante, ya que se parece a la altura de ola que era estimada mediante observaciones visuales, por lo que es muy común que las formulaciones empleen este parámetro para considerar el oleaje.

El mismo procedimiento se puede realizar con los períodos, algunos de los más típicos son:

Período promedio de cruces por cero:
$$\bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i} \quad (3.4)$$

Período significativo:
$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} T_i \quad (3.5)$$

Esta forma de caracterizar el oleaje posee algunas desventajas, debido a que los algoritmos dependiendo de la técnica escogida, deben adoptar una definición de ola, que en muchos casos no es tan clara como el esquema que presenta la Figura 3.9, lo que dificulta el proceso. Otro inconveniente es la dirección, estas series de desnivelación son medidas puntuales, por lo que no se sabe a priori cual es la dirección de cada una de las olas coleccionadas.

El segundo enfoque se denomina espectral, y es ampliamente utilizado en la actualidad por su alto potencial en la representación del oleaje irregular, así como también en otros fenómenos de naturaleza oscilatoria.

El análisis espectral del oleaje se basa en un concepto aparentemente simple en un comienzo, pero muy complejo en la realidad. La función de superficie libre (Figura 3.9) puede ser representada a partir de la superposición de oscilaciones regulares, matemáticamente esto es:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (3.6)$$

Donde α y a son la fase y amplitud respectivamente y f es la frecuencia. Cada uno de estos armónicos puede ser determinado a partir de una serie de Fourier.

La aplicación del análisis espectral sobre las series de tiempo de desnivelación, entrega dos espectros, uno de amplitud y otro de fase para cada armónico como se muestra en la Figura 3.10. La vinculación de ambos espectros es descuidada en la mayoría de los casos, ya que el concepto de energía está ligado con la amplitud, sin embargo los procesos de transformación del oleaje que dependen de la fase, como reflexión difracción y otros, son un problema al trabajar con densidades espectrales.

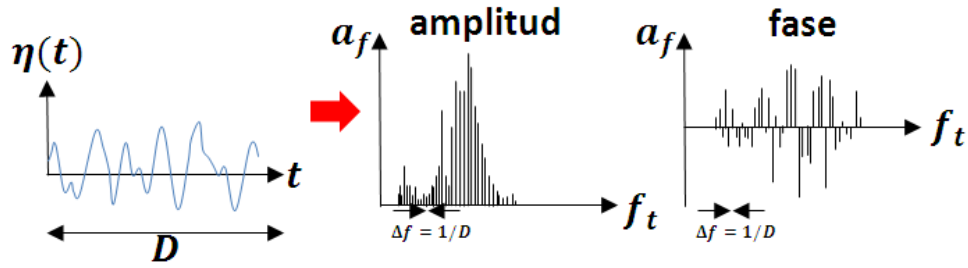


Figura 3.10: Espectro de superficie de amplitud y de fase.
(Fuente: Holthuijsen (2007))

El espectro de frecuencias, el cual representa la energía asociada a un rango de períodos o frecuencias es:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} a^2 \quad (3.7)$$

Considerando que las alturas de ola se distribuyen Rayleigh, se puede vincular la varianza a cada banda de frecuencias de modo de obtener la densidad espectral, que implica una descripción completa de la superficie libre en términos estadísticos, para un proceso Gaussiano y estacionario:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} E \left\{ \frac{1}{2} a^2 \right\} \quad (3.8)$$

La caracterización espectral puede ser expandida al dominio de las direcciones de las componentes armónicas a través de la descomposición del vector número de onda.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \alpha_{i,j}) \quad (3.9)$$

Luego la densidad espectral se obtiene análogamente al caso unidimensional de frecuencias, como:

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} E \left\{ \frac{1}{2} a^2 \right\} \quad (3.10)$$

Más detalles de este procedimiento pueden ser encontrados en Holthuijsen (2007).

Un aspecto importante en el tratamiento de los espectros, es la respuesta de éste al ser sometido a funciones de transferencia, Holthuijsen (2007) explica cuan determinante es la linealidad de los fenómenos y la obtención de la repuesta ante una excitación del espectro.

Si un espectro es excitado primero mediante un input $\delta(t)$ y se obtiene como respuesta $\Delta(t)$, y si luego se excita mediante otro input $\omega(t)$ obteniendo como respuesta $\Omega(t)$, el sistema es llamado lineal si la combinación lineal de esas excitaciones resulta en la correspondiente combinación lineal de respuestas:

$$a\delta(t) + b\omega(t) \rightarrow a\Delta(t) + b\Omega(t) \quad (3.11)$$

Esto muestra que las excitaciones y sus respectivas respuestas son independientes y no interactúan entre sí, que es lo que ocurre al suponer que la descripción de la mecánica de cada componente armónica es representada mediante la teoría lineal del oleaje. Otra característica de este sistema es que cuando el tiempo es constante y la excitación posee la forma de un armónico, la repuesta es también un armónico con la misma frecuencia, con lo que ambas señales, de entrada y de respuesta solo difieren en amplitud y fase.

$$\delta(t) = \|\delta\| \cos(2\pi ft + \alpha_\delta) \rightarrow \text{sistema lineal} \rightarrow \Delta(t) = \|\Delta\| \cos(2\pi ft + \alpha_\Delta) \quad (3.12)$$

Luego las funciones de respuesta del espectro en amplitud y fase son:

$$R(f) = \frac{\Delta(f)}{\delta(f)} ; R_\alpha(f) = \alpha_\Delta(f) - \alpha_\delta(f) \quad (3.13)$$

El espectro de respuesta obtenido debido a la excitación es:

$$E_\Delta(f) = [R(f)]^2 E_\delta(f) \quad (3.14)$$

Si se considera que las excitaciones dependen de la dirección, las respuestas también lo harán luego la función de transferencia y el espectro de respuesta serán:

$$R(f, \theta) = \frac{\Delta(f, \theta)}{\delta(f, \theta)} \quad (3.15)$$

$$E_\Delta(f, \theta) = [R(f, \theta)]^2 E_\delta(f, \theta) \quad (3.16)$$

Por otra parte, tomando en cuenta el modelo de aleatorio de amplitud y fase, si se considera que la superficie libre queda representada por la aproximación lineal, al tomar un momento arbitrario $\underline{\eta}(t) = \underline{\eta}(t_1)$ éste debe poseer una distribución Gaussiana, donde sí se asume que la media es cero, la función de densidad de probabilidad es:

$$p(\eta) = \frac{1}{(2\pi m_0)^{1/2}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2m_0}\right) \quad (3.17)$$

Donde $m_0^{1/2}$ es la desviación estándar de la superficie libre.

Luego si la superficie libre aleatoria es tratada como estacionaria correspondiente a un proceso Gaussiano, entonces todas las características estadísticas son determinadas a partir de la densidad espectral $E(f)$, estas características pueden ser expresadas en términos de los momentos espectrales que se definen:

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (3.18)$$

Donde m_n es llamado “momento de orden n ”. Una relación importante es que la varianza de la superficie libre es igual al momento de orden cero.

La obtención de los períodos representativos del espectro son los siguientes:

Períodos de cruces por cero:
$$\overline{T_0} = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (3.19)$$

Período medio:
$$T_{m_{01}} = f_{mean}^{-1} = \left(\frac{m_1}{m_0}\right)^{-1} \quad (3.20)$$

Período *peak*: se define como el período asociado a la mayor energía del espectro $E(f)$.

Las alturas pueden ser evaluadas a partir de las desnivelaciones instantáneas, las cuales asumiendo que poseen las características anteriormente descritas, es decir, que se comportan como un proceso Gaussiano de media cero. Considerando la desnivelación en la cresta η_{cresta} en teoría lineal la altura es $H \approx 2\eta_{cresta}$, luego es posible derivar la función de distribución de probabilidad de la altura de ola individual, empleando el Jacobiano correspondiente:

$$p(H) = p_{\eta_{cresta}}(\eta) \frac{d\eta_{cresta}}{dH} \quad (3.21)$$

$$p(H) = \frac{H}{4m_0} \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right) \quad (3.22)$$

Que es la distribución de Rayleigh. Todas las características de H pueden ser obtenidas a partir de la distribución Rayleigh.

Altura de ola promedio:
$$\overline{H} = E\{\underline{H}\} = \sqrt{2\pi m_0} \quad (3.23)$$

Altura cuadrática media:
$$H_{rms} = E\{\underline{H}^2\}^{1/2} = \sqrt{8m_0} \quad (3.24)$$

La altura significativa tal como se definió anteriormente es el promedio del tercio superior de las olas del estado de mar, la cual puede ser obtenida a partir de la integración de la porción superior de la distribución Rayleigh.

$$\int_{H^*}^{\infty} p(H)dH = \frac{1}{3} \quad (3.25)$$

$$H_{m0} = E\{H\}_{H \geq H^*} = \frac{\int_{H^*}^{\infty} Hp(H)dH}{\int_{H^*}^{\infty} p(H)dH} \quad (3.26)$$

Luego reemplazando $H_{m0} \approx 4\sqrt{m_0}$ en aguas profundas.

Una relación importante es entre la altura significativa y la altura cuadrática media.

$$H_{rms} = \frac{1}{2}\sqrt{2}H_{m0} \quad (3.27)$$

Las expresiones anteriores son la base de la modelación del oleaje y en el siguiente apartado se tratará de describir cómo cambian estas variables cuando el oleaje se propaga.

3.2.2 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

La transformación del oleaje es uno de los aspectos fundamentales para la elección de su representación, ya que la bondad de las herramientas empleadas para caracterizar anteriormente, influyen en la modelación de la propagación de este desde un punto ubicado en aguas profundas hasta la cara de playa.

Las variaciones del oleaje al propagarse se deben a los cambios de profundidad, la presencia de corrientes, obstáculos y contornos. Algunos de los procesos principales de transformación son; asomeramiento, refracción, difracción, radiación, reflexión y rotura.

3.2.2.1 MODELOS DE TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

Los modelos de transformación del oleaje se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Modelos formulados en la teoría de ondas.
- Modelos que resuelven las ecuaciones de Navier Stokes y de Reynolds.

En ingeniería generalmente son empleados los modelos formulados en la teoría de ondas y estos a su vez pueden ser ordenados en dos grandes familias:

- Modelos promediados en la fase (independientes del tiempo).
- Modelos resolvedores de la fase (no estacionarios).

La Recomendación de Obras Marítimas Española, presenta tablas comparativas de los tipos de modelos de oleaje, sus aproximaciones, y los procesos que son capaces de simular. Éstas se presentan a continuación.

Tabla 3.2: Comparación de la capacidad de los modelos para simular los procesos de transformación del oleaje.

Modelos promediados en la fase (teoría lineal)				
Procesos de transformación	Rayo/Refrac [*]	Stokes I-MSPE		
		Elíptica	Hiperbólica	Parabólica
Refracción/asomeramiento	Si	Si	Si	Si
Difracción	No	Si	(Si)	Si $\theta < 40^\circ$
Reflexión/radiación	(No)**	Si	(Si)	No
Fricción en el fondo	No	No	Si/No	Si
Rotura por fondo***	Si/No	Si/No	Si	Si

(*) La teoría del rayo se puede aplicar a trenes de onda no lineales en particular para estudiar los procesos de asomeramiento y refracción.
 (**) Es posible aplicar la teoría del rayo a los procesos de refracción "inversa o hacia el mar" y tener en cuenta la reflexión desde un reflector fijo.
 (***) La mayoría de los modelos tienen implementado la rotura en el régimen de saturación (disipativo) o mediante el roller; en ambos casos se está suponiendo de forma implícita que la reflexión es nula en ese contorno y, por coherencia, así se debe especificar cuando se aplique un modelo elíptico.

Modelos resolutores de la fase		
Procesos de transformación	Stokes (lineal) MSPE-t	Boussinesq (no lineal) varias aprox.
Refracción/asomeramiento	Si	Si
Difracción	Si	Si
Reflexión	Si	Si
Fricción en el fondo	No	Si/No
Rotura por fondo*	No/Si	Si
Evolución superficie libre	Si	Si

(*) En estos modelos la rotura del tren de ondas suele venir implementada por el roller.

(Fuente: Recomendación de Obras Marítimas)

Las ecuaciones de gobierno están ligadas con la representación del oleaje. La Tabla 3.3 presenta las variables involucradas en la descripción de los modelos

Tabla 3.3: Variables calculadas por los modelos de transformación de ondas.

Variables de aplicación				
	$\eta(\vec{x}, t), u(\vec{x}, t)$	H, T, θ	$H_{rms,0}, \overline{T_z}, \overline{\theta}$	$S(f, \theta), S(\vec{k})$
Rayo	No	Si	Si	Si
Stokes (MSPE)	No	Si	Si	Si
MSP-t	(Si)	Si	Si	(Si/Fourier)
Boussinesq	Si	(No)	(No)	(Si/Fourier)
N-S y otros	Si	(Si)*	(Si)*	No

(*) Formalmente es posible aplicar estos modelos a un tren de ondas especificando las variables básicas del tren y proponiendo un perfil de ondas (lineal o no lineal) $\eta(t, \vec{x}^*)$ inicial.

(Fuente: Recomendación de Obras Marítimas)

En este punto se debe considerar algunos aspectos en la elección del modelo de transformación del oleaje, dos posibles candidatos existen para el cálculo del oleaje a lo largo del perfil, los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq y los que resuelven la ecuación de acción de onda, los cuales pertenecen a la familia de modelos de propagación de rayos.

Los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq se acercan a la resolución más elemental del oleaje y por lo tanto presentan un futuro prometedor en la modelación de muchos de los procesos que involucran la transformación del oleaje, sin embargo, poseen una gran desventaja al no ser capaces de modelar oleaje dispersivo, lo que genera una enorme restricción fuera de las zonas más someras, además los avances en el tiempo de los modelos de evolución morfodinámica son del orden de segundos, por lo que se debe resolver muchas veces el oleaje a través del perfil variando en el tiempo, y considerando los altos gastos computacionales que implican estos modelos, no son los modelos óptimos hoy para este tipo de cálculos en proyectos de ingeniería. Otra desventaja que presentan es la modelación en la zona de rompiente, la cual es compleja e induce inestabilidades, Tajima & Madsen (2004) observan algunos de estos aspectos, también lo hace Eldeberky (2011) indicando que los modelos del tipo Boussinesq aún no son los más apropiados a la hora de seleccionar un modelo de transformación del oleaje, como un módulo dentro de un modelo de evolución morfodinámica.

Los modelos más apropiados son los promediados en la fase, específicamente los que resuelven la ecuación de balance de energía para resolver la transformación del oleaje.

3.2.2.2 MODELACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

En el caso del oleaje regular, en principio solo se cuenta con una teoría capaz de reproducir la mecánica del oleaje, la cual es construida suponiendo que el fondo es constante, sin embargo, en un perfil de la costa, la profundidad es una función del eje de propagación, tal como se muestra en la Figura 3.11.

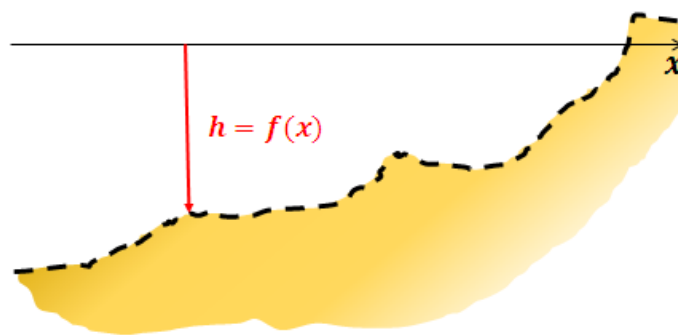


Figura 3.11: Esquema eje y perfil de propagación.
(Fuente: Elaboración propia)

Para emplear una teoría que considera un fondo horizontal, en un perfil como el que se muestra en la Figura 3.11, se debe suponer que el oleaje se adapta de forma inmediata en la profundidad local, lo cual se conoce como hipótesis de Rayleigh.

Para definir la transformación del oleaje, se deben realizar algunas definiciones previas:

En una onda lineal de frecuencia f se tiene que la energía media por unidad de superficie horizontal es:

$$E(f, \vec{x}) = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \quad (3.28)$$

Donde ρ_w es la densidad de agua y g es la aceleración de gravedad.

Otra variable básica del tren de ondas regular es la celeridad de grupo, definida de acuerdo a la teoría lineal del oleaje como:

$$C_g = \frac{1}{2} C \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (3.29)$$

Donde C es la celeridad de la ola y k es el número de onda. La energía media por unidad de superficie horizontal se relaciona con la densidad espectral mediante la siguiente relación:

$$S(f, \vec{x}) = \frac{E(f, \vec{x})}{\rho_w g} \quad (3.30)$$

Con estas variables se puede construir la respuesta a la pregunta; ¿Cómo cambia la altura el período y la dirección al propagarse este tren regular sobre un perfil? Para responderla se puede asumir primero; el supuesto de conservación de número de olas, el cual indica que en un mismo intervalo de tiempo para dos puntos del perfil, se debe tener la misma cantidad de olas pasando, lo que necesariamente implica mantener constante el período de cada ola.

La variación de la altura es más compleja de determinar, para ello se puede emplear el principio de conservación de la energía. La distribución del flujo medio de energía por unidad de ancho $\overline{f_E(z)}$, que es la cantidad de energía que pasa por una sección en un ciclo de oscilación, se puede determinar mediante:

$$\overline{f_E(z)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_d u dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \rho g \sigma \eta^2 \frac{\cosh^2 k(h+z)}{\cos h(kh) \sinh(kh)} dt \quad (3.31)$$

El flujo total de energía que pasa por la sección desde el fondo hasta el nivel medio del mar se obtiene integrando sobre la profundidad:

$$\int_{-h}^0 \overline{f_E(z)} dz = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g = E C_g \quad (3.32)$$

Luego las variaciones de la altura pueden ser obtenidas realizando un balance de energía en un volumen de control de modo que:

$$\frac{\partial(E C_g)}{\partial x} = 0 \quad (3.33)$$

La aplicación de esta ecuación permite obtener algunos resultados teóricos de los procesos de asomeramiento y refracción, siendo prudente aplicarla fuera de la zona de rompientes.

Para el asomeramiento, se puede considerar una onda que viaja en la dirección x y que no experimenta ni aportes ni pérdidas de energía tal como lo expresa la ecuación (3.33), además se debe asumir que los veriles son rectos y paralelos, luego los flujos de energía en dos puntos del perfil deben ser iguales.

$$[EC_g]_1 = [EC_g]_2 \quad (3.34)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{C_{g,1}}{C_{g,2}}} a_1 \quad (3.35)$$

En el caso de la refracción, que es la deflexión en la dirección la onda debido a cambios en la velocidad de propagación, inducidos por variaciones en la profundidad o interacción con corrientes; se puede realizar un análisis geométrico de modo de cuantificarla, como se muestra en la Figura 3.12.

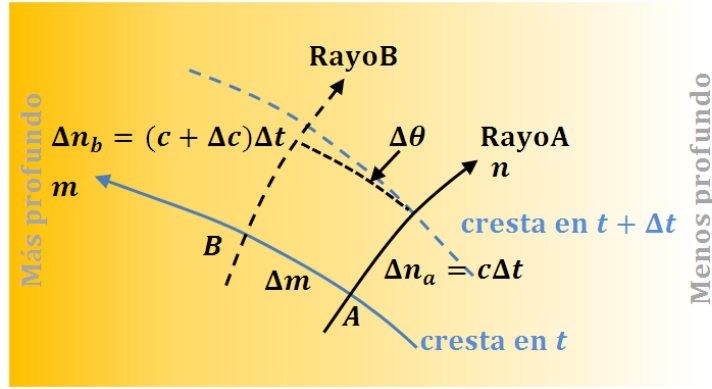


Figura 3.12: Análisis de refracción.
(Fuente: Holthuijsen (2007))

Las variaciones de la dirección del frente pueden ser calculados mediante:

$$\Delta\theta = -\frac{(\Delta n_B - \Delta n_A)}{\Delta m} = -\frac{\Delta c \Delta t}{\Delta m} \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta n} = -\frac{(\Delta c/c)}{\Delta m} \quad (3.37)$$

Considerando diferencias infinitesimales se tiene:

$$\left(\frac{d\theta}{dn}\right)_{ref} = -\frac{1}{n} \frac{\partial c}{\partial m} \quad (3.38)$$

Para veriles rectos y paralelos esta aproximación se transforma en la Ley de Snell.

$$\frac{d}{dn} \left(\frac{\sin\theta}{c} \right) = 0; \frac{\sin\theta}{c} = cte \quad (3.39)$$

Con este cálculo se puede desarrollar un balance de energía en el volumen considerado, con lo que la variación de la amplitud queda determinada por:

$$[EC_g]_1 b_1 = [EC_g]_2 b_2 \quad (3.40)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{C_{g,1}}{C_{g,2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} a_1 \quad (3.41)$$

En el caso del oleaje irregular la ecuación empleada para la transformación del oleaje en aguas cercanas a la costa es la de balance de energía o acción de onda. En coordenadas cartesianas puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial E(f, \theta, \vec{x}, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} E(f, \theta, \vec{x}, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} E(f, \theta, \vec{x}, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} E(f, \theta, \vec{x}, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta, \vec{x}, t) \quad (3.42)$$

Los modelos espectrales suelen hacer un cambio de variables y expresar la ecuación de balance de energía en términos de la acción de onda, debido a que esta variable se conserva en presencia de corrientes, y por lo tanto permite trabajar con mayor facilidad la interacción ola corriente. La densidad de acción de onda se relaciona con densidad de energía mediante la siguiente relación:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (3.43)$$

Donde σ es la frecuencia relativa en radianes, S en (3.42) representa las pérdidas y ganancias de energía de los procesos que ocurren mientras la ola se propaga. Holthuijsen (2007) presenta una tabla en donde se pueden medir la importancia relativa de cada efecto en la transformación del oleaje, dependiendo de la ubicación de interés donde se propaga la ola, siendo a juicio de este autor, recomendable su utilización para el planteamiento teórico del modelo a desarrollar (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje.

PROCESO	AGUAS COSTERAS			
	OLEAJE OCEÁNICO	OLEAJE EN MARES COSTEROS	OLEAJE EN LAS CERCANIAS DE LA COSTA	OLEAJE EN DARSENAS
GENERACIÓN POR VIENTO	●●●	●●●	●	○
INTERACCIÓN OLA-OLA MEDIANTE CUADRUPLÉS	●●●	●●●	●	○
WHITE-CAPPING (CABRITAS)	●●●	●●●	●	○
FRICCIÓN DE FONDO	○/●	●●	●●	○
REFRACCIÓN POR CORRIENTES / AGRUPAMIENTO DE LA ENERGÍA	○	●	●●	○
REFRACCIÓN POR FONDO / ASOMERAMIENTO	○	●●	●●●	●●
ROTURA (INDUCIDA POR PROFUNDIDAD; SURF)	○	●	●●●	○
INTERACCIÓN OLA-OLA MEDIANTE TRIADAS	○	○	●●	●
REFLEXIÓN	○	○	●/●●	●●●
DIFRACCIÓN	○	○	●	●●●

●●● = DOMINANTE
 ●● = SIGNIFICATIVO PERO NO DOMINANTE
 ● = DE MENOR IMPORTANCIA
 ○ = DESPRECIABLE

(Fuente: Holthuijsen (2007))

De la Tabla 3.4, para efectos de los modelos de respuesta del perfil de playa la tercera columna es de mayor interés (oleaje en la cercanía de la costa). Un comportamiento que se destaca de la tercera columna es que ningún proceso es despreciable, y esto es un verdadero desafío para la modelación de la respuesta de playa ya que la complejidad del oleaje es una de las principales variantes de estos modelos.

Los procesos dominantes en la zona de surf considerando la Tabla 3.5 son; refracción, asomeramiento y rotura, y los procesos significativos son la fricción por fondo, refracción por corrientes e interacciones ola-ola mediante triadas. Cada uno de estos procesos y su modelación se analizará en el Capítulo 4.

3.2.3 ROTURA DEL OLEAJE

Uno de los fenómenos más importantes en la evolución morfológica de una playa, es el proceso que sufre el oleaje denominado rotura. En la actualidad no está totalmente comprendida, por lo que no se dispone de teorías capaces de representar todos los fenómenos físicos involucrados, esto se debe principalmente a la alta complejidad de estos, sumado con la invalidez de la mayoría de los supuestos empleados para la construcción de las teorías que representan la mecánica del oleaje.

Para modelación de la rotura generalmente se define un índice de rotura.

$$\text{Indice rotura} = \left(\frac{H}{h}\right)_b \quad (3.44)$$

Donde H es la altura de la ola y h corresponde a la profundidad, el subíndice b indica rotura del inglés *breaking*. Este índice corresponde a un valor donde la altura propagándose a cierta profundidad rompe.

3.2.3.1 DEFINICIONES FÍSICAS DE LA ROTURA DEL OLEAJE

La rotura del oleaje se puede dar tanto en aguas profundas como en aguas someras, para efectos de este documento sólo se considerará la que tiene lugar al arribar el oleaje a la playa debido a las variaciones de fondo. Goda (2011) recoge algunas definiciones las cuales se presentan a continuación.

Uno de los criterios más aceptados y empleados para modelar la rotura del oleaje es el que define Yamada et al. (1965), quien propone que una ola rompe cuando la velocidad orbital de las partículas exceden la celeridad de la misma. Este exceso ocurre en aguas someras debido a que la disminución de la profundidad implica una disminución de longitud de onda, y consecuentemente también disminuye la celeridad de la ola, en tanto que producto de la transformación (principalmente asomeramiento) ocurre un incremento en la altura de la ola, lo que significa que las partículas al acercarse a la costa deberán en un período aproximadamente constante seguir trayectorias más grandes, por lo tanto la velocidad de las partículas debe incrementarse al disminuir la profundidad. Luego existirá una profundidad a la cual la velocidad de las partículas exceda a la celeridad de la onda lo que físicamente no es posible y gatilla un colapso de la ola. Matemáticamente esto se puede describir de la siguiente forma:

$$(u_{max})_{z=\eta} \geq C_b \quad (3.45)$$

Donde la velocidad máxima horizontal u se da en la superficie libre η , y el subíndice b significa la celeridad de rotura (*breaking*).

En el caso de zonas afectas a reflexión, las condiciones estacionarias perturban la rotura y es más adecuado definirla cuando la aceleración vertical de las partículas excede la de gravedad. Esto ocurre debido a la naturaleza del oleaje estacionario el cual presenta oscilaciones verticales importantes durante su propagación. Matemáticamente la rotura en este caso puede ser cuantificada mediante la siguiente expresión.

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{z=\eta} \geq g \quad (3.46)$$

Donde la derivada de la velocidad vertical v respecto del tiempo t es aproximadamente la aceleración de la partícula y g es la aceleración de la partícula.

Nakoda et al. (1997) propone que la rotura del oleaje ocurre cuando el gradiente vertical de presión es cero. Este criterio es empleado por Hirayama et al. (2005) para identificar cuando las olas entran en rotura en los modelos que resuelven la propagación mediante las ecuaciones de Boussinesq.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{z=\eta} = 0 \quad (3.47)$$

3.2.3.2 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL ÍNDICE DE ROTURA DEL OLEAJE

Goda (2011) revisa los parámetros que tienen influencia en el índice rotura del oleaje e identifica cuatro tipos de expresiones.

- *Expresión del tipo I* $\rightarrow \frac{H_b}{h_b} = f_1(0) = \text{constante}$
- *Expresión del tipo II* $\rightarrow \frac{H_b}{h_b} = f_2\left(\frac{h_b}{L_0} \text{ o } \frac{h_b}{L_b}\right)$
- *Expresión del tipo III* $\rightarrow \frac{H_b}{h_b} = f_3(S)$
- *Expresión del tipo IV* $\rightarrow \frac{H_b}{h_b} = f_4\left(S, \frac{h_b}{L_0} \text{ o } \frac{h_b}{L_b}\right)$

(3.48)

Donde H es la altura de ola, h es la profundidad, L es la longitud de onda y S es la pendiente del fondo.

Las expresiones del tipo I generalmente son empleadas por su simplicidad, además de la facilidad con la que se puede calibrar esta constante.

Sierra & Lo Presti (1998) realizan un estudio acerca de los criterios de rotura, separándolos en dos tipos de expresiones; las que depende de parámetros locales, y las que dependen de parámetros offshore. Esta clasificación no se ha expuesto en el presente trabajo, dado que ese artículo es sólo para oleaje regular y la clasificación anterior generaliza este aspecto.

3.2.3.3 DIFERENCIAS ENTRE LA ROTURA PARA OLEAJE REGULAR E IRREGULAR

Gran parte de la literatura se enfoca en la predicción de la rotura del oleaje regular, sin embargo para los propósitos de la ingeniería es necesario además cuantificar el efecto de la irregularidad del tren de oleaje.

La rotura en caso del oleaje regular se caracteriza por poseer un solo punto donde todas las olas del tren rompen, la altura de ola se incrementa debido al asomeramiento alcanzando su máximo valor en el punto donde se da la rotura para luego decrecer rápidamente, además las variaciones del nivel medio son importantes tanto en su zona negativa denominado *Set-Down*, como en la zona positiva llamada *Set-up*.

Para el oleaje Irregular se tiene que la rotura se puede dar en toda la zona comprendida como *surfzone*. La altura de ola varía gradualmente a través de la zona de *surf* y las variaciones del nivel medio son mínimas en el caso del *Set-Down* y el *Set-Up* puede tomar valores del orden de una a tres veces el correspondiente considerando oleaje regular.

Considerando que el análisis espectral es capaz de caracterizar adecuadamente el oleaje, es posible asociar formas espectrales empírico/teóricas según las características del oleaje. Estas formas sintéticas generalmente se aplican en modelos de propagación, y pueden ser construidas a partir de un estado de mar o de parámetros de viento. Se ha encontrado que la cola del espectro en el lado de las frecuencias altas en aguas profundas es proporcional a f^{-5} durante todo el proceso de propagación, en aguas intermedias y someras se ha adoptado según mediciones, que la cola se transforma, y la forma de la cola tiende a ser proporcional a f^{-3} , esto apoyándose en la hipótesis de Kitaigorodskii el cual propone una forma invariable del espectro cuando se traslada al dominio del número de onda, la cual es aplicada por ejemplo en el espectro sintético TMA o FRF.

3.2.4 MODELACIÓN DEL OLEAJE PARA MODELOS DE EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA.

El enfoque que se adopta para la representación del oleaje en el desarrollo de modelos de evolución morfodinámica ha generado principalmente dos tipos de aproximaciones:

- Aproximaciones paramétricas: Representan el oleaje a partir de un parámetro para describir sus características energéticas (por ejemplo: Altura de ola cuadrática media), un parámetro para describir sus características frecuenciales (por ejemplo: Período *peak*) y otro parámetros para describir la dirección de propagación o incidencia a la costa (por ejemplo: Dirección asociada al período *peak*).
- Aproximaciones probabilísticas: Representan el oleaje tomando una cantidad finita de componentes discretizados de altura período y dirección.

En el caso de la aproximación paramétrica, ésta asume que la energía del oleaje está asociada a una franja angosta del espectro de frecuencias. Estos estados de mar son comúnmente denominados de banda angosta y bajo este comportamiento es posible caracterizar todo el estado mediante un solo período representativo de la banda de frecuencias donde se concentra la energía, generalmente el parámetro elegido es el período *peak*. Esta característica debe extenderse a las direcciones y los parámetros más empleados son la dirección asociada al período *peak* y la dirección media, para el oleaje en las proximidades de la costa, la elección de un parámetro representativo de todas las direcciones de las olas, es más adecuado dependiendo del grado de refracción que han sufrido los frentes de oleaje que ya sienten el fondo. Todas las variables de los módulos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en adelante poseen el mismo enfoque.

Ejemplos de estos modelos son los desarrollados por Roelvink & Stive (1989) y Nairn & Southgate (1993).

Las aproximaciones conocidas como probabilísticas u ola a ola, se basan en la discretización de una distribución de probabilidad de las variables básicas que describen el oleaje. Los módulos hidrodinámico y de transporte de sedimentos se calculan separadamente y luego se vinculan para realizar la evolución morfodinámica. Las tasas de transporte son combinadas en una función de densidad de probabilidad para predecir los cambios de batimetría.

Van Rijn & Wijnberg (1996) argumentan que esta aproximación del oleaje es más adecuada, debido a la dependencia del transporte de sedimentos con la alta no-linealidad que presenta el oleaje cercano a la costa, la cual no puede ser considerada correctamente mediante el enfoque determinístico.

Generalmente se eligen histogramas de alturas de ola discretizados para efectos de la modelación, este es el caso de modelos presentados por Mase & Iwaky (1982), Mizuguchi (1982), Dally & Dean (1986), y Van Rijn & Wijnberg (1996).

Otra descripción es la representación del oleaje a través de espectros, ésta es aplicada comúnmente para fenómenos físicos de naturaleza oscilatoria. Considerando al oleaje irregular como aleatorio en su fase y amplitud, se puede decir que el enfoque espectral es la forma más importante con la cual se describe el oleaje (Holthuijsen, 2007).

Actualmente muchos de los modelos lineales con los que se cuenta para describir el oleaje utilizan éste enfoque como descriptor, generalmente para caracterizar el oleaje en aguas profundas, algunos de los más conocidos son WaveWatch III y WAM. Con la comprensión del espectro y sus cualidades para describir los estados de mar, se han incorporado numerosos estudios acerca del comportamiento de los espectros al propagarse en aguas someras, en base a éstos se han desarrollado modelos como Mike 21NSW (*nearshore spectral waves*, DHI), Mike21SW (*Spectral waves*, DHI), Stwave (USACE), SWAN (Delft) entre otros. Además existen hoy aplicaciones a la evolución morfodinámica como lo es Xbeach (Delft).

3.2.5 CARACTERÍSTICAS DEL OLAJE EN LAS COSTAS DE CHILE

Chile recibe en sus costas el oleaje generado en el Océano Pacífico, cuyos procesos de transformación en aguas profundas están bien comprendidos, por lo que se pueden obtener estadísticas a partir de campos de vientos de gran calidad.

Para exponer las características del oleaje que llega a las costas chilenas, se pueden considerar de forma muy general tres sistemas de oleaje, dos de los cuales aparecen claramente en la Figura 3.13, donde se presenta un gráfico obtenido del Atlas de Global de Oleaje KNMI/ERA-40 desarrollado por Caires et al. (2005). En él se aprecian dos zonas de generación muy marcadas, que corresponden en relación a las costas chilenas a; una más cercana y energética ubicada al SW de la costa de Chile y otra más lejana ubicada al NW en el Pacífico Norte.

Ambas zonas de generación poseen características frecuenciales distintas, en función de la distancia de la tormenta a la costa, y también energéticas. Esto explica las características de la morfología de la costa en Chile, y su tendencia a proteger la costa del oleaje más energético y frecuente proveniente del SW. Las zonas que no son abrigadas por estas configuraciones naturales generalmente corresponden a playas, debido a que en términos morfodinámicos, éstas son la mejor defensa de la costa contra el oleaje.

El otro sistema de oleaje mencionado, corresponde al de generación local cuya dirección depende de posición geográfica a lo largo de la costa chilena.

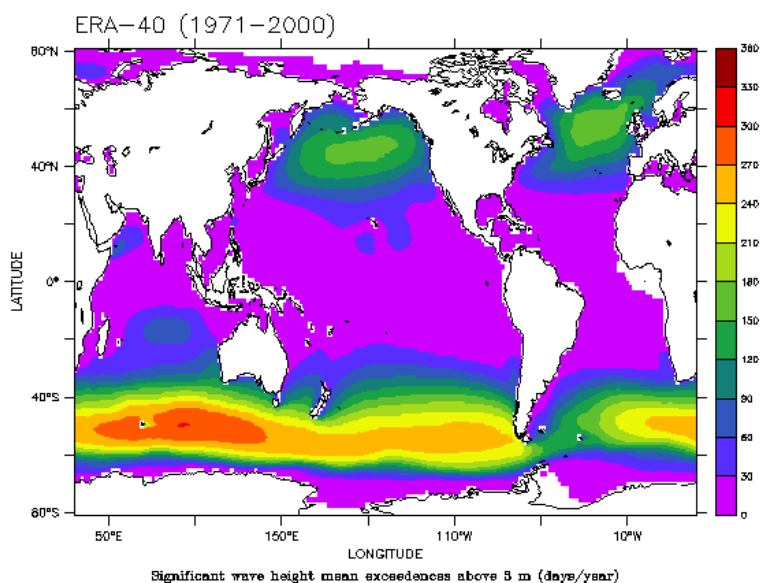


Figura 3.13: Excedencia Altura Significativa media para 3 [m] en (días/años).
(Fuente: KNMI/ERA-40)

Para la obtención de envolventes de erosión/sedimentación, se debe cuidar de elegir la tormenta más severa que pueda atacar la playa dentro de un instante de tiempo determinado, por lo general la vida útil del proyecto, algunas aproximaciones pueden ser extrapoladas a partir de las curvas de probabilidad de eventos extremos, donde la tormenta puede ser asociada a un cierto valor de período de retorno.

Tal como se comentó anteriormente, interesa conocer cuáles son las propiedades de las tormentas más severas que han atacado las costas de Chile.

La Figura 3.14 muestra los estados *peak* de las mayores tormentas en términos de energía del oleaje, en aguas profundas de los últimos 30 años para la zona central de Chile. La base de datos espectral Olas del Pacífico, desarrollada por Baird & Associates, logra caracterizar de forma destacada cada evento en aguas profundas, implicando validaciones con bondades estadísticas óptimas para la práctica de la ingeniería de costas en Chile y en todo el Pacífico, mayores detalles pueden ser encontrados en Quezada (2012).

Estas tormentas ocurrieron en el año 1997, el cual corresponde al año con el evento ENOS (El Niño Oscilación del Sur) más severo del siglo XX. El espectro de la izquierda corresponde a Junio (A) y se puede observar que es un solo sistema de oleaje, con una dispersión grande en dirección y frecuencia, mientras el espectro de la derecha (B) corresponde a una tormenta que ocurrió en Agosto, donde se presentan dos sistemas de oleaje claramente definidos, actuando simultáneamente.

Representar estos estados de oleaje con una dirección y un período característicos para toda la energía del estado, no es apropiado en ambos casos. Pueden ser a priori consideradas dos alternativas; conservar la representación espectral, que es capaz de

contener toda la información, o aislar los sistemas de oleaje superpuestos en el estado, para su caracterización de resumen por separado, reconociendo además la importancia en la elección del descriptor de estado apropiado para representar las características del sistema de oleaje. Cabe destacar que si bien este tema no es abordado en el presente documento, se plantea debido a la importancia que pudiera tener estas características en la costa chilena.

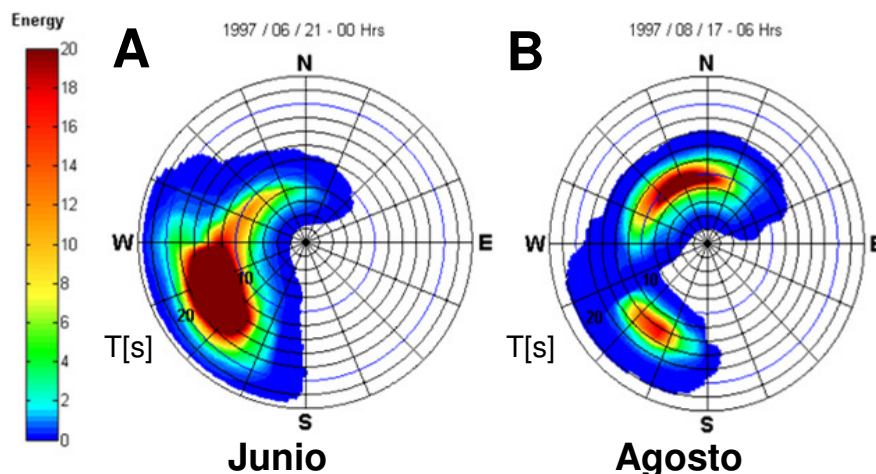


Figura 3.14: Estados *peak* de las tormentas más severas en los 30 últimos años en Chile.

(Fuente: Elaboración propia a partir de Olas Chile)

3.3 CORRIENTES Y VARIACIONES DEL NIVEL MEDIO INDUCIDAS POR OLAJE

Las olas no solo transportan energía, si no también momento el cual es equivalente a un tensor y sus variaciones horizontales actúan como fuerzas sobre el cuerpo de agua, generando inclinaciones del nivel de agua sin perturbación y corrientes. En profundidades grandes estas fuerzas son tan débiles que pueden ser consideradas despreciables para efectos de ingeniería, salvo en la generación de ondas de grupo, sin embargo, en la zona de *surf* suelen ser importantes y deben ser consideradas.

3.3.1 MOMENTO DEL OLAJE Y TENSORES DE RADIACIÓN

El momento del oleaje es un vector que resulta del producto de la masa y de la velocidad de las partículas debido al paso de la ola. Para estimar la cantidad total de momento bajo la ola se considera ésta de cresta infinita, se toma un área diferencial en el fondo con magnitud Δx en la dirección de la propagación y Δy en dirección de la cresta, el momento inducido en x para un elemento de la columna de altura Δz resulta $\rho u_x \Delta x \Delta y \Delta z$, donde ρ es la densidad volumétrica del agua y u_x la velocidad horizontal en la dirección del eje x . La cantidad total bajo la ola resulta integrando en la vertical.

$$q_x = \left(\int_{-d}^{\eta} \rho u_x dz \right) \Delta x \Delta y \quad (3.49)$$

El momento promediado en el tiempo y por unidad de área entonces es:

$$Q_x = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho u_x dz} \quad (3.50)$$

La integración puede ser resuelta aplicando teoría lineal y considerando términos de segundo orden.

$$Q_x = \frac{\rho a^2}{2 \tanh(kh)} \omega \quad (3.51)$$

El transporte de momento es llamado tensor de radiación (Longuet-Higgins and Stewart, 1960, 1961, 1962, 1964). Para determinar el transporte de momento en x se debe considerar ahora una ventana vertical en la misma columna anterior de dimensiones $\Delta y \Delta z$ para un tiempo Δt luego el transporte es $(\rho u_x) u_x \Delta y \Delta z \Delta t$, en adición parte del momento es también transferido presión inducida por oleaje (P_{ola}) por lo que se debe considerar este aporte $P_{ola} \Delta y \Delta z \Delta t$. El transporte total queda determinado por $(P_{ola} + \rho u_x u_x) \Delta y \Delta z \Delta t$.

El transporte S_{xx} a través de toda la cara de la columna, desde el fondo hasta la superficie es obtenido integrando entre ambos límites.

$$S_{xx} = \left(\int_{-d}^{\eta} (\rho u_x u_x + p_{ola}) dz \right) \Delta y \Delta t \quad (3.52)$$

Promediando en el tiempo y por unidad de ancho:

$$S_{xx} = \overline{\int_{-d}^{\eta} (\rho u_x u_x + p_{ola}) dz} \quad (3.53)$$

Integrando y promediando en el tiempo se obtiene la componente del tensor, y se interpreta como el transporte del momento x en la dirección x .

$$S_{xx} = \left(2n - \frac{1}{2} \right) E \quad (3.54)$$

Análogamente se puede encontrar una componente del transporte en y actuando en la dirección y los transportes de x e y actuando en las direcciones y y x respectivamente.

Si el oleaje se propaga con una dirección distinta del eje x , el tensor de radiación queda determinado por:

$$S_{xx} = \left(n - \frac{1}{2} + n \cos^2(\theta) \right) E \quad (3.55)$$

$$S_{yy} = \left(n - \frac{1}{2} + n \sin^2(\theta) \right) E \quad (3.56)$$

$$S_{xy} = n \cos(\theta) \sin(\theta) E \quad (3.57)$$

$$S_{yx} = n \sin(\theta) \cos(\theta) E \quad (3.58)$$

3.3.2 INDUCCIÓN DE SET-UP Y SET-DOWN POR OLEAJE

La generación de corrientes, Set-Up y Set-Down, se debe al incremento de transporte de momento. La fuerza de radiación por unidad de área horizontal de superficie en la dirección x e y son respectivamente

$$F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (3.59)$$

$$F_y = -\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} \quad (3.60)$$

En el caso de las variaciones del nivel medio, este puede ser evaluado realizando un balance de momento, el cual resulta:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \rho g(d + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \quad (3.61)$$

Para condiciones estacionarias todas las derivadas con respecto del tiempo son cero y las derivadas reducen su complejidad ya que las variaciones solo ocurren en x :

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = \rho g(d + \bar{\eta}) \frac{d\bar{\eta}}{dx} \quad (3.62)$$

3.4 CORRIENTES

Las corrientes suelen estudiarse en conjunto con el agente que las produce, y no exclusivamente de forma aislada. Éstas corresponden a movimientos de masa que se traslada dentro del cuerpo de agua, Su característica principal es su no periodicidad y alta sensibilidad a los cambios de los agentes climáticos, pudiendo variar rápidamente en magnitud y dirección. Estas particularidades hacen que este agente sea un fenómeno difícil de cuantificar (Sverdrup, 1943).

La clasificación clásica de las corrientes en ingeniería costera, es función de la proximidad o lejanía de la costa y el agente climático generador. Algunas identificaciones más comunes son:

- Corrientes generales.
- Corrientes locales inducidas por vientos, o corrientes costeras.

- Corrientes de marea.
- Corrientes originadas por las variaciones de las propiedades físicas o químicas del agua.
- Corrientes inducidas por oleaje.

De las corrientes revisadas anteriormente, las más importantes en los procesos costeros son las generadas por oleaje, debido a su mayor magnitud, especialmente para oleaje extremo.

Las corrientes locales inducidas por el viento aparecen cuando éstos soplan en áreas y tiempos limitados, éstas tienden a tomar direcciones paralelas a la costa, la persistencia del viento puede provocar variaciones en el nivel medio del mar.

La elevación y descenso del nivel del mar debido a las mareas, genera movimientos de masa de agua las cuales se denominan corrientes de marea. Una de sus principales características además de diferenciadora, es su periodicidad debido a la influencia del agente que las genera. Generalmente estas corrientes cobran importancia en las proximidades de la costa.

La acción de oleaje en la cercanía de la costa además de transportar energía, transporta masa hacia la costa, este fenómeno puede ser explicado considerando la no linealidad del oleaje en la zona de *surf*.

Cuando el oleaje rompe se generan corrientes de dos tipos: una ascendente, cuya masa se mueve en la capa superficial hasta alcanzar la cota dada por el Run-up correspondiente; y otra descendente o de retorno, en sentido hacia el mar producto del balance de masa necesario en la zona de ascenso-descenso, esta corriente es la responsable de la formación de barras en la playa sumergida. Otra característica importante es el ángulo de incidencia del oleaje sobre la playa, lo que genera la separación conceptual de las corrientes en dos componentes: una transversal; y otra longitudinal o paralela a la costa. Ambas corrientes son importantes dependiendo del proceso de evolución morfodinámica que se esté estudiando. En el caso de la respuesta del perfil de playa ambas corrientes son relevantes, sin embargo en el corto plazo las corrientes transversales dominan y permiten explicar gran parte de las variaciones del perfil ante la acción de una tormenta.

En la Figura 3.15 se muestra un esquema que incluye las variables básicas más elementales para describir los flujos en la cercanías de la costa, en ésta aparecen las distribuciones de velocidad del flujo en la vertical para las componentes de corriente longitudinal y transversal. La variación de la distribución de la velocidad en la vertical se suele dividir en tres capas, tal como se muestra en la Figura 3.15, una de superficie, zona intermedia y en el fondo. La resolución de todo el sistema aislando cada componente, es lo que comúnmente se denomina modelo cuasi 3D de corrientes.

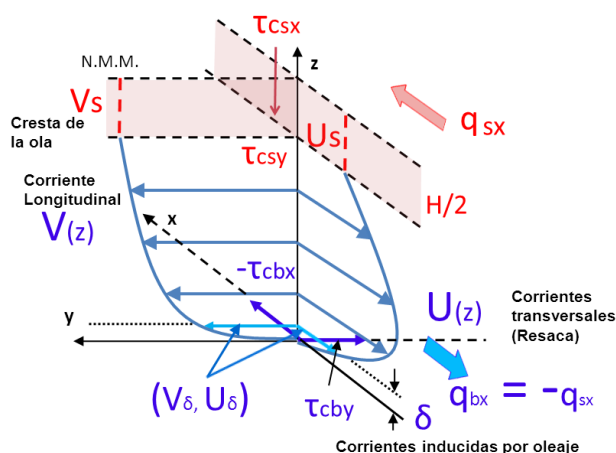


Figura 3.15: Esquema variables involucradas en los flujos asociados a la zona de surf.
(Fuente: Tajima & Madsen (2004))

Como se comentó anteriormente, en el siguiente documento se da importancia a la componente transversal debido a su importancia en las variaciones morfodinámicas en el corto plazo.

El transporte transversal se debe principalmente a dos flujos, las corrientes de resaca o *undertow*, y la corriente asociada a la asimetría en la velocidad orbital de las partículas.

3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para cuantificar la evolución del perfil se debe calcular el transporte de sedimentos tanto del oleaje incidente y como de las corrientes inducidas por él. La precisión de la estimación del transporte de sedimentos es algo que todavía se está muy lejos de alcanzar. Los errores en la cuantificación de esta variable son enormes, incluso considerando que se trata de un cálculo para ingeniería. Uno de los principales motivos de esta deficiencia en el estado de la técnica, es que a la escala en que ocurren los procesos de transporte de material, solo existe una vaga idea del comportamiento del flujo, por lo que es aún más difícil saber cómo éste moverá las partículas de sedimento (Perillo 2003).

Por otra parte la acción conjunta de todos los granos de sedimentos, de diversos tamaños y configuraciones mineralógicas, son todo un desafío para ser representados en ingeniería, en donde generalmente el muestreo del sedimento consiste en un tamizado de la muestra, y la obtención de una distribución de tamaños de grano. Esta información suele ser expuesta a través de curvas granulométricas que indican el porcentaje pasante de la muestra para un valor de la malla del tamiz. La clasificación de los sedimentos es a nivel macro, debido a que calificar todos los granos presentes en una playa es una tarea imposible de realizar.

Cuando se han generado las curvas granulométricas y las distribuciones de tamaños del sedimento presente en la capa superficial de la playa, se procede a calcular algunos parámetros de resumen que indican la forma de la distribución del tamaño de los granos. Generalmente la muestra queda determinada mediante varios diámetros relevantes, los cuales indican un tamaño asociado al porcentaje pasante de la muestra. Los parámetros de

resumen de la forma de la distribución de los tamaños, generalmente son; simetría, curtosis, desviación estándar, y tamaño promedio.

Para representar las características del grano, las formulaciones actuales generalmente consideran solo un diámetro relevante, descuidando la forma de la distribución. Además no se tienen en cuenta los efectos del agrupamiento del sedimento, cuyo concepto es denominado empaquetamiento.

La forma de los sedimentos es otra simplificación ya que se consideran perfectamente esféricos, sin embargo, en la realidad los granos poseen distintas formas geométricas y sólo poseen un grado de esfericidad, este concepto fue introducido por Wadell (1932) y modificado por Sneed & Folk en 1958. La forma de los grano también posee un efecto en el transporte de sedimentos, pero tratar de representar la aleatoriedad es complejo.

El proceso en el cual los sedimentos se mueven está relativamente entendido, sin embargo no es posible predecir donde caerán y como se moverá una partícula que se ha puesto en movimiento. Existen varias formas de clasificar los movimientos de las partículas, y en general se aceptan cuatro tipos:

- Rodadura y deslizamiento: Este tipo de movimiento se genera cuando es superada la tensión tangencial crítica para la cual se inicia el movimiento.
- Saltación: A medida que la tensión tangencial aumenta, se genera una lámina de sedimento cercana al fondo, donde el material inicia el movimiento y sedimenta sin incursionar distancias mayores respecto del fondo
- Suspensión: Se presenta cuando la velocidad de corte excede la velocidad de caída del grano, levantándolo desde el fondo hasta una cierta altura en la cual es transportado.
- Flujo de lámina: Corresponde a una capa de sedimento que se mueve en el fondo, en la cual no es posible distinguir el movimiento individual de los granos.

Estos movimientos están relacionados con las condiciones de velocidad, además del compromiso existente entre la turbulencia del flujo y la viscosidad del fluido, donde el mecanismo de iniciación del movimiento se debe principalmente a la generación de vórtices los cuales golpean los granos. Estos vórtices se desgranar en una cascada de energía, hasta una escala en donde la viscosidad del fluido es capaz de aplacarlos.

3.5.1 MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para modelar el transporte de sedimentos en el perfil, Zheng & Dean (1997) reconocen dos grandes grupos; los modelos basados en procesos y los basados en equilibrio, éstos últimos hacen tender el perfil a una forma preestablecida en función de las condiciones hidrodinámicas.

Considerando que la modelación basada en procesos es la adecuada para estudiar la evolución morfodinámica de las playas en el corto plazo, la tasa volumétrica de transporte promediada en el tiempo se puede expresar como:

$$\bar{q}(x) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_s} u(x, z, t) C(x, z, t) dz dt \quad (3.63)$$

Donde:

u : Velocidad horizontal del flujo.

C : Concentración volumétrica de sedimento.

Δt : Paso de tiempo morfológico.

z_b, z_s : Son las cotas de terreno o fondo y superficie del fluido.

El primer problema para la estimación de la tasa de transporte, es la obtención de la velocidad, debido a que como se comentó anteriormente, ésta se encuentra fuertemente dominada por procesos que ocurren a distintas escalas, como la turbulencia, el oleaje de alta y baja frecuencia, grupos de olas, entre otros fenómenos. Roelvink & Broker (1993), Ruessink et al. (1999) proponen la siguiente expresión para abordar la representación de las velocidades:

$$u = \bar{u} + u_w + u' \quad (3.64)$$

Donde la velocidad puede ser obtenida como la suma de; el valor medio \bar{u} , la componente debida a oscilaciones u_w y variaciones turbulentas u' .

El mismo enfoque puede ser aplicado en el caso de la concentración de sedimento. El producto de la velocidad horizontal con la concentración, cobra sentido para los términos con escalas equivalentes.

$$\bar{q}(x) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_s} (\bar{u}c + u_w c_w + u'c') dz dt \quad (3.65)$$

De la ecuación 3.65 se debe destacar que el primer término está asociado a características medias, siendo importante en condiciones de alto transporte, las cuales generalmente erosionan la playa, destacándose el transporte producto de las corrientes de resaca dentro de la zona de rompientes.

El segundo término se puede considerar como el aporte de oscilaciones de largo período, que si bien tiene efectos despreciables en capacidad de transporte de sedimentos, restringe los siguientes aspectos:

- Las condiciones de otros agentes que si son relevantes para el transporte.
- El aporte de oscilaciones de período corto que se asocian con términos no lineales del oleaje, los cuales cobran importancia en la zona de surf y por tanto vuelven asimétrico los campos de velocidades orbitales de las partículas.
- El paso del oleaje durante el período de la ola, esto implica una velocidad neta en dirección hacia la playa la cual genera estados de acreción del material emergido.

Finalmente el tercer término corresponde a los efectos de la turbulencia, que se relacionan con las variaciones verticales y pueden ser despreciadas en comparación con los demás términos de la ecuación.

Para las variaciones del perfil transversal Roelvink & Broker (1993) clasifican los modelos en función del transporte, en tres categorías:

- Modelos dominados por el flujo medio: Tal como lo expresa su nombre, estos modelos toman en cuenta el término asociado a la corriente y concentración media, presentado resultados apropiados para eventos muy energéticos, la tasa de transporte se puede estimar mediante:

$$\bar{q}(x) \approx A \int_{z_b}^{z_s} \bar{u}\bar{c}dz \quad (3.66)$$

Donde A se incorpora para compensar los términos despreciados.

- Modelos energéticos: Si las velocidades pueden considerarse aproximadamente uniformes, en la capa en donde ocurre el transporte, la integración en la vertical también puede ser aproximada. Si además se considera que el perfil presenta un transporte importante cercano al fondo se puede introducir una velocidad representativa ubicada en cierto nivel de referencia y una función de carga de sedimentos $L(u_{ref})$.

$$\bar{q}(x) \approx \overline{u_{ref}L(u_{ref})}. \quad (3.67)$$

Bowen (1980) aplica este concepto, para cuantificar la respuesta de un perfil transversal de playa, utilizando la formulación de Bagnold (1966), donde la carga del transporte es proporcional a una potencia de la velocidad cerca del fondo, y obteniendo a través de una combinación lineal de momentos de velocidad, parámetros del fondo y pendientes del perfil. Bailard (1981) vuelve a emplear este concepto rederivando las expresiones para la estimación del transporte, Guza & Thornton (1985) y Stive (1986) incorporan el transporte producto de las corrientes netas producidas por la generación de super armónicos, al considerar la no linealidad de los frentes de ola en la zona de surf. Ranasinghe et al. (1999) incorpora los términos no lineales considerando el porcentaje de olas no rotas, las cuales se propagan en la zona de rotura del oleaje.

- Modelos que resuelven el transporte a escala inferior a la del período de la ola: Éstos modelos resuelven el transporte en su forma extendida, por lo que requieren una descripción completa de la hidrodinámica, incluyendo los efectos de la viscosidad de remolino en la zona de rompiente, conceptualmente son muy robustos, pero en la práctica son muy inestables y costosos en términos computacionales.

En adelante se desarrollará el concepto de transporte mediante el enfoque energético, debido a simplicidad que presenta y economía en el gasto computacional.

La forma en que considera el transporte de sedimentos es simplificada y se debe tener presente que en la realidad no existe ni el transporte por suspensión ni el transporte por fondo, sólo son separados para facilitar su caracterización y cuantificación.

Como se mencionó anteriormente el movimiento de las partículas de sedimento puede considerarse paralelo (longitudinal) y/o perpendicular a la costa (transversal, en sentido hacia el lado playa o lado mar). Nuevamente se debe notar que el fenómeno se ha separado por simplicidad.

El transporte longitudinal es proporcional a la corriente en esa dirección, producto de la velocidad inducida por el oleaje. De forma similar el transporte transversal puede ser modelado realizando un balance entre la asimetría del campo de velocidades producto de la oscilación del oleaje, y el balance entre la gravedad y las corrientes estacionarias.

3.5.2 MODELO ENERGÉTICO PROPUESTO POR BAILARD (1981)

El modelo general basado en el concepto energético para el transporte de sedimento, considerando flujo variable en el tiempo sobre una pendiente arbitraria propuesto por Bailard (1981) es:

$$\langle \vec{i}_t \rangle = \rho c_f \frac{\varepsilon_B}{\tan\phi} \langle |\vec{u}_t|^2 \vec{u}_t \rangle - \frac{\tan\beta}{\tan\phi} \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle \hat{i} + \rho c_f \frac{\varepsilon_S}{W} \langle |\vec{u}_t|^3 \vec{u}_t \rangle - \frac{\varepsilon_S}{W} \tan\beta \langle |\vec{u}_t|^5 \rangle \hat{i} \quad (3.68)$$

Donde ε_B y ε_S son los factores de eficiencia del transporte por fondo y en suspensión respectivamente, ϕ es el ángulo de fricción interna del sedimento, $\tan\beta$ es la pendiente de fondo, W es la velocidad de caída del sedimento, c_f es el coeficiente de arrastre en el fondo, \vec{i}_t es la tasa instantánea de transporte y \vec{u}_t es la velocidad instantánea en las cercanías del fondo.

Un aspecto importante del modelo de Bailard (1981), es la importancia de una serie de momentos de velocidad, los cuales son definidos en términos de oleaje monocromático, Thorton & Guza (1985) extendieron estos momentos para input espectrales. Longuet-Higgins (1953) utilizando teoría de Stokes de segundo orden estimaron la velocidad producto de la simetría, en el movimiento orbital de las partículas al paso de una ola.

Si se considera el vector velocidad en términos de sus componentes en dos dimensiones, y tomando en cuenta la asimetría hasta la segunda componente armónica, empleando un desarrollo de segundo orden para la velocidad se tiene:

$$\vec{u}_t = (\tilde{u} \cos\alpha + \bar{u} \cos\theta) \hat{i} + (\tilde{u} \sin\alpha + \bar{u} \sin\theta) \hat{j} \quad (3.69)$$

$$\tilde{u} = u_m \cos(\sigma t) + u_{2m} \cos(2\sigma t) + \dots \quad (3.70)$$

Estas pueden ser reemplazadas en la expresión para el transporte instantáneo, resultando la tasa de peso sumergido transportado:

$$\langle i_x \rangle = \rho c_f u_m^3 \left\{ \frac{\varepsilon_B}{\tan\phi} \left[\psi_1 + \frac{3}{2} \delta_u - \frac{\tan\beta}{\tan\phi} u_5^* \right] + \frac{u_m}{W} \varepsilon_S \left[\psi_2 + \delta_u u_3^* - \frac{u_m}{W} \varepsilon_S \tan\beta u_5^* \right] \right\} \quad (3.71)$$

Donde:

$$\delta_u = \frac{\bar{u}}{u_m} \cos\theta$$

$$\psi_1 = \frac{\langle \tilde{u}^3 \rangle}{u_m^3}; \psi_2 = \frac{\langle |\vec{u}_t|^3 \tilde{u} \rangle}{u_m^4}$$

$$u_3^* = \frac{\langle |\vec{u}_t|^3 \rangle}{u_m^3}; u_5^* = \frac{\langle |\vec{u}_t|^5 \rangle}{u_m^5}$$

(3.72)

Asilando los factores de eficiencia la ecuación para el transporte de sedimentos queda:

$$\langle i_x \rangle = \varepsilon_B I_A + \varepsilon_S I_B - \varepsilon_S^2 I_C \quad (3.73)$$

$$I_A = \frac{\rho c_f}{\tan\phi} \langle |\vec{u}_t|^2 \vec{u}_t \cdot \hat{i} \rangle - \frac{\tan\beta}{\tan\phi} \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle$$

$$I_B = \frac{\rho c_f}{W} \langle |\vec{u}_t|^3 \vec{u}_t \cdot \hat{i} \rangle$$

$$I_C = \frac{\rho c_f}{W^2} \tan\beta \langle |\vec{u}_t|^5 \rangle$$

$$u_m = \frac{\gamma}{2} \sqrt{gh}; \gamma = \frac{H}{h}$$

(3.74)

La tasa de peso sumergido transportado se relaciona con el volumen transportado Q_x .

$$Q_x = \frac{\langle i_x \rangle}{(\rho_s - \rho)gN_0} \quad (3.75)$$

Donde:

ρ_s : Es la densidad del sedimento.

g : Es la aceleración de gravedad.

N_0 : es el resto de volumen concentrado, Bailard (1981) propone $N_0 = 0.6$.

Bailard (1981) propone para los factores de eficiencia $\varepsilon_B = 0.21$ y $\varepsilon_S = 0.025$.

Este modelo es ampliamente utilizado en la cuantificación de la tasa de transporte de sedimentos, para modelos de respuesta de perfil de playa.

En este capítulo se ha revisado los tópicos más relevantes, generando una base teórica para el entendimiento de los agentes responsables de la evolución morfodinámica. Entre ellos se destaca la dificultad para caracterizar el oleaje irregular, la inducción de variaciones del nivel medio, corrientes y la modelación del transporte de sedimentos.

4. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL MODELO

Para estudiar las bondades de las ecuaciones disponibles para cuantificar cada una de las variables involucradas en la evolución del perfil transversal de playa, se desarrolló una herramienta (modelo) capaz de resolver dichas expresiones, y así obtener la respuesta del perfil ante la acción de un temporal.

En el siguiente capítulo se revisan las ecuaciones empleadas en el desarrollo del modelo de respuesta del perfil, a través de una revisión teórica de los módulos y sub-modelos utilizados en el presente trabajo. En los capítulos posteriores se realizarán trabajos de sensibilidad de los parámetros ajustables y también se evaluará la bondad de cada módulo empleado, comparando con mediciones de laboratorio y de campo.

A continuación se presenta el desarrollo teórico de la modelación de cada módulo.

- Apartado 4.1: En este apartado se describe el dominio espacial de resolución del modelo.
- Apartado 4.2: En este apartado se describen las ecuaciones de gobierno para la resolución del oleaje mediante un enfoque paramétrico, se presentan además las ecuaciones que resuelven los fenómenos de transformación de oleaje, como lo son; refracción, asomeramiento, disipación por rotura y fricción de fondo. Se destaca la importancia de la disipación por rotura en la zona de surf. Para ello se emplean 13 aproximaciones candidatas, los cuales fueron agrupados en cuatro familias:
 - Aproximaciones basadas en la distribución de Rayleigh truncada. Se implementaron los siguientes:
 - Aproximación de Battjes & Janssen (1978), BJ78.
 - Aproximación de Battjes & Stive (1985), BS85.
 - Aproximación de Southgate & Nairn (1993), SN93.
 - Aproximaciones basadas en la distribución de Rayleigh completa. Se implementaron los siguientes:
 - Aproximación de Thornton & Guza (1983) para dos expresiones planteadas, TG83 Ex1, Ex2.
 - Aproximación de Whitford (1998), WH88.
 - Aproximación de Y. Kuriyama (2012), YK12, (puede ser asumida otra distribución distinta).
 - Aproximaciones de energía límite. Se implementaron los siguientes:
 - Aproximación de Rattanapitikon & Shibayama (1998), RS98.
 - Aproximación de Rattanapitikon et al. (2003) RK03.
 - Aproximación de Tajima & Madsen (2004), TM04.
 - Aproximaciones basadas en la aplicación de la distribución Delta de Dirac a la distribución de altura de ola, con el objetivo de simular la disipación en condiciones de oleaje no saturado.
 - Aproximación de Baldock et al. (1998), BHV98.
 - Aproximación de Ruessink et al. (2003), RWS03.
 - Aproximación de Janssen & Battjes (2007), JB07.
- Apartado 4.3: Descripción del módulo espectral.
- Apartado 4.4: Aquí se describe la ecuación de balance de momentum, la cual determina las variaciones del nivel medio, producto de la existencia del oleaje.

- Apartado 4.5: En este punto se describen la inclusión del *roller* en la modelación. Las ecuaciones de balance de densidad de energía del *roller* candidatas, fueron las siguientes:
 - Aproximación del *roller* de Stive & De Vriend (1994), RM.SDV94.
 - Aproximación del *roller* de Lippmann et al. (1996), RM.LP96.
 - Aproximación del *roller* de Tajima & Madsen (2004), RM.TM04.
 - Aproximación del *roller* de Kuriyama (2012), RM.YK12.
- Apartado 4.6: Se describe las corrientes netas en el fondo.
- Apartado 4.7: Se describe el módulo de transporte de sedimentos.
- Apartado 4.8: Finalmente se describe el módulo de evolución morfodinámica.

4.1 DOMINIO ESPACIAL DE RESOLUCIÓN Y PARÁMETROS DE ENTRADA

La variable central del modelo es el perfil, éste se discretiza generando celdas donde se resolverá la hidrodinámica, transporte y balance del sedimento en el espacio-tiempo, lo que permite conocer la variación del perfil ante la acción de una tormenta (Ver Figura 4.1).

El perfil de playa debe tomarse perpendicular a la línea de costa, lejos de obstáculos que causen efectos como reflexión, difracción y modificación sobre la circulación en la playa. Se debe cuidar que los veriles puedan ser aproximadamente rectos y paralelos, para que los fenómenos considerados sean correctamente resueltos por las ecuaciones que implementa el modelo.

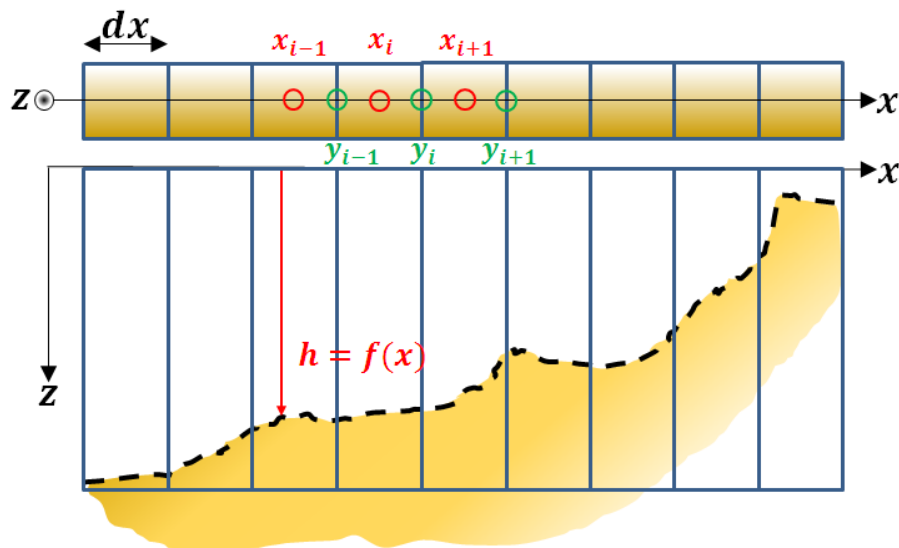


Figura 4.1: Discretización dominio espacial del perfil.
(Fuente: Elaboración propia)

Las variables asociadas a la hidrodinámica y transporte de sedimentos son resueltas en las caras de las celdas, tomando los valores centrales como condicionantes para la resolución de los esquemas numéricos. La evolución del perfil obtenida de la ecuación del balance del

sedimento, se puede realizar para cada celda actualizando el perfil en cada avance de tiempo morfodinámico.

La discretización espacial (Δx) depende esencialmente de la densidad de celdas por unidad de longitud, el cual puede ser configurada en el modelo como variable o constante a lo largo del perfil. El objetivo de variar la longitud espacial de las celdas es representar eficientemente las variaciones del perfil donde es importante la resolución de las variables.

4.2 MÓDULO DE OLEAJE PARAMÉTRICO

El módulo de oleaje se basó en la ecuación de balance de energía. Tomando la variación en un eje se tiene:

$$\frac{\partial [EC_g \cos(\theta)]}{\partial x} = D_x \quad (4.1)$$

Esta ecuación representa el balance de energía en cada punto del eje x , el lado derecho de la ecuación contiene implícita la transformación conservativa, es decir, los procesos de transformación que no presentan pérdidas o ganancias de energía, algunos de estos procesos son por ejemplo: asomeramiento, refracción y difracción. A la derecha de la ecuación se encuentran los términos fuentes, los cuales cuantifican los procesos que implican pérdidas y ganancias de energía, algunos de éstos son: generación por viento, fricción de fondo y disipación por rotura.

En el caso de los modelos paramétricos de perfil, los procesos relevantes en la resolución del oleaje son los siguientes:

- Asomeramiento y Refracción
- Disipación por rotura
- Disipación por fricción con el fondo
- Variaciones del nivel medio

Las ecuaciones diferenciales de este módulo se resuelven aplicando el método de diferencias finitas, mientras que las raíces son aproximadas mediante Regula Falsi.

A continuación se presentan los modelos para cada proceso.

4.2.1 ASOMERAMIENTO Y REFRACCIÓN

Ambos procesos fueron resueltos considerando teoría lineal del oleaje en donde la transformación viene dada en energía por:

$$a_2 = \sqrt{\frac{C_{g,1}}{C_{g,2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} a_1 \quad (4.2)$$

Donde C_g corresponde a la celeridad de grupo y b es la distancia entre ambos rayos.

Una ecuación importante de resolver es la relación de dispersión lineal (Ecuación 4.3). Existen muchos trabajos acerca de la resolución apropiada de esta expresión, uno de los más contemporáneos You (2003) realiza una revisión de las formulaciones más comunes para aproximar la ecuación de dispersión lineal, desde donde se toma la aproximación propuesta por Hunt (1979), la cual se describe a continuación.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (4.3)$$

$$kh = (k_0 h) \sqrt{1 + \left[(k_0 h) \left(1 + \sum_{n=1}^6 D_n (k_0 h)^n \right) \right]^{-1}} \quad (4.4)$$

Donde:

$$D_1 = 0.6666666666$$

$$D_2 = 0.3555555555$$

$$D_3 = 0.1608465608$$

$$D_4 = 0.0632098765$$

$$D_5 = 0.0217540484$$

$$D_6 = 0.0065407983$$

You (2003) muestra que para cualquier profundidad el error cometido al emplear la aproximación de Hunt (1979) es menor que el 0.2%, valor que resulta adecuado de aceptar para el presente autor.

4.2.2 DISIPACIÓN POR ROTURA

Tal como se ha expresado en el capítulo anterior, en la teoría de ondas no se ha incorporado la representación física de la rotura en las ecuaciones que gobiernan la propagación del oleaje. Para resolver este fenómeno artificialmente, se incorporan criterios de rotura que evalúan la altura máxima dependiendo de diversos parámetros los cuales se mencionan en el apartado 0. Por otro parte para evaluar la cantidad de energía disipada se cuenta con dos familias de modelos:

- Esquemas de disipación de bore.
- Esquemas de energía límite.

Los esquemas de disipación del bore permiten estimar la tasa promedio de energía por unidad de área. Si se asume que la ecuación de balance de energía es capaz de resolver la propagación dentro y fuera de la zona de surf, en donde el único proceso es el de rotura, se tiene la siguiente ecuación de gobierno:

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} = -\bar{D}_b \quad (4.5)$$

Donde \bar{D}_b es la tasa media de energía disipada por la rotura. Cabe destacar que fuera de la zona de surf, \bar{D}_b tiende a cero, y el oleaje se propaga conservando el flujo y ajustando cada variable hidrodinámica a la profundidad de propagación.

Battjes & Janssen presentan un artículo en 1978, este esquema de disipación por rotura es ampliamente utilizado inclusive en modelos pertenecientes al estado del arte en esta materia. La iniciativa de emplear la ecuación de balance para resolver el oleaje dentro de la zona de surf, provienen desde los trabajos de Lé Mehauté (1962), Divorky et al. (1970) y Hwang & Divorky (1970), los cuales aplican el concepto de propagación del bore al proceso de rotura de una onda solitaria, en donde la altura de ola rompiendo es una función de la profundidad, de acuerdo con la Ecuación 4.6.

$$H(x) = \gamma h(x) \quad (4.6)$$

Lé Mehauté (1962) plantea que la tasa de disipación de la ola rota puede ser estimada a partir de la disipación debida a un bore con altura equivalente. El esquema considera que el bore conecta dos regiones del fluido con profundidades Y_1 y Y_2 (ver Figura 4.2), las propiedades macroscópicas de este se pueden determinar a partir de la conservación de la masa y momentum a través de él, la energía disipada por unidad de ancho D' , es obtenida por Lamb (1932).

$$D' = \frac{1}{4} \rho g (Y_2 - Y_1)^3 \left[\frac{g(Y_2 + Y_1)}{2Y_2Y_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

La estimación de la energía disipada en una ola no es en estricto sentido determinada por la expresión anterior, sin embargo Battjes & Janssen (1978) plantean que ambas disipaciones poseen el mismo orden de magnitud, lo que justifica su uso. Lé Mehauté (1962) plantea las siguientes aproximaciones:

$$Y_2 - Y_1 \sim H \quad (4.8)$$

$$\left[\frac{g(Y_2 + Y_1)}{2Y_2Y_1} \right]^{\frac{1}{2}} \sim \left[\frac{g}{h} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

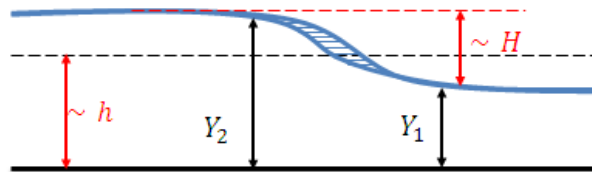


Figura 4.2: Esquema del bore.
(Fuente: Elaboración propia)

Sustituyendo las simplificaciones en la ecuación de disipación del bore, se tiene que:

$$D' \sim \frac{1}{4} \rho g H^3 \left(\frac{g}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

Si se considera la periodicidad del oleaje, la disipación en el proceso de rotura por unidad de área es:

$$D = \frac{D'}{L} = \frac{fD'}{c} \sim \frac{fD'}{(gh)^{\frac{1}{2}}} \sim \frac{1}{4} \rho g f \frac{H^3}{h} \quad (4.2)$$

Otra aproximación de la disipación del oleaje es el enfoque de energía límite. Estos esquemas surgen de las observaciones realizadas por Horikawa & Kuo (1966). Las conclusiones principales de este estudio, pueden ser explicadas mediante la Figura 4.3, en donde una vez que la ola alcanza la rotura, esta se propaga sobre una profundidad constante. Se observa que la ola rota disipa una cantidad de energía, adaptándose hasta alcanzar una nueva altura donde la onda vuelve a ser estable. Este concepto es importante en el caso de playas con barras porque permite reformar el oleaje luego que ha roto.

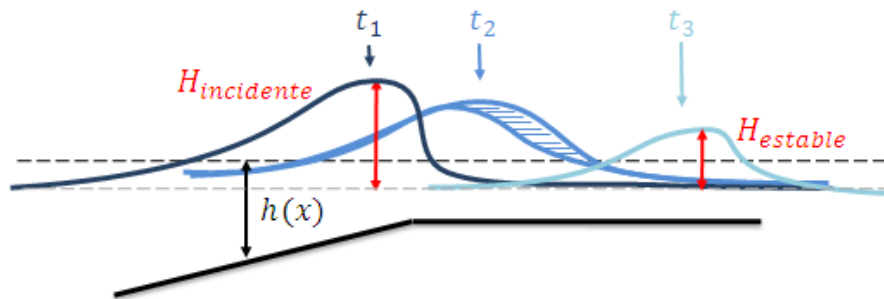


Figura 4.3: Esquema fundamento de modelos de energía límite.
(Fuente: Elaboración propia)

La altura de ola estable producto de la disipación de la energía puede determinarse mediante la expresión:

$$H_{estable} = \Gamma h \quad (4.12)$$

Donde Γ toma valores entre 0.35 y 0.6.

Dally, Dean & Dalrymple (1985), consideran que tasa de disipación media puede ser encontrada a partir de la diferencia entre la energía de la ola incidente y la ola estable.

$$\bar{D}_b = \frac{K}{h} \left[EC_g - (EC_g)_{estable} \right] \quad (4.13)$$

Este enfoque generalmente es empleado en modelos probabilísticos ya que es difícil de extenderlo a oleaje irregular.

A continuación se revisan las aproximaciones para la tasa de disipación por rotura implementados en la presente memoria.

4.2.2.1 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BATTJES & JANSSEN (1978), BJ78

Battjes & Janssen (1978) reconocen que esta aproximación simula las características macroscópicas de la rotura, cuya resolución es simple de aplicar. Básicamente proponen que en un punto cualquiera dentro de la zona de surf, considerando oleaje irregular, existirá un umbral de altura H_m que denota cuáles olas pertenecientes a la distribución de alturas exceden dicho umbral, y por lo tanto están rotas o rompiendo. Esta aproximación presenta una simplificación dado que no todas las alturas que cumplan con la condición de rotura lo están, considerando que pueden existir olas suficientemente largas que no rompen aún cumpliendo con el criterio de altura.

Un supuesto adoptado por BJ78, es que la forma de la distribución de probabilidad de altura es la misma en ausencia de olas rotas, siendo esta la de Rayleigh. Para \hat{H} denominada altura modal se tiene que:

$$f(H) = \begin{cases} \frac{H}{\hat{H}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\hat{H}}\right)^2\right) & \text{para } 0 \leq H < H_m \\ \frac{Q_b}{H_m} \delta\left(\frac{H}{H_m} - 1\right) & \text{para } H_m \leq H \end{cases} \quad (4.14)$$

Donde:

$$Q_b = P(H > H_m) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_m}{\hat{H}}\right)^2\right] \quad (4.15)$$

Donde δ es la distribución Delta de Dirac. La ecuación 4.14 está determinada por H_m y \hat{H} , por lo que todos los parámetros estadísticos del modelo de oleaje irregular dependen de estas variables. Se puede realizar un cambio introduciendo la altura cuadrática media y a partir de ésta encontrar la expresión que la vincula con la fracción de olas rotas.

$$H_{rms}^2 = \int_0^{\infty} H^2 f(H) dH \quad (4.16)$$

$$H_{rms}^2 = 2 \left[1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{H_m}{\hat{H}}\right)^2\right\} \right] \hat{H}^2 \quad (4.17)$$

$$H_{rms}^2 = 2(1 - Q_b)\hat{H}^2 \quad (4.18)$$

$$Q_b = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{H_m^2}{\bar{H}^2}\right) \quad (4.19)$$

La altura modal puede ser eliminada quedando la altura media cuadrática que posee un sentido físico. Utilizando 4.18 y 4.19, se obtiene:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}^2}{H_m^2}\right) \quad (4.20)$$

Battjes & Janssen (1978) reconocen que esta ecuación es el elemento clave de todo el esquema, la cual depende del valor de la altura cuadrática media y debe ser encontrada integrando la ecuación de conservación de energía. La fracción de olas rotas en la integración es importante debido a que los resultados reaccionan principalmente a las variaciones de profundidad a través de Q_b . Para el análisis numérico del comportamiento de Q_b se incluye el parámetro adimensional β , el cual se obtiene mediante la expresión 4.2. Cuando se está en aguas profundas β tiende a cero y consecuentemente la fracción de olas rotas tiende a cero, mientras que muy dentro de la zona de surf β y Q_b tienden a 1 debido a que todas las olas están de proceso de rotura y tienen altura igual a H_m .

$$\beta = \frac{H_{rms}^2}{H_m^2} \quad (4.21)$$

La tasa de disipación extendida a oleaje irregular necesita aún los siguientes supuestos:

- Solo considera el balance de energía en una dirección.
- No puede simular la reformación de las olas.
- $H_b/h_b \sim O(1)$ dentro de la zona de rotura.
- La frecuencia empleada en las ecuaciones corresponde al *peak* del estado de mar asociado a la tormenta.
- Todas las olas rotas o rompiendo tienen altura igual a H_m .

Aplicando lo anterior, la tasa de disipación media para la rotura del oleaje irregular es:

$$\bar{D}_b = \frac{\alpha}{4} Q_b f_p \rho g H_m^2 \quad (4.22)$$

En donde α es una constante del orden de la unidad.

Para la determinación del índice de rotura BJ78 emplea el criterio de Miche (1954):

$$H_m = 0.88 k_p^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma k_p d}{0.88}\right) \quad (4.23)$$

$$d = h + \bar{\eta} \quad (4.24)$$

Donde $\bar{\eta}$ corresponde al nivel medio y γ es el índice de rotura, Battjes & Janssen (1978) recomienda $\gamma = 0.8$, posteriormente Oliveira (2007) propone $\gamma = 0.78$.

Aunque BJ78 utiliza la distribución de Rayleigh truncada como representación de la distribución real de alturas en la zona de surf, lo que puede ser discutible debido a los supuestos propios de uso de ésta distribución, Janssen & Battjes (2007) notan el buen comportamiento del esquema presentado, y establecen algunas mejoras en relación a los trabajos de Baldock et al. (1998) para zonas de surf no saturadas, que tienen lugar en playas con pendientes fuertes.

4.2.2.2 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BATTJES & STIVE (1985), BS85

Battjes & Stive (1985) realizan una revisión de la aproximación de Battjes & Janssen (1978). Se propone el mismo esquema de disipación de bore turbulento en donde la tasa de disipación media para la rotura del oleaje irregular es:

$$\bar{D}_b = \frac{\alpha}{4} Q_b f_p \rho g H_m^2 \quad (4.25)$$

En donde α es una constante del orden de la unidad.

Para la determinación del índice de rotura BS85 emplea el criterio de Miche (1954), al igual que BJ78, sin embargo, BS85 propone un cambio en el índice de rotura, haciéndolo dependiente del peralte en aguas profundas.

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh(33S_0) \quad (4.26)$$

$$S_0 = H_{0rms}/L_{p0} = 0.64 H_{0rms} f_p^2 \quad (4.27)$$

Los supuestos y estructura del esquema es la misma que BJ78.

4.2.2.3 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE SOUTHGATE & NAIRN (1993), SN93

La aproximación de Southgate & Nairn (1993) proponen mayores cambios en el esquema de resolución, aplicando un esquema más eficiente y económico desarrollado por Southgate (1987) para la integración de la ecuación de balance de energía. La tasa de disipación media para la rotura del oleaje irregular es:

$$\bar{D}_b = \frac{\alpha}{4} Q_b f_p \rho g \frac{H_m^3}{h} \quad (4.28)$$

En donde α es una constante del orden de la unidad.

Para la determinación de la altura máxima SN93 utiliza la fórmula propuesta por Battjes & Stive (1985) y modificada por Nairn (1990):

$$H_m = \gamma h \quad (4.29)$$

$$\gamma = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_0) \quad (4.30)$$

S_0 corresponde a la misma variable que la descrita en la Ecuación 4.27. Los supuestos y estructura del modelo es la misma que BJ78.

4.2.2.4 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE THORNTON & GUZA (1983), TG83

Thornton & Guza (1983), plantean un esquema de disipación de bore, considerando la distribución de Rayleigh completa, esto tomando en cuenta resultados obtenidos de mediciones de campo.

El modelo TG83 establece que la distribución de alturas en rotura puede ser obtenida ponderando la distribución Rayleigh de todas las olas presentes en el estado.

$$P_b(H) = W(H)P(H) \quad (4.31)$$

Nótese que se debe establecer la siguiente condición $W(H) \leq 1$, para asegurar que $P_{b(H)} \leq P(H)$, con lo que la porción de las olas rotas del estado puede expresarse de la siguiente forma:

$$Q_b = \int_0^{\infty} P_b(H) dH \quad (4.32)$$

Donde Q_b es la fracción de olas que está en rotura, naturalmente en aguas profundas Q_b tiende a cero y en la zona de surf tiende a 1, considerando que todas las olas deben romper.

La hipótesis que la fracción de olas rotas es una proporción de todas las olas permite expresar que:

$$W(H) = Q_b = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h} \right)^n \quad (4.33)$$

El problema de esta formulación es que $W(H)$ es constante, y las observaciones muestran que en ubicaciones particulares olas más grandes tienden a romper y no así las pequeñas. Thornton & Guza (1983) proponen una variación de la ecuación anterior para considerar este efecto.

$$W(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h} \right)^n \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{H}{\gamma h} \right)^2 \right) \right] \leq 1 \quad (4.34)$$

Donde γ y n son valores recomendados de las observaciones de los autores.

Para cuantificar la disipación TG83 se basan en los trabajos de Stoker (1957) en donde la tasa media por unidad de área disipada por el bore puede ser calculada como:

$$\varepsilon_{bore} \sim \frac{1}{4} \rho g \frac{(BH)^3}{h^2} Q \quad (4.35)$$

Donde B es del orden de la unidad y Q es el volumen de descarga por unidad de área a través del bore. Hwang & Divoky (1970) proponen que

$$Q = \frac{Ch}{L} \quad (4.36)$$

Para una onda monocromática se tiene que la tasa de disipación por unidad de área es:

$$\varepsilon_b = \frac{1}{4} \bar{f} \rho g \frac{(BH)^3}{h} \quad (4.37)$$

Existen algunas recomendaciones para la determinación del parámetro B , como se mencionó B es $O(1)$, también se ha relacionado con el tipo de rotura, $B < 1$ para rotura en Spilling y $B > 1$ para rotura en voluta.

Para extender esta aproximación a oleaje irregular son necesarios algunos supuestos, los cuales se mencionan a continuación;

- La frecuencia del estado de mar puede ser representada por un descriptor, siendo posible adoptar la frecuencia *peak*.
- Solo se considera balance de energía en la dirección del eje de propagación.
- No se tiene en cuenta la reformación del oleaje.

La tasa media de energía disipada puede ser obtenida simplemente multiplicando la altura por la probabilidad de ola rompiente e integrando para toda la distribución.

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{B^3}{4} \rho g \frac{\bar{f}}{h} \int_0^\infty H^3 P_b(H) dH \quad (4.38)$$

Integrando las distribuciones empíricas de olas en rotura, construidas con las expresiones 4.33, 4.34 y la distribución Rayleigh, con $n = 4$ se obtiene respectivamente:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 \bar{f}}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (4.39)$$

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g B^3 \bar{f} \frac{H_{rms}^5}{\gamma^2 h^3} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (4.40)$$

Thornton & Guza (1983) recomiendan $\gamma = 0.42$, sin embargo, Mase & Kirby (1992) concluyen que $B = 1$ y $\gamma = 0.6$ representan adecuadamente los ensayos de laboratorio y datos de campo. Por lo que la altura máxima es:

$$H_b = \gamma h \quad (4.41)$$

Cabe destacar que este es un esquema ampliamente utilizado, es eficiente en términos computacionales y además no es necesario determinar la fracción de olas rotas para la integración de la ecuación de balance de energía.

4.2.2.5 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE WHITFORD (1988), WH88

A las expresiones empíricas para la ponderación de la función de Rayleigh completa, para representar la distribución de probabilidad de olas rotas, Whitford (1988) presenta una nueva expresión, generando una modificación a la tasa media de disipación por rotura presentada por TG83.

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g B^3 \bar{f} \frac{H_{rms}^3}{h} M \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (4.42)$$

$$M = \left\{ 1 + \tanh \left[8 \left(\frac{H_b}{\gamma h} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4.43)$$

El valor de γ recomendado por Whitford (1988) es 0.34.

4.2.2.6 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RATTANAPITIKON Y SHIBAYAMA (1998), RS98

RS98 aplica un esquema de energía límite desarrollado por Dally et al. (1985), pero introduce el concepto de fracción de olas rotas para extender el sub modelo a oleaje irregular. La aproximación de Dally plantea la tasa de disipación de una onda monocromática como:

$$D_b = \frac{K_d C_g \rho g}{8h} [H^2 - H_{estable}^2] \quad (4.44)$$

Para determinar la altura de ola estable o energía estable, Dally et al (1985) proponen $H_{est} = \Gamma h$, con $\Gamma = 0.4$ y $K_d = 0.15$. Shibayama (1996), por su parte, propone una modificación del factor de estabilidad de acuerdo con la Ecuación 4.45.

$$\Gamma = \exp \left[-0.36 - 1.25 \frac{h}{\sqrt{LH}} \right] \quad (4.45)$$

Donde L es la longitud de onda.

Rattanapitikon & Shibayama (1998) determinan la tasa media de energía disipada por rotura introduciendo el concepto de fracción de olas rotas desarrollado por Battjes & Janssen (1978).

$$D_b = \frac{K_1 Q_b C_g}{8h} [E - E_{estable}] \quad (4.46)$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (4.47)$$

$$E_{estable} = \frac{1}{8} \rho g H_{estable}^2 = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma_I h)^2 \quad (4.48)$$

El factor de estabilidad Γ_I queda determinado por:

$$\Gamma_I = \exp \left[K_2 \left(-0.36 - 1.25 \frac{h}{\sqrt{L_p H_{rms}}} \right) \right] \quad (4.49)$$

En la Ecuación 4.49 L_p es la longitud asociada al período representativo del estado que en este caso corresponde al período *peak*.

La fracción de olas rotas es la obtenida a partir de la distribución Rayleigh truncada.

$$\frac{1 - Q_b}{\ln(Q_b)} = - \left(\frac{H_{rms}^2}{H_m^2} \right) \quad (4.50)$$

Donde la altura máxima H_m según recomendaciones de Rattanapitikon & Shibayama (1998) puede ser determinada según el criterio de Goda (1970).

$$H_m = K_3 L_0 \left(1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} \left(1 + 15m^{\frac{4}{3}} \right) \right] \right) \quad (4.51)$$

L_0 es la longitud offshore asociada al período representativo del estado y m la pendiente del fondo.

Los parámetros ajustables fueron calibrados con datos de 128 ensayos de gran escala del SUPERTANK (Kraus & Smith, 1994). Las pruebas indicaron que los coeficientes que mejor se ajustaba son $K_1 = 0.10$, $K_2 = 1.6$ y $K_7 = 0.10$

4.2.2.7 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RATTANAPITIKON ET AL. (2003) RK03

Esta aproximación surge de los trabajos de Ruessink (2003), empleando el esquema de energía límite desarrollado por Dally et al. (1985) para oleaje regular. RS98 cumple el mismo objetivo incluyendo en la tasa media la fracción de olas rotas desarrollada por BJ78, sin embargo, en este trabajo Rattanapitikon et al. (2003) emplean otra solución.

$$D_b = K \frac{\rho g C_g}{8h} [H_{rms}^2 - (\Gamma_I H_b)^2] \quad (4.52)$$

Los valores de K y Γ_I recomendados por Rattanapitikon et al. (2003) son 0.12 y 0.42 respectivamente.

La altura máxima es calculada según el criterio de Miche (1944).

$$H_b = \beta L \tanh(kh) \quad (4.53)$$

Una de las ventajas más destacadas de este esquema es que simple de aplicar y recoge las características puras de los modelos de energía límite, los cuales generalmente son del tipo probabilísticos o también llamados ola a ola.

4.2.2.8 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE BALDOCK ET AL. (1998), BHV98

Para suplir las falencias de BJ78 al simular playas con pendientes fuertes, en donde para este tipo de perfiles el oleaje no se encuentra saturado como en playas de pendiente suave. BHV98 define la fracción de olas rotas asumiendo una distribución de probabilidad de altura de ola tipo Rayleigh, la fracción puede ser obtenida integrando la distribución para los valores de H que cumplen la condición $H/H_{rms} \geq H/H_b$:

$$Q_b = \int_{H^*}^{\infty} P\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) d\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) \quad (4.54)$$

Donde $H^* = H_b/H_{rms}$, integrando se obtiene una expresión explícita para Q_b .

$$Q_b = \exp\left[-\left(\frac{H_b}{H_{rms}}\right)^2\right] \quad (4.55)$$

La tasa media de disipación siguiendo el modelo BJ78 es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{1}{4} \rho g f_p B \int_{H^*}^{\infty} H^2 P\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) d\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) \quad (4.56)$$

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{1}{4} \rho g f_p B \exp\left[-\left(\frac{H_b}{H_{rms}}\right)^2\right] (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad (4.57)$$

En el caso que la zona se encuentre saturada se cumple la condición $H_b = H_{rms}$, y por consiguiente la tasa media de disipación es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{1}{2} \rho g f_p B \frac{H_b^2}{e} \quad (4.58)$$

Para cuantificar la altura máxima Baldock et al. (1998) utiliza la expresión desarrollada por Battjes & Stive (1985) modificada por Nairn (1990).

$$\frac{H_b}{h} = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_0) \quad (4.59)$$

$$S_0 = H_{0rms}/L_{p0} = 0.64 H_{0rms} f_p^2 \quad (4.60)$$

4.2.2.9 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE RUESSINK ET AL. (2003), RWS03

Ruessink, Walstra & Southgate (2003) recogen el trabajo de Baldock (1998), donde la tasa de disipación media es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = B \exp \left[- \left(\frac{H_b}{H_{rms}} \right)^2 \right] f_p \frac{\rho g (H_b^2 + H_{rms}^2)}{4} \quad \text{para } H_{rms} < H_b \quad (4.61)$$

$$\langle \varepsilon_b \rangle = B \exp[-1] f_p \frac{\rho g H_b}{2} \quad \text{para } H_{rms} \geq H_b \quad (4.62)$$

Para la altura máxima RWS03 emplea la misma fórmula usada en BJ78.

$$H_b = K_5 L \tanh[(K_6 kh + K_7)kh] \quad (4.63)$$

Donde $K_5 = 0.14$, $K_6 = 0.86$ y $K_7 = 0.33$.

4.2.2.10 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE JANSSEN & BATTJES (2007), JB07

Janssen & Battjes (2007) revisan lo propuesto por Baldock et al. (1998) y proponen un nuevo esquema que posee las características que incorporaba el modelo BHV98 al de BJ78. Este nuevo esquema incorpora la simulación de playas con pendientes grandes, las cuales no presentan buenos resultados con BJ78, para lograr este objetivo se emplea el supuesto desarrollado por TG83 donde se emplea una ponderación de la distribución de probabilidad de la altura de ola, asociada a todas las olas.

$$P_b(H) = W(H)P(H) \quad (4.64)$$

Donde $W(H) = \mathcal{H}(H - H_b)$, donde \mathcal{H} es la función escalón unitario. La tasa media de disipación propuesta es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{B \bar{f} \rho g}{4 h} \int_{H_b}^{\infty} H^3 P(H) dH \quad (4.65)$$

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g B^3 \bar{f} \frac{H_{rms}^3}{h} \left[1 + \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \left(R^3 + \frac{3}{2} R \right) \exp[-R^2] - \operatorname{erf}(R) \right] \quad (4.66)$$

Donde $R = H_b/H_{rms}$, B es del orden de la unidad y el índice de rotura es el que presenta BS85.

$$\gamma = \frac{H_b}{h} = 0.39 + 0.56 \tanh(33S_0) \quad (4.67)$$

$$S_0 = H_{0rms}/L_{p0} = 0.64 H_{0rms} f_p^2 \quad (4.68)$$

4.2.2.11 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE TAJIMA & MADSEN (2004), TM04

Tajima & Madsen desarrollan un modelo de oleaje monocromático el cual es extendido a oleaje irregular. Una de las particularidades del modelo de Tajima es el concepto de flujo lineal equivalente. La cuantificación de los efectos no-lineales es importante, en especial para el cálculo del transporte de sedimentos, razón por la cual se desarrolla el concepto de aplicar un modelo lineal cuyo flujo es exactamente igual al de una ola no-lineal equivalente, capturando las magnitudes físicas más básicas en lugar de las más complejas.

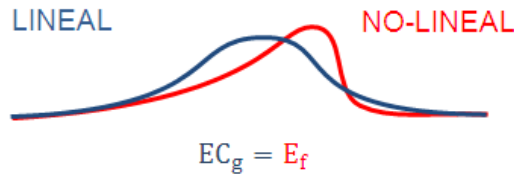


Figura 4.4: Esquema de onda lineal equivalente
(Fuente: Elaboración propia)

El esquema de modelo utilizado por Tajima et al. (2004) corresponde a energía límite, donde la tasa de disipación para una ola regular es:

$$\varepsilon_b = K_b \frac{C_g}{h} (E - E_r) \quad (4.69)$$

Donde K_b es un parámetro de ajuste constante definido por Dally et al. (1985), en la aproximación TM04 tomando como referencia Watanabe & Dibajnia (1988), K_b se hace dependiente del fondo.

$$K_b = -\frac{5}{2} \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2 - \gamma_r^2} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{5}{2} \frac{\gamma_s^2 \tan\beta}{\gamma_s^2 - \gamma_r^2} \quad (4.70)$$

$$\varepsilon_b = K_b \frac{C_g}{h} (E - E_r) \quad (4.71)$$

Donde $\tan\beta$ es la pendiente de la superficie media del agua, denominada pendiente efectiva, este procedimiento es una mejora del modelo de Dally et al. (1985).

Para los valores de γ_s y γ_r Tajima et al. (2004) utilizan datos de laboratorio obtenidos por Horikawa & Kuo (1966) y Okayasu & Katayama (1992), donde los mejores ajustes se obtienen a partir de la siguiente relación:

$$\gamma_s = \gamma_r + A \tan\beta = 0.3 + 4 \tan\beta \quad (4.72)$$

En los casos donde la pendiente es negativa K_b según Watanabe y Dibajnia (1988) puede ser obtenido como $K_b = 0.094$.

El criterio de rotura se basa en Watanabe et al. (1984), el cual mide el ratio existente entre la velocidad de fase de la ola y la velocidad de las partículas cerca de la cresta:

$$\left(\frac{2u_c}{C}\right)_b = \frac{k_b H_b}{\tanh(k_b H_b)} \quad (4.73)$$

Tajima & Madsen (2004) modifican esta expresión para obtener el siguiente criterio de rotura:

$$\frac{k_b H_b}{\tanh(k_b h_b)} = 1.07 - 0.59 \exp\left(-8.6 \frac{h_b}{L_0}\right) + 2.59 \tan\beta_0 \exp\left(-15.1 \left(\frac{h_b}{L_0}\right)^{\frac{3}{2}}\right) \quad (4.74)$$

Para extender esta aproximación a oleaje irregular se deben aceptar algunos supuestos:

- La forma del espectro del estado es de banda angosta, lo que permite la utilización de un período representativo de todo el estado.
- Las alturas de ola en la zona de surf se distribuyen Rayleigh.
- Solo las olas con alturas mayores o iguales a H_b están en proceso de rotura.

La expresión general de este esquema corresponde a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty P(\xi) E C_g d\xi = -K_b \frac{C_g}{h} \int_{\xi_b}^\infty P(\xi) (E - E_r) d\xi \quad (4.75)$$

$$P(\xi) = 2\xi \exp(-\xi^2) \quad (4.76)$$

Donde $\xi = H/H_{rms}$ y $\xi_b = H_b/H_{rms}$

Luego la disipación media por unidad de área es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = -K_b \frac{C_g}{h} \exp(-\xi_b^2) [E(1 + \xi_b^2) - E_r] \quad (4.77)$$

La ventaja y defecto de TM04 es que no posee a priori parámetros ajustables, sin embargo, se han asumido algunos valores empíricos en el criterio de rotura, por lo que la calibración de estas ecuaciones tiene aún sentido.

4.2.2.12 APROXIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE KURIYAMA (2012), YK12

Y. Kuriyama presenta un esquema de disipación usando el esquema de bore periódico desarrollado por Thornton & Guza (1983).

$$B(H) = \frac{1}{4} \rho g f_p \frac{(B_w H)^3}{h} \quad (4.78)$$

El parámetro B_w , generalmente considerado como una constante del orden de la unidad, utilizando datos experimentales de Seyama & Kimura's (1988), Kuriyama & Ozaki (1996) llegan a la siguiente expresión:

$$B_w = C_B \left[1.6 - 0.12 \ln \left(\frac{H_0}{L_0} \right) + 0.28 \ln(\tan \beta) \right] \quad (4.79)$$

Luego la tasa media de disipación propuesta por Kuriyama (2012) es:

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \int_{H_b}^{\infty} P(H) B(H) dH \quad (4.80)$$

El autor recomienda una discretización de 20 términos entre H_b y $3H_b$, para resolver de manera adecuada la integral de la Ecuación 4.80.

Cabe destacar que para los efectos del presente documento se escogió la distribución de Rayleigh para describir las alturas de ola en la zona de surf.

La altura de ola máxima es propuesta por Seyama & Kimura (1988)

$$\frac{H_b}{h_b} = C_{br} \left[0.16 \frac{L_0}{h_b} \left\{ 1 - \exp \left[-0.8\pi \frac{h_b}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \beta \right) \right] \right\} - 0.96 \tan \beta + 0.2 \right] \quad (4.81)$$

La utilización del período *peak* se hace bajo las recomendaciones de Grasmeijer & Ruessink (2003). Los coeficientes C_B y C_{br} son 0.70 y 0.75 respectivamente, según mediciones obtenidas por Kuriyama et al. (2008b).

4.3 MÓDULO DE OLEAJE ESPECTRAL

El efecto de la rompiente en la evolución del espectro ha sido estudiada previamente por diversos autores, entre ellos Battjes & Beji (1992) que dan cuenta de la formación de superarmónicos, cuando se está en presencia de barras para oleaje no rompiente y rompiente, empleando espectros unimodales, además en este trabajo se concluye que existe una modificación de las pendientes y también de la forma de espectro. Mase & Kirby (1992) realizan pruebas de laboratorio para observar la respuesta del espectro debido al asomeramiento y rotura del oleaje, estos identifican que en profundidades muy reducidas las frecuencias altas son más influenciadas por la rotura que las del *peak* primario del espectro, estos resultados sugieren que los efectos de la rotura puede ser considerados en dos partes; una que implica el decaimiento proporcional de las componentes del espectro para todas las frecuencias, y otra en donde la disipación es proporcional al cuadrado de las frecuencias. Vicent et al. (1994) realiza nuevamente mediciones de laboratorio para oleaje unimodal, en donde concluye que la distribución de la disipación en el espectro es proporcional a la densidad de energía y no de la frecuencias, estas conclusiones son concordantes con las realizadas independientemente por Battjes & Beji (1993).

Para la propagación de cada componente espectral se emplea la ecuación de balance de energía propuesta por Eldeberky (1996).

$$\frac{\partial}{\partial x} [C_g(f)E(f)] = s \quad (4.82)$$

Donde C_g es la celeridad de grupo, E es la densidad espectral de energía y s es la suma de los términos fuente/decaimiento, los cuales deben incluir los procesos dominantes en la transformación del oleaje dependiendo de la zona de propagación. Tal como se comentó en el marco teórico, los procesos de transformación considerados son disipación por rotura de fondo e interacción entre triadas, ambos se detallan a continuación.

4.3.1 DISIPACIÓN POR ROTURA

Poco se conoce de la forma de la disipación en el dominio de las frecuencias y hasta hoy el autor desconoce la existencia de una teoría capaz de determinar la distribución espectral considerando las pérdidas de energía por rotura. Beji & Battjes (1993) a partir de ensayos de laboratorio, recomiendan que la reducción sea proporcional a cada componente de energía del espectro y a la disipación tomada de un modelo empírico-teórico, lo que implica que no se afecta la forma del espectro. Mase & Kirby (1992) plantean un término de disipación dependiente de la frecuencia, éste consiste en dos partes ponderadas por la densidad espectral, la primera es proporcional a la energía de cada banda del espectro y la segunda es proporcional a frecuencia al cuadrado.

Asumiendo que la rotura puede ser simulada cuantificando la disipación como un bore turbulento, tal como lo propone Battjes & Janssen (1978) en donde para una ola se tiene:

$$D_{wave} = -\frac{1}{4}\alpha_{BJ}\rho g f_0 H_{br}^2 \quad (4.83)$$

Considerando que la disipación para una ola en un estado de mar es una variable aleatoria, puede expresarse como:

$$\overline{D_{wave}} = -\frac{1}{4}\alpha_{BJ}\rho g \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_0 H_{br}^2 p(H_{br}, f_0) df_0 dH_{br} \quad (4.84)$$

Para el cálculo de la disipación para todas las olas se debe incorporar la fracción de olas rotas de acuerdo a:

$$\overline{D_{surf}} = Q_b \overline{D_{wave}} \quad (4.85)$$

Holthuijsen (2007) comenta la falta de estudio de la función de densidad de probabilidad conjunta de período y altura en rotura. Sin embargo, Battjes & Janssen (1978), señalan previamente que esta función de densidad de probabilidad no es requerida para estimar las propiedades integrales, sino más bien a través del uso de la distribución de alturas del estado, en donde todas las olas rotas tienen una altura igual a H_{br} , luego es posible reemplazar las expresiones dependientes de la integración con lo que resulta:

$$\overline{D}_{surf} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} \rho g Q_b \bar{f}_0 H_{br}^2 \quad (4.86)$$

La tasa de disipación total queda determinada distribuyendo para cada bin de energía en términos de la varianza.

$$S_{surf}(f, \theta) = \frac{\overline{D}_{surf} E(f, \theta)}{m_0} \quad (4.87)$$

Donde m_0 corresponde al momento de orden cero del espectro.

En la Figura 4.5 se muestra la forma de la disipación, destacándose su similitud con la distribución en frecuencias del espectro. Se supone que la dependencia de la disipación debido a las frecuencias es despreciable en comparación con la disipación ligada a la proporción de densidad de energía de cada banda en el espectro.

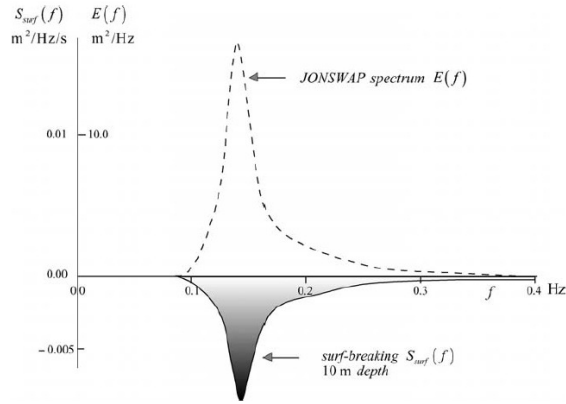


Figure 8.18 The depth-induced-breaking (surf-breaking) source term, for a JONSWAP spectrum in shallow water (computed with the spectral bore model based on Battjes and Janssen, 1978; for $H_s = 3.5$ m and $T_{peak} = 7$ s).

Figura 4.5: Esquema del término sumidero; disipación debido a rotura inducida por la interacción con el fondo.
(Fuente: Holthuijsen (2007))

4.3.2 INTERACCIÓN NO LINEAL OLA A OLA

La resonancia que ocurre producto de la interacción entre las olas pertenecientes al oleaje irregular, genera transferencia de energía desde el “armónico principal” hacia los “armónicos secundarios”, este comportamiento genera cambios en la mecánica del oleaje a medida que este se propaga en aguas intermedias y poco profundas.

Para simular la transferencia de energía del armónico principal a los secundarios en las zonas cercanas a la costa, debido al efecto conocido como interacción ola a ola generada por triadas, se empleó la expresión denominada *Lumped Triad Approximation* (LTA) desarrollada primero por Eldeberky & Battjes (1995) y modificada por Eldeberky (1996):

$$S_{tnl}(f_p) = S_{tnl}^+(f_p) + S_{tnl}^-(f_p) \quad (4.88)$$

$$S_{tnl}^+(f_p) = \max \left\{ 0, \alpha_{EB} C C_g J^2 |\sin \beta| \left[E^2 \left(\frac{f_p}{2} \right) - 2E \left(\frac{f_p}{2} \right) E(f) \right] \right\} \quad (4.89)$$

$$S_{tnl}^-(f_p) = -2 * S_{tnl}^+(2f_p) \quad (4.90)$$

Donde α_{EB} es un coeficiente de calibración, que implica mover la cantidad de energía transferida, β es la bifase, que puede ser aproximada por:

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left(\frac{0.2}{U_r} \right) \quad (4.91)$$

U_r corresponde al número de Ursell, el que también es empleado para determinar si se calcula la interacción. Luego siempre que $10 > U_r > 0.1$ se efectúa el cálculo de transferencia de energía.

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (4.92)$$

El coeficiente de interacción J es calculado según Madsen & Sørensen (1993) como:

$$J = \frac{k_{f/2}^2 (gd + 2C_{f/2}^2)}{k_f d (gd + \frac{2}{15}gd^3k_f^2 - \frac{2}{5}\omega^2d^2)} \quad (4.93)$$

Estas ecuaciones permiten el cálculo de la transferencia de energía del armónico principal hacia los superarmónicos generados por la interacción entre olas, tal como se muestra en la Figura 4.6.

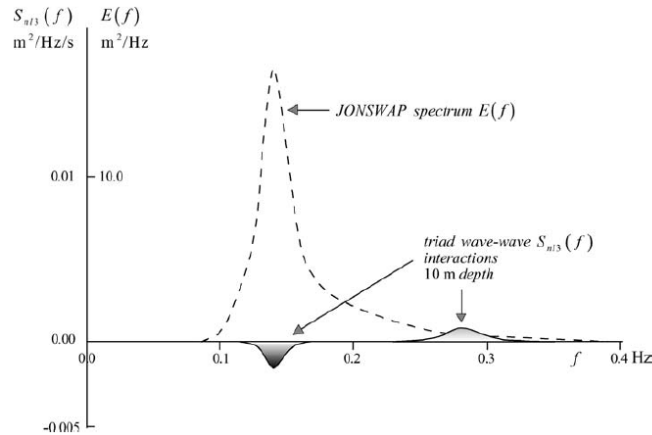


Figura 4.6: Esquema de la forma del término fuente; interacción no lineal ola a ola mediante triadas
(Fuente: Holthuijsen (2007))

Beji & Battjes (1993) observan el incremento de energía asociada a frecuencias altas durante el proceso de propagación sobre barras, las cuales implican un aumento de la no linealidad, donde la energía es transferida hacia las frecuencias más altas.

Edeberky (1996) manifiesta que la inclusión de este efecto puede ser importante para los perfiles que contienen barras, sin embargo, se desconocen estudios más profundos acerca de sus consecuencias en el transporte de sedimentos, además se debe notar que el método LTA no considera la dirección como variable dependiente de la transferencia de energía en el dominio de las frecuencias, efecto que también sería de interés en caso que este proceso sea significativo en la propagación del oleaje en las costas chilenas.

4.4 MÓDULO INCLUSIÓN DEL *ROLLER*

Para explicar el incremento de las corrientes de resaca o *undertow*, se introduce el concepto de *roller*. Svendsen (1984) es el primero en incluir este sub modelo (sub debido a que es una parte del modelo de evolución morfodinámica) para explicar el aumento de las corrientes de retorno y el esfuerzo de corte dentro de la zona de *surf* en base a observaciones. Okayasu et al. (1990) encuentra en los trabajos de Svendsen (1984), que los resultados sobre predicen las corrientes y el esfuerzo de corte fuera de la zona de *surf*, e introduce el supuesto de que la energía disipada por la rotura, es transferida al *roller* correspondiente y a energía turbulenta.

En el presente trabajo se han incluido cuatro formulaciones distintas para estimar la energía del *roller*, siendo estas:

- Stive & De Vriend (1994)
- Lippmann et al. (1996)
- Tajima & Madsen (2004)
- Kuriyama (2012)

A continuación se describe brevemente cada uno de ellas.

4.4.1 APROXIMACIÓN DEL *ROLLER* DE STIVE & DE VRIEND (1994)

La ecuación de gobierno de influencia del *roller* es:

$$\frac{\partial(2E_r c \cos(\theta))}{\partial x} = -D_r + D_b \quad (4.94)$$

Donde E_r es la densidad de energía del *roller*, c es la celeridad, y D_b es la tasa media de disipación producto de la rotura. D_b debe ser obtenido a partir de la solución de la ecuación de balance de energía.

D_r es la disipación del *roller*. Siguiendo los trabajos de Duncan (1981) y Deigaard (1993), la disipación del *roller* puede ser modelado como:

$$D_r = \frac{2gE_r \sin\beta}{c} \quad (4.95)$$

Donde β es la pendiente de la cara de la ola. Reniers & Battjes (1997) y Ruessink et al. (2001) recomiendan un valor de β igual o menor a 0.1.

4.4.2 APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE LIPPMANN ET AL. (1996)

La ecuación de gobierno de influencia del *roller* según Lippmann et al. (1996), viene dada por:

$$\frac{\partial(E_r c \cos(\theta))}{\partial x} + \frac{\partial(2E_w C_g \cos(\theta))}{\partial x} = -D_r \quad (4.96)$$

Donde E_r es la densidad de energía del *roller* y c es la celeridad.

$$E_r = \frac{1}{8} \rho c f \frac{H_b^3}{h \tan \sigma} \quad (4.97)$$

f puede ser utilizado como la frecuencia *peak* del estado, σ es la pendiente en la cara de la ola. Lippmann et al. (1996) recomienda como valor 12.5° , sin embargo, éste puede variar para ángulos $\sigma > 5^\circ$ o 10° .

La disipación del *roller* puede ser obtenida a partir de:

$$D_r = \frac{1}{4} \rho g f \frac{H_b^3}{h} \cos \sigma \quad (4.98)$$

Donde:

$$H_b^3 = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} M H_{rms}^3 \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (4.99)$$

$$M = \left\{ 1 + \tanh \left[8 \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4.100)$$

Es de notar que al comparar las ecuaciones con el modelo de oleaje WH88 $B = 1$ y σ es pequeño, las expresiones son equivalentes.

4.4.3 APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE TAJIMA & MADSEN (2004)

El esquema propuesto por Tajima & Madsen (2004) es tomado a partir de los trabajos de Dally & Brown (1995) en el cual se expone la solución de la discontinuidad de la energía del *roller* en el punto de rotura. La ecuación de balance de energía para el oleaje es:

$$\frac{\partial(E C_g \cos(\theta))}{\partial x} = -\frac{K_b}{h} C_g (E - E_r) \quad (4.101)$$

Los detalles de esta ecuación pueden ser encontrados en el apartado donde se expone el modelo TM04, la inclusión del *roller* a ésta ecuación es construida mediante los siguientes supuestos:

- Parte de la energía disipada por la rotura del oleaje, es transferida al *roller* de superficie, y el resto es transferido a energía turbulenta en la columna de agua.
- La energía del *roller* de superficie se mueve con velocidad c igual a celeridad de la ola.
- La energía transferida al *roller* es disipada a una tasa proporcional a la energía local del *roller* mismo.
- El *roller* de superficie se desvanece una vez que la ola deja de romper y se ha reformado.

Aplicando estos supuestos Tajima & Madsen (2004) plantean la ecuación de conservación de energía incluyendo el *roller* de superficie como:

$$\alpha \frac{\partial(E C_g \cos(\theta))}{\partial x} + \frac{\partial(C E_{sr} \cos(\theta))}{\partial x} = -\frac{K_b}{h} C E_{sr} \quad (4.102)$$

Donde α es la fracción de la energía de la ola disipada que es transferida al *roller*, siendo su estimación muy compleja debido a lo caótico del fenómeno, para asignar un valor se asume que la pérdida de potencial de energía de las olas rotas es la mitad de la energía disipada, luego $\alpha = 1/2$.

Finalmente la ecuación de balance de energía completa es obtenida sustituyendo 4.101 en 4.102.

$$\frac{\partial(E_{sr} C \cos(\theta))}{\partial x} = -\frac{1}{h} \left(K_b C_g \frac{E - E_r}{2} - K_{sr} C E_{sr} \right) \quad (4.103)$$

En donde K_{sr} es recomendado por Dally & Brown (1985) como una constante igual a 0.2, sin embargo, Tajima & Madsen (2004) proponen que si los mecanismos de transferencia de la ola y del *roller* son similares, una buena aproximación para K_{sr} será tomar la misma formulación que para determinar K_b .

$$K_{sr} = \frac{5 \gamma_s^2 \tan \beta}{2 \gamma_s^2 - \gamma_r^2} \quad (4.104)$$

Más detalles de la expresión 4.104 pueden encontrarse en el apartado 4.1.2.11.

La energía del *roller* es caracterizada siguiendo el concepto propuesto por Dally & Brown (1985) en donde sus propiedades pueden ser determinadas a partir de la sección transversal de superficie S_{sr} (ver Figura 4.7).

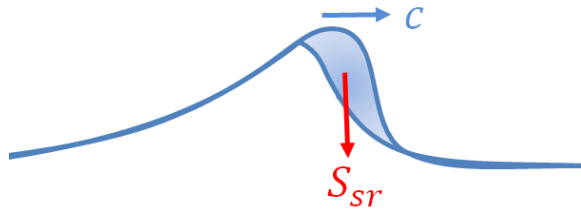


Figura 4.7: Esquema de la sección transversal del *roller* de superficie.
(Fuente: Elaboración propia)

Mediante observaciones es posible determinar que el *roller* de superficie tiene lugar en la cara de la cresta de la ola rota y se propaga en conjunto con ésta. Por lo que Tajima & Madsen definen que la energía cinética éste por unidad de área es:

$$E_{sr} = \frac{\rho S_{sr} C^2 / 2}{L} = \frac{\rho S_{sr} C}{2T} \quad (4.105)$$

Donde L y T corresponden a la longitud de onda y al período respectivamente.

La extensión de este modelo a oleaje irregular es similar a la empleada en el caso de la disipación por rotura de TM04. La ecuación de balance de energía incluyendo el *roller* para oleaje irregular resulta:

$$\frac{\partial(E_{sr} C \cos(\theta))}{\partial x} = \frac{K_b}{h} \left(\frac{C_g}{2} \exp(-\xi_b^2) [E(1 + \xi_b^2) - E_r] - CE_{sr} \right) \quad (4.106)$$

Donde $\xi = H/H_{rms}$ y $\xi_b = H_b/H_{rms}$.

4.4.4 APROXIMACIÓN DEL ROLLER DE KURIYAMA (2012)

El esquema de disipación de *roller* propuesto por Kuriyama (2012), asume que posee una distribución vertical de velocidades de forma triangular donde la velocidad máxima se da en la cresta igual a la celeridad de la ola y en el fondo tiende a cero tal como se muestra en la Figura 4.8.

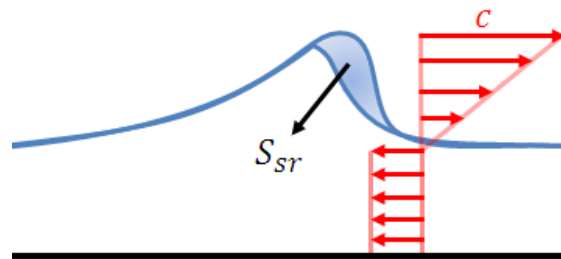


Figura 4.8: Esquema distribución vertical de velocidades en el modelo de Kuriyama.
(Fuente: Elaboración propia)

Kuriyama & Nakatsukasa (2000) asumen que el *roller* solo existe cuando la ola rompe, y que la superficie transversal de éste es proporcional a la altura de ola al cuadrado. Kuriyama introduce el término S_{sr}/h a la tasa de disipación del *roller*, de modo de suprimir el incremento inusual de las corrientes de resaca cerca de la línea de costa. Con esto la ecuación de balance de energía incluyendo los efectos del *roller* es:

$$\alpha \frac{\partial(E_w C_g \cos(\theta))}{\partial x} + \frac{\partial(F_{sr} \cos(\theta))}{\partial x} = D_r \quad (4.107)$$

Donde F_{sr} es el flujo medio de energía del *roller* y se puede determinar mediante:

$$F_{sr} = \frac{1}{8} \rho c^3 \frac{S_{sr}}{L} \quad (4.108)$$

La tasa de disipación media de energía del *roller* D_r propuesta por Kuriyama es:

$$D_r = B_r g \frac{F_r S_{sr}}{c^2 h^2} \quad (4.109)$$

Donde B_r es 0.096 según las recomendaciones de Kuriyama (2010^a).

4.5 MÓDULO DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO

Tal como se presentó previamente el efecto del oleaje en las playas provoca variaciones en el nivel medio, estas pueden ser calculadas mediante la ecuación de balance de cantidad de movimiento en el eje de propagación.

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = -\rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \quad (4.110)$$

Donde S_{xx} corresponde al tensor de radiación, el cual fue derivado previamente.

$$S_{xx} = \left(n - \frac{1}{2} + n \cos^2(\theta) \right) E \quad (4.111)$$

Svendsen (1984) incluye en la ecuación de balance de cantidad de movimiento la presencia del *roller*.

$$\rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{sr,xx}}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (4.112)$$

En la ecuación 4.112 el término de advección de la corriente media es despreciado, τ_x es la tensión de corte en el fondo, la cual puede ser despreciada y $R_{sr,xx}$ es el flujo de cantidad de movimiento debido a la inclusión del *roller*.

$$R_{sr,xx} = \frac{\rho S_{sr} c^2 \cos^2(\theta)}{L} = 2 E_{sr} \cos^2(\theta) \quad (4.113)$$

Cabe destacar que la corrección de las variaciones del nivel medio es uno de los factores que motivó el uso de *roller* en la determinación de la hidrodinámica en la zona de *surf*.

Tanto la ecuación de balance de energía como la cantidad de movimiento, deben ser resueltas en forma simultánea, debido a que una reducción o incremento en la profundidad de propagación afecta al oleaje a lo largo del perfil.

4.6 MÓDULO DE CORRIENTES NETAS EN EL FONDO

En el presente trabajo se recogieron algunas formulaciones disponibles para estimar las corrientes transversales a la playa, las cuales son las principales responsables de las variaciones del perfil transversal de la playa.

Se consideraron tres formulaciones, siendo estas:

- De Vriend & Stive (1987)
- Tajima & Madsen (2004)
- Kuriyama (2012)

Estas expresiones son esencialmente de dos tipos, el primer tipo corresponde a fórmulas que incluyen tanto los efectos de *undertow* y las corrientes netas generadas por oleaje, como presenta la formulación de De Vriend & Stive (1987), en donde se puede apreciar corrientes hacia la costa antes de la rotura y corrientes de resaca después de la rotura. Mientras que el otro tipo de formulación solo considera los efectos de las corrientes de resaca, por lo que solo pueden obtenerse corrientes con sentido *offshore* (Tajima & Madsen (2004) y Kuriyama (2012)).

4.6.1 APROXIMACIÓN DE VRIEND & STIVE (1987)

El esquema de De Vriend & Stive (1987) se denomina cuasi 3D porque intenta acoplar un modelo 2DH con uno 2DV. Para integrar en la vertical, divide la columna de agua en tres niveles. Para efectos de las corrientes en el fondo se empleará una simplificación propuesta por Ranasinghe et al. (1999).

$$U_{rb} = -\left(\frac{1}{2} + 7\frac{d}{\lambda}\right)\frac{d\overline{D}_b C_1}{\rho c v \xi_t} - Q_b \left(1 + 7\frac{d}{\lambda}\right)\frac{E}{\rho c h \rho \xi_t} + (1 - Q_b)\frac{3 u_m^2}{4 C} \quad (4.114)$$

Donde:

d : es la profundidad local.

λ : es la longitud de onda en rotura correspondiente al período de *peak*.

D_b : es la tasa de disipación de energía por unidad de área.

ρ : es la densidad del agua.

c : es la celeridad de la onda correspondiente al período de pico.

v : es la viscosidad de remolino vertical (*Eddie viscosity*).

ξ_t : es el nivel del seno de la onda desde el fondo adimensionalizado con la profundidad, $\xi_t = \max(0.8d, d - H_{rms}/2)$, recomendado por Rodríguez et al. (1994).

C_1 es:

$$C_1 = \frac{5}{36}\xi_t^2 + \frac{5}{48}(2\log 2 - 1) - \frac{5}{72}\frac{1}{\xi_t}(3\log 2 - 2) \quad (4.115)$$

E : es la densidad de energía del oleaje por unidad de área.

Q_b : es la proporción de olas rotas

u_m : es la velocidad orbital en las inmediaciones del fondo. Para teoría lineal u_m resulta:

$$u_m = \frac{\pi}{T_p} \cdot \frac{H \cos \theta}{\sinh(k_p d)} \quad (4.116)$$

Para la viscosidad de remolino vertical se utiliza el modelo De Vriend & Stive (1987), de acuerdo a:

$$v = Ku^*d + Md(D/\rho)^{\frac{1}{3}} \quad (4.117)$$

Donde K y M son constantes empíricas y u^* es la velocidad de corte, definida por:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (4.118)$$

La tensión tangencial en el fondo media τ_b , se calcula utilizando la expresión propuesta por Rakha & Kamphuis (1997).

$$\tau_b = \rho f_w U_{rb} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{T_p \sinh(k_p d)} \right)^2 H_{rms}^2 + U_{rb}^2} \quad (4.119)$$

El factor de fricción f_w se obtiene a partir de la formulación de Swart (1974).

$$f_w = \begin{cases} 0.3 & r \leq 1.57 \\ 0.00251 \exp(5.21r^{-0.19}) & r > 1.57 \end{cases} \quad (4.120)$$

$$r = \frac{A}{K_s} \quad (4.121)$$

A es la amplitud del desplazamiento orbital:

$$A = \frac{H_{rms}}{2 \sinh(k_p d)} \quad (4.122)$$

K_s es la rugosidad de Nikuradse la que se considera como $K_s = 2.5D_{50}$.

Los valores para K y M son 0.083 y 0.025 respectivamente, según recomendaciones hechas por Southgate & Nairn (1983).

4.6.2 APROXIMACIÓN DE TAJIMA & MADSEN (2004)

El flujo volumétrico medio de resaca por unidad de ancho integrado en la vertical debido al *roller* es:

$$\vec{q}_{sr} = \frac{S_{sr}}{T} \vec{n} = \frac{2E_{sr}}{\rho C} \vec{n} \quad (4.123)$$

En donde $\vec{n} = (\cos\theta, \sin\theta)$ es la dirección de propagación de la ola respecto de la perpendicular a la costa. Mediante teoría lineal se puede obtener el flujo total q_x .

$$\vec{q}_x = \int_{-H/2}^{\eta} \vec{u} dz + q_{srx} = \frac{E + 2E_{sr}}{\rho C} \cos\theta \quad (4.124)$$

Asumiendo veriles rectos y paralelos se pueden despreciar las variaciones en el eje paralelo a la costa, con lo que el flujo medio integrado en la vertical es:

$$U_{rb} = -\frac{q_x}{h} \quad (4.125)$$

4.6.3 APROXIMACIÓN DE KURIYAMA (2010)

La estimación de la corriente media de resaca (*undertow*), integrada en la vertical U_{rb} , es tomada de la formulación de Svendsen (1984).

$$U_{rb} = \frac{Q_w + Q_r}{d_{tr}} \quad (4.126)$$

Donde Q_w y Q_r son los flujos de masa debido al oleaje y *roller* respectivamente, d_{tr} es la distancia vertical de la columna de agua desde el fondo hasta la cresta de la ola, se puede asumir la recomendación de Rodríguez et al. (1994), o simplemente considerar $d_{tr} = h - 0.5H_{rms}$.

La estimación del flujo por oleaje corresponde a:

$$Q_w = \frac{C}{h} \zeta_{rms}^2 \quad (4.127)$$

Con C igual a la celeridad de la ola asociada al período representativo y ζ_{rms} igual a la desviación estándar de la superficie libre de la ola, y puede ser estimada mediante el parámetro de no linealidad Π propuesto por Goda (1983).

$$\zeta_{rms} = \frac{1}{2\sqrt{2}} H_{rms} \quad \Pi < 0.15$$

$$\zeta_{rms} = \frac{1}{1.668 \log_{10} \Pi + 4.204} H_{rms} \quad 0.15 \leq \Pi < 3$$

$$\zeta_{rms} = \frac{1}{5} H_{rms} \quad \Pi \geq 3$$

(4.128)

Donde el parámetro de Goda es:

$$\Pi = \frac{H_{rms}}{L} \tanh^3 \left[\frac{2\pi h}{L} \right] \quad \text{(4.129)}$$

Con L igual a la longitud de ola correspondiente al período representativo del estado de mar.

El flujo debido al *roller* es estimado asumiendo que la distribución vertical de velocidades es triangular, según Kuriyama & Nakatsukasa (2000).

$$Q_r = \frac{S_r C}{2L} \quad \text{(4.130)}$$

Donde S_r es la superficie transversal del *roller* turbulento.

4.7 MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Éste módulo determina el transporte de sedimentos, tomando como base los campos de oleaje y de corrientes netas en el fondo. Se ha optado por dos formulaciones, una de ellas ampliamente contrastada en el estado del arte de la modelación de la evolución morfodinámica, que corresponde a la basada en el enfoque energético de Bailard (1981) modificado por Ranasinghe et al. (1999), mientras que la segunda es la metodología más reciente conocida por el autor en este ámbito y fue desarrollada por Kuriyama (2012).

La primera formulación estima el transporte total como la suma de la carga en suspensión y la de fondo, sin embargo, cabe destacar que la expresión presentada por Bailard (1981) ha sufrido modificaciones, sugeridas por diferentes autores con objeto de modelar de manera más adecuada los procesos físicos que afectan al transporte de sedimentos.

En el caso del modelo de Kuriyama (2012), si bien considera el transporte de sedimentos como la suma de la carga por fondo y suspensión, incorpora los efectos de *roller* del oleaje, entre otros aspectos.

4.7.1 APROXIMACIÓN DE RANASINGHE ET AL. (1999)

Ranasinghe et al. (1999) propone que el transporte expresado en peso sumergido ($\langle ics \rangle$) puede determinarse mediante la suma de 6 componentes: $\langle ics \rangle = \langle iasb \rangle + \langle iass \rangle + \langle iscb \rangle + \langle iscs \rangle + \langle islb \rangle + \langle isls \rangle$. Cada una de estas trata de representar el transporte de la carga de sedimentos debido a un proceso en específico.

Estas componentes representan los siguientes fenómenos:

- $\langle iasb \rangle$, transporte por fondo debido a la asimetría del oleaje.
- $\langle iass \rangle$, transporte en suspensión debido a la asimetría del oleaje.
- $\langle iscb \rangle$, transporte por fondo debido a la corriente neta.
- $\langle iscs \rangle$, transporte en suspensión debido a la corriente neta.
- $\langle islb \rangle$, transporte por fondo debido a la influencia de la pendiente.
- $\langle isls \rangle$, transporte en suspensión debido a la influencia de la pendiente

Las expresiones para el cómputo de estas componentes se escriben a continuación, agrupándolas en los procesos responsables de la consideración de cada término en el transporte de sedimentos.

- Componentes debido a asimetría:

$$\langle iasb \rangle = \frac{9}{16} B_b \frac{u_m^4 \cos \theta (1 - Q_b)}{c \sinh^2(k_p d)} \quad (4.131)$$

$$\langle iass \rangle = \frac{9}{5\pi} B_s \frac{u_m^5 \cos \theta (1 - Q_b)}{c \sinh^2(k_p d)} \quad (4.132)$$

- Componentes por corriente neta:

$$\langle iscb \rangle = B_s u_m^2 U_{rb} \left(\frac{1}{2} + \cos^2 \theta \right) \quad (4.133)$$

$$\langle iscb \rangle = 4B_s u_m^3 u_{rb} (u_3)^* \quad (4.134)$$

- Términos debido a la influencia de la pendiente:

$$\langle islb \rangle = B_b u_m^3 (u_3)^* \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \quad (4.135)$$

$$\langle islb \rangle = B_s \varepsilon_s u_m^5 (u_5)^* \frac{\tan \beta}{W_f} \quad (4.136)$$

Donde:

$$B_b = \frac{\rho C_f \varepsilon_b}{\tan \phi} \quad (4.137)$$

$$B_s = \frac{\rho C_f \varepsilon_s}{W_f} \quad (4.138)$$

$C_f = 0.5f_w$ (f_w es calculado a partir de la formulación de Swart (1974)), $\tan\beta$ es la pendiente local, ϕ es el ángulo de rozamiento interno de la arena y W_f es la velocidad de caída del sedimento obtenida a partir de la formulación de Ahrens (2000).

$$W_f = \frac{C_1 \Delta g d^2}{\nu} + C_t \sqrt{\Delta g d} \quad (4.139)$$

Siendo $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ es la densidad de la partícula de sedimentos de diámetro d , ρ es la viscosidad del agua. Los coeficientes C_1 y C_t pueden ser obtenidos mediante:

$$C_1 = 0.055 \tanh[12A^{-0.59} \exp(-0.0004A)] \quad (4.140)$$

$$C_t = 1.06 \tanh[0.016A^{0.50} \exp(-120/A)] \quad (4.141)$$

Donde A es un índice de boyancia definido como:

$$A = \frac{\Delta g d^3}{\nu^2} \quad (4.142)$$

La viscosidad del agua ν puede ser estimada según Ahrens (2000) para arenas de cuarzo en función de la temperatura del fluido como:

$$\nu(m^2/s) = 10^{-2}(C_0 + C_1 T + C_2 T^2) \quad (4.143)$$

Donde

T : es la temperatura en grados Celsius.

C_0 : es 0.0182 (agua salada) o 0.0178 (agua dulce).

$C_1 = -0.000529$

$C_2 = 0.0000069$

Los factores de eficiencia ε_b y ε_s son parámetros del transporte por fondo y suspensión respectivamente. Los valores de $\varepsilon_b = 0.1$ y $\varepsilon_s = 0.02$ propuestos por Bailard (1982) luego de la calibración mediante datos de campo tomados en Torrey Pines Beach en Noviembre de 1978 han sido utilizados por Stive (1986), Nairn & Southgate (1993) y Soulsby (1997). El mismo Bailard (1985) propone utilizar los valores de $\varepsilon_b = 0.13$ y $\varepsilon_s = 0.032$. Estos últimos valores son los que se adoptan en el presente modelo.

El transporte volumétrico de sólidos q puede ser relacionado con el peso sumergido obtenido anteriormente mediante:

$$q = \frac{\langle i_{cs} \rangle}{(\rho_s - \rho)g} \quad (4.144)$$

Donde falta por estimar los momentos de velocidad para definir totalmente el módulo, los términos $(u_3)^*$ y $(u_5)^*$ son los momentos centrales adimensionalizados con la velocidad orbital u_m . Según recomendaciones de Stive (1986) y Guza & Thornton (1985) se sugieren los siguientes los valores 0.5 y 1.5 respectivamente. Mientras que la velocidad orbital puede ser aproximada mediante teoría lineal (Ecuación 4.116).

Para oleaje irregular, Soulsby (1997) propone utilizar los parámetros representativos período *peak* y altura de ola cuadrática media H_{rms} .

4.7.2 APROXIMACIÓN DE KURIYAMA (2012)

El siguiente apartado muestra las expresiones presentadas por Kuriyama (2012) para el cálculo del transporte de sedimento a lo largo del perfil. La tasa total puede ser obtenida sumando todas las componentes descritas a continuación:

- q_s , transporte en suspensión.
- $q_{b,v}$, transporte debido a la velocidad orbital del oleaje.
- $q_{b,a}$, transporte debido a la asimetría del oleaje.
- $q_{b,slope}$, transporte debido a la pendiente del fondo.

El transporte en suspensión es estimado considerando que éste es proporcional a la tasa de disipación del *roller* de superficie, esta expresión (Ecuación 4.145) es desarrollada por Kobayashi et al. (2008).

$$q_s = \alpha_1 \frac{D_r}{\rho g (s - 1) W_f} U \quad (4.145)$$

Donde s es la gravedad específica del sedimento, W_f es la velocidad de caída del grano y U es la corriente de *undertow*.

El transporte debido a la amplitud horizontal de la velocidad orbital de oleaje, siguiendo modelo propuesto por Bailard (1981) se obtiene mediante:

$$q_{b,v} = -\alpha_2 S_u u_{b,rms}^3 \cos(\theta) \quad (4.146)$$

Hoefel & Elgar (2003) proponen que el transporte debido a la asimetría de la aceleración en las inmediaciones del fondo $q_{b,a}$ es:

$$q_{b,a} = -\alpha_3 \left(S_a a_{b,rms} - \frac{a_{cr} |S_a|}{S_a} \right) \cos(\theta) \quad \text{si } |S_a a_{b,rms}| > a_{cr}$$

$$q_{b,a} = 0 \quad \text{si} \quad |S_a a_{b,rms}| \leq a_{cr} \quad (4.147)$$

La variable $a_{b,rms}$ es la amplitud de la aceleración cercana al fondo, mientras que a_{cr} es un valor umbral recomendado por Kuriyama (2012) igual a 0.2 m/s^2 .

Por último la componente de transporte debido a la pendiente del perfil, también es tomada de Bailard (1981).

$$q_{b,slope} = \alpha_4 \frac{\tan\beta}{\tan\phi} u_{b,rms}^3 \quad (4.148)$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interno del sedimento, que para arena media corresponde a 30° como valor característico.

Para calcular las expresiones anteriores es necesario estimar los valores de asimetría de la velocidad (S_u) y aceleración orbital (S_a), para este modelo se emplean las aproximaciones propuestas por Kuriyama (2009), basado en los hallazgos de Goda (1983), Kuriyama (1991) y Doering & Bowen (1995).

$$S_u = 0.83\Pi_{1/3} \quad \text{si} \quad \Pi_{1/3} < 0.15$$

$$S_u = \left[0.5 + 0.39 \ln \left(\frac{3\pi}{4} \Pi_{1/3} \right) \right] \cos \left\{ \left[-90 + 90 \tanh \left(0.73 \frac{4}{3\pi \Pi_{1/3}} \right) \right] \frac{\pi}{180} \right\} \quad 0.15 \leq \Pi_{1/3} \quad (4.149)$$

$$S_a = \left[-0.67 - 0.24 \ln \left(\frac{3\pi}{4} \Pi_{1/3} \right) \right] \sin \left\{ \left[-90 + 90 \tanh \left(0.73 \frac{4}{3\pi \Pi_{1/3}} \right) \right] \frac{\pi}{180} \right\} \quad (4.150)$$

Donde $\Pi_{1/3}$ es el parámetro de no linealidad propuesto por Goda (1983).

$$\Pi_{1/3} = \frac{H_{1/3}}{L_{1/3}} \coth^3 \frac{2\pi h}{L_{1/3}} \quad (4.151)$$

Donde $L_{1/3}$ es la longitud de onda asociada al período significativo.

4.8 MÓDULO DE TRANSPORTE EN LA ZONA DE ASCENSO-DESCENSO

La modificación del perfil es fuertemente influenciada por el transporte en la zona de ascenso-descenso (*swash zone*). Por lo tanto, es importante modelar de manera adecuada el transporte y por consiguiente el retroceso de la línea de costa.

La tasa neta de transporte en la cara de la playa emergida es principalmente una función de la pendiente local, las características del sedimento y las propiedades de la lámina de agua que asciende y desciende sobre el talud. El modelo Petra perteneciente al sistema de modelado costero SMC de la Universidad de Cantabria, propone la utilización de la

formulación de Wise et al. (1996), la cual plantea una forma teórica pre-establecida que asegura el buen comportamiento del modelo en esta zona del perfil.

$$q = q_s \left(\frac{x - x_R}{x_s - x_R} \right)^{3/2} \cdot \frac{\tan \beta_l}{\tan \beta_0} \quad (4.152)$$

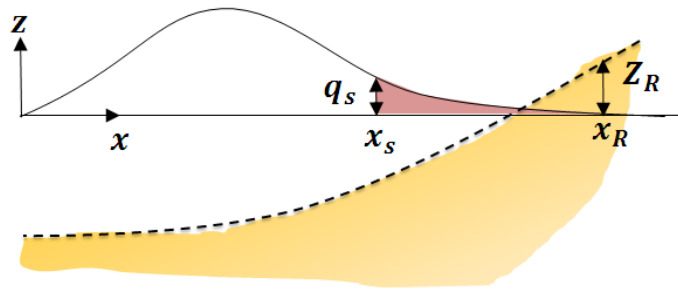


Figura 4.9: Esquema aplicación del transporte en la zona de lavado.
(Fuente: Elaboración propia)

Donde,

$\tan \beta_l$: es la pendiente local (siempre mayor que cero)

$\tan \beta_0$: es la pendiente media representativa del talud de playa.

Para aplicar esta formulación se debe estimar el Run-Up, el cual se define como la distancia vertical entre un plano de referencia (nivel medio del mar) a la máxima cota alcanzada por el oleaje al ascender sobre el talud de la playa. Para su cálculo se ha empleado la Ecuación 4.153 descrita a continuación.

$$Z_R = 1.47 H_{rmso} \left(\frac{\tan \beta_0}{\sqrt{H_{rmso}/L_0}} \right)^{0.79} \quad (4.153)$$

Donde H_{rmso} es la altura de ola cuadrática media y L_0 es la longitud de onda correspondiente al período *peak*, ambas en indefinidas.

4.9 MÓDULO DE EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA

Para cuantificar la variación del fondo en el tiempo producto del transporte, se emplea la ecuación de conservación del sedimento, la cual propone que los cambios del lecho en el tiempo son proporcionales a las variaciones del transporte de sedimentos en el espacio. Un esquema de la derivación de ecuación de conservación (Ecuación 4.147) es mostrado en la Figura 4.10 la cual fue tomada de Komar (1998).

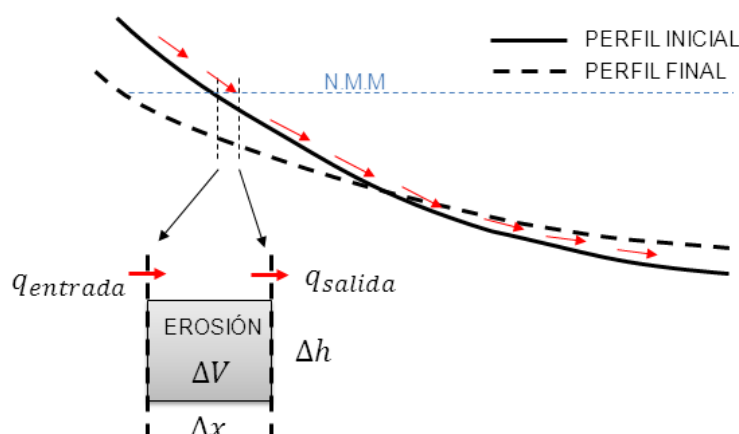


Figura 4.10: Esquema derivación ecuación de conservación del sedimento.
(Fuente: Komar (1998))

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (4.154)$$

En la ecuación 4.147 z es la cota desde el nivel de referencia, n es la porosidad del fondo, y q es el transporte de sedimento expresado en términos volumétricos.

La resolución de la ecuación de balance es un paso clave en la predicción del nivel medio y por ello deben ser minimizados los errores numéricos. La estabilidad de la ecuación debe ser asegurada tomando incrementos de h suficientemente pequeños de modo que se cumpla con el criterio de Courant.

Para minimizar los errores numéricos se han tomado dos esquemas de resolución candidatos para la ecuación 4.154. El primero se trata del esquema Lax-Wendroff (1960), el error estimado a partir del transporte de sedimentos es de segundo orden en el tiempo y el espacio, según muestra la ecuación 4.155.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial q}{\partial x} = O(\Delta x^2, \Delta t^2) \quad (4.155)$$

Cabe destacar que el esquema de Lax-Wendroff es ampliamente utilizado en modelos de evolución del fondo.

El segundo esquema seleccionado, es más reciente y eficiente. Fue desarrollado por Long et al. (2008) y es denominado WENO (Weighted Essentially Non Oscillatory). La precisión en el tiempo y el espacio se muestra en la Ecuación 4.156.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial q}{\partial x} = O(\Delta x^5, \Delta t) \quad (4.156)$$

Nótese que la eficiencia del esquema WENO radica en que este no debe recalcular la hidrodinámica, lo que supone un ahorro en tiempo y recursos de memoria.

5. VALIDACIÓN DE LOS MÓDULOS MEDIANTE DATOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO.

Para validar un modelo numérico es práctica usual comparar los resultados de la simulación matemática con mediciones obtenidas en escenarios ideales y/o reales, los cuales generalmente son provistos por ensayos de laboratorio físico y/o publicaciones científicas, además de mediciones en terreno. En el caso particular del modelo propuesto en este trabajo, se contó con tres fuentes principales de información. La primera correspondió a un set robusto de ensayos de modelos físicos que permitieron validar el módulo de oleaje paramétrico. Estos datos corresponden a mediciones de altura de ola a lo largo del perfil para ensayos con y sin barra en un canal de oleaje 2D.

La segunda correspondió a información de campo obtenida desde el proyecto de investigación SandyDuck (1997), que permitió validar el módulo de oleaje espectral.

La tercera base de datos correspondió a resultados de ensayos de laboratorio obtenidos desde publicaciones científicas de otros modelos numéricos y permitió validar el módulo de corrientes y cálculo de set-up del oleaje. Cabe destacar que este tercer set de datos es para un número de ensayos limitados, pero sin embargo, permitió comprobar el funcionamiento de las dinámicas recientemente mencionadas.

A continuación se detalla cada uno de los procedimientos de validación realizados.

5.1 VALIDACIÓN MÓDULOS DE OLEAJE PARAMÉTRICOS

Los datos disponibles para la comparación se separaron en dos grandes grupos; un set de datos de laboratorio obtenidos para perfil con y sin barra para distintas alturas y períodos además de variaciones de marea, los cuales se detallan en la Tabla 5.1. La información fue provista por Baird & Associates S.A.

La información contenida en la Tabla 5.1 muestra las características de los 13 casos, empleados para las comparaciones de las 13 aproximaciones de disipación por rotura paramétricas.

Tabla 5.1: Casos validación módulo de olas

Casos	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
WL (m, NRS)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	1.23	1.23	1.23	1.23
H (m)	1.00	2.33	1.00	3.95	2.00	1.00	2.00	2.61	2.00	2.00	2.33	2.00	3.95
T (s)	10	10	16	16	10	13	13	13	16	10	10	16	16

(Fuente: Elaboración propia)

Para efectos de la comparación solo se considera la altura de ola significativa, debido a que a través de ésta se puede evaluar si la tasa de disipación es la adecuada, si el criterio de rotura está prediciendo correctamente dónde la ola rompe y además si la profundidad corregida mediante las variaciones del nivel medio contribuyen a la obtención de un buen resultado en la comparación del oleaje. Además se puede verificar si el esquema numérico propuesto es adecuado.

Los resultados se presentan considerando una primera comparación de la evaluación de las ecuaciones con los valores recomendados por los autores originales (coeficientes sin calibrar), y si es necesario para lograr un buen ajuste, mediante el análisis de error presentado más adelante, se modifican de acuerdo a los valores propuestos en este documento (coeficientes calibrados).

En la Tabla 5.2 se presenta de manera resumida los coeficientes empleados tanto en la versión sin calibrar como en la calibrada.

Tabla 5.2: Coeficientes empleados en la validación de los modelos de disipación.

Modelo	Valor por defecto		Valor mejor ajuste	
	α	γ	α	γ
BJ78	1.00	0.78	1.40	0.70
BS85	1.00	-	-	-
SN93	1.00	-	-	-
	B	γ	B	γ
TG83Ex1	1.00	0.60	1.00	0.50
TG83Ex2	1.00	0.60	1.00	0.50
WH88	1.00	0.34	1.00	0.42
	Cb	Cbr	Cb	Cbr
YK12	0.70	0.75	1.10	1.20

Modelo	Valor por defecto				Valor mejor ajuste			
	K1	K2	K3	$\Gamma(K2)$	K1	K2	K3	$\Gamma(K2)$
RS98	0.10	1.60	0.10	-	0.20	1.50	0.10	-
RK03	0.12	-	-	0.42	-	-	-	-
TM04	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	K5	K6	K7	B	K5	K6	K7
BHV98	1.00	-	-	-	-	-	-	-
RWS03	1.00	0.14	0.86	0.33	-	-	-	-
JB07	1.00	-	-	-	-	-	-	-

(Fuente: Elaboración propia)

A continuación se presentan un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos numéricos realizados, evaluando cualitativamente cada aproximación haciendo énfasis en las deficiencias y bondades. Se han presentados algunas comparaciones en gráficos, para ilustrar los comentarios realizados. En cada gráfico se presenta en la derecha un eje que muestra el perfil de playa en color gris, la línea negra sólida muestra la altura significativa del modelo en estudio y los puntos rojos corresponden a los datos medidos.

El detalle de las comparaciones de todos los casos para cada aproximación con y sin calibración, son presentados en el Anexo A.

5.1.1 APROXIMACIONES BASADAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH TRUNCADA

De las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación BJ78, con los parámetros de calibración recomendados por los autores. Se observa que la simulación tiende a sobrestimar la altura de ola en las cercanías de la rotura donde el *shoaling* es más importante hasta la zona de ascenso y descenso, mientras que la posición de la rotura esta levemente desplazada hacia la playa (Figura 5.1 (2)). Las diferencias más significativas ocurren para las mayores alturas de ola (Figura 5.1 (1)).

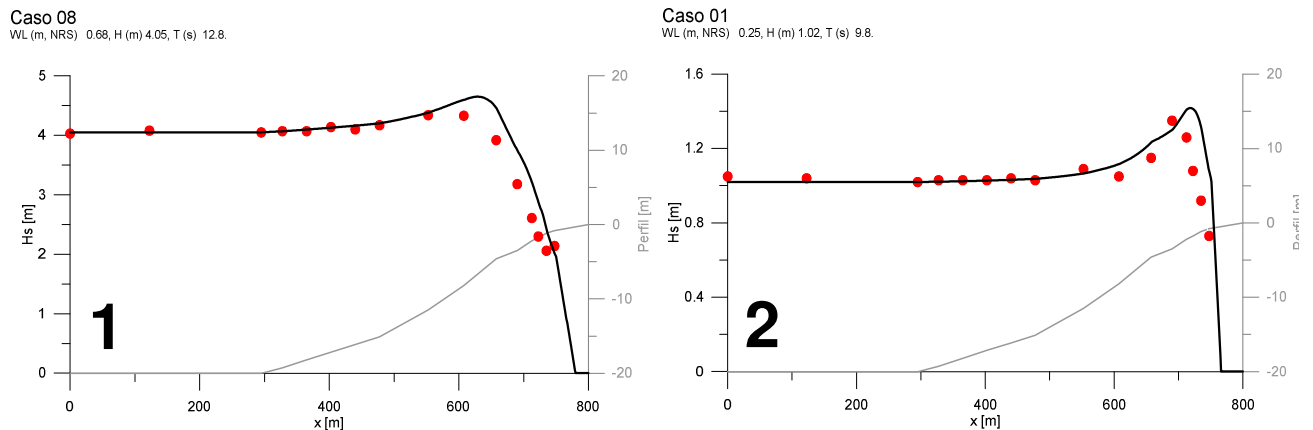


Figura 5.1: Resultados comparación perfil sin barra con BJ78, sin calibrar.
(Fuente: Elaboración propia)

Estos resultados fueron indicadores de la necesidad de variar α para regular la altura de ola y γ para relocalizar la rotura.

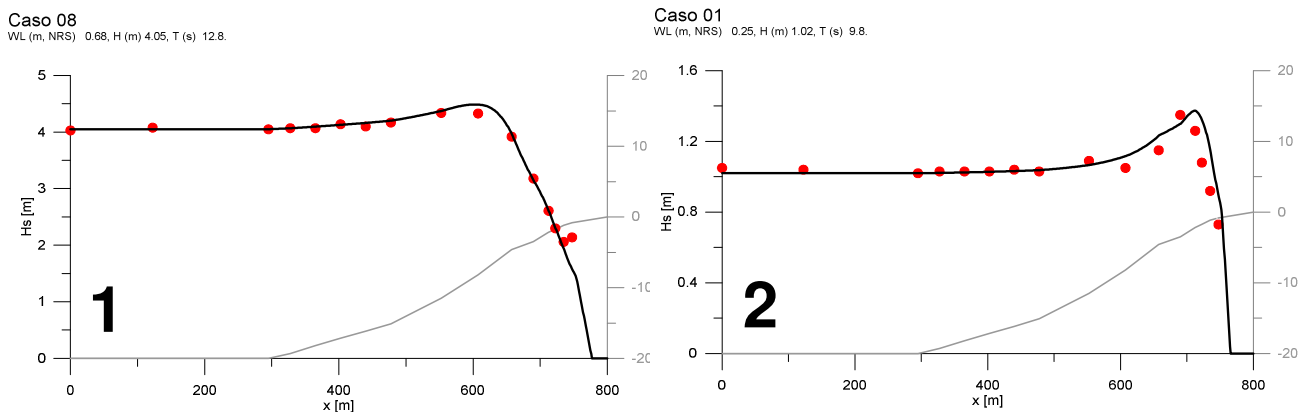


Figura 5.2: Resultados comparación perfil sin barra con BJ78, calibrado.
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 5.2 muestra los casos considerados anteriormente con los parámetros de calibración que ofrecieron los mejores resultados. En general para todos los casos disponibles tanto la disipación como la posición de la rotura es adecuada y representa correctamente el oleaje para el perfil estudiado.

En función de estos resultados, se puede advertir que el modelo de BJ78 es capaz de reproducir de manera adecuada las características de la altura de ola a lo largo del perfil de playa libre, si es que se realizan ajustes de sus coeficientes principales.

La Figura 5.3 muestra las comparaciones para el perfil de playa con presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación BJ78 con los parámetros de calibración que ofrecieron los mejores resultados para el perfil sin barra.

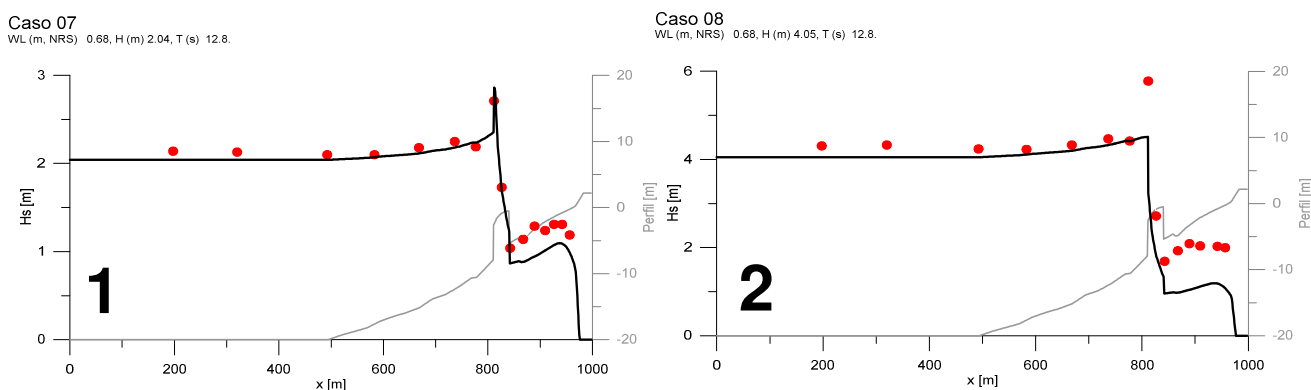


Figura 5.3: Resultados comparación perfil con barra con BJ78, calibrado.
(Fuente: Elaboración propia)

En general para todos los casos la altura de ola es subestimada después de la barra, por otra parte las alturas más grandes también existe una subestimación de la altura antes de la barra, esto se debe a que parte de la energía de la ola que siente la barra es reflejada incrementando la agitación debido a la presencia de oleaje de características estacionarias y BJ78 no es capaz de considerar este efecto. Los resultados son esperables ya que la aproximación de disipación BJ78, asume que todas las olas mayores que la altura máxima están rotas y no tienen la capacidad de reformarse, luego la barra obliga a una gran parte de todas las olas a romper y ninguna de estas será capaz de reformarse, ni aumentar las condiciones de agitación después de ella. Este tipo de modelos en presencia de barras, tan importantes como el perfil en estudio, no son adecuados para representar el oleaje aún cuando estos sean debidamente calibrados.

Para el esquema de disipación BS85 los resultados muestran que es innecesario variar los coeficientes de calibración recomendados por los autores. Se debe destacar que la única variación que esta aproximación propone respecto de BJ78 es una función para la estimación del parámetro γ en la rotura. Luego es de notar que para este caso es más importante predecir donde ocurrirá la rotura que el valor de la tasa de disipación y su constante de proporcionalidad.

La Figura 5.4 (1) muestra un ejemplo de los casos considerados, donde en general la correspondencia entre los datos modelados y medidos es adecuada sin calibrar, lo que implica que este esquema podría ser más confiable que BJ78, esto se debería a la mejor representación del coeficiente o índice de rotura, dejando en evidencia que asumir que γ es constante, no es adecuado en este tipo de esquemas

La Figura 5.4 (2) muestra un ejemplo de los casos considerados, en donde en general las comparaciones para el perfil de playa con presencia de barra, muestran que los resultados son similares a los obtenidos con el modelo BJ78; para el mismo tipo de perfil y las razones de su baja similitud con los datos de laboratorio son las mismas señaladas anteriormente.

Nótese que si bien en un perfil sin presencia de barra, el modelo BS85 presenta mejores resultados que BJ78, para el caso con barra ambos tienen un comportamiento distante de las mediciones, esto se podría deber a que ninguno de los dos modelos está formulado para representar el proceso de regeneración de la altura de ola, luego de alcanzar la rotura por primera vez.

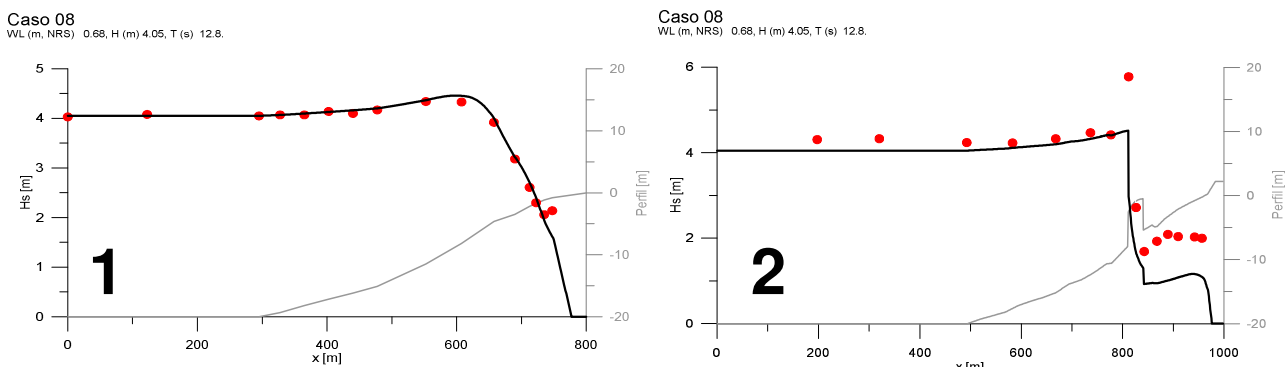


Figura 5.4: Resultados comparación perfil con y sin barra con BS85, sin calibrar.
(Fuente: Elaboración propia)

La aproximación de SN93 presenta resultados similares a BS85. Asimismo, los resultados obtenidos fueron considerados como satisfactorios, no siendo necesario un proceso de calibración.

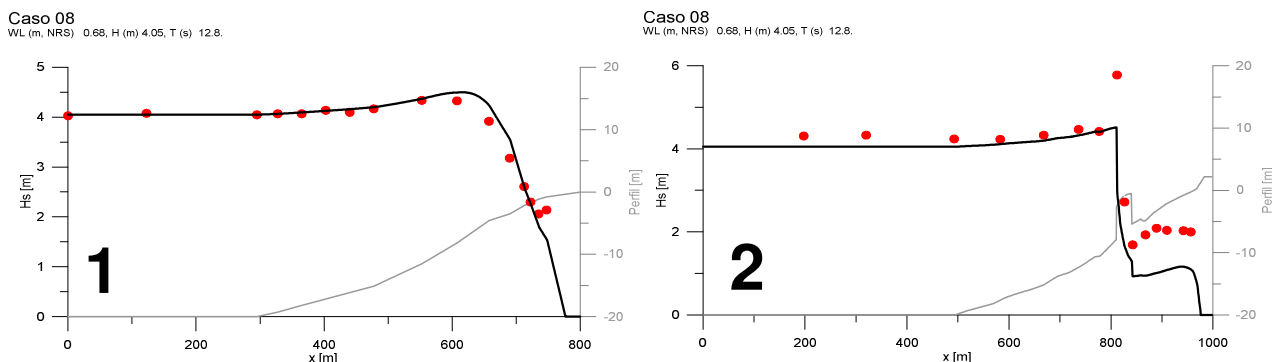


Figura 5.5: Resultados comparación perfil con y sin barra con SN93, sin calibrar.
(Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar que la única variación que este modelo propone respecto de los anteriores, es una función para el cálculo del parámetro γ en la estimación de la rotura, al igual que en el caso de BS85.

Nótese que la tasa de disipación también es levemente alterada en este esquema. Para las comparaciones se observó que la disipación es más rápida que las mediciones en algunos

casos, es decir, tiene un decaimiento más grande en menos distancia. Sin embargo, el modelo se comporta de mejor modo que la configuración recomendada por BJ78.

Las comparaciones para el perfil de playa con presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación SN93, con los parámetros de calibración recomendados por los autores del modelo, son muy parecidos a los obtenidos con los modelos BJ78 y BS85, y las razones podrían ser las mismas señaladas anteriormente. En general todos los esquemas pertenecientes a la familia de modelos de disipación Rayleigh truncada no representan bien el oleaje en presencia de barras para los casos estudiados, lo que podría deberse a que estos no son capaces de reformar el oleaje y no permiten que olas de período largo que cumplen con el criterio de umbral de altura máxima sin romper continúen propagándose.

En función de los resultados obtenidos se debe destacar que los modelos BS85 y SN93 son más robustos respecto de BJ78 debido a que se comportaron adecuadamente, sin necesidad de calibrarlos para la condición sin barra, y esto corresponde a una ventaja cuando no existen datos de campo o de laboratorio para revisar el funcionamiento de los modelos.

5.1.2 APROXIMACIONES BASADAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH COMPLETA

A continuación se comentan las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación TG83 Expresión 01, estas se realizaron con los parámetros de calibración recomendados por los autores, entregando resultados poco satisfactorios en algunos de los casos considerados.

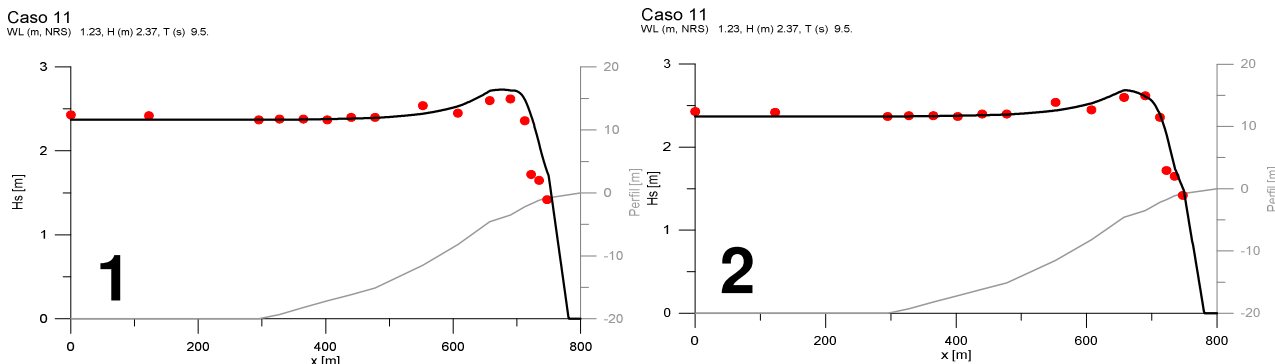


Figura 5.6: Resultados comparación perfil sin barra con TG83 Ex1, sin calibrar y calibrado.

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 5.6 muestra a modo de ejemplo la comparación entre el esquema calibrado (2) y el con los parámetros de calibración por defecto (1).

La ventaja de este modelo por sobre BJ78 es que no debe ser incluida la fracción de olas rotas en el cálculo de disipación. La distribución de éstas corresponde a la de probabilidad de Rayleigh completa, lo que permite que existan componentes de altura mayores que rompan en las proximidades de la línea de costa, esto puede ser apreciado ya que la mayor parte de los casos presentan una leve mejoría en los datos comparados en post-rotura.

Cabe destacar que en algunos de los ensayos numéricos realizados para este esquema de disipación, en este trabajo, no fue posible encontrar una combinación de coeficientes que regularan de mejor manera la disipación acelerada que se encontró para los casos 04, 08 y 13. Por lo cual, podría ser ésta una limitante del modelo TG83 cuando se resuelve con la Expresión01.

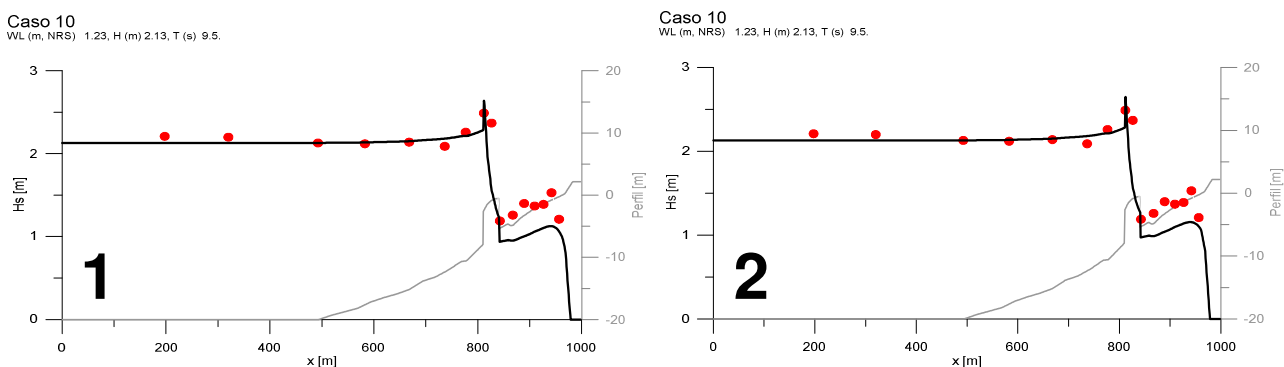


Figura 5.7: Resultados comparación perfil con barra para TG83 Ex1 y Ex2, calibrados.
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 5.7 muestra un ejemplo para un caso entre el esquema de disipación TG83 Expresión 01 y 02, para el perfil con barra con los parámetros de calibración que arrojaron las mejores correlaciones entre los datos medidos y simulados para el caso sin presencia de barra. Los resultados obtenidos muestran que el esquema no representa adecuadamente las alturas luego de la barra para las dos expresiones consideradas, presentando resultados similares entre ambas.

Cabe destacar que la inclusión de la función peso en la fracción de olas rotas en función de la altura, no mejora significativamente las condiciones de oleaje después de la barra. Este comportamiento es esperable y se justificaría debido a que aunque este modelo tiene en cuenta la rotura de las olas más grandes y también de las más pequeñas, tomando la distribución Rayleigh completa, el esquema no sería capaz de simular las condiciones del oleaje reformado luego de la barra.

A continuación se exponen los comentarios obtenidos de las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación WH88, con los parámetros de calibración recomendados por los autores del esquema. Para todos los casos comparados existe una tendencia a subestimar la altura de ola, respecto a la posición de la rotura, ésta se encuentra antes de las mediciones lo que genera una caída rápida de la energía. La pendiente de la altura de ola para la propagación post-rotura es levemente mayor a la de los datos medidos lo que indica una tasa exagerada de energía disipada por rotura, un ejemplo de este comportamiento se muestra en la Figura 5.8 (1).

Eventualmente ante estos resultados, se hace necesario efectuar una calibración de los coeficientes de la ecuación de disipación WH88, las mejoras pueden ser observadas en la Figura 5.8 (2).

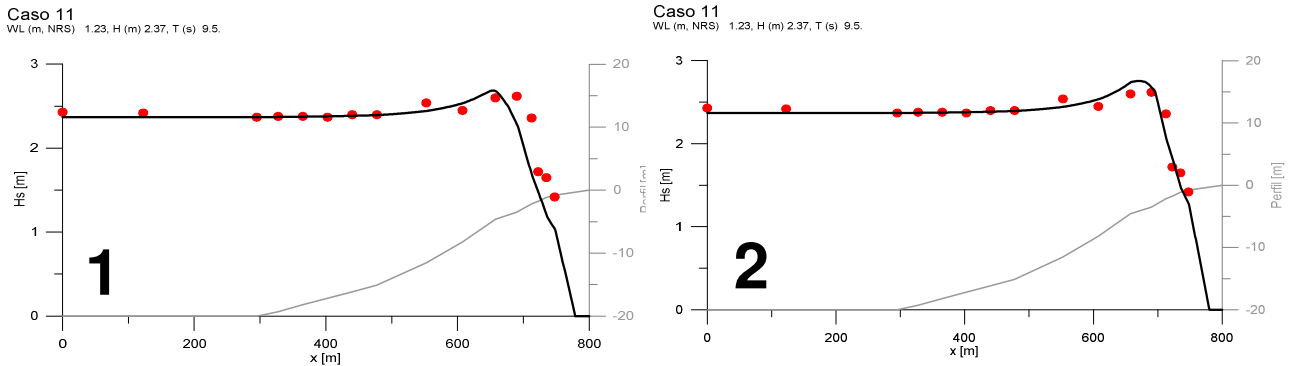


Figura 5.8: Resultados comparación perfil sin barra con WH88, sin calibrar y calibrado.
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa que el esquema de WH88 para las alturas grandes, la disipación continuó siendo demasiado rápida, lo que genera una subestimación de la altura de ola después de la rotura. La posición de la rotura es adecuada para algunos casos, salvo para las mayores alturas donde la calibración no mejoró la solución. Se debe destacar que a pesar de la modificación de los coeficientes para mejorar la simulación, los resultados continúan siendo deficientes en los casos 04, 08, 09 y 13.

Las comparaciones de los casos para el perfil de playa con presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación WH88, con los parámetros de calibración que arrojaron las mejores correlaciones entre los datos medidos y simulados para el caso sin presencia de barra, muestran que el esquema no representa adecuadamente las alturas luego de la barra.

El comportamiento obtenido es esperable y se justificaría debido a que éste modelo no es capaz de reformar las olas después de la rotura, lo que supone un aumento de la altura después de la barra. Cabe destacar que los resultados obtenidos son menos adecuados que los de TG83 en sus dos expresiones.

Un aspecto importante de este modelo es el que presenta los resultados más alejados de las mediciones en comparación de los ya evaluados.

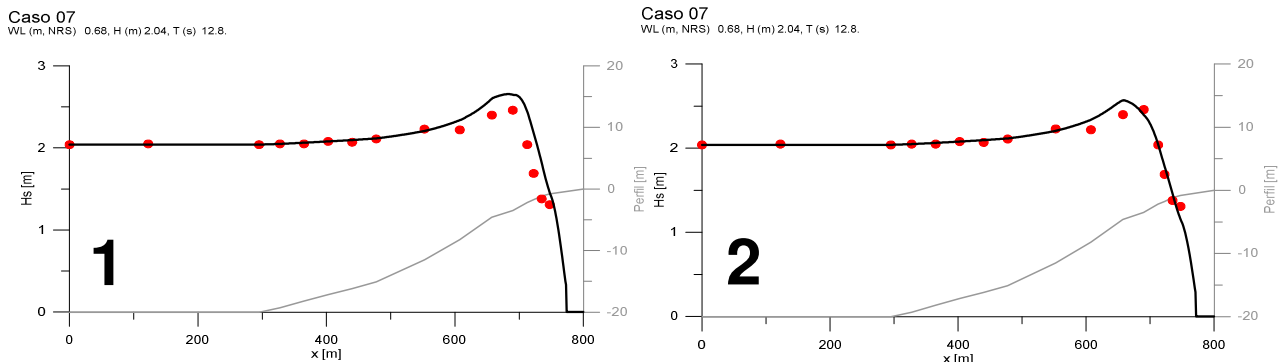


Figura 5.9: Resultados comparación perfil sin barra con YK12, sin calibrar y calibrado.
(Fuente: Elaboración propia)

Las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación YK12, con los parámetros de calibración recomendados por los autores del modelo, presentan para todos los casos una tendencia a sobrestimar la altura de ola. Las mayores diferencias ocurren para las olas de mayor altura (casos 04, 08 y 13), en donde también se aprecia que la rotura está desplazada de las mediciones hacia profundidades más bajas (Figura 5.9). En todos los casos para las olas más pequeñas la posición de rotura es adecuada (casos 03, 07, 10 y 11).

Para mejorar estos aspectos se realizó un ajuste de los coeficientes de calibración, la correlación arrojó que las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra para las alturas grandes (casos 04, 08 y 13), la disipación es rápida lo que genera una subestimación de la altura de ola después de la rotura. La posición de la rotura es adecuada para todos los casos, y en general el modelo representa correctamente la transformación del oleaje a lo largo del perfil.

En cuanto al perfil con presencia de barra, se observó que el modelo representa adecuadamente las alturas luego de la barra, un ejemplo se muestra en la Figura 5.10 (1), sin embargo, para algunos casos se tiende a sobrestimarlas (Figura 5.10 (2)), A pesar de esto desde un punto de vista de la aplicación a la ingeniería esta condición representa un escenario conservador. Nótese que de la familia de modelos evaluados cuya distribución de alturas en rotura corresponde a Rayleigh completa, éste es el único capaz de capturar los efectos de la variación del oleaje post-barra de manera aceptable. Estos buenos resultados puede deberse a la expresión empleada para el criterio de rotura y la integración numérica y local de la tasa de disipación. Finalmente se advierte que antes del rompeolas se aprecia una subestimación del oleaje, lo que podría ser debido a que no se está considerando condiciones estacionarias producto de la reflexión inducida por la barra.

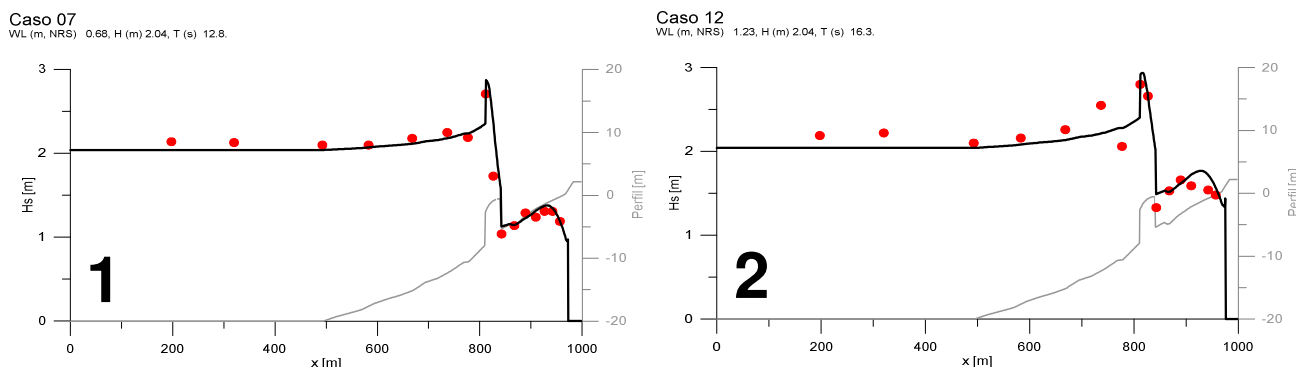


Figura 5.10: Resultados comparación perfil con barra con YK12, calibrado.
(Fuente: Elaboración propia)

5.1.3 APROXIMACIONES DE ENERGÍA LÍMITE

De las comparaciones para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación RS98, con los parámetros de calibración recomendados por los autores del modelo, para todos los casos existe una tendencia a sobrestimar la altura de ola. Las mayores diferencias ocurren para las olas de gran altura, en donde también se aprecia que la rotura está desplazada de las mediciones hacia profundidades más bajas. En todos los casos para las olas más pequeñas la posición de rotura es adecuada.

A modo de mejorar los resultados obtenidos, se realizó la calibración de los coeficientes de ajuste dentro de la formulación de RS98. Los parámetros que arrojaron las mejores correlaciones entre los datos medidos y simulados presentan para las alturas grandes que la posición de la disipación está muy retardada y por tanto el modelo permite más *shoaling* que el obtenido de los datos de laboratorio, lo que se traduce en una sobrestimación de la altura de ola en la zona de rompiente, sin embargo, ésta situación se puede considerar como conservadora. Además, la disipación post-rotura es demasiado rápida en comparación a los datos de laboratorio, lo que genera una subestimación de la altura de ola después de la rotura, ejemplos de estos comportamientos pueden ser observados en la Figura 5.11 donde se comparan el esquema sin calibrar (1) y calibrado (2).

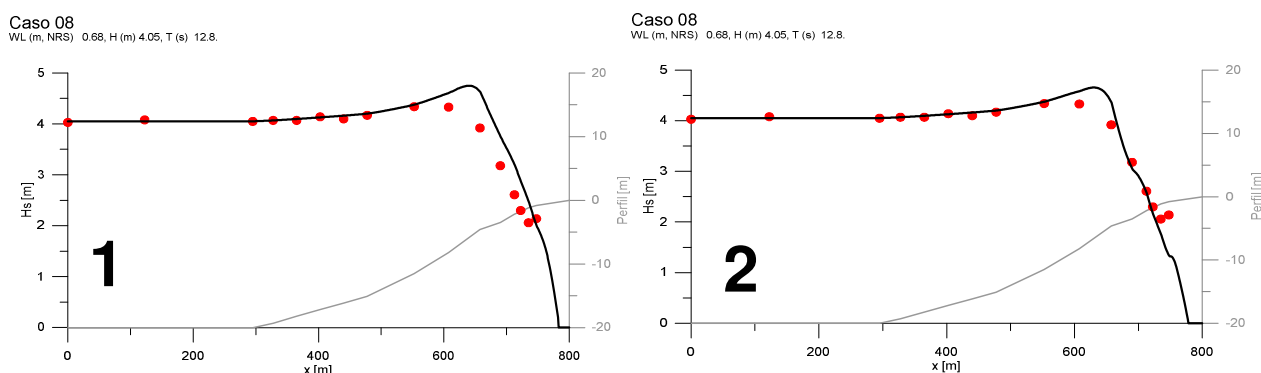


Figura 5.11: Resultados comparación perfil sin barra con RS98, sin calibrar y calibrado.

(Fuente: Elaboración propia)

Con los parámetros de calibración que arrojaron las mejores correlaciones entre los datos medidos y simulados para el caso sin presencia de barra, se procedió a simular los casos para perfil con barra, en donde se observó que el esquema representa adecuadamente las alturas de ola luego de la barra y en general tiende a subestimarlas levemente. Los resultados obedecerían a las características del esquema de disipación, el cual permite la reformación de las olas luego de romper sobre la barra. Un ejemplo de la bondad de los resultados se muestra en la Figura 5.12.

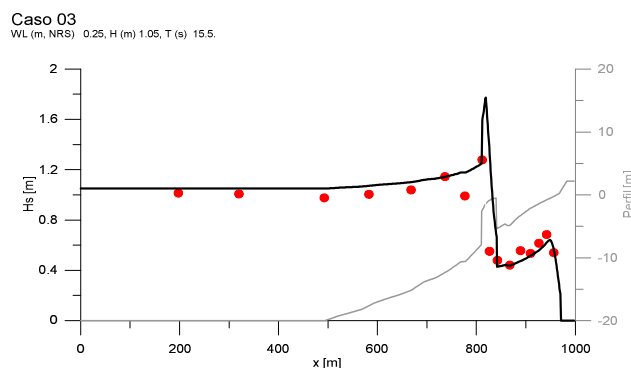


Figura 5.12: Resultados comparación perfil con barra con RS98, calibrado.

(Fuente: Elaboración propia)

Del esquema de disipación RK03 con los parámetros de calibración recomendados por los autores del modelo. Se observa que para todos los casos la altura de ola es ligeramente sobrestimada, sin embargo, se han conservado los resultados sin calibrar debido a que las diferencias no se consideran significativas.

Se aprecia que la posición de la rotura es en general adecuada para todos los casos en estudio, así como también la disipación de energía.

Las comparaciones para el perfil de playa con presencia de barra se realizan considerando los parámetros de calibración recomendados por los autores de la aproximación.

Se observa que el modelo representa adecuadamente las alturas luego de la barra. Nótese que el desempeño de la correlación entre los datos medidos y simulados, está relacionada con la familia de disipación, la cual corresponde a energía límite, que permite reformar el oleaje luego de la rotura sobre la barra. Otra ventaja de este modelo es su simpleza, ya que permite establecer esquemas numéricos eficientes y fáciles de interpretar.

Para ilustrar el buen resultado de este esquema, a modo de ejemplo se ha graficado en la Figura 5.13 un caso con (1) y sin barra (2).

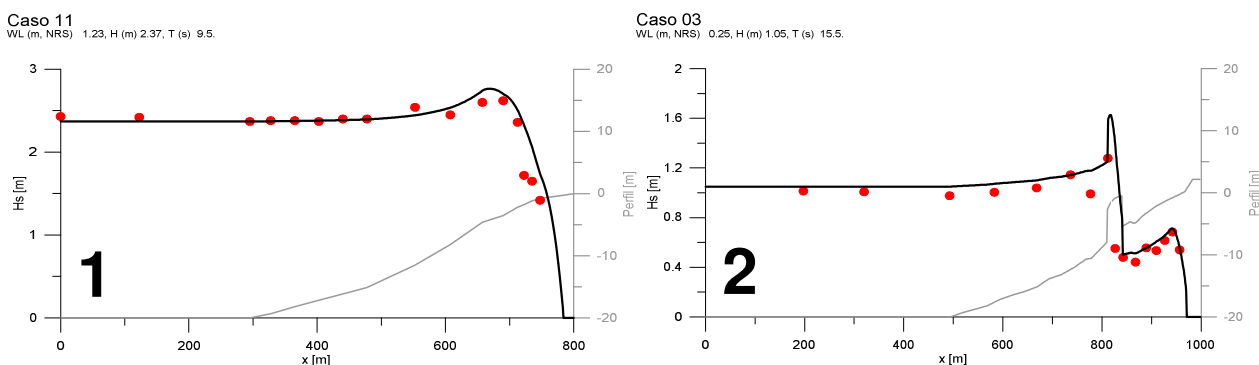


Figura 5.13: Resultados comparación perfil con y sin barra con RK03, sin calibrar.
(Fuente: Elaboración propia)

A continuación se resumen los resultados para el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación TM04. Nótese que este modelo no presenta parámetros de calibración, ya que propone para todas las constantes de proporcionalidad expresiones dependientes de las condiciones del medio y las condiciones de oleaje.

En general para todos los casos analizados el esquema presenta una adecuada correspondencia entre los datos medidos y simulados. Se puede observar además, que para las alturas más grandes (casos 04, 08 y 13), la disipación para los datos simulados es levemente mayor que la que se aprecia en las mediciones. Por otro lado la posición de la rotura es adecuada para todos los casos.

Las comparaciones para el perfil de playa con presencia de barra, revelan que el esquema subestima la altura de ola luego de la barra, un ejemplo de este comportamiento puede observarse en la Figura 5.14. A pesar de que TM04 pertenece a la familia de esquemas de disipación de energía límite. Este esquema asume expresiones para la determinación de todos los coeficientes de calibración, lo cual es una importante iniciativa en el desarrollo de la representación macroscópica del oleaje en rotura, sin embargo, la física que se trata de

cuantificar es compleja, sobre todo cuando los perfiles son tan exigentes como el presentado en este estudio.

Esta incapacidad de calibración mediante ajustes de coeficientes, hacen que su aplicación sea limitada en perfiles de barra complejos, considerando los resultados obtenidos en este estudio.

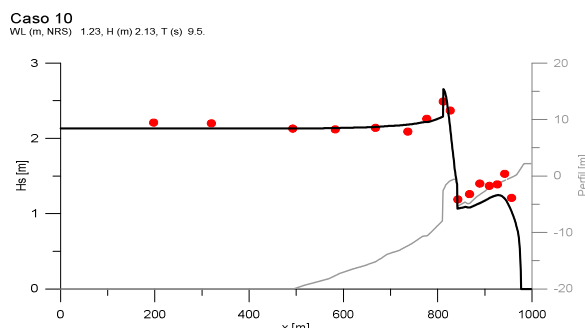


Figura 5.14: Resultados comparación perfil con barra con TM04, sin calibrar.
 (Fuente: Elaboración propia)

5.1.4 APROXIMACIONES BASADAS EN LA APLICACIÓN DE UNA FUNCIÓN DELTA DE DIRAC A LA DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH PARA OLEAJE NO SATURADO

Para las comparaciones del el perfil de playa sin presencia de barra, asumiendo el esquema de disipación BHV98 con los parámetros de calibración recomendados por los autores. Se concluye de todos los casos analizados, que la altura es predicha adecuadamente, excepto para algunos puntos donde existe una tendencia a subestimar la altura de ola. Nótese que en esta familia de modelos de disipación, generalmente se calibran mediante un solo parámetro, lo que implica que este es un modelo confiable en caso de no existir datos de comparación.

Para el perfil con presencia de barra, se apreció que el esquema no representa adecuadamente las alturas luego de la barra. En general las olas son subestimadas antes y después de la barra, los motivos podrían ser los mismos comentados anteriormente para el caso de los modelos basados en la distribución de Rayleigh, debido a que los resultados obtenidos no consideran la reflexión producto de la presencia de la barra.

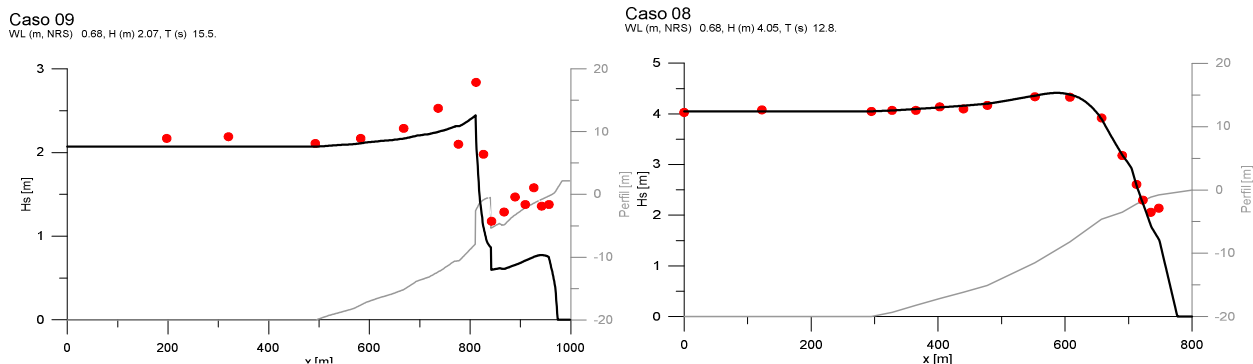


Figura 5.15: Resultados comparación perfil con y sin barra con BHV98, sin calibrar.
 (Fuente: Elaboración propia)

De las comparaciones efectuadas con el esquema de disipación por rotura RWS03, se concluye que no se aprecian variaciones significativas entre los resultados de BHV98 y RWS03.

Finalmente, asumiendo el esquema de disipación JB07 con los parámetros de calibración recomendados por los autores. Se observa que para todos los casos estudiados la altura es predicha adecuadamente, al igual que para los modelos de disipación BHV98 y RWS03, sin variaciones significativas entre los modelos de la última familia estudiada, la cual simulan las variaciones de altura de ola para oleaje no saturado.

Cabe destacar que si bien los autores de este modelo son los mismos de BJ78, esta nueva aproximación no requeriría de calibración, constituyendo de este modo una mejora en las prestaciones de la aproximación a la rotura del oleaje.

En el caso del perfil con barra, se observa que el esquema no representa adecuadamente las alturas luego de la barra, al igual que los esquemas de disipación presentados anteriormente.

5.1.5 ANÁLISIS DEL ERROR

Para complementar el análisis cualitativo se procedió a cuantificar el error cometido en la estimación de la altura de ola de cada uno de los modelos presentados. Las diferencias se han relativizado para que éstas sean comparables entre los casos y tenga un mayor significado respecto del error total de las muestras. El detalle de los resultados obtenidos puede ser encontrado de manera tabulada en el Anexo B. En ellas se muestran los valores del error a lo largo del perfil, para cada caso y además se ha incluido el promedio en para cada uno de los sensores en las diversas posiciones a lo largo del canal y como resumen para cada caso.

A modo de ejemplo de las tabulaciones contenidas en el Anexo B se presenta en la Tabla 5.3 el detalle de las diferencias respecto de los datos de laboratorio, obtenidas en la aplicación del esquema BJ78 con los coeficientes propuestos por los autores originales. Con el propósito de resumir los errores en la simulación para todos los casos, en la columna de la derecha se presenta el promedio considerando todos los datos para cada una de las estaciones de medición, mientras que la última fila lo presenta para cada caso.

Tabla 5.3: Error relativo para el esquema de disipación BJ78, sin calibrar.

Caso	caso1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6	caso7	caso8	caso9	caso10	caso11	caso12	caso13		
WL (m)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	1.23	1.23	1.23	1.23		
H (m)	1.02	2.39	1.05	4.13	2.07	1.03	2.04	4.05	2.07	2.13	2.37	2.04	4.08		
T (s)	9.8	9.8	15.5	15.5	9.8	12.8	12.8	12.8	15.5	9.5	9.5	16.3	15.5		
Profundidad [m]	-20.0	2.9%	2.0%	1.0%	0.5%	2.8%	1.0%	0.0%	0.5%	1.4%	2.7%	2.5%	1.4%	0.2%	1.5%
	-20.0	1.9%	2.4%	0.0%	0.7%	2.8%	0.0%	0.5%	0.7%	1.0%	2.3%	2.1%	1.4%	0.7%	1.3%
	-20.0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	-19.3	0.8%	1.1%	1.4%	0.4%	0.8%	0.3%	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.2%	0.5%
	-18.2	0.5%	0.4%	0.2%	0.0%	0.1%	1.0%	0.5%	0.5%	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.0%	0.3%
	-17.2	0.2%	0.5%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.8%	0.3%	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%
	-16.2	0.7%	0.4%	0.5%	0.8%	0.0%	1.5%	1.1%	1.3%	0.4%	0.2%	0.6%	0.0%	0.5%	0.6%
	-15.1	0.5%	0.0%	0.0%	1.7%	0.4%	0.6%	0.1%	0.5%	2.0%	0.0%	0.1%	2.0%	1.1%	0.7%
	-11.5	1.8%	2.0%	2.7%	1.1%	2.1%	0.0%	0.5%	0.3%	0.7%	3.8%	3.5%	1.4%	2.8%	1.7%
	-8.2	5.3%	4.1%	9.4%	8.9%	4.7%	5.1%	4.1%	5.4%	10.1%	2.8%	2.7%	7.7%	7.7%	6.0%
	-4.6	4.4%	7.1%	8.0%	13.4%	6.0%	4.7%	5.5%	9.6%	7.2%	2.3%	3.2%	4.7%	9.0%	6.5%
	-3.5	0.8%	2.1%	0.7%	10.9%	4.8%	0.1%	7.0%	12.2%	10.4%	2.3%	3.7%	6.9%	14.5%	5.9%
	-2.2	9.2%	14.7%	12.3%	7.9%	9.1%	9.8%	22.6%	19.0%	21.7%	8.6%	9.1%	14.4%	17.8%	13.6%
	-1.8	29.3%	23.9%	11.2%	0.7%	31.3%	17.9%	35.9%	19.3%	29.9%	38.3%	38.7%	40.8%	31.2%	26.8%
	-1.2	33.3%	21.1%	72.6%	0.0%	20.9%	41.5%	42.0%	8.9%	49.3%	24.7%	26.5%	53.0%	19.9%	31.8%
-0.8	12.5%	0.4%	2.8%	18.1%	12.9%	33.6%	8.3%	0.5%	1.3%	26.2%	25.2%	26.0%	1.1%	13.0%	
	6.5%	5.1%	7.7%	4.1%	6.2%	7.3%	8.0%	4.9%	8.6%	7.2%	7.4%	10.0%	6.7%		

(Fuente: Elaboración propia)

Una revisión general de los errores presentados en el Anexo B, permite identificar puntos específicos en el perfil en donde la magnitud es significativamente mayor respecto del resto de los valores, sin embargo, estos no presentaron un comportamiento aleatorio ya que se concentraron preferentemente sobre la barra y en profundidades bajas.

Este comportamiento de los valores extremos de los errores relativos, podrían ser atribuibles a defectos en las mediciones o zonas donde la variabilidad del modelo es muy grande, debido a la alta complejidad de los procesos hidrodinámicos. Así el promedio como parámetro de resumen puede en algunos casos no ser el más representativo de la muestra, ya que produce un aumento excesivo del valor final del error.

Para cuantificar el error se emplea la mediana como parámetro de resumen, de modo de capturar las medidas centrales de la muestra sin ponderar de manera excesiva el valor máximo. De este modo se han agrupado los resultados en las familias de esquemas de disipación indicados anteriormente.

En la Figura 5.16 se muestran la mediana del error para cada uno de los modelos y casos analizados. Las gráficas se han elaborado agrupando los distintos niveles del mar y considerando el valor del peralte del oleaje (S_0 de acuerdo a la Ecuación 4.27) al inicio del perfil.

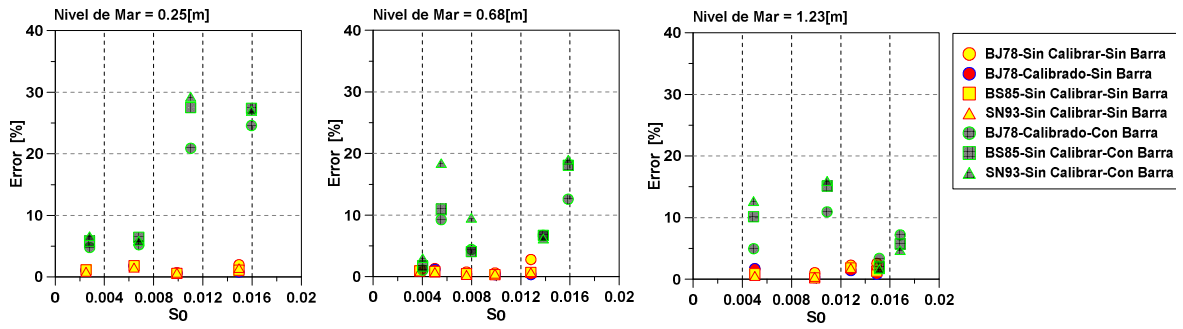
Del análisis de los resultados mostrados en la Figura 5.16 se puede establecer que respecto de los casos simulados sobre un perfil sin barra (símbolos amarillos con línea roja) los errores no superan el 5%, independiente del modelo de evolución del oleaje en post-rotura que se emplee. Complementariamente se pudo observar una disminución de la diferencia entre las mediciones y simulaciones, en los casos calibrados (símbolos azules con línea roja).

Se advierte que las diferencias más grandes para el perfil sin barra, se dan para los mayores peraltes del oleaje, condición que fue destacada previamente en el análisis cualitativo de las comparaciones de los modelos.

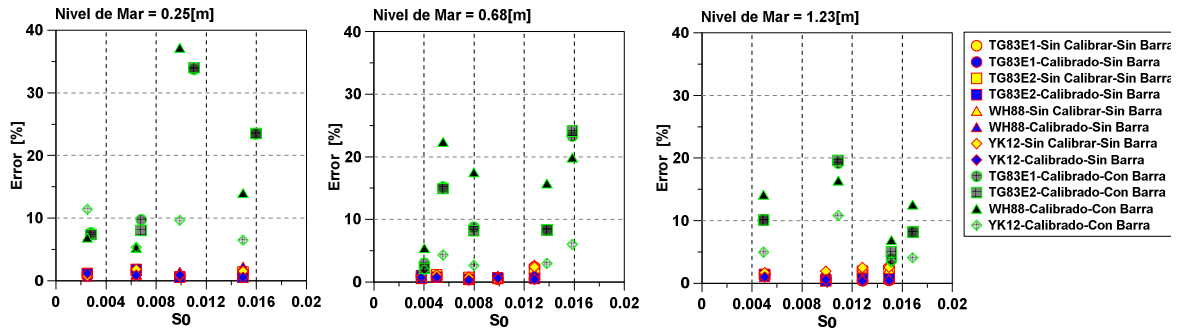
Para el caso de análisis considerando el perfil con presencia de barra (símbolos grises con línea verde), se obtuvieron los mayores errores, que en algunos casos alcanzaron magnitudes cercanas al 40% (WH88). Cabe destacar que en términos generales los modelos de energía límite (RS98, RK03 y TM04) son los que presentaron los mejores ajustes en comparación a los demás esquemas evaluados.

En el caso de los modelos de energía límite considerando el perfil con presencia de barra, se advierte que para niveles del mar de 0.68 y 1.23 [m] los errores encontrados son menores que el 10%, valor que puede ser considerado como adecuado para simular este tipo de condiciones. Sin embargo, para una carga de agua de 0.25 [m] la magnitud de las diferencias aumenta hasta un 25% en el peor de los escenarios.

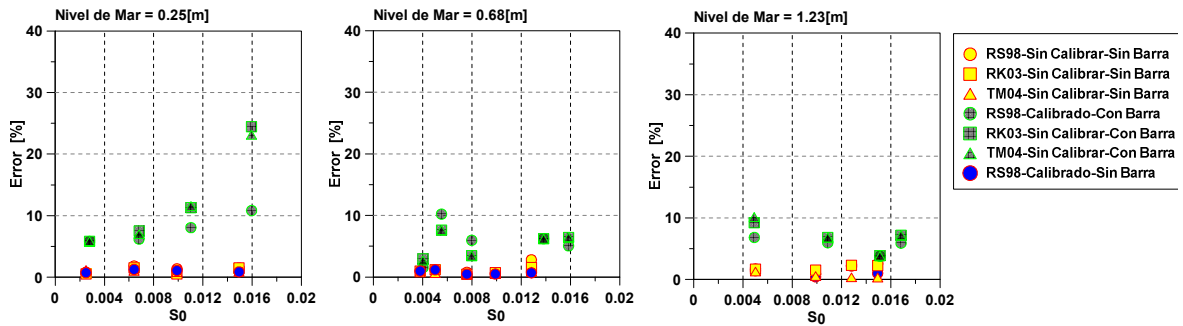
Cabe señalar que tanto para el caso del perfil sin barra como para el que si tiene la presencia de ésta, el nivel del mar más bajo (0.25 [m]) fue el que presentó las mayores magnitudes del error, esto podría deberse a que los instrumentos de medición no son capaces de registrar de manera adecuada en bajas cargas de agua y/o a que la dinámica de aguas someras es de una complejidad elevada y no es bien representada mediante los esquemas estudiados.



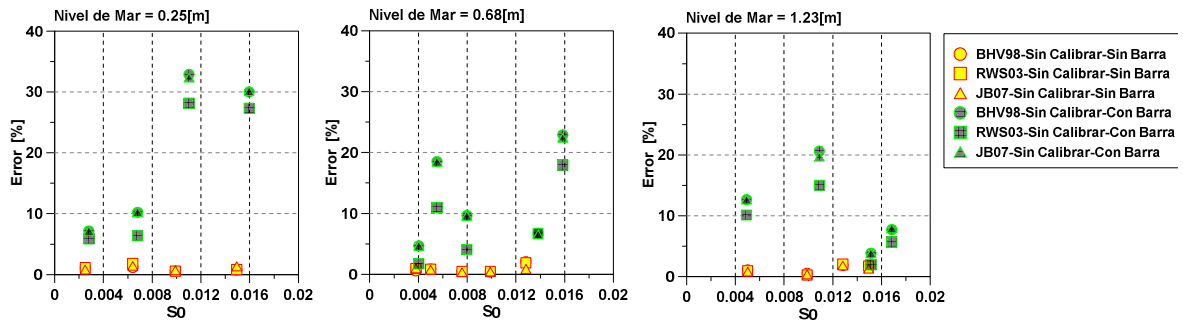
a) Modelos basados en la distribución de Rayleigh truncada.



b) Modelos basados en la distribución de Rayleigh completa.



c) Modelos de energía límite.



d) Modelos basados en la aplicación de la función Delta Dirac a la distribución Rayleigh para oleaje no saturado

Figura 5.16: Análisis del error para los esquemas revisados.
(Fuente: Elaboración propia)

Considerando los resultados anteriores desarrollados en el marco de la presente investigación y a juicio del autor, se realiza un resumen acerca de las capacidades que cada módulo presentó. Cabe señalar que la información entregada a continuación, es solo referencial y no descarta el uso de los modelos de disipación para todos los casos, sino más bien permite el uso informado considerando el comportamiento obtenido en las comparaciones anteriores.

Para efectuar este resumen se confeccionó la Tabla 5.3, en ella se observa una calificación cualitativa de cada modelo considerando el comportamiento de la tasa de disipación, la posición de la rotura y la necesidad de calibración, lo que en términos generales muestra la correspondencia entre los datos medidos y simulados. Se ha conservado la separación de los casos con y sin barras, debido a que algunas de las formulaciones presentaron comportamientos variables en función de las características del perfil.

Tabla 5.4: Resumen resultados módulos paramétricos de oleaje.

ESQUEMA DISIPACIÓN	COMPORTAMIENTO	
	PERFIL SIN BARRA	PERFIL CON BARRA
BJ78	● ●	●
BS85	● ● ●	●
SN93	● ● ●	●
TG83 Ex1	● ●	●
TG83 Ex2	● ● ●	●
WH88	●	●
YK12	● ●	● ●
RS98	● ●	● ●
RK03	● ● ●	● ● ●
TM04	● ● ●	●
BHV98	● ● ●	●
RWS03	● ● ●	●
JB07	● ● ●	●

● ● ● = COMPORTAMIENTO DESTACADO
 ● ● = ADECUADO
 ● = MENOS ADECUADO

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados muestran que los modelos obtenidos a partir del truncamiento de la distribución Rayleigh, como lo son BJ78, BS85 y SN93 no representaron de forma adecuada el oleaje después de la barra. Sin embargo, para el perfil sin barra tanto BS85 como SN93 muestran un excelente ajuste sin necesidad de calibración, lo que sugiere confiabilidad en el uso de este tipo de disipación para este perfil.

La disipación obtenida a partir de la distribución del oleaje en rotura modelado a partir de Rayleigh completa, muestra algunas incertezas en la correspondencia con los datos disponibles. En este grupo se destaca el modelo de Kuriyama (2012), este presenta buenos

resultados tanto en presencia de barras como en ausencia de estas, considerando la calibración más ventajosa para ambos perfiles de estudio.

La familia de módulos con estructura de disipación de energía límite, muestran ventajas para representar el oleaje en presencia de la barra para estas mediciones, destacándose el desempeño del esquema RK03, el cual si calibrar presenta una correspondencia destacada con las mediciones. Se ha mostrado que aunque existe dificultad teórica para extender este tipo de modelos a oleaje irregular, las configuraciones presentadas por los autores revisados en este estudio logran capturar en la mayoría de los casos la transformación, rotura y post rotura del oleaje. La característica más importante de estos esquemas de disipación es su capacidad de reformar el oleaje, lo cual significa una ventaja sobre los modelos de disipación del *bore*.

Los esquemas para oleaje no saturado entregan una buena correspondencia entre los datos medidos y simulados para el perfil sin barra estudiado, sin embargo, para el esquema con barra los resultados no poseen una representación adecuada al comparar los modelos con los datos de laboratorio.

La variabilidad de los resultados hace difícil la elección absoluta de un esquema de disipación específico. En adelante se considera según corresponda cada caso, el esquema de disipación adecuado para la representación del oleaje.

5.2 VALIDACIÓN MÓDULO DE OLEAJE ESPECTRAL

Para validar el módulo espectral de oleaje, se emplearon datos obtenidos del proyecto SandyDuck (1997), donde se midió en un perfil de playa real, sus cambios topobatimétricos y datos de presión a lo largo del transecto perpendicular a la playa, así se disponen de espectros no direccionales obtenidos a partir del análisis de Fourier aplicado a los datos levantados.

Para configurar la condición de borde del modelo numérico desarrollado, se consideró información proveniente desde un sensor del tipo ADCP que posee información espectral bidimensional del oleaje a una profundidad de 8 m, de manera simultánea a lo registrado por los sensores de presión comentados previamente. En la Figura 5.33 se ilustra un ejemplo para un estado de mar.

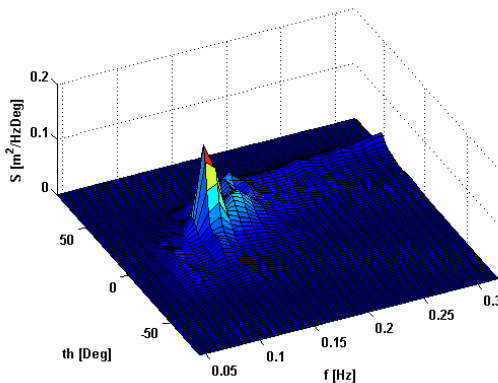


Figura 5.17: Ejemplo Espectro direccional de oleaje.
(Fuente: Elaboración propia)

Es importante destacar que al ser información de campo, los datos obtenidos escapan de las condiciones ideales impuestas en el laboratorio, por lo que la tolerancia de la correspondencia entre los datos medidos y simulados debe incrementarse, admitiendo mayores diferencias tanto en los valores como en su distribución. Es de notar que de las dos componentes de disipación en el dominio de las frecuencias, propuestas por Mase & Kirby (1992), solo se ha considerado en la modelación la proporcional a las componentes del espectro, depreciando la dependencia de la frecuencia. La consecuencia más importante de este supuesto en la disipación por rotura asociada al fondo es que la forma de espectro se mantiene a lo largo de la zona de *surf*.

Las Figuras 5.34 y 5.35 muestran un conjunto de gráficos donde se compararon los resultados modelados y los medidos. A continuación se detalla la información contenida:

- En la parte A se ilustra la altura cuadrática media modelada y medida. Ambos parámetros son obtenidos a partir de la integración de la energía del espectro la cual representa a todo el estado de mar. Además se ha señalado cada punto de comparación con el prefijo “S” y valores numerados a lo largo del perfil incrementándose hacia la costa. Cada estación espectral contiene la información en color rojo para las mediciones y negro para la simulación.
- En la parte S1 a S6 se presentan las comparaciones de la forma espectral de las mediciones y modelación, en el dominio de la frecuencia. Al igual que para las alturas de olas, se ha utilizado el color rojo para los datos de campo y el negro para los resultados de la modelación.

Las Figuras 5.34 y 5.35 muestran las comparaciones espectrales para dos casos, el primero corresponde a un estado unimodal de oleaje, es decir, se observa la presencia de un solo *peak* que predomina durante toda la propagación y el segundo a oleaje bimodal.

Cabe destacar que para el caso unimodal (Figura 5.34) existe un pequeño sistema de oleaje asociada a frecuencias bajas el cual cobra importancia relativa al resto de las componentes que contiene el espectro a medida que se va propagando. A pesar de ello los resultados indican que la disipación implementada en la modelación es adecuada por lo que es posible despreciar los efectos de la dependencia de la frecuencia en la disipación por rotura para el caso unimodal.

En general los resultados obtenidos para el oleaje unimodal fueron adecuados para todas las estaciones de medición, presentándose algunas diferencias de baja magnitud en el caso del punto S5 y S6, esto podría deberse a que los sensores de presión se encuentran en profundidades reducidas y las alteraciones de las mediciones podrían ser significativas.

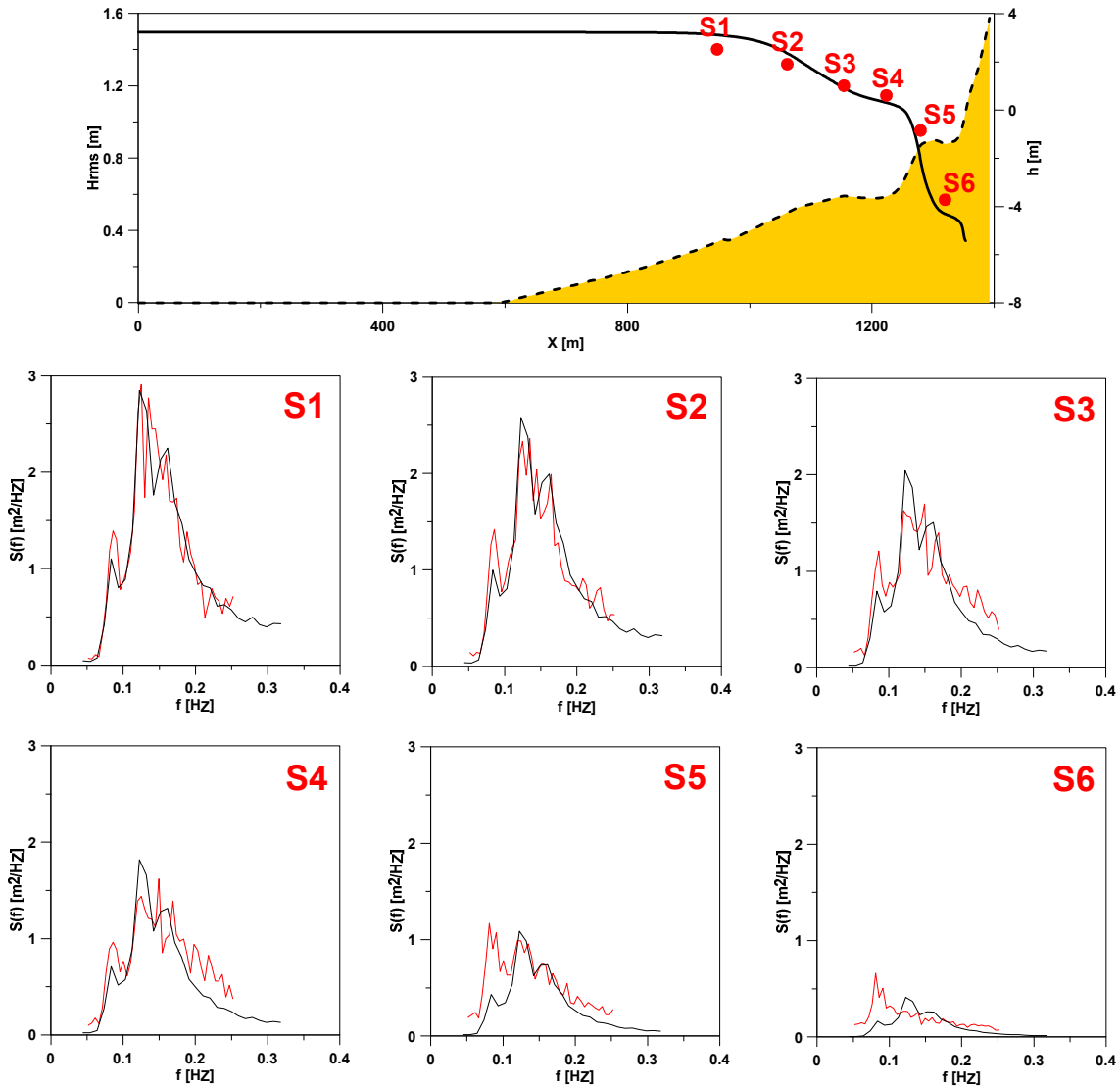


Figura 5.18: Validación Espectral $H_s = 2.11m$ a 8m de profundidad.
(Fuente: Elaboración propia)

El caso que se muestra en la Figura 5.35, es un estado que contiene dos modos o sistemas de oleaje, en general se observa que la comparación espectral es adecuada en todos los casos, siendo más desfavorable la estación S5, donde las mediciones no contemplan la presencia del segundo *peak* asociada a las frecuencias altas.

Al igual que en el caso unimodal, las diferencias encontradas para la estación S5 y S6, en menor grado, podrían deberse a la baja profundidad a la cual se encuentran los instrumentos.

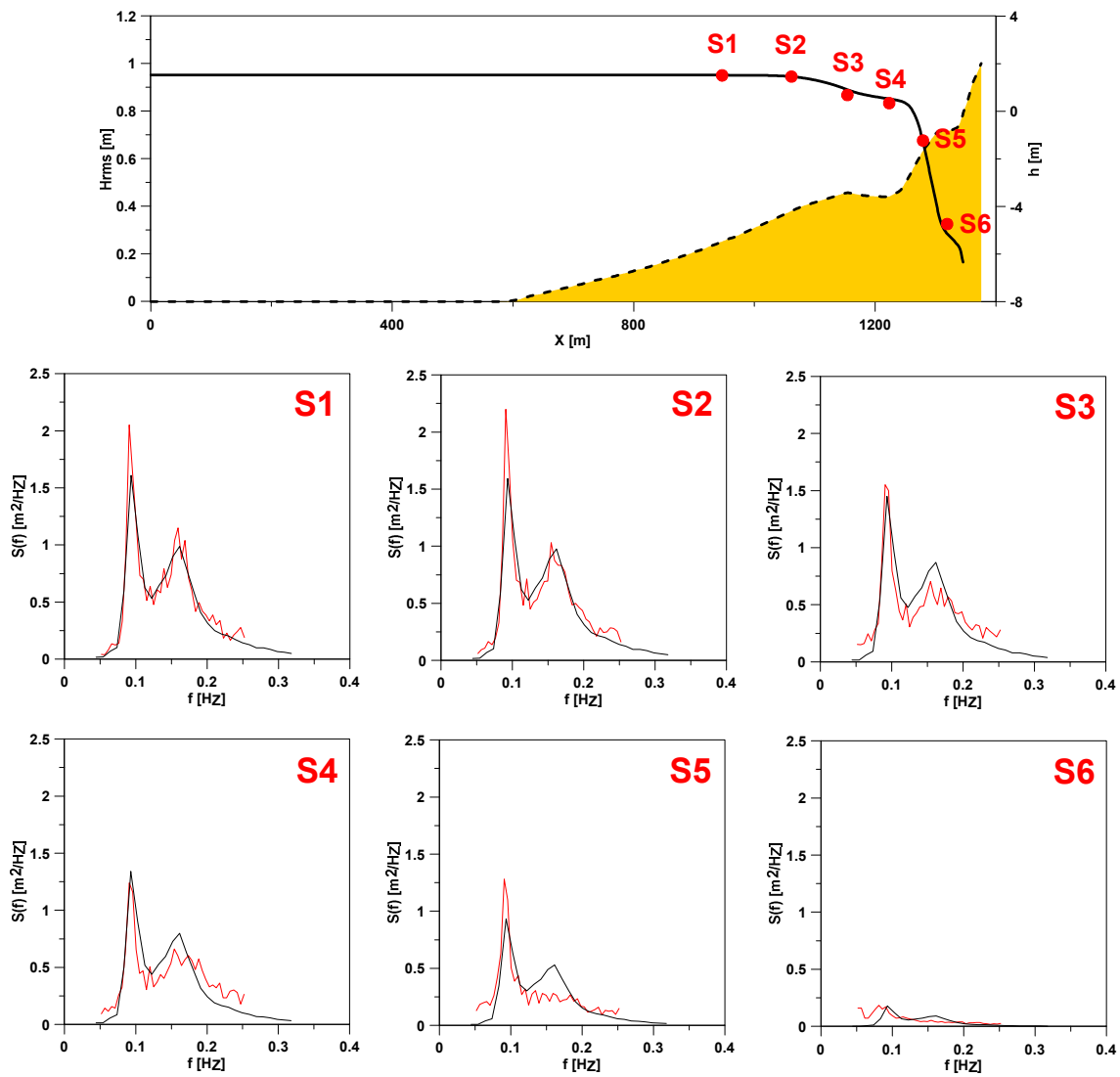


Figura 5.19: Validación Espectral $H_s = 1.35m$ a $8m$ de profundidad.
(Fuente: Elaboración propia)

Otra característica importante de destacar es la suavidad de la curva del modelo, la cual podría ser causada por una menor sensibilidad a las variaciones locales del perfil, a diferencia de la propagación de un parámetro de resumen (módulo paramétrico), esto se debería a que cada componente aporta en la propagación, suavizando los parámetros que emanan de ella.

De la comparación de los datos disponibles con el módulo espectral se consideran válidos los resultados obtenidos, por lo cual el modelo numérico implementado sería capaz de predecir de manera correcta no tan solo la evolución de la energía a lo largo de un perfil, sino también su distribución en el dominio de las frecuencias.

Cabe destacar que este último proceso realizado es de una característica técnica altamente exigente, ya que al estar representado el espectro con periodos de oleaje que van desde los

20 a los 3 segundos, el modelo necesita representar de manera adecuada la transformación de cada uno de los bins de energía.

5.3 VALIDACIÓN MÓDULO VARIACIONES DEL NIVEL MEDIO

A continuación se presentan las comparaciones de las variaciones del nivel medio (Set-Up y Set-Down inducidas por oleaje). Se han seleccionado dos casos tomados de las comparaciones realizadas por Battjes & Stive (1985). El primer caso es un ensayo de un perfil sin barra, mientras que el segundo corresponde a un perfil con presencia de una barra idealizada.

Las comparaciones se efectuaron considerando los siguientes esquemas de disipación:

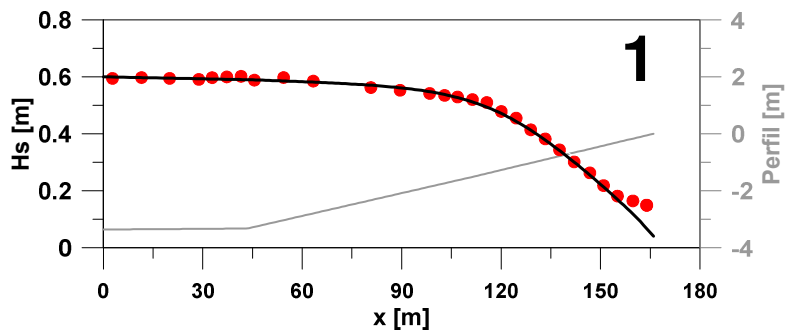
- RK03: Se seleccionó debido a que presentó los mejores resultados en las validaciones de oleaje contra datos de laboratorio.
- TM04: Se seleccionó debido a que no presenta parámetros ajustables.
- YK12: Se seleccionó debido a que de las comparaciones anteriores se destaca su correspondencia contra las mediciones, y además permite como línea futura de investigación efectuar calibraciones a partir de la elección de la función de distribución de alturas de ola.

Las comparaciones del resto de los esquemas de disipación quedan fuera de los alcances de este documento, debido a que el objetivo de comparar muchos esquemas de disipación para efectos de esta memoria, eran evaluar las capacidades de representar la propagación del oleaje y no sus efectos sobre el resto de las variables inducidas por él.

En la Figura 5.36, lámina (1), se observa la comparación de las mediciones con el modelo de disipación RK03, donde se destaca la alta correspondencia entre los datos medidos y los simulados para las alturas de olas, mientras que en la lámina (2) se muestran dos curvas además de los datos de laboratorio; la curva negra presenta los resultados obtenidos sin incluir los efectos del *roller*, mientras la curva azul muestra la variación del nivel medio considerando los efectos del *roller*.

Módulo Oleaje, Modelo disipación RK03

WL (m, NRS) 0.00, H (m) 0.60, T (s) 3.3, $\theta(^{\circ})$ 0.0.



Módulo Determinación Nivel Medio, Modelo Roller SDV94

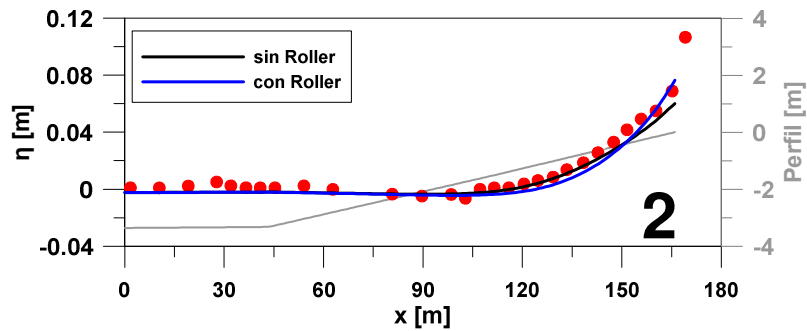


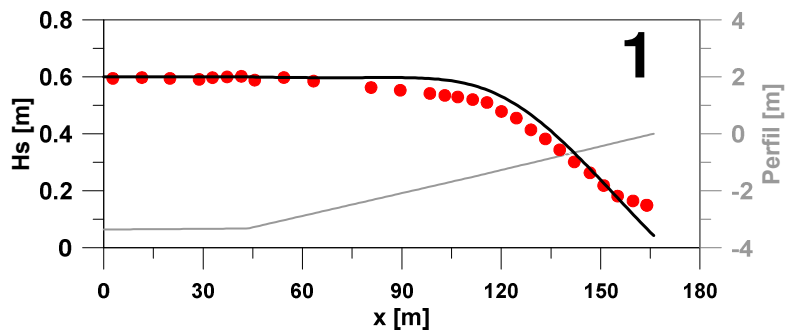
Figura 5.20: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Stive & De Vriend (1999)
(Fuente: Elaboración propia)

En general se observa una correlación adecuada en la comparación del nivel medio. En la zona anterior a la rotura los resultados tienden a ser supradichos, mientras que en la zona más cercana a la cara de la playa los resultados revelan un mejor ajuste entre ambas series de datos.

En la Figura 5.37 se presentan los resultados para el mismo caso anterior pero variando el módulo de oleaje e inclusión del *roller*, considerando para ambos las formulaciones propuestas por Tajima & Madsen (2004). Se observa en la lámina (1) que el oleaje tiene una tendencia a disipar menos energía que las mediciones, lo que implica un empeoramiento en los resultados de la variación del nivel medio, destacándose la zona anterior a la rotura como la menos representada por el modelo para la condición con y sin inclusión del *roller*.

Módulo Oleaje, Modelo disipación TM04

WL (m, NRS) 0.00, H (m) 0.60, T (s) 3.3, $\theta(^{\circ})$ 0.0.



Módulo Determinación Nivel Medio, Modelo Roller TM04

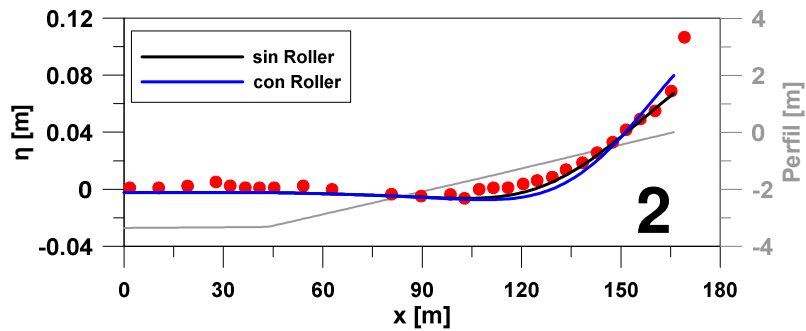


Figura 5.21: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Tajima & Madsen (2004).
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 5.38 muestra para el mismo caso anterior los resultados de la variación del Set Up, considerando los esquemas propuestos por Kuriyama (2012). Se observa de la lámina (2) que antes de la zona de rotura reinante existe un mejor comportamiento de la curva sin incluir el *roller*, por el contrario después de la zona de rotura es la inclusión del *roller* la que permite una correlación adecuada con los datos.

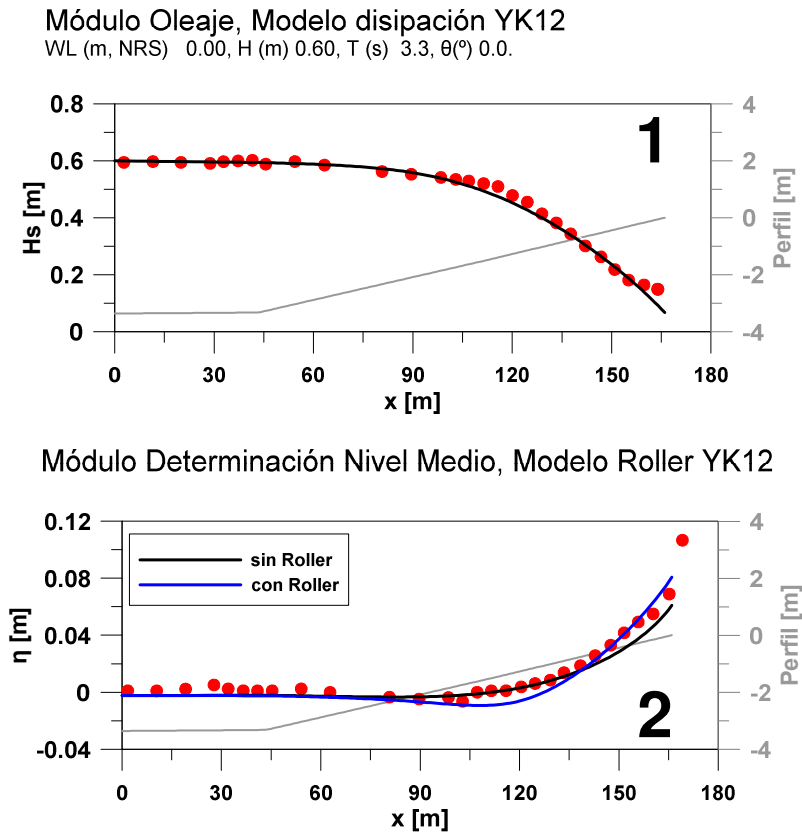


Figura 5.22: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Y. Kuriyama (2012).
 (Fuente: Elaboración propia)

Considerando el mismo formato de presentación de los resultados se ilustra a continuación el caso de perfil con barra. Se han asumido los mismos esquemas anteriores (RK03+SDV99, TM04 y YK12) cuyos resultados se muestran en las Figuras 5.39 a 5.41. Se observa que existe una estrecha relación entre el oleaje y el nivel medio tanto en forma como en magnitud. Claramente en presencia de la barra idealizada el esquema con *roller* tiende a mejorar la correspondencia entre los datos medidos y simulados.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se puede considerar el módulo de variación del nivel medio o Set Up y Set Down como válido. También es posible reconocer que para los casos analizados las diferencias entre cada modelo de inclusión del *roller* no fue significativa, no así la elección del módulo de oleaje ya que las magnitudes analizadas en este apartado son fuertemente dependientes de la altura de ola.

En función de estos resultados se debe destacar que la correcta simulación del proceso de set-up y set down, guarda una estrecha relación con la capacidad de representar el oleaje en la zona previa a la rotura, así como también en el sector de post-rotura.

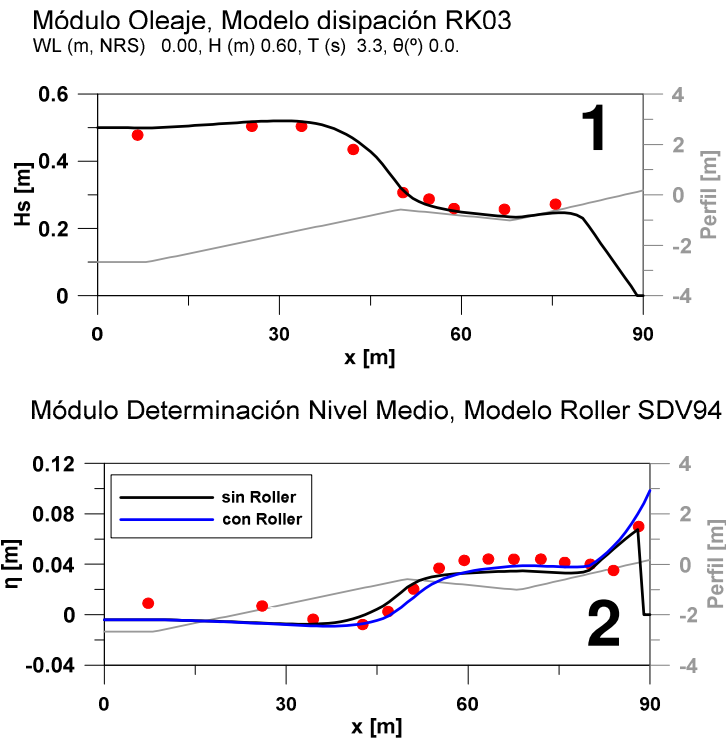


Figura 5.23: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Stive & De Vriend (1999)
 (Fuente: Elaboración propia)



Figura 5.24: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Tajima & Madsen (2004)
 (Fuente: Elaboración propia)

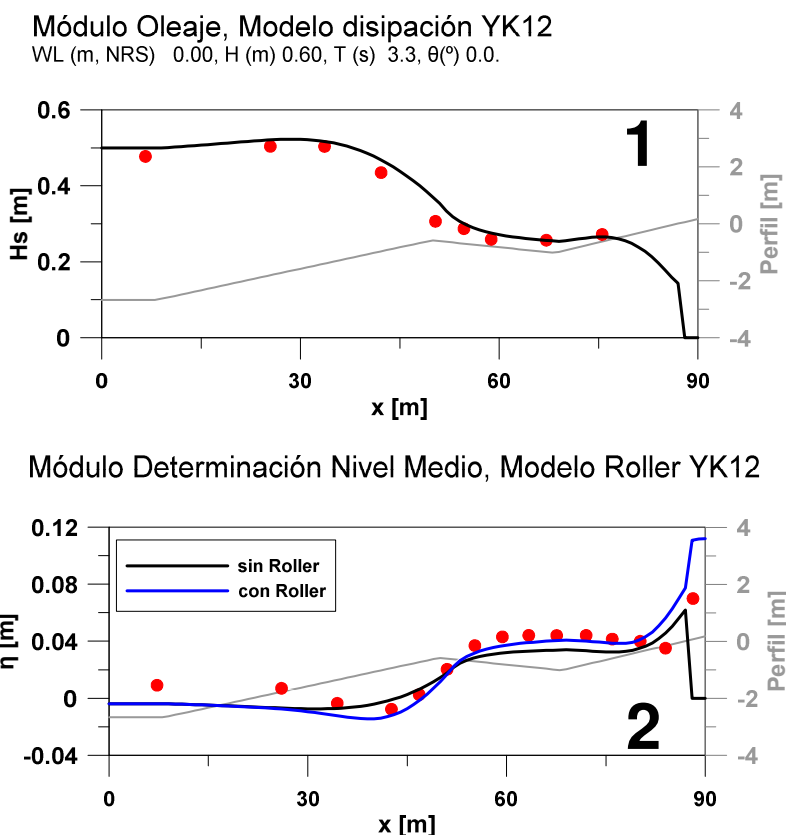


Figura 5.25: Comparaciones Variación Nivel Medio mediante Y. Kuriyama (2012)
 (Fuente: Elaboración propia)

5.4 VALIDACIÓN MÓDULO DE CORRIENTES

En este apartado se presentan los resultados del proceso de validación correspondiente al módulo de corrientes, se debe tener en cuenta que la dificultad en la comparación con los datos es mayor que en el resto de las variables, debido a la complejidad de los patrones de circulación existentes en las costas. Es por este motivo que se puede considerar una correspondencia adecuada, cuando el orden de magnitud y la forma son similares a las mediciones.

En concordancia con las formulaciones presentadas en capítulo anterior se presentan tres formulaciones

- De Vriend & Stive (1987) modificado por Ranasinghe (1999).
- Tajima & Madsen (2004).
- Y. Kuriyama (2012).

A continuación se presentan los resultados de las comparaciones de cuatro ensayos de laboratorio y datos de campo.

Las figuras empleadas para las comparaciones con datos de laboratorio y de campo se presentan en tres columnas, cada una contiene tres gráficos; el primero muestra las variaciones de altura de ola a lo largo del perfil, validando los resultados con datos cuando se dispone de mediciones, el segundo corresponde a las variaciones del nivel medio, donde la curva azul muestra los resultados incluyendo los efectos del *roller*, mientras que la curva negra muestra los resultados sin incluir el efecto del *roller* en el balance de momento, por último el tercer gráfico muestra las variaciones de las corrientes netas.

La Figura 5.42 muestra los resultados de las comparaciones con el ensayo de Rodríguez et al. (1994) los que corresponden a datos de campo. Para este ensayo no se dispone de datos de altura del ola por lo que los Módulos de oleaje y Set-Up se calculan con los valores por defecto recomendados por sus respectivos autores.

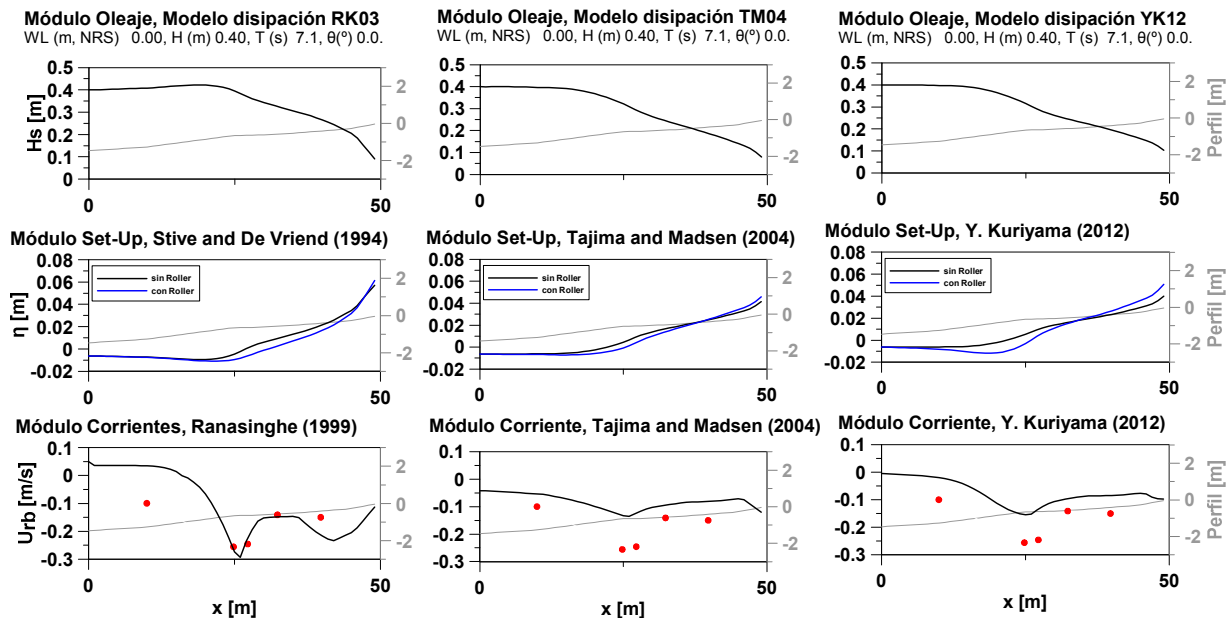


Figura 5.26: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Rodríguez et al. (1994).
(Fuente: Elaboración propia)

Para las comparaciones con los datos de corriente se debe cuidar la interpretación de los gráficos, ya que en la mayoría de los casos no se dispone de la información acerca de la discretización de las celdas en la vertical, ni del tratamiento de los datos y como éstos se promedian para adquirir un parámetro capaz de representar las corrientes a lo largo del perfil. Es de notar que la formulación de Ranasinghe (1999) considera para la representación de la circulación, el modelo de tres capas propuesto por De Vriend & Stive (1987), donde los valores de velocidad del flujo neto estacionario corresponden a la capa en el fondo, éstas además consideran los efectos de estructura vertical de la resaca (*undertow*), y las corrientes de netas asociadas deriva de Stokes. Las dos formulaciones restantes consideran tan solo las corrientes de *undertow* promediando las velocidades en la vertical y en el tiempo, esto debido a que estas son las más importantes para la erosión de la playa durante una tormenta.

Se observa del ensayo analizado en la Figura 5.42, que el esquema de corrientes que más se ajusta a las mediciones es Ranasinghe (1999). Tanto Tajima & Madsen (2004) junto con Kuriyama (2012) poseen un comportamiento similar entre ellos, ambos subestimando la magnitud de la corriente pero caracterizando de forma correcta las variaciones de la corriente lo largo del perfil, es decir, su distribución longitudinal.

La Figura 5.43 muestra los resultados de las comparaciones con el ensayo de Roelvink & Stive. (1994a) los que corresponden a datos de laboratorio, para los cuales se dispone de información de altura del ola, por lo que se valida nuevamente el módulo de oleaje. Sin embargo, no se disponen de mediciones de Set-Up. Las validaciones del oleaje muestran que se representa adecuadamente la tasa de disipación y la posición de la rotura. Las variaciones del nivel medio son similares para las formulaciones propuestas por Stive & De Vriend (1994) y Tajima & Madsen (2004). Cabe destacar que la inclusión del *roller* presenta una condición de Set-Down más pronunciada.

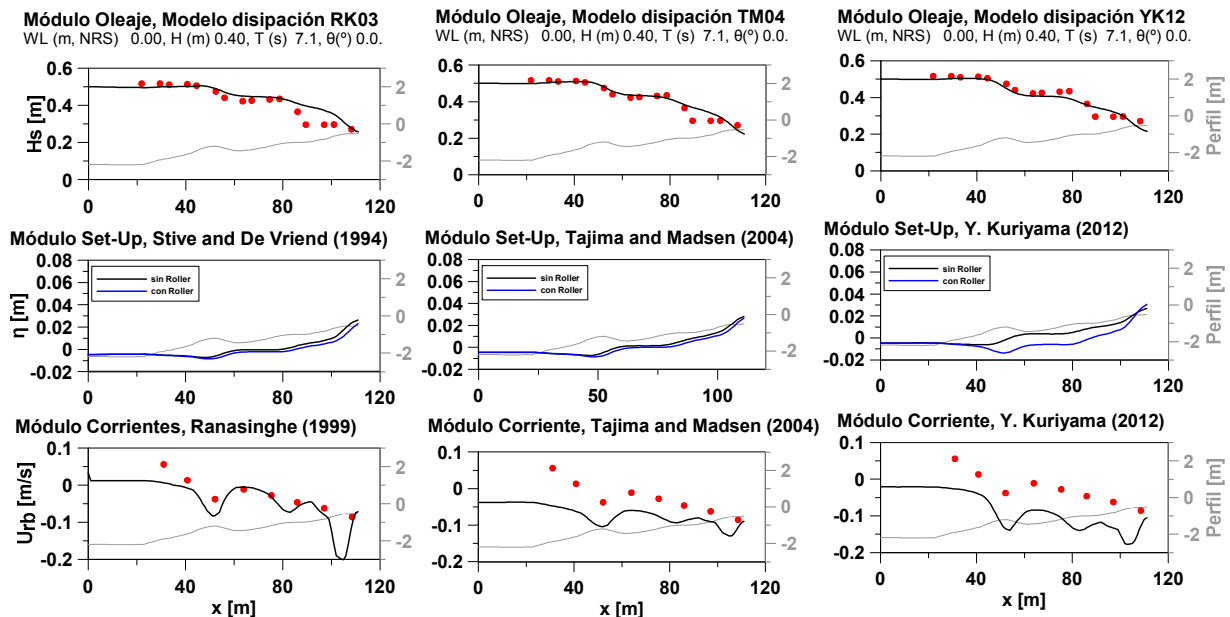


Figura 5.27: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Roelvink & Stive (1989a)
(Fuente: Elaboración propia)

Nuevamente la formulación de Ranasinghe (1999) presenta la mejor correspondencia con los datos medidos tanto para su magnitud como para su distribución. Las tres formulaciones presentan una curva similar de variación a lo largo del perfil. Las formulaciones de Tajima & Madsen (2004) y Kuriyama (2012) sobrestiman la magnitud de la corriente.

Nótese que la interpretación del signo de la velocidad está relacionado con el sentido de la corriente, los valores positivos indican que la media es hacia la playa, mientras que signos negativos corresponden a flujo con sentido *offshore*. En general los valores positivos son generados por la asimetría en el perfil de velocidades, mientras que los negativos son los que corresponden a las corrientes de resaca.

La Figura 5.44 muestra los resultados de las comparaciones con el ensayo de Roelvink & Stive. (1989b) los que corresponden a datos de laboratorio. Para esta comparación se cuenta con datos de altura de ola a lo largo del perfil, se advierte que solo el modelo Tajima & Madsen (2004) no representa bien la posición de la rotura, pero esto no puede ser corregido debido a que las expresiones que recomienda Tajima no poseen parámetros ajustables.

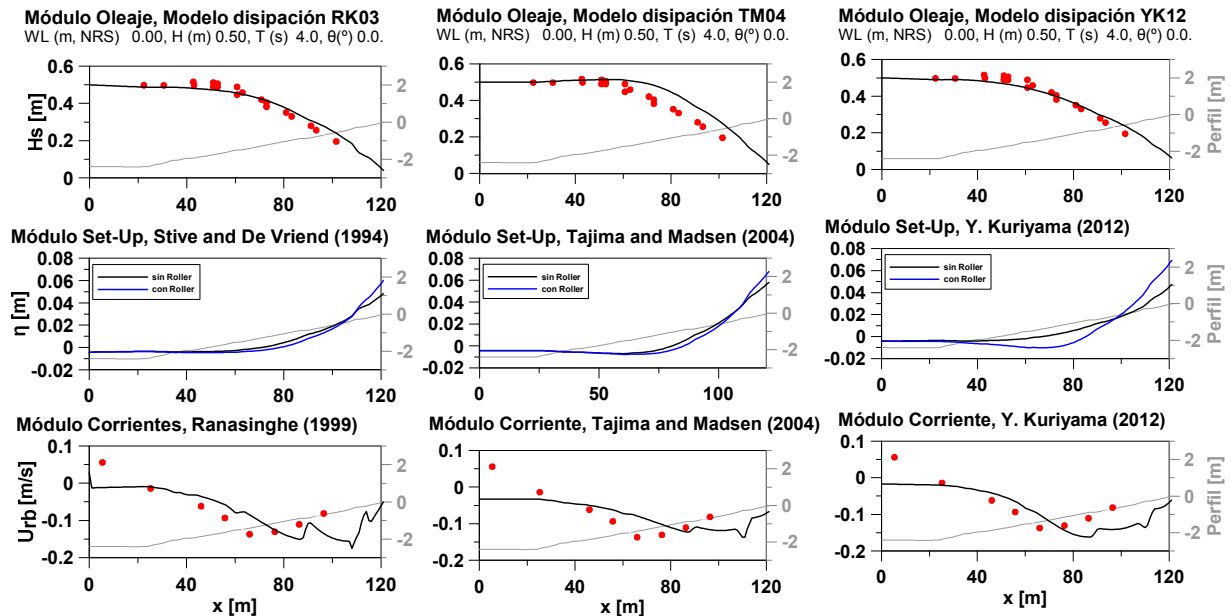


Figura 5.28: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Roelvink & Stive (1989b)
(Fuente: Elaboración propia)

Los modelos considerados para representar las variaciones del nivel medio presentan resultados similares, excepto el modelo que incluye los efectos del *roller* correspondiente a Kuriyama (2012), el cual presenta variaciones más acusadas de Set-Down y Set-Up.

En el caso de las corrientes las tres formulaciones consideradas presentan resultados similares, para todos los casos las magnitudes de la velocidad son aceptables, sin embargo se observa un desplazamiento hacia el lado costa de la variación de la corriente a lo largo del perfil.

La Figura 5.45 muestra los resultados de las comparaciones con el ensayo de Guza & Thornton (1985) los que corresponden a datos de laboratorio. Para esta comparación no se cuenta con datos de altura de ola a lo largo del perfil ni con datos de variación del nivel medio.

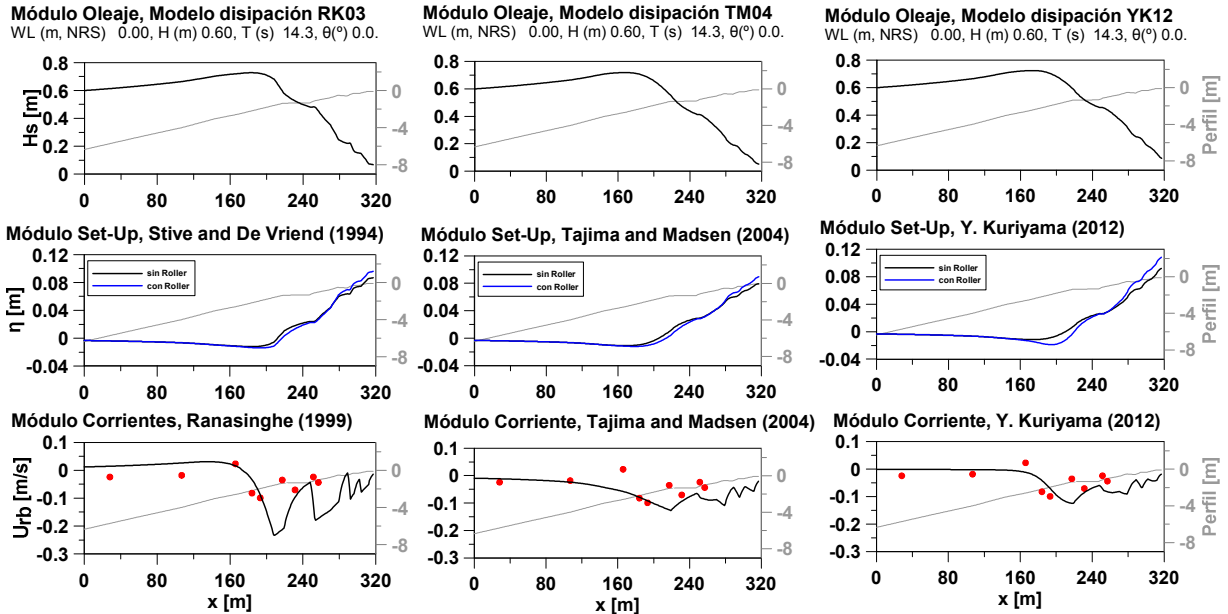


Figura 5.29: Comparaciones Modelos de Corrientes, Ensayo Guza & Thornton (1985)
(Fuente: Elaboración propia)

En términos generales para todos los ensayos numéricos realizados, el modelo numérico implementado es capaz de representar de manera correcta las características principales de las corrientes inducidas por oleaje a lo largo del perfil. Como fórmula destacada se presenta la de Ranasinghe (1999), que para todos los sets de datos considerados, presentó una correspondencia adecuada, tanto para su distribución transversal como para sus magnitudes.

Luego de las comparaciones con datos de campo y laboratorio, se considera validado el módulo de corrientes.

6. COMPARACIÓN DEL MODELO CON DATOS DE CAMPO

Para validar el comportamiento del modelo desarrollado, se comparó con mediciones de campo. En estas condiciones todos los fenómenos ocurren simultáneamente, es por esto que las diferencias puede atribuirse a procesos que el modelo no considera, sin embargo, estas deben ser suficientemente despreciables para que la modelación resulte adecuada. La otra fuente de diferencia en la comparación proviene del error en la medición, debido a que en el sector donde están los instrumentos durante el temporal, las condiciones del flujo pueden invalidar los métodos de post-proceso de los datos, generando una incapacidad de captar las variables que cuantifican los fenómenos.

Sin embargo esta incertidumbre se puede controlar en función de un tratamiento adecuado de los datos por especialistas. De este modo se considera estas magnitudes como despreciables.

Los datos de campo pertenecen al Field Research Facility (FRF) del US Army Corps of Engineers. FRF se ubica en un sector de la costa de Carolina del Norte USA (Figura 6.1) cerca de la localidad de Duck.

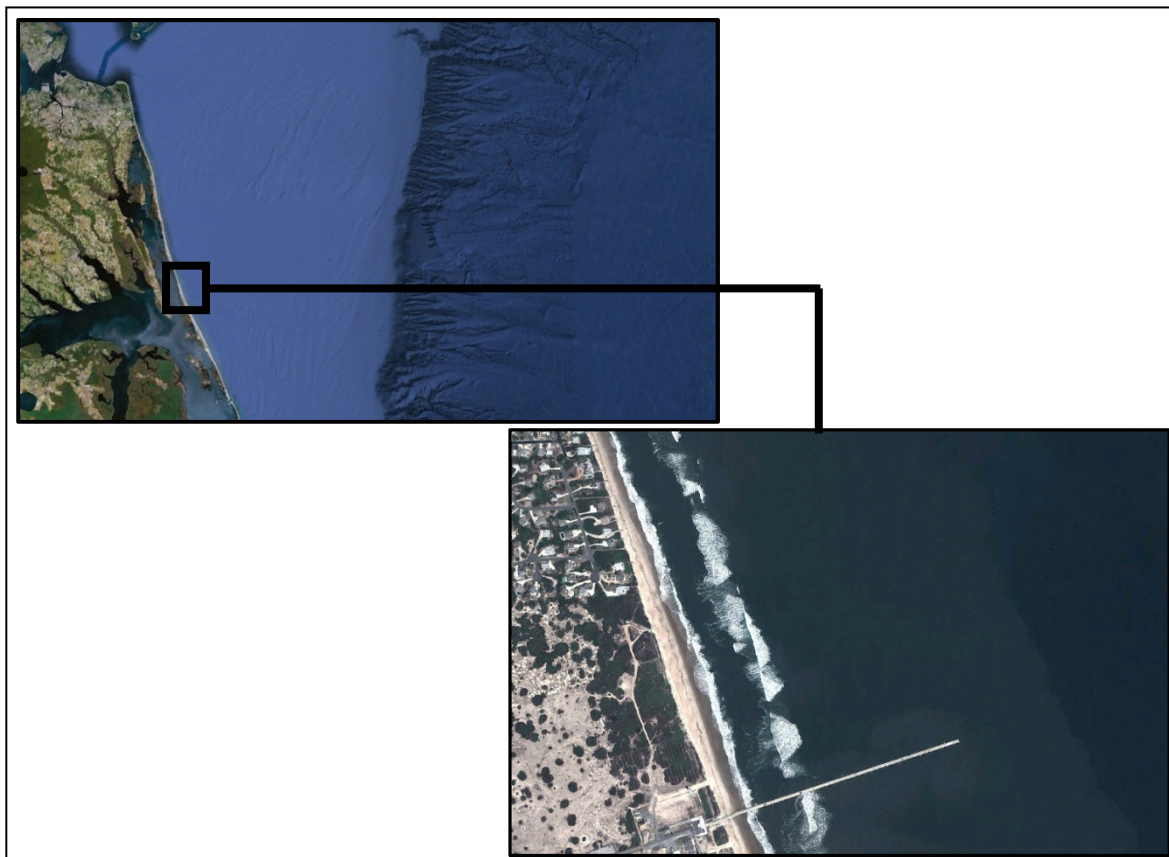


Figura 6.1: Ubicación FRF
(Fuente: Google Earth)

FRF mantiene estudios en este sector desde 1977, para el análisis de la respuesta de la playa, habiendo sido ejecutados tres grandes experimentos. En el presente documento se

consideraron los datos más reciente denominado SandyDuck'97, éste se realizó en los meses de Septiembre a Octubre de 1997 y contempló 30 experimentos guiados por 57 investigadores de varias nacionalidades y especialidades. La distribución espacial de los instrumentos empleados puede observarse en la Figura 6.2.

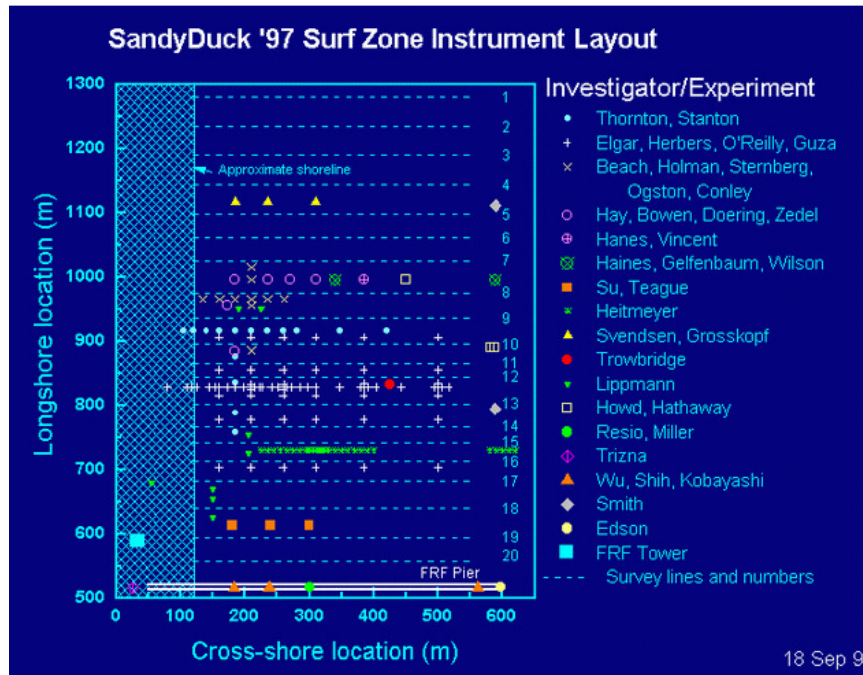


Figura 6.2: Configuración de los instrumentos empleados en los experimentos asociados a los distintos grupos de investigación (Fuente: FRF)

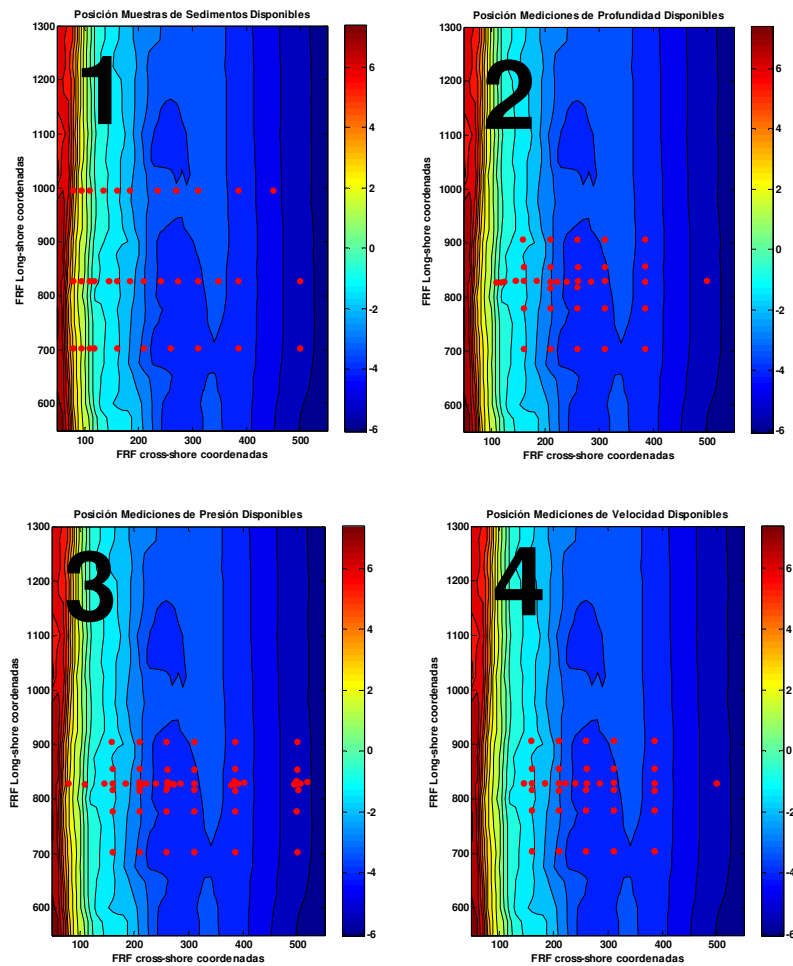
El principal objetivo de SandyDuck' 97 era rebasar los conocimientos a esa fecha en materia de evolución morfodinámica. Para efectos de este documento se utilizaron las mediciones efectuadas por el grupo compuesto por Elgar, Herbers, O'Reilly & Guza, para el experimento llamado "*Surf Zone wave current and morphology*", este ensayo cuenta con 33 altímetros de sonar, 69 medidores de presión y 33 sensores de velocidad. Todos estos dispuestos en una grilla en planta que abarca 200 [m] en sentido longitudinal a la playa por 420 [m] en sentido transversal, cubriendo profundidades aproximadas de 1 a 5 [m]. La Figura 6.2 detalla la posición dentro de la grilla de cada instrumento.

Cabe destacar que el uso de estos datos de campo es gratuito y de libre acceso vía web, para todos los proyectos de investigación que se deseen llevar a cabo.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES PARA LA COMPARACIÓN

Se ha seleccionado para comparar el día 18 de Octubre, que corresponde a 22 horas de simulación de acuerdo con los datos disponibles. El perfil empleado coincide con la mayor densidad de mediciones según la Figura 6.3, y ha sido extendido hasta los 8 [m] de profundidad donde los datos son vinculados con las mediciones de un ADPC que contiene espectros direccionales de oleaje, con una longitud temporal entre cada medición de 3 horas.

Figura 6.3: Disponibilidad espacial de datos: (1) Muestras de Sedimento, (2) Sonares



para determinar profundidades, (3) Mediciones de presión, (4) Sensores de velocidad.
(Fuente: Elaboración propia)

La metodología de simulación correspondió a:

1. Se generó el perfil inicial y las propiedades del sedimento a lo largo de este (densidad y tamaño).
2. Se detallaron las propiedades del agua como temperatura y densidad.

3. Se detalló el oleaje en el inicio del perfil (x_0) cada tres horas, hasta abarcar la longitud temporal de la simulación.
4. Se definió la marea durante el tiempo de simulación.
5. Se definieron las condiciones de borde para la tasa de transporte.

Con las condiciones de borde e iniciales, el modelo tomó el oleaje al inicio del perfil lo propagó hasta una profundidad suficientemente pequeña, calculó la hidrodinámica a lo largo del perfil y el transporte de sedimento. Dependiendo de la magnitud del transporte y el esquema numérico seleccionado, se obtiene el avance temporal (Δt) y se procede a calcular la evolución en el tiempo. Este proceso se repitió n veces donde la condición de oleaje es interpolada linealmente hasta encontrar el inicio de otro estado de mar o el final de la simulación. Este procedimiento de interpolación del oleaje, es necesario debido a que el criterio de estabilidad de Courant impone un paso del tiempo (Δt) usualmente menor a la distancia temporal para la cual se describen los estados de mar (generalmente 3 horas). Cabe destacar que este procedimiento es estándar en la mayoría de los modelos de evolución morfodinámica.

Como se comentó esta es una prueba exigente, la incorrecta predicción de cualquier agente provocaría una mala estimación de la evolución del perfil, lo que implicaría al siguiente paso temporal la propagación del oleaje en un perfil que no corresponde y por tanto la solución comenzará a alejarse de la realidad, de este modo cuanto más tiempo transcurra más evidente será la diferencia. Siendo esto denominado en la matemática como error de propagación.

La Figura 6.4 muestra la variación del tamaño de sedimento a lo largo del perfil, apreciándose un incremento del d_{50} hacia profundidades más bajas. Este comportamiento ha sido descrito previamente por varios investigadores, en donde la pérdida de material fino no cohesivo (fácil de mover) es mayor en las zonas donde las velocidades aumentan, quedando presente los granos más grandes, lo que se conoce como acorazamiento de la playa. Esta configuración granulométrica fue aplicada al modelo numérico implementado.

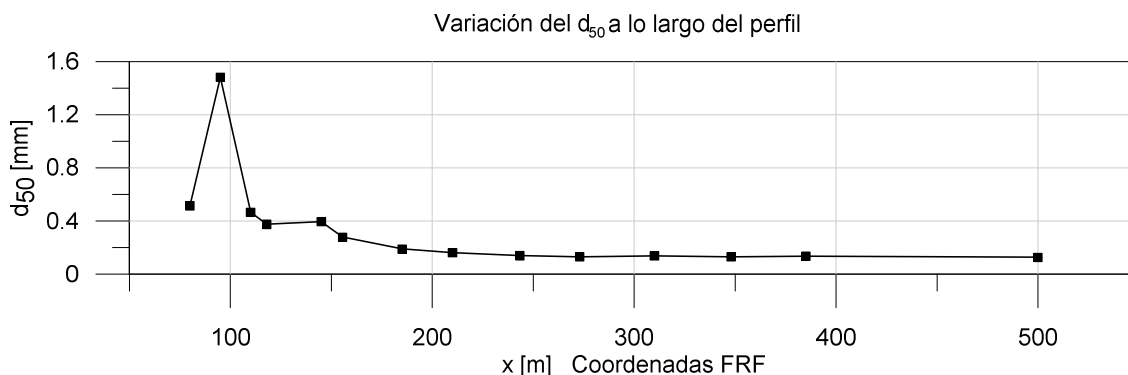


Figura 6.4: Tamaño del sedimento a lo largo del perfil.
(Fuente: Elaboración propia)

Los valores de oleaje adoptados en el inicio del perfil se muestran la Figura 6.5, junto con la marea asociada a cada estado de mar. Nótese que la dirección *peak* (DPK) se ha descrito como la desvinculación del oleaje respecto del eje del perfil de playa modelado.

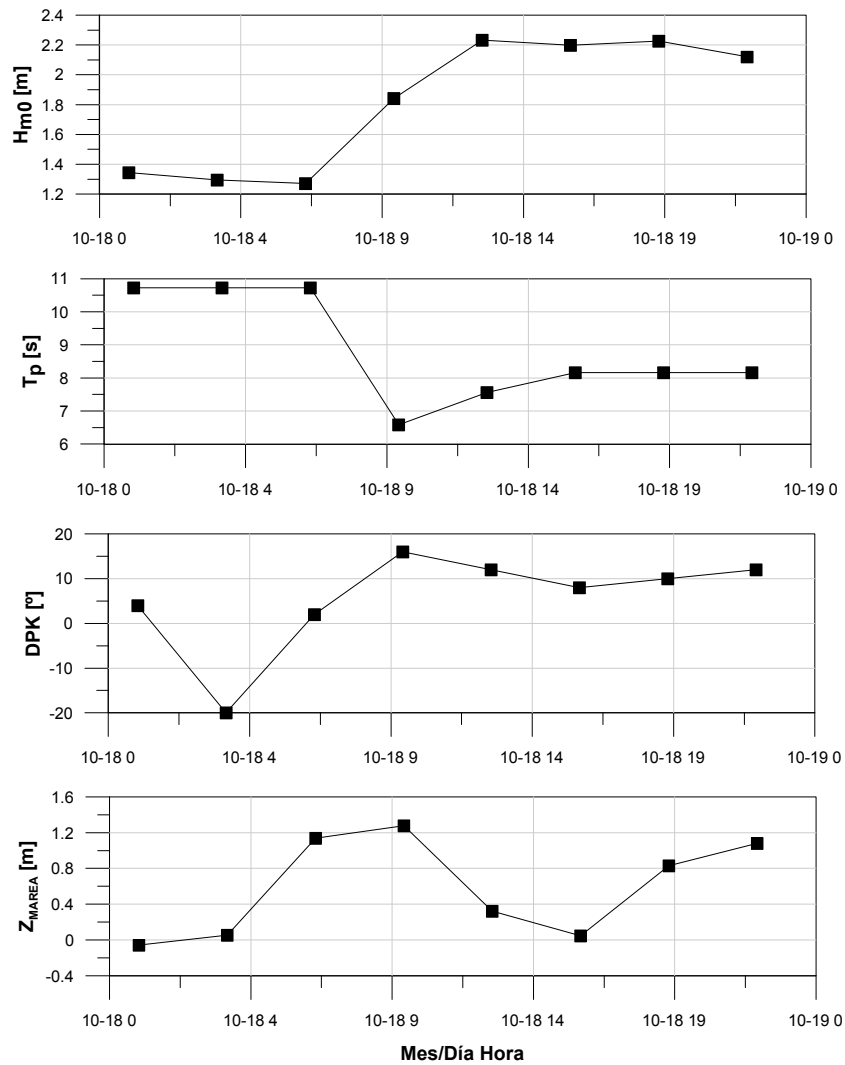


Figura 6.5: Tormenta medida a 8[m] de profundidad
(Fuente: Elaboración propia)

6.2 COMPARACIÓN DIRECTA CON DATOS DE CAMPO

Se compararon los datos medidos con los resultados de la modelación numérica y debido a que anteriormente los módulos de transporte de sedimento y evolución morfodinámica no fueron validados, se probaron cuatro combinaciones a modo de evaluar las posibles diferencias entre los esquemas numéricos y las formulaciones disponibles para el cálculo de la tasa de transporte. Los casos considerados se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Casos para las comparaciones con datos de campo.

Método Numérico	Tasa de Transporte
Lax-Wendroff	Ranasinghe et al. (1999)
Lax-Wendroff	Kuriyama (2012)
WENO	Ranasinghe et al. (1999)
WENO	Kuriyama (2012)

(Fuente: Elaboración propia)

La configuración de módulos que se presenta es la que arrojó los mejores resultados de acuerdo al análisis de error entre el modelo y las mediciones. Éste consistió en la comparación directa con los datos de campo correspondientes al perfil en evolución, estimando el error cuadrático medio (ECM, Ecuación 6.1) para cada paso de tiempo. Los resultados del ECM se presentan en la Tabla 6.2.

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_{i,simulado} - z_{i,medido}]^2} \quad (6.1)$$

Tabla 6.2: Resumen de los errores cuadráticos medios para los casos considerados.

Método Numérico	Tasa de Transporte	Error Cuadrático Medio en metros para cada paso de tiempo (día_hora)							
		18_01	18_04	18_07	18_10	18_13	18_16	18_19	18_22
Lax-Wendroff	Ranasinghe	0.04	0.05	0.08	0.12	0.16	0.19	0.22	0.27
Lax-Wendroff	Kuriyama	0.04	0.06	0.10	0.13	0.16	0.18	0.20	0.23
WENO	Ranasinghe	0.04	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27
WENO	Kuriyama	0.04	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.20	0.23

(Fuente: Elaboración propia)

De la Tabla 6.2 se observa que los errores más pequeños corresponden a los casos que contienen el módulo de transporte de sedimento acorde a las expresiones recomendadas por Kuriyama (2012), para ambos métodos numéricos el error es similar por lo que este ensayo no resulta concluyente por si solo de una mejora en la calidad debido a la variación del esquema empleado en la evolución morfodinámica del perfil, sin embargo, como se comentó anteriormente los tiempos de simulación con WENO son más bajos y por tanto más eficiente en economía computacional. Los resultados de los casos no presentados en este capítulo se adjuntan en el Anexo C.

En base al análisis anteriormente presentado, los módulos empleados en la simulación que se presenta fueron los siguientes:

- Oleaje: YK12
- *Roller*: Kuriyama (2012)
- Corrientes: Kuriyama (2012)
- Transporte de sedimentos: Kuriyama (2012)
- Esquema evolución morfodinámica: WENO

Las Figuras 6.6 – 6.8 presentan las comparaciones para los 8 estados de mar. Las variables que se grafican para cada estado son: altura de ola cuadrática media, Set-Up, corrientes, tasa de transporte de sedimentos y la evolución del perfil. Los puntos rojos corresponden a las mediciones, mientras que las curvas negras son los resultados del modelo.

Las comparaciones que se realizaron permitieron evaluar las bondades y falencias del modelo. En general se observó de las comparaciones entre datos medidos versus simulados, que los resultados son adecuados para todas las variables validadas.

La simulación de las condiciones de oleaje es adecuada, existiendo una correspondencia con los valores medidos durante toda la modelación. Es de notar que las zonas más alejadas de la condición inicial se observa una tendencia a subestimar las alturas de ola. La posición de la zona de rompiente es adecuada en todas las comparaciones al igual que la tasa de disipación.

Nótese que no se dispone de datos de Set-Up para la comparación, sin embargo, se observa una relación esperable entre el cambio de la altura de ola y las variaciones del nivel medio lo que confirma la adecuada modelación mediante el módulo de Set-Up, además las magnitudes son concordantes en relación con los valores de altura de ola.

Las comparaciones con los datos de corrientes fueron adecuadas en todos los tiempos comparados. De los comentarios realizados en el capítulo anterior, se puede observar que la correspondencia en algunos casos es sobresaliente, y durante toda la simulación el módulo respondió modelando adecuadamente tanto la magnitud como la forma de las velocidades a lo largo del perfil. Se evidencia en general que el modelo tiende a subestimar las corrientes sin embargo las diferencias no son significativas y podrían clasificarse como aceptables, considerando además que en la realidad se dan otros patrones de circulación más complejos que los considerados en el modelo.

La tasa de transporte de sedimentos es difícil de medir, por lo que no se dispone de datos para realizar la comparación, sin embargo el modelo adoptado es concordante con las variaciones de la ola y las corrientes a lo largo del perfil y no posee gradientes fuertes de caudales volumétricos, lo que permite verificar la estabilidad en las soluciones de evolución morfodinámica.

Las comparaciones de la evolución del perfil son adecuadas para todos los tiempos considerados. La forma del perfil se mantiene apegada a los datos medidos lo que implica el buen funcionamiento de todos los módulos, especialmente el de transporte de sedimentos que no ha sido comparado con datos medidos.

En general y considerando los resultados obtenidos, se puede establecer que el modelo numérico implementado es capaz de representar de manera adecuada las condiciones reales de la zona estudiada.

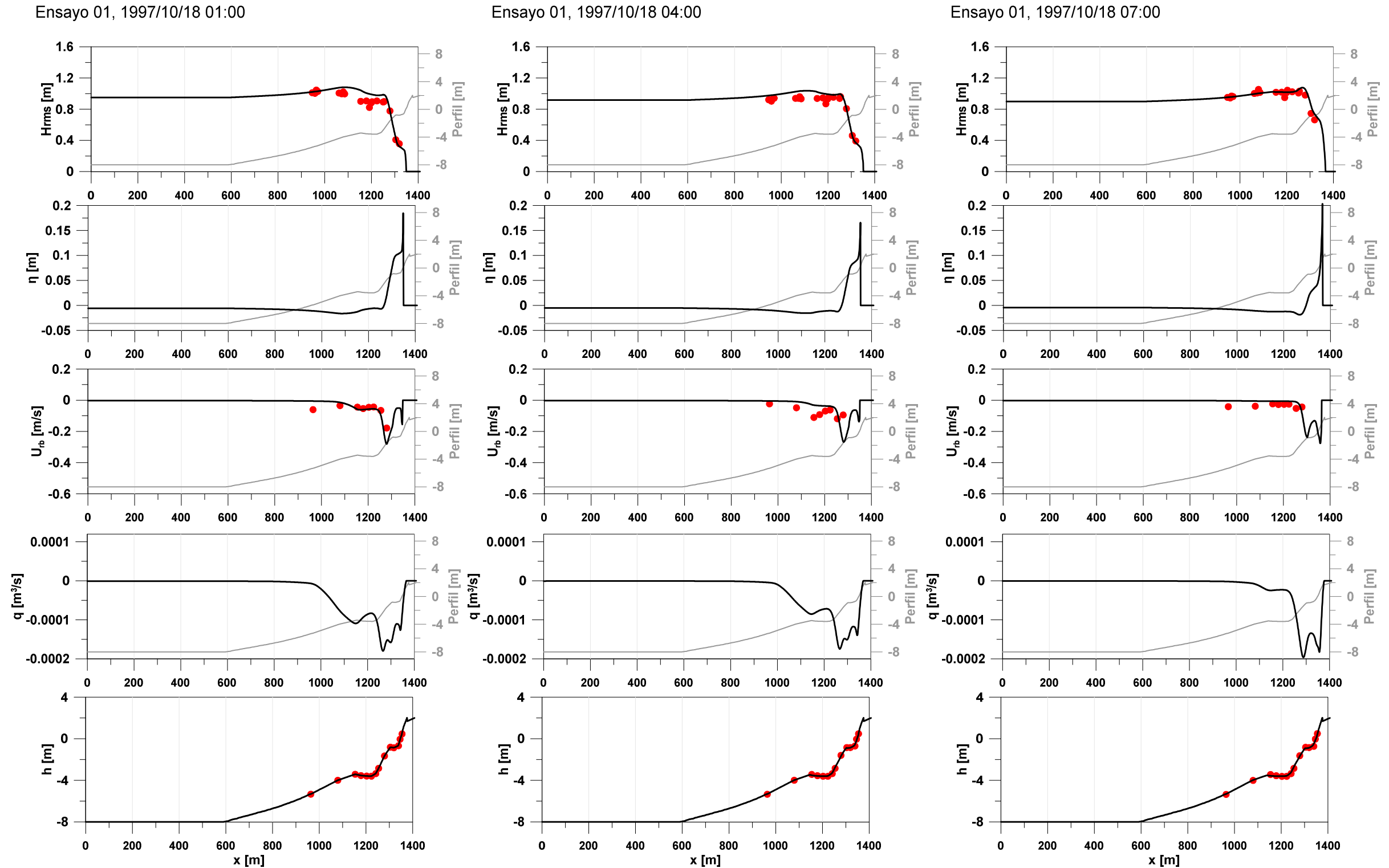


Figura 6.6: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 01, 04 y 07.
(Fuente: Elaboración propia)

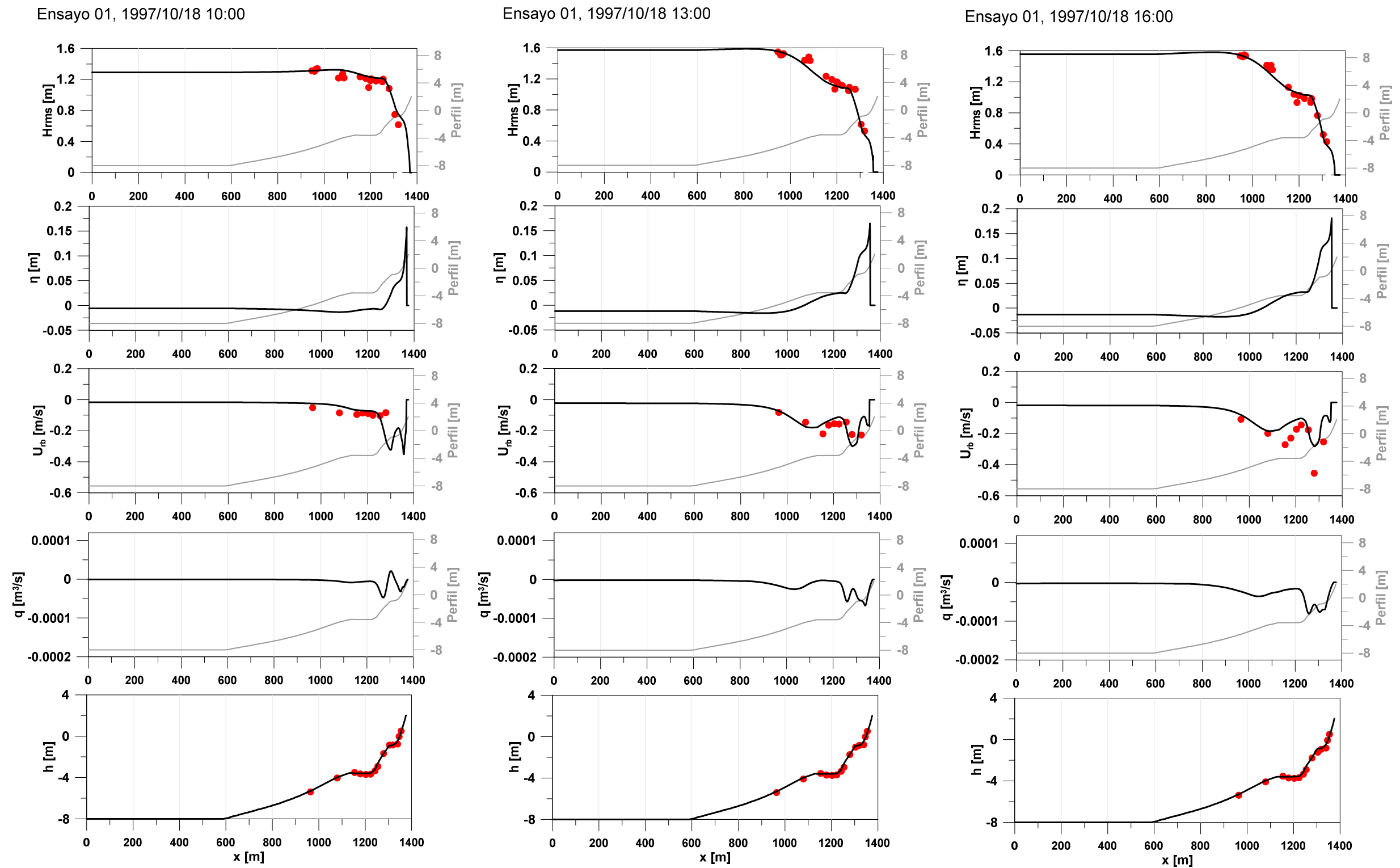


Figura 6.7: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 10, 13 y 16.
(Fuente: Elaboración propia)

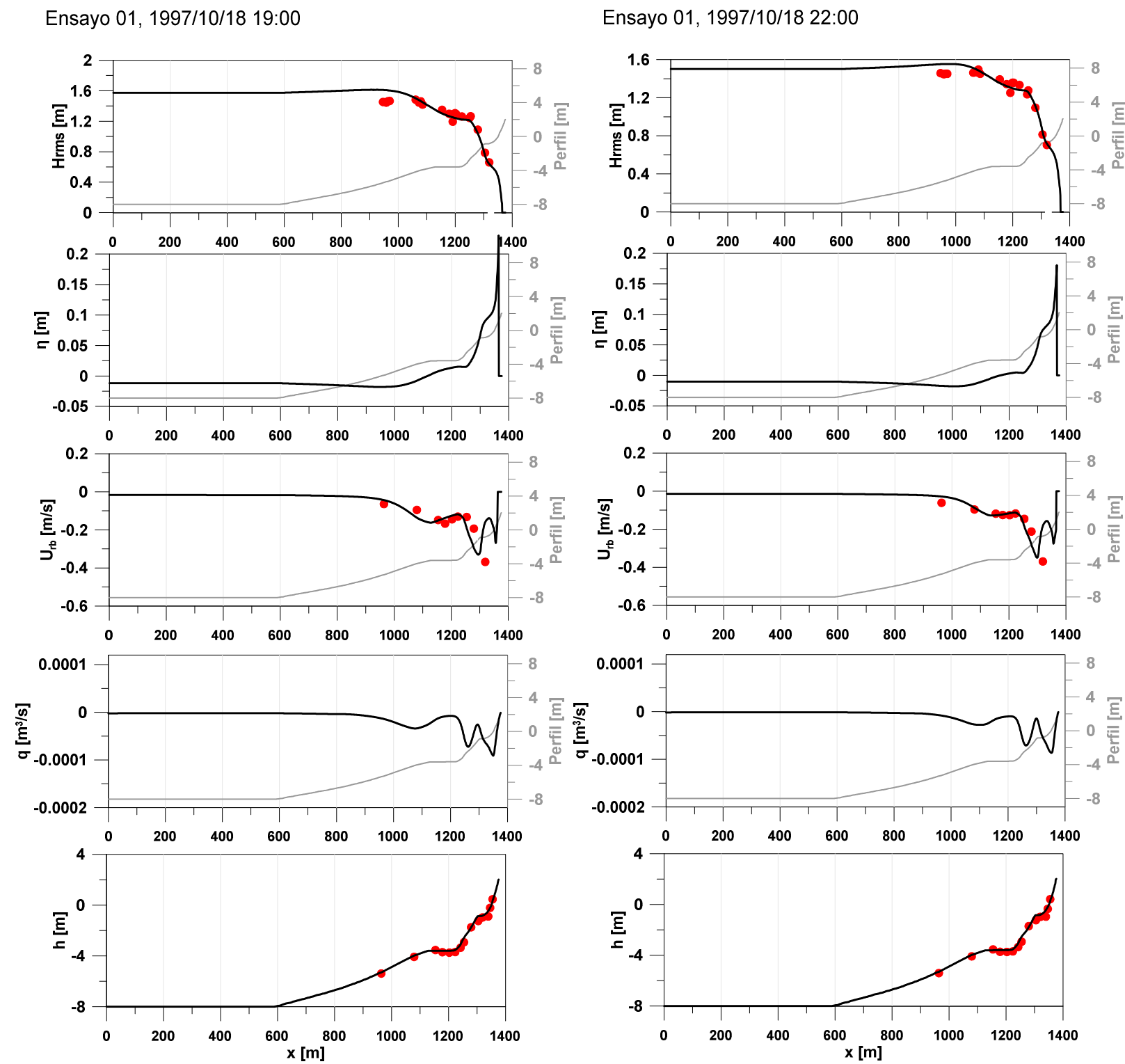


Figura 6.8: Comparación estados de mar correspondientes a las horas 19 y 22.
(Fuente: Elaboración propia)

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este trabajo se han separado por temática las cuales se presentan a continuación:

Respecto del oleaje se puede concluir:

- Existen varias formas de representar el oleaje, y la decisión de cómo hacerlo está relacionado con el objetivo de la modelación.
- Se reconoce el oleaje como el agente más importante en la modelación de la evolución morfodinámica, debido a que es este fenómeno el que induce las acciones responsables de la respuesta de la playa.
- En el caso de los modelos de respuesta del perfil de playa existe una tendencia a la ocupación de modelos paramétricos, debido a la economía en los gastos computacionales. Sin embargo, existen también el enfoque ola a ola, el cual se denomina probabilístico. En este trabajo, considerando los datos disponibles, la aproximación paramétrica presenta buenos resultados concluyéndose suficiente y aceptable la modelación con este tipo de enfoque.
- Si bien la aproximación paramétrica es adecuada para representar el oleaje en las cercanías de la costa, es recomendable aumentar los conocimientos en los fenómenos espectrales debido a las particularidades del oleaje en las costas chilenas.
- Se reconoce el amplio uso de la distribución Rayleigh para modelar el comportamiento estadístico de las alturas en la zona de rompientes. Tal como expresa Janssen & Battjes (2007), esta presenta resultados aceptables en playas donde no hay presencia de barras u rompeolas sumergidos.
- Respecto del desarrollo y avance en la modelación de la disipación de la energía en la zona de *surf*, considerando los dos esquemas analizados (disipación análoga a un bore y energía límite), se observa que poco se conoce de la extensión de los esquemas de energía límite a oleaje irregular, tanto RS98, RK03 y TM04, presentan correlaciones adecuadas en los perfiles con y sin barras. Por otra parte el amplio desarrollo en el enfoque de disipación del bore propuesto por Battjes & Janssen (1978) ha permitido mayores mejoras en las aproximaciones, las cuales funcionan adecuadamente para los perfiles sin barras, acá se destacan los esquemas BHV98, JB07 y YK12 entre otros.
- Se observa que los esquemas de disipación son más sensibles a la determinación del parámetro de rotura, que a los parámetros de proporcionalidad ligados a cantidad de energía perdida en el proceso. En este sentido, se advierte una falencia debido a que en todos los casos la altura rompiente es cuantificada mediante expresiones empíricas, las cuales están calibradas para los datos de laboratorio empleados en su determinación.
- En el caso de la modelación espectral del oleaje se observa que la tasa de disipación debido a la rotura es dependiente de la energía y los efectos de proporcionalidad respecto a la frecuencia pueden ser despreciados, tal como lo indica Eldeberky (2006).

Respecto de las variaciones del nivel medio se puede concluir:

- La resolución simultánea de la ecuación de balance de momento y energía del oleaje, es necesaria para describir adecuadamente el comportamiento de la hidrodinámica del perfil.
- En el caso de oleaje irregular, el Set-Up posee una mayor magnitud que el Set-Down.
- La inclusión del *roller* incrementa las variaciones del nivel medio. Además, las comparaciones con datos de laboratorio tienden a mejorar incluyendo este efecto.

Respecto de las corrientes se puede concluir:

- Éstas están fuertemente influenciadas por el oleaje.
- Los datos disponibles de laboratorio muestran que el esquema que incorpora las dos componentes (Ranasinghe (1999)) es el que mejor correlación entrega, sin embargo, en el caso de la comparación con datos reales el modelo de flujo promediado en la vertical (Y. Kuriyama 2012) se ajusta adecuadamente en forma y magnitud.

Respecto del transporte de sedimentos se puede concluir:

- La representación del sedimento es compleja y su incorporación a las expresiones capaces de predecir el transporte es aún simplista, ya que sólo se considera un diámetro relevante para describir toda la distribución de tamaños de granos.
- La inclusión de los fenómenos responsables del transporte es de forma lineal, lo que supone que las componentes consideradas son independientes entre sí, lo que puede ser discutible, debido a que claramente existe un efecto en la respuesta de una componente distinta cuando se encuentran dos actuando simultáneamente.
- El transporte en la zona de *swash* requiere una mejor determinación de la hidrodinámica en esta zona debido a que los fenómenos del flujo en medios porosos comienza a ser importante y debe ser tratado de forma distinta que el resto del perfil. Para considerar este efecto Wise et al. (1996) propone el uso de una forma predefinida de la tasa de transporte en este sector del perfil.
- Las condiciones de acreción y erosión que sufre el perfil de playa, deben ser modeladas considerando términos en la tasa de transporte, o bien modelando las corrientes responsables del movimiento de los granos.

Respecto la evolución morfodinámica se puede concluir:

- Es el aspecto que más se debe cuidar en términos del cálculo numérico, debido a que la ecuación de conservación de la cantidad de sedimento es condicionalmente estable, por lo que la resolución inadecuada de esta ecuación puede llevar a resultados alejados de la realidad.
- Al depender la ecuación de conservación de la porosidad de los sedimentos que componen la playa, se debe evaluar de manera correcta su magnitud ya que puede tener efectos importantes sobre la evolución morfodinámica, desviando los resultados del perfil en evolución.
- El esquema de Lax-Wendroff es ampliamente usado en modelos de evolución morfodinámica debido a que permite evitar el cálculo de velocidad de fase del fondo. Éste toma la aproximación numérica en dos pasos uno corrector y otro predictor, lo que implica volver a calcular la hidrodinámica a lo largo del perfil. Sin embargo, Long

(2008) plantea un esquema con mayor precisión numérica denominado WENO, el cual además requiere calcular la hidrodinámica una sola vez, resultando más eficiente.

A continuación se presentan las recomendaciones emanadas del presente trabajo:

Respecto del oleaje:

- Considerando la simulación mediante enfoque paramétrico, se recomienda en presencia de barras el uso de modelos de disipación del tipo energía límite, además si no se cuenta con datos disponibles para la calibración, se sugiere el uso de la Tabla 5.4 como primera aproximación, de modo de buscar una opción conservadora, es decir que no subestime las alturas de ola a lo largo del perfil.
- En el caso del oleaje espectral, es necesario mayores estudios acerca de la distribución de probabilidad de altura y período dentro de la zona de *surf*.
- Cada esquema de disipación puede ser extendido para oleaje espectral, sin embargo, en este trabajo solo se ha considerado la extensión comúnmente utilizada del modelo de BJ78. Este punto puede ser necesario para el caso chileno si se trata de tormentas bimodales, por lo cual se deben realizar esfuerzos por clarificar el comportamiento del oleaje de estas características en las playas de Chile (Pub. SHOA 3201, Instrucciones Oceanográficas N°1), en donde para efectos de la propagación del oleaje fuera de la zona de rotura es vital el uso del enfoque espectral.

Respecto de las variaciones del nivel medio:

- Se deben realizar un estudio más detallado de los efectos del Set-Up para las condiciones del oleaje en Chile, el cual contemple mediciones de laboratorio para un rango mayor de casos, así como también mediciones de campo.
- Si bien existen estimaciones efectivas del tensor de radiación a partir de las componentes espectrales, el autor desconoce documentación acerca de los efectos del uso de estas expresiones versus las de parámetros de resumen y se recomienda una revisión para clarificar la importancia del enfoque espectral en las ecuaciones para estimar las variaciones del nivel medio.
- Se recomienda realizar un estudio más acabado de los efectos del *roller*, debido a que este factor mostró ser importante en las corrientes y variaciones del nivel medio. Para lo cual sería recomendable realizar mediciones de laboratorio y campo de este fenómeno, siendo posible la utilización de análisis fotográfico de la rompiente.

Respecto de las corrientes:

- Se recomienda evaluar un rango mayor de casos de laboratorio de modo de estimar los errores cometidos en el uso de las formulaciones revisadas.
- Grasmeijer (2002) concluye que la hidrodinámica a partir de un parámetro de resumen es adecuada en el caso del estudio de la morfodinámica del perfil de playa, sin embargo, se recomienda evaluar la posibilidad de incorporar un módulo más completo de corrientes inducidas por oleaje, de forma de aproximar de mejor manera el transporte de sedimento.

- No se han considerado las corrientes longitudinales, por lo que se recomienda adicionar esta capacidad, además de evaluar las expresiones disponibles para su estimación.
- Se debe incorporar los efectos del flujo en un medio poroso para la zona de *swash* de modo que la aproximación del transporte de sedimentos sea adecuada.

Respecto del transporte de sedimentos:

- Se recomienda investigar acerca de las técnicas de medición de la tasa de transporte disponibles en la actualidad, e incorporarlas para un rango de condiciones asociadas al oleaje y corrientes que permitan mayor certidumbre en el uso de este módulo.
- Se recomiendan más análisis de sensibilidad de los parámetros de ajuste de las ecuaciones disponibles para la estimación del transporte y sus efectos en las variaciones del perfil.
- Se recomienda incorporar al análisis el transporte de sedimentos en suspensión a partir de la resolución de las corrientes en la columna de agua y evaluar los efectos en la evolución morfodinámica, en lo posible para un set de mediciones de laboratorio y de campo.
- Se recomienda incorporar factores de corrección para simular los efectos de la variabilidad del tamaño de los granos en el cálculo del transporte.
- Se recomienda adicionar el transporte longitudinal en el balance de sedimento de las celdas del perfil, además de clarificar la importancia de esta componente en condiciones de erosión y acreción.

Respecto de la evolución morfodinámica

- Se recomiendan estudios dedicados a este módulo como consecuencia directa del transporte de sedimento, los cuales se enfoquen en la ecuación de balance del sedimento en específico en los valores de porosidad y sus efectos a lo largo del perfil. Por este motivo, no se recomienda para efectos de la modelación efectuar variaciones de los resultados ajustando la porosidad si no existen mediciones que permitan estimar un valor de ella, debido a que en el sentido físico se está cambiando la densidad aparente del sedimento.
- Se recomienda efectuar un análisis de las geometrías convenientes para la celdas empleadas en la resolución de la ecuación de balance del sedimento y sus efectos en la estimación de la evolución morfodinámica

Finalmente, el modelo implementado representa adecuadamente las condiciones de oleaje, variaciones del nivel medio, corrientes y evolución morfodinámica. Su uso puede ser incorporado como una herramienta de apoyo a modelos ampliamente utilizados con el objetivo de obtener un segundo valor de referencia.

8. REFERENCIAS

- Ref. 1** Alex Apotsos, Britt Raubenheimer, Steve Elgar, R.T. Guza. "Testing and Calibrating Parametric Wave Transformation Models on Natural Beaches". Coastal Engineering. Vol. 55. p 224-235. 2007.
- Ref. 2** Alexander V. Babanin, Ian R. Young, Michael L. Banner. "Breaking Probabilities for Dominant Surface Waves on Water of Finite Constant Depth". Journal of Geophysical Research, Vol 106. 6, 11.659-11.676. 2001.
- Ref. 3** B.G Ruessink, D.J.R Walstra, H.N Southgate. "Calibration and Verification of a Parametric Wave Model on Barred Beaches". Coastal Engineering. 48, 139-149. 2003.
- Ref. 4** B.T. Grasmeijer, B.G. Ruessink. "Modeling of Waves and Currents in the Nearshore Parametric Versus Probabilistic Approach". Coastal Engineering. 49, 185-207. 2003.
- Ref. 5** Brian Greenwood and Peter R. Mittler. "Sediment flux and equilibrium slopes in a barred nearshore". Marine geology. 60, 79-89. 1984.
- Ref. 6** Bryan, K.P. Black, R.M. Gorman. "Spectral Estimates of Dissipation Rate Within and Near the Surf Zone". Journal of Physical Oceanography. 2003.
- Ref. 7** Cristopher Daly, Dano Roelvink, Ap Van Dongeren, "Short Waves Breaking Effects on Low Frequency Waves". Deltares. 2010.
- Ref. 8** Changhoon Lee, Jae-Sang Jung and Merrick C. Haller. "Asymmetry in Directional Spreading Function of Random Waves due to Refraction". Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. 2010.
- Ref. 9** Daniel T. Cox and Nobuhisa Kobayashi, ASCE. "Kinematic Undertow Model with Logarithmic Boundary Layer". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1997.
- Ref. 10** Dano Roelvink (P.I),ad reniers, Ap Van Dongeren, Jaap Van Thirl de Vries, Jamie Lescinski, Robert McCall. "XBeach Model Description and Manual". 2010.
- Ref. 11** Edward B. Thornton. "Transformation of Wave Height Distribution". Journal of Geophysical Research, Vol 88, NO C10, 5925-5938. 1983.
- Ref. 12** F. Becq-Girard et al."Wind-Generated Waves".Basic Coastal engineering. 1999.
- Ref. 13** Francoise Becq-Girard, Philippe Forget, Michel Benoit. "Non-linear Propagation of Unidirectional Wave Fields Over Varying Topography". Coastal Engineering. 38, 91-113. 1999.

- Ref. 14** Frederick L.W. Tang and C.F. Lin. "Practical Method for Evaluating Directional Spectra After Shoaling and Refraction". Conference Proceeding Paper Coastal Engineering. 780-793. 1986.
- Ref. 15** Frederick L.W. Tang, Shan Hwei Ou. "Researches on the Deformation of Wave Spectra in Intermediate Water Area by Calculation". Conference Proceeding Paper Coastal Engineering. 1972
- Ref. 16** Gerardo M.E. Perillo. "Dinámica de Transporte de Sedimento". 2003.
- Ref. 17** I.S. Podymov, et al. "Influence of JONSWAP Wave Spectra Form on Frequency Spectrum of Suspended Sediment Transport Values". Coastal Engineering Practice, ASCE. 2011.
- Ref. 18** Ian R. Young, Alexander V. Babanin. "Spectral Distribution of Energy Dissipation of Wind-Generated Waves due to Dominant Wave Breaking". Journal for Physical Oceanography. Vol.36. 2006.
- Ref. 19** Ida Bøker hedegaard and J.A Roelvink. "Cross-Shore Profile Models". Coastal Engineering, 21, 163-191. 1993.
- Ref. 20** Ida Bøker hedegaard, J.A Roelvink, Howard Southgate, Philippe Pechon, John Nicholson, Luc Hamm. "Intercomparison of Coastal Profile Models". International Conference Coastal engineering, Cap. 162. 1992.
- Ref. 21** J. A. Roelvink and M. J. F. Stive. "Bar-Generatíong Cross-Shore Flow Mechanisms on a Beach". Journal of Geophysical Research. Vol. 94. 4, 4785-4800. 1989.
- Ref. 22** J. William Kamphuis ASCE. "Alongshore Sediment Transport Rate". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 117. 1991a.
- Ref. 23** J. William Kamphuis ASCE. "Wave Height from Deep Water Through Breaking Zone". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 120. 1994.
- Ref. 24** J. William Kamphuis. "Incipient Waves Breaking". Coastal Engineering. 15,185-203.1991c.
- Ref. 25** J. William Kamphuis. "Wave Transformation". Coastal Engineering. 15, 173-184. 1991b.
- Ref. 26** J.A Battjes and J.P.F.M Janssen. "Energy Loss and Set-Up to Breaking of Random Waves". Coastal Engineering. 32, 569-587. 1978.
- Ref. 27** J.A. Battjes and M.J.F. Stive. "Calibration and Verification of a Dissipation Model for Random Breaking Waves". Journal of Geophysical Research, Vol.

90, 9159-9167. 1985.

- Ref. 28** J.A. Roelvink and M.J.F. Stive. "Bar-Generating Cross-Shore Flow Mechanisms on a Beach". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, 4785-4800. 1989.
- Ref. 29** J.C. Doering and A.J. Bowen. "Shoaling Surface Gravity Waves: A Bispectral Analysis". *Conference Proceeding Paper Coastal Engineering*. p 150-162. 1986.
- Ref. 30** J.S. Schoonees, A.K Theron. "Evaluation of 10 Cross-Shore Sediment Transport Morphological Models". *Coastal Engineering*, 25, 1-41. 1995.
- Ref. 31** J.T. Kirby. "Mass Flux and Undertow in a Surf Zone". *Coastal engineering*. 8, 347-365. 1984.
- Ref. 32** J.W. Kamphuis. "Introduction to Coastal Engineering and Management". Word Scientific. 2000.
- Ref. 33** James A. Bailard. "Modelling On-Offshore Sediment Transport in the Surfzone". *Coastal Engineering*. 1982.
- Ref. 34** James M.Kaihatu and James T. Kirby. "Nonlinear Transformation of Waves in Finite Water Depth". *Physics of Fluids*. Vol. 7. 1995.
- Ref. 35** Janhai Zheng et al. "Implementation and Evaluation of Alternative Wave Breaking Formulas in a Coastal Spectral Wave Model". *Ocean Engineering*. 35, 1090-1101. 2008.
- Ref. 36** John Casey Church and Edward B. Thornton. "Effects of Breaking Wave Induced Turbulence Within a Longshore Current Model". *Coastal engineering*. 20, 1-28. 1993.
- Ref. 37** Kos'yan R. "The Dependence of Suspended Sand Concentration on the Degree of Storm Development". *Coastal Engineering*. 2010.
- Ref. 38** L.H. Holthuijsen, N Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A.T.M.M Kierftemburg, E.F. Kriezi, M Zijlema. "SWAN Cycle III version 40.20". 2003.
- Ref. 39** L.H. Holthuijsen. "Waves in Oceanic and Coastal Waters". Technische Universiteit Delft. 2007.
- Ref. 40** Leonel Romero, W. Kendall Melville, Jessica M. Kleiss. "Spectral Energy Dissipation due to Surface-Wave Breaking". *Scripps Institution of Oceanography*. 2011.

- Ref. 41** Luc Hamm, Per A. Madsen and D. Howell Peregrine. "Wave Transformation in the Nearshore Zone: A Review". Coastal Engineering, Vol. 21. pp 5-39. 1993.
- Ref. 42** M. J. F. Stive. "A model for Cross-Shore Sediment Transport". Coastal Engineering. 114, 1550-1564. 1986.
- Ref. 43** M.A. Donelan, F. Ancil and J.C. Doering. "A Simple Method for Calculating the Velocity Field Beneath Irregular Waves". Coastal Engineering. 16, 399-424. 1992.
- Ref. 44** M.H. Freilich and R.T. Guza. "Nonlinear Effects of Shoaling Surface Gravity Waves". 2012.
- Ref. 45** M.H. Freilich, R.T. Guza, S.L. Elgar."Observations of Nonlinear Effects in Directional Spectra of Shoaling Gravity Waves". Journal of Geophysical Research, Vol.45. 6, 9645-9656. 1990.
- Ref. 46** M.H. Freilich, R.T. Guza, S.L. Elgar."Observations of Nonlinear Interactions in Directionally Spread Shoaling Surface Gravity Waves". Journal of Geophysical Research, Vol.98. 11, 20.299-20.305. 1993.
- Ref. 47** M.J.F. Stive. "A Model for Cross-Shore Sediment Transport". Coastal Conference of Coastal Engineering. Cap. 114. 1986.
- Ref. 48** M.S. Longuet-Higgins. "Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves, 2". Journal of Geophysical Research. Cap. 114. 1970b.
- Ref. 49** M.S. Longuet-Higgins. "Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves, 1". Journal of Geophysical Research. Cap. 114. 1970a.
- Ref. 50** Miguel A. Losada, Luis Tejador Martinez, Miguel A. Corniero, Jose L. Tejeria. "Metodos Espectrales De Prevision de Oleaje. Estudio Comparativo". Revista de obras Públicas. 1977.
- Ref. 51** Mustafa Kemal Cambazoglu and Kevin A. Haas, ASCE. "Numerical Modeling of Breaking Waves and Cross-Shore Currents on Barred Beaches". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2011.
- Ref. 52** P.D. Treloar. "Spectral Wave Refraction Under the Influence of Depth and Current". Coastal Engineering. Cap. 9, 439-452. 1986.
- Ref. 53** Peter Nielsen. "Suspended Sediment Concentrations Under Waves". Coastal Engineering. Cap. 10, 23-31. 1986.
- Ref. 54** Pham Thanh Nam et al. "A Numerical Model of Breach Morphological Evolution due to Waves and Currents in the Vicinity of Coastal Structures". Coastal engineering. 58, 863-876. 2011.

- Ref. 55** Poonchai Nuntakamol and Winyu Rattanapitikon. "Transformation of Mean and Highest One-Tenth Wave Heights Using Representative Wave Approach". *Kasetsart Journal*. Cap. 45. 1171-1181. 2011.
- Ref. 56** Quezada M. "Validación Directa en Aguas Someras de Modelo de Hindcast Olas Chile IV". White paper. 2012.
- Ref. 57** Qun Zhao, James T. Kirby, ASCE. "Bagnold Formula Revisited: Incorporating Pressure Gradient Into Energetics Models". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116. 2011.
- Ref. 58** Qun Zhao, James T. Kirby, Jack A. Puleo. "Modeling On-Shore Sediment Transport Using Energetic Models". *International Conference of Coastal Engineering*. 2008.
- Ref. 59** R. A. Bagnold. "An Approach to the Sediments Transport Problem from General Physics". *Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers*. 1966.
- Ref. 60** R.T Guza and B. Raubenheimer, Stive Elgar, T.H.C Herbers And Edith L. Gallagher. "Spectral Evolution of Shoaling and Breaking Waves on a Barred Beach". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102. 7, 15.797-15.805. 1997.
- Ref. 61** Recomendación para Obras Marítimas (ROM) 1.0-09 Cap. III. Anejo I "Agentes Climáticos en el Emplazamiento".
- Ref. 62** Recomendación para Obras Marítimas (ROM) 1.0-09 Cap. IV. Anejo I "Fundamentos y Justificaciones".
- Ref. 63** Robert B. Nairn and Howard N. Southgate. "Deterministic Profile Modeling of Nearshore Processes. Part 1. Waves and Currents". *Coastal Engineering*. Cap. 19. 29-56. 1993a.
- Ref. 64** Robert B. Nairn and Howard N. Southgate. "Deterministic Profile Modeling of Nearshore Processes. Part 2. Sediment Transport and Beach Profile Development". *Coastal Engineering*. Cap. 19, 57-96. 1993b.
- Ref. 65** Robin G.D. Davidson-Arnott and David C. Randall. "Spatial and Temporal Variations in Spectral of Storm Waves Across a Barred Nearshore". 1984.
- Ref. 66** Roshanka Ranasinghe, Charitha Pattiaratchi, Gerhard Masselink. "A Morphodynamic Model to Simulate the Seasonal Closure of Tidal Inlets". *Coastal Engineering*. Cap. 37, 1-36. 1999.
- Ref. 67** S. Beji, K. Nadaoka. "A Spectral Model for Unidirectional Nonlinear Wave Propagation over Arbitrary Depths". *Coastal Engineering*. Cap. 36, 1-16. 1999.
- Ref. 68** T.E. Baldock, P. Holmes, S. Bunker, P. Van Weert. "Cross-Shore Hydrodynamics within an Unsaturated Surf Zone". *Coastal Engineering*. Cap.

34, 173-196. 1998.

- Ref. 69** T.H.C. Herbes and Mark Orzech, Steve Elgar, R.T. Guza. "Shoaling Transformation of Wave Frequency-Directional Spectra". Journal of Geophysical Research. Vol.108. 1. 2003.
- Ref. 70** T.T. Janssen and J.A. Battjes. "A Note on Wave Energy Dissipation Over Step Beaches". Coastal Engineering. Vol.54. p 711-716. 2007.
- Ref. 71** Technical Standards and Comentararies for Port and Harbour Facilities in Japan. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Part II Design Conditions.
- Ref. 72** Troels Aagaard, Brian Geenwood and Jorgen Nielsen. "Cross-Shore Sediment Transport: a Field Test of the Bailard Energetics Model". International Coastal Conference of Coastal Engineering. 2008.
- Ref. 73** W.C. O'Reilly, ASCE, R.T. Guza. "Comparison of Spectral Refraction and Refraction-Diffraction Wave Models". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. Vol. 117. p 199-215. 1991.
- Ref. 74** W.H. Yang. "Breaking Wave Spectrum and Set-Down Set-Up in Shallow Water". Journal of Marine Science and Technogy. Vol.1. 73-79. 1993.
- Ref. 75** William R. Dally and Robert G. Dean, ASCE. "Suspended Sediment Transport and Beach Profile Evolution". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 110. 1984.
- Ref. 76** William R. Dally and Robert G. Dean. "Transformation of Random Breaking Waves on Surf Beat". Internation Conference of Coastal Engineering. Cap. 9.p 109-123. 1986.
- Ref. 77** William R. Dally, "Random Breaking Waves: Field Verification of a Wave-by-Wave Algorithm for Engineering Application". Coastal Engineering, Vol 16, 369-397. 1992.
- Ref. 78** Winyu Rattanapitikon and Tomoya Shibayama. "Energy Dissipation Model for Irregular Breaking waves".Coastal Engineering Conference Proc. 26, ASCE, pp. 112-125. 1998.
- Ref. 79** Winyu Rattanapitikon and Romanee Karunchintadit. "Comparison of dissipation models for irregular breaking waves". Songklanakarinn Journal of Science and Technology. 24. pp. 139-148. 2002.
- Ref. 80** Winyu Rattanapitikon and Sangapol Sawanggun. "Energy Dissipation Model for a Parametric Wave Approach Based on Laboratory and Field Experiments". 30, 333-341. 2008.
- Ref. 81** Winyu Rattanapitikon. "Calibration and Modification of Energy Dissipation Models for Irregular Wave Breaking". 2007.

- Ref. 82** Y Goda. "Random Seas And Design Of Maritime Structures". Advanced Series on Ocean Engineering. Volume 15. 2000.
- Ref. 83** Y. Kuriyama. "Process-Based One-Dimensional Model for Cyclic Longshore Bar Evolution". Coastal Engineering. Vol. 62. pp. 48-61. 2012.
- Ref. 84** Yasser Eldeberky, Per A. Madsen. "Deterministic and Stochastic Evolution Equations for Fully Dispersive and Weakly Nonlinear Waves". Coastal Engineering. Vol. 38, pp. 1-24. 1999.
- Ref. 85** Yasser Eldeberky. "Modeling Spectra of Breaking Waves Propagation Over a Beach". Ain Shams Engineering Journal. Vol. 2. pp. 71-77. 2011.
- Ref. 86** Yasser Eldeberky. "Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone". Thesis. 1996.
- Ref. 87** Yehuda Agnon et al. "Nonlinear Evolution of a Unidirectional Shoaling Wave Field". Coastal Engineering. Vol. 20, 29-58. 1993.
- Ref. 88** Yoshimi Goda. "A Performance Test of Nearshore Wave Height Prediction with CLASH Datasets". Coastal Engineering. Vol. 56, 220-229. 2009.
- Ref. 89** Yoshimi Goda. "Breaking of Regular and Random Waves with Associated Surf-Zone Hydrodynamics". Queens University Conference. 2011.
- Ref. 90** Yoshimi Goda. "Examination of the Influence of Several Factors on Longshore Current Computation with Random Waves". Coastal Engineering. Vol. 53. pp. 157-170. 2006.
- Ref. 91** Yoshimi Goda. "Reanalysis of Regular and Random Breaking Wave Statistics". Coastal Engineering Journal. Vol. 52. pp. 71-106. 2010.
- Ref. 92** Yoshimi Goda. "Wave Setup and Longshore Currents Induced by Directional Spectral Waves: Prediction Formulas Based on Numerical Computation Results". Coastal Engineering Journal. Vol 50. 2008.
- Ref. 93** Yoshimitsu Tajima. "Waves, Currents, and Sediment Transport in the Surf Zone along Long, Straight Beaches". Thesis. 2004.
- Ref. 94** Zhili Zou and Nicholas Dodd. "A Nonlinear Surf Beat Model". International Conference of Coastal Engineering. pp. 141. 1994.