



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**MORFODINÁMICA COSTERA BAJO CONDICIONES DE ROTURA TIPO
VOLUTA**

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS.
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DIANA EDITH RESÉNDIZ MORENO

TUTOR PRINCIPAL
ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. [Septiembre](#) 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Echávez Aldape Gabriel
Secretario: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
Vocal: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
1^{er}. Suplente: Dr. Silva Casarín Rodolfo
2^{do}. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. PEDROZO ACUÑA ADRIÁN

FIRMA

*A mis padres Blanca Moreno y Víctor Reséndiz,
Todo mi amor, cariño, respeto y gratitud*

Agradecimientos

Gracias a Dios que en esos momentos de debilidad y desmotivación, me has dado la fortaleza necesaria para avanzar y concluir con cada reto propuesto y que sabiamente me has guiado. Por hacerte presente a través de las personas que llenan de luz, amor y esperanza en mi vida y han sido pieza clave para poder llegar hasta esta etapa.

Agradezco a mis padres, porque a ellos les debo todos mis logros, porque sin su apoyo, amor y confianza no hubiera sido fácil llegar hasta este punto de mi vida y por ser el motor de mi vida. A mi mamá Blanca Moreno, no tengo palabras para agradecer todo el amor y cariño brindado a lo largo de mi vida. A mi papá Victor Resendiz por ser ejemplo de trabajo, por tu orientación y amor. Gracias por acompañarme en este trayecto de mi vida, porque este logro no solo es mío, ha sido gracias a ustedes.

A mi familia por apoyarme y motivarme siempre a seguir superándome, a todos mis tíos, primos y sobrinos que me llenan de felicidad. Muy especialmente a mi abuela Rosa por su preocupación y ternura, y a mi mamá Lupe que aunque ya no te encuentras con nosotros estás muy presente en mi corazón

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, a quien debo mi desarrollo académico.

Y quiero expresar mi agradecimiento al Instituto de Ingeniería (UNAM), por haberme brindado las facilidades, recursos y apoyos para la elaboración de este trabajo.

Agradezco a todos mis profesores que me guiaron y transmitieron conocimientos a largo de mi estadía en el posgrado, Dr. Echavez, M.I. Franco, Dr. Pozos, Dr. Ramón, Dr. Mariles. Y muy especialmente al Dr. Edgar y al Dr. Rodolfo que han sido ejemplo y grandes maestros en mi formación.

No me queda más que mostrar toda mi gratitud a mi tutor, el Dr. Adrián Pedozo por su paciencia, apoyo, consejo, por creer y confiar en mí. Y por haber sido un guía tanto en mi formación académica como personal.

A todos mis compañeros de maestría Chucho, Jonathan, Jorge, Fernando, muy especialmente a Irving, Miguel y Noe con quien tuve la oportunidad compartí este trayecto. A mis compañeros de cubículo que hicieron que todas esas horas de trabajo fueran alegres y sentirlos como de mi familia: Aurea, Edgar, Gerardo, Jair, Juan Pablo, Mirei, Raúl, Toño, en especial a César que me ayudó a la elaboración de las pruebas. No puedo olvidar agradecer a los chicos y chicas de laboratorio por su apoyo durante la ejecución de las pruebas. A mis amigas Abril, Alejandra, Ariadna, Diana, Salma, no tengo palabras para agradecerles su apoyo incondicional y cariño brindado, han sido como unas hermanas. A los amigos que siempre han estado en las buenas y malas Victor y Arturo.

En fin GRACIAS a todas esas personas que han sido parte de mi vida, y aunque algunas ya no se encuentran presentes, han dejado grandes enseñanzas en el camino..

A una persona que ha entrado en mi vida y de la cual no he recibido más que apoyo, confianza y mucho cariño, gracias Adrián.

RESUMEN

La respuesta morfológica de la playa, para cualquier clima del oleaje dado, está regida por la hidrodinámica de las zonas cercanas a la costa. En esta área se encuentra la zona de rompientes, esta región se extiende desde poco antes del rompimiento del oleaje incidente hasta la zona de lavado, la rotura se localiza dentro de esta zona, con el fin de disipar la energía y la transforma en turbulencia; y la zona de vaivén que se localiza en la franja superior de la playa sobre la que tienen lugar, el ascenso y descenso del oleaje; ambas zonas son altamente dinámicas y dentro de ellas se generan los mayores cambios morfológicos. Las zona de rompiente y de vaivén, juegan un rol importante en la forma de la playa y, por lo tanto, influyen en los procesos de erosión y de acreción que ocurren en la línea de costa. Los procesos hidrodinámicos en ambas regiones usualmente trabajan en forma interactiva, pero el efecto dominante de la zona de rompiente hacia la de vaivén es más significativo que viceversa. Los esfuerzos de investigación generalmente han considerado la zona de rompiente y de vaivén por separado y han tenido menos atención en el estudio de la caracterización simultánea del flujo en ambas regiones. Esto es particularmente importante para la rotura en voluta, donde las condiciones de frontera entre las dos regiones son completamente arbitrarias. Por esta razón, para comprender plenamente la respuesta morfológica de la playa requiere de una determinación correcta del movimiento del flujo que toma lugar dentro de la zona de rompiente que luego interactúa con el que ocurre en la zona de vaivén, de forma conjunta.

Esta tesis presenta los resultados de un trabajo experimental, para cuatro modelos de playas con diferentes tamaños de sedimentos, dos de los cuales presentan una distribución modal y los otros dos una distribución bimodal. Cada modelo de playa se ejecutó para seis diferentes condiciones hidrodinámicas, que cumplieran con la condición de romper en voluta.

Esta investigación presenta mediciones de la morfología de la playa, gradientes de presión y la relación de la velocidad con la influencia de los términos advectivos de la ola inducida por la rotura. El propósito es proporcionar un estudio detallado del balance de los procesos hidrodinámicos en la zona cercana a la costa en relación con la composición de sedimento utilizados en los modelos de playa, la morfología y distribución de sedimento a lo largo del perfil resultante.

ABSTRACT

The morphological response of a beach to any given wave climate is governed by nearshore hydrodynamics. In this area is find the surf zone, this region extends before the breaking wave to swash zone, the breaking wave is located within this area, in order to dissipate the energy and it is transform in turbulence; and swash zone, place on top of the beach which occur run-up and run-down of the waves. Both of the regions are highly dynamic areas within them generate the greatest morphological changes. The surf and swash zones, play an important role in shaping the beach, and hence, exert a control in the erosive and accretive processes occurring at the shoreline. Hydrodynamic processes in both of these regions usually work in interactive concert, but the connection from surf to swash is more significant than the opposite direction. Research efforts have generally considered the surf and swash zone processes separately, and less attention has been devoted to the simultaneous characterisation of the flow in both regions. This is particularly important for plunging breakers where the boundary between the two regions is quite arbitrary. However, a comprehensive understanding of the morphological response of a beach certainly requires an accurate determination of water flow motions which take place within the surf zone, and are then transformed and interact within the swash zone.

This thesis presents the results of experimental work, where beaches used four different models of sediment sizes; two of them have a modal distribution and the other two a bimodal distribution. Each beach model performed for six different hydrodynamic conditions, with a plunging wave, this type of breaking wave generate high levels of turbulence.

This investigation presents high-resolution measurements of beach morphology, pressure gradient and its relation to the wave velocity with advection terms induced by plunging wave breaking in the laboratory. The aim is to provide a detailed study of the balance of hydrodynamic processes in the nearshore zone in relation to beach composition, sediment sorting, and morphology.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

Lista de Figuras iii

Lista de Tablas.....vii

Lista de Ecuacionesvii

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1 OBJETIVO 3

1.1.1 General 3

1.1.2 Específicos 3

1.1.3 Alcances y limitaciones 3

1.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO 4

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES 5

2.1 SISTEMAS COSTEROS 5

2.1.1 Playa 6

2.1.2 El sistema costero morfodinámico 6

2.2 ROTURA DEL OLEAJE 7

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ROMPIENTES Y VAIVÉN 8

2.3.1 Condiciones de forzamiento para la zona de lavado 9

2.3.2 Asimetría en el transporte de sedimentos en la zona de lavado 10

2.3.3 Infiltración y exfiltración de flujos subterráneos 11

2.3.3 Efectos de turbulencia 12

2.3.4 Recolección de datos de la zona de lavado 13

2.4 PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN LA ZONA DE LAVADO 13

2.5 TIPO DE SEDIMENTO 15

2.6 GRADIENTE DE PRESIÓN 16

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA.....	19
3.1 INSTRUMENTACIÓN.....	19
3.1.1 Descripción del canal.....	20
3.1.2 Descripción de la rampa.....	20
3.1.3 Sensores de presión.....	21
3.1.4 Sensores de nivel.....	22
3.1.5 Velocímetro acústico tipo Doppler.....	24
3.1.6 Cámara de alta velocidad y luces tipo Fresnel.....	24
3.1.7 Equipo para pruebas de granulometría.....	26
3.2 CONDICIONES DE OLEAJE.....	26
3.3 MODELO FÍSICO (CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO).....	28
3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	32

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
4.1 SELECCIÓN DE EXPERIMENTOS.....	37
4.2 RESPUESTA MORFOLÓGICA.....	38
4.2.1 Resultados prueba H=12 cm, T=1.0 s.....	40
4.2.2 Resultados prueba H=16 cm, T=1.0 s.....	41
4.2.3 Resultados prueba H=12 cm, T=1.5 s.....	42
4.2.4 Resultados prueba H=16 cm, T=1.5 s.....	43
4.2.5 Resultados prueba H=12 cm, T=2.0 s.....	44
4.2.6 Resultados prueba H=16 cm, T=2.0 s.....	45
4.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS.....	48
4.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTO.....	53
4.4.1 Tipo de transporte de sedimento.....	53
4.4.2 Volúmenes de transporte de sedimento.....	54
4.5 CAMPO DE VELOCIDADES.....	56
4.5.1 Series temporales de velocidad (ADV).....	57
4.5.2 Campos de velocidades con la técnica de BIV.....	59

4.6	VALIDACIÓN DE SERIES TEMPORALES EN ZONA DE ROTURA, BIV/ADV	64
4.7	GRADIENTE DE PRESIÓN VS TÉRMINOS DE EULER.....	65
4.7.1	Advección	65
4.7.2	Gradiente de presión	72
4.8	EFFECTOS DE LA ESCALA Y LABORATORIO	74
4.9	INTEGRACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA Y MORFOLOGÍA.....	75
CAPÍTULO 5		
	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	77
5.1	CONCLUSIONES	77
5.2	PERSPECTIVAS FUTURAS	79
	REFERENCIAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Terminología del perfil de playas (adaptado del shore protection manual, 1984).....	6
Figura 2.2	Componentes primarios involucrados en morfodinámica costera.....	7
Figura 2.3	Tipos de rotura de oleaje.	8
Figura 2.4	Diagrama conceptual del sistema morfodinámico de la interacción en la zona de rompiente y de vaivén (G. Masselink, J.A. Puleo, 2006).	9
Figura 2.5	Esquema de ilustración de efectos de la infiltración y exfiltración en la zona de lavado.	11
Figura 2.6	Crecimiento de la capa límite durante las fases de ascenso y descenso del oleaje en la zona de lavado (línea punteada: posición anterior).	12
Figura 2.7	Esquema de ilustración de los efectos de transporte de sedimentos en la zona de lavado.	14
Figura 2.8	Esquema del ciclo de la zona de lavado (línea gruesa representa el perfil de playa, línea delgada la elevación de la superficie libre, línea punteada es el nivel freático, línea discontinua el nivel freático en respuesta a la acción del ascenso máximo, y las flechas indican la dirección de flujo.	15
Figura 3.1	Canal de oleaje del instituto de ingeniería de la UNAM.....	20

Figura 3.2 A) Dimensionamiento e instalación de la rampa en el canal de oleaje, B) Esquema de instalación de la rampa, C) Ejemplo de la colocación de la cama de sedimento (modelo 3: mezcla de color rojo-verde) colocada de 12 cm de espesor sobre la cama impermeable de acrílico.....	21
Figura 3.3 A) Arreglo de los sensores de presión utilizado, B) Sensores de presión marca Keller utilizados en las pruebas.	22
Figura 3.4 Ubicación de los 6 sensores de presión, posicionados a 2.25 m del pie de la rampa con separación entre sí de 2 cm.	22
Figura 3.5 Panel superior: localización de los sensores (A). Panel inferior izquierdo: sensores de nivel empleados en el canal de oleaje (B). Panel inferior derecho: monitor de sondas para la calibración de los sensores de nivel (C).....	23
Figura 3.6 A y B) Ejemplo del uso del vectrino en la prueba H16T20 para el Modelo 4 (grava roja), C) ADV utilizado para las pruebas.	24
Figura 3.7 A) Cámara de alta velocidad marca Fastec, modelo Hispec. B) Cámara de alta velocidad marca PCO, modelo Dimax HD, C) Equipo de iluminación fresnel de 650 w utilizado en las pruebas, D) Arreglo empleado para la técnica no intrusiva conocida como BIV.....	25
Figura 3.8 A) Máquina ro-top y mallas, B) Báscula, C) Horno Lab-Line	26
Figura 3.9 Presiones de impacto adimensionales vs el número de Iribarren (\diamond - las presiones de impacto para el caso 1 $H_s = 1$ m $T_p = 4.1$ s; \circ - presiones de impacto para el caso 2 $H_s = 1.2$ m $T_p = 4.2$ s; \blacktriangledown - las presiones de impacto para el caso 3 $H_s = 1$ m $T_p = 5.2$ s). Pedrozo-Acuña et al. (2008).....	27
Figura 3.10 Curvas granulométricas de los 3 materiales utilizados en los experimentos.	28
Figura 3.11 Curvas granulométricas de las 4 condiciones de los modelos físicos estudiados.....	29
Figura 3.12 Muestras de las mezclas de los escenarios para las playas analizadas y su relación con la permeabilidad e implicación de procesos físicos	30
Figura 3.13 Metodología para el análisis de resultados.	35
Figura 4.1 Condición H12T10. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	41
Figura 4.2 Condición H16T10. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	42
Figura 4.3 Condición H12T15. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	43

Figura 4.4 Condición H16T15. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	44
Figura 4.5 Condición H12T20. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	45
Figura 4.6 Condición H16T20. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).	46
Figura 4.7 A) Condición H12T10; B) Condición H12T15, C) Condición H12T20. (Modelo 3: mezcla rojo-verde).	50
Figura 4.8 A) Condición H16T10; B) Condición H16T15, C) Condición H16T20. (Modelo 3: mezcla rojo-verde).	52
Figura 4.9 Condición H16T20 (Modelo 1: mezcla rojo-blanco).....	52
Figura 4.10 Volúmenes de sedimento para las pruebas de laboratorio. Paneles izquierdos representan alturas de olas de 12 cm (paneles a, c, e) y los paneles derechos alturas de 16 cm (paneles b, d, f), para periodos de 1, 1.5 y 2 respectivamente.	56
Figura 4. 11 Los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectrino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y ubicación del vectrino. La ubicación se encuentra sobre la formación de la barra para una condición de oleaje de H=16 cm y T=2.0. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).	57
Figura 4.12 Los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectrino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y de la ubicación del vectrino. La ubicación se encuentra en el punto de rotura para una condición de oleaje de H=16 cm y T=2.0s. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).....	58
Figura 4.13 los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectrino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y de la ubicación del vectrino. La ubicación se encuentra en la zona de lavado para una condición de oleaje de H=16 cm y T=2.0s. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).	59
Figura 4.14 Mapas espacio-temporales, para una condición de altura de oleaje H=16 cm y un periodo de T=2.0 s, para el Modelo 4: Grava roja (alta permeabilidad).....	60
Figura 4.15 Evidencia fotográfica, para una condición de altura de oleaje h=16 cm y un periodo de t=2.0 s, para el modelo 4: Grava roja (alta permeabilidad).....	61
Figura 4.16 Mapas espacio-temporales, para una condición de altura de oleaje H=16 cm y un periodo de T=2.0 s, para el Modelo 1: Mezcla de grava roja y arena blanca (baja permeabilidad).....	62
Figura 4.17 Evidencia fotográfica, para una condición de altura de oleaje h=16 cm y un periodo de t=2.0 s, para el Modelo 1: Mezcla de grava roja y arena blanca (baja permeabilidad)	63

Figura 4.18 Comparación de velocidades técnica del BIV y ADV, para la prueba H12T10 del Modelo 3 (50/50 de grava roja y grava verde). A) Localización de los puntos de comparación; B) Análisis en el punto de rotura; C) Análisis en escalón.....	64
Figura 4.19 Para la condición de H=16cm y T=2s. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	66
Figura 4.20 Para la condición de H=16cm y T=1.5s. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	67
Figura 4.21 Para la condición de H=16cm y T=1s. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	68
Figura 4.22 Para la condición de H=12cm y T=2. Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	69
Figura 4.23 Para la condición de H=12cm y T=1.5s. Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	70
Figura 4.24 Para la condición de H=12cm y T=1s. . Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales)y vaivén (paneles izquierdos).	71
Figura 4.25 Gradiente de presión para las condición de altura de H=16 cm y T=1.5s, para las cuatro condiciones estudiadas. Paneles superiores representan señales de presión, paneles inferiores simbolizan el gradiente de presión, para la condición hidrodinámica analizada	73

Figura 4.26 Gradiente de presión para las condición de altura de H=16 cm y T=2.0 s, para las cuatro condiciones estudiadas. Paneles superiores representan señales de presión, paneles inferiores simbolizan el gradiente de presión, para la condición hidrodinámica analizada. 74

Figura 4.27 Esquema conceptual de la interacción entre los procesos producidos en las zonas cercanas a las costas, con el resultado morfológico, de acuerdo a los resultados mostrados en este trabajo experimental..... 76

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Distancia entre los sensores de nivel. 23

Tabla 3.2 Condiciones de oleaje seleccionado 27

Tabla 3.3 Propiedades de los materiales utilizados en los experimentos. 29

Tabla 3.4 Propiedades de los materiales de los modelos físicos..... 30

Tabla 3.5 Velocidades de caída de los cuatro materiales empleados para la elaboración de las playas 31

Tabla 3.6 Tabla resumen del posicionamiento del vectrino para cada escenario de playa para la condición H16T20..... 32

Tabla 3.7 Parámetros fotográficos estudiados. Para las pruebas del Modelo 2 (grava verde) 34

Tabla 3.8 Condiciones de estudio seleccionadas..... 35

Tabla 4.1 Valores de los parámetros Dean..... 38

Tabla 4.2 Números de Dean 39

Tabla 4.3 Profundidad de cierre de acuerdo a Hallermeier (1981). 40

Tabla 4.4 Tipo de perfil..... 47

Tabla 4.5 Relación entre número de Dean y clase de transporte predominante 53

Tabla 4.6 Clasificación del tipo de transporte de acuerdo al número de Dean para las pruebas de laboratorio realizadas 54

Tabla 4.7 Volúmenes de erosión y de acreción experimentales 55

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2.1	17
Ecuación 2.2	18
Ecuación 3.1	28
Ecuación 3.2	28
Ecuación 3.3	31
Ecuación 3.4	31
Ecuación 4.1	38
Ecuación 4.2	39
Ecuación 4.3	65
Ecuación 4.4	65
Ecuación 4.5	72

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable de las zonas costeras requiere de un mejor entendimiento de los procesos locales que ocurren en ella. Desde hace muchas décadas, los responsables de la gestión costera observaron la necesidad de tener una mejor comprensión de la dinámica litoral, a fin de crear métodos y soluciones que funcionen de forma conjunta con los procesos presentes en una playa (Simm et al. 1996; Dean et al. 1976; Silvester 1960; Bruun 1954). Esto aplica, entre otros, a la identificación de mecanismos involucrados en la dinámica litoral y los procesos asociados al transporte de sedimentos. Las playas alrededor del mundo son afectadas por procesos físicos tales como el oleaje, mareas, corrientes y vientos, es decir, son función del clima marítimo. Por otra parte, la presión demográfica debido a la densidad de población y extensiones de territorio ocupadas sobre las costas, y el incremento en el nivel del mar, hacen evidente la necesidad de investigación enfocada en procesos costeros, a fin de que se pueda contar con información adecuada, que pueda ser utilizada por ingenieros para poder enfrentar nuevos retos.

El oleaje se genera como resultado de la transferencia de energía por parte de la atmósfera al océano por medio de los vientos incidentes sobre la superficie del mar en áreas de gran magnitud. A pesar de las dimensiones del área de generación, la energía del oleaje es disipada en una pequeña área cercana a la costa, conocida como zona de rompientes. La rotura del oleaje en esta zona, es responsable de la transformación del oleaje de un patrón ordenado de movimiento oscilatorio, a uno caótico donde la turbulencia y las corrientes generadas movilizan y suspenden al sedimento que conforma la playa. Las corrientes generadas pueden así transportar grandes cantidades de sedimento en todas direcciones, y en algunos lugares pueden alcanzar volúmenes tan grandes como cientos de miles de metros cúbicos de arena al año.

Investigadores a nivel mundial han reconocido las limitaciones existentes para la representación de la respuesta morfológica de una playa ante la acción del oleaje en la zona de rompientes (e.g. Davis y Fox 1971; Wright, et. al. 1985; Sánchez-Arcilla y Jiménez, J. A. 1994; Losada, et. al. 1995; Vidal, et. al. 1995; Bernabeu, et. al. 2001). En esta región, el flujo se caracteriza por ser altamente no lineal/turbulento y existen interacciones no lineales entre componentes. La rotura del oleaje es, sin duda, el proceso más llamativo y, al mismo tiempo, el menos entendido de todos. Los expertos concuerdan en que la determinación del campo de velocidades y su interacción con los sedimentos en esta zona, representan los problemas más complejos dentro del campo de la ingeniería costera (e.g. Raubenheimer, 2002).

La falta de conocimiento de la rotura del oleaje, turbulencia, interacciones no lineales, en conjunto con el transporte de sedimentos hace muy difícil la predicción correcta del reacomodo del material sobre una playa (e.g. cambio del perfil). También existen muchos otros factores que no son posibles de predecir, pero son importantes considerar, como los agentes atmosféricos y la respuesta de sistemas ecológicos, sin embargo en este estudio no se considerarán estos factores. Lo que a su vez complica el diseño adecuado del funcionamiento de medidas de mitigación (ej. rellenos artificiales). El reconocimiento de las limitaciones de los métodos de predicción actuales, junto con la disponibilidad de nuevos modelos numéricos, técnicas de medición en laboratorio y de monitoreo “*in situ*”, ha motivado un resurgimiento en el interés por realizar estudios diagnósticos que tengan como objetivo un mejor conocimiento de la morfodinámica litoral.

Los estudios recientes abocados a este tema indican que a fin de obtener una mejor caracterización de la dinámica litoral, es necesario investigar la relación entre el gradiente de presión inducido por el oleaje en rotura y el movimiento de sedimentos en el fondo (Pedrozo-Acuña et al., 2008, 2010). Esta idea ha revolucionado el concepto de cálculo del transporte de sedimentos, el cual tiene su origen en la conceptualización propuesta para flujos uniformes unidireccionales, que utiliza únicamente la velocidad en el fondo y un tamaño de grano representativo único para determinar el volumen de material en movimiento.

Entonces, existe una evidente necesidad de investigar más a fondo los procesos físicos involucrados en la morfología de playas, con particular énfasis en la interacción entre la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en la zona de rotura. El alto costo de los estudios de campo en esta región, además de las dificultades asociadas a la instalación de equipos en un área donde se presentan grandes olas, velocidades intensas, turbulencia y condiciones aleatorias, indican la pertinencia de investigación básica a través de trabajos experimentales en laboratorio bajo condiciones hidrodinámicas controladas. Estudios de este tipo han probado ser una alternativa útil para identificar mecanismos importantes para la extensión del conocimiento de la dinámica litoral.

Esta tesis de maestría presenta un estudio en que se han investigado, de manera integral, los procesos morfodinámicos en la zona de rompientes, por medio de un trabajo experimental detallado. Se consideró para los ensayos que el oleaje rompiera en voluta. Este tipo de rotura genera grandes niveles de turbulencia que puede provocar un efecto mayor en el transporte de sedimentos y las grandes cantidades de intrusión de aire característico de un flujo turbulento, se pudo hacer uso de la técnica no intrusiva conocida como la técnica de trazado de burbujas (*BIV*), en conjunto con una técnica intrusiva conocida como velocímetro acústico (*ADV*) para estimar los campos de velocidades. Estos experimentos se usa una mezcla bimodal de sedimentos en el laboratorio, lo que constituye un aspecto novedoso en los estudios de transporte de sedimentos que hasta ahora sólo consideran un tamaño de grano único.

La investigación propuesta da continuidad a estudios previos abocados al estudio de la función del gradiente de presión inducido por el oleaje en rotura sobre el transporte de sedimentos considerando una mezcla bi-modal en el material de la playa (Pedrozo-Acuña et al., 2010, 2011).

1.1 OBJETIVO

1.1.1 General

Analizar la respuesta de un perfil de playa conformado por sedimento modal y bimodal a las condiciones hidrodinámicas impuestas por oleaje con rotura de tipo voluta.

1.1.2 Específicos

Para cumplir con el objetivo general, se trabajarán los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una investigación experimental de los procesos físicos asociados al oleaje estudiado, bajo las mismas condiciones iniciales de análisis.
- Medir de los procesos físicos dentro de la zona de rompientes y de vaivén, mediante técnicas intrusivas y no intrusivas.
- Analizar la influencia que tiene la advección sobre el transporte de sedimentos.
- Asociar los procesos que ocurren dentro de las zonas cercanas a la costa para generar una determinada morfología.
- Caracterizar la morfología con las condiciones estudiadas.
- Contribuir en el diagnóstico a detalle de los procesos hidrodinámicos durante la rotura del oleaje, así como en las zonas de rompiente y de lavado.

1.1.3 Alcances y limitaciones

Los alcances de este trabajo experimental permitirán observar la importancia de las velocidades dentro de la respuesta de los perfiles, sin considerar otros factores externos y de evaluar la influencia de los términos advectivos dentro de la zona de rompientes y de vaivén.

Hay que considerar que este trabajo presenta limitaciones, la más importante es que los resultados que se obtienen todavía no son posibles utilizar en la ingeniería; sin embargo, aporta un estudio a detalle de la influencia de los procesos que pueden contribuir en el transporte de sedimentos en las zonas cercanas a las playas. Entre otras limitaciones se encuentra que solo se considera la rotura tipo voluta para los experimentos sin tomar en cuenta las roturas por descrestamiento y oscilación por lo cual no se pueden generalizar los resultados. Así mismo las pruebas desprecian los efectos debido al nivel freático ya que el nivel freático coincidía con el nivel de referencia. El forzamiento externo considerado solo fue el provocado por el oleaje, sin embargo tampoco se considera la aleatoriedad del oleaje, es decir que se trabajó con oleaje monocromático para tener condiciones controladas en el laboratorio. Y se debe de considerar la incertidumbre que existe de las técnicas de medición de las velocidades. Solo es posible considerar el cambio morfológico transversal.

1.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo está estructurado en seis capítulos que se describen a continuación:

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 2. Antecedentes

En esta sección se presenta una revisión del estado del arte, a través de una serie de investigaciones previas orientadas al estudio de los mecanismos que se consideran importantes en el transporte de sedimentos. En específico se detallan los estudios previos sobre el papel de los proceso de advección (variación espacio-temporal de la velocidad) sobre el transporte de sedimentos.

Capítulo 3. Experimentos de laboratorio

En este capítulo se incorpora una breve descripción del canal de oleaje utilizado para las pruebas experimentales, así como los equipos de medición utilizados para el análisis de los mecanismos de transporte que se presentan en la zona de rompientes y lavado. Se describen a detalle las condiciones de oleaje seleccionado y las diferentes playas construidas a partir de la combinación de distintos tamaños de grano.

Capítulo 4. Metodología

Aquí se presentan las metodologías empleadas en la investigación de laboratorio. En donde se describe con mayor detenimiento la técnica del trazado de burbujas para la medición del campo de velocidades, el análisis granulométrico y las pruebas de densidad.

Capítulo 5. Resultados

En este apartado se muestran los resultados de la distribución de sedimentos al llegar a una condición de equilibrio, así mismo se presentan los resultados de la morfología de las playas bajo las condiciones de oleaje incidente seleccionadas. De igual forma, se presentan las valoraciones de los campos de velocidad bajo cada condición de oleaje y los efectos que se observan en función de la porosidad de la playa. Por último, se incorpora un análisis de los términos de advección y su relación con el gradiente de presión medido.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo presenta las conclusiones de este trabajo de forma resumida y algunas sugerencias para las futuras líneas de investigación que se desprenden de esta tesis.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Las costas son las regiones donde el oleaje sufre las transformaciones más drásticas, pues es el lugar donde se produce el fenómeno de la rotura, que es responsable de procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos. En particular, la zona de rotura del oleaje tipo voluta se caracteriza por la liberación repentina de la energía que transporta la onda por medio de la transformación de un flujo oscilatorio a uno caótico y turbulento lo que da pie a la generación de vórtices y al atrapamiento de grandes cantidades de aire procesos que a su vez modifican el campo de velocidades en esta región.

Entre los procesos físicos que afectan la forma de la costa se encuentran: las generadas por el oleaje, la energía liberada en la rotura, corrientes. De esta forma, es necesario el entendimiento de dichos procesos físicos, para comprender su relación con el transporte de sedimentos. Sin embargo, la interacción entre la hidrodinámica, los sedimentos y la morfología, ha probado ser uno de los temas de mayor complejidad en el campo de la ingeniería costera.

Dentro de la zona próxima a la costa (ver Figura 2.1), las regiones más activas desde el punto de vista morfodinámico, son las zonas de rotura y vaivén. Diversos estudios han demostrado que ambas juegan un papel importante en la distribución y movimiento del sedimento, por lo que es muy probable que el balance de procesos que se presenta en ambas regiones controlen la generación de procesos erosivos y de acreción en una playa (Brocchini y Baldock, 2008). En la zona de rotura, se producen gran cantidad de flujos turbulentos que originan agitación en los sedimentos permitiendo su transporte por medio del flujo (Baldock et al. 2010, Butt et al. 2004, Elfrink y Baldock 2002, Deigaard et al. 1986). Para la comprensión de la respuesta morfológica de una playa es necesario determinar el movimiento del agua en la zona de rompiente y la zona de vaivén (Masselink y Puleo, 2006).

2.1 SISTEMAS COSTEROS

Los ambientes costeros representan todas las regiones que definen la interfaz entre los procesos terrestres y marinos. En estas regiones se encuentran depósitos de sedimentos con diversas características (alrededor del mundo los sistemas costeros están constituidos por materiales sueltos, ya sean gravas, arenas o lodo), que se ven afectados por su exposición a procesos tales como oleaje, viento y corrientes (clima marítimo). La interacción entre los forzamientos y el sedimento nativo, es la responsable de generar una morfología dada.

2.1.1 PLAYA

Las playas representan una defensa natural ante el embate de forzamientos extremos, oleaje intenso y mareas de tormenta. La [Figura 2.1](#) presenta la descripción de la zonación de la zona costera, la cual está constituida por cuatro secciones: costa afuera, zona cercana a la costa, la playa y la costa.

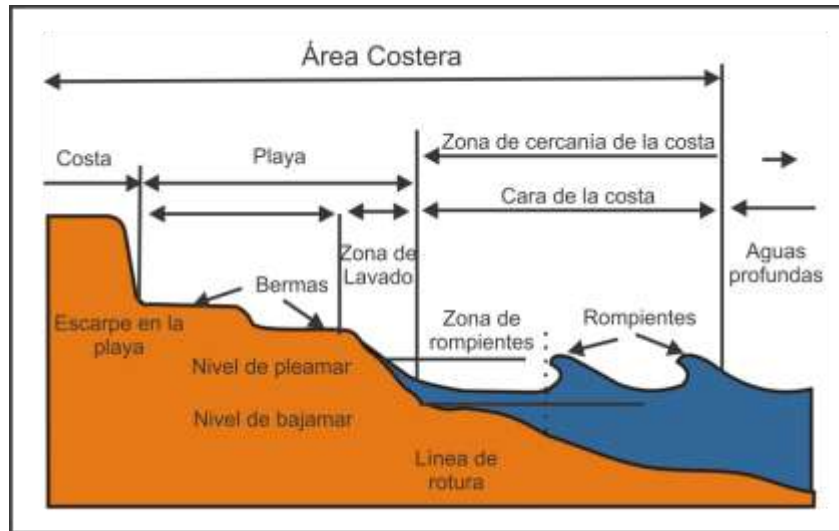


Figura 2.1 Terminología del perfil de playas (adaptado del shore protection manual, 1984).

2.1.2 EL SISTEMA COSTERO MORFODINÁMICO

Aplicando un enfoque de sistemas, [Wright y Thom \(1977\)](#), observaron que un ambiente costero representa un sistema dinámico con variables de entrada y salida de energía y material claramente identificables, que están controladas por las condiciones del medio ambiente (ver [Figura 2.2](#)). De hecho, [Wright y Thom \(1977\)](#) fueron los primeros en introducir el concepto de “morfodinámica costera” para su enfoque y definieron morfodinámica como “el ajuste mutuo entre la topografía y la dinámica de fluidos que involucra transporte de sedimentos”.

Los componentes primarios involucran a los procesos hidrodinámicos (oleaje, marea, corriente y vientos), así como el transporte de sedimento la morfología y la estratigrafía. Los condiciones de frontera o factores externos, representan aquellas condiciones del medio ambiente que son dadas, es decir, la geología, el tipo de sedimentos y el clima. Como se ha dicho, la interacción entre todos estos componentes se presenta con mayor claridad en la zona de cercanías de la costa que comprende las zonas de rotura y de vaivén. Por lo tanto la comprensión de la hidrodinámica en estas regiones es de gran importancia.

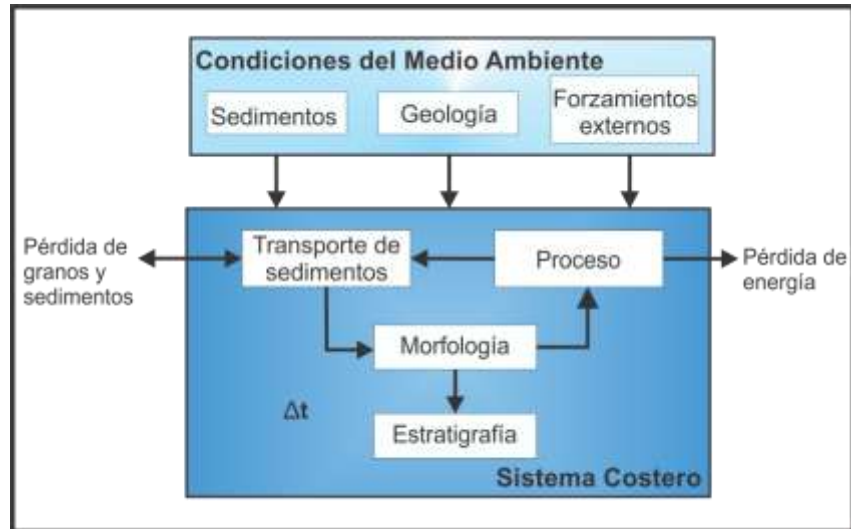


Figura 2.2 Componentes primarios involucrados en morfoodinámica costera.

2.2 ROTURA DEL OLEAJE

Dentro de los principales procesos involucrados en la hidrodinámica de la costa, uno de gran importancia es el de la rotura del oleaje. Este proceso disipador de energía, se origina como resultado del proceso de someramiento, es decir por la reducción de la profundidad se produce un incremento en la altura de ola, hasta que se produce un punto de inestabilidad que resulta en el colapso de la ola hacia la dirección de propagación.

Existe el consenso entre la comunidad científica, de que la determinación del campo de velocidades y su interacción con los sedimentos en la zona de rotura, representan los problemas más complejos dentro del campo de la ingeniería costera (Govender et al. 2002, Kimmoun y Branger 2007, Bakhtyar et al. 2010). Como resultado, la comprensión y descripción de los flujos, el transporte de sedimento y los cambios morfológicos en esta zona, siguen siendo temas totalmente abiertos a la investigación.

Los procesos que se generan como resultado de la rotura del oleaje son: la turbulencia, aumento y disminución del nivel medio del mar, oscilaciones infra-gravitatorias, corrientes y transporte de sedimento. Estos procesos producen a su vez el cambio en la morfología de la playa en función de su intensidad. Existen innumerables autores que han expuesto los criterios de rotura para su clasificación basado en la pendiente de fondo, peralte de olas, entre los que se encuentran Batjjes (1974); Losada and Giménez-Curto (1979); Sánchez-Arcilla y Lemos (1990), Miche (1994), Weggel (1972), Kiminsky y Kraus (1993). La clasificación se ha realizado para tres tipos de rompientes: descrestamiento (*spilling*), voluta (*plunging*) y de oscilación (*surging*), aunque también es aceptado el tipo de rotura denominada como colapso (*collapsing*), ver Figura 2.3. La rotura por descrestamiento se da sobre una pendiente suave y oleaje esbelto; la voluta se da para una pendiente pronunciada y un oleaje medianamente peraltado; y el rompimiento por oscilación se genera con una pendiente pronunciada y olas de poca inclinación

Las condiciones de rotura más llamativas desde un perspectiva visual, son las que se presentan bajo un rotura intensa tipo voluta. Debido a que es un área donde se presentan grandes olas, velocidades intensas, turbulencia y condiciones aleatorias, indican la pertinencia de investigación básica a través de trabajos experimentales en laboratorio bajo condiciones hidrodinámicas controladas.

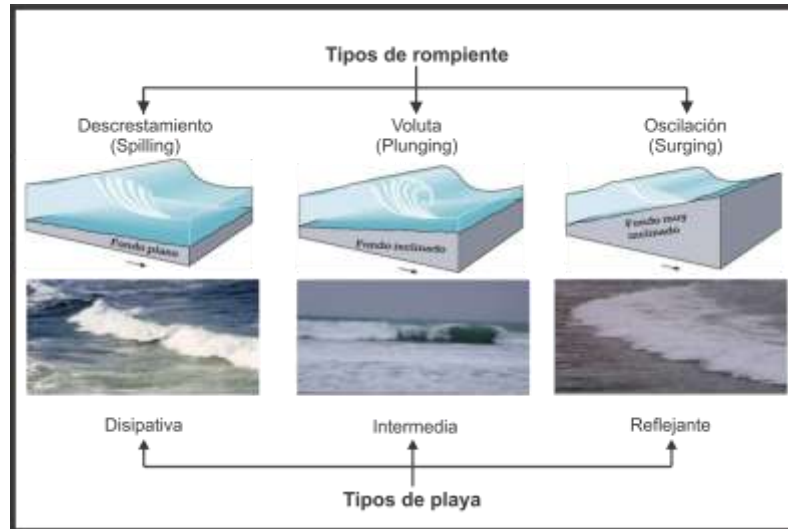


Figura 2.3 Tipos de rotura de oleaje.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ROMPIENTES Y VAIVÉN

La franja superior de la playa sobre la que tienen lugar, el ascenso y descenso del oleaje, mejor conocida como zona de lavado, está íntimamente ligada a la zona de rompientes. En los últimos años, la caracterización y estudio de esta región, ha recibido gran atención por parte de los investigadores a nivel mundial, dado que en esta zona se determina la respuesta morfológica de una playa ante las condiciones de oleaje incidente (Elfrink y Baldock, 2002).

La escala temporal de las oscilaciones en esta zona es altamente variable, con rangos que van desde los segundos en playas con pendientes pronunciadas (Hughes et al., 1997) hasta los minutos en playas con pendientes suaves (e.g. Butt y Russell, 1999). La zona de lavado está caracterizada por flujos no uniformes con grandes velocidades e intensa turbulencia, asociadas a grandes concentraciones de sedimento en movimiento (Puleo et al. 2000). De hecho, las tasas de transporte asociadas a esta zona son mucho mayores a aquellas que se encuentran en la zona de rompientes (Puleo et al. 2000, Masselink et al. 2005), con concentraciones de sedimento en suspensión mayores a los 100kg/m^3 , cerca del fondo. Esto es especialmente cierto para playas reflejantes, con pendientes pronunciadas, donde la mayor parte del transporte longitudinal ocurre en la zona de lavado y puede constituir la mayor parte de todo el arrastre litoral longitudinal (Lampe et al. 2003; Masselink y Puleo, 2006).

De forma similar a la zona de rotura, esta región del perfil de una playa exhibe una considerable diversidad morfológica (e.g. Ortega-Sánchez et al. 2008). En este sentido, existen diversos esfuerzos encaminados a entender y cuantificar los procesos físicos que actúan sobre esta zona, tal y como ha sido registrado en las reseñas de la zona de lavado presentadas por Butt y Russell (2000), Elfrink y Baldock (2002), Masselink y Puleo (2006) y Hughes y Moseley (2007).

La interacción entre ambas zonas define los cambios morfológicos que se observan en las playas. En la Figura 2.4 se muestra un mapa conceptual en donde se ilustra la interacción dentro de la zona de rompiente y de lavado en un sistema costero en la morfodinámica (adaptada de Puleo y Masselink, 2006).

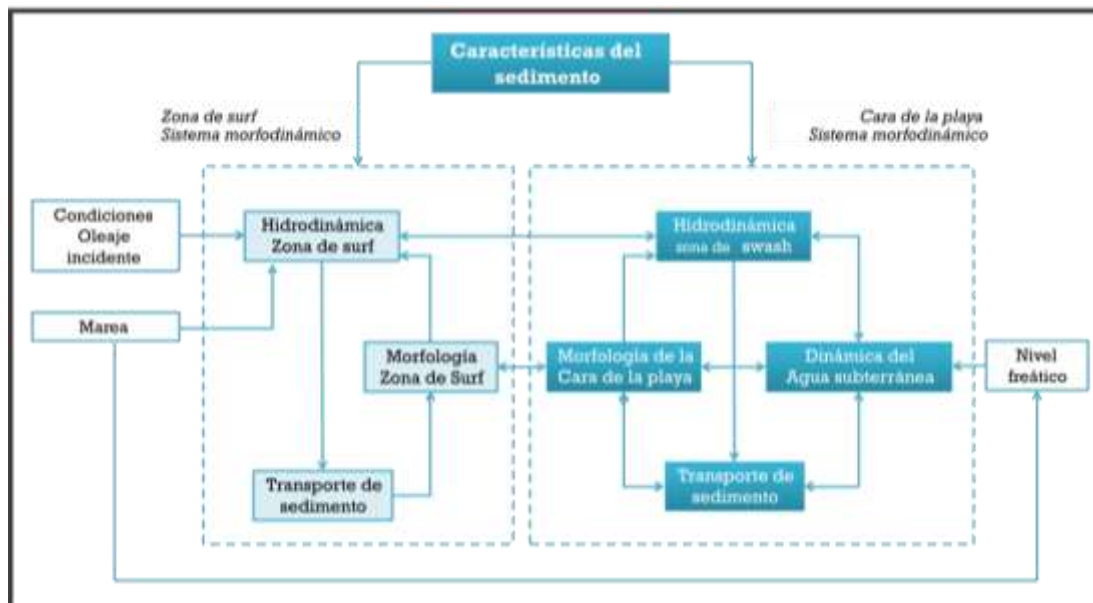


Figura 2.4 Diagrama conceptual del sistema morfodinámico de la interacción en la zona de rompiente y de vaivén (G. Masselink, J.A. Puleo, 2006).

La zona de vaivén contiene flujos no uniformes con velocidades altas y grandes niveles de turbulencia asociados a altas concentraciones de sedimento en movimiento y tasas de transporte que provocan cambios rápidos en la morfología (Puleo et al. 2000).

La aceleración rápida del flujo se debe a la interconexión que existe con la zona de rompiente, y el consecuente cambio en el régimen de flujo durante el colapso de la ola y su transformación en un bore.

2.3.1 CONDICIONES DE FORZAMIENTO PARA LA ZONA DE LAVADO

Las condiciones de forzamiento que gobiernan el comportamiento del flujo en la zona de lavado son resultado de las condiciones predominantes dentro de la zona de rompientes. Las oscilaciones inducidas por la zona de rompientes incluyen movimientos de baja frecuencia de la línea de costa, ondas largas, ondas de borde, ondas de corte, además de las corrientes transversales, longitudinales y la turbulencia (Svendsen y Putrevu, 1996), estos movimientos gobiernan la naturaleza del transporte de sedimentos en las cercanías de la costa y por lo tanto son generadores del comportamiento morfológico de las playas.

En esta región, si la playa se caracteriza por una pendiente suave, las olas rompen en descrestamiento, con lo que una corriente de resaca intensa es por lo general observada (Ting, y Kirby, 1994) y la zona de rompientes es amplia. Por otro lado, en playas con pendientes pronunciadas están compuestas por materiales gruesos, y la rotura que se presenta es de tipo voluta muy cerca de la línea de costa, con lo que la zona de rompientes es muy angosta, generando que las oscilaciones de ascenso y descenso del oleaje sobre la playa, estén asociadas a las mismas frecuencias del oleaje incidente y la corriente de resaca sea reducida como resultado de la alta permeabilidad del lecho marino y la reducción de la zona de rompientes (Lara et al. 2002).

Estudios de Huntley et. al. (1977), han identificado que el movimiento dominante del oleaje en la zona de rompientes está determinado por su grado de saturación energética. En los casos en los que la zona

de rompientes no está saturada, es posible observar un dominio energético de olas asociadas a mayores frecuencias (ej. ondas cortas), esta condición es más relevante para playas compuestas por sedimentos gruesos, donde los movimientos de la zona de lavado están dominados por el ascenso del remanso turbulento sobre el perfil de la playa (Hibberd y Peregrine, 1979). Por lo que la saturación de la zona de rompientes es función de las características del oleaje incidente y la batimetría debajo del nivel medio del mar. En playas con pendiente suave, donde la zona de rompientes es ancha y está saturada, la altura de ola está controlada por la profundidad local por medio de la rotura del oleaje. Cualquier incremento en la energía incidente del oleaje es disipado a través de un incremento en la rotura del oleaje y por lo tanto las alturas de ola en la zona de rompientes permanecen constantes. En consecuencia, se acepta que no hay agrupamiento del oleaje cerca de la línea de costa, debido a la disipación de energía en esta área. Sin embargo, en playas con pendientes pronunciadas, donde la zona de rompientes es muy angosta, la rotura del oleaje ocurre mucho más cerca de la costa, o incluso en la línea de costa tal y como lo describieron Raubenheimer y Guza (1996). En este caso, un incremento en la energía del oleaje incidente, resulta en un incremento en la altura de ola en la zona de rotura, lo que motiva que cerca de la costa se observen las mismas frecuencias asociadas al tren de olas incidente (Holmes et al., 1996; Kobayashi et al., 1989). En playas con pendientes pronunciadas, no hay suficiente tiempo para que toda la energía del oleaje incidente sea disipada (Wright y Short, 1984; Baldock et al. 1997), por lo que la energía dominante en la zona de lavado está relacionada con las frecuencias asociadas al oleaje incidente (Mase, 1995). Playas con una zona de rompientes saturada o no saturada, inducen diferentes condiciones hidrodinámicas cerca de la costa (en la zona de lavado). En esta descripción de los efectos de la energía del oleaje y su disipación no se contempla los efectos de las barras, ni contempla efectos tales como de la vegetación marina. Con lo que la respuesta morfológica de la playa será totalmente distinta dependiente de las condiciones prevalecientes en esta zona.

2.3.2 ASIMETRÍA EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA ZONA DE LAVADO

El transporte de sedimentos estudiados en esta tesis es aquel que se da en dirección a la costa o hacia el mar, define la respuesta morfológica de la playa, sin embargo para una valoración completa es necesario considerar el transporte longitudinal. El balance entre los flujos de ascenso y descenso del oleaje, produce una tasa de transporte de sedimentos asimétrica muy alta, y un transporte neto potencialmente pequeño (Butt y Russell, 1999; Osborne y Rooker, 1999; Kobayashi y Johnson, 2001). La dirección del transporte neto de sedimentos en la zona de lavado, depende del resultado del balance entre los volúmenes de transporte durante ambas fases (Osborne y Rooker, 1999).

La asimetría del transporte de sedimentos en esta zona, durante ambas fases de incidencia del oleaje, ha sido motivo de investigación para diversos autores. Las hipótesis que tratan de explicar el proceso de ascenso, lo atribuye al coeficiente de fricción más grande para la fase de ascenso que para la fase de descenso del oleaje (Conley y Griffin, 2004; Raubenheimer et al., 2004), los efectos de aceleración y los gradientes de presión inducidos por el oleaje (Nielsen, 2006; Puleo et al. 2003, Puleo et al. 2007), la advección de sedimento en el punto de colapso del remanso turbulento (Pritchard y Hogg, 2005; Hughes y Moseley, 2007; Hughes et al., 2007), la turbulencia generada por la rotura que eventualmente alcanza al fondo marino (Puleo et al., 2000; Petti y Longo, 2001) y la modificación de la capa límite del flujo por efectos de infiltración y exfiltración de flujos subterráneos (Butt et al. 2001, Obhrai et al. 2002). Sin embargo, de acuerdo con Baldock y Hughes (2006) se piensa que los efectos de aceleración del flujo durante la fase de ascenso, no son importantes en la parte alta de la playa, por lo que se puede concluir que este proceso no es fundamental en la determinación de la dirección del transporte de sedimentos en esta zona de la playa. Pedrozo-Acuña (2005) señaló que no existen en la literatura expresiones que involucren todos los procesos asociados al transporte de sedimentos en esta zona.

2.3.3 INFILTRACIÓN Y EXFILTRACIÓN DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS

La diferencia en los niveles de agua subterránea, es provocado por los efectos combinados entre las mareas y las olas. Se sabe que la dinámica del nivel freático interviene en el transporte de sedimentos en la zona de vaivén. De acuerdo a observaciones realizadas en playas, se vio que la posición del nivel freático es importante para los procesos de la deposición y erosión [Grant \(1948\)](#), en condiciones en donde este nivel freático era mayor al nivel medio del mar provocaba la aceleración de los efectos de erosión sobre las playas, mientras que un descenso del nivel freático era causante de la acumulación en la playa. Por esta razón es importante entender la relación entre los procesos que ocurren en la superficie y del flujo subterráneo en las playas, entre los cuales se identifican los ocasionados por la infiltración y exfiltración.

[Horn \(2002, 2006\)](#) ha revisado la dinámica asociada a los flujos subterráneos y los efectos de infiltración y exfiltración en la zona de lavado. Ver Figura 2.5.

La infiltración de agua en el perfil de la playa, actúa de dos formas distintas ([Nielsen et al., 2001](#); [Obhrai et al., 2002](#); [Conley y Griffin, 2004](#); [Hoque y Asano, 2007](#)):

- Adelgazando la capa límite, lo que genera una compresión de las líneas de flujo cerca del fondo, y que de alguna forma explica los esfuerzos cortantes más grandes durante la fase de ascenso del oleaje.
- Generando una presión estabilizadora sobre los granos de sedimento
- La exfiltración por su parte, actúa de forma opuesta:
- Reduce los esfuerzos cortantes en el fondo por medio de la dilatación del grosor de la capa límite por la salida de agua
- Desestabiliza al fondo por medio del ejercicio de una fuerza hacia arriba inducida por la velocidad de salida del flujo.

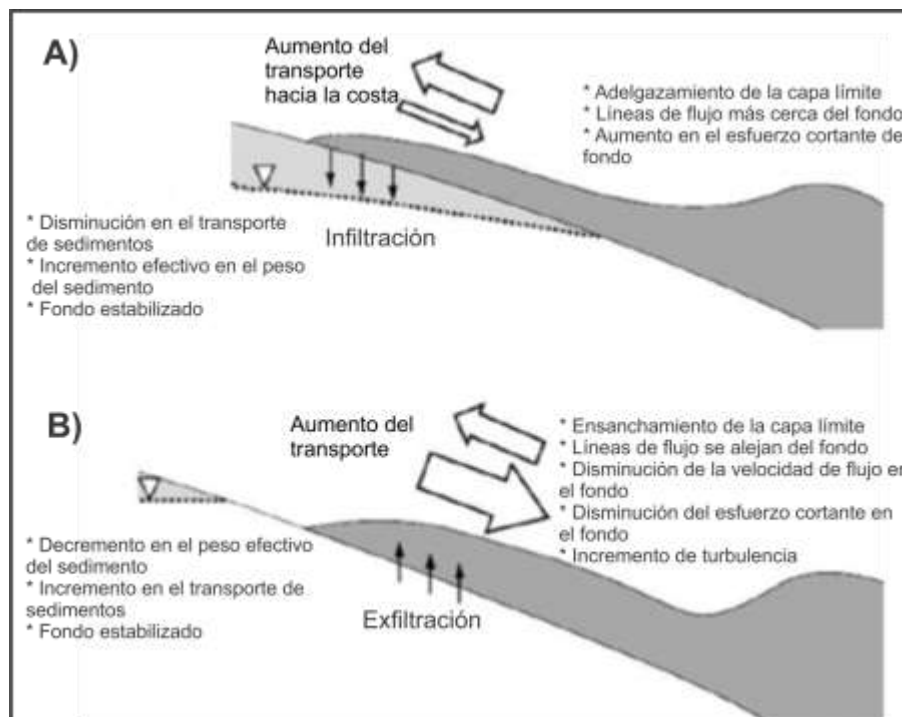


Figura 2.5 Esquema de ilustración de efectos de la infiltración y exfiltración en la zona de lavado.

2.3.3 EFECTOS DE TURBULENCIA

Cuando la rotura del oleaje se propaga hacia la costa, la turbulencia asociada con el movimiento del oleaje en dirección a la costa, puede llegar a alcanzar el lecho marino. Cuando esto sucede, este proceso puede contribuir como un mecanismo para la puesta en movimiento de sedimentos para ser transportados dentro de la zona de lavado. La mayor parte de los estudios de turbulencia han sido desarrollados dentro de la zona de rompientes en comparación con la zona de lavado.

Las mediciones indican que la turbulencia, generada por el remanso, domina durante la fase de ascenso, mientras que turbulencia generada por el fondo (de pared) es más importante durante la fase de descenso. Por lo que se concluye que el movimiento de descenso del oleaje, tiene mayor tiempo de duración y un crecimiento de la capa límite distintivo en comparación con la fase de ascenso, ver Figura 2.6 (Raubenheimer, 2002; Masselink et al., 2005).

Petti y Longo (2001), analizaron datos de superficie libre, velocidades y turbulencia, generadas por olas rompiendo en voluta y en colapso sobre una playa impermeable con pendiente de 1:10. Sus resultados indicaron que el flujo de energía de la turbulencia tiene dirección hacia la costa, ya que la energía cinética de la turbulencia es mayor durante la fase de ascenso del oleaje que durante la fase de descenso. Además, de acuerdo con los resultados obtenidos para el perfil de velocidades alrededor del nivel de aguas medias, encontraron que este perfil es prácticamente uniforme para todas las fases del movimiento oscilatorio. Puleo et al. (2000) mostró con ayuda de un estudio en campo en una playa de arena que el transporte hacia la costa es afectado por la turbulencia del remanso en ascenso, y observó que se mantuvieron altas concentraciones de sedimento en suspensión. Esta investigación concluyó que la turbulencia asociada a este remanso puede ser un proceso dominante en el transporte de sedimentos hacia la costa.

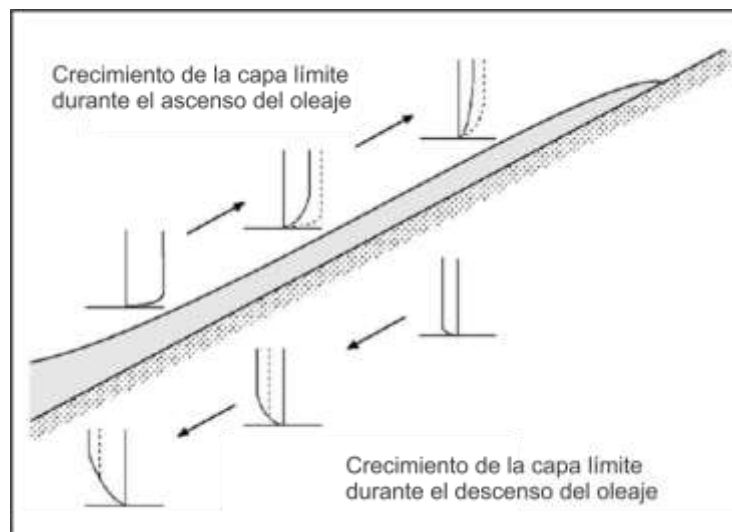


Figura 2.6 Crecimiento de la capa límite durante las fases de ascenso y descenso del oleaje en la zona de lavado (línea punteada: posición anterior).

El flujo durante el descenso del oleaje debe su intensidad a la fuerza de gravedad, la fricción y los gradientes de presión transversales a la playa, sin embargo, ésta no se desarrolla en todo su potencial gravitacional (Puleo et al. 2003).

Masselink et al. (2005), concluye que la turbulencia, es un factor menor en playas disipativas que en playas reflejantes, debido a los periodos largos de oscilación en la zona de lavado (mayores a 15 s) y las grandes extensiones de la zona (mayores a 20 m). Otra fuente para la generación de turbulencia en la zona de lavado, es la que proviene de los saltos hidráulicos que se observan al final de eventos de descenso asociados a ondas de infragravedad. Sin embargo, al igual que en la zona de rompientes, la representación de la turbulencia para determinar la morfología resultante en la zona de lavado, permanece como una incógnita a ser resuelta en futuras investigaciones.

2.3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA ZONA DE LAVADO

Los mecanismos de transporte son variables y producen diferentes gradientes a lo largo de la cara de la playa, como resultado de la exposición intermitente del perfil de la playa al flujo, lo que imposibilita el uso de métodos analíticos estadísticos (Hughes y Baldock, 2004). La naturaleza intermitente de datos recabados en esta región, previene el uso de técnicas convencionales para el análisis de series de tiempo (ej. análisis espectral). Como resultado, es muy difícil producir comparaciones entre datos medidos y teóricos (Masselink y Russell, 2006). Las series de tiempo de datos hidrodinámicos obtenidos en la zona de lavado son discontinuas, por lo que conceptos básicos utilizados para la zona de rompiente, como son altura de ola, longitud y periodo, no son inmediatamente transferibles a esta región (Masselink y Puleo, 2006).

Se requieren de mediciones confiables de transporte de sedimentos en la zona de lavado para entender el balance de procesos y mecanismos en esta zona. Sin embargo la tecnología disponible en la actualidad, permite la medición del transporte de sedimentos en campo, pero su costo aún es muy alto. Por lo tanto el uso de modelos numéricos y de mediciones de laboratorio es una forma alternativa para explicar los procesos de importancia para el transporte de sedimentos, a fin de avanzar en la comprensión de cada uno de los procesos que tienen lugar en esta zona.

2.4 PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN LA ZONA DE LAVADO

Si se considera la zona de lavado como un sistema morfodinámico (ej. Cowell y Thom, 1994), la morfología en esta zona se debe principalmente al equilibrio entre la hidrodinámica de la zona, la dinámica del flujo subterráneos y el transporte de sedimentos. Más aun, este sistema no puede ser estudiado de forma aislada ya que está en constante interacción con la morfodinámica y los procesos asociados a la zona de rompientes. En principio, ambos sistemas son forzados por las mareas y las condiciones de oleaje en aguas profundas, y un muy importante control está dado por las características del sedimento a través del tamaño de grano, densidad, factor de forma, el origen de los materiales, la distribución del sedimento en la playa, entre otros.

Los procesos morfodinámicos asociados a la zona de lavado, están gobernados por las condiciones predominantes en la zona de rompientes, la fricción de fondo, los flujos subterráneos y la turbulencia (Pedrozo-Acuña, 2005), entre otros, que en este estudio no se tomarán en cuenta pero tienen relevancia en la naturaleza, entre las cuales se encuentra la disponibilidad de sedimento o los efectos de la vegetación (ej. Türker, Yagci et al. 2006). La acreción o erosión de una playa, requiere que se genere una asimetría en las cantidades de sedimento que se ponen en movimiento durante el ascenso y descenso del oleaje (Masselink et al. 2005; Aagaard y Hughes, 2006; Masselink y Russell, 2006, Pedrozo-Acuña et al. 2006, 2007; Hughes et al. 2007). Datos recabados durante campañas de campo en playas de arena, muestran que por lo general, la fase de ascenso del oleaje contiene concentraciones de sedimentos en

suspensión más grandes que aquellas observadas durante la fase de descenso (Masselink y Hughes, 1998).

A pesar de la clara relación entre las zonas de rompientes y de lavado, Masselink y Puleo (2006) indicaron una serie de rasgos únicos a la zona de lavado (ver Figura 2.7). Entre los que se destaca: (1) La naturaleza energética de los flujos en esta zona, con velocidades superiores a 2 m/s; (2) La contribución significativa de turbulencia de fondo y de superficie libre para la suspensión de sedimento y su transporte; (3) El efecto del movimiento vertical de salida y entrada del flujo debido a la infiltración/exfiltración; (4) El papel del potencial del flujo supercrítico y los saltos hidráulicos debidos a las altas velocidades durante la fase de descenso; (5) Las concentraciones de sedimentos en suspensión, que son generalmente un orden de magnitud superiores a las que se observan en la zona de rompientes (alcanzando los 100 kg/m³ cerca del fondo); (6) Las grandes tasas de transporte resultantes de la combinación de flujos intensos y altas concentraciones de sedimento en suspensión.

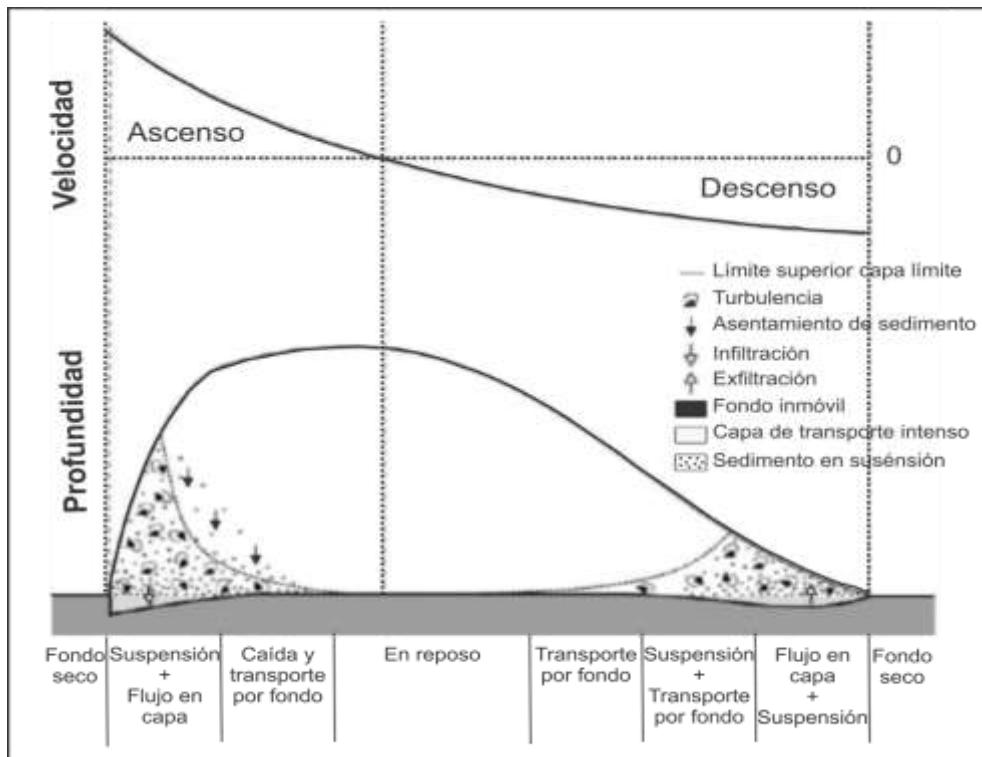


Figura 2.7 Esquema de ilustración de los efectos de transporte de sedimentos en la zona de lavado.

La extensión de la zona de lavado se considera desde el punto de colapso del remanso turbulento, hasta el punto de ascenso máximo de las olas sobre el perfil de la playa (Hughes y Turner, 1999), sin embargo, la frontera entre las zonas de rompientes y lavado puede ser muy difusa, sobre todo en playas disipativas con pendientes suave.

Otra forma de mirar los procesos que actúan sobre esta región se ilustra en la Figura 2.8, donde se presentan instantes de la historia de oscilación de la superficie libre sobre la cara de la playa (Pedrozo-Acuña, 2005). En la primera parte del evento, identificada en el panel (a), el remanso turbulento se aproxima al punto de salida, que se define por medio de la intersección del perfil de playa con el nivel freático subterráneo. En este instante, se registran grandes velocidades en la dirección de propagación

del oleaje, las cuales están asociadas con el ascenso de esta masa de agua turbulenta. En esta fase, se observa la interacción entre los flujos de ascenso y descenso sobre el perfil de playa. De acuerdo con resultados de estudios, se cree que la turbulencia generada en esta fase, es responsable del mezclado vertical del material en el flujo. En el panel (b), se muestra la terminación de la fase de ascenso, con gran parte de la turbulencia disipada y la activación de la infiltración de agua sobre la playa. Evidentemente, la cantidad de agua infiltrada depende directamente de las características de permeabilidad y contenido de agua de los sedimentos que componen la playa. En el tercer panel (c), comienza la fase de descenso del oleaje, resultando en un estrechamiento de la lengua de agua como resultado de la infiltración. Finalmente, para completar el ciclo el panel (d) presenta el descenso del oleaje en interacción con la siguiente ola incidente en rotura, indicando también la acción de la exfiltración del flujo a través de la matriz de sedimento que forma la playa.

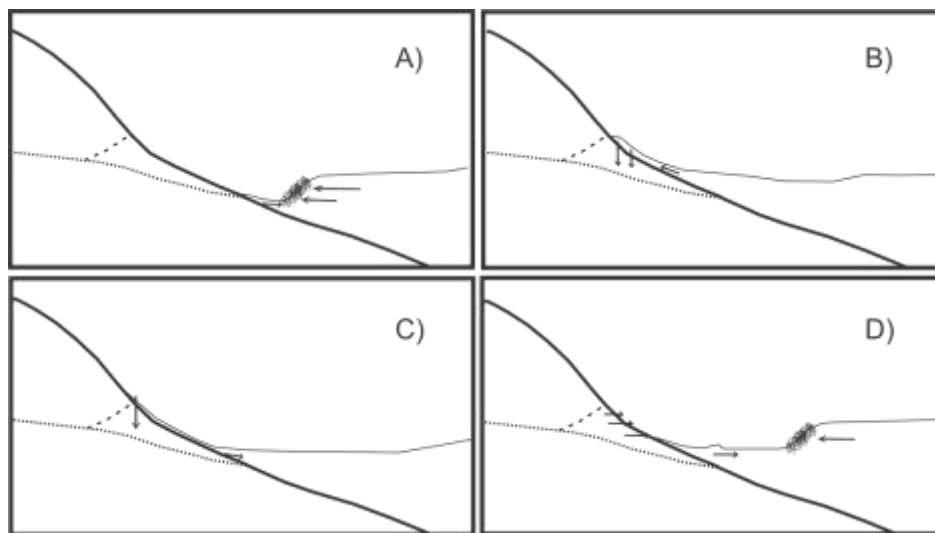


Figura 2.8 Esquema del ciclo de la zona de lavado (línea gruesa representa el perfil de playa, línea delgada la elevación de la superficie libre, línea punteada es el nivel freático, línea discontinua el nivel freático en respuesta a la acción del ascenso máximo, y las flechas indican la dirección de flujo).

2.5 TIPO DE SEDIMENTO

El tipo de sedimento es con frecuencia una de las variables que no se considera en los estudios de morfodinámica costera. Entre los trabajos más destacados, [Work y Dean \(1991\)](#) consideraron los efectos de variación del tamaño del grano sobre el equilibrio de los perfiles de playas, demostrando que para playas con tamaños de grano grueso, se presentan perfiles tipo escalón en su gran mayoría, ya que también es posible observar que esta formación también se da con sedimentos de medianos a finos. Sin embargo, en la realidad, la mayoría de las playas están compuestas por un rango de tamaños de grano, con diferente frecuencia de la distribución del sedimento a lo largo del perfil. [Moutzouris \(1991\)](#) encontró que los sedimentos más gruesos se encuentran localizados generalmente sólo hacia el mar o fuera de costa, mientras que los sedimentos más finos tienden a depositarse en las barras formadas fuera de costa. El transporte de sedimento de tipo bimodal bajo olas que rompen sobre una cama de arena fue considerado por [Mansell \(1992\)](#). [Quick and Dyksterhuis \(1994\)](#), encontró evidencias de un proceso de acorazamiento para condiciones de energía baja a diferencia de las condiciones de alta

energía el sedimento grueso tuvo pequeños efectos sobre la evolución del perfil y el sedimento fino controla la playa tipo escalón. La permeabilidad de la playa, por lo tanto, parece tener el control del comportamiento de la playa, ya que influye en el comportamiento hidráulico sobre el perfil de playa (e.g. Gourlay, 1980, Dyksterhuis, 1998, Steenhauer, et al. 1998). En estudios experimentales previos, han considerado la distribución del sedimento de la playa en particular de la distribución de la sección transversal, por ejemplo en el trabajo de Wilcock, et. al., 2001, se ha observado un aumento en la tasa de transporte de grava con el aumento de contenido de arena, así mismo Richmond y Sallenger, 1984 observaron los cambios de perfil y transporte de sedimentos en diferentes posiciones a lo largo del perfil, la migración del material más grueso se observó hacia fuera de costa, mientras que el material más fino fue acumulado hacia la costa.

Los sedimentos se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño, empleando el diámetro medio (D_{50}) medido en milímetros [mm] o por un sistema de clasificación conocido como Udden-Wentworth, que utiliza una escala conocida como escala phi [Φ], que consiste en una escala logarítmica de base 2.

La importancia de conocer el tamaño del sedimento se da por observaciones realizadas que muestran que de acuerdo al tamaño del sedimento se puede inferir el reacomodo del material en las zonas cercanas a las costas. Por ejemplo la mayor parte de los registros de granulometrías en dunas se han reportado del orden de 1.60- 2.65 en escala de Φ , y de acuerdo a su clasificación oscila de muy bien moderadamente clasificada. Por otro lado, los depósitos de granos de mayor tamaño suelen encontrarse en la zona de rompientes, aunque también suelen ser observados en movimiento sobre la cara de la playa. Así, existe una relación entre la permeabilidad, el tamaño grano medio del sedimento, su porosidad, factor de forma, velocidad de caída, origen del material, entre factores todos que pueden tener una injerencia en la dirección predominante del transporte y la respuesta morfológica de una playa.

El esfuerzo presentado por Holmes et. al. (1996), representa una investigación en las que se consideraron diversos tamaños de grano, material fino (0.5 mm), material de mayor tamaño granulométrico (1.5 mm) y mezcla bimodal con ambos materiales (con una relación 50:50). Sus resultados indicaron que el comportamiento para ambas playas, una compuesta por una mezcla bimodal y otra por material fino, es muy semejante, reportando una redistribución del sedimento sobre la playa. Esta similitud se atribuye a la baja permeabilidad de ambas playas que funciona como un forzamiento clave en el balance de los procesos hidrodinámicos.

Otro aspecto de importancia es la interacción entre el fluido y el sedimento es provocada por la fricción entre ambos medios, la fricción del fondo depende de la rugosidad del medio poroso que depende en gran medida del tamaño de grano (D_{50}). La fricción generada entre el fluido y sedimento ocasiona una tensión de corte proporcional al gradiente de velocidades, la región comprendida entre la distribución de velocidades que va desde cero hasta la velocidad máxima, se le denomina como capa límite; las tensiones de corte son las que provocan el inicio de transporte de sedimento, ya que si las tensiones de corte del flujo exceden a las del sedimento, estos empezarán a moverse. La capa límite depende del tipo de flujo que se presente, un flujo turbulento la aumentará, por esta razón en las zonas cercanas a la costa donde este tipo de flujo es visible se considera como a zona de mayor actividad de intercambio de sedimento se presenta.

2.6 GRADIENTE DE PRESIÓN

Los estudios más recientes abocados al tema de transporte de sedimentos en la zona de rotura y lavado, indican que a fin de obtener una mejor caracterización de la dinámica litoral, es necesario investigar la

relación entre el gradiente de presión inducido por el oleaje en rotura y el movimiento de sedimentos en el fondo.

Se le llama gradiente de presión a la diferencia entre presiones entre un punto y otro, si estos gradientes existen dentro en una cama de sedimento inducidos por las acción del oleaje, puede provocar su transporte o movimiento, al disminuir la resistencia efectiva del sedimento y provocar una fluidización del material. Un estudio con mayor detalle en esta zona generaría una mejor comprensión de los mecanismos de transporte de sedimentos y de la dinámica de la playa.

Esta idea ha cambiado el concepto del transporte de sedimentos, el cual tiene su origen en la conceptualización propuesta para flujos uniformes unidireccionales, que utiliza únicamente la velocidad en el fondo y un tamaño medio de grano único para determinar el volumen de material en movimiento (ej. Meyer-Peter y Müller, 1948). Así entonces, a principios de esta década los esfuerzos de los investigadores se concentraron en formular una expresión que incluye al gradiente de presión. Entre los primeros trabajos, se utilizó a la aceleración local (du/dt) como un sustituto del gradiente de presión (Drake y Calantoni 2001; Hoefel y Elgar, 2003). Sin embargo, esta hipótesis ha sido cuestionada al comprobarse que para algunos casos de flujo, no hay ninguna correlación entre estas cantidades (Puleo et al., 2007). Esto ha abierto la puerta, a la propuesta de expresiones que son función de la aceleración local más el término de advección horizontal ($du/dt + u du/dx$) (Foster et al., 2006). Aunado a lo anterior y bajo condiciones de rotura intensa, investigaciones recientes han identificado que la contribución del término de advección vertical ($w du/dz$), no es menor (Pedrozo-Acuña et al. 2010).

Los razonamientos de estos trabajos hacen evidente la necesidad de investigar los procesos físicos involucrados en la morfología de playas, con particular énfasis en la interacción entre la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en la zona de rotura. La comprensión de la cinemática del oleaje en la costa es de suma importancia para determinar zonas vulnerables a erosión e inundación ante eventos extremos, así como la probabilidad de fallo de estructuras de protección costera.

Es posible derivar una primera aproximación de los gradientes de presión por medio de la aproximación propuesta en la Ecuación de Euler, que se presenta en Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2. Esta expresión matemática relaciona los cambios de presión con la naturaleza del flujo, en particular con sus velocidad y aceleración total.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla p = 0 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde $v=(u, w)$ representa la velocidad de flujo (en dirección horizontal y vertical), ρ es la densidad del fluido, ∇p es el gradiente de presión y Dv/Dt la aceleración total del flujo.

Sin embargo la aceleración total considera además de la derivada de la velocidad en el tiempo, la suma de los términos de advección tal y como se muestra en la Ecuación 2.2:

$$\frac{Dv}{Dt} = \begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} & \text{horizontal} \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} & \text{vertical} \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde Dv/Dt representa la aceleración total del flujo; $(\partial u)/\partial t$ y $(\partial w)/\partial t$ la aceleración local de la componente horizontal y vertical respectivamente; $u(\partial u)/\partial x$ y $\bar{u} (\partial \bar{w})/\partial x$ términos de advección horizontales (para las componentes horizontales y verticales); $w (\partial u)/\partial z$, $w(\partial w)/\partial z$ términos de advección vertical (componentes horizontales y verticales).

Esta representación permite el diagnóstico de los procesos involucrados en la generación de un gradiente de presión, permitiendo incluso una investigación de la importancia de la advección en el transporte de sedimentos y la morfología de playas. Siguiendo las conclusiones presentadas por [Pedrozo-Acuña et al. \(2007\)](#), quienes verificaron que bajo condiciones de rotura tipo voluta, las aceleraciones locales no son significativas, es necesario investigar el papel de la advección en el transporte de sedimentos.

Estudios previos han indicado la importancia de la advección en el ascenso de la masa de agua hacia la playa. [Alsina \(2009\)](#), observó que después de que la ola rompe, el sedimento es levantado y suspendido por las ondas de bore y tiene este efecto aproximadamente a la mitad de la zona de vaivén, mostrando la importancia de estos fenómenos en la zona baja del vaivén. Posteriormente, [Alsina, et al. \(2011\)](#) realizaron estudios en los cuales presentaba la base de datos de las propiedades hidrodinámicas y de la concentración del sedimento en suspensión recolectado dentro de la zona de rompientes y la zona de vaivén, este estudio se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento en las zonas cercanas a la línea de costa y la respuesta de la misma.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Los datos experimentales utilizados en esta tesis, forman parte de un proyecto de investigación financiado por la UNAM (IN106610) y el CONACYT (SEP-SEB-167003), en los que la autora participó de forma activa, siendo el responsable de la realización de cada una de las pruebas realizadas y la recolección de datos en laboratorio. El procedimiento experimental seguido, fue diseñado de tal manera que se produjeran condiciones de oleaje tipo voluta propagándose sobre un lecho permeable, el estudio se limitó a trabajar con este tipo de rotura, porque la naturaleza de la rotura es compleja, pues es el fenómeno de rotura en donde la onda se impacta perdiendo una considerable cantidad de energía, durante este procesos se produce una gran cantidad de aire generando turbulencia y vorticidad que puede llegar a causar un efecto sobre los sedimentos, asimismo esta tesis representa una continuación del trabajo experimental presentado por [Gutiérrez Valencia \(2012\)](#), quien estudió el uso de técnicas no intrusivas en el canal de oleaje con una pendiente impermeable. Además, el programa experimental consideró el desarrollo y la ejecución de una técnica no intrusiva, para la medición detallada del campo de velocidades bajo condiciones de flujo altamente turbulenta y caótica. Los experimentos se realizaron en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La construcción de la pendiente con material granular permeable, requirió la instalación de una rampa impermeable que sirvió como base para la colocación de material granular (cuatro combinaciones de material fueron utilizadas, a partir del uso de arena y grava con diferentes graduaciones). En todos los casos, la pendiente inicial, sobre la que se ejerció el forzamiento de las condiciones de oleaje monocromático definidas en función del periodo y altura de ola correspondiente fue la misma.

Este capítulo tiene como objetivo presentar la metodología y el diseño de los experimentos realizados en este trabajo de investigación, integrando en detalle, la descripción del modelo físico construido y la instrumentación utilizada para las mediciones. Así mismo, se presentan las cuatro diferentes composiciones de sedimento que se utilizaron para la construcción de los modelos físicos con diferente permeabilidad. Por último, se introducen las condiciones de oleaje seleccionadas para estos experimentos.

3.1 INSTRUMENTACIÓN

El equipo de medición comprendió el uso de instrumentos tales como sensores de nivel y sensores de presión, que permitieron la adquisición de series temporales de superficie libre y presión en la zona de rompientes. Adicionalmente, se incorporó el uso de la técnica no intrusiva, conocida como BIV (Bubble image Velocimetry) para el registro del campo de velocidades en las zonas altamente aireadas y con turbulencia. La implementación de esta técnica requirió el uso de una cámara de alta velocidad e iluminación para generar mapas espacio-temporales del campo de velocidades. Así mismo, se incorporaron instrumentos intrusivos como son los velocímetros acústicos de efecto Doopler (ADV), a fin de obtener series temporales de velocidades en algunos puntos estratégicos. Con el propósito de estudiar la distribución del sedimento por la acción del oleaje, se obtuvieron muestras de sedimento sobre el perfil resultante (morfología). Para lo cual se requirió el empleo de equipo para la caracterización granulométrica.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL CANAL

Los experimentos se realizaron en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM, ver Figura 3.1. El canal es de sección rectangular, su estructura está conformada por perfiles PTR, separados 2 m. Las paredes del canal de un lado son de cristal de 2 cm de espesor y, mientras en el otro lado solo 8 m son de cristal, el resto y los extremos son de lámina de acero inoxidable. Las dimensiones del canal son las siguientes: 37.0 m de longitud, 0.80 m de ancho y 1.2 m de profundidad. Para la generación de olas el canal está equipado con una pala de tipo pistón, cuya capacidad de generación de olas es de periodos de entre 0.2 a 4 segundos.



Figura 3.1 Canal de oleaje del instituto de ingeniería de la UNAM.

3.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA RAMPA

Para la construcción del modelo físico que representa la playa, se utilizó una estructura metálica con pendiente 1:5, que hizo la función de la base del material granular. Esta estructura, fabricada de aluminio y tres piezas de acrílico, permitió la colocación de sedimento (grava y arena, en diferentes combinaciones y proporciones para lograr diversas permeabilidades). Las dimensiones de la rampa son 3.5 m de longitud, 0.79 m de anchura y 0.7 m de altura.

En esta estructura se instalaron tres hojas de acrílico. La primera pieza de acrílico fue colocada en la parte superior de la rampa de las siguientes dimensiones: 0.79 m de ancho y 1.72 m de longitud, mientras las dos piezas restantes de dimensiones semejantes fueron posicionadas en la parte inferior de

la rampa de forma paralela con dimensiones: 0.35 m de ancho y 1.84 m de longitud. Además, se instalaron dos placas de acero inoxidable en la parte central entre las piezas de acrílico semejantes. Estas placas, cuyas dimensiones son de 0.60 m de longitud y 0.09 m de ancho cada una, cuentan con orificios de 2 cm de separación para tener un total de 78 orificios que sirvieron como posiciones para colocar sensores de presión. La Figura 3.2 ilustra el dimensionamiento, instalación y un ejemplo del estado final de la construcción de uno de los modelos físicos utilizados en este trabajo.

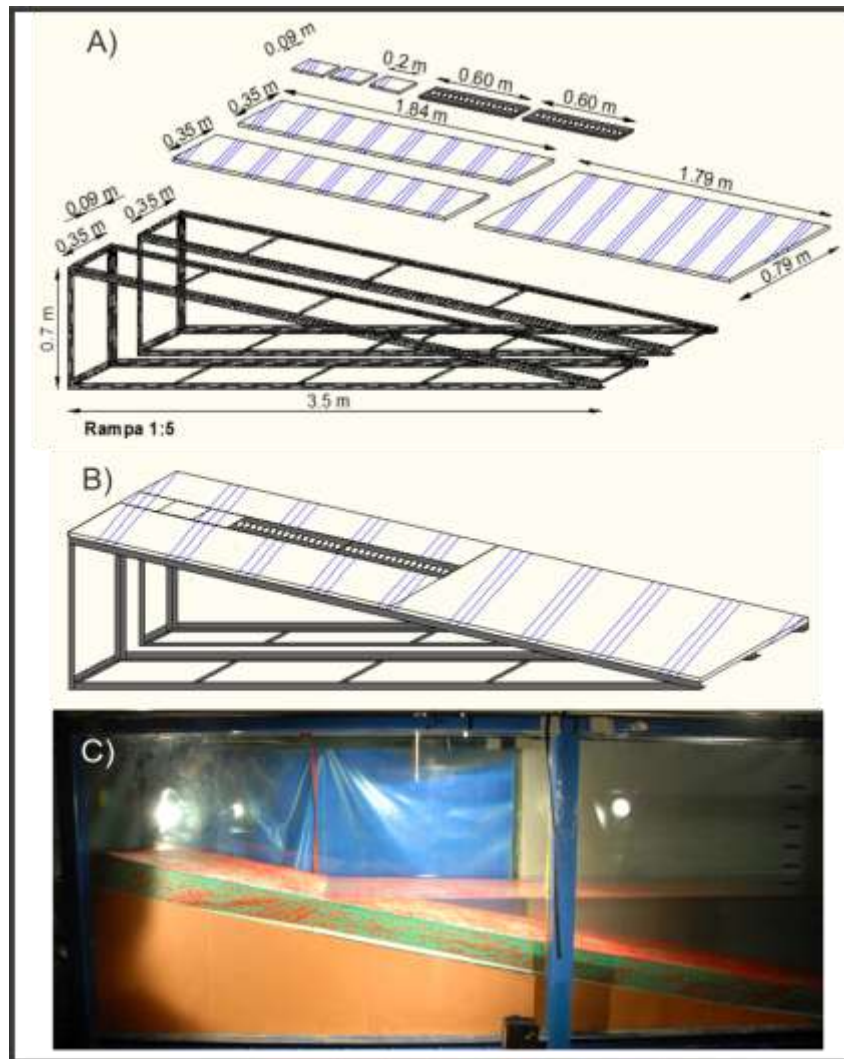


Figura 3.2 A) Dimensionamiento e instalación de la rampa en el canal de oleaje, B) Esquema de instalación de la rampa, C) Ejemplo de la colocación de la cama de sedimento (modelo 3: mezcla de color rojo-verde) colocada de 12 cm de espesor sobre la cama impermeable de acrílico.

3.1.3 SENSORES DE PRESIÓN

Los sensores de presión registran, en forma de voltaje, cambios de presión que ocurren dentro del flujo. Los sensores de presión utilizados en el laboratorio para los experimentos son de marca KELLER, sus dimensiones son 19 mm de diámetro y 10 cm de largo, ver Figura 3.3. Los rangos de presión de los sensores son de 200 mb y 1 bar, que funcionan a temperaturas de entre -45 y 100 °C.

Estos sensores, fueron ubicados a lo largo de la rampa, debajo del sedimento en 6 posiciones localizadas cercanas al punto de rotura para los casos de análisis.

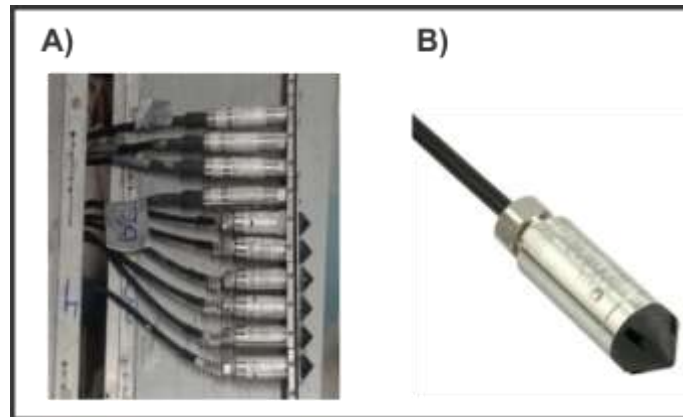


Figura 3.3 A) Arreglo de los sensores de presión utilizado, B) Sensores de presión marca Keller utilizados en las pruebas.

Para que los diferentes ensayos fueran comparables entre sí, los sensores de presión fueron dispuestos en la misma ubicación durante todas las pruebas, para ello su ubicación se definió en función de la localización del punto de rotura de las olas a fin de capturar la presión debida al impacto de las olas sobre la pendiente. Se utilizaron 6 sensores de presión ubicados a 2.25 m del pie de la rampa, tal y como se muestra en la Figura 3.4. En virtud de que los sensores se fijaron a la pendiente impermeable, estos quedaron enterrados bajo 12 cm del material granular seleccionado para cada prueba.

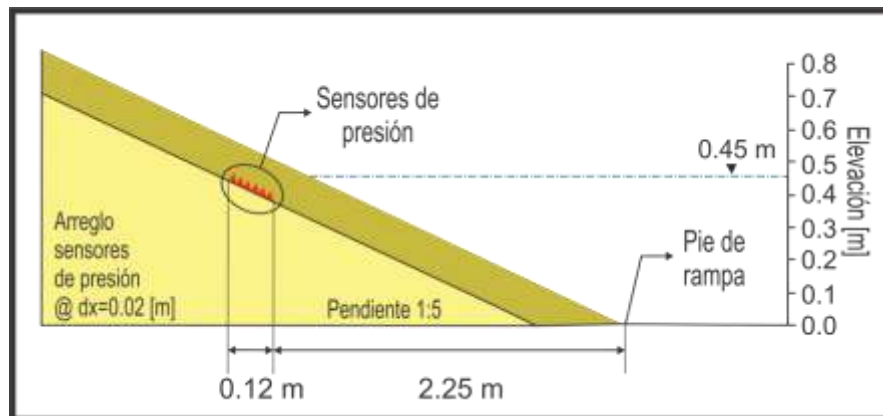


Figura 3.4 Ubicación de los 6 sensores de presión, posicionados a 2.25 m del pie de la rampa con separación entre sí de 2 cm.

3.1.4 SENSORES DE NIVEL

Para obtener los registros temporales de la superficie libre del agua, se utilizaron sensores de nivel, que actúan bajo el principio de resistividad eléctrica. Por medio de estos instrumentos se determinó el nivel de la superficie del agua durante toda la prueba a partir del cierre del circuito eléctrico entre dos

electrodos. La diferencia de potencial se registra en voltaje y es directamente proporcional al nivel del agua.

La calibración de este tipo de sensores se realiza por medio de un dispositivo simple y confiable llamado monitor de ondas (ver Figura 3.5). La corriente que fluye entre los electrodos es proporcional a la profundidad de inmersión. Dicha corriente se convierte en una tensión de salida proporcional a la profundidad de inmersión instantánea. Así, la tensión de salida puede ser calibrada en función del nivel de agua en reposo o el valor de la altura de ola, de tal modo que se establecen los límites superiores e inferiores para la variación de la superficie libre a lo largo del sensor. La localización de los sensores de nivel se muestra de forma gráfica en la Figura 3.6, mientras que la información espacial se reporta en la Tabla 3.1.

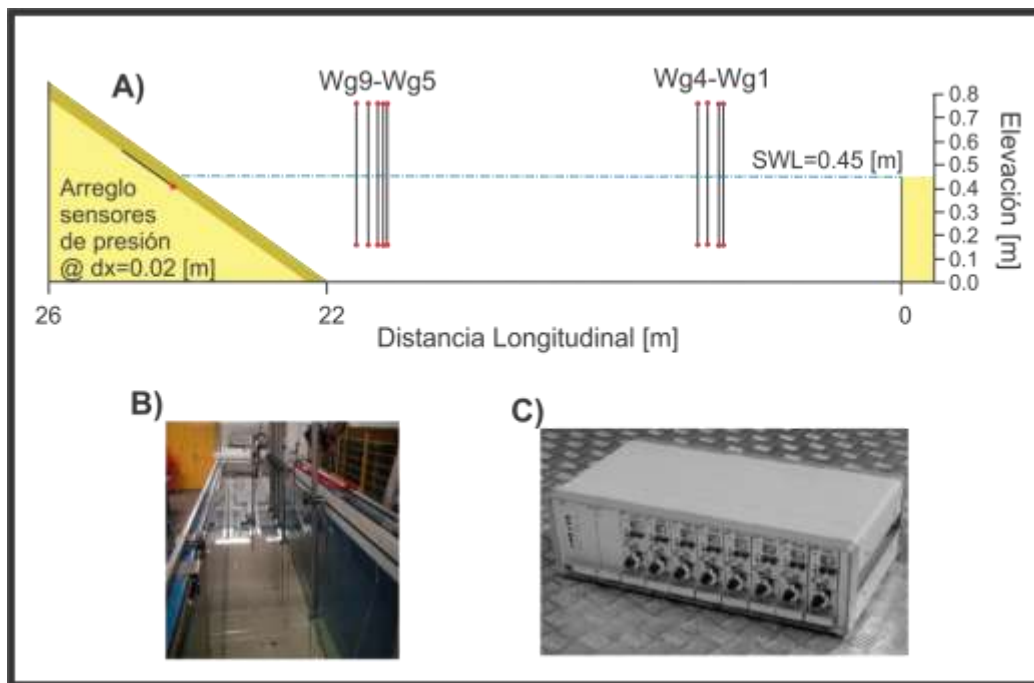


Figura 3.5 Panel superior: localización de los sensores (A). Panel inferior izquierdo: sensores de nivel empleados en el canal de oleaje (B). Panel inferior derecho: monitor de sondas para la calibración de los sensores de nivel (C).

Tabla 3.1 Distancia entre los sensores de nivel.

No. de Sensor	Distancia entre sensores [m]	No. de Sensor	Distancia entre sensores [m]
Wg 1 - Wg 2	0.12	Wg 5 - Wg 6	0.12
Wg 2 - Wg 3	0.25	Wg 6 - Wg 7	0.25
Wg 3 - Wg 4	0.35	Wg 7 - Wg 8	0.35
Wg 4 - Wg 5	12.0	Wg 8 - Wg 9	0.45

3.1.5 VELOCÍMETRO ACÚSTICO TIPO DOPPLER

El velocímetro acústico es un instrumento de alta resolución, que permite conocer los valores puntuales de la velocidad en las tres direcciones (x , y , z). Su funcionamiento se basa en el principio del efecto Doppler y consiste en enviar un pulso acústico corto desde un transductor activo hacia un volumen de control, cuando el pulso cruza el punto donde se orientan los transductores pasivos el eco es registrado por cada uno de ellos. Las señales temporales así obtenidas permiten conocer el valor de la velocidad con frecuencias de muestreo que van hasta los 100 Hz.

El equipo utilizado corresponde a un Vectrino I de la empresa noruega NORTEK AS, su utilización fue necesaria a fin de tener datos intrusivos de velocidad que permitieran establecer la correspondencia con las mediciones que se realizarán con la técnica de trazado de burbujas. Para ello, en todos los modelos físicos construidos con diferente material, se midieron velocidades en la zona de rompientes tomando como experimento de referencia aquél definido por $H=16$ cm y $T= 2$ segundos (H16T20). La ubicación vertical del instrumento fue aproximadamente a 5 cm del fondo y con once diferentes posiciones a lo largo de la pendiente de arena. Adicionalmente, la Figura 3.6 presenta una imagen del ADV utilizado durante las pruebas para el material granular más grueso.

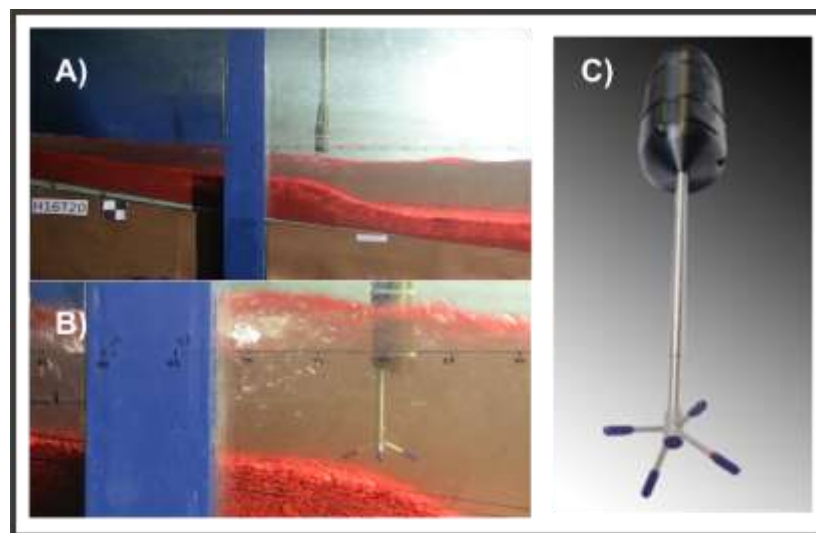


Figura 3.6 A y B) Ejemplo del uso del vectrino en la prueba H16T20 para el Modelo 4 (grava roja), C) ADV utilizado para las pruebas.

3.1.6 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD Y LUCES TIPO FRESNEL

La implementación de la técnica del trazado de burbujas, *Bubble Image Velocitmetry* (BIV, por sus siglas en inglés), propuesta por [Ryu et al. \(2005\)](#), requiere la utilización de equipo específico: una cámara de alta velocidad e iluminación profesional para cuidar la calidad de las imágenes.

Las cámaras de alta velocidad son equipos capaces de capturar imágenes con intervalos de tiempo muy pequeños entre ellas, durante la ocurrencia de determinados fenómenos físicos. El uso de la cámara de alta velocidad en el proyecto de investigación fue de gran utilidad, ya que se obtuvieron imágenes del

fenómeno de rotura en voluta sobre la pendiente, que permitieron determinar el campo de velocidades bajo estas condiciones hidrodinámicas.

La cámara que se utilizó para la realización de los experimentos en el laboratorio, es fabricada por la empresa Fastec (modelo Hispec, ver Figura 3.7a). Esta cámara tiene una sensibilidad ISO 3200 (la cual permite obtener fotografías con una menor cantidad de luz) y resolución temporal de hasta 506 fotogramas por segundo con resolución espacial de 1280 X 1024 píxeles. La velocidad de fotogramas es ajustable hasta 12000 imágenes por segundo, lo que resulta en una pérdida de resolución espacial o disminución del campo de visión del fenómeno. En estas pruebas se tuvo además la oportunidad de utilizar una segunda cámara de alta definición y a color, manufacturada por la empresa PCO, modelo Dimax HD (ver Figura 3.7b), capaz de capturar 1469 cuadros por segundos y resolución de 1920 X 1080 píxeles, la cual fue empleada únicamente durante las pruebas en las que el material de la playa tenía colores distintos, ej. verde y rojo. En cada una de las pruebas realizadas, ambas cámaras se colocaron de la misma manera, es decir, en dirección perpendicular al canal y a la dirección de propagación del fenómeno, con un campo de visión hacia la zona de rotura de las olas.

Por otro lado, el equipo de iluminación representa otra parte fundamental en la implementación del trazado de burbujas, durante estos experimentos se utilizaron luces tipo Fresnel (ver Figura 3.7c). Su característica principal es que incorpora un sistema para concentrar y dirigir el haz de luz mediante el desplazamiento de la lámpara. El control del haz de luz hace que sea un proyector idóneo para la iluminación creativa, utiliza una lámpara incandescente con filamento de cuarzo encerrada en una atmósfera de un gas halógeno, la lámpara está fijada a un reflector de metal esférico y se desplaza mediante un mando exterior. La intensidad de la luz puede variar según el grado de concentración del haz entre cinco y treinta veces. La potencia de los proyectores fresnel es de 650W y se utilizaron 3 de ellos, dos en los extremos y otra en la parte posterior del canal al inicio de la rampa. Adicionalmente se empleó una lámpara conocida como “open face” con potencia de 1000 W que fue colocada por encima del fenómeno de estudio a fin de uniformar la iluminación en el campo de visión. En la Figura 3.7d se presenta una imagen de instalación del equipo en el laboratorio.

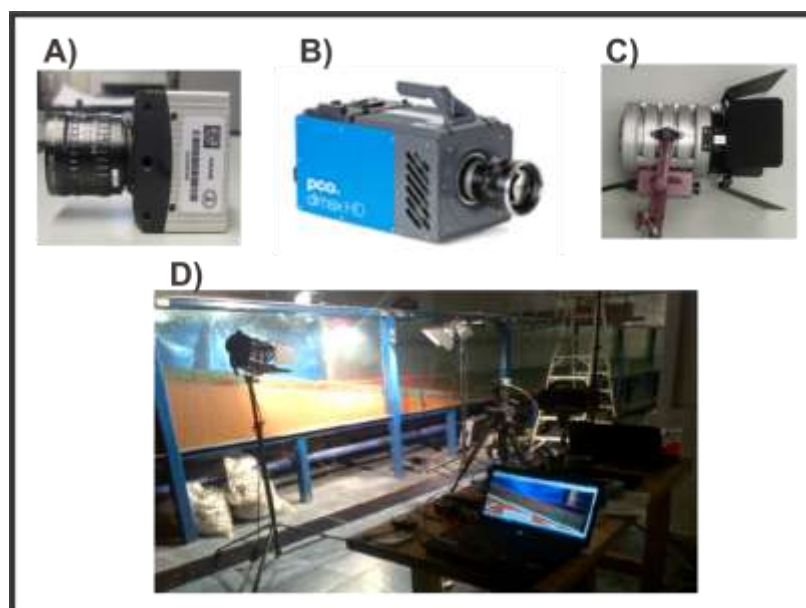


Figura 3.7 A) Cámara de alta velocidad marca Fastec, modelo Hispec. B) Cámara de alta velocidad marca PCO, modelo Dimax HD, C) Equipo de iluminación fresnel de 650 w utilizado en las pruebas, D) Arreglo empleado para la técnica no intrusiva conocida como BIV

3.1.7 EQUIPO PARA PRUEBAS DE GRANULOMETRÍA

Además de evaluar el campo de velocidades en condiciones de rotura, este trabajo de investigación tuvo como objetivo conocer la distribución granulométrica del sedimento bajo diferentes condiciones hidrodinámicas y diferente tipo de materiales bimodales. En este sentido, fue necesaria la implementación de pruebas granulométricas a fin de conocer la distribución del sedimento, tanto al inicio de la prueba como al final de la misma.

Para cumplir con este objetivo, el equipo utilizado consistió en diferentes mallas de cribado, a saber, las correspondientes a los números 4#, 5#, 8#, 10#, 14#, 18#, 25#, 35#, 45#, 80#, 120# y 230#. A fin de facilitar este proceso se usó una máquina Ro-Top y un horno para el secado de muestras. La Figura 3.8 presenta las fotografías del equipo implementado, máquina cribadora con las mallas (panel a), la báscula para pesar el contenido de material (panel b) y el horno utilizado marca Lab-Line (panel c).

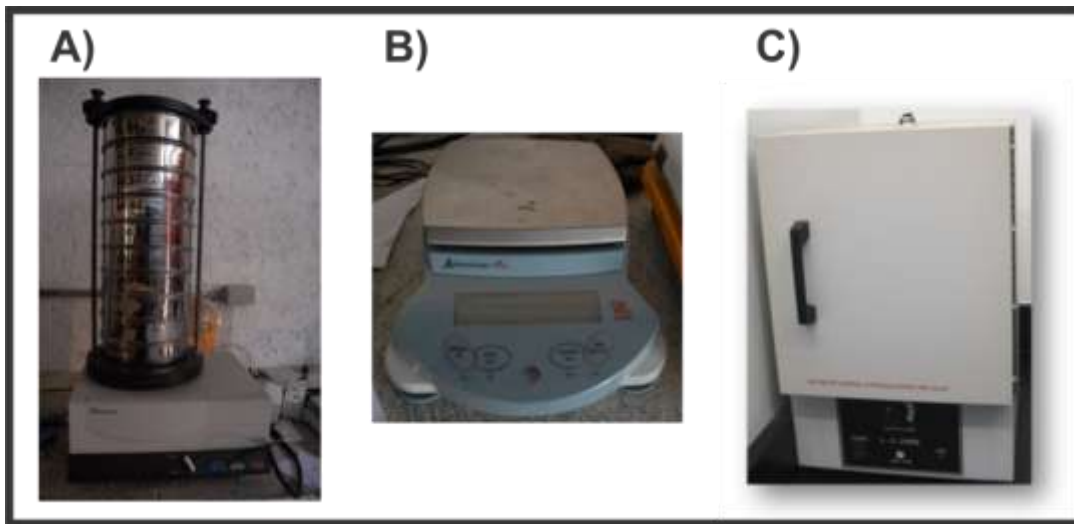


Figura 3.8 A) Máquina ro-top y mallas, B) Báscula, C) Horno Lab-Line

3.2 CONDICIONES DE OLEAJE

El programa experimental se definió para que todas las condiciones de oleaje rompieran en voluta sobre la pendiente del modelo físico. La generación de rotura tipo voluta está asociada a valores del número de Iribarren entre el rango de 0.5 y 3.3. El número de Iribarren fue calculado mediante la siguiente expresión $I_r = \tan \theta / (H_i / L_0)^{0.5}$. La selección de las condiciones de oleaje utilizadas se realizó a partir de la parametrización propuesta por [Pedrozo-Acuña et al. \(2008\)](#), quienes mostraron una clara relación entre la presión máxima registrada en el punto de impacto y el número de Iribarren. La [Figura 3.9](#) presenta parte de sus resultados donde se comprueba que los impactos más intensos, están asociados a números de Iribarren cerca de 0.6.

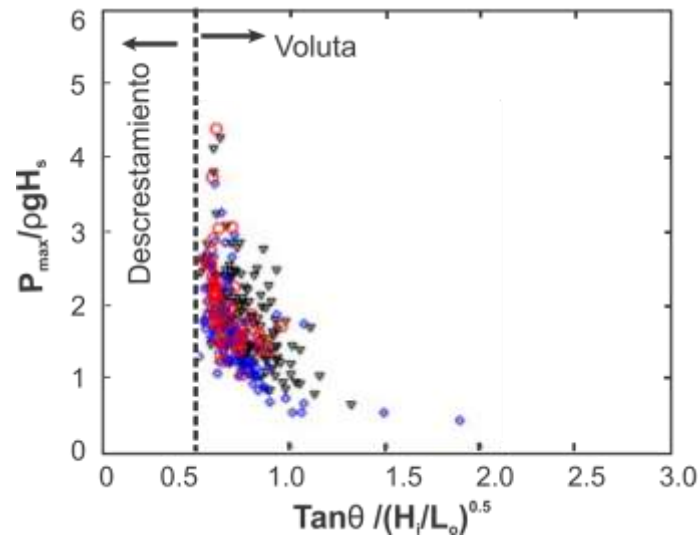


Figura 3.9 Presiones de impacto adimensionales vs el número de Iribarren (\diamond - las presiones de impacto para el caso 1 $H_s = 1$ m $T_p = 4.1$ s; \circ - presiones de impacto para el caso 2 $H_s = 1.2$ m $T_p = 4.2$ s; \blacktriangledown - las presiones de impacto para el caso 3 $H_s = 1$ m $T_p = 5.2$ s). Pedrozo-Acuña et al. (2008).

La [Tabla 3.2](#) reporta las condiciones de oleaje seleccionadas para estos ensayos de laboratorio, donde se aprecian valores de I_r cercanos a 0.6, 1 y 1.5 a fin de tener condiciones de voluta con presiones de impacto diferente. En particular, se determinó el uso de oleaje regular y se definieron seis diferentes condiciones que satisfacen el parámetro de *surf* (o número de Iribarren) para la determinación de una rotura de tipo voluta sobre la pendiente. La duración de cada una de las pruebas completas fueron de 3 horas de generación de oleaje dividido en 3 series de 1 hora cada una, de tal suerte que la deformación del perfil de la playa correspondiera al perfil de equilibrio, esto fue verificando de forma visual, que después de las 2 hrs de oleaje el perfil no observaba un cambio representativo sobre la pendiente.

Tabla 3.2 Condiciones de oleaje seleccionado

NOMBRE DE LA PRUEBA	ALTURA DE OLA [cm]	PERIODO [s]	I_r [1]
H12T10	12	1.0	0.7214
H12T15	12	1.5	1.0821
H12T20	12	2.0	1.4428
H16T10	16	1.0	0.6248
H16T15	16	1.5	0.9371
H16T20	16	2.0	1.2495

3.3 MODELO FÍSICO (CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO)

Para la construcción de los modelos físicos en laboratorio, se utilizaron 3 diferentes tamaños de grano, identificados por el D_{50} , esto permitió la generación de modelos con cuatro permeabilidades distintas.

Los materiales utilizados fueron los siguientes, arena fina caracterizada por un diámetro medio $D_{50} = 0.19$ mm (en color blanco), el número adimensional phi correspondiente se estimó en 2.40. Adicionalmente se utilizó granillo y gránulos, caracterizados por un $D_{50} = 2.2$ mm (color verde) equivalente a -1.14 en escala de phi y un $D_{50} = 3.6$ mm (color rojo) que en escala de phi sería de -1.85, respectivamente. En la Figura 3.10 se presentan las curvas granulométricas para cada material por separado.

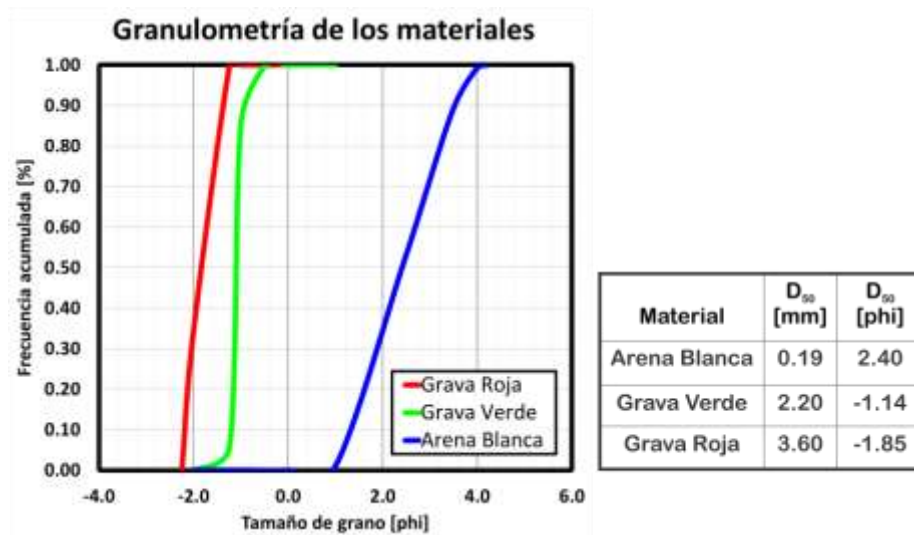


Figura 3.10 Curvas granulométricas de los 3 materiales utilizados en los experimentos.

Adicionalmente del análisis granulométrico, se calcularon en el laboratorio las densidades de los materiales, la porosidad de los materiales, así como el ángulo de reposo del material y por último la velocidad de caída. En la Tabla 3.3 se presentan las características del sedimento, tales como diámetros representativos, variación estándar y las obtenidas en el laboratorio, por otra parte para el cálculo de permeabilidad se utilizó la fórmula de Soulsby (1997) para material de diámetro menor a 1.2 mm y Engelund (1953) para diámetros mayores, las expresiones se muestran en las Ecuaciones 3.1 y 3.2.

Soulsby (1997),	$K_p = 0.0011 k_p D_{50}$	$D_{50} < 1.2 \text{ mm}$	$c_p = \frac{g}{v} k_p$	Ecuación 3.1
Engelund (1953)	$k_p = \frac{n^2 D_{50}^2}{1000(1 - n)^2}$		$c_p = \frac{g}{v} k_p$	Ecuación 3.2

Tabla 3.3 Propiedades de los materiales utilizados en los experimentos.

Material	D5 [phi]	D16 [phi]	D50 [phi]	D84 [phi]	D95 [phi]	σ [1]	S_s [1]	n [%]	ϕ [°]	W_f [m/s]	C_p [cm/s]
Arena blanca	1.20	1.50	2.40	3.30	3.70	0.83	2.62	38.6	25.42	0.03	0.04
Grava Verde	-1.25	-1.10	-1.14	-1.00	-0.25	0.18	2.60	42.2	26.47	0.18	2.60
Grava Roja	-2.25	-2.15	-1.85	-1.45	-1.30	0.32	2.60	42.7	27.69	0.25	7.60

Los diferentes modelos físicos, se construyeron a partir de las siguientes combinaciones de material: (ver Figura 3.11 la granulometría de las cuatro condiciones de playas en estudio):

- Modelo 1: mezcla cuya relación del material fue de 50-50% en peso del material rojo ($D_{50}= 3.6$ mm) y blanco ($D_{50}= 0.19$ mm). Con un $D_{50}= 0.7$ mm ($\Phi=0.52$). Esta condición representa el caso más impermeable.
- Modelo 2: sólo material verde con un $D_{50}= 2.2$ mm ($\Phi=-1.14$).
- Modelo 3: consistió en emplear una proporción de mezcla de 50-50% de gravilla verde ($D_{50}= 2.2$ mm) y gránulos rojos ($D_{50}= 3.6$ mm). El tamaño medio de sedimento de la mezcla se estimó un $D_{50}= 2.6$ mm ($\Phi=-1.38$).
- Modelo 4: material color rojo de un $D_{50}= 3.6$ mm ($\Phi=-1.85$).

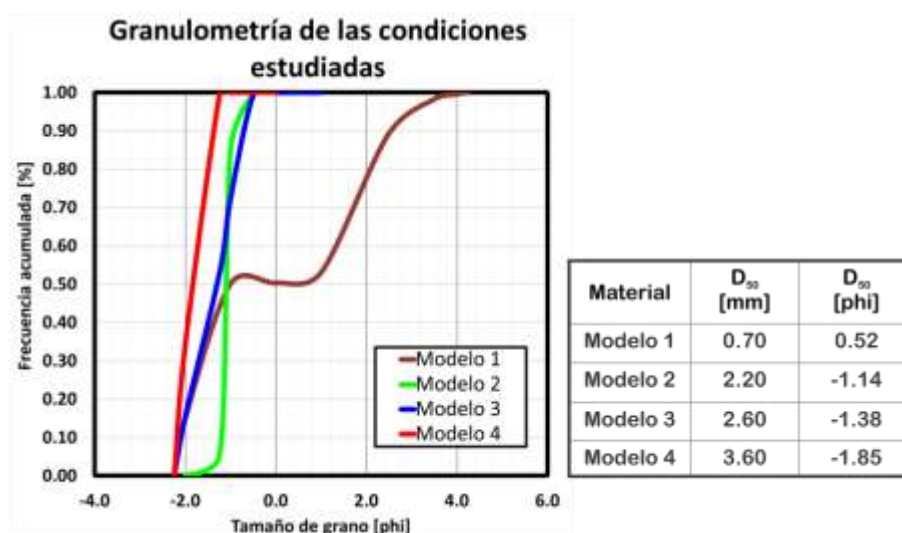


Figura 3.11 Curvas granulométricas de las 4 condiciones de los modelos físicos estudiados.

La Tabla 3.4 muestra las características de los materiales para las cuatro condiciones utilizadas en el modelo físico.

Tabla 3.4 Propiedades de los materiales de los modelos físicos.

Material	D5 [phi]	D16 [phi]	D50 [phi]	D84 [phi]	D95 [phi]	σ [1]	S_s [1]	n [%]	ϕ [°]	W_f [m/s]	C_p [cm/s]
Modelo 1	-2.20	-2.00	0.51	2.30	3.00	1.86	2.61	40.8	25.91	-	0.04
Modelo 2	-1.25	-1.10	-1.14	-1.00	-0.25	0.18	2.60	42.2	26.47	0.18	2.60
Modelo 3	-2.20	-2.00	-1.38	-0.75	-0.60	0.55	2.60	43.3	26.10	-	1.80
Modelo 4	-2.25	-2.15	-1.85	-1.45	-1.30	0.32	2.60	42.7	27.69	0.25	7.60

La elección de los materiales para estos modelos físicos, se realizó con el objetivo de evaluar la representación de la permeabilidad en la respuesta morfológica de la playa. Adicionalmente, se tomaron muestras puntuales de sedimento antes y después de cada condición de oleaje, a fin de determinar la redistribución del sedimento por la acción del oleaje.

Para la construcción de cada uno de estos modelos se utilizaron aproximadamente 9 costales de 50 Kg de cada material. En la Figura 3.12 se muestra de forma gráfica los diferentes materiales utilizados para la construcción de los modelos físicos.

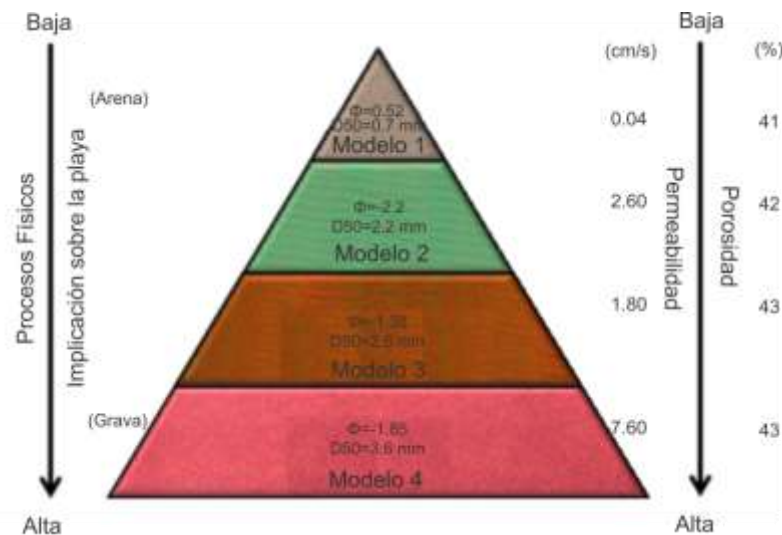


Figura 3.12 Muestras de las mezclas de los escenarios para las playas analizadas y su relación con la permeabilidad e implicación de procesos físicos

A fin de conocer de forma más completa las características del sedimento utilizado, se determinaron las velocidades correspondientes de caída del sedimento, valor que depende del tamaño, la forma y la densidad del mismo. Las velocidades de caída, se calcularon de forma experimental y teórica de acuerdo con Camenen (2007), Madsen y Jimenez (2003) que se presentan en las Ecuaciones 3.3 y 3.4, debido a que las formulaciones son precisas. A partir del empleo de estas expresiones matemáticas, se obtuvieron las velocidades de caída de los materiales empleados, los cuales se reportan en la Tabla 3.5.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 24 & a_2 &= 100 & a_3 &= 2.1 + 0.06P \\
 b_1 &= 0.39 + 0.22(6-P) & a_2 &= 20 & a_3 &= 1.75 + 0.35P \\
 m_1 &= 1.2 + 0.12P & m_2 &= 0.47 & m_{ca} &= m_1 \left[\sin \frac{\pi}{2} CSF \right]^{m_2} \\
 CSF &= 0.7 & P &= 3.5
 \end{aligned}$$

Camenen (2007)

$$A_{ca} = a_1 + a_2 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2} CSF \right]^{a_3}$$

$$B_{ca} = b_1 + b_2 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2} CSF \right]^{a_3}$$

$$W_f = \frac{v}{D_{50}} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{2/m_{ca}} + \left(\frac{4d_*^3}{3B_{ca}} \right)^{2/m_{ca}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}}} \right]$$

Ecuación 3.3

$$d_{NR} = \frac{D_{50}}{0.9}$$

$$S_* = \frac{d_{NR}}{4\nu} \sqrt{\Delta g d_{NR}}$$

$$W_f = \left(A + \frac{B}{S_*} \right)^{-1} \sqrt{\Delta g d_{NR}}$$

Madsen y Jimenez (2003)

Ecuación 3.4

Tabla 3.5 Velocidades de caída de los cuatro materiales empleados para la elaboración de las playas

Nombre	Composición	D50 [mm]	Medidos [m/s]	Camenen [m/s]	Jiménez Madsen [m/s]
Modelo 1	Grava roja - Arena blanca [50/50]	0.70	-	0.02	0.02
Modelo 2	Grava verde	2.20	0.18	0.19	0.20
Modelo 3	Grava roja - Grava verde [50/50]	2.60	-	0.16	0.17
Modelo 4	Grava roja	3.60	0.25	0.26	0.26

3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación se presenta la metodología experimental seguida en este trabajo de investigación, las labores de laboratorio se pueden dividir en cinco etapas. Para la primera, se definió que durante el primer tren de ondas se registrarían series temporales de presión y nivel de superficie libre de manera simultánea a la grabación de la cámara de alta velocidad. Por limitaciones de la memoria de la cámara se determinó un periodo de grabación de 3 segundos.

La segunda etapa consideró el registro de series temporales de presión y nivel durante una hora, para cada conjunto de prueba (con un total de 3 pruebas). Al terminar la acción del oleaje durante las tres horas, es decir, una vez que el perfil de no presentaba cambios significativos, se repitió el procedimiento de la primera fase, que considera la grabación de las condiciones hidrodinámicas con la cámara de alta velocidad. Como cuarto paso, se determinó el vaciado del canal a fin de obtener el perfil final, y evidencia fotográfica de la distribución del sedimento. Por último, a fin de obtener la información del sedimento, se tomaron de 6 a 7 muestras de la capa superior del material a lo largo del perfil final.

Una parte de la metodología contempló para las condiciones de mayor contenido energético, es decir para una altura de ola de $H=16$ cm y periodo de $T=2$ segundos, utilizar el ADV, para obtener las velocidades de forma puntuales a lo largo del perfil, estas velocidades se compararon con las obtenidas con la técnica del BIV. Estas pruebas se ejecutaron después del set de 3 horas de oleaje. El tiempo de muestreo definido para cada prueba fue de 5 minutos. La Tabla 3.6 reporta las posiciones horizontales medidas respecto a la intersección del nivel de referencia de (0.45 m) y la pendiente inicial.

Tabla 3.6 Tabla resumen del posicionamiento del vectrino para cada escenario de playa para la condición H16T20.

Modelo 1: Rojo-Blanco			Modelo 2: Verde		
Posición	Distancia x [m]	Distancia y [cm]	Posición	Distancia x [m]	Distancia y [cm]
1	1.25	10.0	1	1.20	11.6
2	1.10	8.5	2	1.15	9.2
3	1.00	6.5	3	1.00	4.1
4	0.95	2.0	4	0.90	3.8
5	0.90	2.5	5	0.80	3.6
6	0.80	3.0	6	0.70	2.1
7	0.70	1.1			
8	0.50	1.3			
9	0.25	1.1			

10	0.00	1.2			
11	-0.20	1.0			
Modelo 3: Rojo-Verde			Modelo 4: Rojo		
Posición	Distancia x [m]	Distancia y [cm]	Posición	Distancia x [m]	Distancia y [cm]
1	0.25	2.0	1	1.10	11.3
2	0.30	2.0	2	1.00	8.3
3	0.35	4.0	3	0.90	5.0
4	0.40	4.0	4	0.80	2.5
5	0.45	4.5	5	0.50	2.0
6	0.60	4.2	6	0.40	1.5
7	0.70	3.9	7	0.25	1.2
8	0.80	3.8	8	0.15	1.0
9	0.90	3.8	9	0.00	1.2
10	10.00	4.7, 1.7	10	-0.20	1.4
11	1.15	9.2			

Como se ha dicho con anterioridad, durante estos experimentos se implementó la técnica de la velocimetría por trazado de burbujas, conocida como BIV o Bubble Image Velocimetry. Esta metodología presentada a detalle por [Gutiérrez \(2012\)](#), considera la extracción del campo de velocidades a partir de la medición de fotografías de alta velocidad. Para ello se requiere la definición de los parámetros fotográficos de la cámara de alta velocidad, la localización de la zona de estudio y la toma de fotografías para un evento de rotura del oleaje. Previo a su procesamiento, las imágenes son tratadas por medio de una técnica de inversión de color. La técnica utiliza el algoritmo de correlación conocido como *diferencias mínimas cuadráticas* (MQD, siglas en inglés), para ubicar el movimiento de las burbujas entre dos fotografías consecutivas, las velocidades en la zona de flujo turbulento quedan determinadas a partir del desplazamiento estimado de las burbujas en un tiempo conocido.

El intervalo de tiempo entre cada fotografía se definió de tal manera que fue posible dar seguimiento al movimiento de las burbujas entre cuadros fotográficos consecutivos. Para el caso de la cámara de alta velocidad monocromática, el intervalo quedó definido como $\Delta t = 0.000835$ s, es decir se capturaron 1117 fotos por segundo, con una resolución de 1056 x 512 píxeles. Mientras que para la cámara de alta

velocidad a color, se obtuvieron imágenes con una mayor resolución dada por 1920 x1080 pixeles, y con un intervalo de tiempo de $\Delta t= 0.000992$ s (pruebas realizadas únicamente para el sedimento rojo-verde).

Dentro de las pruebas realizadas en este trabajo se utilizaron diferentes números f debido a los requerimientos de la luz empleada, pues a medida que este número incrementa la abertura se reduce o dobla la cantidad de luz que pasa por el objetivo. Así mismo se emplearon distintos puntos de colocación de la cámara, por lo que se utilizaron diferentes distancias entre la cámara de alta velocidad y el objeto de estudio. En la Tabla 3.7 se muestran algunos de los parámetros fotográficos estudiados.

Tabla 3.7 Parámetros fotográficos estudiados. Para las pruebas del Modelo 2 (grava verde)

PRUEBA	H12T10	H12T15	H12T20	H16T10	H16T15	H16T20
f-stop	f/2.5	f/1.5	f/2	f/2	f/2	f/2.8
Diámetro de pupila [mm]	10.00	16.67	12.50	12.50	12.50	8.93
Distancia focal del lente [mm]	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
L [m]	0.90	1.10	1.10	1.10	1.20	1.30
Límite más próximo de nitidez, R	0.87	1.07	1.06	1.06	1.16	1.23
límite más lejano de nitidez, S	0.93	1.13	1.14	1.14	1.25	1.38
Profundidad de campo, DOF [m]	0.06	0.06	0.08	0.08	0.09	0.15

Cabe señalar que el empleo de esta técnica de medición ha sido reportada exitosamente por [Hassan et al. \(1998\)](#), [Nishino et al. \(2000\)](#), [Lindken y Merzkirch \(2002\)](#), [Pedrozo-Acuña et al \(2011; 2012; 2013\)](#) y [Rivillas-Ospina et al. \(2012\)](#).

En la Figura 3.13 se muestra a manera de resumen, un diagrama de flujo con la metodología empleada para este trabajo de tesis.

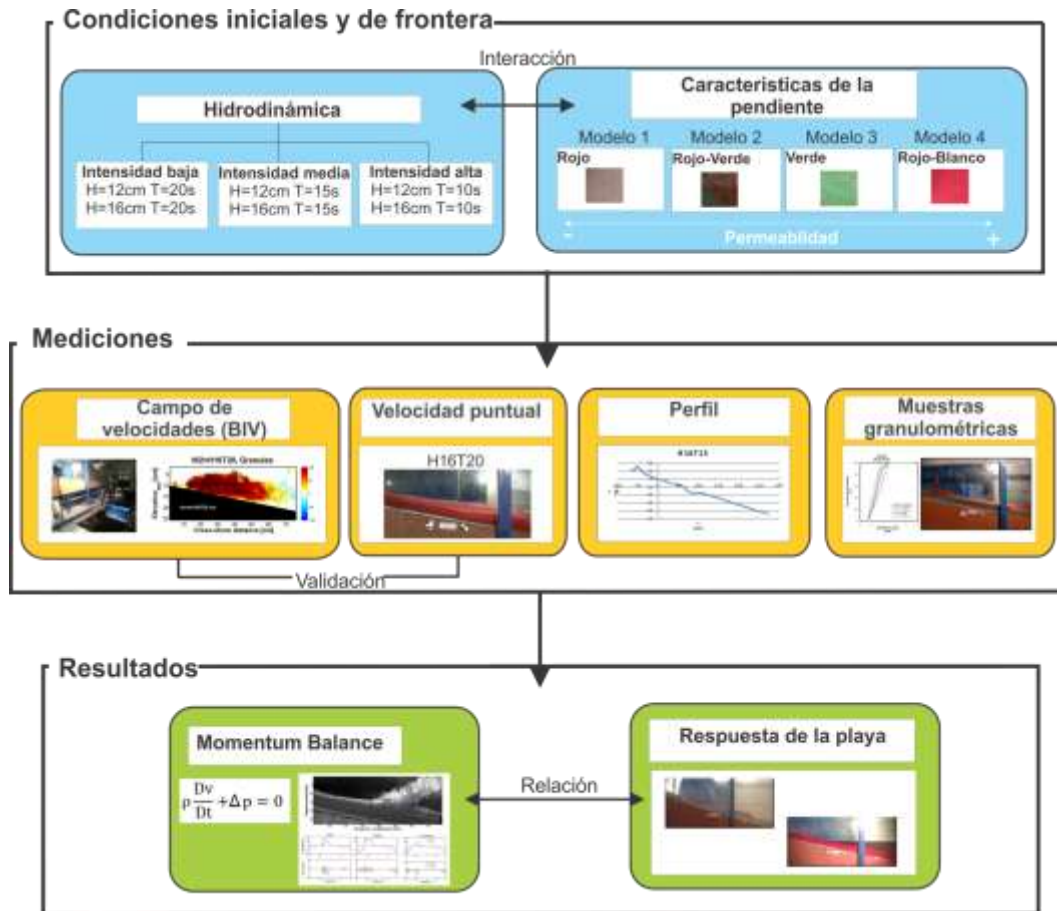


Figura 3.13 Metodología para el análisis de resultados.

Las pruebas realizadas para el trabajo experimental se muestran en la [Tabla 3.8](#). Para los casos de mayor impermeabilidad solo fueron seleccionadas aquellas pruebas de mayor contenido energético.

Tabla 3.8 Condiciones de estudio seleccionadas

PRUEBA	Modelo 1 Rojo –Blanco [Modelo 3 Verde	Modelo 3 Rojo – Verde	Modelo 4 Rojo
H12T10	n/a	x	x	x
H12T15	n/a	x	x	x
H12T20	n/a	x	x	x
H16T10	x	x	x	x
H16T15	x	x	x	x
H16T20	x	x	x	x

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo introduce los resultados del análisis de los datos de laboratorio, los cuales permitirán establecer una discusión sobre el balance que se presenta en los procesos hidrodinámicos dentro de la zona de cercanías de la playa considerando diferente composición de la pendiente permeable (material homogéneo y heterogéneo de diferente graduación o D_{50}). Los resultados mostrados solo son válidos a nivel de laboratorio, utilizando una escala 1:1.

El trabajo experimental realizado en esta tesis contribuye al esclarecimiento de los procesos asociados a la rotura más intensa que se presenta en la naturaleza.

Este capítulo presenta los resultados referentes a la respuesta morfológica, el campo de velocidad, y el gradiente de presión determinado, en la zona de cercanías de la costa, bajo condiciones de rotura tipo voluta. Se presentan, entonces, los resultados asociados a la respuesta morfológica de la pendiente permeable bajo una misma condición de oleaje, considerando diferente tipo de sedimentos en el material que la compone. Esta información se contrasta con el campo de velocidades medido, y la cantidad de movimiento del flujo expresada en función de la ecuación de Euler. Los resultados se discuten en función de las diferencias en las características físicas de permeabilidad, porosidad e infiltración, a fin de poder determinar su importancia en el balance de los mecanismos de transporte de sedimentos presentes en la zona de cercanías de la costa.

4.1 SELECCIÓN DE EXPERIMENTOS

Dada la magnitud del esfuerzo experimental realizado en este proyecto de investigación, se seleccionaron, para la discusión, sólo una parte de los resultados de laboratorio. En el caso de los resultados morfológicos, se presentan todos los datos obtenidos, a fin de discutir la distribución granulométrica e ilustrar cómo una misma condición de oleaje puede generar condiciones morfológicas completamente distintas. Mientras que para el caso del campo de velocidad y el gradiente de presión se hace una selección en función de las presiones impulsivas clasificando cada condición de oleaje como: alto a las condiciones con altura de ola de $H=12$ y 16 cm y periodo de $T=1$ s, medio para las condiciones con alturas de ola de $H=12$ y 16 cm y con periodo de $T=1.5$ s y bajo para periodos de $T=2$ s y altura de ola de $H=12$ y 16 cm.

4.2 RESPUESTA MORFOLÓGICA

La morfología en la zona de cercanías a la costa es el resultado de la interacción de una serie de agentes dinámicos y características físicas del sistema. Por ejemplo, el nivel relativo de la superficie (SWL), las condiciones de oleaje, el tipo de sedimento en la playa, la disponibilidad del material, entre otros factores son elementos clave que determinan la morfodinámica en esta región. En esta sección se muestran los perfiles finales, es decir cuando los cambios morfológicos del perfil de la pendiente permeable fueron nulos.

Antes de presentar los resultados experimentales correspondientes, se introduce un breve análisis del perfil que se espera en cada una de las condiciones probadas. Para ello, se utilizan expresiones paramétricas que ayudan a determinar el tipo de perfil que se esperaría bajo ciertas condiciones. La primera expresión corresponde al Número de Dean (Ecuación 4.1) que determina si un perfil será erosivo o de acreción de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 4.1. Así, este parámetro proporciona información sobre el tipo de transporte que prevalece durante la acción del oleaje.

Tabla 4.1 Valores de los parámetros Dean

Parámetro	Umbral de acreción	Umbral de erosión
Dean	< 2.7	> 2.7

La ecuación que lo define está dada por:

$$N^{\circ} \text{ de Dean} = \frac{H_s w_s}{T} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

En donde: H_s representa a la altura de ola [cm], w_s es la velocidad de caída de la partícula [cm/s] y T es el periodo [s].

La Tabla 4.2 resume los valores estimados para el número de Dean, para cada condición de oleaje y modelo físico usado en los experimentos, donde A se refiere a un perfil de acreción y E a uno erosivo. Las velocidades de caída utilizadas se encuentran en la Tabla 3.5.

Tal y como se reporta, para la mayor parte de las condiciones de oleaje y modelos, se esperaría una predominancia de transporte hacia la costa, es decir, perfiles de acreción. Sin embargo en el modelo 2 y modelo 4 para la condición de altura de ola de $H=16$ cm y periodo de $T=1$ s, y para el modelo 4 para las condiciones de altura de ola de $H=16$ cm y periodo de $T=1.5$ s se muestran se esperarían perfiles erosivos. Estos resultados son constantes para las velocidades de caídas tanto teóricas como experimentales.

Tabla 4.2 Números de Dean

Condiciones de oleaje	Medidos		Camenen				Jiménez – Madsen			
	Modelo 2	Modelo 4	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
H12T10	2.1	3.1	-	2.3	2.0	3.1	-	2.4	2.0	3.1
	A	E		A	A	E		A	A	E
H12T15	1.4	2.0	-	1.6	1.3	2.1	-	1.6	1.3	2.1
	A	A		A	A	A		A	A	A
H12T20	1.1	1.5	-	1.2	1.0	1.6	-	1.2	1.0	1.5
	A	A		A	A	A		A	A	A
H16T10	2.8	4.1	0.4	3.1	2.6	4.2	0.4	3.1	2.7	4.1
	E	E	A	E	A	E	A	E	A	E
H16T15	1.9	2.7	0.2	2.1	1.8	2.8	0.3	2.1	1.8	2.7
	A	E	A	A	A	E	A	A	A	E
H16T20	1.4	2.0	0.2	1.6	1.3	2.1	0.2	1.6	1.3	2.1
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Adicionalmente, se calculó la profundidad de cierre teórica, para ello se utilizó la expresión que se presenta en la Ecuación 4.2, propuesta por [Hallermeier \(1981\)](#).

$$h_c = 2.28H - 68.5 \left(\frac{H^2}{gT^2} \right) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde H representa la altura de ola [m], T está asociado con el periodo [s] y g es la aceleración debido a la gravedad [m/s²]. La Tabla 4.3 presenta los resultados obtenidos para cada condición de oleaje.

Tabla 4.3 Profundidad de cierre de acuerdo a Hallermeier (1981).

H [cm]	T [s]	h_c [cm]	H [cm]	T [s]	h_c [cm]
0.12	1.00	0.1730	0.16	1.00	0.1860
0.12	1.50	0.2289	0.16	1.50	0.2854
0.12	2.00	0.2485	0.16	2.00	0.3201

El propósito detrás del cálculo de estos parámetros empíricos, consiste en establecer qué tan bien representan o describen las mediciones obtenidas en el laboratorio. Se anticipa que esto permitirá discutir las limitaciones y avances del conocimiento para predecir la morfodinámica costera.

4.2.1 RESULTADOS PRUEBA $H=12$ CM, $T=1.0$ S

La Figura 4.1 introduce los resultados para la condición de oleaje definida por una altura de ola $H=12$ cm y periodo de $T=1.0$ s. Estas condiciones definen un forzamiento con bajo contenido energético y con altas presiones impulsivas (número de iribarren ~ 0.6). El panel superior de la Figura 4.1 se presenta un resumen de todos los cambios morfológicos para cada uno de los modelos físicos utilizados (para las condiciones de media energía $H=12$ cm no se probó el modelo 1 construido con la mezcla de arena blanca y gránulos rojo. En este resultado es posible comparar y observar que para una misma condición de forzamiento se obtienen resultados morfológicos diferentes, con una pequeña variación en la permeabilidad de la pendiente, por lo que se comprueba que la relación de un tipo de material con un clima de olas es prácticamente biunívoca. Por otro lado, la línea azul quebrada horizontal indica el nivel de agua en reposo (*SWL*, por sus siglas en inglés), mientras que la línea marrón horizontal define la profundidad de cierre estimada con la ecuación de [Hallermeier \(1981\)](#).

Los resultados de cambios morfológicos para cada uno de los casos señalan que la infiltración de agua en la pendiente, juega un papel primordial en los cambios morfológicos que se registran en el perfil. La posición de la berma es un indicador de ello, ya que para el material más permeable compuesto por grava roja (modelo 4) se reporta una berma en una posición anterior al de los casos menos permeables construidos con gravilla verde (modelo 2) y la combinación de ambos (modelo 3). Esto indica que el ascenso máximo que se registra sobre la pendiente permeable está gobernado por la infiltración de agua sobre el modelo. Por otro lado, en las tres pruebas se observa la generación de un ligero escarpe en la zona cercana a la rotura de la ola (punto de impacto), así como la formación de una pequeña berma y barra.

El movimiento de sedimentos se ubica en la zona cercana al punto de rotura, ya que el material es agitado por el impacto de la onda y el subsecuente *bore* en conjunto con los efectos de turbulencia, provocando que el movimiento de sedimento, su transporte y depositación sobre la berma o barra.

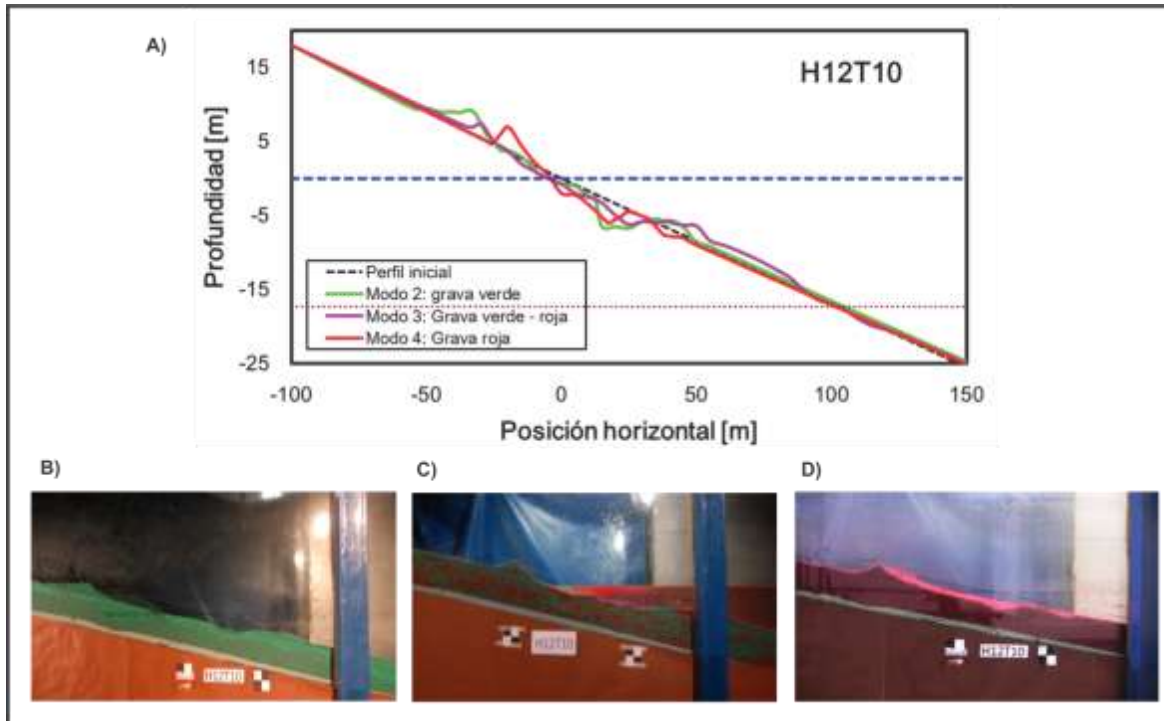


Figura 4.1 Condición H12T10. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

4.2.2 RESULTADOS PRUEBA $H=16\text{ CM}$, $T=1.0\text{ S}$

La Figura 4.2, presenta los resultados para la condición de oleaje definida por una altura de ola de $H=16\text{ cm}$ con periodo de $T=1\text{ s}$. En este caso, se tienen resultados morfológicos para los cuatro modelos físicos construidos. En el panel superior, si se compara el cambio morfológico, es posible determinar que, en comparación con los resultados reportados para el caso de $H=12\text{ cm}$ y $T=1\text{ s}$ se observa una magnificación del tipo de perfil resultante entre una condición de baja y alta energía. Esto se explica porque las condiciones asociadas a una ola de más energía, permiten el movimiento de más cantidad de sedimentos con lo que ambas, berma y barra presentan mayor tamaño y su localización se encuentra más alejada. De manera notable, el caso de menor permeabilidad (modelo 1) presenta una respuesta morfológica completamente diferente a la que se reporta para los casos de mayor permeabilidad (modelo 2, 3 y 4). Lo que indica una relación importante de la infiltración en el balance de los procesos hidrodinámicos que actúan sobre la pendiente. Por ejemplo, la menor permeabilidad permite la intensificación de la corriente de resaca que produce un mayor transporte de sedimentos en dirección contraria a la costa (*offshore*), para formar la barra; también otro factor que pudo haber interferido en esta formación es el peralte asociado al D_{50} del modelo, pues este elemento es el encargado de controlar la reflexión y disipación de energía del oleaje incidente, por lo que para peraltes altos generados en el modelo 1, aumenta la disipación de energía en la zona de rompientes lo que produce un aumento en la intensidad de las corrientes de retorno. El sedimento, que se presenta en el modelo 1 (arena blanca – grava roja), es erosionado de la parte alta del perfil, provocando un escarpe de grandes dimensiones, similar al que se observa al paso de condiciones de tormenta (Ruiz de Alegría-Arzaburu et al., 2013), cuyas pendientes

reportadas fueron mayores a los 32° de ángulo crítico de reposo para las playas del Caribe mexicano compuesta por arena con un D_{50} aproximada de 0.6 mm y donde los escarpes fueron relacionados con el ascenso del oleaje (*runup*), las mareas y la contribución del flujo de energía litoral. La posición de este escarpe identifica la posición máxima del ascenso máximo, se aprecia que para el caso de menor permeabilidad (modelo 1), el avance del fluido recorre una mayor distancia que en el resto de los materiales, resaltando una vez más la función de la permeabilidad/infiltración en la respuesta morfológica del perfil. Adicionalmente, para este caso de menor permeabilidad (modelo 1) se identificó la presencia de pequeños rizos en la región de someramiento de las olas y hasta el pie de la rampa. Mientras que para los materiales más gruesos no se apreciaron.

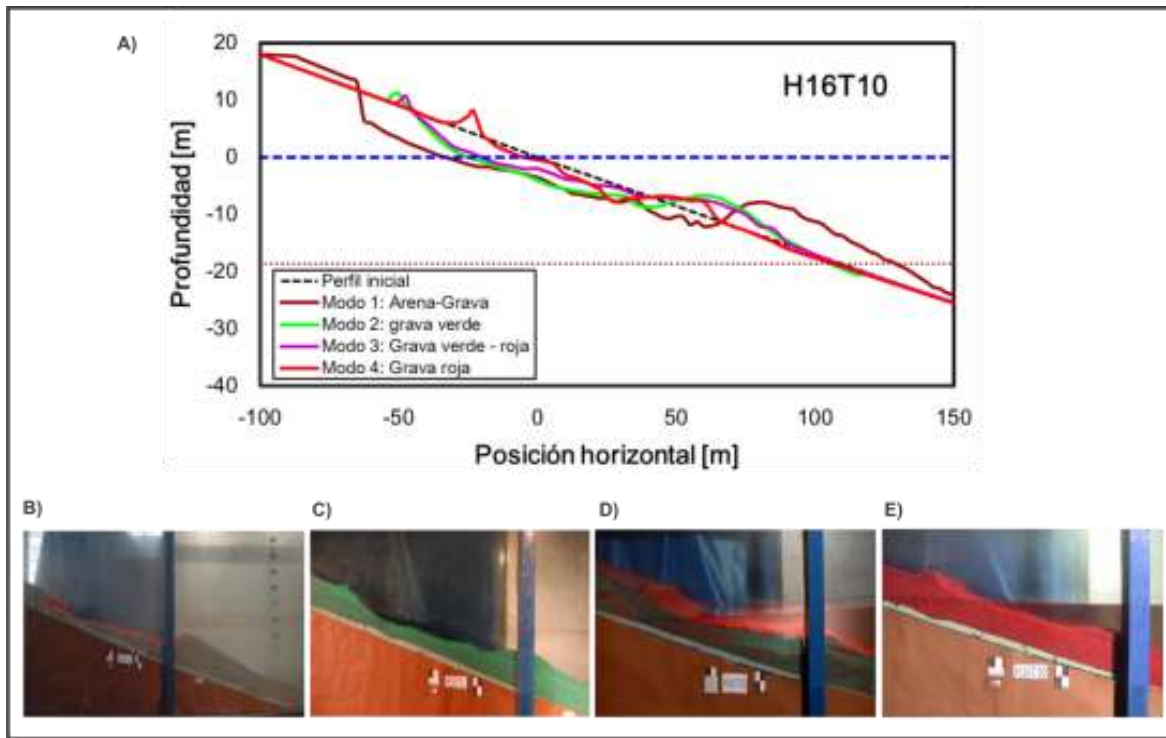


Figura 4.2 Condición H16T10. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

4.2.3 RESULTADOS PRUEBA $H=12$ CM, $T=1.5$ S

La Figura 4.3 muestran los perfiles para una condición hidrodinámica de altura de ola de $H=12$ cm y periodo de $T=1.5$ s, en este caso el resultado morfológico es interesante discutir. Por un lado, los tres perfiles de los materiales utilizados presentan la generación de una berma en la parte alta del perfil, es relevante que en el caso de mayor permeabilidad la posición de la berma indica un menor ascenso máximo sobre la pendiente. Así mismo, debajo del nivel de agua en reposo el modelo 4 (material rojo) indica la presencia de un escalón, típico de playas de grava en condiciones de campo. Mientras que los casos de material menos grueso presenta la formación de una barra incipiente en esa misma posición.

Este resultado confirma el papel protagonista de la infiltración en el balance de los procesos hidrodinámicos en la región de las cercanías a la costa. En general, los perfiles resultantes para los tres modelos son muy semejantes a los perfiles teóricos para playas de gravas, en donde se evidencia la presencia de un perfil tipo escalón para las playas de diámetros mayores y la formación de un perfil tipo barra en diámetros menores (Powell 1990).

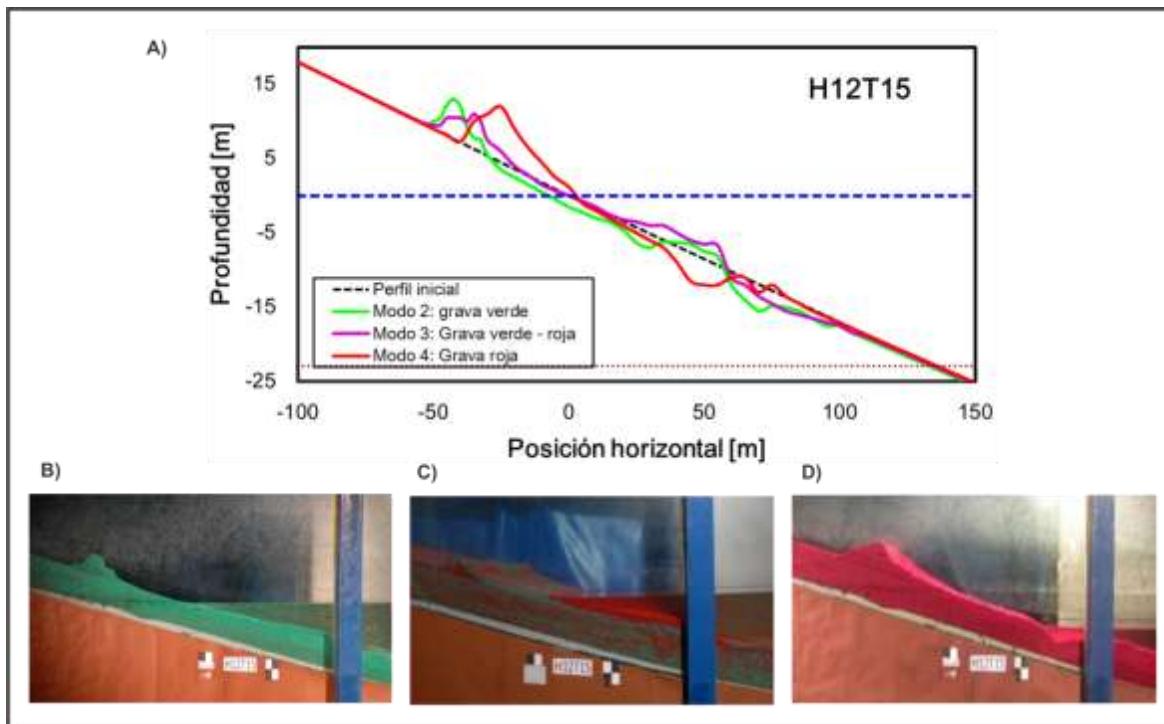


Figura 4.3 Condición H12T15. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

4.2.4 RESULTADOS PRUEBA $H=16$ CM, $T=1.5$ S

La Figura 4.4 introduce las respuestas morfológicas registradas para una condición hidrodinámica dada por una altura de ola de $H=16$ cm y periodo de 1.5 s. Los resultados encontrados bajo esta condición señalan una respuesta morfológica similar en todos los casos. El perfil más impermeable, dado por la mezcla de gránulos y arena (modelo 1), presenta pocos cambios morfológicos, con una mínima barra debajo del nivel de agua en reposo. Por otro lado, los otros tres casos con mayor permeabilidad generan un escalón debajo del nivel de agua en reposo, rasgo morfológico que está asociado a la interacción de la onda en rompiente con el flujo de descenso.

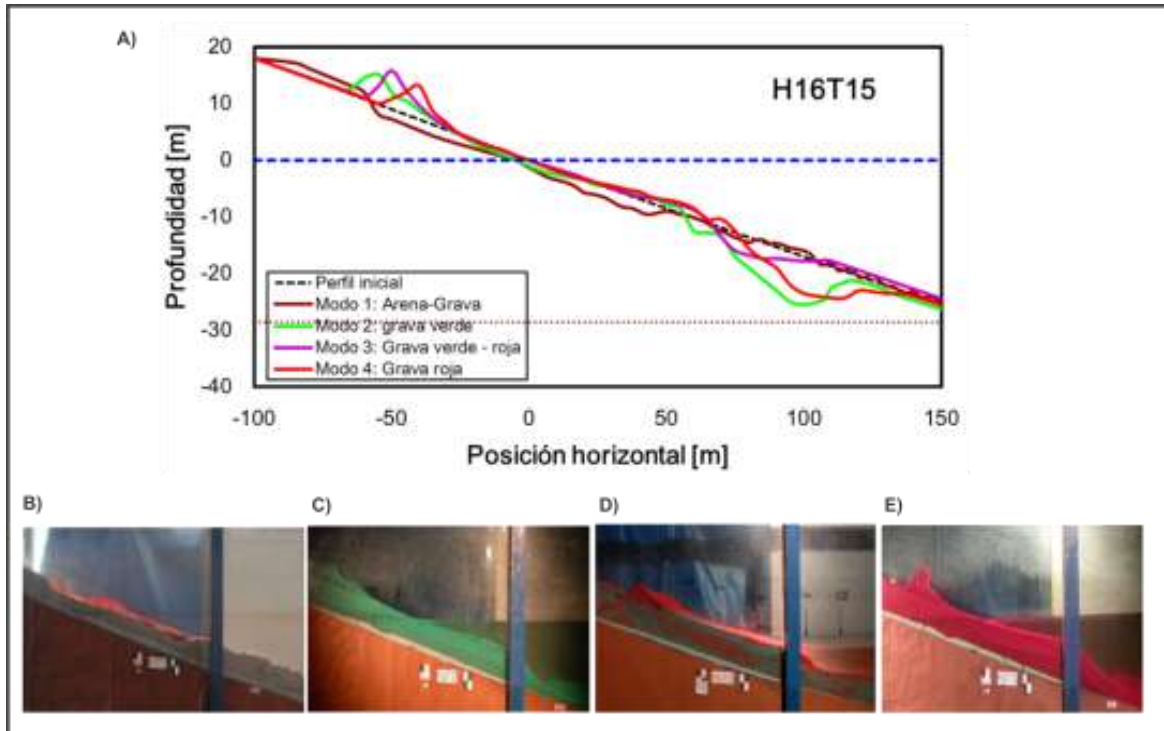


Figura 4.4 Condición H16T15. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

4.2.5 RESULTADOS PRUEBA $H=12$ CM, $T=2.0$ S

La Figura 4.5 introduce las respuestas morfológicas registradas para una condición hidrodinámica dada por una altura de ola de $H=12$ cm y periodo de 1.5s. Los resultados encontrados bajo esta condición señalan una respuesta morfológica similar en todos los casos. El perfil más impermeable, dado por la mezcla de gránulos y arena (modelo 1), presenta pocos cambios morfológicos, con una mínima barra debajo del nivel de agua en reposo. Por otro lado, los otros tres casos con mayor permeabilidad generan, ambos, una berma en la parte alta del perfil y un escalón debajo del nivel de agua en reposo. Este último rasgo morfológico está asociado a la interacción de la onda en rompiente con el flujo de descenso.

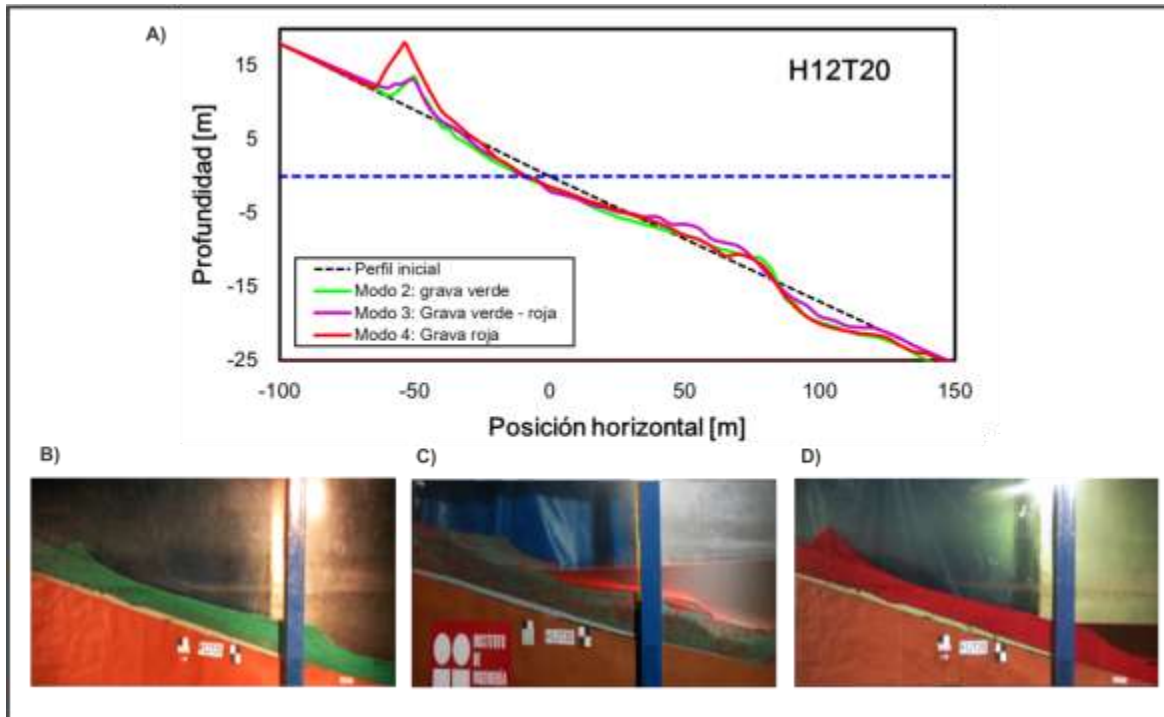


Figura 4.5 Condición H12T20. Panel superior muestra el gráfico con los perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los tres perfiles estudiados; B) Modelo 2: grava verde (infiltración baja); C) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); D) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

4.2.6 RESULTADOS PRUEBA $H=16\text{ CM}$, $T=2.0\text{ S}$

La Figura 4.6 introduce las respuestas morfológicas de la última condición de oleaje probada, aquella que corresponde a una altura de ola de $H=16\text{ cm}$ y periodo de 2.0 s . Los resultados encontrados confirman una vez más la función de la permeabilidad de la playa en la respuesta morfológica del perfil, dado que para el caso más impermeable se registra una condición erosiva sobre la pendiente, mientras que para los casos de mayor permeabilidad se registra la presencia de una barra y berma sobre el perfil. En esta condición de oleaje, se aprecia que para el caso de mayor permeabilidad, la respuesta morfológica es muy similar a aquella registrada en playas de grava (ver resultados de [Pedrozo-Acuña et al., 2006](#) y [López-de San Román-Blanco et al., 2006](#)).

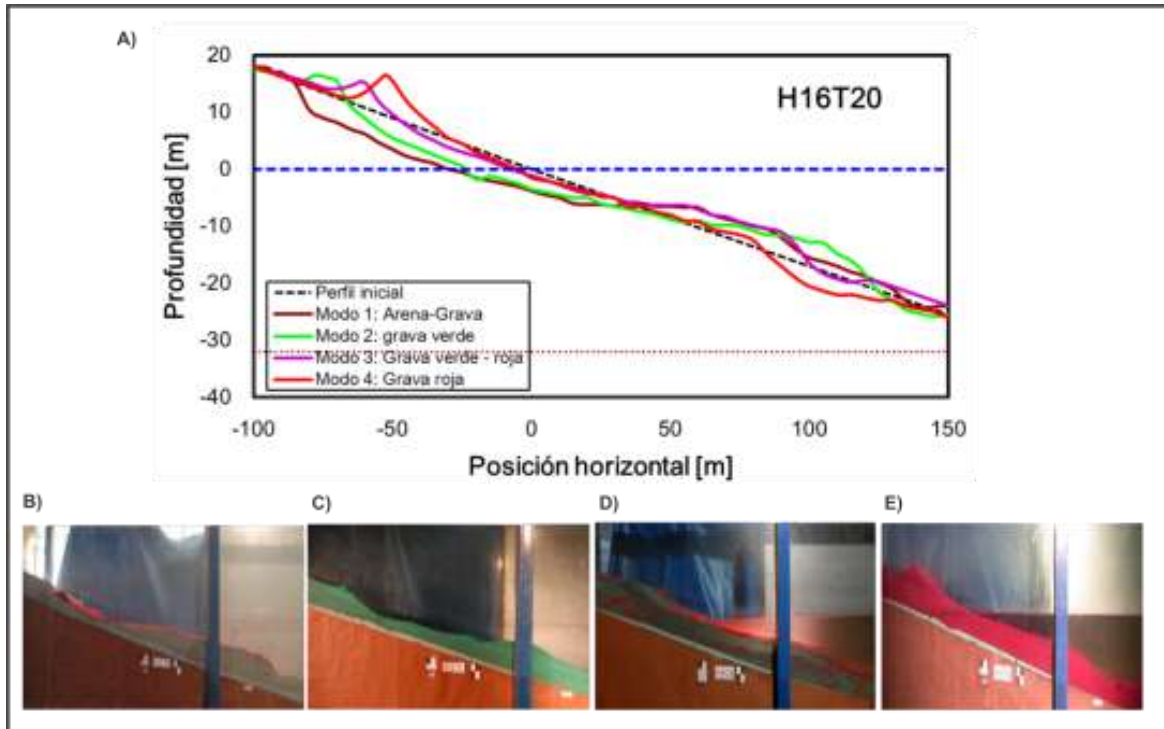


Figura 4.6 Condición H16T20. Panel superior muestra el gráfico de los cuatro perfiles estudiados, paneles inferiores presentan las muestras fotográficas. A) Gráfico de los cuatro perfiles. B) Modelo 1: arena blanca y grava roja (infiltración baja); C) Modelo 2: grava verde (infiltración media); D) Modelo 3: grava roja y verde (infiltración media); E) Modelo 4: grava roja (infiltración alta).

De acuerdo con las respuestas morfológicas registradas para estas condiciones de rotura, es posible afirmar que los sedimentos son agitados por la acción del oleaje en el punto de rotura, el material puesto en suspensión es, en función del régimen hidrodinámico, transportado en dirección hacia la costa (*onshore*) para generar la berma o en dirección opuesta (*offshore*), para conformar un escarpe y la barra de arena debajo del nivel de agua quieta. Estos resultados son similares a los de investigaciones anteriores, como por ejemplo, aquella presentada por [Holmes et. al. \(1996\)](#), donde bajo condiciones de oleaje aleatorio también se pusieron a prueba modelos físicos de playas construidos con dos tipos de materiales, uno grueso y una mezcla 50/50 entre material fino y grueso. En sus resultados, los perfiles para la mezcla del material de material fino y grueso indicó una tendencia erosiva, en la que el transporte de sedimento es dirigido *offshore* para la generación de una barra (similar al de nuestro caso arena/gránulos). Sin embargo, para el caso del material grueso el movimiento se presenta hacia la costa (*onshore*), esto sucedió para la formación de la berma por encima del *SWL* inicial (igual que los gránulos rojos de nuestro experimento). Lo mismo ocurre en comparación con los resultados presentados por [Jennings y Shulmeister \(2002\)](#), quienes consideraron una amplia gama de tipos de playa, en función de las mezclas y de los tamaños de grano.

Se observa que la respuesta de la playa está en función del tamaño de sedimento (diámetro medio). Dado que, en términos generales conforme aumenta la permeabilidad del sedimento (en relación a los diámetros de mayor tamaño), la presencia de la berma es más evidente y es más cercana al nivel de agua en reposo (*SWL*), lo que indica la importancia de la infiltración en la prevención del flujo de ascenso. En contra parte, en el caso de menor permeabilidad (mezcla de arena y grava), se encontró la presencia de un escarpe en la parte alta de la pendiente, lo que indicó para los casos estudiados una condición erosiva.

Los resultados de este trabajo, originados por distintas condiciones de oleaje y modelos de playas fueron relacionados con los perfiles estables alcanzados en el laboratorio para una playa de diámetro de 0.25 mm sin afectación del nivel freático, con altura de ola de 0.12 y 0.16 m y periodos de 1 y 2 s, partiendo de un talud inicial 1:5, (Meneses 2009). En los perfiles se visualizó que las deformaciones de sus modelos eran comparables con los modelos 2, 3 y 4 de este trabajo experimental pues en ellos era evidente la formación de un perfil reflejantes con acumulación de una berma y la formación de una barra o escalón, así mismo, era evidentes que conforme la altura de ola aumentaban se acrecentaba el volumen depositado en la berma así como la erosión en la parte baja del perfil y al incrementar los periodos el desplazamiento del material es mayor por lo cual es más evidente la erosión que en su gran mayoría provocaba la formación de un perfil escalón y el incremento de la berma.

En la Tabla 4.4 se muestran los tipos de perfiles que se identificaron, fue nombrado como perfil de erosión a aquel que provocó una mayor erosión en la cara de la playa y provocó un avance del nivel agua en reposo hacia el lado de tierra, disminuyendo con esto la superficie emergida y ubicando la mayor parte del material en la barra/escalón; por otra parte una playa en acreción se le nombró cuando el escarpe observado era imperceptible y la acumulación de la mayor cantidad de material se daba en la posición de la berma. Al comparar los perfiles experimentales con los valores estimados para el número de Dean mostrados en la Tabla 4.2 y de acuerdo al balance de realizado del material posicionado tanto en la berma como en la barra, se aprecia que los valores con el número de Dean solo predijeron el perfil para el modelo 2 (grava verde), porque correspondió a un perfil en erosión para la condición H16T10, pero para el modelo 4 (grava roja) los ensayos no lo que predecía en número de Dean para las condiciones H16T10, H16T15, H12T10, no se mostró perfil de erosión sino de acreción.

Tabla 4.4 Tipo de perfil

Condición	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
	Rojo-Blanco	Verde	Rojo-Verde	Rojo
H12T10	-	Acreción	Erosión	Acreción
H12T15	-	Acreción	Acreción	Acreción
H12T20	-	Erosión	Erosión	Acreción
H16T10	Erosión	Erosión	Erosión	Acreción
H16T15	Erosión	Acreción	Acreción	Acreción
H16T20	Erosión	erosión	Erosión	Acreción

Es posible afirmar que es evidente que los cuatro modelos físicos construidos generan respuestas morfológicas completamente diferentes, esto indica un factor importante de la permeabilidad dentro del balance de procesos hidrodinámicos que generan la evolución del perfil (por ejemplo, la infiltración y el flujo de retorno). La importancia de la permeabilidad en la respuesta morfológica de una playa fue también estudiada durante una investigación experimental realizada en el año 2002, en el Gran Canal de Oleaje (GWK) ubicado en Hannover, Alemania (López de San Román al-Blanco et., 2006). En este trabajo, se estudió la respuesta morfológica de modelos físicos a escala de prototipo, para lo cual se

construyeron dos modelos distintos, uno compuesto solo por grava y otro por una mezcla de grava y arena (similar al caso de nuestra grava roja mezclada con la arena). En el caso del modelo mezclado, existe una pequeña diferencia entre aquél experimento y el realizado en esta tesis que estriba en el porcentaje de cada material, durante los experimentos de Alemania se utilizó una composición de 30% de arena y 70% de grava, mientras que para los resultados de este trabajo se definió una composición de 50/50.

En ambos experimentos, la respuesta morfológica del perfil de playa compuesto por grava (ej. alta permeabilidad) es muy similar bajo todas las condiciones probadas. Es decir, se observa la formación de una berma por encima del nivel de agua en reposo. Sin embargo, la respuesta morfológica del modelo mixto compuesto por una mezcla de grava y arena, presenta resultados completamente diferentes en ambos experimentos. Es muy probable que esto se deba a la diferencia en el porcentaje seleccionado para cada material durante la construcción de ambos modelos (70/30 vs 50/50). Al construir con mayor cantidad de arena el modelo mixto durante nuestros experimentos, la permeabilidad de la misma es reducida considerablemente.

Otros factores que deben ser considerados en las pruebas de laboratorio es la duración de la acción del oleaje y la condición inicial de la pendiente de la playa. De acuerdo con lo reportado por [Dalrymple y Thompson, 1976](#) las condiciones iniciales de pendientes dadas por 1:5 a 1:10 no tienen efecto alguno sobre perfiles de arena de 0.4 mm, al igual que [Nicholson, 1968](#) en arenas de 2 mm y [Van Hijum 1974](#) en material de 1.8 mm a 16.5 mm, en todos estos experimentos llegaron a la misma conclusión que con estas pendientes los efectos de los perfiles no tienen gran influencia.

4.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS

Una actividad adicional durante las pruebas de laboratorio se consideró el estudio de la re-distribución del sedimento a lo largo de la pendiente, naturalmente, este trabajo se llevó a cabo únicamente para aquellos experimentos en los que se utilizó una mezcla de diferentes tamaños de sedimentos. Estas pruebas consistieron en tomar muestras de sedimento a fin de evaluar su granulometría en distintas posiciones a lo largo del perfil.

Con el propósito de simplificar la discusión, sólo se mostrarán resultados en tres puntos, el primero localizado en la berma o escarpe generado, el segundo corresponde a la intersección entre el nivel de agua en reposo y la pendiente de la playa, y el último punto, por debajo del nivel de agua en reposo, se ubicó en la barra o escalón generado en cada prueba. Las muestras se tomaron al finalizar cada condición de oleaje, es decir, después de las tres horas de la acción de oleaje con el perfil resultante de los experimentos. En virtud de que el oleaje solo redistribuye la parte expuesta o superficial del perfil de playa, el material para análisis se tomó exclusivamente de los 5 cm superiores de cada modelo.

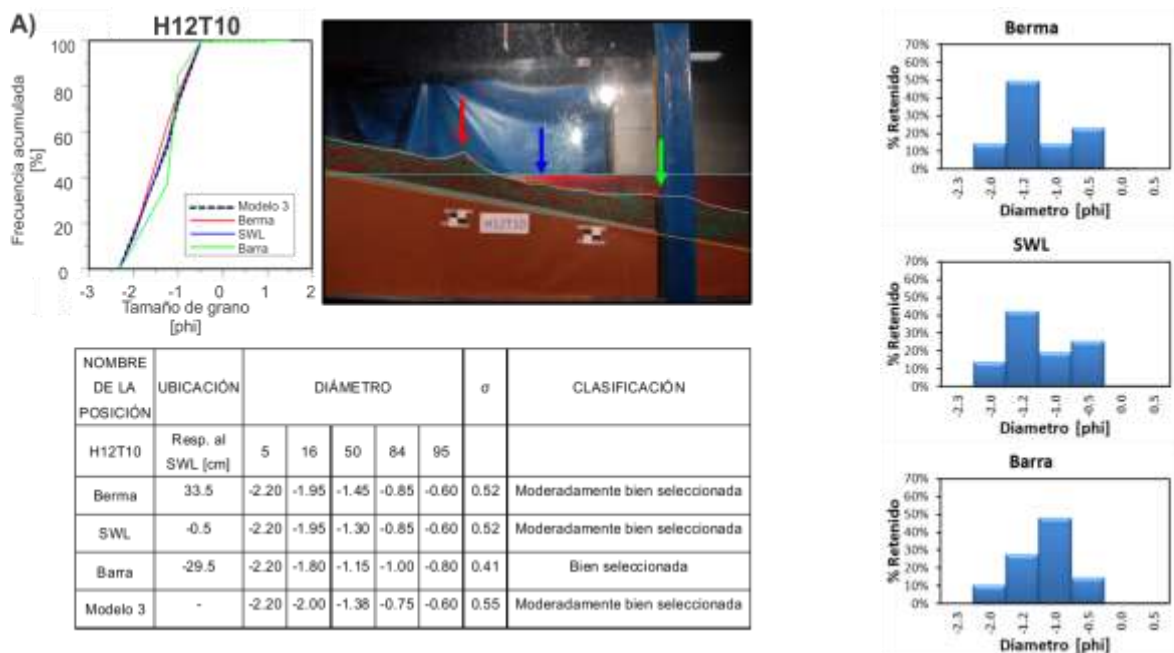
Las siguientes figuras presentan los resultados para el modelo construido con el modelo 3 conformado por el material verde y rojo (ver Figuras 4.7 y Figura 4.8), así como para el construido con el modelo 1 constituido por la mezcla de material blanco y rojo. En este último caso sólo se presentan resultados para la condición hidrodinámica dada por una altura de ola $H=16$ cm y periodo de $T=2$ s (ver Figura 4.9).

Las figuras muestran la curva de distribución granulométrica para la mezcla inicial y en cada punto de análisis al final de la prueba. Adicionalmente, se presenta evidencia fotográfica del perfil final y la ubicación de los puntos de análisis sobre el perfil, el porcentaje del material, junto con una tabla que reporta los resultados de los percentiles característicos de la muestra y otros parámetros de análisis (percentiles utilizados: 5, 16, 50, 84 y 95).

La Figura 4.7 muestra los resultados para el perfil de playa generado bajo condiciones hidrodinámicas con altura de ola de $H=12$ cm. De la inspección de los gráficos de distribución granulométrica es posible concluir que las condiciones de oleaje que favorecen el reacomodo del material a lo largo del perfil de playa están asociadas a ondas con periodos más largos (ej. $T= 2s$). En el caso de las condiciones con periodo corto, el diámetro medio (D_{50}) del sedimento, propiamente no cambia en ninguno de los puntos de análisis. Solamente para el caso del punto en la berma se registra un ligero cambio en la curva de distribución granulométrica (ej. para condiciones con $T= 1$ y 1.5 s).

Los resultados indican un reacomodo en la distribución del sedimento, dado que el sedimento de mayor diámetro fue depositado en la zona de la berma y el material de menor diámetro sobre la cara de la playa y en la formación tipo escalón. En el caso de los resultados con altura de ola de 12 cm, se observa un diámetro medio en escala de phi entre -1 y -2 , entre los diámetros de mayor porcentaje de retención registrado se encontraron los de diámetro de comprendidos entre -1 y -1.2 , con un diámetro medio de la mezcla ($\Phi=-1.38$), es decir que no existen grandes variaciones de tamaño de sedimento en cuanto a la mezcla original. Esto indica que las condiciones hidrodinámicas no son lo suficientemente energéticas para provocar el reacomodo del material. Sin embargo, para el periodos de $T=1$ s se puede ver que la clasificación de la distribución se encuentra de moderadamente bien seleccionada a bien seleccionada, lo que refleja la homogeneidad de la mezcla.

En la Figura 4.8 se muestran los resultados para las condiciones de oleaje de altura de ola de $H=16$ cm, en donde se observa que el cambio en la distribución de sedimentos es más evidente. La variación de la selección oscila entre una mezcla moderadamente bien seleccionada a una mezcla bien seleccionada. Mientras que los valores de diámetro medio varían entre diámetros de -1 a -1.9 en escala de phi, los diámetros de mayor porcentaje de retención se concentró entre diámetros de -1 y -1.2 . En este caso, el material de menor diámetro es colocado sobre la barra mientras que el de mayor tamaño se ubica sobre la berma en la parte alta del perfil. En estos casos, de manera especial en el de $T=1.5s$, se aprecia un ligero acorazamiento de la superficie de la pendiente, inclusive visualmente se aprecia un engrosamiento de material respecto a la mezcla empleada. Los perfiles finales medidos, son muy semejantes a los generados con menor energía.



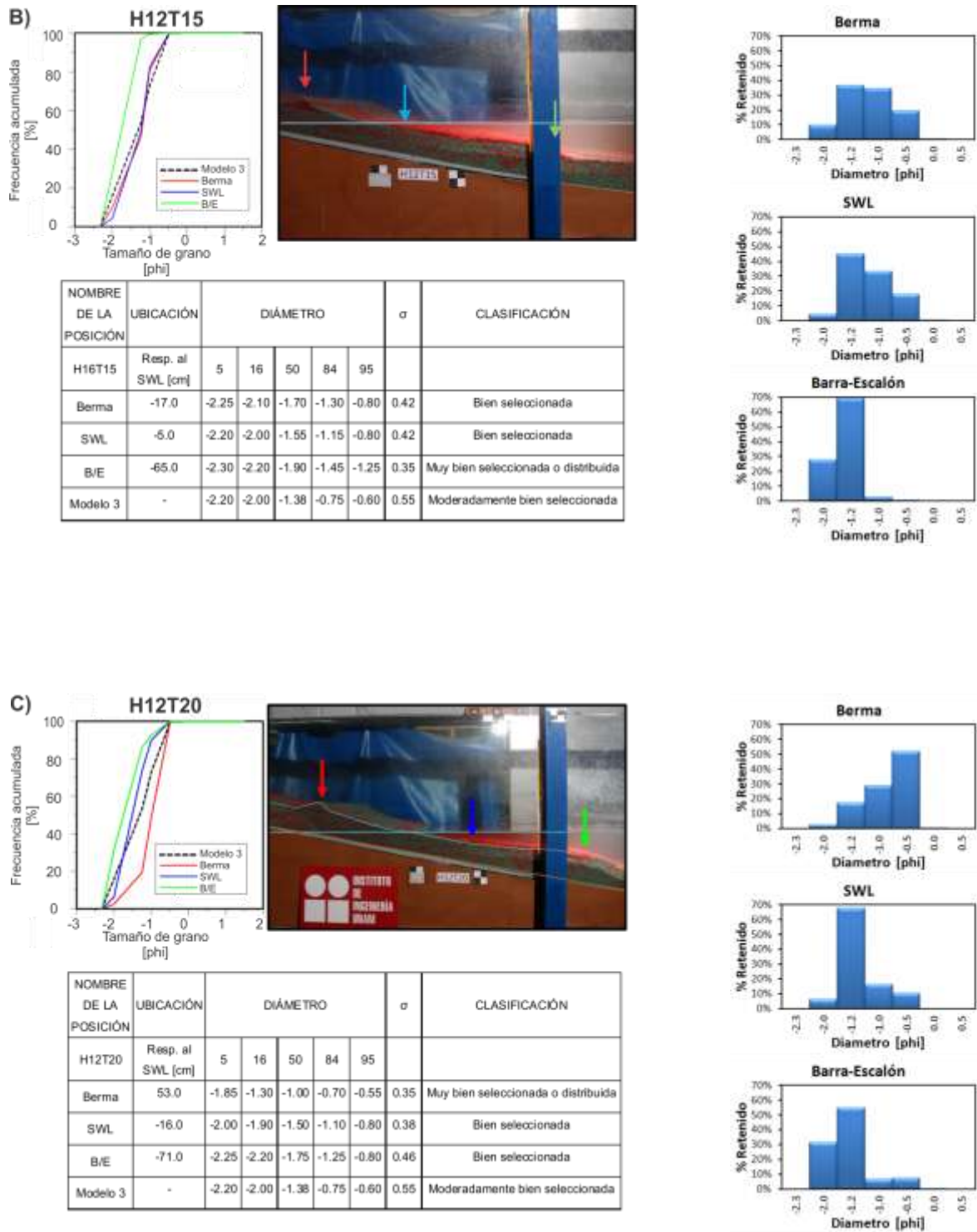
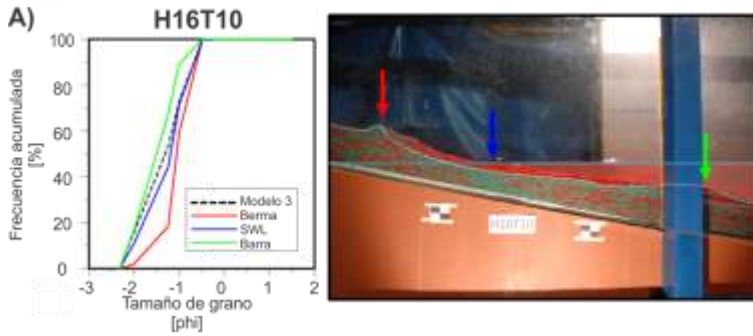
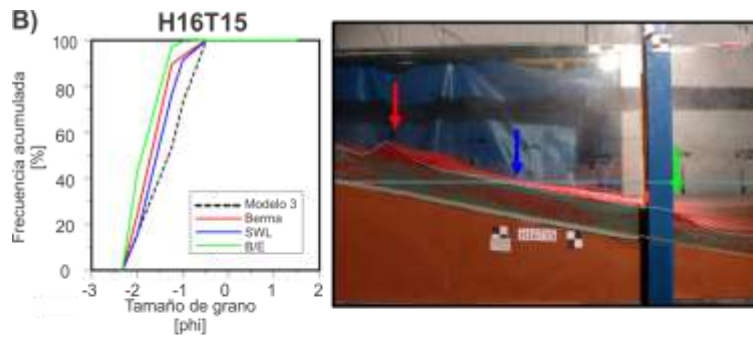
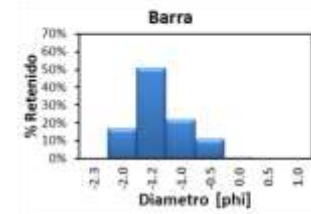
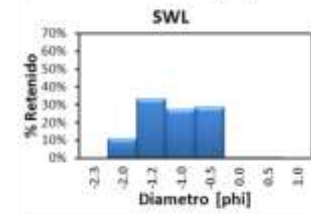
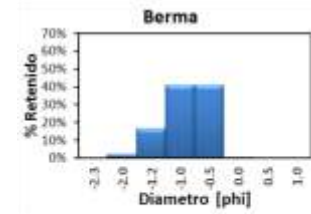


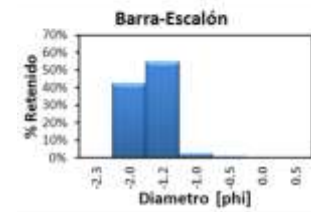
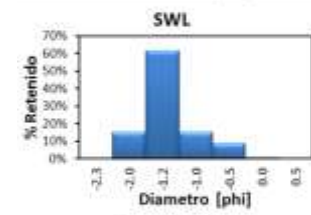
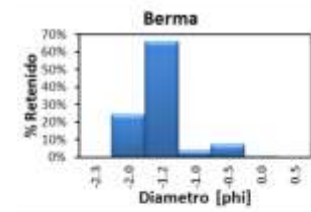
Figura 4.7 A) Condición H12T10; B) Condición H12T15, C) Condición H12T20. (Modelo 3: mezcla rojo-verde).



NOMBRE DE LA POSICIÓN	UBICACIÓN	DIÁMETRO					σ	CLASIFICACIÓN
		5	16	50	84	95		
H16T10	Resp. al SWL [cm]							
Berma	43.0	-1.80	-1.30	-1.05	-0.70	-0.55	0.34	Muy bien seleccionada o distribuida
SWL	8.0	-2.15	-1.90	-1.15	-0.80	-0.60	0.51	Moderadamente bien seleccionada
Barra	-60.0	-2.25	-2.00	-1.50	-1.05	-0.80	0.46	Bien seleccionada
Modelo 3	-	-2.20	-2.00	-1.38	-0.75	-0.60	0.55	Moderadamente bien seleccionada



NOMBRE DE LA POSICIÓN	UBICACIÓN	DIÁMETRO					σ	CLASIFICACIÓN
		5	16	50	84	95		
H16T15	Resp. al SWL [cm]							
Berma	-17.0	-2.25	-2.10	-1.70	-1.30	-0.80	0.42	Bien seleccionada
SWL	-5.0	-2.20	-2.00	-1.55	-1.15	-0.80	0.42	Bien seleccionada
B/E	-65.0	-2.30	-2.20	-1.90	-1.45	-1.25	0.35	Muy bien seleccionada o distribuida
Modelo 3	-	-2.20	-2.00	-1.38	-0.75	-0.60	0.55	Moderadamente bien seleccionada



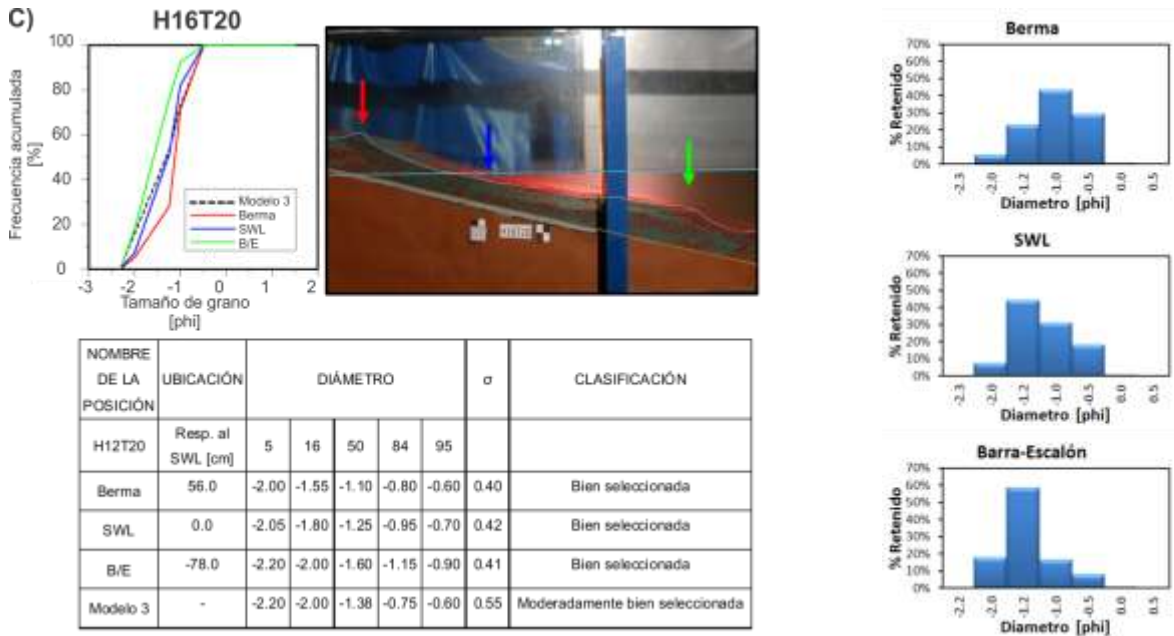


Figura 4.8 A) Condición H16T10; B) Condición H16T15, C) Condición H16T20. (Modelo 3: mezcla rojo-verde).

La Figura 4.9 muestra las distribuciones para el *modelo 1* que consiste en la combinación del material más fino con el de mayor diámetro (rojo y blanco). Para esta composición de material, el perfil de la playa presenta un comportamiento erosivo, a pesar de este comportamiento tan opuesto con respecto a la mezcla anterior, se aprecia claramente la distribución del material, similar al registrado en la Figura 4.8 para el periodo de 1.5 s, con un acorazamiento sobre la superficie del modelo físico. El material de menor diámetro se coloca sobre la barra-escalón y el material grueso sobre la berma, esa tendencia se observa en todos los experimentos. Las curvas de distribución de sedimentos obtenidos en la barra, el nivel de agua en reposo y la zona del escarpe de la playa confirmó el engrosamiento de los sedimentos superficiales como se muestra en el gráfico de distribución de la figura.

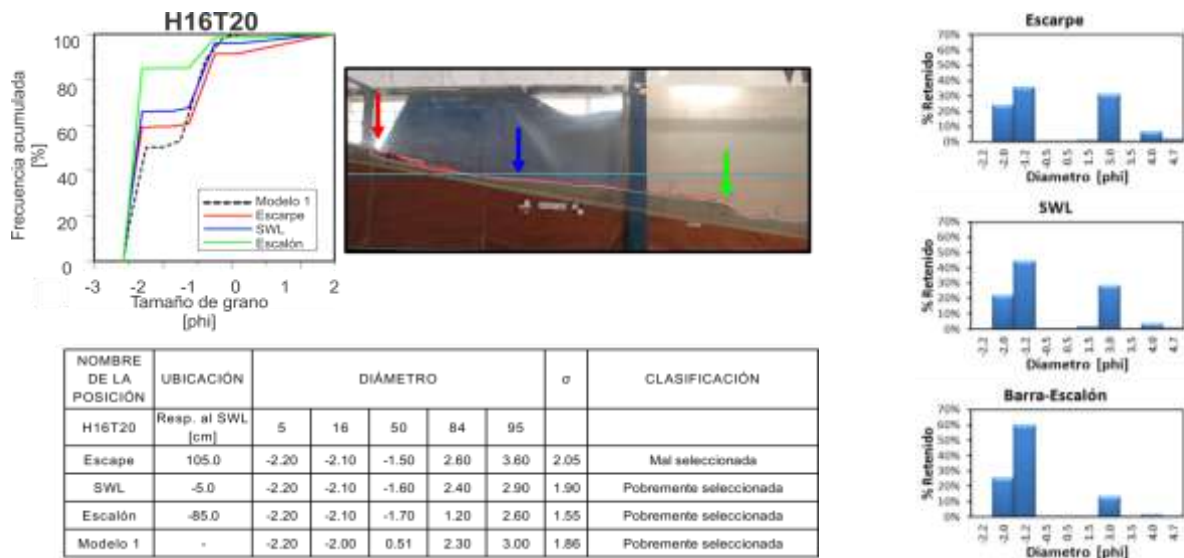


Figura 4.9 Condición H16T20 (Modelo 1: mezcla rojo-blanco).

En general, el material de mayor tamaño es colocado costa afuera (*offshore*) en zonas donde las condiciones de flujo son más energéticas. Observándose también la importancia que tiene el periodo de la ola en el reacomodo del sedimento, para aquellas pruebas en las que el periodo de la onda era mayor se registró una clara variación de la curva granulométrica inicial. Es decir, que la longitud de onda es determinante para la distribución de sedimentos a lo largo de perfil de playa, periodos cortos no representan gran variación respecto a la distribución inicial.

En esta redistribución de sedimentos se logra percibir que los diámetros son muy próximos a la mezcla original, es decir que conserva la clasificación asignada para la mezcla utilizada. Los resultados muestran que los sedimentos gruesos son colocados en la zona del escalón de la playa tal y como ha sido reportado para playas de grano grueso en campo (Austin y Buscombe, 2008).

De acuerdo con Gallagher et. al (2011), el tamaño de grano es un factor importante para la predicción de la morfodinámica de las playas, por ello es de importancia un análisis de granulometría detallado como el que se ha presentado en este trabajo.

4.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTO

4.4.1 TIPO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Para caracterizar el tipo de transporte de sedimentos que se podría presentar en los experimentos, se utilizó el parámetro de Dean, definido por medio de la Ecuación 4.1.

Para un primer análisis del tipo de transporte generado por la acción de oleaje, se evaluaron para los cuatro tipos de materiales empleados, y las 6 condiciones de oleaje. En la Tabla 4.5 de acuerdo con Carter (1988) se muestran la clasificación respecto al número de Dean en el que se señala el tipo de transporte que se puede presentar de acuerdo a las características del material y a las condiciones hidrodinámicas.

Tabla 4.5 Relación entre número de Dean y clase de transporte predominante

N° de Dean	Tipo de transporte
$n < 1$	Transporte de fondo
$1 < n < 6$	Transporte intermedio: fondo /suspensión
$n > 6$	Transporte en suspensión

En la Tabla 4.6 se muestra la clasificación del tipo de transporte de acuerdo con las pruebas que se realizaron en el laboratorio, en donde se ordenó de acuerdo con la permeabilidad del material de menor a mayor, es decir, el Modelo 1 corresponde a la mezcla 50/50 arena blanca y grava roja, el Modelo 2 es representado para la grava verde, el Modelo 3 esté compuesto de grava roja y gravilla verde, y por último el Modelo 4 está formado por la grava roja.

De acuerdo con lo reportado, se espera una tendencia hacia el transporte intermedio. La importancia de conocer estos valores es ofrecer una idea de la morfología resultante simplemente con el conocimiento

de la velocidad de caída y del estado de mar con el cual trabajará el canal de oleaje. Números de Dean altos representan mayores niveles de transporte, ya que el transporte por suspensión genera mayor movimiento del material. Los resultados arrojan de forma lógica que con la presencia de material fino, diámetros pequeños, el sedimento se mueve más por procesos de transporte asociados a la suspensión. Fenómeno que de hecho se observó durante el desarrollo de los experimentos.

Tabla 4.6 Clasificación del tipo de transporte de acuerdo al número de Dean para las pruebas de laboratorio realizadas

Condiciones de oleaje	Medidos		Camenen				Jiménez – Madsen			
	Modelo 2	Modelo 4	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
H12T10	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.
H12T15	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.
H12T20	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Fondo	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.
H16T10	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.
H16T15	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.
H16T20	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.	Fondo	Inter.	Inter.	Inter.

4.4.2 VOLÚMENES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO

Con el propósito de cuantificar el volumen de sedimento en movimiento a lo largo de la pendiente en cada simulación, se estimaron los volúmenes de acreción y erosión en función de las diferencias observadas entre perfil inicial y final. Los volúmenes se han calculado en cm^3 y se muestran en la Tabla 4.7, la suposición más importante de este ejercicio consiste en que el comportamiento morfológico descrito en el perfil, no varía de forma transversal dentro del canal, con lo que es suficiente hacer la diferencia en la dirección longitudinal del mismo. Para la estimación del volumen de sedimento se consideró la anchura real del canal de 80 cm.

Tabla 4.7 Volúmenes de erosión y de acreción experimentales

CONDICION.	MODELO 1 ROJO-BLANCO		MODELO 2 VERDE		MODELO 3 ROJO-VERDE		MODELO 4 ROJO	
	Acreción [cm ³]	Erosión [cm ³]	Acreción [cm ³]	Erosión [cm ³]	Acreción [cm ³]	Erosión [cm ³]	Acreción [cm ³]	Erosión [cm ³]
H12T10	-	-	-1887.50	1962.10	-3300.00	1570.00	-1217.50	1367.50
H12T15	-	-	-1857.50	2077.50	-1685.00	1775.00	-2650.00	2690.00
H12T20	-	-	-2120.00	1670.00	-3020.00	2350.00	-3158.20	3015.80
H16T10	-3327.00	2146.00	-2467.50	2082.50	-1890.00	1770.00	-1210.00	1345.00
H16T15	-3747.00	3034.30	-2465.00	3270.00	-1775.90	1242.54	-3460.00	3220.00
H16T20	-5498.90	7182.60	-3095.00	2735.00	-3048.38	2234.06	-3085.00	2995.00

Naturalmente, se espera que bajo todas las condiciones hidrodinámicas, el volumen estimado de erosión sea equivalente al volumen de deposición a lo largo del perfil. De acuerdo con los resultados que se presentan en la Tabla 4.7, se observa que ambos valores son aproximados (ej. no idénticos), esta pequeña diferencia es explicable en virtud de que para algunos casos el sedimento era movilizadado a regiones fuera de las zonas de interés (ej. hacia aguas más profundas) o debido a la compactación del perfil de playa en la zona de medición.

Adicionalmente, la Figura 4.10, ilustra de forma gráfica esta información para todas las pruebas. Se puede observar que las tasas de erosión y de acreción aumentan considerablemente en función de la energía incidente, ej. H=16 cm. Adicionalmente, se verifica que los niveles de transporte de sedimentos aumentan conforme aumenta el periodo de la onda.

Cabe resaltar que a pesar de que los experimentos manejan escalas distorsionadas, con lo que es necesario verificar estos resultados a una escala de prototipo o trabajar con otro tipo de sedimentos. A pesar de lo anterior, y en virtud de la comparación de los resultados obtenidos con trabajos previos en laboratorio a gran escala (López de San Román-Blanco et. al, 2006; Williams et al. 2012), hay confianza en lo reportado en este trabajo de investigación, donde los resultados pueden ser utilizados para demostrar algunos procesos a nivel de laboratorio.

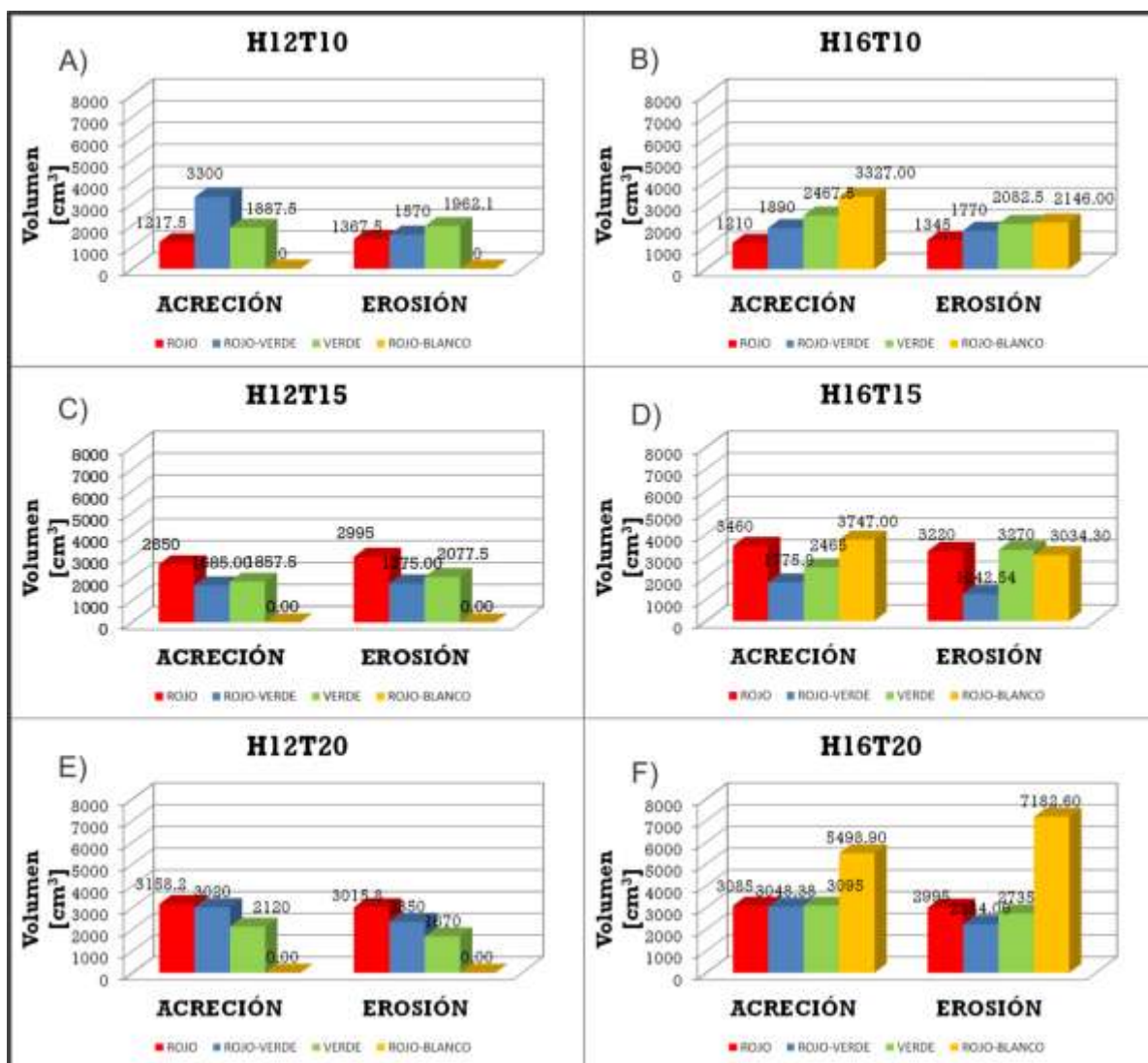


Figura 4.10 Volúmenes de sedimento para las pruebas de laboratorio. Paneles izquierdos representan alturas de olas de 12 cm (paneles a, c, e) y los paneles derechos alturas de 16 cm (paneles b, d, f), para periodos de 1, 1.5 y 2 respectivamente.

4.5 CAMPO DE VELOCIDADES

En esta sección se incorporan los resultados referentes a la evaluación del campo de velocidades bajo cada una de las condiciones probadas en el laboratorio. Para ello, se utilizaron dos técnicas de medición un velocímetro acústico y la técnica no intrusiva de trazado de burbujas (Ryu et al. 2005).

Los resultados incluyen la evolución espacio-temporal del campo de velocidades inducidas por una rotura de oleaje tipo voluta, desde una zona antes del punto de rotura y dentro de la zona de vaivén.

A fin de validar el campo de velocidades obtenido por medio de la técnica no intrusiva, se compararon, en diversos puntos estratégicos, las velocidades obtenidas del ADV con aquellas derivadas de la técnica no intrusiva.

La importancia de estas mediciones, que contienen de forma simultánea información sobre las zonas de rompiente y lavado, es clara debido a su importancia para el conocimiento de la hidrodinámica en estas regiones, que es el forzamiento principal para el cambio morfológico de las playas.

4.5.1 SERIES TEMPORALES DE VELOCIDAD (ADV)

En esta sección se presentan, a manera de ejemplo, algunas de las series temporales de velocidad obtenidas con el velocímetro acústico. En este sentido, se muestran resultados asociados a la condición más energética y con materiales de diferente diámetro (D_{50}). Esto se hace con el propósito de comparar las señales registradas para una misma condición de forzamiento bajo la que se obtuvo una morfología completamente distinta en función del material presente en el modelo.

La Figura 4.11 ilustra de forma gráfica la información correspondiente a la serie temporal de velocidades en un punto cercano al escalón del modelo. De manera significativa para el caso del modelo construido con el material grueso las velocidades que se registran son mayores en comparación con el material con la mezcla de grava y arena (de 3.5 cm/s a 5.5 cm/s), en la dirección positiva hacia la costa, sin embargo, en el contraflujo el registro de velocidad es muy parecido entre sí (aproximadamente de -3 cm/s).

El punto de discusión radica en la razón detrás de esta diferencia para una misma condición pero con dos materiales diferentes sobre la pendiente. Una suposición inicial, que se fundamentará más adelante con los resultados, consiste en que en el modelo de menor permeabilidad hay más interacción entre el flujo de ascenso y el descenso con lo que la velocidad de la onda incidente es reducida. No así en el caso del material más grueso en el que debido a la permeabilidad, el volumen de descenso es considerablemente reducido.

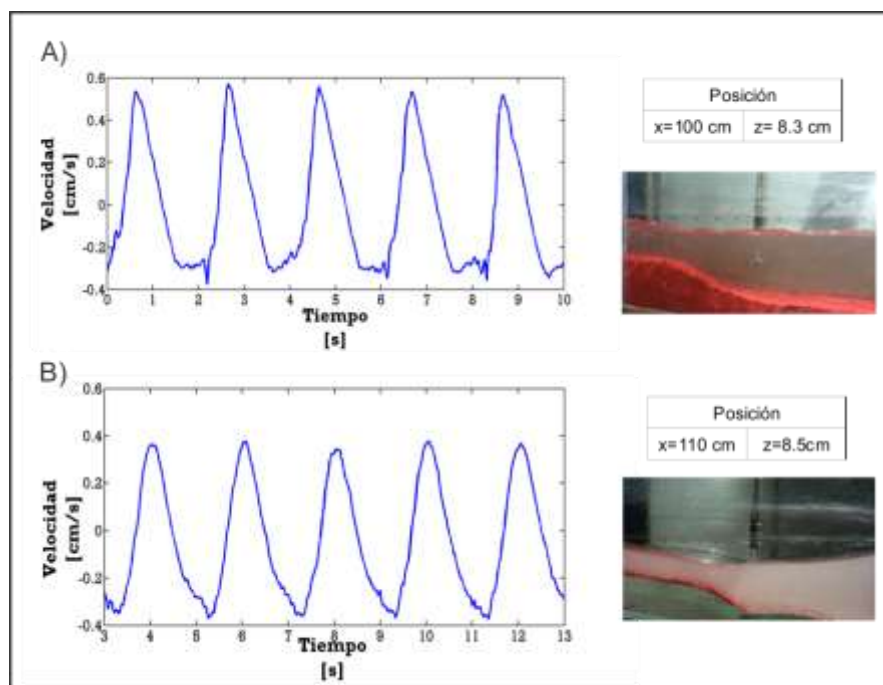


Figura 4. 11 Los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectrino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y ubicación del vectrino. La ubicación se encuentra sobre la formación de la barra para una condición de oleaje de $H=16$ cm y $T=2.0$. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).

Por otra parte, la Figura 4.12 registra las velocidades obtenidas en el punto de rotura, en la que se aprecia un comportamiento hidrodinámico similar, con un pico de baja duración hacia una velocidad positiva, fenómeno que está asociado al impacto de la onda sobre la cama de sedimento. En ambas señales los puntos de mayor velocidad se encuentran en el momento del impacto, con valores entre 0.4 y 0.6 cm/s. Sin embargo, para el material cuya permeabilidad es mayor se observa que las velocidades de retorno (ej. negativas) son mucho menores, en comparación con aquellas registradas para el modelo de menor permeabilidad. Confirmando la importancia de la permeabilidad en el balance de los procesos hidrodinámicos sobre el modelo, es decir a mayor infiltración se reduce el volumen de retorno con lo que la velocidad y fuerza de este proceso disminuye. Reduciendo así los efectos erosivos sobre el modelo. Esto es evidente al observar la respuesta morfológica de esta condición para la playa menos permeable, en la que se reportó la presencia de un escarpe y la formación de una barra como resultado de este forzamiento.

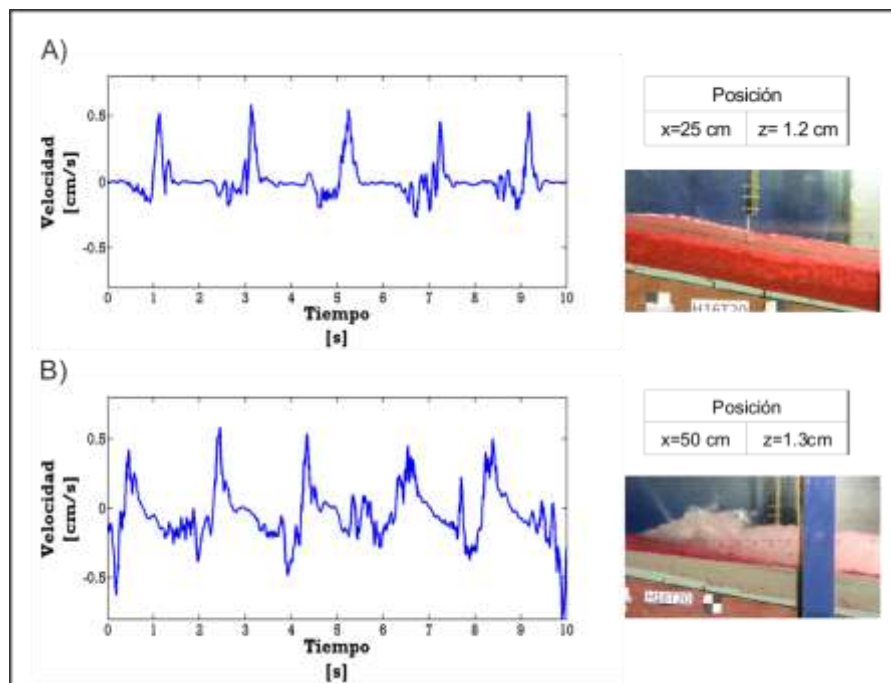


Figura 4.12 Los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectorino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y de la ubicación del vectorino. La ubicación se encuentra en el punto de rotura para una condición de oleaje de $H=16$ cm y $T=2.0$ s. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).

Por último al analizar las señales en la zona de lavado en la Figura 4.13, los datos muestran velocidades altas hacia la costa para el caso de mayor permeabilidad, lo cual explica su papel en la generación de la berma en la parte alta del perfil. Mientras que las velocidades negativas (*offshore*) son muy pequeñas en comparación. Por otra parte, para el modelo compuesto por la mezcla de grava y arena se aprecia que las velocidades hacia la costa (*onshore*) se observa una reducción en las velocidades reportadas para el caso de mayor permeabilidad, al mismo tiempo que las velocidades de retorno aumentan significativamente.

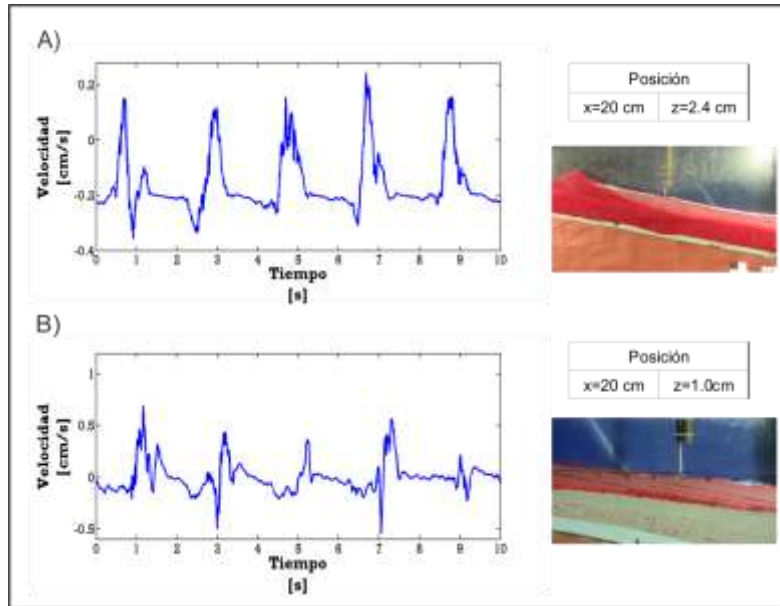


Figura 4.13 los paneles izquierdos muestran las señales registradas por el vectrino y los paneles derechos la evidencia fotográfica y de la ubicación del vectrino. La ubicación se encuentra en la zona de lavado para una condición de oleaje de $H=16$ cm y $T=2.0$ s. Para el modelo 1 (panel B) y modelo 4 (panel A).

Las comparaciones presentadas en esta sección son de gran importancia, ya que indican que para una misma condición de forzamiento, la composición de la playa juega un papel fundamental en el balance de los procesos hidrodinámicos en las zonas de rompiente y lavado, que posteriormente condicionan la respuesta morfológica de la playa.

4.5.2 CAMPOS DE VELOCIDADES CON LA TÉCNICA DE BIV

Una vez presentadas las mediciones puntuales de la velocidad en diferentes zonas del modelo, en esta sección se introducen los resultados asociados a la evolución temporal del campo de velocidades. De tal suerte que se tenga una perspectiva integral de su evolución considerando diferentes permeabilidades en el modelo físico. Los resultados espacio-temporales consecuencia de la aplicación de la técnica de trazado de burbujas permiten identificar la magnitud de la velocidad horizontal y vertical en cualquier punto de la zona de cercanías de la costa. En virtud de la cantidad de información generada para este análisis sólo se presentan resultados del valor medio del campo de velocidad durante el paso de una ola en rotura asociada a una condición definida por una altura de ola de 16cm con periodo de 2s.

Las figuras siguientes presentan resultados correspondientes a seis instantes clave en el proceso de propagación de la ola: al inicio del evento, durante la rotura, durante el colapso de la ola y durante el evento de ascenso y descenso (*uprush* y *downrush*). Los colores cálidos en las imágenes representan velocidades positivas que se encuentran en dirección hacia la costa, mientras que los colores fríos representan velocidades negativas con dirección hacia el mar. Claramente, en el caso del modelo de menor permeabilidad Figura 4.16, el remanso turbulento o bore que asciende sobre la pendiente es frenado por la presencia de un intenso flujo de descenso, interacción que no se aprecia en el caso de la playa más permeable. Esta observación confirma la importancia de la permeabilidad de la playa en el balance de los procesos costeros que inciden sobre el transporte de sedimentos en la cercanía de la costa.

En los mapas espacio-temporales que se muestran en las Figuras 4.14 y Figura 4.16, se reportan para el material más permeable y el menos permeable, los campos de velocidad obtenidos en ambas pruebas. Se observa que para la condición con material más permeable, las velocidades son mayores en dirección a la costa, mientras que para el material de menor permeabilidad las velocidades son menores en ambas direcciones, apreciándose una asimetría en la duración de la fase de descenso de la ola, con velocidades negativas de mayor duración.

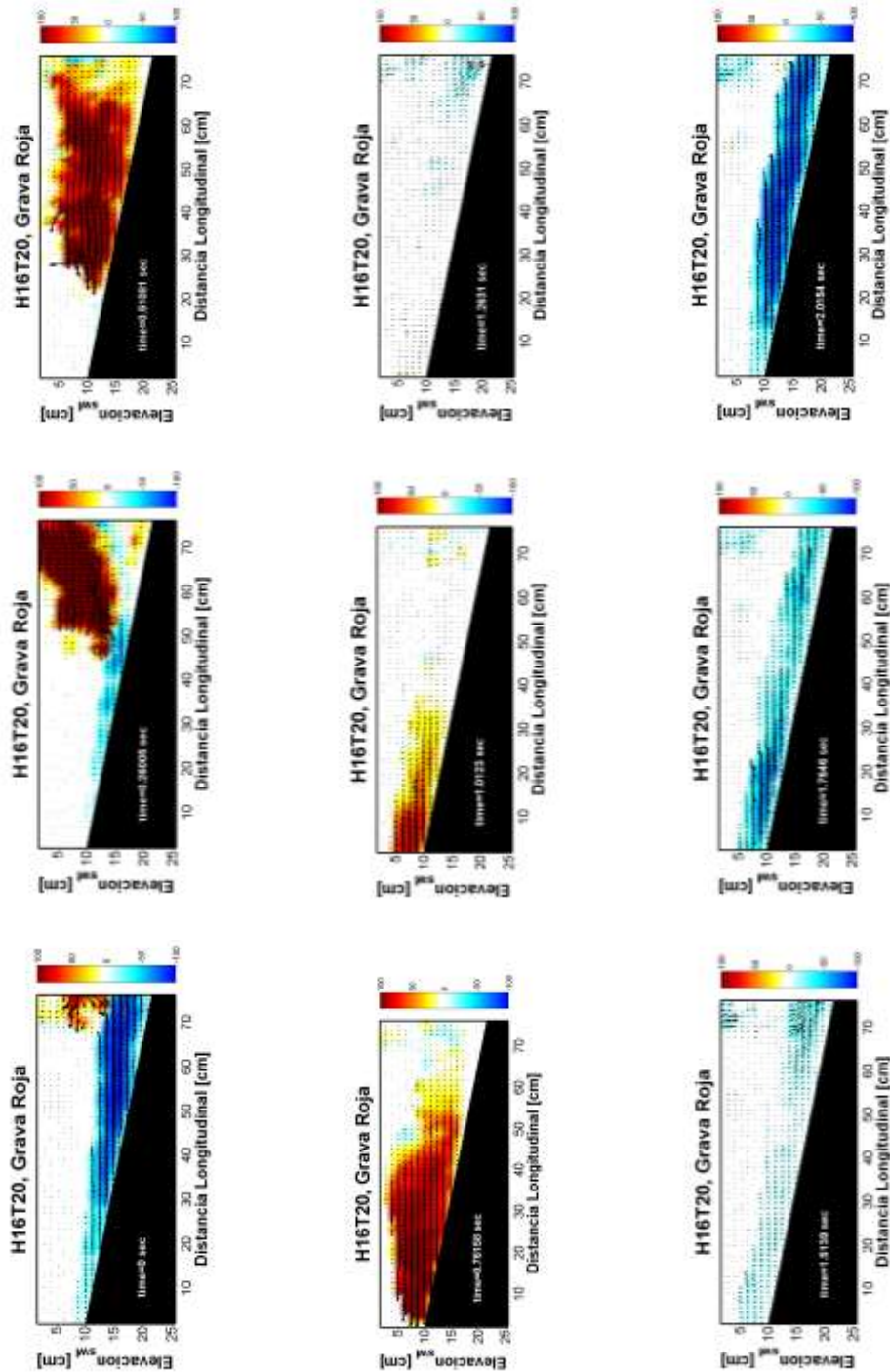


Figura 4.14 Mapas espacio-temporales, para una condición de altura de oleaje $H=16$ cm y un periodo de $T=2.0$ s, para el Modelo 4: Grava roja (alta permeabilidad)

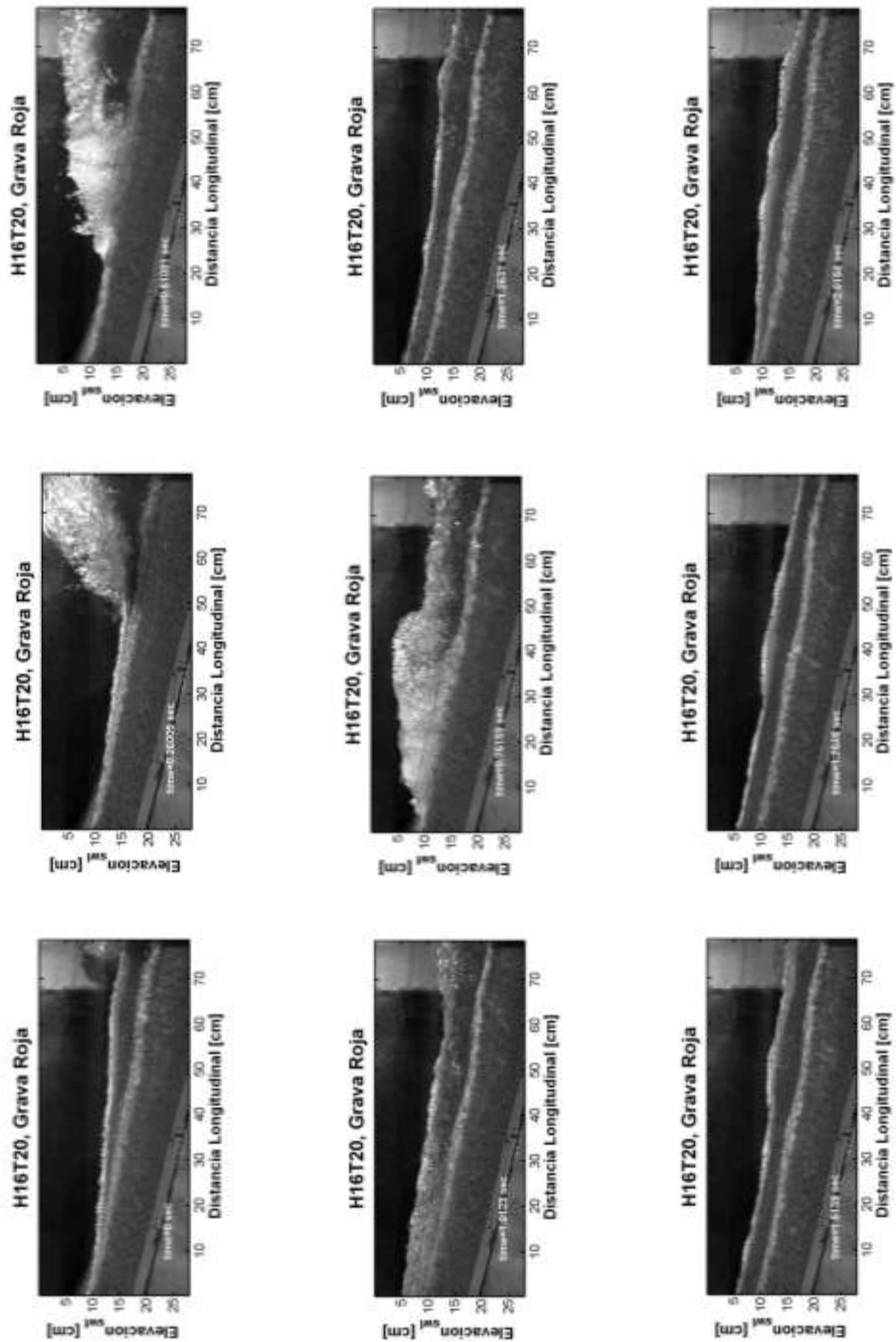


Figura 4.15 Evidencia fotográfica, para una condición de altura de oleaje $h=16$ cm y un periodo de $t=2.0$ s, para el modelo 4: Grava roja (alta permeabilidad)

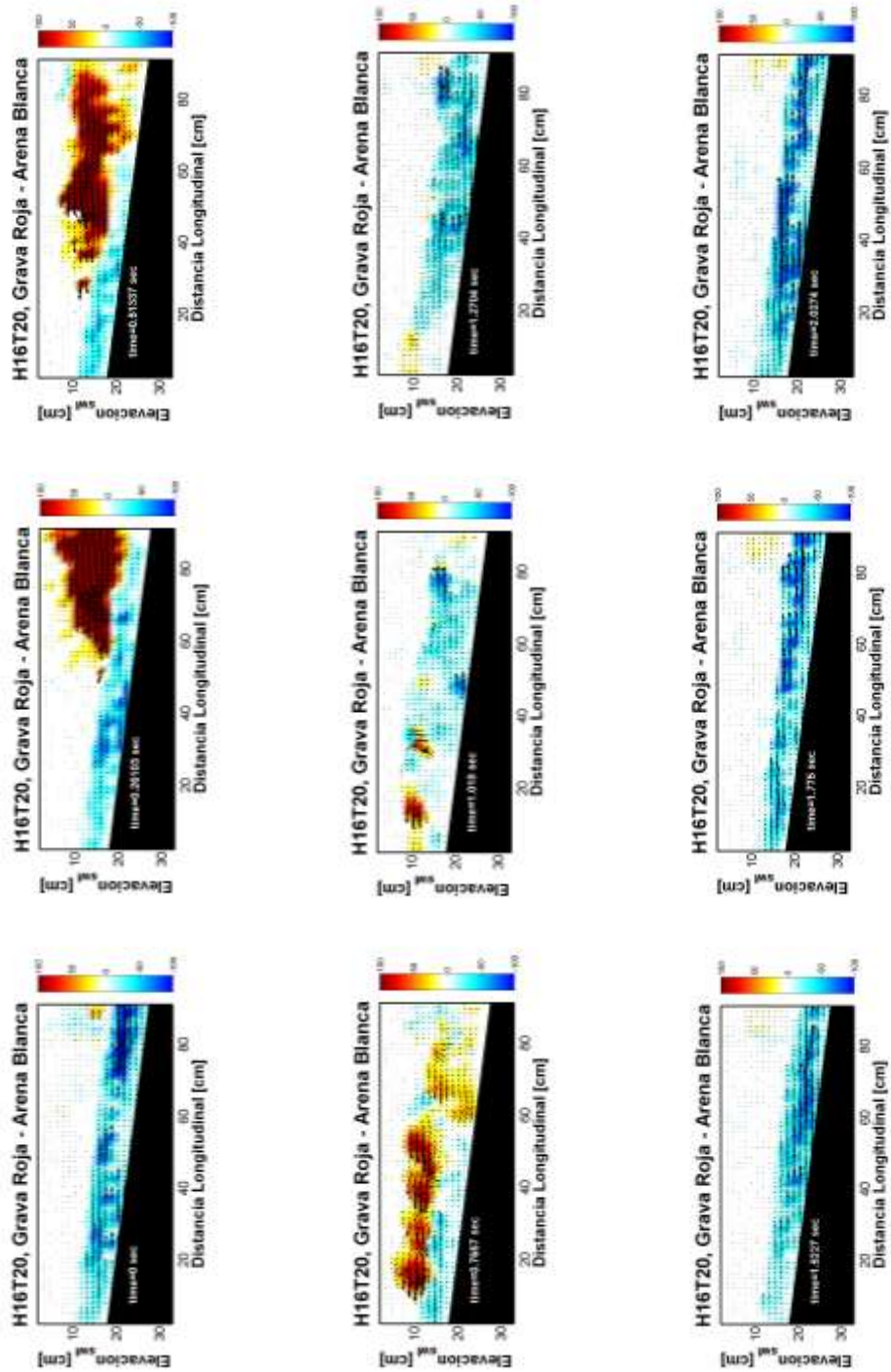


Figura 4.16 Mapas espacio-temporales, para una condición de altura de oleaje $H=16$ cm y un periodo de $T=2.0$ s, para el Modelo 1: Mezcla de grava roja y arena blanca (baja permeabilidad)

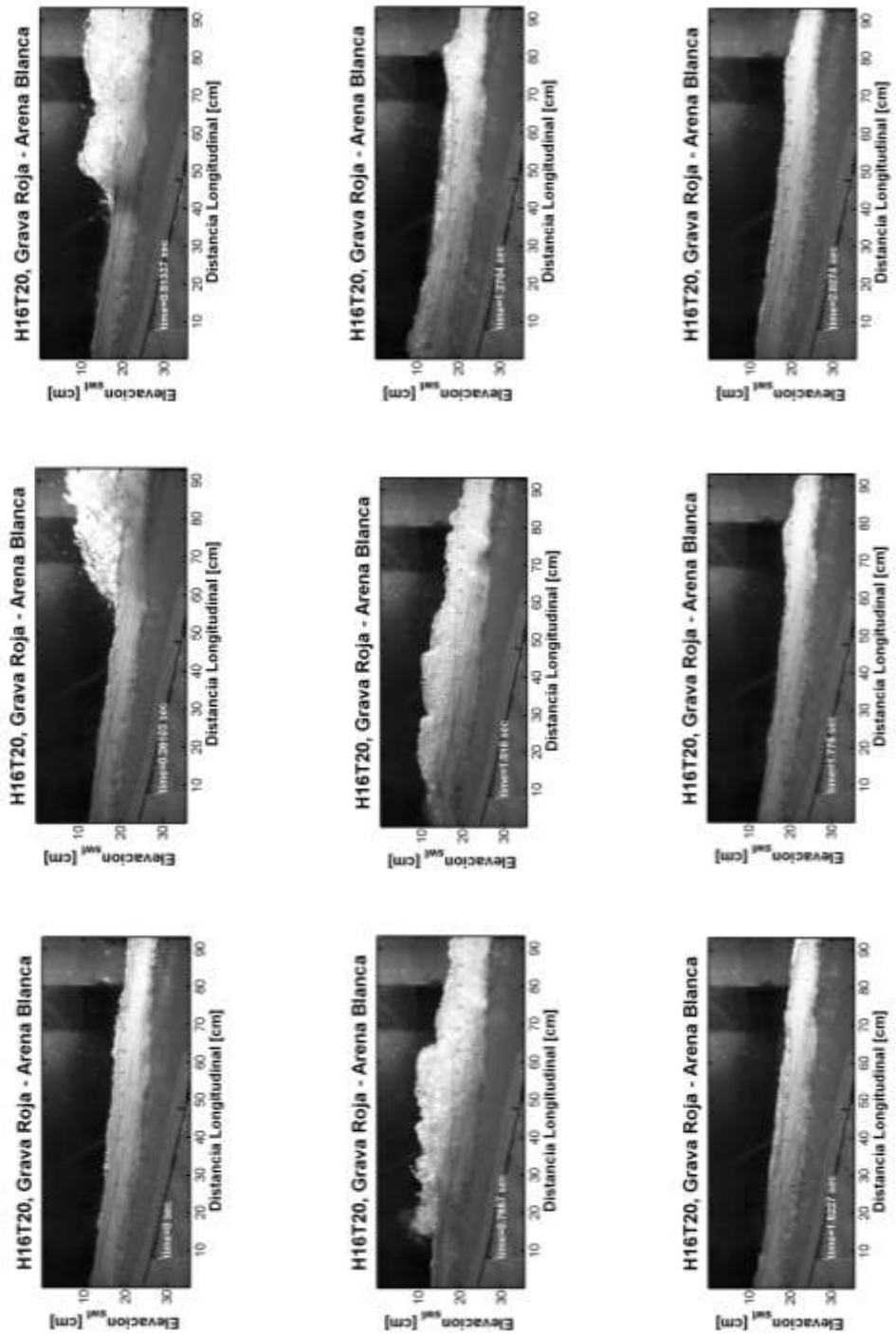


Figura 4.17 Evidencia fotográfica, para una condición de altura de oleaje $h=16$ cm y un periodo de $t=2.0$ s, para el Modelo 1: Mezcla de grava roja y arena blanca (baja permeabilidad)

4.6 VALIDACIÓN DE SERIES TEMPORALES EN ZONA DE ROTURA, BIV/ADV

Con el propósito de validar los resultados de los mapas espacio-temporales presentados, en esta sección muestra una comparación entre las series temporales de velocidad obtenidas por medio de la técnica del BIV con aquellas obtenidas con el velocímetro acústico en dos puntos diferentes. Las condiciones de la comparación corresponden a la prueba definida para una altura de ola de 12 cm y el modelo 3 construido con la mezcla materiales rojo y verde. Para realizar esta validación se seleccionaron dos puntos de medición ubicados en dos zonas con regímenes hidrodinámicos distintos. En el panel superior de la Figura 4.18 se presentan los puntos seleccionados a lo largo del perfil, mientras que los paneles inferiores ilustran la comparación entre ambas técnicas de medición. La correspondencia entre los valores medidos con una y otra técnica, dan confianza a los valores de velocidad derivados por medio de la técnica del BIV. Se sabe que puede existir incertidumbre en los resultados, lo que influye en los niveles de confiabilidad, por la diferencia de velocidades entre el agua y el aire, sin embargo en el trabajo de [Gutiérrez Valencia \(2012\)](#), comparó y validó las mediciones de velocidades ubicados en la zona de rompientes y de lavado, observó que se presentan diferencias en los registros de los datos, con el velocímetro acústico se reportó mayor incertidumbre en las mediciones que con la técnica del BIV, sin embargo, la confiabilidad obtenida por ambas técnicas de medición es aceptable, por lo que el uso puede ser considerado apropiado.

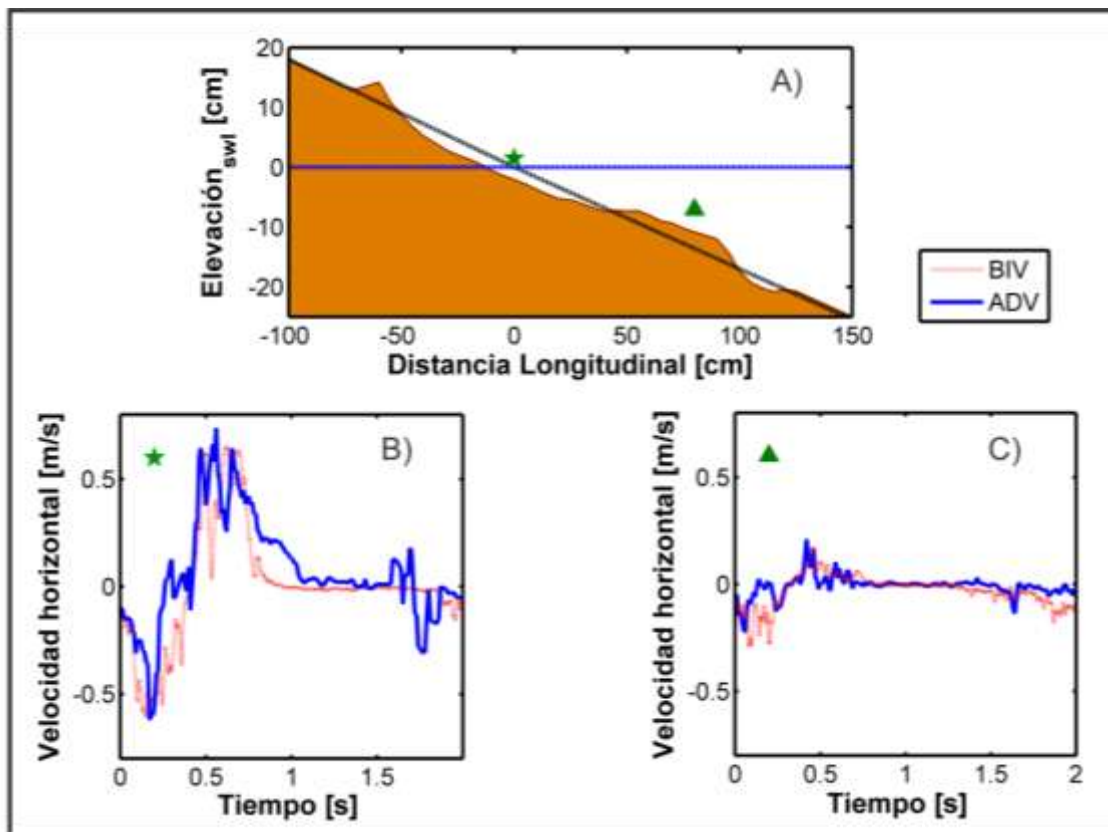


Figura 4.18 Comparación de velocidades técnica del BIV y ADV, para la prueba H12T10 del Modelo 3 (50/50 de grava roja y grava verde). A) Localización de los puntos de comparación; B) Análisis en el punto de rotura; C) Análisis en escalón.

4.7 GRADIENTE DE PRESIÓN VS TÉRMINOS DE EULER

Esta sección introduce los resultados correspondientes al procesamiento de los mapas espacio-temporales de velocidad a fin de estimar los términos involucrados en la ecuación de Euler, para diversos puntos a lo largo del perfil de playa. Este análisis se incorpora a fin de poder determinar su contribución para el cambio morfológico registrado en cada modelo.

El punto de partida de esta investigación corresponde al análisis presentado por [Pedrozo-Acuña et al. \(2010\)](#), en donde para la ecuación de momento, se considera la aproximación dada por Euler en la que los efectos de turbulencia y las tensiones tangenciales son despreciadas. Así el cambio en la presión registrada sobre la pendiente es resultado de la aceleración total en el fluido, donde la aceleración total es representada por la suma de la aceleración local y de los términos de advección de la aceleración (en dirección horizontal y vertical).

4.7.1 ADVECCIÓN

Los resultados del análisis se ilustran para tres puntos diferentes a lo largo del perfil (antes de la rotura, en el punto de rotura y en la zona de vaivén).

Para el cálculo de las derivadas parciales se utilizó el método de diferencias finitas:

$$F(x + 2h) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2h)^n}{n!} F^{(n)}(x)$$

$$F(x - 2h) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(2h)^n}{n!} F^{(n)}(x)$$

Ecuación 4.3

Donde para el cálculo de estas derivadas se utilizaron las aproximaciones de segundo orden que se reportan en la [Ecuación 4.4](#).

$$F'(x) = \frac{-F(x + 2h) + 4F(x + h) - 3F(x)}{2h} + O(h^2)$$

Ecuación 4.4

Las siguientes figuras presentan los resultados divididos de la siguiente forma, el panel superior una fotografía tomada con la cámara de alta velocidad en la que se indican los puntos de análisis para la estimación de la aceleración local y los términos de advección. En los paneles medios se presentan las series temporales de velocidad, derivadas de la aplicación de la técnica del trazado de burbujas, en donde la línea de color azul corresponde a las velocidades horizontales y la de color rojo a las verticales. Por último, los paneles inferiores presentan los diferentes términos involucrados en la componente horizontal de ecuación de Euler, a saber, aceleración local (azul) y términos de advección horizontal (verde) y vertical (rojo).

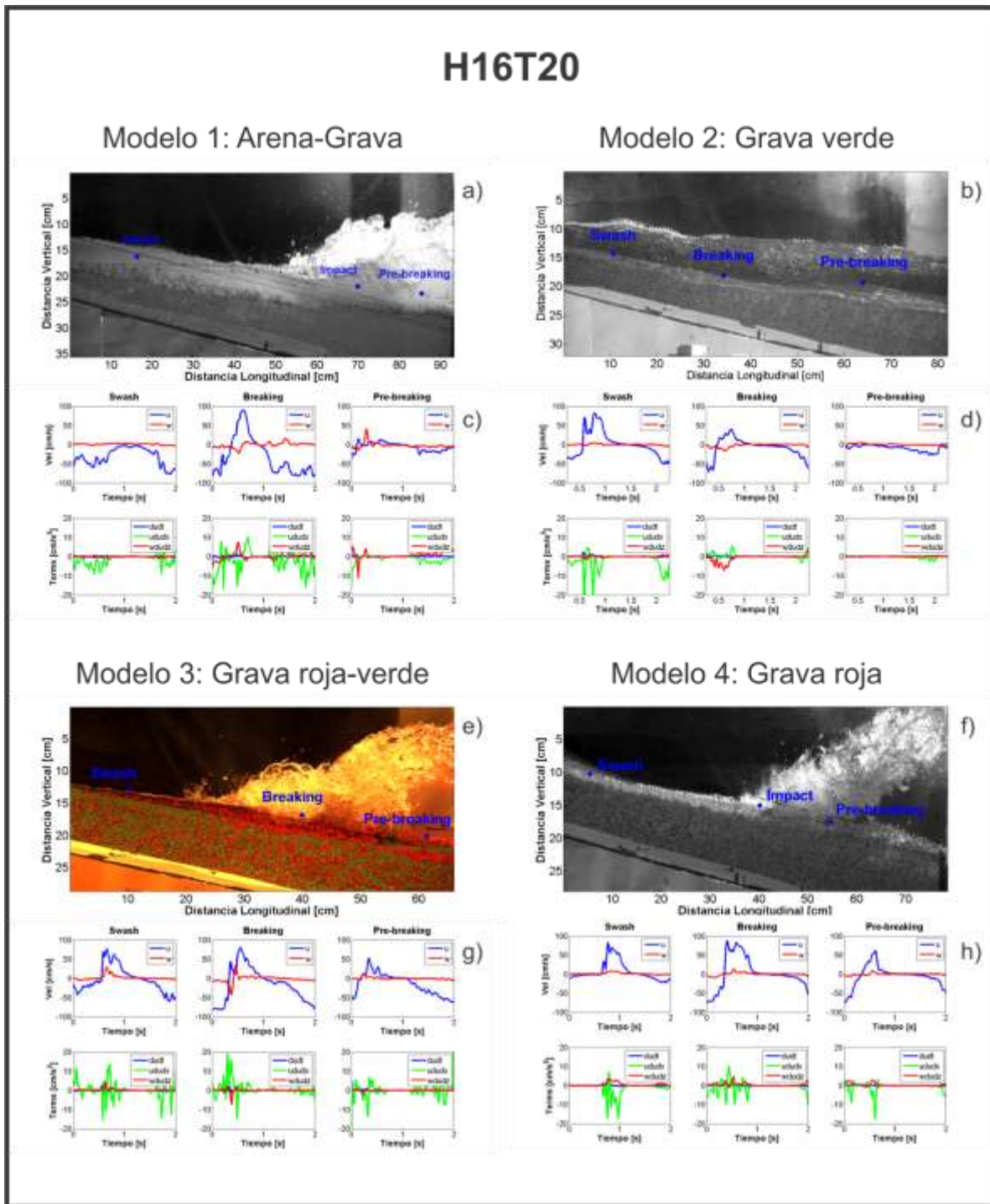


Figura 4.19 Para la condición de $H=16\text{cm}$ y $T=2\text{s}$. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

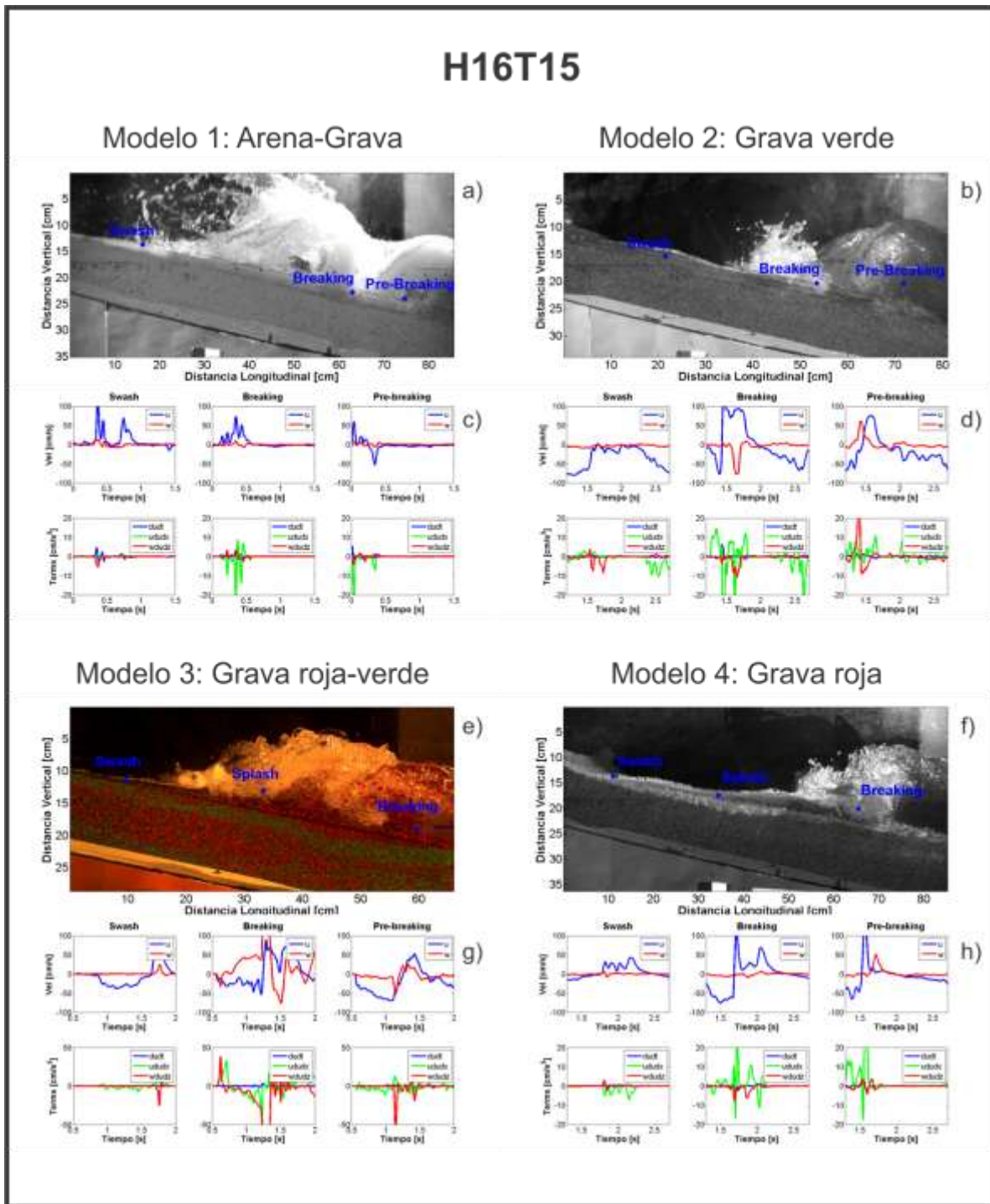


Figura 4.20 Para la condición de $H=16\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

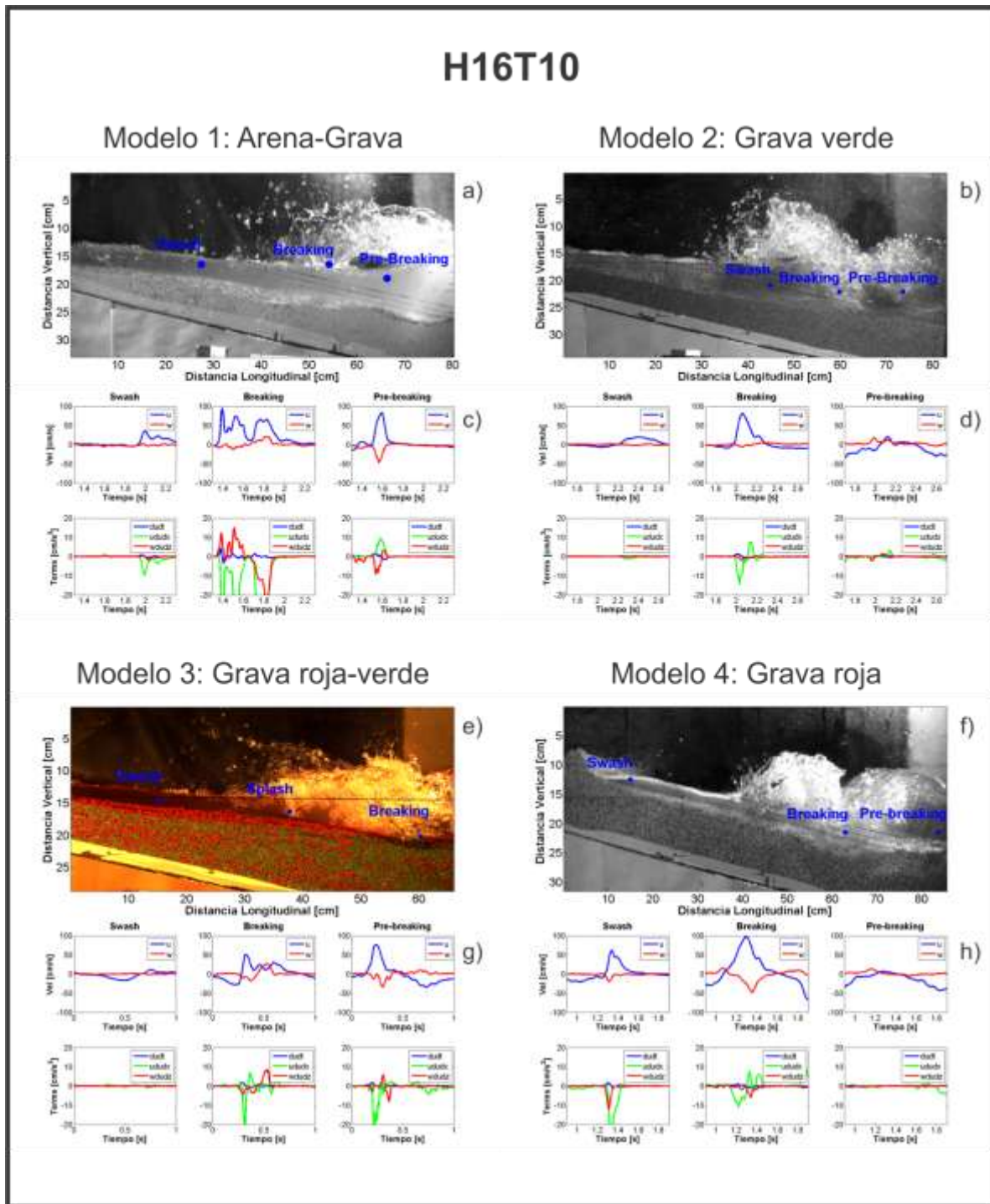


Figura 4.21 Para la condición de $H=16\text{cm}$ y $T=1\text{s}$. Se muestra la evidencia fotográfica para los cuatro tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e, f). En los paneles c, d, g, h se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

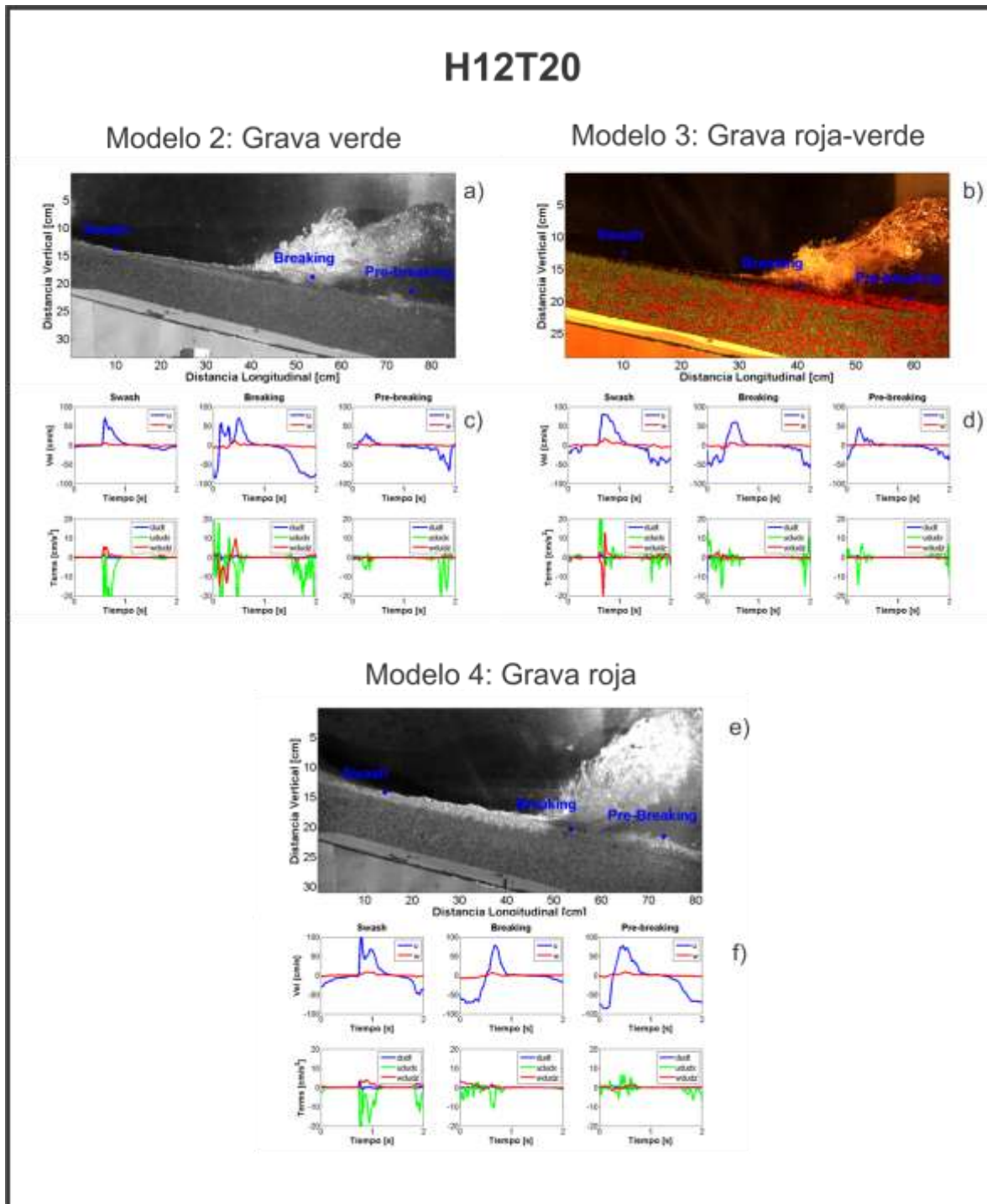


Figura 4.22 Para la condición de $H=12\text{cm}$ y $T=2$. Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

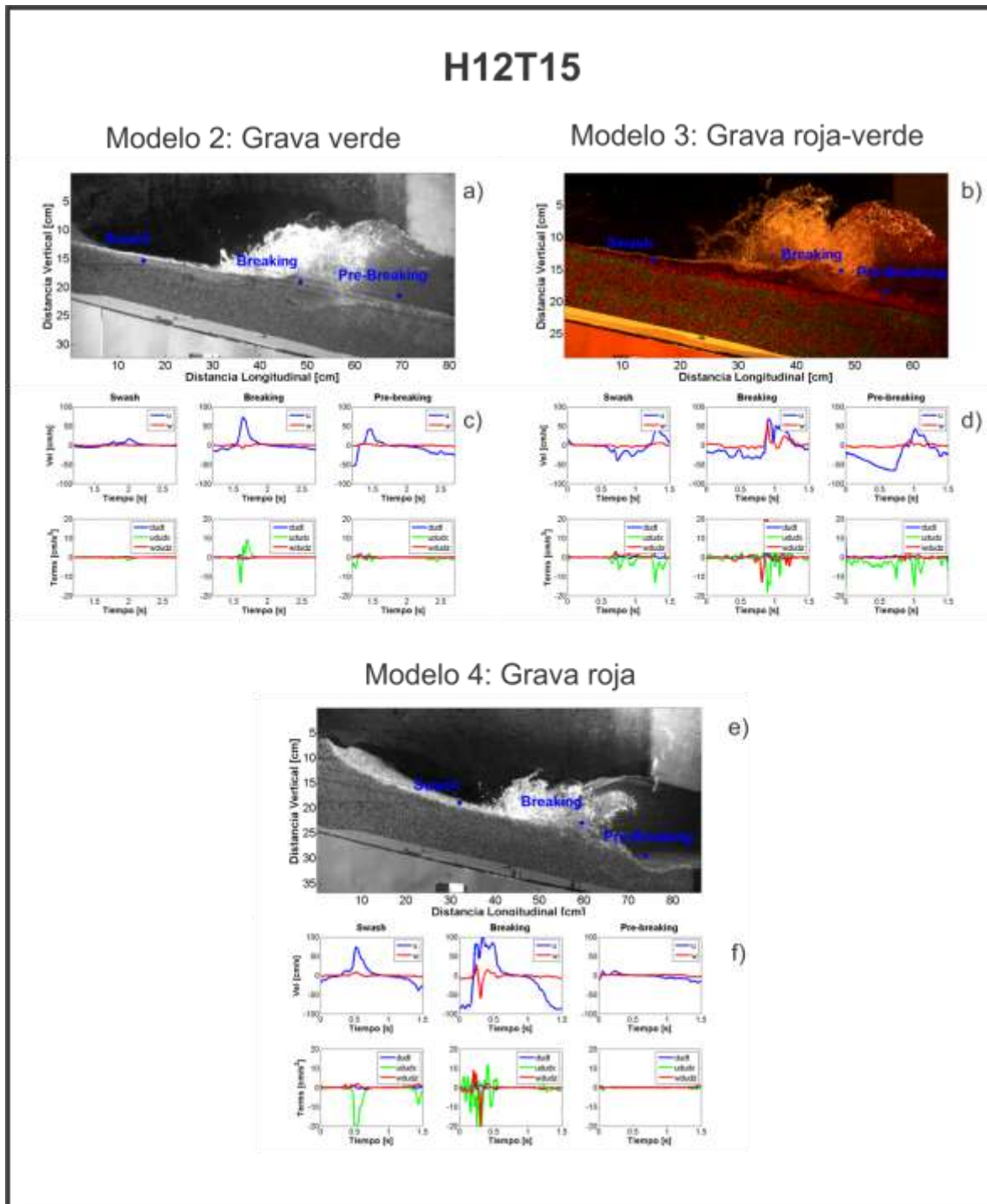


Figura 4.23 Para la condición de $H=12\text{cm}$ y $T=1.5\text{s}$. Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

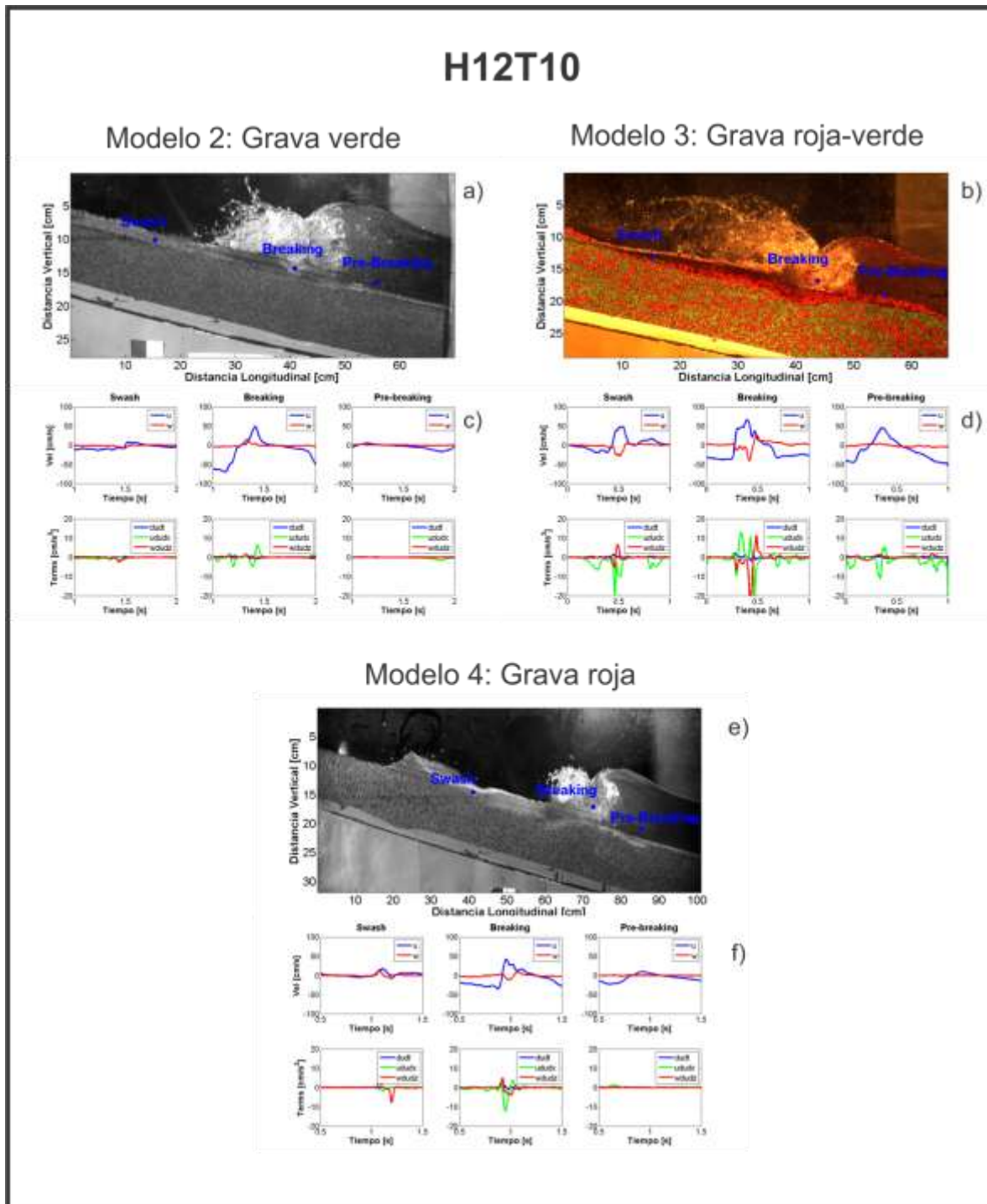


Figura 4.24 Para la condición de $H=12\text{cm}$ y $T=1\text{s}$. Se muestra la evidencia fotográfica para tres tipos de materiales estudiados (paneles a, b, e). En los paneles c, d, f se muestran las velocidades verticales y horizontales en color rojo y azul respectivamente (paneles superiores) y los términos advectivos horizontales y verticales en color verde y rojo respectivamente (paneles inferiores) para los puntos analizados: pre-rotura (paneles derechos), rotura (paneles centrales) y vaivén (paneles izquierdos).

En términos generales, para las condiciones estudiadas, ambas componentes de velocidad son importantes en el instante y punto del impacto, no así para el resto del evento en el que para la mayoría de los puntos analizados las velocidades verticales son insignificantes. El signo negativo representa el movimiento del agua en dirección hacia fuera de la costa, mientras que velocidades positivas indican movimiento hacia la costa. En este caso, la asimetría registrada en los gráficos temporales de la velocidad es de gran importancia ya que de ésta dependerá la deposición del material para formar rasgos morfológicos. Así entonces, una asimetría negativa indicará la predominancia de la corriente de resaca que será responsable de la generación de la barra, mientras que una asimetría en dirección positiva indicará la posible generación de una berma en la parte alta de la pendiente. Por otra parte, la magnitud del término de aceleración local es despreciable a lo largo de toda la pendiente del modelo y en cualquier instante analizado, lo anterior concuerda con observaciones realizadas a partir de simulaciones numéricas (Puleo et. al 2007; Pedrozo-Acuña et. al 2010). Adicionalmente, la contribución de los términos de advección horizontal, son insignificantes salvo en el punto de impacto o rotura de las olas donde se reporta una ligera contribución. Por lo que respecta al término de advección vertical, se observa una contribución significativa en el punto de rotura, la cual se asocia a la agitación del sedimento en el fondo marino. Una vez más los resultados obtenidos indican una importancia relevante a la permeabilidad del modelo sobre el comportamiento espacio-temporal del campo de velocidades.

4.7.2 GRADIENTE DE PRESIÓN

Debido a la naturaleza caótica y aleatoria del flujo en la zona de rotura y vaivén, existe una variación longitudinal en las presiones registradas, por lo que el gradiente de presión espacial que se genera no es menor, esto es especialmente cierto en la región donde se registran los valores de presión máximos dentro de la zona de impacto de las olas. En este trabajo, para el cálculo del gradiente de presión y la aceleración del fluido, se utiliza el esquema central de diferencias finitas, utilizando los datos de salida de cuatro sensores de presión colocados sobre la rampa, esta ecuación propuesta por Kajishima 1999.

$$\frac{\partial p}{\partial x} \Delta p = \frac{p_1 - 27p_2 + 27p_3 - p_4}{24\Delta x} \quad \text{Ecuación 4. 5}$$

Donde P es la presión, los subíndices indican las posiciones de los sensores de presión y Δx indica la distancia entre cada uno de ellos (para este experimento la distancia entre ellos fue de 1.8cm).

La solución de esta ecuación está dada en la parte intermedia de p_2 y p_3 . Los valores de salidas positivos y negativos indican la presencia de presiones o subpresiones en el punto central, respectivamente. El intervalo de tiempo utilizado para el cálculo del gradiente de presión fue de Δt de 0.01 s, correspondiente a la frecuencia de muestreo de los sensores.

Los resultados que se presentan en esta sección, tienen su base en investigaciones previas sobre playas de grava Pedrozo-Acuña et al. (2007), Pedrozo-Acuña et al. (2010), en las que se demuestra la importancia del tipo de material que compone la playa sobre un gradiente medido. De acuerdo a estos estudios, la morfología de la playa bajo unas condiciones de forzamiento definidas por la rotura en tipo voluta es resultado del balance de los procesos físicos asociados al oleaje, con particular énfasis en los impactos de las olas rompiendo sobre el perfil de la playa Hull y Muller (2005).

Los resultados que aquí se reportan incorporan señales temporales de las presiones y los gradientes estimados con la ecuación 4.5 para dos condiciones hidrodinámicas, definidas por alturas de ola de: H=16cm y para H=12cm, y con un sólo período de: T=1.5s. La selección de estas dos pruebas se debe a

que bajo estas condiciones se registraron los impactos de oleaje más intensos sobre los sensores de presión, es decir la ubicación de los sensores era en ambos casos, muy cercana al punto de rotura de las olas. En las Figuras 4.25-26, se muestran las 4 señales de los sensores de presión bajo la disipación de la onda de bore y del *swash*, que fueron empleadas para el cálculo del gradiente de presión.

De acuerdo a la morfología para la condición asociada a una altura de ola de $H=16\text{ cm}$, en comparación con aquella registrada para la altura de ola de $H=12\text{ cm}$, se observa un incremento en los cambios morfológicos observados. Es decir se observan los mismos rasgos en el perfil, berma y la barra, pero en el caso de la ola de mayor tamaño estas formaciones son más grandes. De forma similar, las presiones registradas son mayores en el caso de la prueba correspondiente a la altura de ola más grande en comparación con aquellas registradas para la altura de ola menor. Se observa que la magnitud de las presiones que se registran en los sensores, está íntimamente asociada al material que compone la playa. En el caso de la mezcla de grava y arena, en el que la permeabilidad es mucho menor, las presiones registradas por los sensores son reducidas considerablemente, sobre todo si se comparan con las registradas cuando la playa estaba compuesta por grava verde o grava roja. Esto indica la importancia de la permeabilidad de la playa en el balance de los procesos hidrodinámicos en la zona de cercanías de la costa.

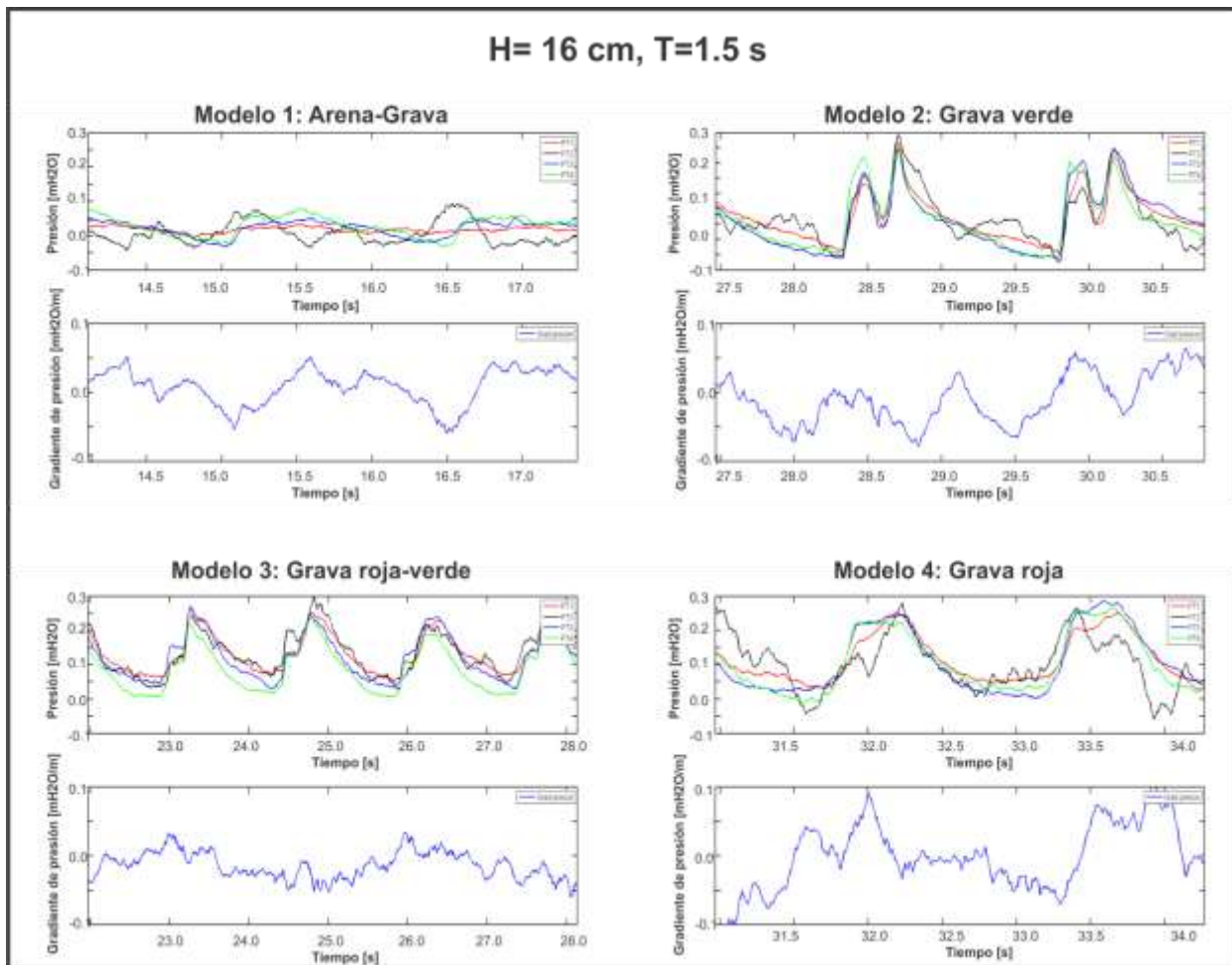


Figura 4.25 Gradiente de presión para las condición de altura de $H=16\text{ cm}$ y $T=1.5\text{ s}$, para las cuatro condiciones estudiadas. Paneles superiores representan señales de presión, paneles inferiores simbolizan el gradiente de presión, para la condición hidrodinámica analizada.

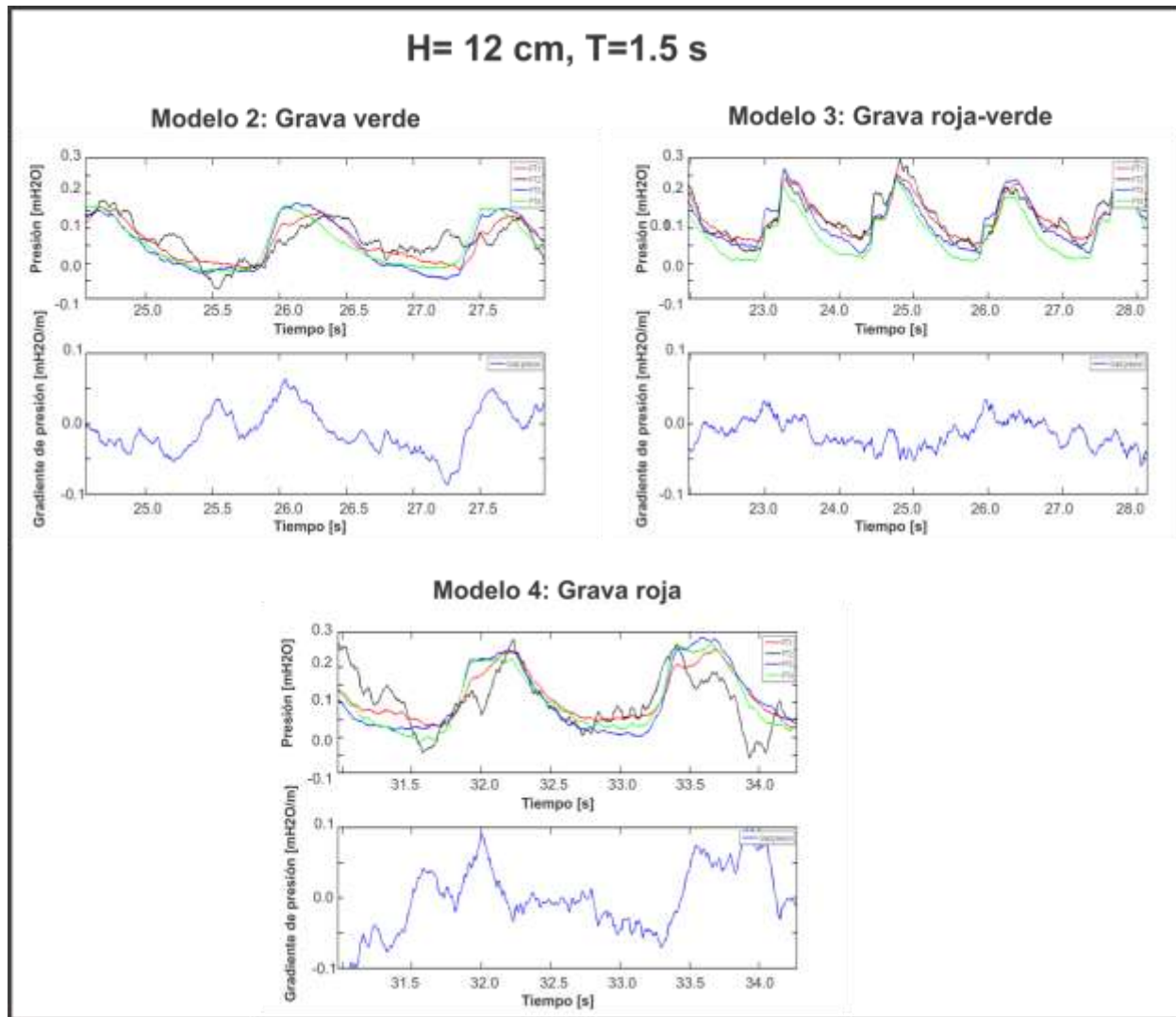


Figura 4.26 Gradiente de presión para las condición de altura de $H=16$ cm y $T=2.0$ s, para las cuatro condiciones estudiadas. Paneles superiores representan señales de presión, paneles inferiores simbolizan el gradiente de presión, para la condición hidrodinámica analizada.

4.8 EFECTOS DE LA ESCALA Y LABORATORIO

El uso de experimentos de laboratorio es una actividad muy socorrida para la comprensión de diversos problemas dentro del campo de la ingeniería costera. Esto se debe a la facilidad de control de las condiciones de forzamiento y la capacidad para aislar procesos que de otra forma sería muy difícil de analizar (de forma separada). Sin embargo, es necesario mencionar que existen lo que se conoce como efectos de escala que afectan la confiabilidad en la representación de un fenómeno o proceso que en realidad ocurre a una escala espacial más grande.

Esta tesis se enfocó al análisis de transporte de sedimento en la zona cercana a la costa, debido a la acción del oleaje monocromático (oleaje regular) y se fundamentó por la necesidad de conocer las

causas de los fenómenos erosivos o de acreción de playas para distintas condiciones controladas, por ello fue de importancia considerar los efectos de escala. Sin embargo con la finalidad de ampliar el conocimiento de las pruebas generadas en el laboratorio e interpretar a qué tipo de playas se asemeja el comportamiento de los experimentos y poder emplearlo a soluciones ingenieriles, en esta sección del Capítulo 4 solo se aborda de forma breve sobre los efectos de la distorsión de la granulometría, con el fin de entender el tipo de simulación se está dando origen en estas pruebas y poderlas comparar cualitativamente a los perfiles reales que se dan en las playas. Para poder destinar los resultados de los experimentos realizados, se deben considerar los efectos de escalas de la altura de ola y de los sedimentos, de los procesos de las playas y por lo tanto del cambio del perfil, que sirva para saber cuál será el perfil de equilibrio. La distorsión en la granulometría en un modelo de lecho móvil es una técnica viable. Pero un gran problema es la incorrecta simulación de la morfología de fondo. El motivo de utilizar oleaje regular, es decir altura de ola y periodos constantes y en una dirección, fue para simplificar los efectos producidos en el oleaje irregular (aleatorio, espectral), ya es difícil evaluar los resultados de este tipo de oleaje

Los experimentos realizados en este trabajo de tesis son conocidos como modelos distorsionados, que si bien no reproducen el comportamiento en un sitio determinado manejaron diversos tamaños de sedimento con los cuales se pudieron estudiar cualitativamente los resultados de perfiles y con ello se puede cualificar el tipo de comportamiento que tendrá un sitio con el tamaño de sedimento modelado de acuerdo a la similitud. Los experimentos realizados son conocidos como modelos cualitativos, como su nombre lo indica estos modelos no pretende cuantificar los diferentes factores que intervienen entre sí, su finalidad es facilitar el entendimiento de los procesos que intervienen, para lograr su análisis.

No solo existen problemas para la representación de la escala, sino también se deben a las limitaciones de las instalaciones, ya que no se pueden representar de forma adecuada una situación real. Así mismo durante la ejecución de las pruebas se observó que no se consideró necesario utilizar el sistema de absorción del canal para evitar que la altura de onda no fuese de mayor tamaño que las propuestas en las condiciones iniciales.

4.9 INTEGRACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA Y MORFOLOGÍA

En la Figura 4.27, se muestra un esquema, cuya intención es sintetizar los resultados de este trabajo de tesis, en ella se explica la relación entre altura de ola y periodo sobre la morfología resultante. Por otro lado, se incorporan las características de sedimento (permeabilidad/porosidad) en la respuesta del perfil de la playa. Además, se valora que debido a la magnitud del fenómeno de turbulencia originada durante y después del impacto de la ola, a lo largo de la zona de lavado se registrarán los cambios morfológicos de mayor intensidad.

Como se ha demostrado en los resultados presentados a lo largo de este capítulo, las condiciones hidrodinámicas que se presentan en la zona de cercanías de la costa, están íntimamente ligadas a las características de sedimentos que componen la playa. Por otro lado, esta investigación también se enfocó en observar otros procesos para poder comprender el proceso de movilización del sedimento, tal es el caso de los términos advectivos, en cuyos resultados se observó su influencia, siendo esta mucho mayor a la que presenta la aceleración local. Los resultados encontrados comprueban la complejidad del estudio de esta zona, debido a los diferentes factores y procesos que intervienen.

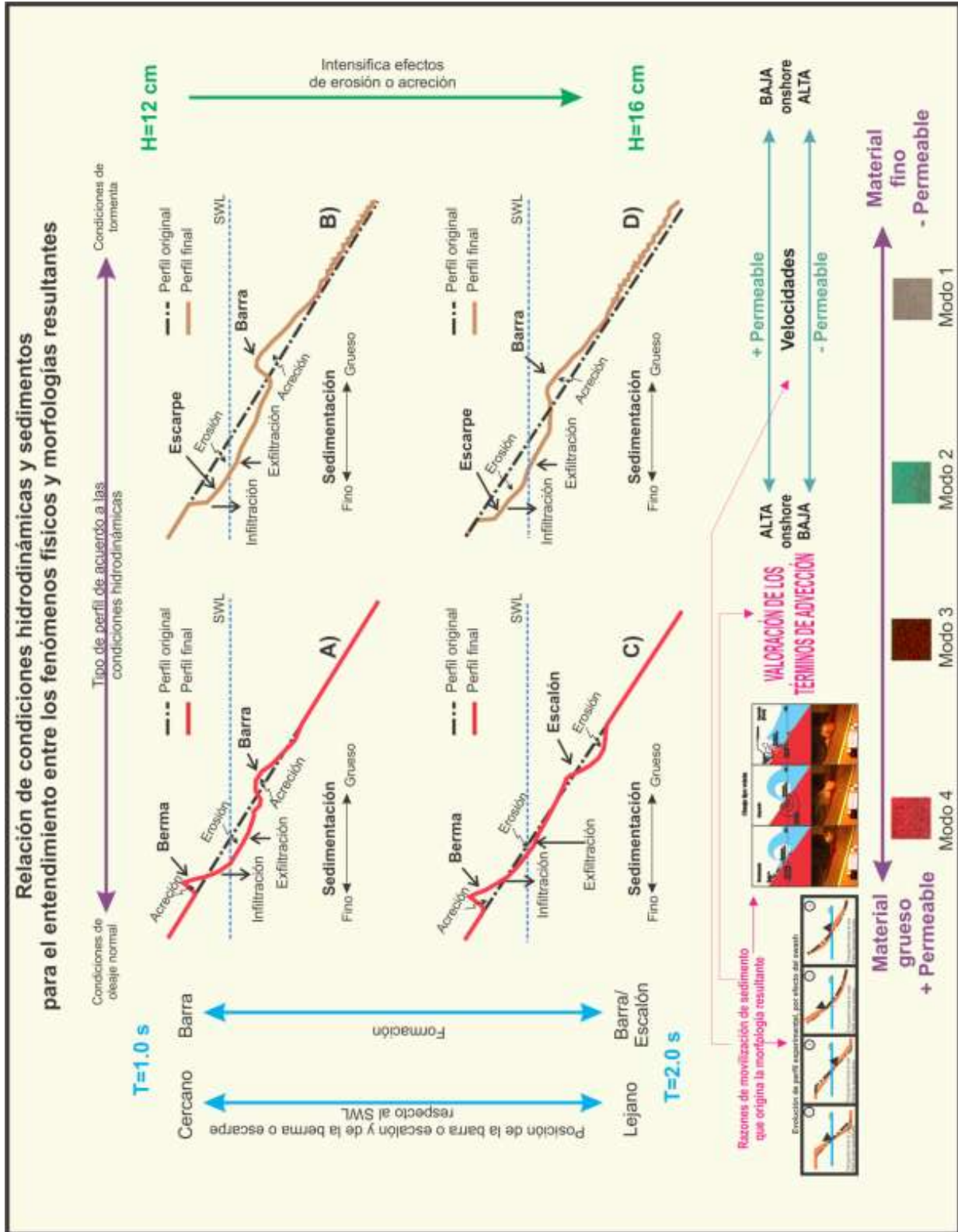


Figura 4.27 Esquema conceptual de la interacción entre los procesos producidos en las zonas cercanas a las costas, con el resultado morfológico, de acuerdo a los resultados mostrados en este trabajo experimental

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

Esta investigación experimental ha cumplido con el objetivo de presentar las observaciones generadas en el laboratorio. Los resultados obtenidos mostraron la evolución espacio-temporal de la morfología de la playa, la clasificación de los sedimentos, así como el equilibrio de la ecuación de momento inducido por la acción del oleaje tipo voluta, en la zona cercana a la costa, y los gradientes de presión registrados en el punto de rotura.

Los resultados experimentales, para los cuatro tipos de playa probados con características granulométricas y porosidades diferentes, mostraron de forma cualitativa el diferente comportamiento morfológico de playas, según su composición, bajo una misma condición hidrodinámica.

Los perfiles de playas muestran la siguiente respuesta morfológica:

- Condiciones erosivas para las porosidades bajas. Por las formaciones de escarpe en dirección hacia la costa, de barra en dirección hacia el mar, y la formación de ondas tipo ripple después de la formación de la barra;
- Condiciones de acreción para los materiales de mayor porosidad. Formación de berma en dirección a la costa y de barra hacia la costa.

La intensificación de la aparición de un perfil tipo erosivo, en los cambios morfológicos se mostró conforme el tamaño de grano empleado era más fino.

El tamaño de grano fue asociado con la porosidad del material, con lo cual se concluye que a menor porosidad los efectos erosivos se intensificaron. Las respuestas morfológicas muestran que la importancia en la naturaleza espacio-temporal, del papel de la porosidad, infiltración y permeabilidad de la playa, además de la influencia de las condiciones hidrodinámicas.

Respecto a las condiciones hidrodinámicas, se mostró el periodo utilizado en las pruebas repercutieron en el perfil de la playa solo en la atenuación o intensificación de sus efectos en la misma. También se mostró que las condiciones influyeron para la caracterización de los perfiles pues se vio que el periodo utilizado en las pruebas solo en el posicionamiento de la berma o escarpe originado, mientras que la atenuación o intensificación de sus efectos en el perfil se origina por el cambio de la energía del oleaje,

es decir, por la altura de ola. Por lo que se concluye que la morfología es resultado de la interacción de las características del sedimento y de las condiciones hidrodinámicas.

Las condiciones hidrodinámicas también son las que afectan durante el proceso de reacomodo de los materiales empleados, esto se logró comprobar para los materiales de tipo bimodal, al comparar varios puntos sobre el perfil de la mezcla original. Se encontró una selección del material entre moderadamente y bien seleccionada, para la mezcla rojo-verde (modelo 3), y pobremente seleccionada para la mezcla rojo-blanco (modelo 1). El reacomodo del material se dio por las condiciones de oleaje que son los responsables de la generación de los altos índices de turbulencia y de energía disipándose, provocando la distribución de los sedimentos. En términos generales, el material grueso se depositó en la barra o barra-escalón (depositado hacia *offshore*), mientras que el material más fino se colocó en la berma (depositado hacia *onshore*). La importancia de analizar la distribución del sedimento fue para la caracterización de las zonas cercanas a la costa (zona de rompientes y zona de vaivén).

Por otra parte emplear para el cálculo del campo de velocidades la técnica de trazado de burbujas conocido como BIV, que permitió elaborar los mapas espacio-tiempo. Dichas velocidades ayudaron a realizar una evaluación diagnóstica de la influencia de los términos de advección y aceleración local, pues logro mostrar la responsabilidad de estos términos en la respuesta morfológica de las playas y de su distribución granulométrica, bajo las condiciones de rotura tipo voluta.

El equilibrio de los procesos físicos se determinó y se asoció a la respuesta morfológica de las playas, los resultados aquí presentados, muestran la importancia de los procesos físicos involucrados en las zonas cercanas a la costa, A través de la ecuación de Euler se permitió la evaluación de la contribución de cada uno de sus términos, con la finalidad de identificación de los parámetros que contribuyen a la generación de movilización y transporte de sedimentos. Los resultados mostrados para los cuatro tipos de modelos físicos, muestran que la magnitud de la aceleración local es insignificante, debido a que la contribución de la aceleración local es mínima, por lo cual relacionar el gradiente de presión y esta aceleración no es correcta ni aproximada, de acuerdo a Euler, debido a su magnitud tampoco se pueden identificar los puntos que presentan mayor vulnerabilidad de ser transportados en esta zona de rompiente y de vaivén, pero se puede recurrir al análisis en la zona de impacto de los términos advectivos tienen gran relevancia y se muestra una gran oscilación. Respecto a los procesos de advección estudiados para los estos indican la dirección predominante del transporte de sedimentos de los puntos de análisis y la influencia durante todo el evento de oleaje del término de advección horizontal y solo la influencia del término vertical para el punto de rotura o de paso de la onda de bore, hay que recordar que estos experimentos fueron analizados para una rotura del oleaje tipo voluta. Lo que se trata de realizar en este estudio es tratar de entender y visualizar si el fenómeno de la advección tiene un efecto en la movilización de los sedimentos, con este análisis se permitió la caracterización de la región de vaivén, de la zona de rompientes y del punto de rotura del oleaje del término advectivo, mostrando la variabilidad del balance en cada punto analizado; sin embargo estos resultados no se pueden generalizar para la rotura de descrestamiento u oscilación, porque los experimentos solo fueron ejecutados para diferentes condiciones hidrodinámicas con rotura tipo voluta, por lo que para comprobar la variabilidad del balance es necesario realizar estas pruebas para los demás tipos de roturas.

Es necesario tratar de comprender dichos procesos de forma conjunta, esto ayudará a gestionar medidas adecuadas que permitan solucionar problemas de orden sociales, entre muchos otros casos, generados por problemas como por ejemplo procesos erosivos, tratamiento de zonas de relleno.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

El estudio de las zonas cercanas a la costa (zona de rompiente y zona de vaivén), es complicado para la determinación de las velocidades en la zona de rompientes representa uno de los problemas más complejos dentro del campo de la ingeniería costera. Es por ello que la comprensión y descripción de los flujos puede hacer uso de la aplicación y desarrollo de nuevas técnicas para la medición de flujos turbulentos (ej. BIV y PIV).

Como es conocido, el estudio de los procesos físicos que se desarrollan en estas zonas sigue siendo aún limitado, por la inestabilidad de los mismos, por lo que se considera necesario continuar realizando trabajos de investigación en laboratorio que permitan la comprensión de los procesos que se generan en estas zonas. Por esta razón se sugieren algunas líneas de investigación para ampliar este trabajo experimental:

- Realizar el trabajo experimental a una escala adecuada con la naturaleza, lo cual implica la utilización de otro tipo de sedimentos
- Trabajar con diferentes condiciones hidrodinámicas y condiciones iniciales, para manejar diferentes tipos de rotura y conocer la predominancia de los procesos físicos para cada una de ellas.
- Trabajar en la comparación de experimentos y modelos para el análisis sobre la evolución de la respuesta morfológica de playas ante los diferentes tipos de acción del oleaje.
- Buscar otros procesos que se vean involucrados en el transporte de sedimentos, sobre estas zonas cercanas a las costas y tratar de vincular todos los procesos con el fin de dar una explicación de su movimiento.
- Trabajar con condiciones de oleaje extremo y en condiciones de oleaje oscilatorio, para acercarnos más a la realidad y no hacer uso del oleaje monocromático.
- Buscar que las condiciones iniciales se adecuen a la pendiente reposo del material utilizado y sean las condiciones que se encuentran en un estado real.
- Estudiar los procesos costeros desde dos diferentes posturas, pero a la vez complementarias: la primera de tipo experimental y la segunda de forma numérica.

REFERENCIAS

- Alport, M., & Zingu, E. (2002). COPID 2000 position paper. *Physica Scripta*, 2002(T97), 13.
- Alsina, J. M., & Cáceres, I. (2011). Sediment suspension events in the inner surf and swash zone. Measurements in large-scale and high-energy wave conditions. *Coastal Engineering*, 58(8), 657-670. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.03.002>
- Alsina, J. M., Falchetti, S., & Baldock, T. E. (2009). Measurements and modelling of the advection of suspended sediment in the swash zone by solitary waves. *Coastal Engineering*, 56(5), 621-631.
- Austin, M. J., & Buscombe, D. (2008). Morphological change and sediment dynamics of the beach step on a macrotidal gravel beach. *Marine Geology*, 249(3-4), 167-183. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2007.11.008>
- Bakhtyar, R., Razmi, A. M., Barry, D. A., Yeganeh-Bakhtiary, A., & Zou, Q.-P. (2010). Air-water two-phase flow modeling of turbulent surf and swash zone wave motions. *Advances in Water Resources*, 33(12), 1560-1574.
- Baldock, T. E., & Hughes, M. G. (2006). Field observations of instantaneous water slopes and horizontal pressure gradients in the swash-zone. *Continental Shelf Research*, 26(5), 574-588. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2006.02.003>
- Baldock, T. E., Manoonvoravong, P., & Pham, K. S. (2010). Sediment transport and beach morphodynamics induced by free long waves, bound long waves and wave groups. *Coastal Engineering*, 57(10), 898-916. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.05.006>
- Battjes, J.A., (1974). Surf similarity. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering (ASCE)*, Copenhagen, Denmark, 1, pp. 446-480.
- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, J. J., & Muñoz-Pérez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14(3-4), 227-236.
- Brocchini, M., & Baldock, T. E. (2008). Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics. *Reviews of Geophysics*, 46(3), RG3003. doi: 10.1029/2006RG000215
- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum, vol. 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 82 pp.
- Butt, T., et al. (2004). The influence of bore turbulence on sediment transport in the swash and inner surf zones. *Continental Shelf Research* 24(7-8): 757-771.

- Butt, T., Russell, P., & Turner, I. (2001). The influence of swash infiltration–exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore. *Coastal Engineering*, 42(1), 35-52.
- Butt, T., & Russell, P. (1999). Suspended sediment transport mechanisms in high-energy swash. *Marine Geology*, 161(2), 361-375.
- Conley, D. C., & Griffin, J. G. (2004). Direct measurements of bed stress under swash in the field. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 109(C3).
- Cowell, P., & Thom, B. (1994). *Morphodynamics of coastal evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cowen, E. A., Mei Sou, I., Liu, P. L.-F., y Raubenheimer, B. (2003). Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(10), 1119-1129.
- Dalrymple, R. A., & Thompson, W. W. (2011). Study of equilibrium beach profiles.
- Davis, R.A. & Fox, W.T. (1971). Four Dimensional Model of Beach and Inner Nearshore Sedimentation. *Journal of Geology*. v. 80, pp. 484- 493.
- Dean, RG, & Galvin Jr, CJ (1976). Erosión de las playas: causas, procesos y medidas correctivas. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 6 (3), 259-296.
- Deigaard, R., et al. (1986). Suspended Sediment in the Surf Zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 112(1): 115-128.
- Drake, T. G., & Calantoni, J. (2001). Discrete particle model for sheet flow sediment transport in the nearshore. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 106(C9), 19859-19868.
- Dyksterhuis Lynne Patricia (1998). Cross-shore sediment transport on mixed sand and gravel beaches
- Elfrink, B., & Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45(3–4), 149-167. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00032-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00032-7)
- Engelund, F. A. (1953). On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand. Danish Academy of Technical Sciences.
- Foster, D., Bowen, A., Holman, R. A., & Nattoo, P. (2006). Field evidence of pressure gradient induced incipient motion. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 111(C5).
- Gallagher, E. L., MacMahan, J., Reniers, A. J. H. M., Brown, J., & Thornton, E. B. (2011). Grain size variability on a rip-channeled beach. *Marine Geology*, 287(1–4), 43-53. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
- Gourlay, M. R. (2011). Beaches: profiles, processes and permeability.
- Govender, K., Alport, M., Mocke, G., & Michallet, H. (2002). Video measurements of fluid velocities and water levels in breaking waves. *Physica Scripta*, 2002(T97), 152.
- Grant, U.S., (1948). Influence of the water table on beach aggradation and degradation, *J. Mar. Res.*,7(3): 655-660
- Gutiérrez Valencia, C. E. (2011). Caracterización hidrodinámica de flujos turbulentos por medio de la técnica de trazado de burbujas. (Maestría), UNAM.

- Hanson, H., y Camenen, B. (2007). Closed form solution for threshold velocity for initiation of sediment motion under waves. In *Proc. Coastal Sediments* (Vol. 7, pp. 15-28).
- Hassan, Y. A., William, S., y Ortiz-Villafuerte, J. (1998). Investigation of three-dimensional two-phase flow structure in a bubbly pipe flow. *Measurement Science and Technology*, 9(3), 309.
- Hibberdt, S., & Peregrine, D. (1979). Surf and run-up on a beach: a uniform bore. *J. Fluid Mech*, 96(part 2), 323-346.
- Hoefel, F., & Elgar, S. (2003). Wave-induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299(5614), 1885-1887.
- Holmes, P., Baldock, T. E., Chan, R. T., & Neshaei, M. A. L. (1996). Beach evolution under random waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(25).
- Holmes, P., Baldock, T. E., Chan, R. T. C., & Neshaei, M. A. L. (2001). Beach evolution under random waves.
- Hoque, M. A., & Asano, T. (2007). Numerical study on wave-induced filtration flow across the beach face and its effects on swash zone sediment transport. *Ocean engineering*, 34(14), 2033-2044.
- Horn, D. P. (2002). Beach groundwater dynamics. *Geomorphology*, 48(1), 121-146.
- Horn, D. P. (2006). Measurements and modelling of beach groundwater flow in the swash-zone: a review. *Continental Shelf Research*, 26(5), 622-652.
- Hughes, M. G., Aagaard, T., & Baldock, T. E. (2007). Suspended sediment in the swash zone: heuristic analysis of spatial and temporal variations in concentration. *Journal of Coastal Research*, 1345-1354.
- Hughes, M. G., Masselink, G., & Brander, R. W. (1997). Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach. *Marine Geology*, 138(1), 91-103.
- Hughes, M. G., & Moseley, A. S. (2007). Hydrokinematic regions within the swash zone. *Continental Shelf Research*, 27(15), 2000-2013.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7): World Scientific Publishing Company Incorporated.
- Huntley, D., Guza, R., & Bowen, A. (1977). A universal form for shoreline run-up spectra? *Journal of Geophysical Research*, 82(18), 2577-2581.
- Jiménez, J.A. & Madsen, O.S. (2003). A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 129, No. 2, 70-7
- Jennings, R., & Shulmeister, J. (2002). A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186(3-4), 211-228. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00314-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00314-6)
- Kimmoun, O., & Branger, H. (2007). A particle image velocimetry investigation on laboratory surf-zone breaking waves over a sloping beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 588, 353-397. doi: doi:10.1017/S0022112007007641
- Kobayashi, N., & Johnson, B. D. (2001). Sand suspension, storage, advection, and settling in surf and swash zones. *Journal of geophysical research*, 106(C5), 9363-9376.

- Lindken, R., & Merzkirch, W. (2002). A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids*, 33(6), 814-825. doi: 10.1007/s00348-002-0500-1
- López de San Román-Blanco, B., Coates, T. T., Holmes, P., Chadwick, A. J., Bradbury, A., Baldock, T. E., Grüne, J. (2006). Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial results. *Coastal Engineering*, 53(4), 349-362. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.021>
- Losada, M. A. & L. A. Giménez-Curto (1980). Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering* 4(0): 187-206.
- Losada, M. A. & L. A. Gimenez-Curto (1979). The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number. *Coastal Engineering* 3(0): 77-96.
- Mase, H. (1995). Frequency down-shift of swash oscillations compared to incident waves. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 397-411.
- Masselink, G., Evans, D., Hughes, M. G., & Russell, P. (2005). Suspended sediment transport in the swash zone of a dissipative beach. *Marine Geology*, 216(3), 169-189.
- Masselink, G., & Puleo, J. A. (2006). Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research*, 26(5), 661-680. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2006.01.015>
- Masselink, G., & Russell, P. (2006). Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches. *Marine Geology*, 227(3), 227-240.
- Meneses Fernandez, Ana Laura, (2009). Efectos del nivel freático en playas. (Maestría) UNAM.
- Nicholson, J. (1968). A laboratory study of the relationship between waves and beach profiles.
- Nielsen, P. (2006). Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and boundary layer streaming. *Coastal Engineering*, 53(9), 749-758.
- Nielsen, P., Robert, S., Møller-Christiansen, B., & Oliva, P. (2001). Infiltration effects on sediment mobility under waves. *Coastal Engineering*, 42(2), 105-114.
- Nishino, K., Kato, H., & Torii, K. (2000). Stereo imaging for simultaneous measurement of size and velocity of particles in dispersed two-phase flow. *Measurement Science and Technology*, 11(6), 633.
- Ortega-Sánchez, M., Fachin, S., Sancho, F., & Losada, M. A. (2008). Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). *Geomorphology*, 99(1), 171-185.
- Osborne, P. D., & Rooker, G. A. (1999). Sand re-suspension events in a high energy infragravity swash zone. *Journal of Coastal Research*, 74-86.
- Pedrozo-Acuña, A. (2010). Introducción a la morfodinámica costera. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Pedrozo-Acuña, A., de Alegría-Arzaburu, A. R., Torres-Freyermuth, A., Mendoza, E., & Silva, R. (2011). Laboratory investigation of pressure gradients induced by plunging breakers. *Coastal Engineering*, 58(8), 722-738. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.03.013>
- Pedrozo-Acuña, A., Resendiz, D., & Gutiérrez Valencia, C. E. (2013). Experimental study on sediment advection and beach response under plunging wave breaking. *Journal of Coastal Research*(65), 1569-1574.

- Pedrozo-Acuña, A., Resendiz, D., Mendoza, E., & Silva, R. (2012). Sediment sorting and beach morphology under plunging wave breaking.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Chadwick, A. J., & Silva, R. (2007a). A numerical–empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand–gravel beaches. *Marine geology*, 241(1), 1-18.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Chadwick, A. J., & Silva, R. (2007b). A numerical–empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand–gravel beaches. *Marine Geology*, 241(1-4), 1-18. doi: 10.1016/j.margeo.2007.02.013
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., Otta, A. K., & Chadwick, A. J. (2006). On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53(4), 335-347. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.019>
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D. J., & Reeve, D. E. (2008). Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *Marine Geology*, 253(1–2), 26-35. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2008.04.013>
- Pedrozo-Acuña, A., & Torres-Freyermuth, A. (2011). Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(2), 51-67.
- Pedrozo-Acuña, A., Torres-Freyermuth, A., Zou, Q., Hsu, T.-J., & Reeve, D. E. (2010). Diagnostic investigation of impulsive pressures induced by plunging breakers impinging on gravel beaches. *Coastal Engineering*, 57(3), 252-266. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.010>
- Petti, M., & Longo, S. (2001). Turbulence experiments in the swash zone. *Coastal Engineering*, 43(1), 1-24.
- Powell, K. A. (1990). Predicting short term profile response for shingle beaches. *Hydraulics Research*. Wallingford.
- Pritchard, D., & Hogg, A. J. (2005). On the transport of suspended sediment by a swash event on a plane beach. *Coastal Engineering*, 52(1), 1-23.
- Puleo, J., Holland, K., Plant, N., Slinn, D., & Hanes, D. (2003). Fluid acceleration effects on suspended sediment transport in the swash zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 108(C11).
- Puleo, J. A., Farhadzadeh, A., & Kobayashi, N. (2007). Numerical simulation of swash zone fluid accelerations. *Journal of Geophysical Research*, 112(C7), C07007.
- Puleo, J. A., Farhadzadeh, A., & Kobayashi, N. (2007). Numerical simulation of swash zone fluid accelerations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C7), C07007. doi: 10.1029/2006JC004084
- Raubenheimer, B., Elgar, S., & Guza, R. (2004). Observations of swash zone velocities: A note on friction coefficients. *Journal of Geophysical Research*, 109(C1), C01027.
- Richmond, B. M., & Sallenger, A. H. (1984). Cross-shore transport of bimodal sands. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(19).
- Rivillas-Ospina, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva, R., Torres-Freyermuth, A., & Gutierrez, C. (2012). Estimation of the velocity field induced by plunging breakers in the surf and swash zones. *Experiments in Fluids*, 52(1), 53-68. doi: 10.1007/s00348-011-1208-x
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I. J., Silva, R., & Pedrozo-Acuña, A. (2013). Post-nourishment beach scarp morphodynamics. *Proceedings 12th International Coastal Symposium*, (65).

- Ryu, Y., Chang, K.-A., & Lim, H.-J. (2005). Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Measurement Science and Technology*, 16(10), 1945.
- Sánchez-Arcilla Conejo, A., & Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería del agua*, 1994, vol. 1, núm. 2.
- Silvester, R. 1960. Stabilization of sedimentary coastlines. *Nature*, 188, 467 p
- Simm, J., Brampton, A., Beech, N., & Brooke, J. (1996). Beach management manual. London: CIRIA Report 153.
- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. Great Britain: Thomas Telford Publications.
- Steenhauer, K., et al. (1998). The effects of beach permeability on bore-driven swash on coarse-grained beaches.
- Ting, F. C., & Kirby, J. T. (1994). Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone. *Coastal Engineering*, 24(1), 51-80.
- Türker, U., Yagci, O., & Kabdaşlı, M. S. (2006). Analysis of coastal damage of a beach profile under the protection of emergent vegetation. *Ocean Engineering*, 33(5), 810-828.
- Van Hijum, E. (2011). Equilibrium profiles of coarse material under wave attack.
- Vidal, C., Losada, M.A.; Medina, R. & Losada, I. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. *Ingeniería del agua* Vol. 2, Abril, 55-74
- Wilcock, P.R., Kenworthy, S.T., Crowe, J.C. (2001). Experimental study of the transport of mixed sand and gravel. *Water Resources Research*, 37 (12), pp. 3349-3358.
- Williams, J. J., Buscombe, D., Masselink, G., Turner, I. L., & Swinkels, C. (2012). Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures. *Coastal Engineering*, 63(0), 3-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.009>
- Wright, LD, corto, AD, & Green, MO (1985). Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model. *Geología Marina*, 62 (3), 339-364.
- Wright, L., & Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, 56(1), 93-118.
- Wright, L., & Thom, B. (1977). Coastal depositional landforms. A morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 1(3), 412-459.