



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE  
PERFILES DE PLAYA, BAJO UN GRADIENTE  
HIDRÁULICO”**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

**MIGUEL ANGEL DELGADILLO CALZADILLA**

TUTOR:

**DR. RODOLFO SILVA CASARÍN**



MÉXICO, D.F.

ABRIL 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría y la finalización de esta tesis.

Al **Instituto de Ingeniería** de la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi casa durante más de cinco años y por las facilidades para desarrollarme profesionalmente en sus instalaciones.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, porque es una casa libre a la expresión y porque dentro y fuera de sus aulas académicamente me ha brindado la oportunidad de ser un recurso humano con valor, ¡Ay UNAM qué emoción vivirla!

A la **Fundación TELMEX** y a los **Servicios Médicos de PEMEX**, por el apoyo que me brindaron.

A ustedes **Papás**, porque hasta económicamente me han apoyado.

A ti **Carlos A. Delgadillo Calzadilla**, por tu apoyo.

Al **Dr. Rodolfo Silva Casarín**. Por el espacio en el grupo, por el apoyo que me otorgó al terminar el cuarto semestre de la maestría y porque en más de una ocasión me ha aconsejado como tutor y como amigo, ¡Gracias!

Al **Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin**, por las discusiones académicas y no académicas, por el conocimiento que has generado en mí, ¡Gracias!

A mis compañeros y amigos del **Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos**, en especial a **Xavier** y **José Antonio** por la confianza y amistad, ¡Gracias!

A la **Familia Saavedra León**, por la amistad y el invaluable tiempo que hemos compartido, además de los consejos, los ánimos y el amor, ¡Gracias!

A mis familiares (tía Sol) y amigos.

Miguel Angel Delgadillo Calzadilla.

¡Orgullosamente UNAM!

---

### Resumen

Actualmente el turismo de playa es una de las actividades costeras más importantes que aprovechan las características naturales de la costa, por lo que el uso razonable de los ecosistemas costeros exige de responsabilidad y ética ambiental para alterarlos lo menos posible. La comprensión de los fenómenos y ciclos naturales es determinante para armonizar los tiempos económicos y las ocurrencias naturales.

La morfología de la playa está determinada por la deposición de sedimentos en las playas causada por el viento, las mareas y las olas, así como el flujo subterráneo a través de la playa. El efecto de este flujo subsuperficial en los sistemas de playa que tiene una laguna adyacente es importante porque si bien estos sistemas son muy rentables para el turismo, también son muy vulnerables a los cambios en el equilibrio que existe entre la laguna y la playa.

En esta tesis se presenta una comparación de los efectos de un flujo sub-superficial sobre una playa, en dirección hacia la laguna (negativo) y en dirección hacia la playa expuesta a la acción del oleaje (positivo). Los datos para la comparación son el resultado de un programa experimental llevado a cabo en el laboratorio de costas y puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se modeló primero una condición de referencia bajo diferentes condiciones de oleaje en la cual el nivel freático de la laguna y de zona expuesta al oleaje fue el mismo. A continuación se modeló una serie de condiciones de oleaje bajo en el cual el gradiente fue de 10 [cm] entre el lado protegido y el lado expuesto a la acción del oleaje. Por último se modeló una condición con un desnivel de 10 [cm] entre lado protegido y la zona de playa. Se encontró que cuando el gradiente es negativo el resultado es una acreción en los límites del *run-up* es, mientras con un gradiente positivo existe una acreción de sedimento entre las zonas de rotura y en la parte más baja de la zona de lavado.

Los resultados obtenidos hasta ahora muestran la conveniencia de nuevas investigaciones sobre el efecto de las variaciones del nivel freático puede ser muy conveniente para comprender mejor las consecuencias económicas y ambientales de los cambios en el perfil de la playa en una playa con una laguna adyacente.

---

## Abstract

---

### Abstract

At the present time beach tourism is one of the most important coastal activities which take advantage of the naturally occurring features of a coastline. The reasonable use of the coastal ecosystem requires responsibility and environmental ethics so that features are disturbed as little as possible. Understanding of the natural phenomena and cycles present allow economic benefits to be long lasting.

The morphology of a beach is determined by the deposition of sediment on beaches caused by wind, tides and waves as well as subsurface flow through the beach. The effect of this subsurface flow in beach systems that have an adjoining lagoon is important because while these systems are very profitable for tourism, they are also very vulnerable to changes in the equilibrium that exists between the lagoon and the beach.

This thesis presents a comparison between the effects of a subsurface flow through such a beach, towards the lagoon (negative) and towards the sea side, which is vulnerable to wave action (positive). The data for the comparison are the result of an experimental program performed at the Coasts and Ports laboratory of the Engineering Institute at the UNAM. A condition was first modelled in which there was no gradient on the barrier between the protected side and the side vulnerable to wave action. Then results due to fluctuations in the levels between the two sides were analysed. Then a second condition was created with an increment of 10 [cm] between the protected side and the side vulnerable to wave action. Finally a drop of 10 [cm] was modeled for the level of the protected side in comparison to that of the seaward side. It was found that where the gradient had a negative direction, accretion on the *run-up* borders is larger than when there was a gradient with a positive direction. In the latter case accretion between the break zone and the lower swash zone is greater.

---

## Índice

LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABLAS .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
I.1 OBJETIVOS .....	7
I.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO .....	7
<b>II. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>11</b>
II.1 FUNDAMENTOS PRE-SIGLO XX .....	11
II.2 SIGLO XX .....	12
II.3 MORFODINÁMICA DE PLAYAS .....	14
II.3.1 <i>Forma en Planta</i> .....	14
II.3.2 <i>Forma en Perfil</i> .....	16
II.3.2.1 Perfil Transversal de Equilibrio .....	19
II.4 EFECTOS DEL NIVEL FREÁTICO SOBRE EL PERFIL DE LA PLAYA .....	24
II.5 ESCALAS TEMPORALES Y ESPACIALES .....	26
II.5.1 <i>Función de las escalas del tiempo</i> .....	27
<b>III. OLEAJE .....</b>	<b>31</b>
III.1 CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE .....	33
III.2 TRANSFORMACIONES DEL OLEAJE .....	34
III.2.1 <i>Refracción</i> .....	34
III.2.2 <i>Difracción</i> .....	34
III.2.3 <i>Reflexión</i> .....	35
III.2.4 <i>Rotura</i> .....	35
III.3 CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE .....	39
III.4 FUENTES DE DATOS DE SEÑALES DE OLEAJE .....	40
III.4.1 <i>Análisis de señales de oleaje</i> .....	41
III.5 TEORÍAS DEL OLEAJE .....	42
<b>IV. METODOLOGÍA .....</b>	<b>47</b>
IV.1 VARIABLES EN ESTUDIO .....	47
IV.1.1 <i>Variables independientes</i> .....	47
IV.1.2 <i>Variables dependientes</i> .....	47
IV.2 MODELACIÓN EN LABORATORIO .....	47
IV.2.1 <i>Canal de oleaje II-UNAM</i> .....	47
IV.2.2 <i>Construcción del perfil inicial</i> .....	48
IV.2.3 <i>Estimación del coeficiente de permeabilidad <math>K_h</math></i> .....	50
IV.2.4 <i>Instrumentación y equipo de laboratorio</i> .....	51

# ÍNDICE

---

IV.2.4.1	Sensores de Nivel .....	51
IV.2.4.2	Velocímetro acústico ADV Vectrino .....	52
IV.2.4.3	Estación total.....	53
IV.2.5	<i>Instrumentación del experimento</i> .....	53
IV.3	EXPERIMENTACIÓN EN EL LABORATORIO .....	55
IV.3.1	<i>Sin gradiente</i> .....	56
IV.3.2	<i>Gradiente Negativo</i> .....	56
IV.3.3	<i>Gradiente Positivo</i> .....	57
IV.4	DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....	57
<b>V.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
V.1	SIN GRADIENTE .....	63
V.1.1	<i>Periodo de 1 s</i> .....	63
V.1.1.1	Efectos en el coeficiente de reflexión debido a cambios en el perfil .....	65
V.1.2	<i>Periodo de 2 s</i> .....	68
V.1.3	<i>Periodo T = 3 s</i> .....	72
V.1.4	<i>Periodo de 4 s</i> .....	76
V.2	EFFECTOS DE UN GRADIENTE NEGATIVO Y POSITIVO AL INTERIOR DE UNA BARRERA ARENOSA .....	81
V.2.1.1	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 1 s H = 12 cm .....	82
V.2.1.2	Avance de playa periodo T = 1 s y altura de ola H = 12 cm .....	83
V.2.1.3	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 1 s H = 16 cm .....	85
V.2.1.4	Avance de playa periodo T = 1 s y altura de ola H = 16 cm .....	86
V.2.1.5	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 2 s H = 12 cm .....	87
V.2.1.6	Avance de playa periodo T = 2 s y altura de ola H = 12 cm .....	88
V.2.1.7	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 2 s H = 16 cm .....	90
V.2.1.8	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 3 s H = 12 cm .....	91
V.2.1.9	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 3 s H = 16 cm .....	93
V.2.1.10	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 4 s H = 12 cm .....	95
V.2.1.11	Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo T = 4 s H = 16 cm .....	97
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>103</b>
VI.1	DISCUSIÓN DE LA TESIS.....	103
VI.2	CONCLUSIONES.....	104
VI.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	105
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>107</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXO A GRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
VIII.1	SIN GRADIENTE .....	111
VIII.1.1	<i>Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo T = 1 s y altura de ola H = 12 cm</i> 111	
VIII.1.2	<i>Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo T = 1 s y altura de ola H = 16 cm</i> 112	
VIII.1.3	<i>Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo T = 2 s y altura de ola H = 12 cm</i> 113	

VIII.1.4	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 16$ cm	114
VIII.1.5	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 12$ cm	115
VIII.1.6	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 16$ cm	116
VIII.1.7	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 12$ cm	117
VIII.1.8	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 16$ cm	118
VIII.2	GRADIENTE NEGATIVO .....	119
VIII.2.1	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 12$ cm	119
VIII.2.2	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 16$ cm	120
VIII.2.3	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 12$ cm	121
VIII.2.4	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 16$ cm	122
VIII.2.5	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 12$ cm	123
VIII.2.6	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 16$ cm	124
VIII.2.7	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 12$ cm	125
VIII.2.8	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 16$ cm	126
VIII.3	GRADIENTE POSITIVO .....	127
VIII.3.1	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 12$ cm	127
VIII.3.2	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 16$ cm	128
VIII.3.3	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 12$ cm	129
VIII.3.4	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 16$ cm	130
VIII.3.5	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 12$ cm	131
VIII.3.6	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 3$ s y altura de ola $H = 16$ cm	132
VIII.3.7	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 12$ cm	133
VIII.3.8	Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 4$ s y altura de ola $H = 16$ cm	134



## ÍNDICE

---

## Lista de Figuras

FIGURA I.1 EJEMPLO DE SISTEMA PLAYA-LAGUNA .....	6
FIGURA II.1 SUBSISTEMAS COSTEROS A DETALLE .....	13
FIGURA II.2 VARIABLES DE LA ECUACIÓN PARABÓLICA DE HSU Y EVANS, 1989 .....	15
FIGURA II.3 PERFILES DE UNA PLAYA. A) FORMA EN PLANTA. B) PERFIL TRANSVERSAL, DE EROSIÓN Y ACRECIÓN. C) MEDIDA DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE UNA PLAYA, MEDIANTE EL VOLUMEN .....	17
FIGURA II.4 MORFODINÁMICA DE UNA PLAYA, WRIGHT Y SHORT (1983, 1984) .....	18
FIGURA III.1 PERIODO-ENERGÍA DE LAS ONDAS. (SILVA, ET AL. 2001) .....	33
FIGURA III.2 OLEAJE TIPO SWELL Y OLEAJE TIPO SEA .....	34
FIGURA III.3 CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA .....	40
FIGURA IV.1 CANAL DE OLEAJE II-UNAM.....	48
FIGURA IV.2 CONSTRUCCIÓN DEL PERFIL INICIAL.....	49
FIGURA IV.3 PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE .....	50
FIGURA IV.4 SENSORES DE NIVEL COLOCADOS SOBRE LA PLAYA.....	52
FIGURA IV.5 VELOCÍMETRO ACÚSTICO ADV VECTRINO .....	52
FIGURA IV.6 ESTACIÓN TOTAL LEICA .....	53
FIGURA IV.7 POSICIONES DE LOS SENSORES EN EL CANAL. ....	54
FIGURA V.1 PERFIL INICIAL DE LA PLAYA.....	64
FIGURA V.2 DESCRIPCIÓN DE ZONAS EN EL PERFIL DE LA PLAYA.....	64
FIGURA V.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN.....	65
FIGURA V.4 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 1$ S Y ALTURA DE OLA $H = 12$ CM, SIN GRADIENTE .....	66
FIGURA V.5 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 1$ S Y ALTURA DE OLA $H = 16$ CM, SIN GRADIENTE .....	66
FIGURA V.6 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, $T = 2$ S, $H = 12$ Y $16$ CM .....	69
FIGURA V.7 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 2$ S Y ALTURA DE OLA $H = 12$ CM, SIN GRADIENTE .....	69
FIGURA V.8 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 2$ S Y ALTURA DE OLA $H = 16$ CM, SIN GRADIENTE .....	70
FIGURA V.9 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, $T = 3$ S, $H = 12$ Y $16$ CM .....	72
FIGURA V.10 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 3$ S Y ALTURA DE OLA $H = 12$ CM, SIN GRADIENTE .....	73
FIGURA V.11 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 3$ S Y ALTURA DE OLA $H = 16$ CM, SIN GRADIENTE .....	74
FIGURA V.12 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, $T = 4$ S, $H = 12$ Y $16$ CM .....	77
FIGURA V.13 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 4$ S Y ALTURA DE OLA $H = 12$ CM, SIN GRADIENTE .....	78
FIGURA V.14 EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE LA PLAYA PERIODO $T = 4$ S Y ALTURA DE OLA $H = 16$ CM, SIN GRADIENTE .....	79
FIGURA V.15 SEDIMENTO DE ARENA INFLUENCIADO POR LA DIRECCIÓN DE UN GRADIENTE NEGATIVO Y POSITIVO .....	81
FIGURA V.16 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES $T = 1$ S, $H = 12$ CM.....	83
FIGURA V.17 PERFILES FINALES, $T = 1$ S, $H = 12$ CM.....	85
FIGURA V.18 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES $T = 1$ S, $H = 16$ CM.....	86
FIGURA V.19 PERFILES FINALES, $T = 1$ S, $H = 16$ CM.....	87
FIGURA V.20 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES $T = 2$ S, $H = 12$ CM.....	88
FIGURA V.21 PERFILES FINALES, $T = 2$ S, $H = 12$ CM.....	90
FIGURA V.22 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES $T = 2$ S, $H = 16$ CM.....	90
FIGURA V.23 PERFILES FINALES, $T = 2$ S, $H = 16$ CM.....	91

## Lista de Figuras

---

FIGURA V.24 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES T = 3 s, H = 12 CM.....	92
FIGURA V.25 PERFILES FINALES, T = 3 s, H = 12 CM.....	93
FIGURA V.26 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES T = 3 s, H = 16 CM.....	94
FIGURA V.27 PERFILES FINALES, T = 3 s, H = 16 CM.....	95
FIGURA V.28 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES T = 4 s, H = 12 CM.....	96
FIGURA V.29 PERFILES FINALES, T = 4 s, H = 12 CM.....	97
FIGURA V.30 DISTRIBUCIÓN DE DIFERENCIAS VERTICALES T = 4 s, H = 16 CM.....	98
FIGURA V.31 PERFILES FINALES, T = 4 s, H = 16 CM.....	99
FIGURA VIII.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	111
FIGURA VIII.2 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	111
FIGURA VIII.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	112
FIGURA VIII.4 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	112
FIGURA VIII.5 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 2 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	113
FIGURA VIII.6 PERFIL FINAL T = 2 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	113
FIGURA VIII.7 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 2 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	114
FIGURA VIII.8 PERFIL FINAL T = 2 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	114
FIGURA VIII.9 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 3 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	115
FIGURA VIII.10 PERFIL FINAL T = 3 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	115
FIGURA VIII.11 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 3 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	116
FIGURA VIII.12 PERFIL FINAL T = 3 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	116
FIGURA VIII.13 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 4 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	117
FIGURA VIII.14 PERFIL FINAL T = 4 s, H = 12 CM, SIN GRADIENTE .....	117
FIGURA VIII.15 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 4 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	118
FIGURA VIII.16 PERFIL FINAL T = 4 s, H = 16 CM, SIN GRADIENTE .....	118
FIGURA VIII.17 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	119
FIGURA VIII.18 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	119
FIGURA VIII.19 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	120
FIGURA VIII.20 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	120
FIGURA VIII.21 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 2 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	121
FIGURA VIII.22 PERFIL FINAL T = 2 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	121
FIGURA VIII.23 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 2 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	122
FIGURA VIII.24 PERFIL FINAL T = 2 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	122
FIGURA VIII.25 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 3 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	123
FIGURA VIII.26 PERFIL FINAL T = 3 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	123
FIGURA VIII.27 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 3 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	124
FIGURA VIII.28 PERFIL FINAL T = 3 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	124
FIGURA VIII.29 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 4 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	125
FIGURA VIII.30 PERFIL FINAL T = 4 s, H = 12 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	125
FIGURA VIII.31 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 4 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	126
FIGURA VIII.32 PERFIL FINAL T = 4 s, H = 16 CM, GRADIENTE NEGATIVO.....	126
FIGURA VIII.33 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 12 CM, GRADIENTE POSITIVO .....	127
FIGURA VIII.34 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 12 CM, GRADIENTE POSITIVO .....	127
FIGURA VIII.35 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL T = 1 s, H = 16 CM, GRADIENTE POSITIVO .....	128
FIGURA VIII.36 PERFIL FINAL T = 1 s, H = 16 CM, GRADIENTE POSITIVO .....	128

## Lista de Figuras

---

FIGURA VIII.37 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 2$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	129
FIGURA VIII.38 PERFIL FINAL $T = 2$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	129
FIGURA VIII.39 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 2$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	130
FIGURA VIII.40 PERFIL FINAL $T = 2$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	130
FIGURA VIII.41 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 3$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	131
FIGURA VIII.42 PERFIL FINAL $T = 3$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	131
FIGURA VIII.43 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 3$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	132
FIGURA VIII.44 PERFIL FINAL $T = 3$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	132
FIGURA VIII.45 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 4$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	133
FIGURA VIII.46 PERFIL FINAL $T = 4$ s, $H = 12$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	133
FIGURA VIII.47 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL PERFIL $T = 4$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	134
FIGURA VIII.48 PERFIL FINAL $T = 4$ s, $H = 16$ cm, GRADIENTE POSITIVO .....	134

## Lista de Figuras

---

## Lista de Tablas

TABLA I.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS COSTEROS .....	5
TABLA II.1 PARÁMETROS PARA DEFINIR EL GRADO DE DISIPACIÓN DE UNA PLAYA.....	19
TABLA II.2 MODELOS DE PERFIL DE EQUILIBRIO.....	21
TABLA II.3 EXPRESIONES PARA ESTIMAR EL FACTOR DE FORMA $A$ .....	22
TABLA II.4 EXPRESIONES PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD DE CAÍDA $w$ .....	23
TABLA III.1 CLASIFICACIÓN DE UNA OLA, SEGÚN FUERZA REGENERADORA Y RESTAURADORA.....	32
TABLA III.2 TIPOS DE ROTURA SOBRE TALUDES IMPERMEABLES.....	39
TABLA III.3 PARÁMETROS INGENIERILES PARA CLASIFICAR UNA OLA SEGÚN LA TEORÍA LINEAL .....	43
TABLA IV.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA DEL MODELO .....	49
TABLA IV.2 DISTANCIAS ENTRE LA PALA GENERADORA Y LOS SENSORES INSTRUMENTADOS EN LA PLAYA. ....	55
TABLA IV.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS GRADIENTES MODELADOS.....	57
<b>TABLA IV.4 RESUMEN DE PRUEBAS REALIZADAS .....</b>	<b>59</b>
TABLA V.1 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 1$ s, $H = 12$ CM.....	67
TABLA V.2 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 1$ s, $H = 16$ CM.....	68
TABLA V.3 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 2$ s, $H = 12$ CM.....	71
TABLA V.4 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 2$ s, $H = 16$ CM.....	71
TABLA V.5 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 3$ s, $H = 12$ CM.....	75
TABLA V.6 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 3$ s, $H = 16$ CM.....	76
TABLA V.7 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 4$ s, $H = 12$ CM.....	80
TABLA V.8 SIN GRADIENTE, PERIODO $T = 4$ s, $H = 16$ CM.....	80
TABLA V.9 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 1$ s, $H = 12$ CM.....	84
TABLA V.10 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 1$ s, $H = 16$ CM.....	86
TABLA V.11 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 2$ s, $H = 16$ CM.....	89
TABLA V.12 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 2$ s, $H = 16$ CM.....	91
TABLA V.13 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 3$ s, $H = 12$ CM.....	92
TABLA V.14 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 3$ s, $H = 16$ CM.....	94
TABLA V.15 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 4$ s, $H = 12$ CM.....	96
TABLA V.16 AVANCE DE PLAYA ENTRE LOS DIFERENTES GRADIENTES $T = 4$ s, $H = 16$ CM.....	98



### Lista de Símbolos

$R_n$	radio vector a partir del cual se obtiene la curva parabólica en m
$R_\beta$	longitud de la línea de control en m
$\beta$	ángulo de oblicuidad del oleaje en °
$B_b$	coeficiente de Rotura
$\varepsilon$	factor de <i>Surf</i>
$P$	diferencia de Fase en s
$\xi_b$	número de Iribarren
$\Omega$	parámetro adimensional de velocidad de caída
$H_b$	altura de ola antes de la rotura en m
$T$	periodo de la ola en s
$L_0$	longitud de la ola en aguas profundas en m
$a$	amplitud de la ola en m
$t$	tiempo que tarda una ola desde que rompe hasta que llega a la cara de la playa en s
$m$	distancia relativa donde rompen las olas
$w_s$	velocidad de caída m/s
$g$	constante gravitacional m/s <sup>2</sup>
$\pi$	Pi = 3.14159
$D_{50}$	diámetro 50 de una muestra
$D_*$	diámetro característico
$\nu$	viscosidad cinemática en m <sup>2</sup> /s
$S$	densidad relativa de la arena
$\gamma_m$	densidad de la arena en kg/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	densidad del agua en kg/m <sup>3</sup>
$H$	altura de ola en m
$C_r$	coeficiente de reflexión



## Lista de Símbolos

---

$H_r$	altura de ola reflejada en m
$H_i$	altura de ola incidente en m
H	profundidad en m
C	celeridad en m/s
$H_\infty$	altura de ola en aguas profundas en m
$L_\infty$	longitud de ola en aguas profundas en m
$C_g$	celeridad de grupo en m/s
$a$	amplitud de la ola en m
$a_x$	aceleración de las partículas horizontal en $m/s^2$
$a_z$	aceleración de las partículas vertical en $m/s^2$
$\eta^+$	nivel medio del mar
Kh	coeficiente de permeabilidad m/s

**CAPÍTULO I**

**Introducción**



### I. Introducción

La costa representa una fuente de recursos naturales que la población ha aprovechado a lo largo de los años según su conveniencia, es así que actividades como el comercio y el transporte marítimo pueden impactar de manera trascendente la economía de un país en función de la atención que él mismo ponga en sus zonas costeras. Actualmente, una actividad que ha incrementado de manera significativa su desarrollo es el turismo de playa, ya que ofrece condiciones, tanto climáticas como ambientales, propicias para la recreación y esparcimiento humano, aunado a su valor ambiental.

El uso razonable de los recursos naturales propios de la costa, se traduce en un crecimiento económico de la región, la responsabilidad y ética ambiental exigen que el ecosistema litoral sea alterado al mínimo posible respecto de sus condiciones iniciales para no cambiar los equilibrios asociados con los procesos naturales.

Es claro que existe una diversidad de desarrollos para el aprovechamiento de los recursos costeros alrededor del mundo, los cuales deberían cumplir a cabalidad con el objetivo de la explotación económica y generación de fuentes de trabajo, pero el aspecto ambiental y social no siempre es atendido con el mismo interés. Como es fácil imaginar, las causas de la desatención ambiental son tan variadas como proyectos existen, pero un patrón común está relacionado con la falta de comprensión de los fenómenos y ciclos naturales de los sistemas litorales, así como una notoria apatía por armonizar los tiempos económicos con los de las ocurrencias naturales. Entonces, desde la perspectiva científica, existen aún incontables retos derivados de la ignorancia que persiste respecto de los equilibrios de las costas y la sensibilidad que manifiesta un sistema específico tanto a las actuaciones humanas como a las posibles alteraciones naturales.

En este sentido, el principal motivo de esta tesis es que México tiene una posición geográfica privilegiada ya que se ubica entre los dos océanos más grandes del planeta, cuenta con más de 11,000 kilómetros de litorales y 17 estados con playa, ¡México es un paraíso costero!, son pocos los países que pueden ofertar una amplia diversidad de ambientes costeros y oceánicos y que tengan el potencial para la construcción de nuevos

## Introducción

---

desarrollos turísticos a corto y mediano plazo en un gran número de sitios a lo largo del país.

Las playas corresponden al espacio en el que se desplazan los sedimentos no consolidados y que son transportados por la acción del oleaje cercano a la costa. Dicho espacio comprende desde los puntos extremos alcanzados por los guijarros lanzados por las olas más fuertes hasta las profundidades donde la oscilación, provocada por los grandes oleajes, aún moviliza los sedimentos más finos sobre el fondo.

Las playas han sido un punto de gran interés para los Ingenieros de Costas, el desarrollo de su estudio fue iniciado en Europa, en buena medida, motivado por la construcción de puertos. En otras áreas del conocimiento, los descubrimientos y observaciones de fósiles marinos incentivaron el interés por el estudio de las playas. Los objetivos de estos estudios solían limitarse a plasmar en los libros una amplia descripción de las formas costeras, o bien ilustrar los procesos que ocurrían sobre las formas costeras para aprovechar al máximo sus recursos. Actualmente esto ha sido de gran ayuda para determinar la acción del oleaje y de las mareas sobre la forma de la costa.

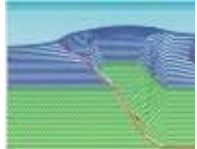


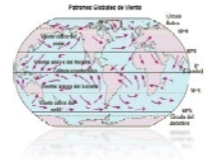
Antes de enumerar los factores que permiten explicar los procesos en el sistema litoral y la distribución de sedimento a lo largo de la playa, en primer lugar, se deben conocer las posibles fuentes de aporte de los materiales a la misma. Entre dichas fuentes se tienen: a) una pared de acantilado sujeta a erosión producida directamente por el oleaje b) el material transportado hacia la costa por los agentes que actúan en el proceso de arrastre, c) el sedimento desplazado lateralmente a lo largo de la costa y d) el sedimento suelto de la zona frente a la costa. Estas fuentes definen la disponibilidad de material que es uno de los principales actores de los que depende estado de una playa.

El resto de los factores o procesos costeros que afectan la dinámica y forma del sistema litoral se pueden agrupar, según su origen, como se muestra en la Tabla I.1:

## Introducción

---

**Tabla I.1 Descripción de los procesos costeros**

PROCESO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Geológico	Se considera la estructura geológica, la litología, resistencia y composición mineralógica de los sedimentos.	
Climático	Se asocia a los fenómenos (intemperismo y meteorización) producidos por los cambios de temperatura.	
Oceanográfico	Es el principal que altera el movimiento de los sedimentos, ya que influye de forma directa en el comportamiento de la costa.	
Atmosférico	El viento se considera como el principal agente que ejerce su influencia.	

Cualquiera que sea la morfología de las playas, se organizan según un perfil transversal bidimensional más o menos regular, pero generalmente son cóncavos. Su pendiente varía de modo sensible en función de las condiciones ofrecidas por el relieve costero submarino, de la fuerza de las olas, y más aún, del tamaño de los elementos que éstas movilizan.

Por otra parte, la forma de las playas también está determinada por elementos locales que, si bien, pueden ser menos agresivos a simple vista, impactan directamente en los estados de equilibrio de los sistemas a largo plazo y, en caso de alteraciones (naturales o artificiales), pueden ser determinantes en el nuevo estado de la costa. Es el caso, por ejemplo, del acarreo del material de la playa debido al viento y del efecto del flujo sub-superficial a través de la playa. Este último, cobra especial importancia en sistemas de playa con un cuerpo lagunar adosado, los cuales suelen ser de gran importancia turística dada su calidad paisajística y, por lo mismo, son sujetos a acciones humanas muy agresivas. La Figura I.1 muestra un ejemplo de este tipo de sistemas.



**Figura I.1 Ejemplo de sistema playa-laguna**

De la Figura I.1 es claro que, a pesar de la comunicación que existe entre el cuerpo de agua y el mar abierto, si la barra es lo suficientemente permeable deberá presentarse un flujo subterráneo determinado por propiedades como la diferencia de niveles entre el mar y la laguna, la porosidad del material de la playa, las mareas y las posibles descargas de ríos. El impacto de este flujo en la forma y estabilidad de la playa es el tema central de esta tesis.

Con el fin de llevar a cabo un primer acercamiento al tema y contar con la mayor cantidad de variables controladas posible, el estudio se llevó a cabo en el canal de olas del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Al respecto, baste decir que la modelación física en la ingeniería marítima ha sido de gran ayuda, se inició formalmente en la década de 1950, mientras que la modelación matemática ya se había desarrollado. Para la década de 1960, con los datos que se obtenían de los modelos físicos, se realizaron análisis de los que se obtuvieron expresiones que hasta la fecha han sido la base de la ingeniería marítima práctica.

Las metas generales de una modelación física se pueden resumir como:

- *Obtener datos de un fenómeno nuevo*
- *Obtener mediciones para verificar o desaprobar un modelo teórico*
- *Obtener mediciones de algún fenómeno el cual implique un análisis teórico muy complicado*

Existe una clasificación de los modelos de una playa, los que son empíricos y los teóricos. Los modelos empíricos se dividen en descriptivos o de correlación, los cuales incluyen

## **Introducción**

---

gráficas y relaciones estadísticas entre las variables independientes y la forma bidimensional del perfil. Los modelos teóricos se dividen de acuerdo con los procedimientos matemáticos que son usados para resolver las ecuaciones de un modelo numérico.

El éxito que pudiera tener cualquier modelación depende de la calidad y la cantidad de datos disponibles.

### **I.1 OBJETIVOS**

A la luz de lo expuesto hasta ahora, el objetivo principal de esta tesis es el siguiente:

- Evaluar experimentalmente el efecto combinado del oleaje y de los flujos intersticiales derivados de una diferencia freática entre el nivel del agua detrás de una playa y el nivel de agua en la zona expuesta al oleaje, para la determinación de la dinámica y estabilidad del perfil de playa.

Para alcanzar dicho objetivo se han planteado las metas particulares siguientes:

- Llevar a cabo un programa experimental que incluya un amplio abanico de climas de oleaje en un modelo físico capaz de representar las condiciones de flujo en el sentido de propagación de oleaje, en el sentido contrario y flujo nulo a través de una barra arenosa.
- Recabar mediciones que permitan interpretar la consecución o no de la estabilidad del perfil de playa, la rapidez de deformación y la variabilidad del movimiento del sedimento.
- Valorar los efectos de los flujos en la interacción oleaje-corrientes-playa a través de la variación de la reflexión ante las mismas condiciones de oleaje.

### **I.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO**

Esta tesis se ha dividido en cuatro capítulos buscando cubrir tanto el marco teórico general como el experimental que dieron lugar a los resultados obtenidos.

El Capítulo 2 presenta una revisión del estado del arte y se resume el conocimiento disponible en la literatura respecto del efecto del nivel freático en playas. Se presenta también una descripción general de las playas en planta y perfil.



## **Introducción**

---

El Capítulo 3 está dedicado a la representación lineal del oleaje, misma que se toma como base para el diseño de los experimentos y la interpretación de las mediciones y resultados de la tesis.

El Capítulo 4 es la descripción de la metodología experimental, el arreglo de modelado físico y el programa de pruebas. Se presenta el equipo que se utilizó y las condiciones de ensayo.

El Capítulo 5 trata el análisis de los datos medidos y en él se discute respecto de la evolución de los perfiles de playa, su estabilidad, variabilidad e interacción con el oleaje en presencia y ausencia de flujos a su través.

El Capítulo 6 busca redondear las ideas vertidas en la tesis concluyendo respecto del conocimiento adquirido y generado, a la vez que plantea las futuras líneas de investigación que han quedado abiertas al término de este trabajo.

## CAPÍTULO II

### **Estado del Arte**



## II. Estado del Arte

Desde tiempos inmemoriales, la costa ha representado una oportunidad de desarrollo para los grupos humanos, tal es así que existen estudios antiguos que lo demuestran. Los griegos describieron un delta en la desembocadura del río Nilo, Heródoto relató la semejanza de la “forma natural” con la letra griega delta. En el siglo XV Leonardo da Vinci dibujó una fina aproximación de la curvatura de la línea de costa en su plan por drenar los pantanos de la costa Pontina.

Sin embargo, los primeros estudios verdaderamente científicos empezaron en el post-renacimiento en el contexto de la navegación en el mar Mediterráneo. Estudios de hidrógrafos, biólogos y geólogos fueron esenciales en la exploración de nuevos continentes, pero también ayudaron al estudio de las costas y el océano.

### II.1 Fundamentos Pre-siglo XX

La geomorfología costera tiene sus fundamentos en los estudios geológicos que se llevaron a cabo durante el reconocimiento de nuevos territorios y la curiosidad por entender el trabajo destructivo que ocasionalmente genera el mar a lo largo de las costas, así lo remarca Lomonosov (1759) en sus memorias.

Principalmente, los viajes de descubrimiento impulsaron el estudio de las formas costeras, lo cual aprovecharon los naturalistas para describir a detalle cualquier formación costera.

Hutton en 1788 y Playfair en 1802, con ayuda del reciente concepto llamado “uniformitarianismo”, en el que se reconoce la operación de los procesos diarios sobre largos periodos de tiempo que logran una gran depositación o erosión y básicamente de ideas geológicas, iniciaron lo que derivó en la Fisiografía, que se enfoca en estudiar las interconexiones entre las causas de procesos y sus formaciones resultantes.

La investigación de la teoría del oleaje apareció a inicios del siglo XIX, debido al desarrollo de las matemáticas y gracias a los trabajos de Gerstner (1802), Russell (1844), Airy (1845), Stokes (1847 y 1880), Boussinesq (1872), Rayleigh (1876, 1877) y Reynolds (1877). Todas estas teorías están basadas, principalmente, en la mecánica de fluidos.

El siglo XIX fue un parteaguas en el estudio de la diversidad del mundo; Charles Darwin y James Dana, siendo parte de la brigada de exploración de los Estados Unidos, observaron

diversos cambios en la forma de la costa. Darwin observó la dinámica de la tectónica de placas a lo largo de la costa de Sudamérica, de lo cual dedujo que los arrecifes pueden llegar a ser barreras arrecifales y que a su vez podrían convertirse en atolones, como resultado de la subsidencia gradual de islas volcánicas combinada con el crecimiento vertical de los arrecifes. Esta deducción representa uno de los primeros modelos de evolución costera que años más tarde fue sustentado por Dana en 1849, durante su viaje a las islas volcánicas del Océano Pacífico.

### II.2 Siglo XX

Todavía hasta principios del siglo XX, el entendimiento del sistema playa no tuvo mucho avance, aunque destaca el trabajo de Johnson (1919), quien describe las transformaciones de la costa provocadas por los factores oceanográficos; además ofrece una amplia clasificación de líneas de costa en particular de playas.

La Segunda Guerra Mundial impulsó el estudio de los ambientes costeros en diversos lugares del mundo, se estudió el impacto de la meteorología, la rotura del oleaje y el movimiento de sedimento, el principal objetivo de todos estos estudios fue explicar cómo interactúa el oleaje con el perfil transversal de la playa.

Actualmente, la geomorfología costera se ha separado un poco de la escuela tradicionalista, la cual hace a un lado los procesos costeros de las formas que se crean en la costa, si bien, hoy es conocido que el oleaje es fundamental para el transporte de sedimentos y también es responsable de la erosión que se presenta en las costas; no así la escuela tradicionalista que acepta hipótesis sumamente robustas.

Durante el siglo XX se precisó que las formas costeras son dinámicas y que responden a frecuentes procesos externos tales como el clima y la variación del nivel del mar. Estos estudios han incrementado la literatura, pero lo mejor de todo es que se ha podido comparar la línea de costa de un lugar con otro.

Desde 1990 cuando se empezó a tomar conciencia del incremento en los niveles del mar, se le ha dado un nuevo impulso al estudio de las costas, lo que hasta la fecha desencadenó en el hecho que muy variadas investigaciones se enfoquen sobre el sistema costero, para predecir su evolución futura y así tener una mejor administración de la costa. El camino que siguen todas las investigaciones se basa en entender las formas costeras que existían en el

pasado, así como los procesos que las afectaban, para poder decidir qué acciones de protección son indispensables según los procesos costeros que afecten.

El estudio de la costa como un “sistema” sitúa a la ingeniería costera ante un enorme panorama de investigación, el cual interactúa con todos los elementos geomorfológicos que se puedan considerar, en este sentido, las relaciones entre formas costeras complejas y los procesos que las forman son más fáciles de explicar.

Los elementos del sistema tales como la forma, el tamaño del sedimento, el oleaje o las mareas son llamados variables. Los factores que son externos al sistema son las variables independientes y representan las condiciones de frontera, ya que cuando se alteran pueden provocar cambios en el sistema. Las variables dependientes son las que se encuentran ligadas directamente y dentro del sistema.

Las variables del sistema definen la escala en la que se debe de estudiar, ya que algunos procesos necesitan una escala de tiempo más larga que otros para poder medir sus consecuencias.

Un sistema está integrado por subsistemas, la interrelación de los subsistemas costeros puede ser que abarque algo muy general o bien que se detalle a conciencia cada subsistema así como la relación que existe entre cada uno, tal como se muestra en la Figura II.1

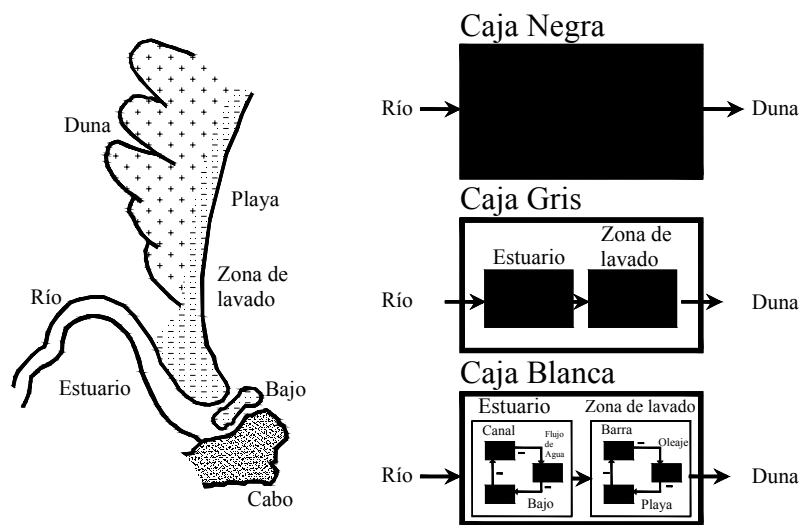


Figura II.1 Subsistemas costeros a detalle

### II.3 Morfodinámica de Playas

La morfodinámica es la rama del estudio de las costas que se encarga de medir el estado de un sistema costero en las dos direcciones principales, una longitud en la que se estudian los cambios en planta y otra transversal en la que se estudian los cambios en el perfil.

#### II.3.1 Forma en Planta

La curvatura en planta que adquiere una playa es producto de los procesos que continuamente actúan sobre ella, el oleaje es el proceso que suministra la mayor energía y por lo tanto es el principal generador de la forma en planta de la playa. Komar (1976) determinó que si existe un oleaje predominante durante un medio-largo plazo, éste proveerá de un gradiente de sedimento longitudinal que generará la forma en el medio-largo plazo. Si llegarán a existir cambios en las condiciones del oleaje, serán notorias las variaciones estacionales que evitarán la consecución del equilibrio de la forma en planta.

El oleaje, al propagarse hacia la playa, sufre los procesos de refracción, difracción, reflexión y fricción de fondo, lo que puede generalizarse a cualquier playa. En planta, se observan dos zonas, una expuesta donde el transporte de sedimento y la evolución de la playa estarán dominados por la incidencia oblicua del oleaje y la corriente inducida y una zona protegida, en donde la difracción actúa además del transporte longitudinal, provocando corrientes que van de la zona expuesta hacia la zona protegida.

Los efectos morfológicos son siempre similares, dando una forma en planta curva, la curva se ha intentado caracterizar en expresiones analíticas. La mayoría asemejan curvas geométricas.

Hsu y Evans (1989) propusieron una ecuación parabólica para determinar la curva de equilibrio estático de una playa en planta (Figura II.3):

$$\frac{R_n}{R_\beta} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta_n} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta_n} \right)^2$$

dónde

$R_n$  radio vector a partir del cual se obtiene la curva parabólica

$R_\beta$  longitud de la línea de control

## Estado del Arte

---

$\beta$  ángulo de oblicuidad del oleaje

$\theta_n$  ángulo de los radios vectores

$C_0, C_1, C_2$  son coeficientes que están en función de la oblicuidad del oleaje:

$$C_2 = \alpha$$

$$C_1 = \beta \cot \beta - 2\alpha$$

$$C_0 = 1 - \beta \cot \beta + \alpha$$

$$\alpha = -2.3833 + 0.2374\beta - 0.0087043\beta^2 + 0.00012836\beta^3 - 6.8815 \times 10^{-5}\beta^4$$

Hsu y Evans indican que en una saliente habrá un punto en donde las olas se difractarán antes de que arriben a la playa; para una playa en equilibrio se satisface que el tiempo que se lleva cualquier ola en viajar la distancia entre el punto de difracción y cualquier punto de la línea de costa, será el mismo y por lo tanto el rompimiento de las olas será simultáneo en la periferia de la playa. La ortogonal del oleaje incidente será normal a la tangente del punto donde la playa comienza a ser recta de una bahía estable. Si el oleaje rompe constantemente en un ángulo pequeño en esta sección de la playa, su ortogonal deberá ser refractada a través de las profundidades que existen y se encuentran alineadas con el punto de inicio de la saliente (Figura II.2). La ola que es refractada a través de la saliente hasta encontrar el punto apropiado de la difracción; el alineamiento de la cresta del oleaje, es normal a esta ortogonal, en el mismo punto de la difracción (Yu y Hsu, 2006).



Figura II.2 Variables de la ecuación parabólica de Hsu y Evans, 1989



### II.3.2 Forma en Perfil

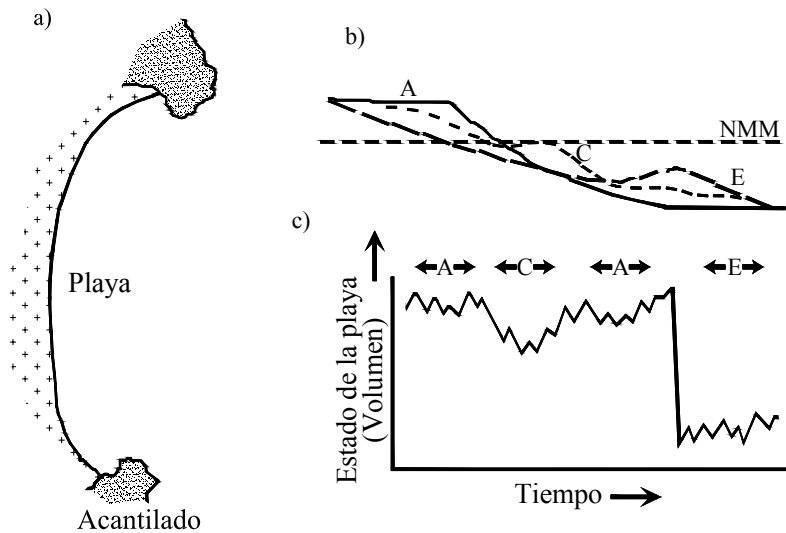
Al igual que el perfil en planta, el perfil transversal es producto de la incidencia del oleaje y de los procesos costeros, se le toma mayor importancia al oleaje debido a que la escala temporal que se liga es sumamente práctica en Ingeniería.

En una playa micromareal, existen cuatro zonas definidas por las características del oleaje, una zona de someramiento, una zona de rotura que puede ser muy ancha, dependiendo de la altura de la ola, una zona de transición y una zona de lavado sobre la cara de la playa. No siempre se presentan todas estas zonas en las playas y su espacio varía a través del tiempo. En una playa macro-mareal la zona de surf algunas veces no existe y la zona de lavado se recorre hacia la parte más alta de la cara de la playa. Masselink y Turner (1999) describieron que las olas pueden romper en diferentes zonas y a lo largo del perfil de la playa, dependiendo del estado de la marea.

Lo más general de la morfodinámica transversal es la descripción de los dos estados finales de una playa, pero siempre en el contexto bidimensional de un perfil, el primero es de un perfil con una pendiente muy inclinada y al que se le puede llamar de *Acreción* y el segundo es de un perfil plano al que se le llama de *Erosión*. En algunas latitudes a estos perfiles se les llama de verano ya que se les asocia con los meses de verano; o de invierno los cuales están asociados a los meses de invierno que es la época cuando se presenta una gran variedad de tormentas.

El perfil de erosión se atribuye a las playas en donde se presenta oleaje de gran contenido energético, se produce una erosión en la parte interna del perfil retrocediendo la línea de costa y transportándose el material mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas, el resultado final es una disminución de la pendiente del perfil.

El perfil de acumulación se produce bajo la acción de un oleaje con bajo contenido energético, generalmente asociado a un oleaje del tipo *swell*; de esta forma el material almacenado en las barras es transportado hacia la costa, reconstruyendo la berma; el resultado final es un aumento en la pendiente de la playa.



**Figura II.3** Perfiles de una Playa. a) Forma en planta. b) Perfil transversal, de Erosión y Acreción. c) Medida de la evolución temporal de una playa, mediante el volumen

Sin embargo, el perfil de una playa puede desarrollar cualquier etapa morfológica independientemente de la estación. Lo que ha provocado que se le llamen a los estados morfológicos de las playas *reflejantes*, *intermedios* y *disipativos*.

Sonu y van Beek (1973) reconocieron seis configuraciones de perfiles, los agruparon en convexos hacia arriba, lineales y convexos hacia abajo, a cada grupo se le puede asociar una barra. A las transiciones de los estados de acreción, se les asoció con un crecimiento o bien de migración de la barra y a las transiciones de estados de erosión, se les relacionó con una destrucción de la barra. Wright (1977) identificó seis tipos de perfiles morfológicos, en circulación, que van de un estado altamente disipativo hasta un perfil reflejante, con pendiente muy pronunciada y una zona de rotura muy corta (Figura II.4). Wright y Short (1983, 1984) concluyeron que la morfología de una playa y su constante cambio, están relacionados con las condiciones climáticas y a la configuración del perfil de la playa.

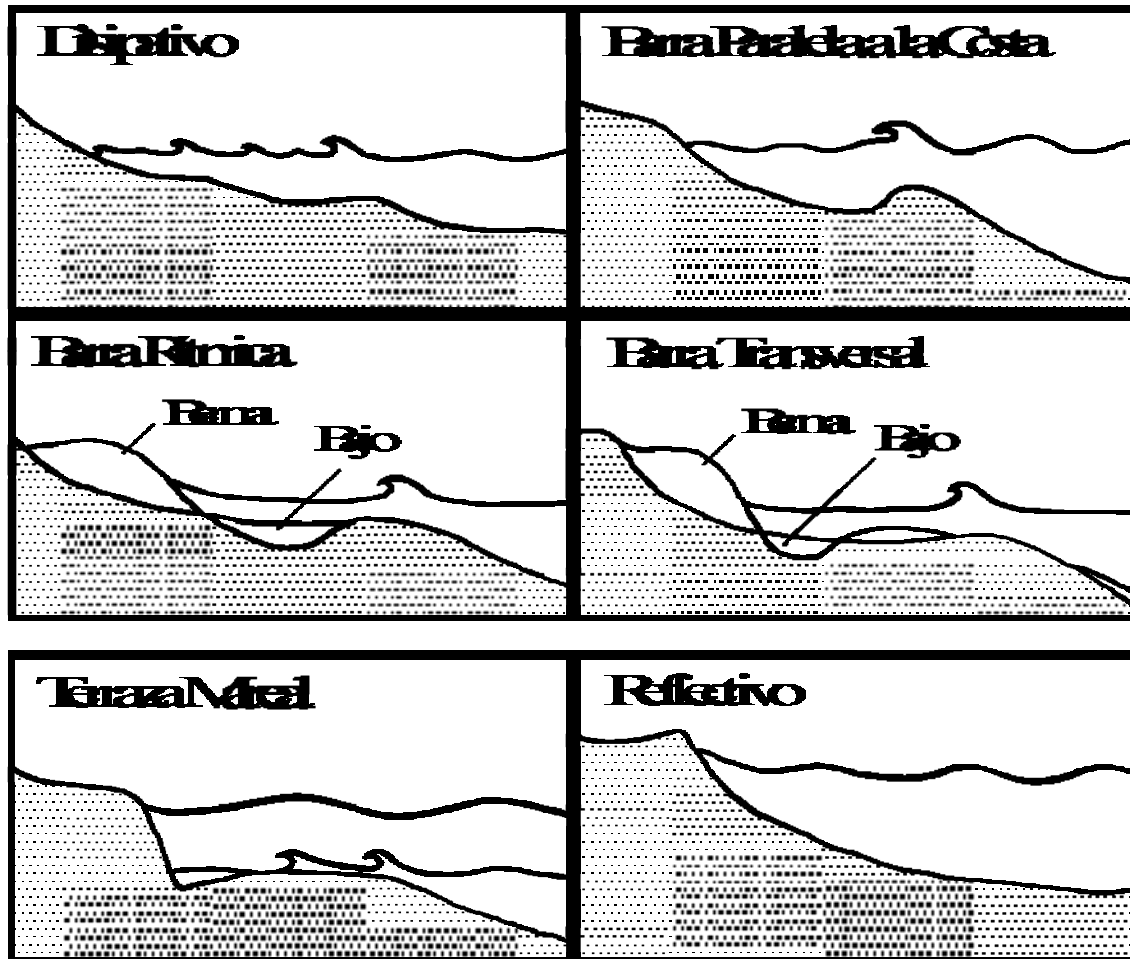


Figura II.4 Morfodinámica de una playa, Wright y Short (1983, 1984)

El grado de disipación de una playa puede ser definido mediante algún parámetro de la Tabla II.1, por ejemplo el factor de surf es función de la amplitud y periodo del oleaje incidente y de la pendiente de la playa, si dicho factor es  $< 2.5$  la playa es de tipo reflejante y si el factor es  $> 20$  la playa es disipativa. El estado de la playa también puede ser definido mediante el parámetro adimensional de caída, propuesto por Dean en 1973, el cual toma en cuenta la rotura del oleaje, el tamaño del sedimento (velocidad de caída) y el periodo del oleaje, en donde si el parámetro adimensional de caída es  $< 1$  la playa es reflejante y si es  $> 6$  la playa es disipativa.

Tabla II.1 Parámetros para definir el grado de disipación de una playa

Parámetro	Expresión	Disipativa	Intermedia	Reflectiva
Coefficiente de Rotura	$B_b = \frac{H_b}{gmT^2}$	>0.068	0.068 – 0.003	< 0.003
Factor de Surf	$\varepsilon = \frac{2\pi a}{gT \tan^2 \beta}$	>20	20.0 – 2.5	< 2.5
Diferencia de Fase	$P = \frac{t}{T}$	>1.0	1.0 – 0.5	< 0.5
Número de Iribarren	$\xi_b = \frac{\tan \beta}{(H_b/L_o)^{0.5}}$	<0.64	0.64 – 5.0	> 0.068
Parámetro adimensional de Velocidad de Caída	$\Omega = \frac{H_b}{Tw_s}$	>6	5.0 – 2.0	< 0.003

$H_b$ , altura de ola antes de la rotura,  $T$ , periodo de la ola,  $L_o$ , Longitud de la ola en aguas profundas,  $a$  amplitud de la ola,  $\beta$ , pendiente de la playa,  $t$ , tiempo que tarda una ola desde que rompe hasta que llega a la cara de la playa,  $m$ , distancia relativa donde rompen las olas,  $w_s$ , velocidad de caída,  $g$ , constante gravitacional = 9.8 m/s<sup>2</sup>,  $\pi$  = 3.14159.

### II.3.2.1 Perfil Transversal de Equilibrio

El perfil de equilibrio es aquel que mantiene constante en una costa específica, el cual está sometido a un clima marítimo fijo.

Existe una hipótesis para idealizar el concepto de perfil de equilibrio de una playa. Esta hipótesis se basa en aceptar las siguientes ideas:

- existe una disipación de energía uniforme, a través de la cara de la playa y que influye directamente sobre la morfología,
- la evolución de la altura de ola en la zona de rotura es lineal,
- no existen variaciones de largo plazo del nivel medio del mar.

- La profundidad ( $h$ ) es una función de la distancia horizontal ( $x$ ), en términos de una constante ( $A$ ) y un exponente ( $m$ ) (Tabla II.2).

Siguiendo la hipótesis de disipación de energía, diversos ajustes de curvas se han realizado con datos batimétricos de la playa; por ejemplo Bruun (1954, 1962) ajustó una batimetría de la costa oeste de Dinamarca, un estudio más profundo y más detallado fue realizado por Dean (1977, 1991) a lo largo de la costa del Golfo de México sobre 500 perfiles. El perfil de equilibrio es un promedio estadístico de las variaciones del perfil de la playa en un tiempo determinado es:

$$h = Ax^m$$

Bruun supuso una disipación de energía constante por unidad de área y derivó un exponente “ $m$ ” de 0.67, en cambio Dean examinó la disipación de energía en términos de volumen de agua e indicó un valor del exponente “ $m$ ” de 0.4.

El ajuste de la curva es dependiente del sitio, por lo tanto es única y depende del factor de forma “ $A$ ” que va ligado con la velocidad de caída del sedimento. Algunos autores (Hardisty (1990a), Kotvojs y Cowell (1991)) proponen ajustar diversas curvas a lo largo del perfil (zona de peralte y zona de transición), con el objeto de tomar en cuenta las características del sedimento a lo largo del perfil.

## Estado del Arte

---

En la Tabla II.2, se presentan los principales modelos de perfil de equilibrio:

**Tabla II.2 Modelos de Perfil de Equilibrio**

Autor	Expresión del Modelo	Límites de A	Límites de m
Bruun (1954)	$y = Ax^m$	$0.002 < A < 6.31$	$0.1 < m < 1.4$
Dean (1977)	$y = Ax^{2/3}$	$0 < A < 0.3$	-
Hughes y Chiu (1978)	$y = Ax^{2/3}$	-	-
Read y Shaw (1979)	$y = Ax^{0.98}$	-	-
Bowen (1989)	$y = Ax^{2/3}$ y $y = Ax^{2/5}$	-	-
Sayao (1982)	$y = Ax^{0.633}$	-	-
Vellinga (1983)	$y = Ax^{0.78}$	-	-
Mc Dougal y Husperth (1983)	$y = Ax^{2/3}$	-	-
Dean (1991)	$y = \frac{h}{m} + \frac{1}{A^{2/3}} h^{2/3}$	-	-

$h$  , profundidad en m,  $m$  , distancia relativa donde rompen las olas en m,

---

## Estado del Arte

---

En la Tabla II.3 , se presentan los principales modelos para estimar el parámetro  $A$ :

**Tabla II.3 Expresiones para estimar el factor de forma  $A$**

Autor	Expresión	Límites $D_{50}$ mm
Moore (1982)	$A = 0.51w^{0.44}$	-
Bowen (1980)	$A = w^{2/3}$	-
Kriebel (1991)	$A = 1.05w^{2/3}$	-
Hanson y Kraus (1989)a	$A = 0.41D_{50}^{0.94}$	$D_{50} < 0.4$
Hanson y Kraus (1989)b	$A = 0.23D_{50}^{0.32}$	$0.4 < D_{50} < 10.0$
Hanson y Kraus (1989)c	$A = 0.23D_{50}^{0.28}$	$10.0 < D_{50} < 40.0$
Hanson y Kraus (1989)d	$A = 0.46D_{50}^{0.11}$	$400 < D_{50}$

$W$  , velocidad de caída m/s

---

## Estado del Arte

En la Tabla II.4, se presentan los modelos para estimar la velocidad de caída de arenas:

**Tabla II.4 Expresiones para estimar la velocidad de caída  $w$**

Autor	Expresión	Límites $D_*$ y $D$ en mm
	$w = 1.1 \times 10^6 D^2$	$D < 0.1$
Expresión simple para arenas con densidad $\rho = 2,650.0 \text{ kg/m}^3$	$w = 273 D^{1.1}$	$0.1 < D < 1.0$
	$w = 4.36 D^{0.5}$	$D > 1.0$
	$w = \frac{\nu D_*^3}{18 D_{50}}$	$D_*^3 < 39$
	$w = \frac{\nu D_*^{2.1}}{6 D_{50}}$	$0.4 < D_*^3 < 10,000$
Hallermeier	$w = \frac{1.05 \nu D_*^{1.5}}{D_{50}}$	$10,000 < D_*^3 < 1,000,000$
	$w = \frac{\nu D_*^3}{18 D_{50}}$	$D_*^3 < 16,187$
	$w = \frac{10\nu}{D_{50}} \left[ (1 + 0.01 D_*^3)^{0.5} - 1 \right]$	$16,187 < D_*^3 < 16,187$
Van Rijn	$w = \frac{1.1 \nu D_*^{1.5}}{D_{50}}$	$D_*^3 > 16,187$
Soulsby	$w = \frac{\nu}{D_{50}} \left[ (10.36^2 + 1.049 D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right]$	-

$$D_* = \left[ \frac{g(S-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50}, \quad (D_{50} \text{ en m}), \quad \nu, \text{ viscosidad cinemática en m}^2/\text{s}, \quad S = \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \text{ densidad relativa de la arena, } \gamma_m$$

densidad de la arena en  $\text{kg/m}^3$ ,  $\gamma_w$  densidad de el agua en  $\text{kg/m}^3$



### II.4 Efectos del nivel freático sobre el perfil de la playa

La relación entre el nivel freático y la erosión de una playa es actualmente el objetivo de muchas investigaciones. En playas sin la influencia del nivel freático es obvio que se deposite arena cerca del límite del máximo ascenso del oleaje “*run up*”, porque el agua se infiltra dentro de ese límite. Este es el caso de un nivel freático bajo, la principal suposición es que hay una infiltración y no una exfiltración a lo largo de la playa. En el caso de una exfiltración en dirección mar la playa es más vulnerable a la erosión.

Bagnold (1940) realizó experimentos en laboratorio, sus resultados demostraron que cuando no había suficiente infiltración en los límites del *run up*, el flujo hacia atrás del oleaje era más energético. Bagnold abordó un análisis sobre los procesos de erosión y acreción a lo largo de la cara de la playa y destaca que cuando hay infiltración existe acreción y cuando hay exfiltración predomina la erosión; este trabajo ha servido como base de las investigaciones posteriores a 1940.

Emery y Foster (1948) asociaron la elevación del nivel freático con el estado de marea que se presentaba, al realizar sus estudios notaron que esta relación no era tan simple. Observaron que los niveles del nivel freático de una playa de arena disminuían por abajo de la intersección de la pendiente de la playa y del máximo ascenso del oleaje y que la disminución incrementaba hacia el lado tierra sobre la zona de lavado.

Grant (1948) observó que la elevación del nivel freático tiene un importante vínculo con los fenómenos de erosión y acreción que se presentan sobre la playa. Sus observaciones incluían descripciones de las variaciones temporales del perfil del nivel freático. De esos estudios explicaron que la amplitud de las fluctuaciones del nivel freático en un ciclo semidiurno disminuyen hacia la zona de tierra, después del punto de intersección entre el nivel de mar y la pendiente de la playa.

Ericksen en 1970, examinó el nivel freático en dos playas de Nueva Zelanda, una de arena (grano fino) y de material fino y grueso. Observó que el nivel freático se comportaba de una manera en las playas de material fino y de otra en playas de material grueso; el nivel freático más grande que Ericksen observó fue cuando existía un incremento en el nivel del mar, mientras que cuando había un nivel de mar bajo el nivel freático disminuía al interior de la playa. Mostró que la elevación del nivel freático era asimétrica respecto a la frecuencia de las mareas y además que estaba fuera de fase; él sugirió que la asimetría era

resultado de las diferencias en la distancia que existe en la zona de lavado cuando se presentaban las bajamares y pleamares. Cuando la marea se incrementaba, las olas subían más sobre la zona de lavado, donde la arena no está saturada por lo tanto la recarga del nivel freático se incrementa proporcionalmente a medida que las olas inundan el área de la zona de lavado. Cuando se presenta la bajamar el nivel freático y la frecuencia de inundación de la zona no saturada disminuye, hasta puede convertirse en un efluente.

Los trabajos relacionados con el modelado matemático se remontan a 1971 (Dominick et al. 1971, Harrison et al. 1971; Fang et al. 1972; Chappell 1978). Estos modelos se basan en la observación de las fluctuaciones del nivel freático debido a la variación de las mareas, que en algunos estudios se les trató como una ola, sin considerar que en diferentes zonas las componentes de las mareas cambian.

Machemehl, French y Huang (1975), realizaron un experimento en un tanque de olas en el que manipulaban el nivel freático de una playa mediante tubería de PVC (polivinilo de cloruro), instalada paralela a la playa. El objetivo del estudio fue estudiar los efectos de acreción sobre la cara de la playa al drenar el nivel freático.

Los trabajos realizados en décadas posteriores a 1970 contribuyeron a la descripción de la variación temporal y espacial de la geometría del nivel freático dentro de la playa. Las descripciones más completas de las oscilaciones del nivel freático son para las más altas (oleaje incidente) y bajas frecuencias (mareas); las conclusiones a manera de resumen se detallan a continuación.

- El nivel freático responde a las fluctuaciones de las mareas de manera que las fluctuaciones de nivel freático atrás de la cara de la playa son proporcionales a la amplitud de la marea (Ericksen 1970; Dominick et al. 1971; Harrison et al. 1971).
- La marea influye en las oscilaciones del nivel freático, como los cambios de fase y amplitud según se propagan tierra adentro sobre la playa (Emery y Foster 1948; Ericksen 1970; Harrison et al. 1971).
- En contraste con las curvas de mar abierto, las curvas del nivel freático a lo largo del perfil de playa son marcadamente asimétricas. La diferencia entre la marea alta y el nivel freático alto es relativamente pequeña, en comparación con la diferencia entre la marea baja y el nivel freático bajo. (Ericksen 1970; Dominick et al. 1971).

En la década de 1990 se tomó mayor interés en los problemas que se suscitaban en las playas, esto en parte se debe al incremento del nivel del mar, además de que el sistema playero resulta muy atractivo para los desarrollos turísticos. Las principales universidades del mundo y sobre todo aquellas que tienen una gran relación con la costa se dispusieron a estudiar estos cambios que se presentaban en la morfología de la playa.

La idea de estabilizar una playa mediante la variación del nivel freático ha hecho que se desarrollen sistemas comerciales de emergencia con el fin de atenuar la erosión. Turner y Leatherman (1997) crearon un sistema de bombeo que abatía el nivel freático, los efectos de este sistema fueron positivos, aunque en presencia de tormentas se llegan a perder este tipo de sistemas.

Trabajos de laboratorio de Dean (1992), Turner (1993b) y Nielsen et al (1998) han descrito las fluctuaciones del nivel freático y lo que implica en la zona de lavado del perfil de una playa que el nivel freático se encuentre por arriba del nivel medio del mar o por debajo.

### II.5 Escalas temporales y espaciales

El estudio de las costas abarca un rango muy amplio tanto en la escala espacial como temporal. En el caso de la escala espacial, varía según el estudio y las zonas de interés, dependiendo si se trata de un estuario, un delta, una playa, una berma o bien un cañón submarino, etc. Lo relevante es que en cada zona hay diferentes objetivos de estudio, tal es el caso del transporte de sedimento, la interacción del nivel freático, la zona y forma de la rotura, por mencionar algunos; en este sentido la topografía, batimetría y el sedimento son de suma importancia, algunos de estos factores cambian a lo largo de varios kilómetros y en otros casos sólo en metros.

Existe una variedad de escalas de tiempo relacionadas a la geomorfología costera. Los geólogos la ligan con los eventos que ocurrieron en el tiempo geológico, por ejemplo, la topografía de una costa rocosa pudo ser originada durante eventos que ocurrieron hace varios millones de años, en el terciario o más recientemente; otras costas han sido formadas durante los constantes cambios de clima que acontecieron en el cuaternario. Para fines ingenieriles, cuando se pretende hacer una estimación de cuánto se ha erosionado o crecido la línea de costa debido a los eventos incidentes de oleaje, la escala de tiempo se hace más

reducida en comparación con una geológica, ya que la observación del movimiento de sedimento ocurre en tiempos cortos en comparación con los tiempos geológicos.

La geomorfología costera necesita de un profundo estudio del paisaje costero, en cada una de sus escalas y puede ser apropiado considerar más escalas de tiempo para aprovechar todos los recursos naturales que puede proporcionar la costa.

Para los distintos procesos que ocurren en la costa se han realizado ajustes en las escalas de tiempo de acuerdo con los estudios y observaciones. Se reconocen las escalas relativas como megaescala, mesoescala y microescala. Cuando se estudia el movimiento de la línea de costa, se llega a decir que se va desde miles de años, días o minutos según la escala relativa. En el caso de las dunas se considera la macroescala (mayor a una década), mesoescala (mayor de un mes, hasta una década) y microescala (de segundos, hasta un mes) (Sherman, 1995).

### **II.5.1 Función de las escalas del tiempo**

Existen muchas ventajas al estudiar las costas con diferentes escalas de tiempo, Cowell y Thom (1994) describieron una secuencia de escalas temporales y espaciales. La escala más pequeña se trata de la escala instantánea, la cual aplica a la mecánica de fluidos gobernada por las leyes de la física, pero ocurriendo estocásticamente en esta escala entran la ocurrencia del oleaje y las mareas.

La escala de tiempo llamada eventual está ligada a los procesos que son recurrentes, tales como los ciclos de mareas, las tormentas, los ciclos de inundación y variaciones temporales; en esta escala eventual se les da una mayor importancia a los eventos que tienen un alto contenido energético (Wolman y Miller, 1960) y que representen una perturbación para la morfología de la costa, esto es porque este tipo de eventos exceden los umbrales que pueden lograr los eventos de una regularidad constante. Es común de esta escala los estados de mar.

El término de escala ingenieril se refiere a aquellos eventos que necesitan de varias décadas y que a la vez son resultado de una combinación de eventos extremos a los que se le da mayor importancia.



## CAPÍTULO III

### **Oleaje**



### III. Oleaje

La costa debe su forma a una gran variedad de procesos. En ocasiones se considera que algunos procesos actúan individualmente; en la práctica es bien sabido que la costa debe su forma a la gran cantidad de procesos que actúan de forma simultánea o en secuencia, sin embargo, el oleaje es el proceso que normalmente predomina sobre otros.

El movimiento de sedimento es un factor primario que controla la forma de la costa, por lo tanto, es de suma importancia tener conocimiento de los procesos relacionados con el transporte de sedimentos y sus repercusiones en los efectos acumulados de erosión o depositación.

El oleaje incidente es el proceso que suministra la mayor cantidad de energía sobre la costa y es común observar que cuando las olas llegan a la costa mueven el sedimento, entonces el periodo (olas infragravatorias o tormentas) tiene gran peso en la modificación de la costa; los periodos más pequeños son dominados por la tensión superficial, los intermedios son dominados por la gravedad y los de periodo más largo son gobernados por la aceleración de Coriolis (Tabla III.1).

En la naturaleza es fácil observar que en la superficie del agua, por ejemplo de un lago o del mar, existen perturbaciones generadas por fuerzas debidas al viento y otros fenómenos oceanográficos, las cuales se pueden idealizar como la superposición de formas simples. Las características más usuales para definir una ola son: periodo, amplitud y celeridad. En Ingeniería Marítima, existen diversas formas para medir a la amplitud y al periodo; cuando se abordan problemas asociados con la ingeniería de playas se acostumbra hacerlo en metros y segundos, en la ingeniería de puertos se hace normalmente en minutos y cuando son mareas las horas resultan ser muy convenientes.

Las ondas se clasifican según el tipo de movimiento, con respecto a la dirección de propagación, en ondas transversales y longitudinales; cuando se trata de las ondas de mar se pretenden configurar de acuerdo a su superficie y el movimiento de las partículas del fluido.

El oleaje es el resultado de perturbaciones inducidas por la acción de fuerzas que se presentan en la naturaleza sobre la superficie del mar, durante un periodo de tiempo, y que



## Oleaje

---

dan como resultado una serie de ondas de forma compleja. La más importante de estas fuerzas es la acción del viento, que puede crear olas con periodos de 0.1 s a 20 s. Terremotos y deslizamientos de tierras o de glaciares, son otras fuerzas generadoras de oleaje, además de la influencia del sol y de la luna que crean a las mareas astronómicas (Figura III.1).

**Tabla III.1 Clasificación de una ola, según fuerza regeneradora y restauradora**

Nombre	Periodo T s	Longitud L m	Altura H m	Fuerza Generadora	Fuerza Restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y Gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	---	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

---

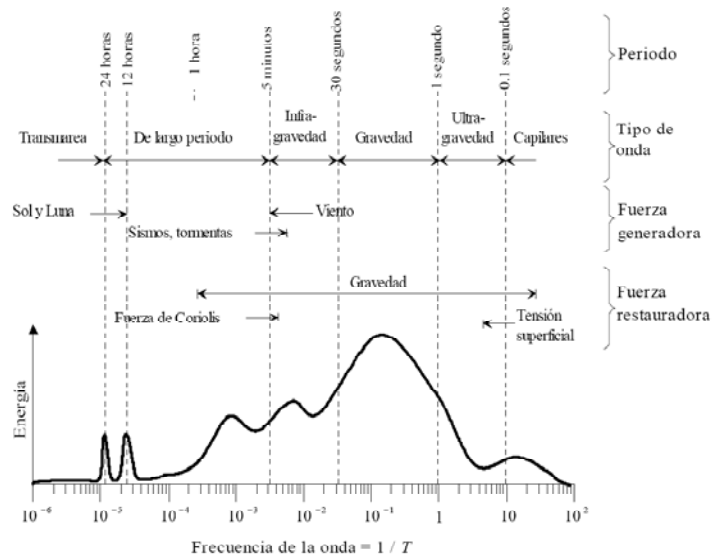


Figura III.1 Período-Energía de las ondas. (Silva, *et al.* 2001)

### III.1 Clasificación del oleaje

La transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar crea al oleaje. El perfil del oleaje puede ser totalmente aleatorio, porque se forma de periodos y alturas de ola diferentes en todo momento, que hacen que la superficie libre del mar no tenga un patrón de forma, se ha optado por definir dos tipos de oleaje extremos según su maduración (*Sea* y *Swell*).

El oleaje tipo *Sea* o **local** es generado mar adentro, su forma es totalmente irregular, no se puede definir fácilmente periodo y altura de una onda, la dirección del oleaje es en todas direcciones, en ocasiones se puede observar que el oleaje transita de la zona de generación hacia alguna parte del océano, pero también en ocasiones el oleaje pareciera que sólo fluctúa de arriba hacia abajo sin que viaje hacia a otra zona.

El oleaje tipo *Swell* o **distante** es aquel que ha salido de la zona de generación, tiene un estado ordenado, debido a que las olas de periodos muy semejantes tienden a reagruparse, en estos se observa una larga cresta de onda; el perfil del oleaje presenta cierta periodicidad y simetría y es capaz de transmitirse en distancias considerables.

Debido a la zona donde se presenta este tipo de oleaje, la batimetría influye sobre su forma haciendo que las ondas se propaguen paralelamente a la batimetría, debido al fenómeno de refracción es posible observar un periodo y simetría a la incidencia del oleaje sobre la costa.



**Figura III.2 Oleaje Tipo Swell y oleaje tipo Sea**

### III.2 Transformaciones del oleaje

El oleaje que proviene de aguas profundas sufre ciertas transformaciones cuando arriba a aguas poco profundas, entre ellas cabe destacar la refracción, someramiento, difracción, reflexión, la reducción de velocidad y la disipación de energía que se transmite para el movimiento de sedimento.

#### III.2.1 Refracción

El proceso de refracción se presenta cuando el oleaje viaja de aguas profundas a profundidades más someras con un ángulo diferente a la orientación de la costa. Este fenómeno ocasiona que el frente del oleaje tienda a alinearse con la orientación de los contornos batimétricos del fondo a medida que la profundidad decrece. En este proceso la velocidad con la que viaja la onda se reduce y las crestas de las ondas tienden a alinearse a los contornos batimétricos.

Para esquematizar el fenómeno de refracción se dibujan rayos ortogonales a las crestas de la onda como si fueran el camino de “objetos que son llevados hacia la costa”, en salientes los rayos convergen lo cual indica una mayor concentración de energía y un incremento de la altura de ola.

En una bahía los rayos divergen, esto indica que existe dispersión de energía.

#### III.2.2 Difracción

El proceso de difracción se presenta cuando en su propagación el oleaje se encuentra con un obstáculo sumergido o emergido, ya que parte de su energía se transferirá lateralmente

de zonas más energéticas hacia la zona protegida con menor energía. Es decir, este fenómeno se refiere a la difusión de energía hacia las zonas de sombra.

### III.2.3 Reflexión

El estudio de la reflexión es tan importante como los fenómenos antes mencionados y se puede definir como la alteración de las características del oleaje al chocar con un obstáculo natural o artificial.

En el estudio de la reflexión se pueden encontrar dos extremos, el primero cuando el oleaje se propaga sobre una pendiente tendida en un medio permeable, disipa su energía gradualmente, y por ende la reflexión es propiamente despreciable; el segundo caso es cuando el oleaje encuentra una pared vertical impermeable, la reflexión es casi completa (máxima), sin procesos de disipación, rotura ni transmisión, se tiene una onda estacionaria. Entre estos dos extremos existen una gran variedad de situaciones intermedias.

La reflexión tiene una gran influencia en muchos procesos, como en las características del oleaje incidente, el cual se ve alterado como una consecuencia de la reflexión, manifestándose en un incremento en la altura de onda; la zona de rompiente se ve alterada, lo cual se manifiesta en un desplazamiento de dicha zona originando con ello cambios de la zona de disipación; propiciando con ello cambios en el patrón de las corrientes y en el transporte de sedimentos.

Para evaluar el efecto de la reflexión y estimar que tan disipativa es una estructura se utiliza el concepto de coeficiente de reflexión:

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \#$$

El coeficiente de reflexión muestra la proporción entre la altura de la ola incidente y la reflejada, obtenidas de la separación del oleaje incidente y reflejado de una señal de oleaje en el dominio del tiempo o la frecuencia.

### III.2.4 Rotura

Antes de la zona de rompientes, la disipación debida a la fricción en el fondo es el proceso principal de atenuación energética. La disipación de energía ocurre principalmente en aguas poco profundas e induce una reducción de la altura de ola. Los efectos de fricción varían

con el tipo de material en el fondo, así como de las características del oleaje, profundidad relativa y distancia de recorrido del oleaje, entre otros. Cuando las olas se propagan a través de una zona relativamente amplia y poco profunda su energía es disipada de forma importante. La disipación puede ser causada por el incremento de fricción en el fondo, la infiltración en los intersticios de estructuras porosas o fondos arenosos, el movimiento de fondos marinos cohesivos y por la resistencia inducida por la vegetación. Los mecanismos de disipación pueden provocar una disminución en la altura de las olas, mayor que la estimada con métodos convencionales para fondos impermeables o arenosos. Los métodos disponibles se basan en el análisis de los parámetros que tienen una amplia gama de valores y puede ser de difícil estimación de manera fiable. El enfoque general para cuantificar la disipación puede implicar el uso de datos empíricos, posiblemente recogidos en el lugar de estudio o disponibles en un sitio similar. En la mayoría de situaciones, la cantidad de disipación será pequeña, y el esfuerzo necesario para analizar los procesos de disipación puede ser grande.

A partir de la zona de rompientes los efectos turbulentos dominan el proceso de disipación de energía y los efectos de fricción y percolación son menos importantes.

La rotura del oleaje es quizá el fenómeno más espectacular que se produce en la cercanía de la costa. Es en la zona de rompientes donde se produce la mayoría de los procesos litorales, y la mayor parte de los que se deben al oleaje, se producen debido a su rotura. En términos físicos, una ola en rotura es una ola cuya amplitud alcanza un nivel crítico, a partir del cual se desencadenan súbitamente ciertos procesos que producen una gran pérdida de energía. Una gran parte de los modelos que describen el comportamiento del oleaje no resultan válidos a partir de rotura, puesto que asumen un comportamiento lineal.

El tipo de rotura que resulta más familiar es el que se observa junto a la costa. Debido a los procesos de someramiento, las olas se peraltan hasta que las crestas se desestabilizan, a causa de la componente horizontal de su velocidad, y caen (según el tipo de rotura). La rotura de oleaje puede ocurrir en cualquier lugar en que se den las circunstancias pertinentes, incluso en alta mar, aunque es mucho más común en las playas u otros lugares de profundidad somera.

La rotura es un fenómeno que se caracteriza por una alta proporción de turbulencia libre y una entrada de aire asociada, produciéndose además una alta velocidad de disipación de

energía. Las ondas así generadas no son oscilatorias sino que más bien son traslacionales. Existen distintas definiciones del fenómeno físico de la rotura. Según (Le Méhauté, 1976), la rotura ocurre cuando se presenta una de las siguientes condiciones:

- La velocidad de las partículas de la cresta sobrepasa la celeridad de la onda.
- La presión de la superficie libre, dada por la ecuación de Bernoulli, es incompatible con la presión atmosférica.
- La aceleración de las partículas en la cresta tiende a separarlas de la superficie de la masa de agua.
- La superficie libre se pone vertical.

La forma más común de establecer cuándo una ola rompe o no, es por medio de la evaluación del cociente entre la altura de ola y la profundidad. Si este cociente es igual o mayor a 0.78 la ola rompe (McCowan, 1894); sin embargo en playas de pendiente grande este valor puede llegar hasta 1.2 ó bien en pendientes muy suaves y casi planas el valor puede disminuir hasta 0.6 (Galvin, 1972).

La rotura es la responsable de la transformación y organización del movimiento del oleaje en la zona del litoral, lo que origina alteraciones en los perfiles de las playas y del fondo marino; ya que al presentarse la rotura del oleaje, por los efectos turbulentos, se favorece la suspensión del sedimento y consecuentemente su movimiento. Además, dicha transformación del oleaje genera un gradiente energético que se traduce en la generación de corrientes litorales, las cuales son en buena medida las responsables de la conformación de las playas.

En las solicitudes que genera el oleaje sobre las estructuras, el tipo de rotura que se presenta en el talud tiene un rol importante, dependiendo del tipo de rotura la extracción de las piezas del manto principal y subsecuentemente de las capas secundarias se va incrementando, hasta que alcanza una condición de equilibrio, en la cual el movimiento de las piezas se reduce al mínimo. En aguas someras, la rotura puede ser un factor limitante a la hora de determinar la altura de ola de diseño de estructuras marítimas, como, por ejemplo, en los diques en talud.

## Oleaje

---

Iversen (1952), Patrik y Wiegel (1954) y Galván (1958), propusieron cuatro tipos de rotura que se describen a continuación:

- **Descrestamiento (Spilling).** Aparece espuma, burbujas y turbulencias en la cresta de la ola y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se descresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala por el frente de la onda.
- **Voluta (Plunging).** La mayor parte del frente de la ola adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la onda originando un salpición de agua.
- **Colapso (Collapsing).** La parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta pero truncada, ya que el punto de enfrente, desde donde la ola se voltea o se desmorona, está adelante y por debajo de la cresta de la ola.
- **Oscilación (Surging).** El frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia.

Iribarren y Nogales (1949) hallaron empíricamente que el parámetro adimensional  $I_r$  juega un papel importante en la rotura del oleaje. Los tipos de rompiente y su valor asociado de número de Iribarren para un talud impermeable se presentan en la Tabla III.2.

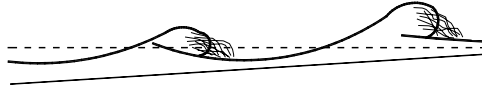
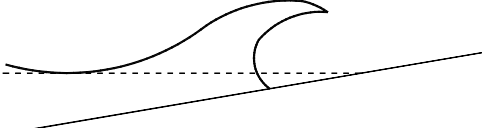
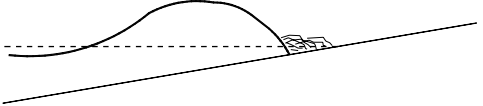
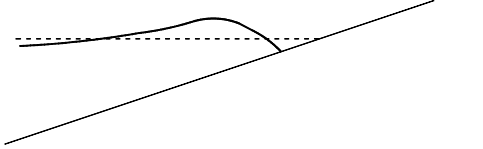
Esquema	Nombre	Parámetro
	Descrestamiento	$Ir < 0.5$
	Voluta	$0.5 < Ir < 3$
	Colapso	$Ir \approx 3.0 - 3.5$
	Oscilación	$Ir > 3.5$

Tabla III.2 Tipos de rotura sobre taludes impermeables

### III.3 Características del oleaje

Para una descripción rápida y sencilla, se puede caracterizar al oleaje de acuerdo a su periodo (T), longitud (L), celeridad (C), profundidad (h) y altura de ola (H).

La altura de ola es definida como la distancia vertical entre la cresta y el valle de una ola, las unidades son en metros m y es simbolizada por la letra H, la  $H_{\infty}$  se refiere a la altura de ola en aguas profundas.

El periodo se define como el intervalo de tiempo de ocurrencia entre dos olas, con respecto a un punto de referencia, se simboliza por la letra T, sus unidades son en segundos s.

La longitud de ola es definida como la distancia horizontal entre dos puntos semejantes de un tren de olas consecutivo, es simbolizado por la letra L y tiene unidades en metros m,  $L_{\infty}$  se refiere a la longitud de ola en aguas profundas.

La celeridad de la ola es definida como la distancia horizontal recorrida, por unidad de tiempo por una ola, es llamada celeridad de fase y es simbolizada por la letra C, con



unidades en metros sobre segundo m/s,  $C_\infty$  se refiere al valor aguas profundas, por definición la celeridad de fase es:

$$C = \frac{L}{T}$$

La celeridad de fase es mayor a la velocidad de transmisión de energía, comúnmente llamada celeridad de grupo  $C_g$ . Las celeridades de grupo y fase son relacionadas por definición por la expresión:

$$C_g = C * n$$

En donde  $n$  es un coeficiente de proporcionalidad, el cual varía de  $n=0.5$  en aguas profundas a  $n=1.0$  en aguas poco profundas.

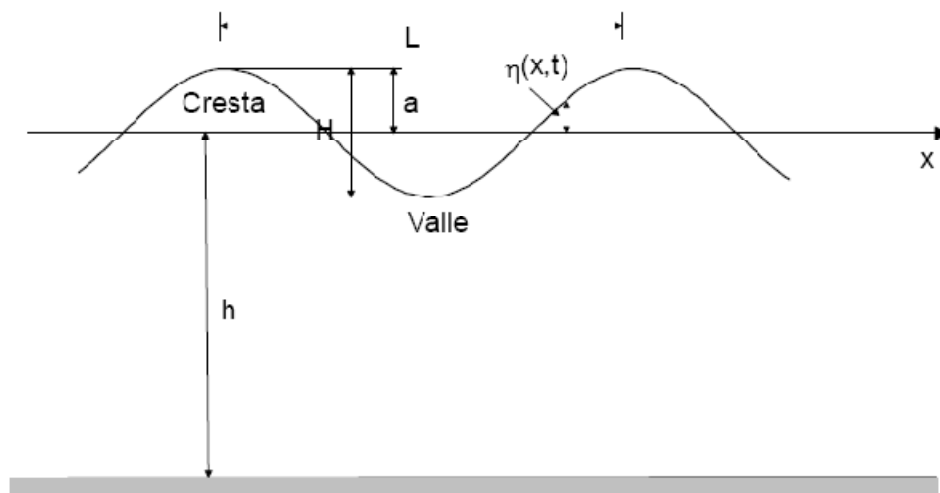


Figura III.3 Características de una onda

### III.4 Fuentes de datos de señales de oleaje

Existen muchas maneras de obtener datos de series temporales del oleaje, lo más común es que se realice a través de equipos que registran la variación de la superficie libre del agua de forma directa o indirecta. El análisis de las señales digitales que son almacenadas permiten caracterizar al oleaje a través de modelos estadísticos o analíticos. Cabe señalar que a grandes rasgos las fuentes de datos más comunes pueden ser de los siguientes tipos:

#### Instrumental directo

- Medidores de resistencia (sensores de nivel)

- Boyas
- Equipos acústicos (hidrófonos)
- Sensores de presión

### No instrumental o instrumental directo

- Equipos ópticos (cámaras de video y satelitales)
- Datos visuales (medidos por barcos en ruta)
- Retro-análisis o predicción basados en información de datos meteorológicos (p.e. a través de modelos paramétricos y de tercera generación como el WAM, *wave action model*).

### III.4.1 Análisis de señales de oleaje

Existen dos tipos de análisis de señales: uno que se refiere al dominio del tiempo y otro en el dominio de la frecuencia. La muestra se obtiene de registros de instrumentos directos o indirectos que registran la variación temporal de la superficie libre y que se colocan estratégicamente, ya sea en laboratorio o en campo.

En primer término se considera un análisis estadístico de la muestra, sin embargo es conveniente seguir la metodología que propone Silva (2005):

#### 1. Corrección del nivel medio

En algunos casos los registros tienen la influencia de ondas largas y en ocasiones llega a ser muy grande su influencia sobre el nivel medio del registro. Por esta razón es necesario que se realice dicha corrección con el fin de evitar cualquier distorsión no deseada.

#### 2. Discretización de la señal

Una vez corregido el nivel medio, es necesario calcular las alturas de ola y periodos individuales, para este propósito se pueden utilizar cualquiera de los siguientes métodos:

- Método de pasos ascendentes por cero
- Método de pasos descendentes por cero
- Método de crestas

- Método de valles
3. Evaluación de parámetros y direcciones orbitales

La altura de ola media, la máxima altura de ola y la altura de ola significativa basada en el promedio del 33 por ciento de las máximas alturas de ola, lo mismo para el caso del periodo.

4. Determinación de la dirección del oleaje

Para realizar un análisis espectral se toma en cuenta el estudio del espectro (o espectro de energía) y sus propiedades en el dominio de la frecuencia y relaciona la distribución de energía del oleaje con la función de frecuencia de una señal.

### III.5 Teorías del Oleaje

A través de diversas teorías es posible evaluar tanto la cinemática como la dinámica del oleaje. Inicialmente a una ola se le asemejaba a una onda trocoidal (Gerstner), con el tiempo Airy consideró que una ola tiene una forma sinusoidal con un movimiento armónico. La teoría de Airy no toma en cuenta los términos de segundo orden o de orden mayor, es por esto que se le llama también teoría lineal. Stokes retomó la teoría de Airy pero incorporó los términos de segundo y de orden mayor. La existencia de una onda solitaria con una sola cresta que se propaga sin cambio de forma en aguas someras, fue descubierta por Russell; su descripción teórica fue dada por Boussinesq. Más tarde, Korteweg y De Vries derivaron una teoría de olas periódicas permanentes de amplitud finita en aguas someras, la cual se conoce hoy en día como la teoría Cnoidal de oleaje. No obstante el avance tanto en los desarrollos analíticos como numéricos, a la fecha la teoría lineal es la herramienta más utilizada con fines de aplicación a casos prácticos en la ingeniería. En la Tabla III.3 se presentan las expresiones que representan los parámetros más importantes de la teoría lineal.

Tabla III.3 Parámetros ingenieriles para clasificar una ola según la teoría lineal

Parámetro	Aguas Profundas ( $h/L > 0.25$ )	Aguas Intermedias ( $0.25 > h/L > 0.05$ )	Aguas Poco Profundas ( $h/L < 0.05$ )
Celeridad de la onda (C)	$C = \frac{gT}{2\pi}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$
Longitud de onda (L)	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$	$L = T\sqrt{gh}$
Celeridad de Grupo	$C_g = \frac{C}{2}$	$C_g = nC = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$	$C_g = C = \sqrt{gh}$
Velocidad de las Partículas Horizontal	$u = a\sigma e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{agk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$	$u = a\sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \sigma t)$
Vertical	$w = a\sigma e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$w = \frac{agk}{\sigma} \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$	$w = a\sigma \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \sin(kx - \sigma t)$
Aceleración de las Partículas Horizontal	$a_x = a\sigma^2 e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$a_x = agk \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$	$a_x = a\sigma\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$a_z = -a\sigma^2 e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$a_z = -agk \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$	$a_z = -a\sigma^2 \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de las Partículas Horizontal	$\zeta = -ae^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$\zeta = -a \frac{gk}{\sigma^2} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$	$\zeta = -a\sigma\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$\xi = ae^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$\xi = a \frac{gk}{\sigma^2} \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$	$\xi = a \left( 1 + \frac{z}{h} \right) \cos(kx - \sigma t)$
Presión Total (Hidrostática+Dinámica)	$p = -\rho gz + \rho g\eta e^{kz}$	$p = \rho gz + \rho g \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$	$p = \rho gz + \rho g\eta$

## Oleaje

---

$$\text{Flujo de Energía} \quad \bar{F} = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{1}{2} C \quad \bar{F} = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \right] \quad \bar{F} = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \sqrt{gh}$$

$H$ , altura de ola,  $T$ , periodo de la ola,  $a$  amplitud de la ola,  $g$ , constante gravitacional = 9.8 m/s<sup>2</sup>,  $\pi = 3.1429$ .

---

## CAPÍTULO IV

# Metodología



### IV. Metodología

La dinámica del nivel freático y la salinidad de los acuíferos que están cercanos al océano se ven afectados por las mareas y las olas, sobre todo cuando los acuíferos son usados para suministrar agua para consumo.

Cuando se combinan las mareas con el ascenso (*run up*) del oleaje en las playas, se produce un incremento en el nivel freático por encima del Nivel Medio del Mar ( $\eta^+$ ).

En barreras costeras muy estrechas el nivel freático por lluvia es pequeño en comparación con el nivel freático por el *run up* de las olas. En ocasiones, la sobreelevación del nivel freático produce un flujo del lado mar hacia tierra, donde por lo general hay una laguna a donde va a dar el flujo.

#### IV.1 Variables en estudio

Tomando como base el material disponible para la construcción de la playa en pequeña escala, las características físicas del canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM y las posibilidades de generación de estados de mar, las siguientes son las variables utilizadas para el estudio de esta tesis:

##### IV.1.1 Variables independientes

La altura de ola  $H$  (12 y 16 cm), periodo de la ola  $T$  (1, 2, 3 y 4 s), duración de las pruebas (293 min), geometría inicial de la playa, distancia de la pala generadora al lugar donde se construyó la playa, gradientes simulados.

##### IV.1.2 Variables dependientes

Series de datos de oleaje, reflexión de la playa, pendiente de la playa, rotura del oleaje, generación de barras a lo largo del perfil, coeficiente de conductividad hidráulica, acreción o erosión del perfil de la playa en la zona de lavado.

#### IV.2 Modelación en laboratorio

##### IV.2.1 Canal de oleaje II-UNAM

Las pruebas se realizaron en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el largo del canal es de 37 m, 0.80 m de ancho y 1.20 m de alto. Una de las paredes del canal



## Metodología

---

es de vidrio templado de 2 cm de espesor, la otra pared y el fondo son de lámina de acero inoxidable.

La generación del oleaje es proporcionada por un sistema que consta de un generador tipo pistón, desarrollado en el Reino Unido por HR Wallingford. El generador está montado en el extremo sur del canal, una placa de acero inoxidable es la que transmite la energía del pistón al agua, se puede generar oleaje regular e irregular mediante los espectros Jonswap o Moskowitz que están cargados en la interfaz de control del generador de oleaje. El generador cuenta con un sistema de absorción, con dos sensores de nivel adheridos a la pala que miden el oleaje reflejado, los datos medidos se comparan contra datos del oleaje que se desea generar, así se obtiene el desplazamiento necesario para eliminar la diferencia de niveles.

El sistema de bombeo para llenar y vaciar el canal consta de tres bombas de 10 HP de potencia, el arreglo en paralelo de las bombas permite llenar el canal por ambos extremos del canal o bien llenar por un extremo y por el otro vaciar, según como lo requiera el modelo que se esté trabajando dentro del canal. Se cuenta con una cisterna capaz de almacenar más de 24 000 litros de agua.



**Figura IV.1 Canal de oleaje II-UNAM.**

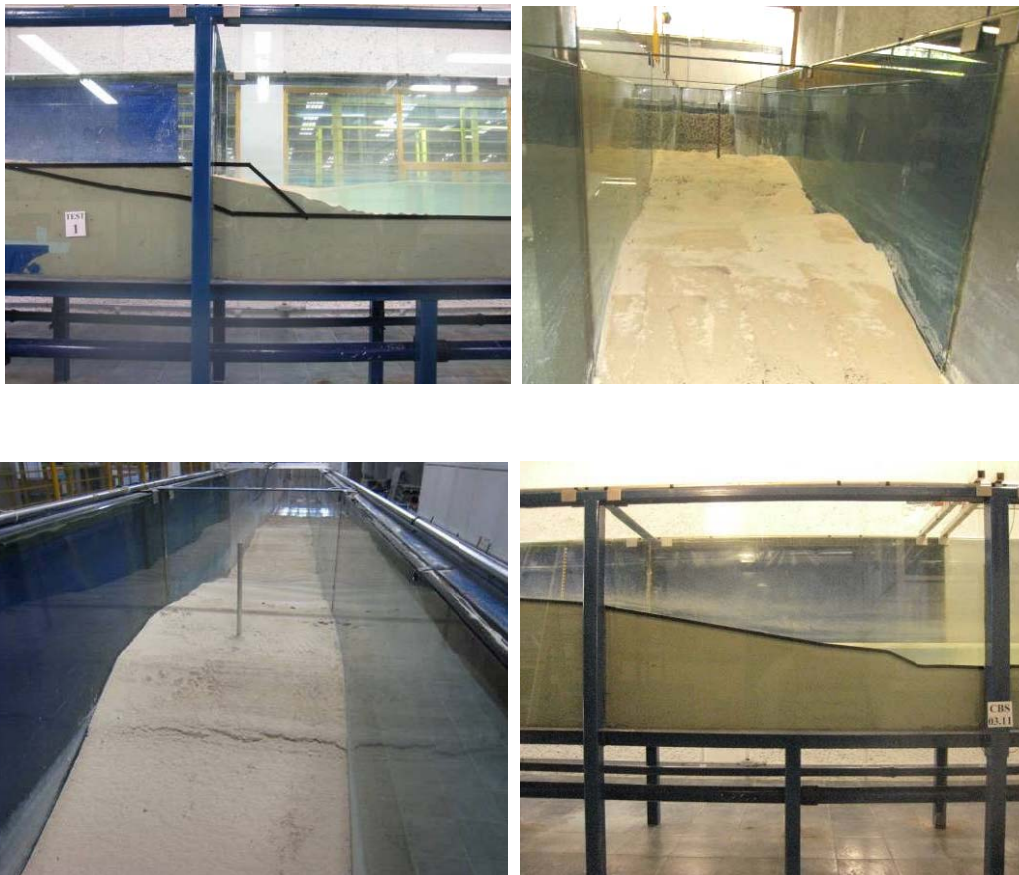
### **IV.2.2 Construcción del perfil inicial**

Aproximadamente a 25 m del generador de oleaje dentro del canal, se construyó la playa, con 6 m<sup>3</sup> de arena (que tiene las características que se presentan en la Tabla IV.1). Se construyó un talud recto de arena con pendiente 1:6 en el lado mar. Dicho talud se dejó evolucionar libremente con un oleaje irregular de espectro Jonswap equivalente a una

## Metodología

---

tormenta (2 s de periodo y 0.18 m de altura de ola) por 48 horas continuas. Una vez que se llegó a una condición de pseudo-equilibrio se registró el perfil de referencia, el cual presentó una pendiente aproximada de 1:30. Para evitar posibles movimientos del pie de la playa y suavizar el cambio de medio en el fondo, al final del perfil de equilibrio se colocó una cama de grava de un metro de longitud.



**Figura IV.2 Construcción del perfil inicial**

**Tabla IV.1 Características de la arena del modelo**

Propiedades Arena de Puerto Morelos, Cancún Quintana Roo, México				
Diámetro medio D50 mm	Densidad kg/cm <sup>3</sup>	Relación de Vacíos	Densidad relativa dentro del agua	Coefficiente de Permeabilidad cm/s
0.26408	2631.5	1.0309	1.6315	0.024

### IV.2.3 Estimación del coeficiente de permeabilidad $K_h$

La permeabilidad es la capacidad de un suelo para drenar agua, el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica es medido por la velocidad del flujo de agua que pasa por una sección transversal del suelo.

Se diseñó un permeámetro de carga constante como el que se muestra en la Figura IV.3, con el fin de medir el coeficiente de permeabilidad. Dentro del permeámetro se consolidó la muestra de arena mediante vibración con un ro-tap, la muestra se saturó de agua introduciendo el permeámetro con la muestra de arena en un cubo de agua, además se le introdujo agua por la parte superior con el objetivo de dejar saturada la muestra de arena al cien por ciento. Se eligió el método de carga constante para determinar el parámetro de permeabilidad, dicho método es usado en suelos friccionantes de alta a media conductividad hidráulica.



**Figura IV.3 Permeámetro de carga constante**

El coeficiente de permeabilidad para un permeámetro de carga constante está determinado por la siguiente expresión:

$$K_h = \frac{VL}{HA t}$$

$V$ , volumen del flujo de agua durante el tiempo de la prueba,  $\text{cm}^3$ ,  $H$ , carga hidráulica constante,  $\text{cm}$ ,  $L$ , Altura de la muestra de arena dentro del permeámetro,  $\text{cm}$ ,  $A$ , área transversal del permeámetro  $\text{cm}^2$  y  $t$ , tiempo de duración de la prueba  $\text{s}$ .

Las dimensiones del permeámetro y la carga hidráulica se resumen en la siguiente tabla:

## Metodología

---

L cm	H cm	A cm <sup>2</sup>
29	70	64.04

Los resultados obtenidos promedio son los siguientes:

V cm <sup>3</sup>	T s
1100	1557

$$K_h = \frac{1100 * 29}{70 * 64.04 * 1557} = 4.57 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

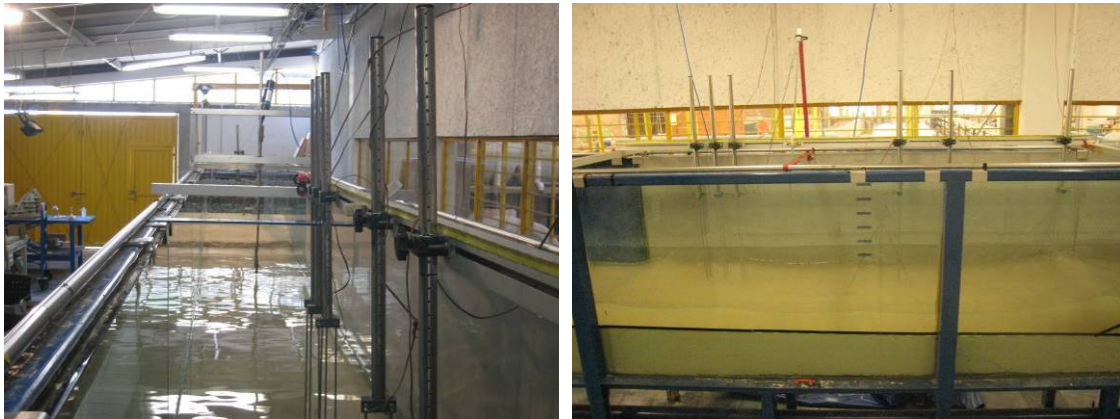
### IV.2.4 Instrumentación y equipo de laboratorio

El equipo de laboratorio con el que se instrumentó el canal de oleaje para registrar los datos de las pruebas es descrito a continuación. También se presenta un esquema de la posición de cada instrumento, para lo cual se estableció como origen la posición media de la pala generadora de oleaje.

#### IV.2.4.1 Sensores de Nivel

Los sensores de nivel con los que cuenta el laboratorio de oleaje están diseñados para adquirir señales análogas de oleaje, las tarjetas de adquisición de datos tienen un rango de  $\pm 10$  V. Para adquirir los datos es necesario que los sensores se calibren sumergidos en el agua en reposo, primero para definir un cero y desplazándolos verticalmente en el rango en una posición hacia arriba y en otra hacia abajo en niveles máximos de desplazamiento de la superficie libre esperados en los ensayos, con el objeto de evitar que los datos se registren en el rango de  $\pm 9.9$  V.

Al hacer incidir un voltaje en los sensores, se pretende crear un circuito, el circuito se cierra solo en la parte sumergida y de esta manera se puede obtener la relación entre el voltaje y la longitud sumergida, determinando así la profundidad en cada instante dado con ayuda de la calibración y de los factores de conversión las mediciones en voltaje se convierten a las unidades deseadas (metros, centímetros, etc.).



**Figura IV.4** Sensores de nivel colocados sobre la playa

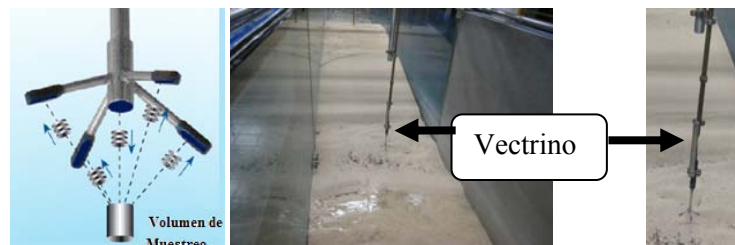
### **IV.2.4.2** *Velocímetro acústico ADV Vectrino*

Entre los instrumentos que están disponibles en el laboratorio se encuentran tres velocímetros de la marca Nortek. Cada velocímetro tiene una sonda fabricada de titanio y consiste de cuatro transductores montados en pequeños brazos y un transductor al centro encargado de emitir el sonido.

El vectrino usa el efecto Doppler para medir la velocidad del flujo de agua, el efecto Doppler es el cambio en un tono que es escuchado, cuando el emisor o receptor del sonido está en movimiento; el cambio en el tono predice que tan rápido se mueve el emisor del sonido.

El vectrino emite pequeños pares de pulsos de sonidos, registra los ecos y por último mide el cambio en el tono o frecuencia del rebote del sonido. Los pulsos son emitidos del transductor central y mediante el efecto Doppler debido al rebote del sonido que es percibido por los cuatro transductores, es posible determinar la velocidad del flujo de agua.

El software de adquisición de datos permite utilizar al vectrino en un modo de ecosonda para medir las distancias al fondo, este modo se probó para medir el perfil de la playa.



**Figura IV.5** Velocímetro Acústico ADV Vectrino

### IV.2.4.3 Estación total

Los perfiles se midieron con una estación total Leica modelo TC(R)/407, la cual permite hacer levantamientos topográficos ya sea con prisma o por medio de láser; para el levantamiento del perfil se utilizó el modo de láser, ya que se optimiza el tiempo de adquisición de datos sin perder precisión.

El levantamiento del perfil se hizo al centro del canal, desde el punto más alto de la playa en dirección a la pala. En cada perfil el número de datos adquiridos fue variable debido a los cambios propios del perfil ocasionados por las condiciones del oleaje modelado para cada prueba.

La posición de la estación total para hacer el levantamiento de los perfiles fue por encima del canal de oleaje y aproximadamente a 10 metros del punto inicial en dirección horizontal, con el fin de visar todo el perfil, inclusive la parte posterior de las barras y los rizos (*ripples*) que se llegaron a crear en el perfil deformado.

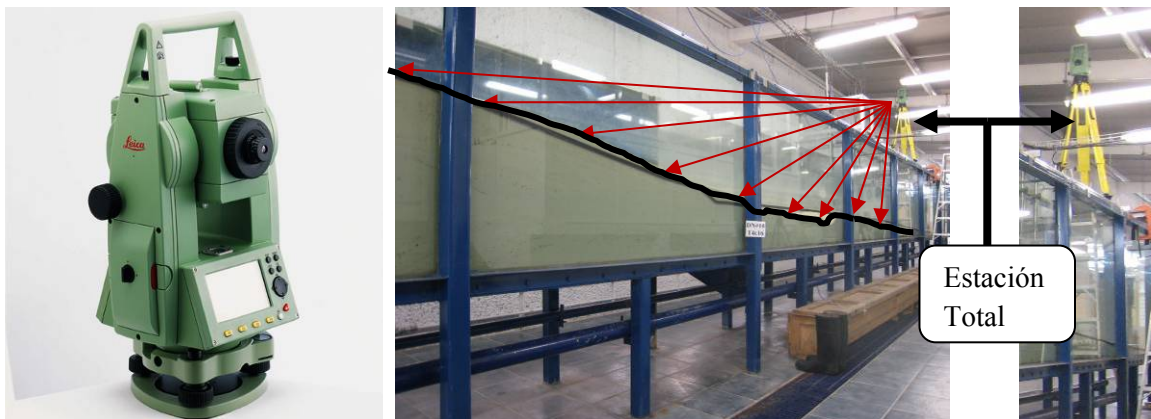


Figura IV.6 Estación total Leica

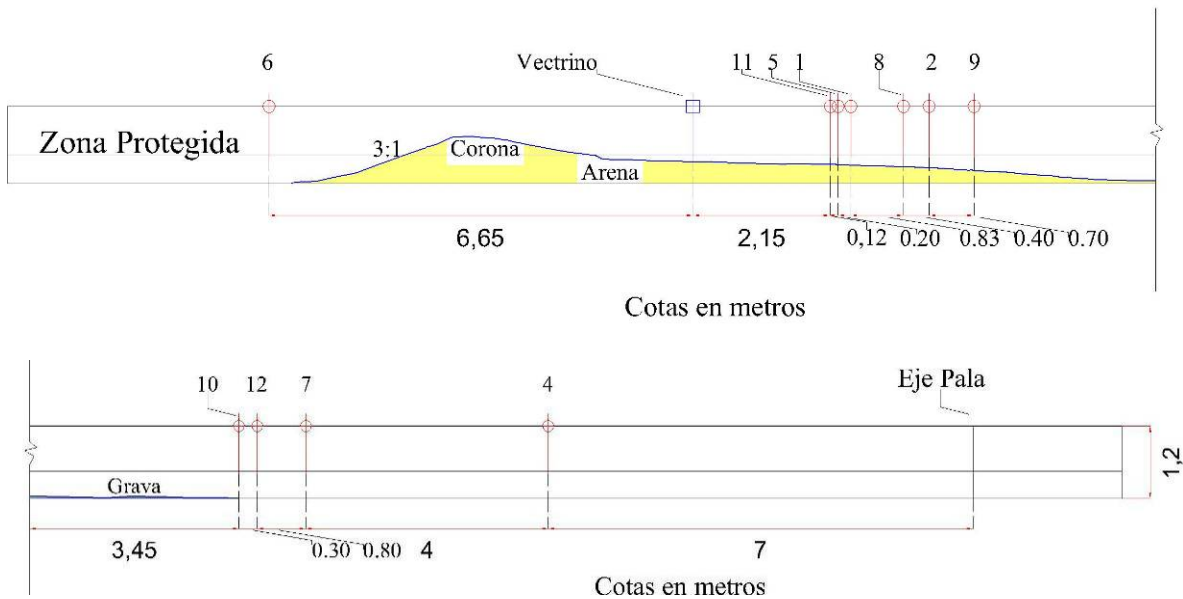
### IV.2.5 Instrumentación del experimento

Para instrumentar el experimento, en principio, y para luego verificar la calidad de los ensayos se requirió colocar sensores de nivel uno muy próximo a la pala generadora de oleaje y otro en la parte protegida por la playa como testigo de la variación de nivel, los demás sensores se colocaron en grupos de tres. Dos grupos se colocaron por encima de la playa antes de la zona donde rompen las olas, con el objetivo de estimar la reflexión de la playa (para establecer en qué estado disipativo se encuentra a lo largo de las pruebas) y el tercer grupo de sensores se colocó en una zona del canal donde la profundidad fuera

## Metodología

constante, el fin de este grupo de sensores fue registrar los cambios que presenta el oleaje regular al empezar a modificarse por el fondo de la playa.

El velocímetro se colocó lo más cercano posible a la cara de la playa pero con la condición de que fuera una zona lo suficientemente profunda como para que la rotura de la ola no se presentara antes o sobre el sensor; es así que conforme cambiaba la longitud de rotura, según las características del oleaje modelado, se ajustaba la posición del velocímetro. A continuación se presenta un esquema del arreglo experimental.



**Figura IV.7 Posiciones de los sensores en el canal.**

**Tabla IV.2 Distancias entre la pala generadora y los sensores instrumentados en la playa.**

Sensor	Número	Distancia medida desde la pala generadora m	Profundidad m
Nivel	4	7.00	0.450
Nivel	7	11.00	0.450
Nivel	12	11.80	0.450
Nivel	10	12.10	0.450
Nivel	9	18.40	0.311
Nivel	2	19.10	0.300
Nivel	8	19.50	0.275
Nivel	1	20.33	0.218
Nivel	5	20.53	0.221
Nivel	11	20.65	0.215
Vectrino		22.80	0.114
Nivel	6	29.45	0.450

### IV.3 Experimentación en el laboratorio

Dado que el oleaje es el factor más importante en la configuración del perfil de playa, se decidió modelar con oleaje regular cuatro periodos de ola (1, 2, 3 y 4 s) y dos alturas de ola (16 y 12 cm), las paradas intermedias durante las pruebas permitieron registrar las series de oleaje y para medir el cambio en el perfil de la playa.

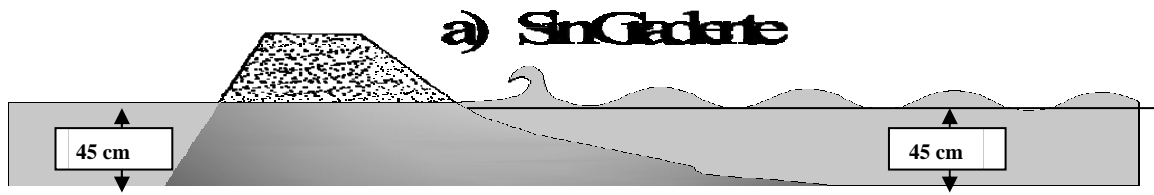
El experimento se diseñó para abarcar las posibles condiciones de nivel freático y flujos sub-superficiales que se pueden presentar en un sistema lagunar, para esto se crearon tres escenarios que tienen que ver directamente con las profundidades de agua dentro del canal, tanto del lado protegido de la playa y del lado expuesto a la acción del oleaje. El gradiente considerado entre los niveles de agua en cada lado de la playa fue de 10 cm; el nivel del lado protegido de la playa fue el nivel variable para crear el gradiente.

Los tres escenarios modelados fueron *sin gradiente*, *gradiente negativo* y *gradiente positivo*.



### IV.3.1 Sin gradiente

El escenario **sin gradiente** fue establecido cuando los niveles de agua en ambos lados de la playa fuesen de 45 cm. Para evitar la transmisibilidad de agua de un lado a otro se saturó la arena. Este escenario se tomó como la base de comparación, es decir, para analizar los resultados de la variación que pudiera presentarse debido a la fluctuación de los niveles contra el estado en el que no existe una alteración en el sistema playa.



### IV.3.2 Gradiente Negativo

La modelación de un **gradiente negativo**, tiene como hipótesis que la fluctuación entre los niveles de la playa modifica la fricción entre las partículas de arena, de tal forma que sea el perfil de la playa menos vulnerable a la acción del oleaje, ya que la infiltración de agua hacia la zona protegida ayuda a que los granos de arena ganen una fuerza extra debida a la dirección del flujo de agua y como consecuencia que el perfil gane estabilidad. Para definir los niveles de este escenario se saturó la arena de la playa. Del lado protegido por la playa se definió el nivel del agua en 35 cm y del lado mar se estableció en 45 cm el nivel de agua.

En primera instancia se tenía planeado que por medio del arreglo de tuberías y con la ayuda de las bombas estar suministrando agua por el lado mar y extraer el volumen infiltrado hacia la zona protegida con el objetivo de compensar los niveles en cada lado y así mantener durante todo el experimento el gradiente de 10 cm, sin embargo en ninguna prueba fue necesario hacer uso de las bombas ya que el volumen infiltrado no fue significativo para provocar cambios en el gradiente de 10 cm.



### IV.3.3 Gradiente Positivo

El **gradiente positivo** fue creado cuando se alcanzó un desnivel entre el lado protegido y el lado mar de 10 cm, este gradiente se debía mantener durante toda la prueba. La hipótesis de este escenario es que las partículas de arena pierden fricción entre ellas, debido a la infiltración de agua del lado protegido hacia el lado mar, con lo que se puede provocar que el agua ponga en suspensión a las partículas de arena y por ende el perfil de la playa debe tender a ser más vulnerable a la acción del oleaje.

La infiltración de agua del lado protegido hacia el lado mar, no cambió los niveles de agua en cada lado de la playa ya que el volumen del lado mar es suficientemente grande en comparación del volumen que hay en el lado protegido por la playa, la compensación del nivel de agua en el lado protegido para mantener el gradiente de 10 cm no fue necesaria.



En la Tabla IV.3 se muestran como resumen las características de cada escenario que se modeló.

**Tabla IV.3 Características de los Gradientes Modelados**

Nombre Gradiente	Nivel Lado Mar cm	Nivel Lado Protegido cm	Gradiente cm
Nulo	45	45	0
Positivo	45	55	10
Negativo	55	45	-10

## IV.4 Desarrollo del experimento

La modelación de cada escenario se diseñó para realizar 6 paradas de medición a los minutos 6, 7, 10, 30, 60 y 180; la duración total fue de 293 min de acción del oleaje. En cada parada se registraron los cambios en el perfil de la playa con la ayuda de una estación

## Metodología

---

total y de un *vectrino ADV* en su modo de ecosonda mediante la interfaz *Vectrino Plus®* que permite medir la distancia del sensor al fondo del perfil.

El perfil de la playa se midió desde una profundidad cercana a la profundidad de cierre (se acepto como profundidad de cierre en el modelo, la correspondiente a donde inicia la cama de grava) hasta la máxima elevación del perfil, aceptando que el experimento tiene la característica de ser bidimensional, el levantamiento del perfil en cada parada se realizó al centro geométrico del ancho del modelo. El origen del eje X con dirección positiva hacia el generador de oleaje fue definido en el punto donde se encuentra la máxima elevación del perfil, por lo tanto, el origen del eje Z se encuentra en el fondo del canal en dirección positiva hacia arriba.

Los datos de la variación de la superficie libre registrada con los sensores de nivel se adquirieron con una resolución de 100 Hz. En las paradas 6, 7 y 10 min del experimento se adquirieron datos de la variación de la superficie libre y la velocidad puntual. Dado que las paradas son de corta duración, fue posible adquirir todos los datos entre parada y parada. Para las paradas de mayor duración 30, 60 y 180 min, la adquisición de estos datos se realizó en los últimos 10 minutos con el objetivo de registrar la evolución temporal y energética del perfil de la playa.

En la **Tabla IV.4** se presenta un resumen de las pruebas realizadas, para los tres escenarios modelados con sus respectivos periodos y alturas de ola.

## Metodología

---

**Tabla IV.4 Resumen de pruebas realizadas**

Pruebas Realizadas						
Nombre Gradiente	Nivel Lado Mar cm	Nivel Lado Protegido cm	Gradiente cm	Periodos modelados s	Altura de ola cm	Duración min
Nulo	45	45	0	1,2,3,4	12,16	6
						7
						10
						30
						60
180						
Positivo	45	55	10	1,2,3,4	12,16	6
						7
						10
						30
						60
180						
Negativo	55	45	-10	1,2,3,4	12,16	6
						7
						10
						30
						60
180						

---



# CAPÍTULO V

## **Análisis de Resultados**



### V. Análisis de Resultados

En este capítulo se analizarán los datos obtenidos de la modelación de laboratorio con el objeto de definir el comportamiento de las variables dependientes: reflexión de la playa, pendiente de la playa, rotura del oleaje, generación de barras a lo largo del perfil, acreción o erosión del perfil de la playa en la zona de lavado.

#### V.1 Sin Gradiente

##### V.1.1 Periodo de 1 s

Partiendo de una geometría inicial de referencia de la playa, para el escenario *Sin Gradiente* se presenta una descripción de la influencia que ejerce un oleaje de periodo de 1 s y altura de ola de 12 cm sobre la evolución espacial del perfil de playa.

En primera instancia se analizan las características del perfil de la playa inicial (Figura V.2) y su evolución durante el tiempo en que se desarrolló la prueba. El perfil inicial corresponde a un perfil de una playa micromareal sin la presencia de barras. Se puede observar que el perfil, en su parte sumergida, presenta un cambio abrupto de pendiente, luego de este cambio de pendiente presenta una transición entre las dos pendientes, a esta transición se le llama escalón. El cambio de pendientes hace que destaque visualmente el escalón, sin embargo, la pendiente de la zona de rotura se mantiene constante hasta la profundidad de cierre. En la zona de lavado la pendiente presenta variaciones desde la zona seca, que corresponde a la zona más alta del perfil, hasta la zona de intersección con el nivel de aguas quietas, siendo su geometría muy parecida a la de una parábola como las descritas por los modelos de perfil de equilibrio propuestos por autores, como Dean, Vellinga, etc. (Figura V.2)



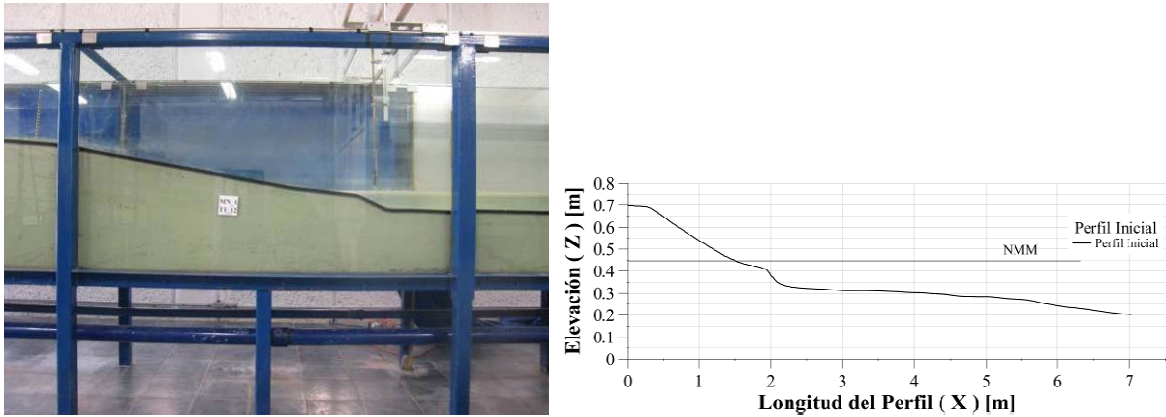


Figura V.1 Perfil inicial de la playa

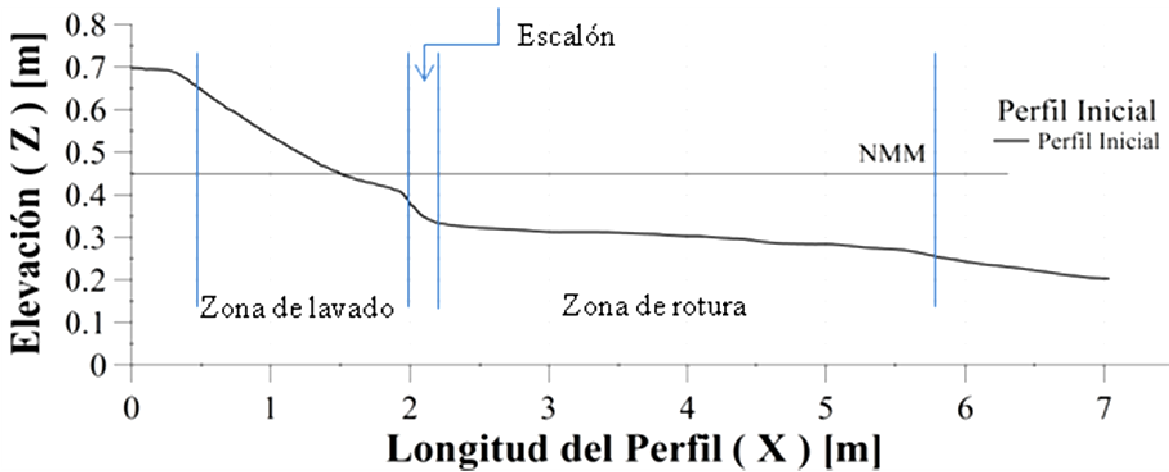


Figura V.2 Descripción de zonas en el perfil de la playa

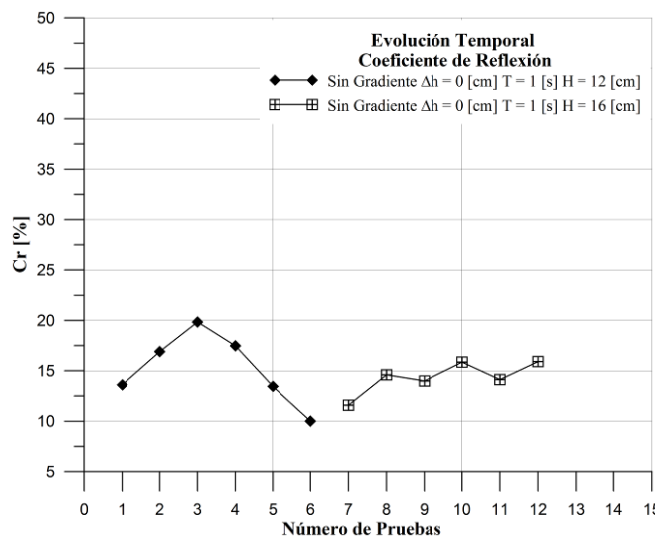
Los cambios de la pendiente en el perfil se da ocurren como respuesta directa al forzamiento que genera el oleaje incidente y la forma en la que el perfil es capaz de evolucionar modificando las condiciones de reflexión a lo largo del tiempo que duró el ensayo.

Durante los ensayos se observó que a medida que el perfil de la playa iba cambiando su forma, otros efectos que se presentaron fueron: una modificación de los límites de ascenso y descenso (*run up* y *run down*) del oleaje, el cambio del coeficiente de reflexión y un cambio de fase del periodo de la onda en el proceso de *up rush* y el *down rush*, es decir, los relacionados con los flujos de agua de ascenso y descenso, respectivamente.

**V.1.1.1 Efectos en el coeficiente de reflexión debido a cambios en el perfil**

Teóricamente cuando se modifica la reflexión del oleaje, la respuesta del perfil de la playa puede inducir estados de acreción o erosión. Para un estado de erosión en el que la pendiente de la playa, en la zona de lavado se hace más tendida, dado que en esta zona se disipa mayor cantidad de energía, y la movilización de sedimento en la zona de rotura puede provocar la formación de barras en el proceso de estabilización del perfil de equilibrio.

En el caso de un perfil en acreción, en el cual el oleaje tiende a crear una berma en la zona de lavado y por consecuencia hace que la pendiente del perfil refleje mayor cantidad de energía, la movilización del sedimento en la zona de rotura puede ser menor y en ocasiones no se forman barras a lo largo de esta zona.



**Figura V.3 Evolución temporal del coeficiente de reflexión**

Cuando se modeló el periodo más corto con las alturas de ola de 12 y 16 cm, la evolución temporal de la reflexión del perfil de la playa, presenta las diferencias que se pueden observar en la Figura V.3. Mientras que la reflexión de la playa para la altura de ola de 12 cm presenta dos ciclos, en el primero, el oleaje reflejado es en orden ascendente hasta los 53 minutos, después de esto la reflexión disminuye hasta ser menor en los últimos minutos de la prueba, muy por debajo del primer registro de la prueba. El que la reflexión esté por abajo del primer registro indica que la playa llegó a un estado de estabilidad disipativo.

## Análisis de Resultados

Para la altura de ola de 16 cm, Figura V.3, lo que se puede observar es que la tendencia de la reflexión es en orden ascendente, en este caso, al final de la prueba la reflexión es mayor que en el primer registro, lo que hace suponer que el perfil de la playa es más estable que para la condición de 12 cm de altura de ola, esto porque no existen diferencias significativas entre cada parada y medición del perfil.

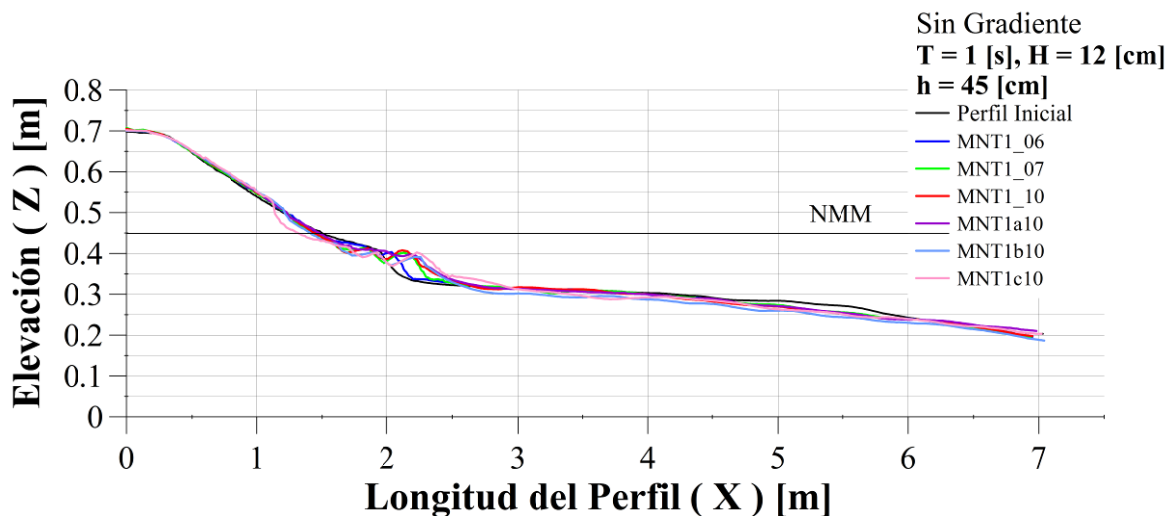


Figura V.4 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

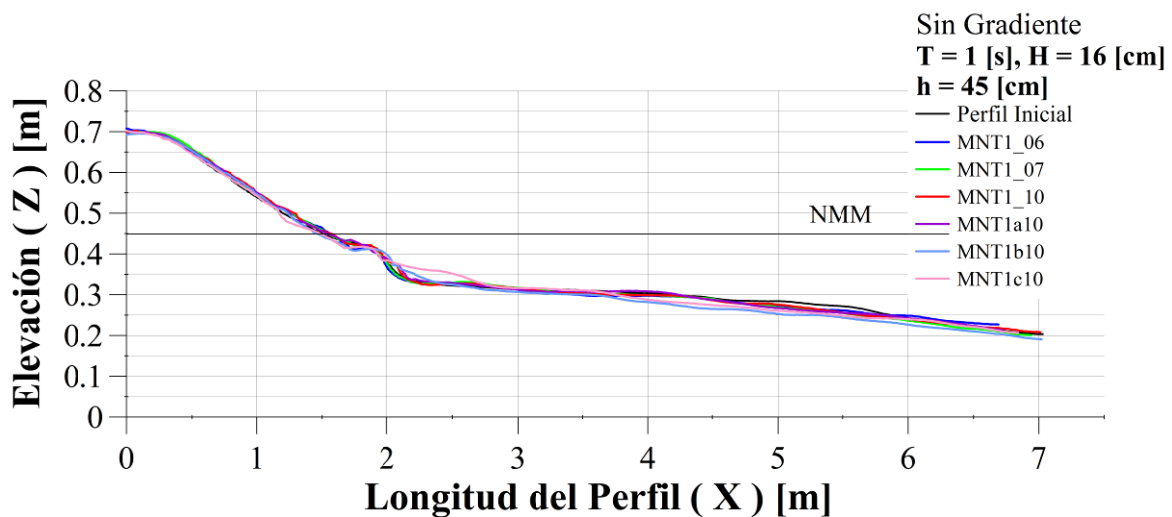


Figura V.5 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

En la Figura V.4 y Figura V.5, correspondientes a la evolución temporal de los perfiles, a una distancia de 2 m de la referencia horizontal, se observan diferencias principalmente en la formación de barras. Este cambio en el perfil para la altura de ola de 12 cm provocó, en la zona de lavado, que el sedimento erosionado se depositara en la zona de transición de las

## Análisis de Resultados

---

pendientes del perfil, extendiéndose hasta unos 50 cm aproximadamente en la dirección hacia el generador de oleaje. Se registró un retroceso en el perfil de la playa en la cota del nivel de aguas quietas que corresponde a 45 cm (Figura V.4). Este retroceso implica una nueva pendiente en el perfil de la playa, precisamente en la zona de lavado donde se presentan el *up-rush* y el *back-rush* y si se considera que el sedimento erosionado creó una barra, se puede suponer que el reacomodo del sedimento provocó una respuesta disipativa por parte del perfil de la playa.

**Tabla V.1 Sin Gradiente, periodo T = 1 s, H = 12 cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 1 s, H = 12 cm	1	6	-0.03815
	2	7	-0.06615
	3	10	-0.05455
	4	30	-0.01915
	5	60	-0.08785
	6	180	-0.18353

La respuesta del perfil con la condición de altura de ola de 16 cm fue menos severa, se observa en la Figura V.5, ya que la evolución del perfil de la playa es menos dinámica si se le compara con la respuesta con la condición de altura de ola de 12 cm.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se observó que la respuesta del perfil no fue la misma, es decir, con la altura de ola más grande no se presentó la formación de barras y el movimiento de sedimento en la zona de lavado fue menor, por lo que si se toma como referencia el comportamiento del coeficiente de reflexión, se puede establecer una primera relación entre la creación de barras y el perfil erosionado en la zona de lavado. De forma preliminar se puede establecer que la erosión de la zona de lavado para el periodo de 1 s tiene una relación importante con el aumento o disminución de la reflexión, reflejándose este comportamiento en la evolución de las características del nuevo perfil, el cual puede tender a ser más disipativo o reflejante.

**Tabla V.2 Sin Gradiente, periodo T = 1 s, H = 16 cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 1 s, H = 16 cm	7	6	0.05916
	8	7	0.04065
	9	10	0.06352
	10	30	0.04235
	11	60	-0.03627
	12	180	-0.01815

En la Tabla V.2 se presentan los valores de las mediciones temporales de los avances y retrocesos que tuvo el perfil de la playa, referidos a la cota del nivel de aguas quietas, según los ensayos iban evolucionando. De los resultados de esta tabla se observa que existe una gran relación entre los cambios geométricos de la zona de lavado y el comportamiento de la reflexión. En ocasiones, cuando la evolución del perfil está transitando hacia una condición de equilibrio, se pueden formar barras o acumulación de sedimento en la zona de rotura, (ver por ejemplo los perfiles asociados a las paradas de registro 5 y 6 en la Figura V.5), lo que conduce a que la relación entre el coeficiente de reflexión y la pendiente de la zona de lavado no sea lineal.

### V.1.2 Periodo de 2 s

En la Figura V.6 se muestran los registros del coeficiente de reflexión de las pruebas que corresponden al periodo  $T = 2$  s, para las alturas de ola  $H = 12$  y  $16$  cm. Las dos series muestran una evolución muy diferente, en el caso de altura de ola de  $12$  cm el coeficiente de reflexión oscila entre el  $20$  y  $25$  %, es decir, la condición del perfil no cambia significativamente a lo largo de la prueba. Es de notar que el valor del coeficiente de reflexión al final de la serie es muy semejante al primero, esta semejanza puede deberse a la formación de una barra en la zona de rotura del oleaje que hace que el comportamiento final del perfil no sea tan disipativo como se podría pensar.

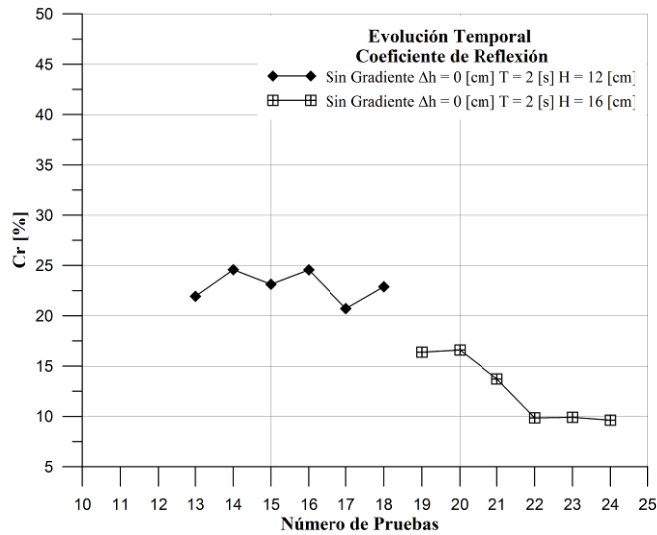


Figura V.6 Evolución temporal del coeficiente de Reflexión, T = 2 s, H = 12 y 16 cm

Al sedimento que se depositó por arriba del nivel de aguas quietas, se le puede asociar con la posición de la zona de lavado, ya que cuando el oleaje está en el proceso de descenso, lo hace con menos intensidad que en su proceso de ascenso a través de la zona de lavado, lo que por consecuencia, produce un transporte de sedimentos acrecivo lo cual se puede observar en la Figura V.7.

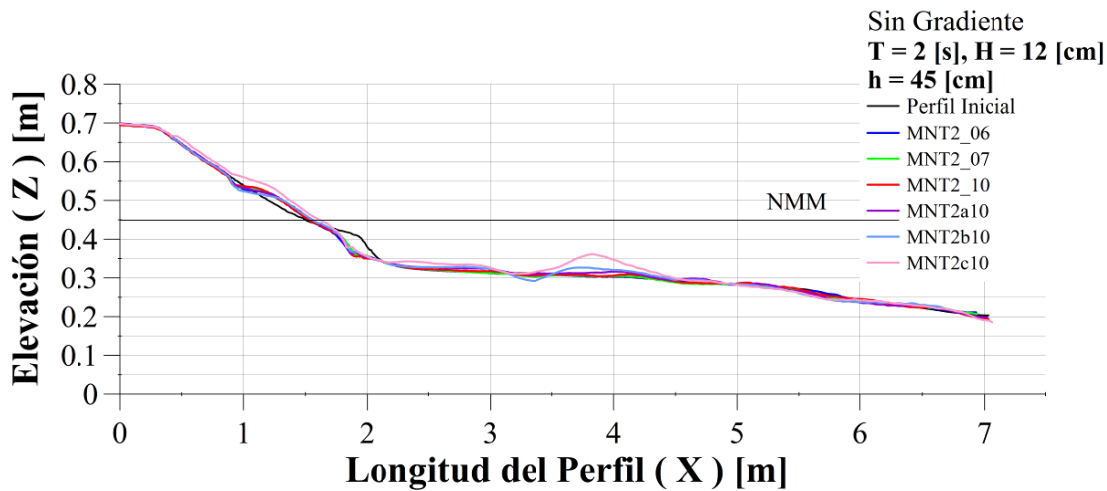


Figura V.7 Evolución del perfil de la playa periodo T = 2 s y altura de ola H = 12 cm, Sin Gradiente

Por lo que toca al caso de altura de ola de 16 cm (Figura V.6), es visible una reducción en el coeficiente de reflexión hasta alcanzar valores menores a 10 %, lo que indica claramente la formación de un perfil disipativo con tendencia a la estabilidad. Es de notar que el valor

## Análisis de Resultados

del coeficiente cae dramáticamente entre el minuto 4 y el minuto 10, lo que indica una gran rapidez de deformación del perfil de playa en para este clima de olas. En la Figura V.8 se muestran los resultados de la evolución de los perfiles de playa para una condición incidente de altura de ola de 16 cm y periodo  $T = 2$  s. Si se comparan estos resultados con los obtenidos con una altura de ola de 12 cm, las diferencias son muy evidentes, así por ejemplo se pueden notar cambios en la formación que la barra, tanto en sus dimensiones, forma, evolución temporal y ubicación. Complementariamente, también se pueden observar las deformaciones que existen sobre la pendiente en la zona de rotura y una tendencia a crear una segunda barra cerca de la zona de lavado.

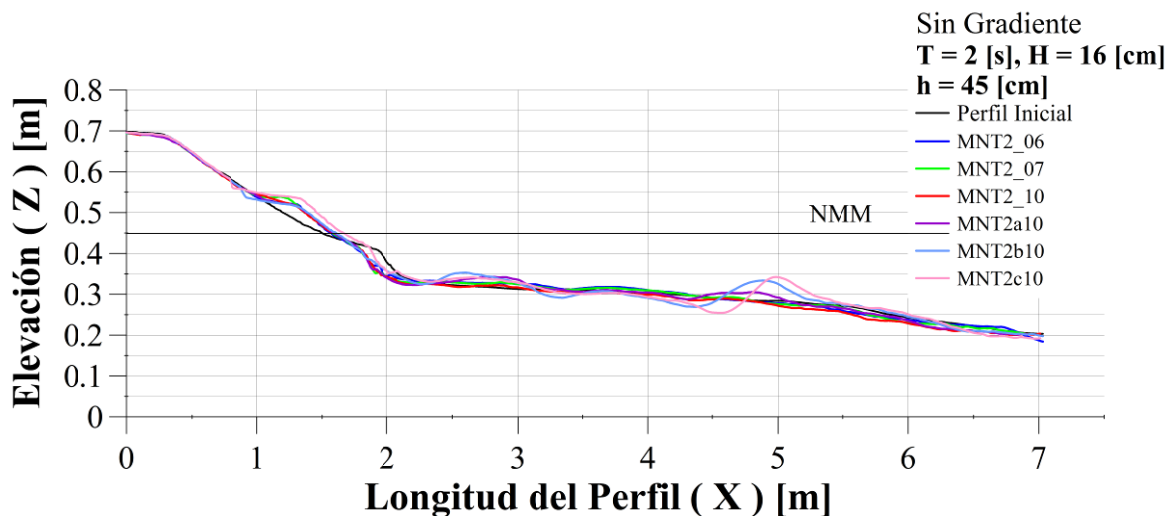


Figura V.8 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

En lo que se refiere al avance de playa para altura de ola de 12 s se puede observar, en la Tabla V.3, que a lo largo de toda la prueba existe una tendencia a incrementarse por encima del nivel de aguas quietas, resultando ser un oleaje constructivo. La relación que existe entre la creación de la barra y el avance de playa es muy claro, en virtud que entre la prueba 14 y 15 existe un retroceso en la playa, pero justo cuando empieza a emerger la barra, la playa nuevamente tiene un avance que se mantiene constante en los 5 cm hasta avanzar 11 cm al final de la prueba. Estos resultados muestran la importancia que puede tener la presencia de una barra desde un punto de vista energético, es decir, con la disipación y reflexión del oleaje contribuye a incrementar la playa por encima del nivel de aguas quietas.

## Análisis de Resultados

**Tabla V.3 Sin Gradiente, periodo T = 2 s, H = 12 cm**

Condiciones de Oleaje ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 2 s, H = 12 cm	13	6	0.03003
	14	7	0.04119
	15	10	0.02924
	16	30	0.05907
	17	60	0.05685
	18	180	0.11542

Por lo que respecta al avance de playa para la condición de H = 16 cm, que se resume en la Tabla V.4, el comportamiento es muy semejante al que se obtuvo con una altura de ola de 12 cm, con las particularidades de la formación de la barra. En este caso siempre se presentó un avance en la playa y nuevamente cuando apareció la barra se experimentaron cambios sobre el perfil, ya que antes de que empiece a emerger la barra el avance de playa presentó una escasa diferencia, no así cuando la barra se formó en la zona de rotura y la playa se tornó energéticamente más disipativa provocando un aumento muy significativo en el avance de playa de casi el doble del registrado antes de que la barra se creará (prueba 15).

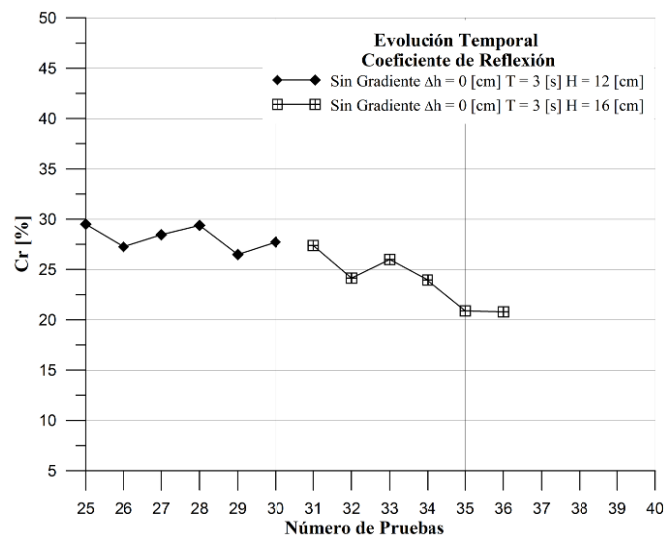
**Tabla V.4 Sin Gradiente, periodo T = 2 s, H = 16 cm**

Condiciones de Oleaje ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	cm
T = 2 s, H = 16 cm	19	6	0.06899
	20	7	0.08055
	21	10	0.08724
	22	30	0.09126
	23	60	0.1081
	24	180	0.16519



### V.1.3 Periodo T = 3 s

En la Figura V.9 se presenta la evolución del coeficiente de reflexión para la prueba con periodo de 3 s y altura de ola de 12 cm. Los valores en toda la prueba muestran poca variación lo que hace suponer, tomando como referencia los resultados con los ensayos con los periodos de 1 y 2 s, que el perfil de la playa no tiene deformaciones considerables o bien que la rotura del oleaje favorece la creación de barras en la zona de rotura. Los valores son muy próximos a 30 % lo cual se puede atribuir al aumento de la energía asociado al incremento del periodo de la ola. Por su parte, el coeficiente de reflexión al final de la prueba es ligeramente menor al inicial, lo que indica que la deformación en el perfil de la playa favorece la disipación de energía.



**Figura V.9 Evolución temporal del coeficiente de Reflexión, T = 3 s, H = 12 y 16 cm**

El incremento en la pendiente de la playa y el periodo de modelación provocó que los valores del coeficiente de reflexión aumentaran. Cabe resaltar que la respuesta de la playa para la altura de ola  $H = 12$  cm, tiende a reflejar el oleaje de manera semejante entre cada parada de registro a lo largo de la prueba. En la Figura V.10 se puede observar que el perfil, para las pruebas de duración más corta, no presenta gran diferencia ni en la zona de rotura, ni en la zona de lavado y en este caso se puede suponer que hasta los 53 min la capacidad reflejante del perfil de playa está dominada por el aumento en la pendiente del perfil en la zona de lavado y no es tan dependiente de la zona de rotura.

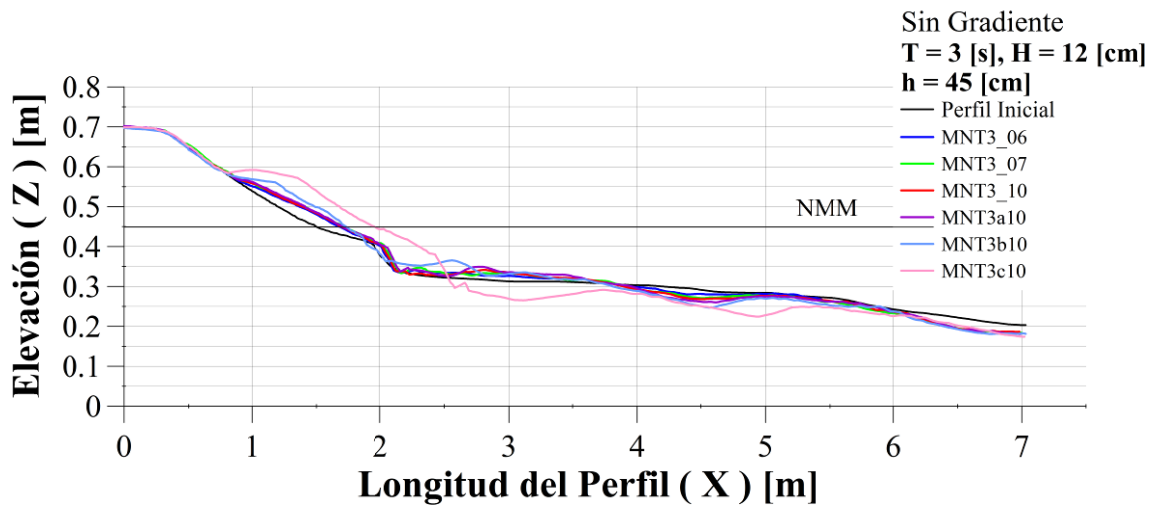
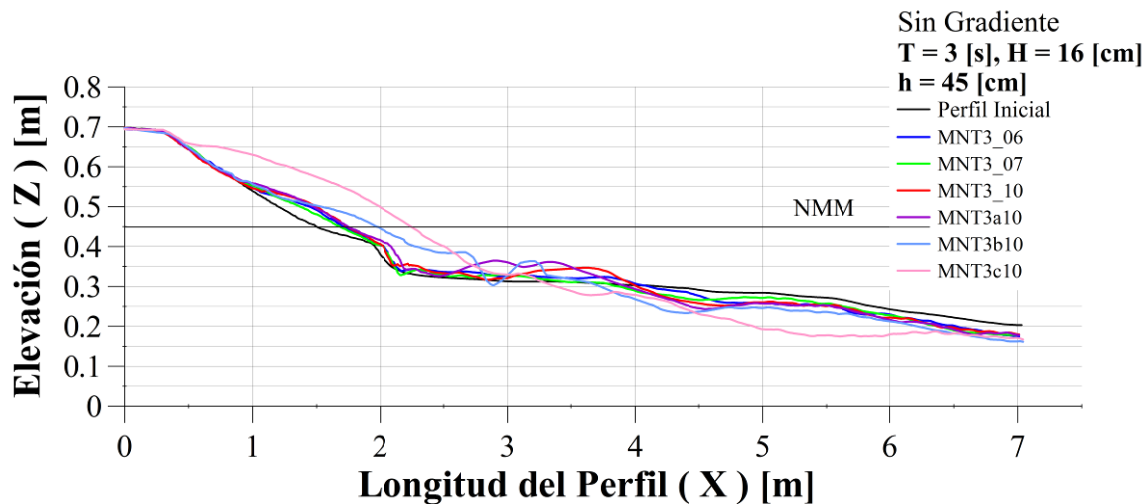


Figura V.10 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

Lo que ocurre en las paradas de registro de mayor duración MNT3b10 y MNT3c10 (ver Figura V.10), cuando el oleaje deforma al perfil particularmente en la zona de rotura, es la socavación del perfil y la creación de un canal a una distancia aproximada de 5 m con relación al cero en dirección horizontal, lo cual implica que el material que se toma del canal creado es acarreado y depositado en la zona de lavado en las proximidades del escalón donde está el cambio de pendientes, por lo tanto, el proceso de *up-rush* y *down-rush* deben ser los responsables de la depositación de sedimento en esas zonas.

Para el perfil de la parada a los 113 min (MNT3b10) (ver Figura V.10), el coeficiente de reflexión disminuye, dado que el sedimento depositado cerca del escalón formó una barra que ayuda a disipar la energía reflejada por el perfil de la playa. Lo que sucede en el último registro es que el coeficiente de reflexión aumentó en relación al registro anterior, posiblemente por la depositación de sedimento en la zona de lavado. Esto provocaría que el perfil se tornara más reflejante debido al incremento de la pendiente, sin embargo, se crearon barras en la zona de rotura que funcionan como disipadores de energía. Es evidente que la formación de barras en la zona de rotura ayuda a disipar energía y a mantener el coeficiente de reflexión en un valor pequeño, aunque aumente la pendiente o exista un incremento de la playa, como es el caso del último registro.



**Figura V.11 Evolución del perfil de la playa periodo T = 3 s y altura de ola H = 16 cm, Sin Gradiente**

Para la condición de H = 16 cm, en la Figura V.9 se muestra la evolución temporal del coeficiente de reflexión. Como se puede observar, cuando se cumplieron 23 min de modelado, se experimentó un descenso abrupto del coeficiente de reflexión, lo cual se asemeja mucho al comportamiento que se observó en las pruebas con periodo de 2 s. La respuesta del perfil se manifestó a través de deformaciones temporales del perfil después de cumplidos 6 minutos (MNT3\_06) de modelado, en particular, desde la zona de rotura hasta la zona de lavado. El comportamiento anterior se debe a que el oleaje, al romper sobre la pendiente puso en suspensión al sedimento y lo acarreo hasta la zona de lavado. En contraste con el ensayo con 12cm de altura de ola, la distancia de la zona de rotura fue mayor, por lo tanto la ola viaja una mayor distancia. Después de la parada de registro a los 23 min, se puede observar que el coeficiente presenta una disminución considerable, en este caso el perfil también presenta cambios de gran importancia, como son la aparición de barras y una mayor socavación en la zona de rotura.

En las últimas paradas de registro, el material acarreado a la zona de lavado es el mayor registrado en relación con todas las combinaciones de condiciones de oleaje modeladas, sin embargo, y en virtud que la pendiente del perfil aumentó sin la formación de barras, se puede establecer que el coeficiente de reflexión también es función de la conformación geométrica del perfil, de la ubicación de la zona de rompientes y del tamaño de la berma en la zona de lavado, lo cual condiciona directamente el proceso de *up-rush*.

## Análisis de Resultados

---

En la Tabla V.5 se muestran los resultados del avance de playa que se presentó a lo largo de la prueba. De esta tabla se puede observar la dependencia que tiene el incremento de playa con la aparición de las barras sobre el perfil y la estabilidad del coeficiente de reflexión, ya que para las paradas de registro 28, 29 y 30 el avance de playa tiene un aumento considerable, siendo hasta del doble en la parada de registro final. Estos resultados permiten establecer la importancia que tiene la formación de la barra en la zona de rotura en la disipación de energía y sobre el avance de playa. Con base en los resultados, se demuestra la interdependencia que tienen ambos procesos y el comportamiento del coeficiente de reflexión, lo cual indica que cuando se deposita el sedimento en la zona de lavado la respuesta del coeficiente de reflexión disminuye, además de que se añade el efecto de la barra que funciona como obstáculo de la ola reflejada.

**Tabla V.5 Sin Gradiente, periodo T = 3 s, H = 12 cm**

Condiciones de Oleaje ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente min	Avance de Playa m
T = 3 s, H = 12 cm	25	6	0.17899
	26	7	0.21458
	27	10	0.1956
	28	30	0.20685
	29	60	0.23098
	30	180	0.45114

Los resultados del avance de playa para la condición de altura de ola de 16 cm son expuestos en la Tabla V.6. A partir de estos resultados, se puede ver que el avance de playa, desde la primer parada de registro, es de gran magnitud en comparación con los avances de playa bajo las otras combinaciones de oleaje modeladas; después la playa manifiesta un retroceso y una disminución del coeficiente de reflexión, lo cual se debe a que el coeficiente de reflexión, hasta la segunda parada de registro, está dominado por la pendiente de la zona de lavado, después que aparece la barra (minuto 23 MNT3\_10) el avance de playa se incrementa, sin embargo, el coeficiente de reflexión disminuye.

## Análisis de Resultados

---

Una vez más, se verifica que la barra tiene un efecto disipativo sobre el perfil de la playa y coadyuva a incrementar la zona seca del perfil. Para las condiciones con periodo  $T = 3$  s, la rotura se hace más violenta sobre el perfil y ocurre entre los 4 y 5 m; esto puede ser la causa del arrastre de sedimento a la zona de lavado.

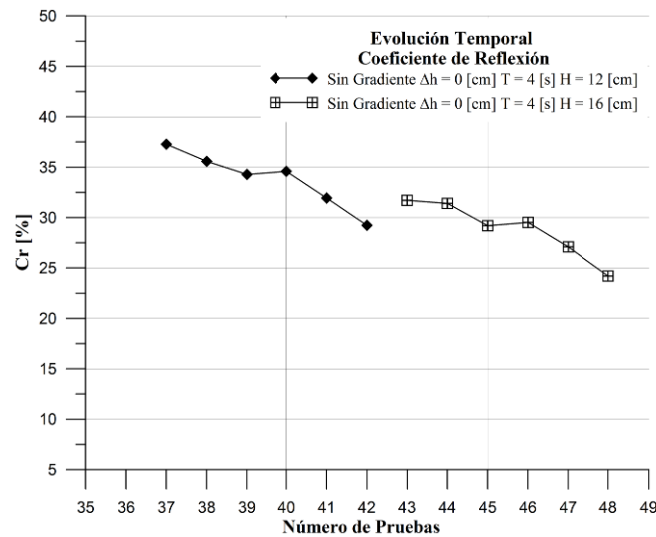
**Tabla V.6 Sin Gradiente, periodo  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente min	Avance de Playa m
T = 3 s, H = 16 cm	25	6	0.21471
	26	7	0.18403
	27	10	0.24052
	28	30	0.24663
	29	60	0.46873
	30	180	0.74623

---

### V.1.4 Periodo de 4 s

El periodo más largo de todos los escenarios modelados fue de 4 s. En la Figura V.12 se presentan las series temporales de la evolución del coeficiente de reflexión para las alturas de ola de 12 y 16 cm. De los resultados obtenidos se observa un comportamiento muy similar a los que se obtuvieron para la altura de ola  $H = 12$  cm, pero con la diferencia de la magnitud del coeficiente de reflexión obtenida. Presumiblemente, la diferencia entre los resultados obtenidos con las dos series, tiene su origen en la ubicación del punto de rotura y/o el efecto de la aparición de barras a lo largo de la zona de rotura.



**Figura V.12 Evolución temporal del coeficiente de Reflexión, T = 4 s, H = 12 y 16 cm**

De los resultados obtenidos para la serie para H = 12 cm, se puede observar que a medida que se desarrolla la prueba el perfil de la playa tiende a ser más disipativo. A partir de la primera parada de registro, Figura V.13, se observa que la acción del oleaje deforma considerablemente al perfil, creando una barra y arrastrando sedimento desde la zona más profunda del perfil hacia la zona de transición de pendientes. Este acarreo de sedimento provoca cambios en la rotura del oleaje, sobre todo en el peralte de la ola, debido al efecto de la aparición de una barra en la zona de rotura que induce un peraltamiento y rotura del oleaje sobre o antes de la barra. Cabe señalar que la tendencia a reflejar menos el oleaje por parte del perfil de la playa se debe a la formación de barras y a la depositación de sedimento en la zona de transición de pendientes. La deformación del perfil hasta la parada de registro a los 113 min tiene una gran semejanza, no así la respuesta del coeficiente de reflexión que presenta una tendencia a disminuir según evolucionan las pruebas. En este caso es notorio que la rotura del oleaje es el principal mecanismo de disipación de energía y que las olas rompan en todos los casos en voluta, por consiguiente, la ola reflejada puede movilizar sedimento en dirección hacia la pala y el arrastre de sedimento se nulifica. También cabe señalar que el coeficiente de reflexión disminuye.

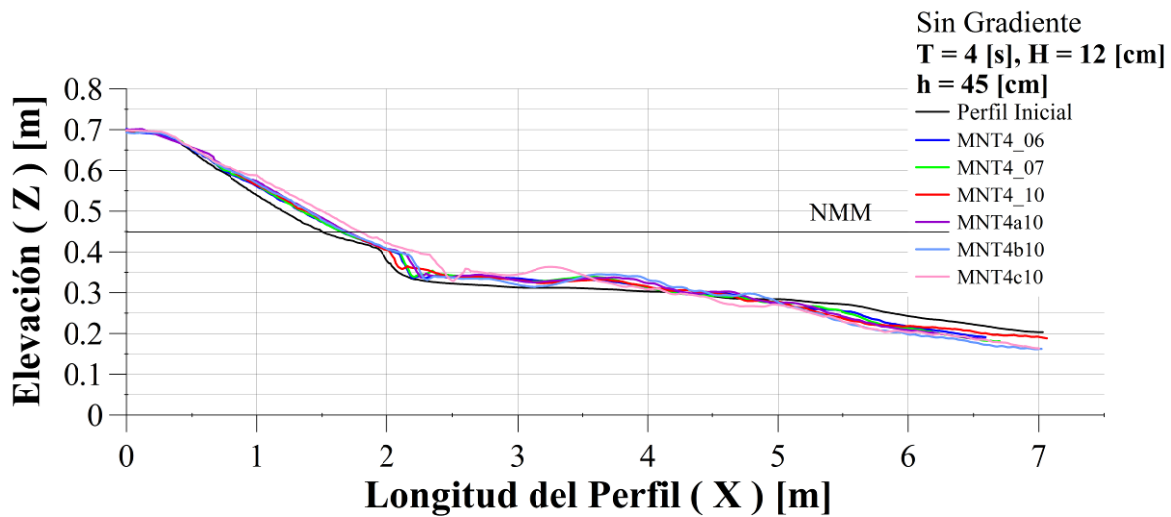


Figura V.13 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

Para la altura de ola de 16 cm, la respuesta del perfil es muy disipativa y sigue una tendencia a disminuir según transcurre la prueba. En este caso la ola rompe más lejos de la pendiente de la zona de lavado y el coeficiente de reflexión tiende a disminuir por esta razón. En general, el perfil gana un poco de sedimento en la zona de lavado presentando una forma cóncava.

La acumulación del sedimento para la condición de  $T = 4$  s, no es semejante a la de los otros periodos modelados. Bajo estas condiciones se gana playa seca y la pendiente es muy suave, lo que puede ayudar a explicar el por qué el perfil refleja menos y se forman perfiles cóncavos con un proceso de ascenso y descenso de la ola menos violentos en comparación con los resultados obtenidos con perfiles sin la presencia de barras.

A partir de la Figura V.14 se puede observar la evolución temporal de la deformación del perfil, resaltando que en las paradas de registro de menor duración las deformaciones se presentan desde la zona de rotura hasta la zona de lavado.

Desde la parada de registro a los 53 min, apareció una barra sobre la zona de rotura, mientras que para las dos últimas paradas de registro el oleaje formó dos barras sobre el perfil en la zona de rotura. La barra de mayor dimensión aparentemente está condicionada al proceso de la rotura del oleaje en esta profundidad, mientras que la barra que está

## Análisis de Resultados

---

próxima a la pendiente de la zona de lavado puede estar suministrando sedimento a la zona de lavado.

Bajo la condición de  $T = 4$  s la deformación del perfil, en particular la aparición de barras, se debe al efecto de la rotura del oleaje. El coeficiente de reflexión también tiene relación con la presencia de las barras, ya que entre más grande se hace la barra en la zona de rotura el coeficiente disminuye.

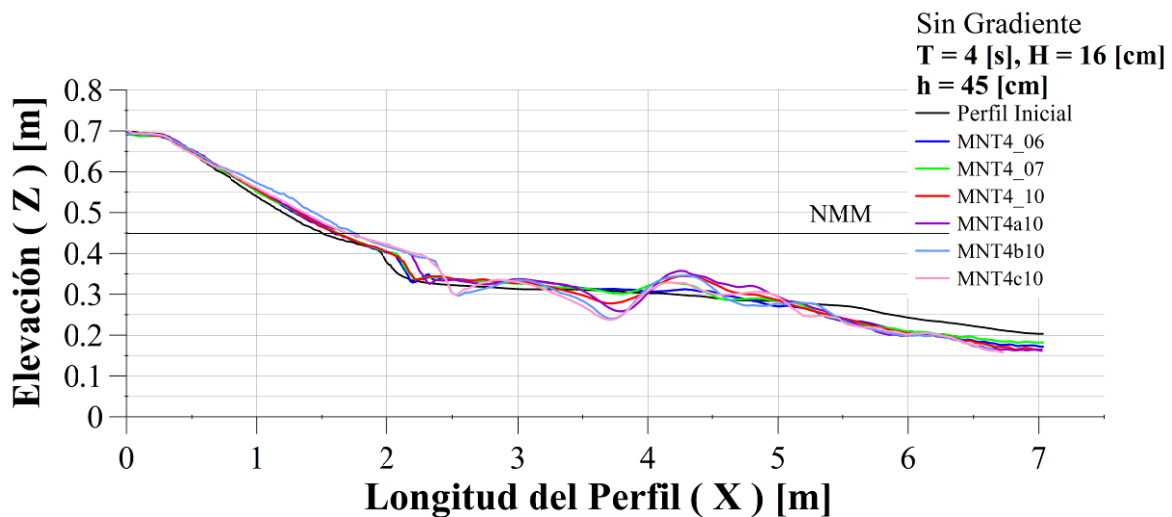


Figura V.14 Evolución del perfil de la playa periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

En la Tabla V.7 se presenta el comportamiento del avance de playa que se registró para la altura de ola de 12 cm. Se puede ver que para las dos primeras paradas el avance presenta una ganancia de 14 cm y se mantiene en el mismo valor hasta la tercera parada de registro, cuando avanza de nuevo la playa en unos 4 cm y así se mantiene hasta los 113 min de duración del oleaje, cuando se experimenta el mayor avance de playa en el perfil.



## Análisis de Resultados

**Tabla V.7 Sin Gradiente, periodo T = 4 s, H = 12 cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 4 s, H = 12 cm	31	6	0.14585
	32	7	0.14748
	33	10	0.18685
	34	30	0.19019
	35	60	0.17822
	36	180	0.29102

La acción del oleaje es constructiva en la zona de lavado, sólo en la parada de registro número 29 el perfil tiene un retroceso.

**Tabla V.8 Sin Gradiente, periodo T = 4 s, H = 16 cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Número de Parada de registro	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	cm
T = 4 s, H = 16 cm	37	6	0.08785
	38	7	0.12042
	39	10	0.10542
	40	30	0.19185
	41	60	0.24852
	42	180	0.19262

Cuando se modeló la altura de ola  $H = 16$  cm, el avance de playa (Tabla V.8) fue menor en comparación con el avance playa registrado para la altura de ola de 12 cm. El comportamiento fue menos estable, es decir existen avances y retrocesos en la playa, hasta los 23 min, después de la parada de registro número 39 el avance de playa de nueva cuenta se incrementa y la formación de una barra en la zona de rotura por parte del oleaje también fue registrada, por lo tanto la barra está colaborando en el avance de playa del perfil en la zona de lavado debido a que parte del sedimento que se pone en suspensión por la rotura de la ola sea acarreado a la zona de lavado.

### V.2 Efectos de un gradiente negativo y positivo al interior de una barrera arenosa

El objetivo principal de esta tesis es determinar el grado de afectación inducido por la diferencia en el gradiente del nivel freático entre un sistema costero y otro lagunar separados por una barrera de arena. El interés parte de entender cómo se modifica el perfil de equilibrio específicamente en la zona de lavado, debido al cambio de la trabazón y fricción del sedimento. El movimiento de sedimento en la zona de lavado genera avances o retrocesos de la playa seca, que en ocasiones puede provocar afectaciones económicas y/o ambientales.

La hipótesis que se planteó, en el caso del **gradiente negativo** o flujo intersticial del mar hacia la laguna, fue que el posible flujo de agua en dirección al lado protegido proporciona una fuerza extra a las partículas de arena y en combinación con la fricción propia del material, el sedimento adquirirá una estabilidad mayor a la que puede tener el sedimento en caso de que no exista dicho flujo.

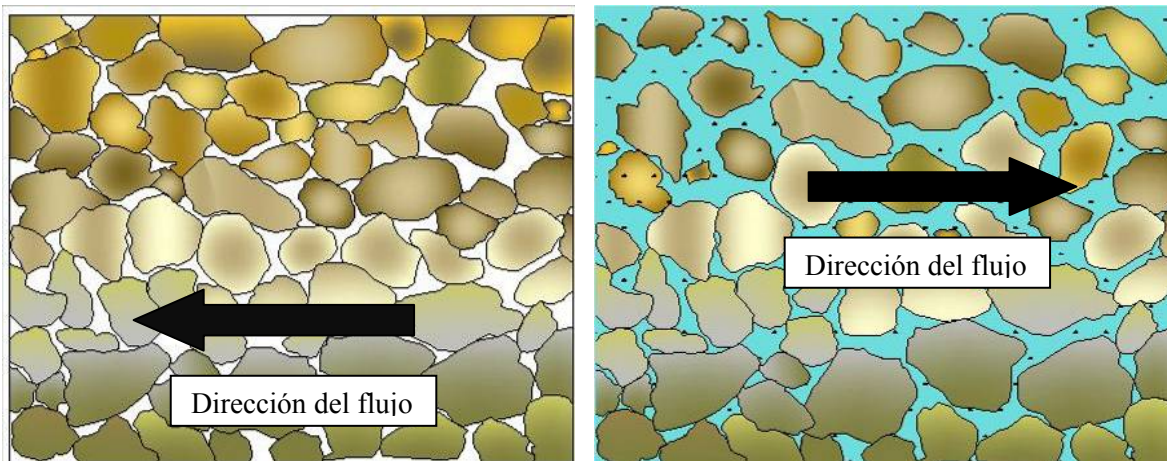


Figura V.15 Sedimento de arena influenciado por la dirección de un gradiente negativo y positivo

El efecto que tiene un **gradiente positivo** de niveles freáticos sobre la arena dentro de la playa es que disminuyen las fuerzas resistentes (fricción y trabazón) y aumenta la capacidad de poner en suspensión a la arena lo que genera, para una misma condición de oleaje, un incremento de la vulnerabilidad por erosión de la playa (Figura V.15).

En la siguiente sección se presentan las diferencias encontradas en los resultados experimentales en el perfil de playa a lo largo de la duración de la prueba (293 min) con el fin de comprobar las hipótesis que se plantearon al inicio de la modelación para las diferentes condiciones de oleaje.

### **V.2.1.1** *Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 1$ s $H = 12$ cm*

Para los fines del presente trabajo, se define a la distribución de diferencias en vertical, como el cambio en el tiempo que tuvo el perfil inicial al concluir la prueba:

$$\delta_i = z_{i+t} - z_i$$

En la Figura V.16 se muestran los resultados de las diferencias obtenidas para las condiciones de gradiente modeladas, con el periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 12$  cm es fácil distinguir la influencia que tiene el **gradiente negativo** en la zona de lavado porque el perfil presenta una acreción en el límite del *up-rush* donde debe estar el *run-up*; en este sentido la poca saturación de agua dentro de la barrera arenosa provoca la infiltración de agua del lado mar al lado protegido en el ascenso sea mucho mayor y en consecuencia el sedimento que es acarreado se logre depositar en esa zona.

Dentro de la zona de lavado también se nota una erosión, aún así el perfil más estable corresponde al **gradiente negativo**. En esta zona erosionada y en la zona del escalón se observa también la influencia del **gradiente positivo** en la que el sedimento es más vulnerable e inestable, cuando incide el oleaje sobre el perfil hace que el sedimento se desplace en dirección contraria a la incidencia del oleaje, lo cual se puede observar en la Figura V.16.

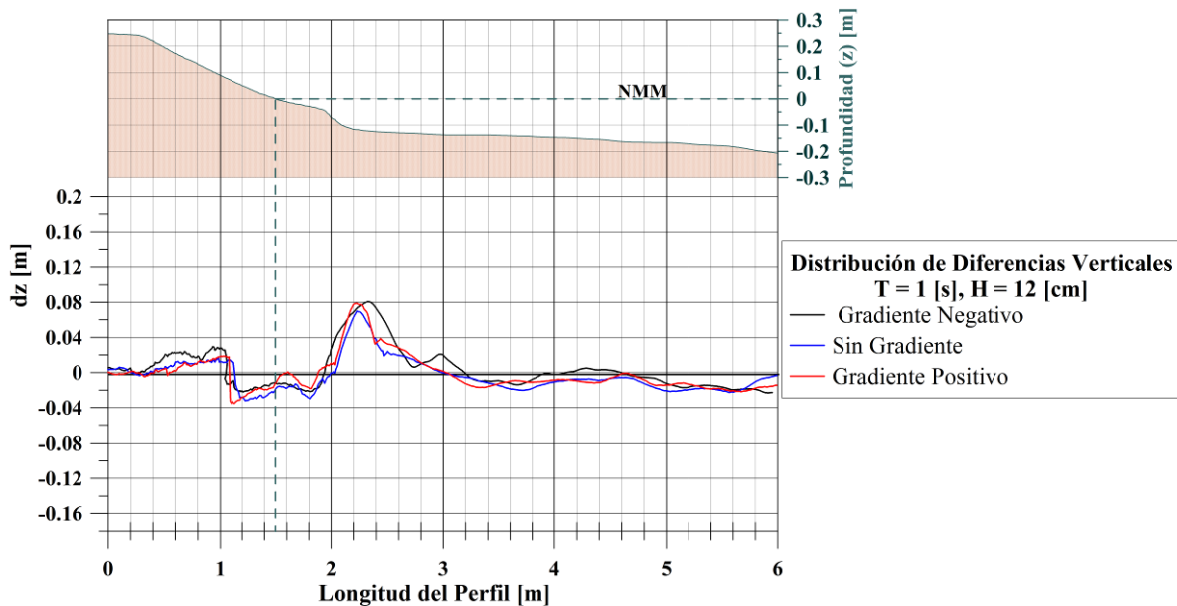


Figura V.16 Distribución de Diferencias Verticales T = 1 s, H = 12 cm

**V.2.1.2 Avance de playa periodo T = 1 s y altura de ola H = 12 cm**

El avance de playa es un tema importante que se debe tener presente en esta tesis, ya que las hipótesis planteadas en un inicio sobre la influencia del gradiente sobre la barrera arenosa, suponen que el movimiento de sedimento en la zona de lavado será el más importante por sus repercusiones en el proceso de acresión y erosión de la playa seca.

El avance de playa se midió en dirección horizontal en la cota vertical que corresponde a los 45 cm ya que en esa cota coincide el nivel de aguas quietas dentro del canal y es el punto de comparación para cuantificar el avance de la playa con relación a esa cota y así valorar la influencia de los gradientes hidráulicos.

$$\Delta y = y_{45} - y_{45+t}$$

$y_{45}$ , es la distancia horizontal en los 45 cm del perfil inicial y  $y_{45+t}$ , es la del perfil final de cada modelación.

## Análisis de Resultados

---

**Tabla V.9 Avance de playa entre los diferentes gradientes T = 1 s, H = 12 cm**

Condiciones de Oleaje ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 1 s, H = 12 cm	Negativo	293	-0.15398
	Sin gradiente	293	-0.18353
	Positivo	293	-0.12507

En la Tabla V.9 se muestran los resultados del avance de playa, para esta condición es claro que el oleaje es erosivo ya que en lugar de que se haya registrado un avance existe un retroceso en la playa, el mayor retroceso se registró en el caso **Sin gradiente**. El valor del avance de playa para la condición de **Gradiente negativo** se debe a que el sedimento se colocó en la parte seca de la playa en el límite del *up-rush*.

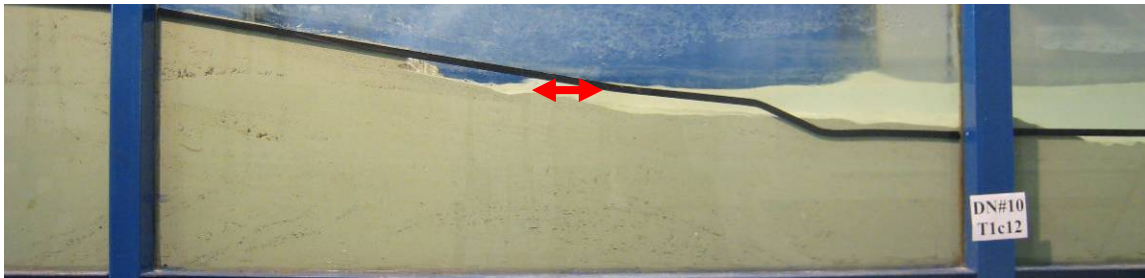
El valor para la condición de **Gradiente positivo** se debe a la fluidización que existe en el sedimento, lo que hace que el sedimento se desplace en dirección contraria a la incidencia del oleaje.



a) Gradiente Negativo



b) Sin Gradiente



c) Gradiente Positivo

Figura V.17 Perfiles finales,  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm

### V.2.1.3 Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 1$ s $H = 16$ cm

En la siguiente Figura V.18 se muestran las diferencias obtenidas entre los gradientes modelados para el perfil final, es de resaltar el movimiento de sedimento que se presenta en el escalón del perfil, en donde se debe de presentar movimiento de sedimento de la zona de rotura y de la zona de lavado que se deposita en el escalón en este sentido existe un equilibrio entre la reflexión y la incidencia del oleaje.

El **gradiente negativo** en la zona de lavado es también el que presenta mayor estabilidad y el que representa una mayor acreción de sedimento en esa zona, aunque también se registró

una erosión, de la Figura V.19 se puede observar que no es de la misma dimensión que la que se tuvo cuando se modeló la altura de ola de 12 cm.

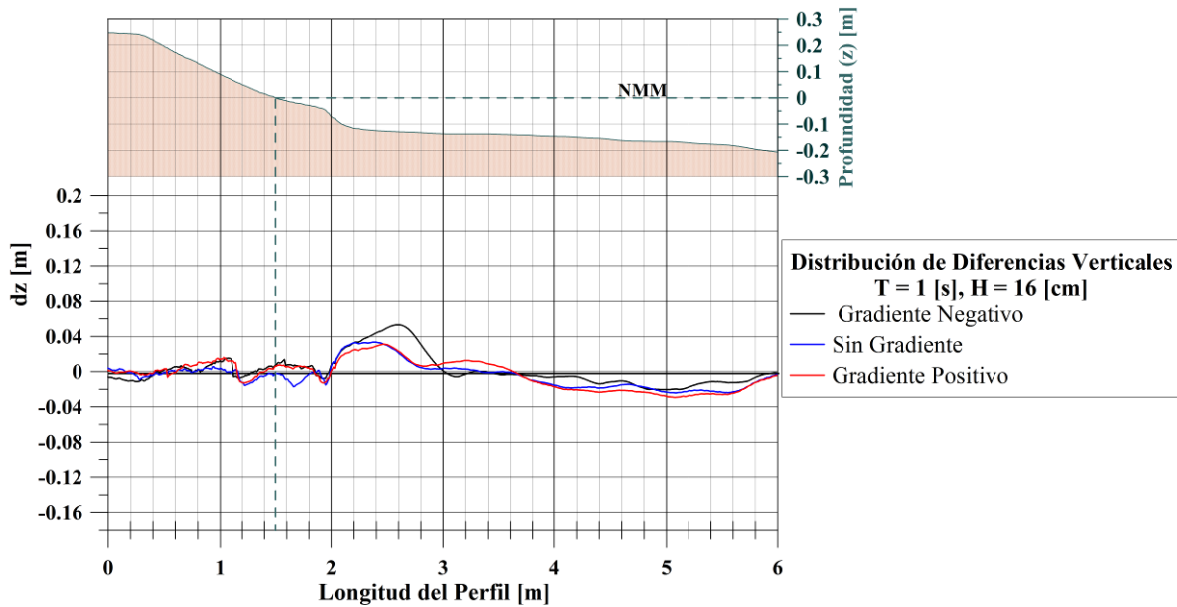


Figura V.18 Distribución de Diferencias Verticales  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm

**V.2.1.4 Avance de playa periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

En la Tabla V.10 se presentan los registros del avance de playa, de los cuales se puede verificar que el **gradiente negativo** resulta ser menos erosionado por el oleaje dada la propiedad que adquiere el sedimento con ese gradiente. Los resultados que se obtuvieron para los perfiles de **Sin gradiente** y de **Gradiente positivo**, tienen ese valor también por la influencia del gradiente, el avance de playa máximo que se registró es el de la condición de **gradiente positivo**, en este caso el punto de exfiltración en la cara de la playa debe estar por debajo de la cota a los 45 cm lo que provocó que el perfil se vuelva inestable a la incidencia del oleaje.

Tabla V.10 Avance de playa entre los diferentes gradientes  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	cm
T = 1 s, H = 16 cm	Negativo	293	0.08685
	Sin gradiente	293	-0.01815
	Positivo	293	0.11810



a) Gradiente Positivo



b) Sin Gradiente

Figura V.19 Perfiles finales,  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm

### V.2.1.5 Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 2$ s $H = 12$ cm

En el periodo de  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 12$  cm, se puede apreciar que aparece una barra en la zona de rotura y que existe una depositación de sedimento cerca de la zona de lavado. El sedimento depositado debió haber sido acarreado de la zona de rotura. También se puede observar, en la Figura V.19, que los perfiles en la zona seca son muy semejantes entre ellos, aunque el perfil de la condición de **Gradiente negativo** presenta una acumulación de sedimento en la zona de lavado diferente a la de los otros perfiles, esta acumulación se caracteriza por ser más extensa, también se observa que la erosión que se presenta en el escalón es menor a la de los otros gradientes. En los límites del *run up*, la acumulación de sedimento es menor en comparación con los perfiles de **Sin gradiente** y **gradiente positivo**.



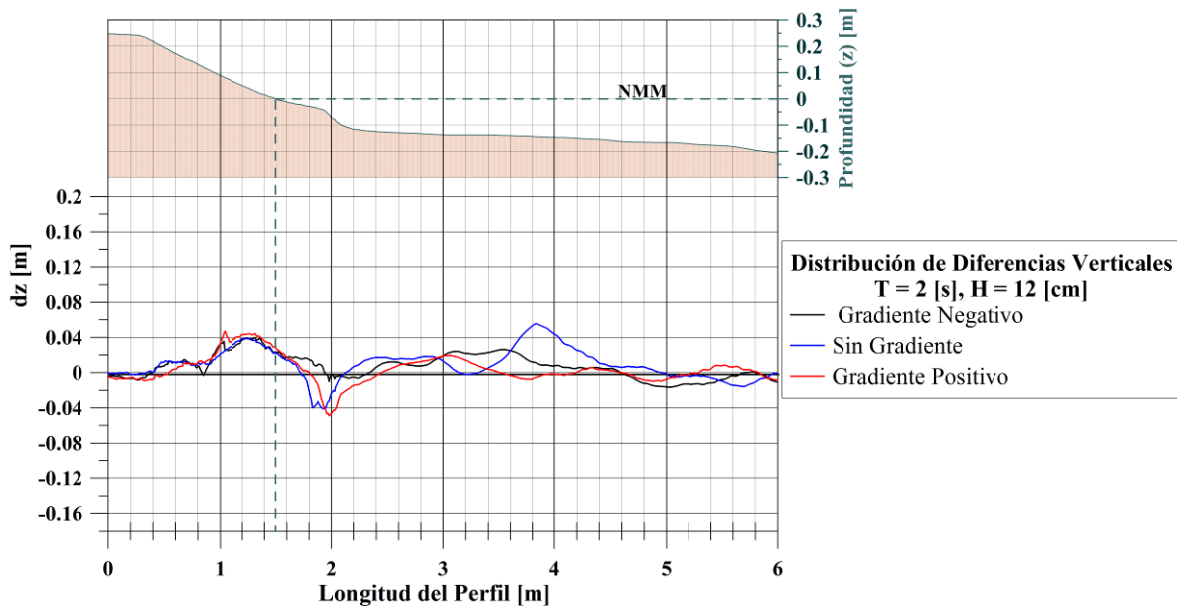


Figura V.20 Distribución de Diferencias Verticales  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm

#### V.2.1.6 Avance de playa periodo $T = 2$ s y altura de ola $H = 12$ cm

El avance de playa calculado en los perfiles finales se resume en la Tabla V.11, de la cual se observa que el mayor avance de playa se registró en la condición de **gradiente negativo**. El menor avance de playa que se midió fue para la condición **sin gradiente**, se puede inferir que el cambio en el perfil de la playa se ve influenciado por el gradiente modelado, ya que para los perfiles finales de **gradiente positivo y negativo**, se puede observar que tienen un avance de playa mayor al avance registrado por la condición de **sin gradiente**.

El avance de playa entre los tres casos es dependiente de la aparición de una barra en la zona de rotura, así, se tiene que para el caso de **sin gradiente** en la Figura V.22 se puede observar la dimensión de la barra la cual disipa la energía del oleaje. En los casos de **gradiente positivo y negativo** la dimensión de la barra es menor y no tiene el mismo efecto sobre el oleaje que con la condición de **sin gradiente**.

## Análisis de Resultados

**Tabla V.11 Avance de playa entre los diferentes gradientes T = 2 s, H = 16 cm**

Condiciones de Oleaje ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 2 s, H = 12 cm	Negativo	293	0.15863
	Sin gradiente	293	0.11542
	Positivo	293	0.12950

El avance de playa en los tres casos es diferente, las principales causas son la aparición de una barra en la zona de rotura y la influencia del gradiente creado entre la zona protegida y la zona expuesta al oleaje, la barra tiene la capacidad de disipar la energía del oleaje y por lo tanto la deformación en el perfil debe ser mínima, en el caso del gradiente la estabilidad del sedimento depende de la dirección en que actúe el gradiente.



**a) Gradiente Negativo**



**b) Sin Gradiente**



**c) Gradiente Positivo**

Figura V.21 Perfiles finales,  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm

**V.2.1.7 Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo  $T = 2$  s  $H = 16$  cm**

En la modelación del periodo  $T = 2$  s y la altura de ola  $H = 16$  cm también aparecen barras, la diferencia que existe con la modelación de la altura de ola de 12 cm, es que la dimensión de la barra es muy semejante. El cambio relevante es en la posición donde aparece, lo que también tiene influencia en la disipación de energía y por ende en el avance de playa del perfil final.

De la Figura V.22 se puede observar que el perfil tiene una gran deformación en la zona de rotura y en la zona de lavado el perfil presenta una acreción. Cuando se modeló el **gradiente negativo** el perfil final presenta una acreción en la zona más alta del perfil en donde tiene más influencia la dirección del gradiente para la depositación de sedimento cuando se presenta el ascenso de la ola sobre la pendiente de la zona de lavado.

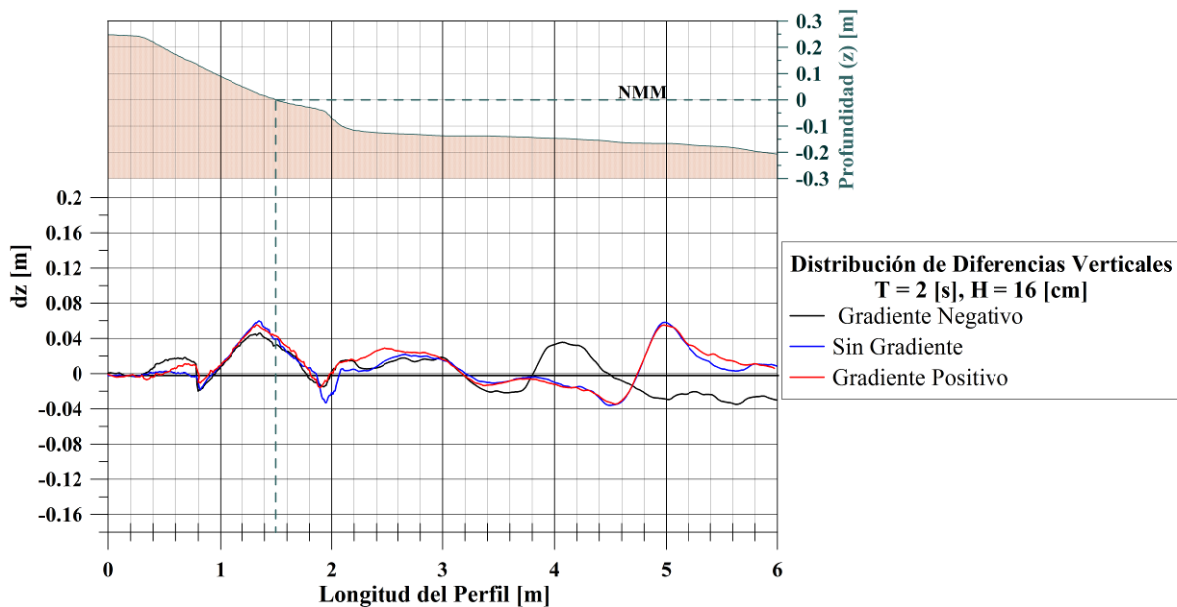


Figura V.22 Distribución de Diferencias Verticales  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm

El avance de playa que se registró (Tabla V.12) cuando se modeló el **gradiente negativo** fue mayor que en los casos de **gradiente positivo** y **sin gradiente**, esto hace suponer que el **gradiente negativo** combinado con esta condición de oleaje tiene una tendencia a hacer la pendiente del perfil más tendido, pero ganando material y provocando un avance de playa.

La deformación del perfil en el escalón es más significativa en el caso del **gradiente positivo**, esto porque la dirección va hacia la zona expuesta a la acción del oleaje,

## Análisis de Resultados

combinada con la fluidización provocan que el sedimento sea menos estable en el perfil la barra está más cercana a la pendiente de la zona de lavado que la barra que se creó para el **gradiente positivo y sin gradiente**.

**Tabla V.12 Avance de playa entre los diferentes gradientes  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
$T = 2$ s, $H = 16$ cm	Negativo	293	0.17593
	Sin gradiente	293	0.16519
	Positivo	293	0.16711

En la Figura V.23 se puede observar la deformación en el perfil para el **gradiente negativo**



**a) Gradiente Negativo**



**b) Gradiente Positivo**

**Figura V.23 Perfiles finales,  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm**

### **V.2.1.8 Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 3$ s $H = 12$ cm**

En la Figura V.24 se presentan las diferencias verticales para un periodo  $T = 3$  s y una altura de ola  $H = 12$  cm, en esta modelación el perfil presenta una erosión en la zona de rotura debido al periodo. La deformación del perfil en dicha zona creó una barra en el perfil

final, de las Figura V.25 se entiende que el sedimento que existía en la zona de rotura, el oleaje lo acarreoó y se depositó en la zona de lavado.

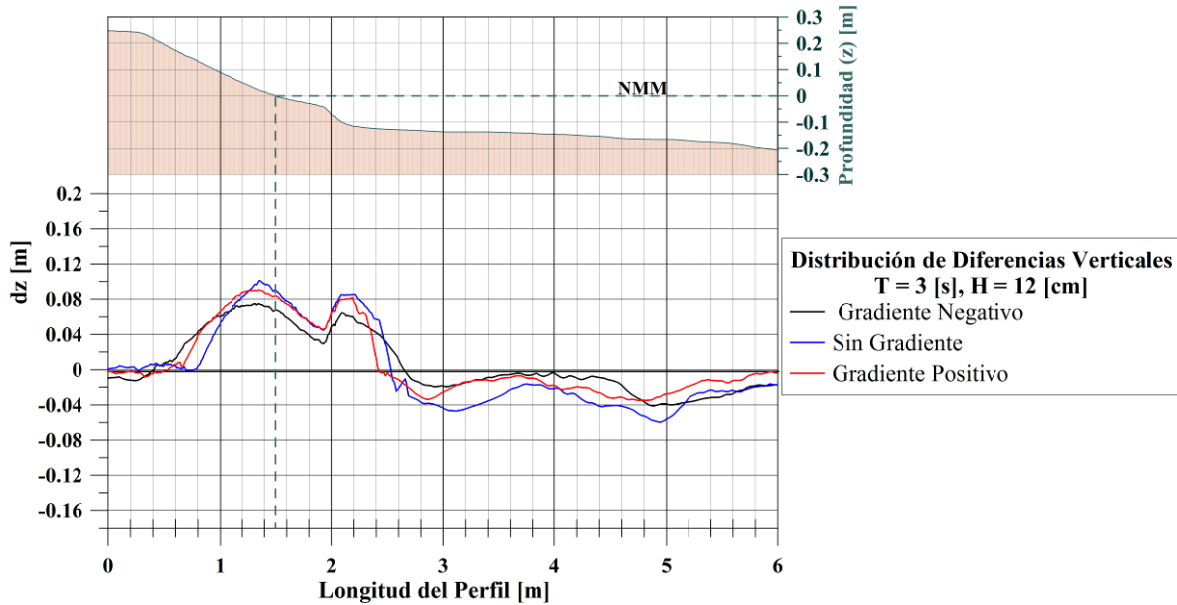


Figura V.24 Distribución de Diferencias Verticales T = 3 s, H = 12 cm

El avance de playa registrado en esta combinación de periodo y altura de ola indica acreción en la zona de lavado. En el caso del **gradiente negativo** se puede observar que existe una depositación de material en el límite del *run-up* aunque, en la zona de lavado sumergida, la acreción de sedimento es menor a los casos de **sin gradiente** y de **gradiente positivo**. En la Tabla V.13 se presentan los registros del avance de playa, el avance que corresponde al **gradiente negativo** es menor a los de **gradiente positivo** y **sin gradiente**. El gradiente positivo parece que no tiene mucha influencia sobre el perfil de la playa, ya que en la Tabla V.13 se distingue que el avance de playa es muy semejante a la condición de **sin gradiente**.

Tabla V.13 Avance de playa entre los diferentes gradientes T = 3 s, H = 12 cm

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente min	Avance de Playa cm
T = 3 s, H = 12 cm	Negativo	293	0.36463
	Sin gradiente	293	0.45114
	Positivo	293	0.45252

## Análisis de Resultados

---

En la Figura V.25 se muestran las semejanzas que existen entre los perfiles finales de **gradiente positivo** y **sin gradiente**, de la misma manera se puede observar que la acumulación de sedimento para el **gradiente negativo**, es mayor en la zona más alta del perfil y que la acumulación a lo largo de la zona de lavado es menor a la acumulación registrada en los casos de **sin gradiente** y **gradiente positivo**.



a) Gradiente Negativo

---



b) Sin Gradiente

---



c) Gradiente Positivo

Figura V.25 Perfiles finales,  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm

### V.2.1.9 Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 3$ s $H = 16$ cm

En la Figura V.26 se puede observar los efectos del gradiente en la zona de lavado, aunque la combinación de oleaje que se modeló también favorece la acreción en la zona de lavado, lo que se puede verificar es que el perfil que corresponde al **gradiente negativo** presenta

## Análisis de Resultados

una mayor acreción en comparación al perfil que está en donde se supone debe estar el *run-up* de la ola que es ahí donde la dirección del gradiente beneficia al perfil. En el caso de las variaciones del perfil que corresponde al perfil positivo la acreción mayor se observa en la zona del escalón. A esa zona se le atribuye la influencia de la dirección del **gradiente positivo** que hace más inestable al sedimento y favorece la acreción de esa zona independientemente a la combinación de oleaje que este incidiendo sobre el perfil de la playa.

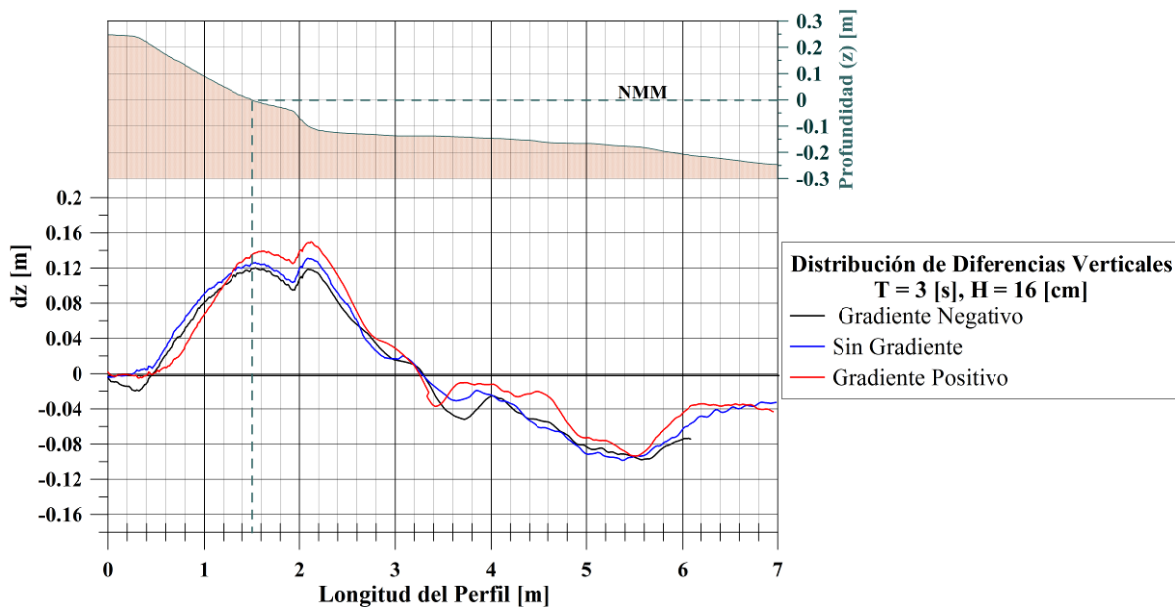


Figura V.26 Distribución de Diferencias Verticales  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm

Tabla V.14 Avance de playa entre los diferentes gradientes  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm

Condiciones de Oleaje ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	Avance de Playa
		min	m
T = 3 s, H = 16 cm	Negativo	293	0.68711
	Sin gradiente	293	0.74623
	Positivo	293	0.83635

El avance de playa más grande de todos es el **gradiente positivo**, la diferencia que existe con el perfil de **gradiente negativo** es de 15 cm, y la acreción máxima en vertical es aproximadamente de 3 cm, para esta combinación de oleaje el avance de playa se ve favorecido cuando la dirección del gradiente es la positiva, sin embargo el perfil en el límite del *run-up* presento una mayor acreción cuando la dirección del gradiente era negativa.



a) Gradiente Negativo



b) Sin Gradiente



c) Gradiente Positivo

Figura V.27 Perfiles finales,  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm

### V.2.1.10 *Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 4$ s $H = 12$ cm*

Las variaciones verticales del perfil inicial contra el perfil final de los escenarios de **Gradiente negativo, positivo y sin gradiente** se muestran en la Figura V.28. En el caso del **gradiente negativo** se distingue que en la zona de lavado la acreción de sedimento es favorable en comparación al **gradiente negativo**, pero menor en comparación con las diferencias de la condición de sin gradiente. Cuando la dirección del gradiente fue positiva, la acreción en la zona del escalón es en longitud y magnitud más grande a la acreción que se obtuvo para las condiciones de **gradiente negativo y sin gradiente**.



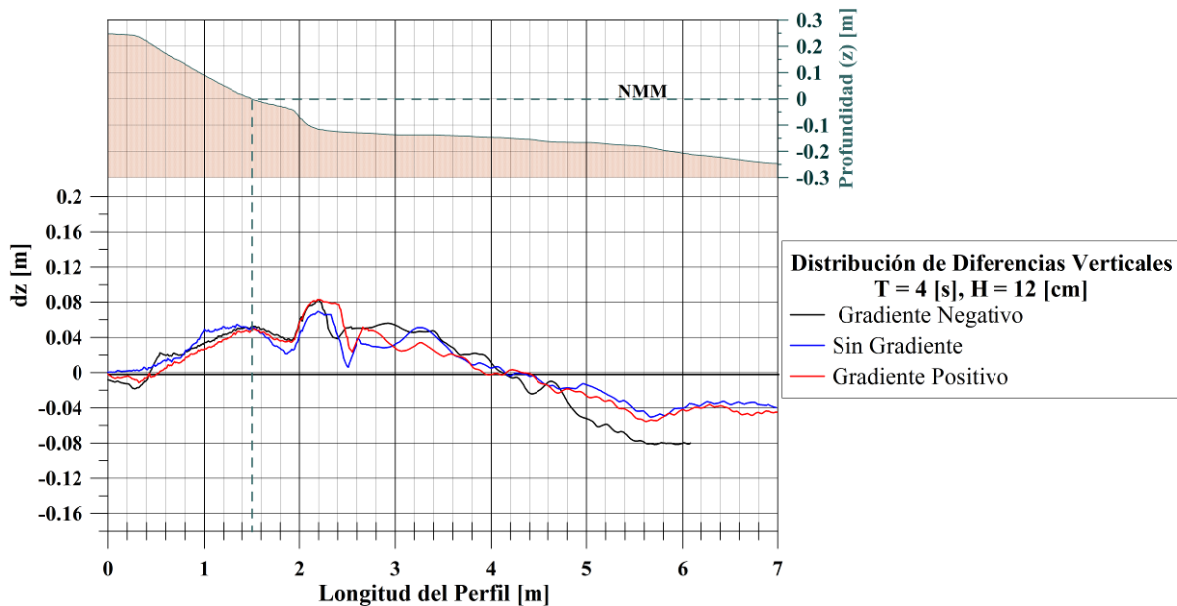


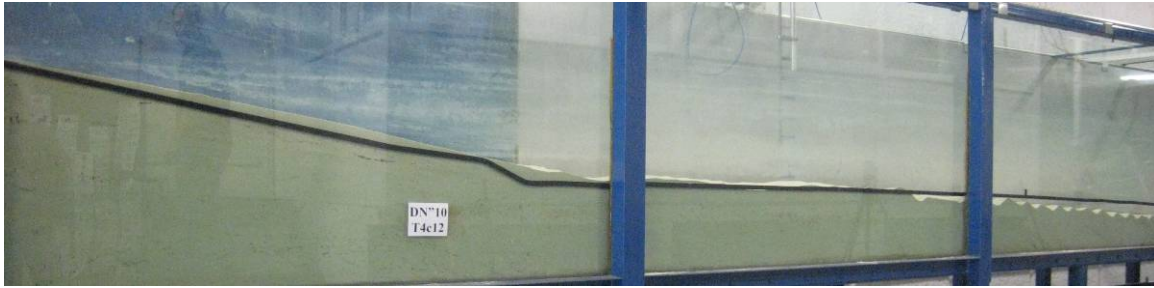
Figura V.28 Distribución de Diferencias Verticales T = 4 s, H = 12 cm

El avance de playa para los tres escenarios se resume en la Tabla V.15, los avances de playa que corresponden a las direcciones de los **gradientes positivo y negativo** son muy semejantes, esto significa que la dirección del gradiente en la zona del perfil donde se midió no es tan influyente, porque los valores son muy semejantes, en estos casos para diferenciar entre los posibles efectos de la dirección del gradiente se deben considerar la zona seca y la zona sumergida del perfil, porque es en esas zonas donde se observa la mayor influencia del gradiente.

Tabla V.15 Avance de playa entre los diferentes gradientes T = 4 s, H = 12 cm

Condiciones de Oleaje ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente	
		min	Avance de Playa m
T = 4 s, H = 12 cm	Negativo	293	0.38801
	Sin gradiente	293	0.29102
	Positivo	293	0.37185

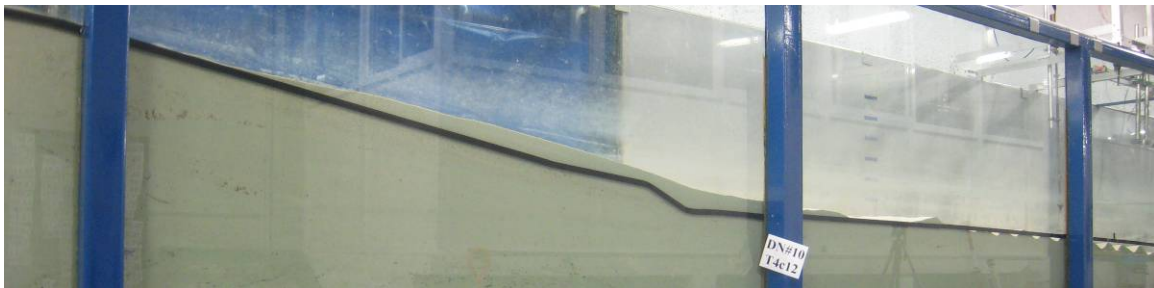
En la Figura V.29, se muestran los perfiles finales de los escenarios modelados, claramente se puede observar que la acreción para el **gradiente negativo** es menor a la acreción registrada en los casos del **gradiente positivo y sin gradiente**, sin embargo, el perfil de la condición de **gradiente negativo** tiene sedimento en la parte más alta, tal como se aprecia en la Figura V.28.



a) Gradiente Negativo



b) Sin Gradiente



c) Gradiente Positivo

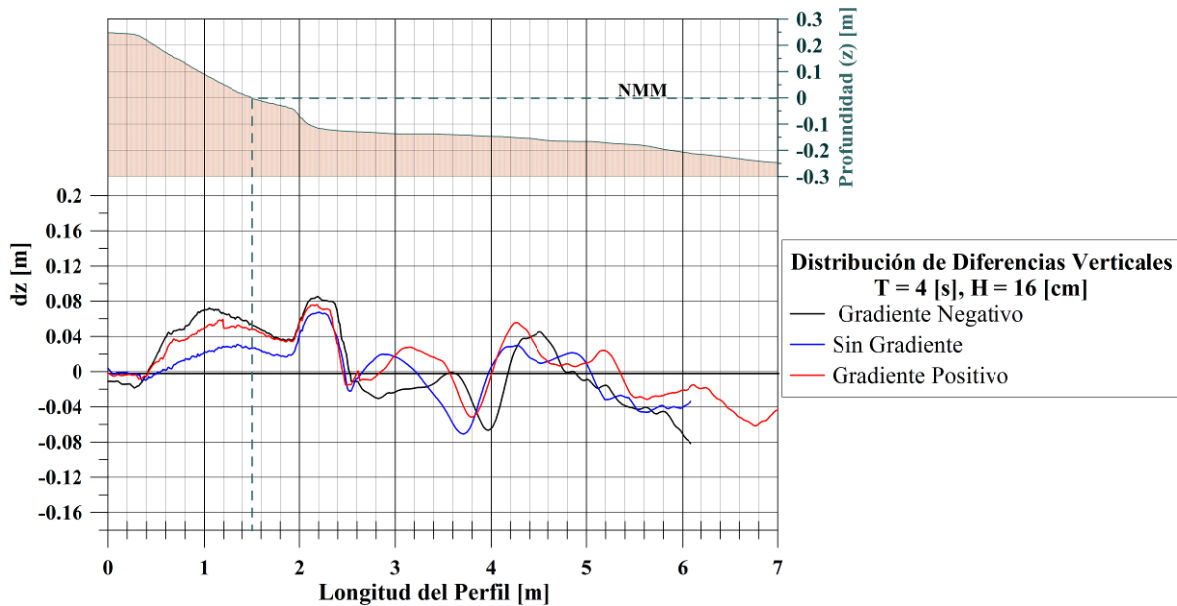
Figura V.29 Perfiles finales,  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm

### V.2.1.11 *Distribución de diferencias verticales en el tiempo, periodo $T = 4$ s $H = 16$ cm*

En la Figura V.30 se observan las diferencias verticales calculadas para cada perfil final de las condiciones de gradiente modeladas, la mayor acreción que se calculó corresponde a la condición de **gradiente negativo** y se presenta en el límite del *run-up* en la zona de lavado. Existe una semejanza entre los perfiles de **gradiente positivo** y **negativo**, justo en donde se encuentra el escalón en el perfil inicial, este punto se puede definir como la zona en donde no tiene influencia la dirección del gradiente, ya que la respuesta morfodinámica es muy semejante para ambas direcciones.

## Análisis de Resultados

En la Figura V.30 también se puede observar el comportamiento del perfil en la zona de rotura, el cual en todos los escenarios modelados presenta una serie de barras y canales debidos principalmente a la acción del oleaje.



**Figura V.30 Distribución de Diferencias Verticales T = 4 s, H = 16 cm**

El avance de playa que se registró se resume en la Tabla V.16. Los avances de playa para las modelaciones de **gradiente negativo** y **positivo**, son muy semejantes y son mayores que para la condición de **sin gradiente**, esto quiere decir que la influencia del gradiente ya sea en dirección negativa o positiva al combinarse con este oleaje, la tendencia es acresiva.

**Tabla V.16 Avance de playa entre los diferentes gradientes T = 4 s, H = 16 cm**

Condiciones de Oleaje Ensayadas	Gradiente	Duración del tren de olas incidente min	Avance de Playa m
T = 4 s, H = 16 cm	Negativo	293	0.37647
	Sin gradiente	293	0.19262
	Positivo	293	0.36102

En la Figura V.31, se presentan en serie las fotografías de los perfiles finales de cada condición de gradiente, en esa serie se puede observar la semejanza entre los perfiles de las condiciones de gradiente positivo y **negativo**.

## Análisis de Resultados

---



a) Gradiente Negativo



b) Sin Gradiente



c) Gradiente Positivo

Figura V.31 Perfiles finales,  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm



CAPÍTULO

**Discusión, Conclusiones y  
Futuras Líneas de Investigación**



## **VI. Discusión, Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación**

### **VI.1 Discusión de la tesis**

El desarrollo experimental para la realización de esta tesis permitió obtener resultados de un perfil de playa, sometido a un gradiente de niveles freáticos de 10 cm entre el lado expuesto al oleaje y el lado protegido por una barrera arenosa. Las direcciones del gradiente se definieron como positiva cuando el nivel de agua en el lado protegido es mayor que el nivel de aguas quietas en el lado expuesto a la acción del oleaje y negativa cuando el nivel del lado expuesto a la acción del oleaje es mayor al nivel de agua del lado protegido.

La modelación de las dos direcciones del gradiente, hizo posible la comparación del efecto que tienen en el perfil final de la playa. Modelar sólo una dirección no permitiría hacer un buen análisis comparativo de los efectos del oleaje y la respuesta morfodinámica del perfil inicial, aunque la hipótesis planteada resultará cierta, ya que implícitamente estaría la incertidumbre del efecto de la dirección contraria.

La modelación de un gradiente con dirección negativa tiende a hacer acresiva la zona donde está el límite del *run-up* en la zona de lavado y en el caso contrario, cuando la dirección del gradiente es positiva, el perfil tiene también una acresión, pero en la zona del escalón por debajo del nivel de aguas quietas en el lado expuesto al oleaje.

Los resultados hasta ahora obtenidos, dan la pauta para seguir investigando el efecto que tienen las direcciones de un gradiente sobre el perfil de una playa, la importancia de seguir esta línea de investigación radica en el peso económico y ambiental que representa tener un avance de playa benéfico sin hacer intervenir una estructura sobre el perfil de la playa, siempre y cuando la duna de la playa tenga material disponible para ser transportado transversalmente hacia la zona expuesta al oleaje.

La ejecución de modelaciones con gradientes de magnitud grande, es una opción para proporcionar más herramientas sobre el efecto que se tiene en el avance de playa y en la acresión de sedimentos o bien en la erosión. De la modelación desarrollada para esta tesis se pueden planear la conveniencia de complementar las modelaciones realizadas con el fin de entender mejor los procesos en la zona de lavado y en el límite del *run-up*,



principalmente los periodos de 1 y 2 s ya que para estos periodos el efecto del oleaje no es constructivo como el caso de los periodos de 3 y 4 s.

En los periodos más largos, 3 y 4 s, aparecen barras a lo largo de la zona de rotura, el comportamiento temporal que pueden tener estas barras, hace suponer en una posible relación con las direcciones del gradiente y hasta con la magnitud del gradiente, por lo tanto éste tema está pendiente.

### VI.2 Conclusiones

Con base en los resultados experimentales, se ha comprobado la importancia relativa que tiene el efecto de los flujos asociados a un gradiente inducido por la diferencia en el nivel freático dentro del medio poroso que conforma una playa de arena. En particular:

La deformación a lo largo del perfil de la playa es función de las condiciones de oleaje incidente y a su vez es relación de la reflexión y disipación de oleaje; es decir que para un oleaje poco energético incidiendo sobre un perfil de playa con pendiente suave, los parámetros de reflexión y disipación se relacionan con la deformación que se presenta en la zona de lavado. Cuando el oleaje es altamente energético, las deformaciones del perfil se encuentran principalmente en la zona de rotura, en estos casos es normal que se creen formas bidimensionales sobre el perfil que al paso del tiempo pueden llegar a formar barras, en estos casos la reflexión y disipación se relacionan con la zona de rotura.

El tamaño de las barras creadas y la deformación de la zona de rotura, debidas al oleaje, es evidente en los resultados de las modelaciones experimentales, las que tienen que ver con los flujos asociados al gradiente presentan diferencias entre ambas.

La combinación entre la creación de una barra y el avance de playa para un oleaje constructivo, como fue el de un periodo de 2 s, hace que el incremento de la playa se vea favorecido. Esto se debe a que la barra disipa energía y parte de la ola que asciende sobre la pendiente de la zona de lavado lleve sedimento a la parte alta de la playa, mismo que el flujo de descenso, que no es tan violento, no es capaz de mover de regreso hacia el mar y por tanto se deposite en los límites del *run-up*.

Cuando la dirección del flujo es positiva las dimensiones de la barra son mayores y su posición es más alejada de la zona de lavado, que las correspondientes a la dirección de flujo negativa, en estos casos la reflexión provocada por la pendiente de la zona de lavado

tiende a disminuir, la rotura del oleaje es más violenta, éstos factores y la dirección del flujo provocan que se acarre sedimento, favoreciendo la erosión de la zona de lavado.

La dirección del gradiente influye en la estabilidad del sedimento, en el caso del periodo de 1 s la deformación en el perfil es sobre la zona de lavado, cuando se modeló la altura de ola de 12 cm la influencia de la dirección negativa del gradiente sobre la zona de lavado se puede observar claramente, ya que hay una depositación de sedimento mayor a la que se logró cuando la dirección del gradiente era positiva, en ese mismo caso existió una erosión también en la zona de lavado, en la cual también es posible detectar la influencia del flujo en la dirección positiva.

En general, para cualquier periodo es posible detectar la influencia que tienen las direcciones de un gradiente sobre el reacomodo del sedimento en la zona de lavado, ya que por ejemplo se puede detectar la zona de exfiltración. Lo ideal es que dicha zona se encuentre por debajo del nivel de aguas quietas, así la erosión por arriba de dicho nivel será mayor y se favorecerá la depositación de sedimento debajo del nivel de aguas quietas. La infiltración sobre la cara de la playa está por encima del nivel de aguas quietas, por lo tanto la depositación de sedimento en los límites del *run-up* se verá favorecida.

Con los resultados y de las Figuras de las Distribuciones de Diferencias Verticales, es posible determinar las zonas de exfiltración e infiltración. La zona de exfiltración se define como la zona en donde se produce el cruce entre las diferencias de **gradiente positivo** y **gradiente negativo** además de que las diferencias de **gradiente positivo** son mayores a las de **gradiente negativo**.

La zona de Infiltración es la zona anterior al cruce que define a la zona de Exfiltración.

### VI.3 Futuras Líneas de Investigación

Al concluir esta tesis han quedado importantes líneas de investigación inconclusas y otras se encuentran en bosquejos para seguir investigando la influencia del gradiente de flujo intersticial debido a diferentes niveles medios del agua en la zona costera y la parte terrestre, en particular:

Queda por definir el nivel de disipación de energía del oleaje inducido por la formación de barras y de qué manera influyen en el avance de playa.

Con los datos hasta ahora obtenidos solo se puede estimar para un tipo de arena las tasas de deformación en la zona de lavado para cada dirección del gradiente, con otros tamaños de sedimento se podrán establecer de manera más general los estados generales de vulnerabilidad para otros tipos de playa cuando éstas estén sometidas a variaciones del nivel freático.

## VII. Referencias y Fuentes de Información

- Airy, G.B., 1845. Tides and waves. *Encyc. Metrop.*, 192, 241-396 pp.
- Bagnold, R.A., 1940. Beach formation by waves; some model-experiments in a wave tank. *Journal of the Institute of Civil Engineers*, 15: 27-53.
- Beresford, P.J. HR Wallingford. 2003. HR Wavemaker Wave generation control program, Software Manual. *Issue 5*.
- Beresford, P.J. Spencer, J.M.A. and Clarke, J. HR Wallingford. 2003. HR WaveData Data acquisition and analysis software program, User Manual. *Report IT 493*.
- Boussinesq, J., 1872. Theories des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement paralleles de la surface au fond. *J. Math. Pures Appliques*. Ser. 2, 17, 55-108 pp.
- Bruun, P., 1954. *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*. Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Technical Memorandum, 44:1-79 pp.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *American Society of Civil Engineering Proceedings, Journal of Waterways and Harbors Division*, 88: 117-130 pp.
- Chappell, J. 1978. On process-landform models from Papua New Guinea and elsewhere, In "Landform Evolution in Australasia." 348-361 pp.
- Cowell, P.J. and Thom, B.G., 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: R.W.G. Carter and C.D. Woodrofe. *Coastal evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge. 33-86 pp.
- Dana, J.D., 1849. Report of the United States Exploring Expedition 1838-1842, *Geology*, Volume 10. C. Sherman, Philadelphia, 759 pp.
- Dean, R.G., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. In: *Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Proceedings of the First Australian Conference on Coastal Engineering*. Institution of Engineers, Australia, Sydney, 208-214 pp.
- Dean, R.G., 1977. *Equilibrium Beach Profiles: US Atlantic and Gulf Coast Ocean*, University of Delaware, Engineering Report. No.12.

- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7: 53-84 pp.
- Dean, R.G., and Oh, T., 1992. Beach face dynamics as affected by ground water table elevations. Gainesville, FL. University of Florida. Department of Coastal and Oceanographic Engineering, (UFL/COEL,92/004)
- Dominick, T. F., Wilkins, B., and Roberts, H. 1971. Mathematical model for beach groundwater fluctuations. *Water Resour. Res.* 7, 1626-1635 pp.
- Emery, K.O. and Foster, J.F., 1948. Water table in marine beaches. *J. Mar. Res.* 7: 644-654.
- Ericksen, N.J., 1970. Measurement of tide induced change to water table profiles in coarse and fine sand beaches along Pegasus Bay. Canterbury. *Earth Sci. J.* 4. 24-31 pp.
- Fang, C.S., Wang, S. N., and Harrison, W. 1972. Groundwater flow in a Sandy tidal beach, dimensional finite element analysis. *Water Resour. Res.* 8, 121-128 pp.
- Galvin, C.J. 1972. Wave Breaking in Shallow water. In: R.E. Meyer *Waves on Beaches*. Academic Press, New York, 413-456 pp.
- Gerstner. F., 1802. Theory der Wellen. Abhandlungen der koniglichen bomischen Gessellschaft der Wissenschaften, Prague.
- Grant, U.S., 1948. Influence of the water table on beach aggradation and degradation. *J. Mar. Res.* 7, 655-660 pp.
- Hardisty, J., 1990a. Terminal velocity of a falling sphere. *GeoSystems Library*, SD-12.
- Hsu, J.R.C., and Evans C., 1989. Parabolic bay shapes and applications. Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, Vol. 87 (Part 2), 556 – 570 pp.
- Kotvojs, F.J. and Cowell, P.J., 1991. Refinement of the Dean profile model for beach design. *Australian Civil Engineering Transactions, Institute of Engineers Australia*, CE33: 9-15.
- Harrison, W., Fang, C.S., and Wang, S, N. 1971. Groundwater flow in a sandy tidal beach dimensional finite element analysis. *Water Resour. Res.* 7, 1313-1322 pp.
- Hutton, H., 1788. Theory of the earth; ora n investigation of the laws observable in the composition, dissolution and restoration of land upon the globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1: 209-397.
- Iribarren, R. and Nogales. C. 1949. Protections des ports. *17<sup>th</sup> Int. Naval Cong.*, Lisbon, Section II-4. 31-82 pp.

- Johnson, D. W., 1919. *Shore Processes and Shoreline Development*. Prentice Hall, New York, 584 pp.
- Komar, P.D., 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. First Edition. Prentice Hall, New Jersey, 429 pp.
- Korteweg, D.J. and de Vries, G., 1895. On the Change of Form of Long Waves Advancing in a Rectangular Canal, and on a New Type of Long Stationary Waves. *Philosophical Magazine*(39): 422-443.
- Leica TPS400/TPS410C series. 2003.
- Le Méhauté, B., 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer-Verlag.
- Lomonosov, M.V., 1759. On the layers of the earth.
- Machemehl, J.L. French, T.J. and Huang, N.E. 1975. New method for beach erosion control, *Proc. Civil Engineering in the Oceans, III*, ASCE, University of Delaware, 142-160 pp.
- McCowan, J., 1894. On the highest wave of permanent type. *Philosophical Magazine, Series 5*, 38: 351-357.
- Masselink, G., and Turner, I.I., 1999. The effect of tides on beach morphodynamics in Short, A.D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons. Ltd. 204-229 pp.
- Nielsen, P., 1998. Coastal groundwater dynamics. *Proc. Coastal Dynamics '97*, ASCE, 546-555 pp.
- Playfair, J., 1802. *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*. Dover, New York, 528 pp.
- Rayleigh, L., 1876. On waves. *Phil. Mag.*, 5, 1. 257-279 pp.
- Rayleigh, L., 1877. On progressive waves. *Proc. Lond. Math. Soc.*, 9, 21-26 pp.
- Reynolds, O., 1877. On the rate of progression of groups of waves and the rate at which energy is transmitted by waves. *Nature*, 36, 343-344 pp.
- Russell, J.S., 1844. Report on Waves. 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science. 311-390 pp.
- Sherman, D.J., 1995. Problems of scale in the modelling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology*, 124: 339-349.

- Silva, R. 2005., Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, serie de docencia. SD/49.
- Sonu, C.J. and van Beek, J.L., 1971. Systematic beach changes on the Outer Banks, North Carolina. *Journal of Geology*, 79: 416-425 pp.
- Stokes, G.G., 1847. On the Theory of oscillatory waves. Trans. Camb. Phil. Soc., 8 pp.
- Stokes, G.G., 1880. On the Theory of oscillatory waves. Math. Phys. Papers I. London. 197-229 pp.
- Turner, I.L., 1993b. Water table outcropping on macro-tidal beaches: A simulation model. *Mar. Geol.*, 115: 227-238.
- Turner, I.L., Leatherman, S.P., 1997. Beach dewatering as a soft engineering solution to coastal erosion; A history and critical review, J. Coastal Res.
- Nortek AS. 2009.
- Wolman, M.G. and Miller, J.P., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68: 54-74.
- Wright, L.D. and Thom, B.G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 1:412-459.
- Wright, L.D. and Short, A.D., 1983. Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. In: P.D. Komar, *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press, Boca Raton, 35-64 pp.
- Wright, L.D. and Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118 pp.

## VIII. Anexo A Gráficas

### VIII.1 Sin Gradiente

#### VIII.1.1 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 12$ cm

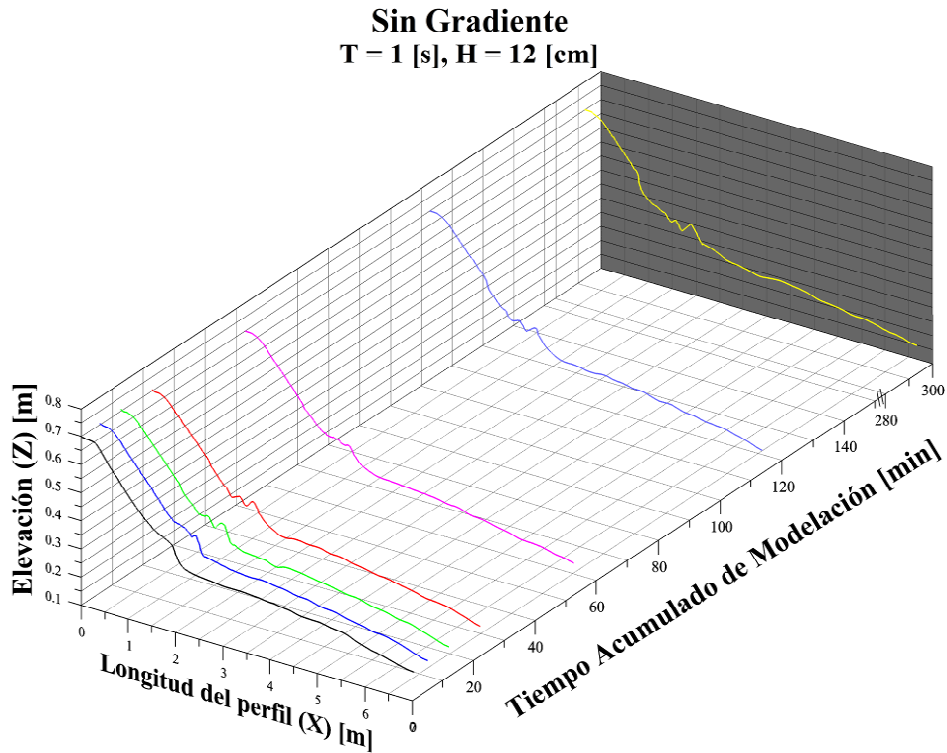


Figura VIII.1 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

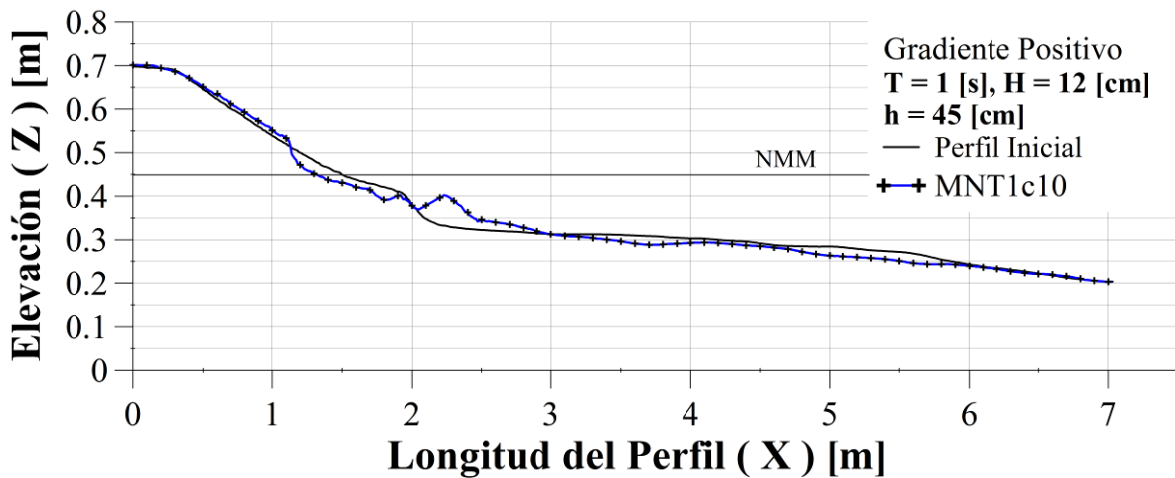


Figura VIII.2 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente



**VIII.1.2 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

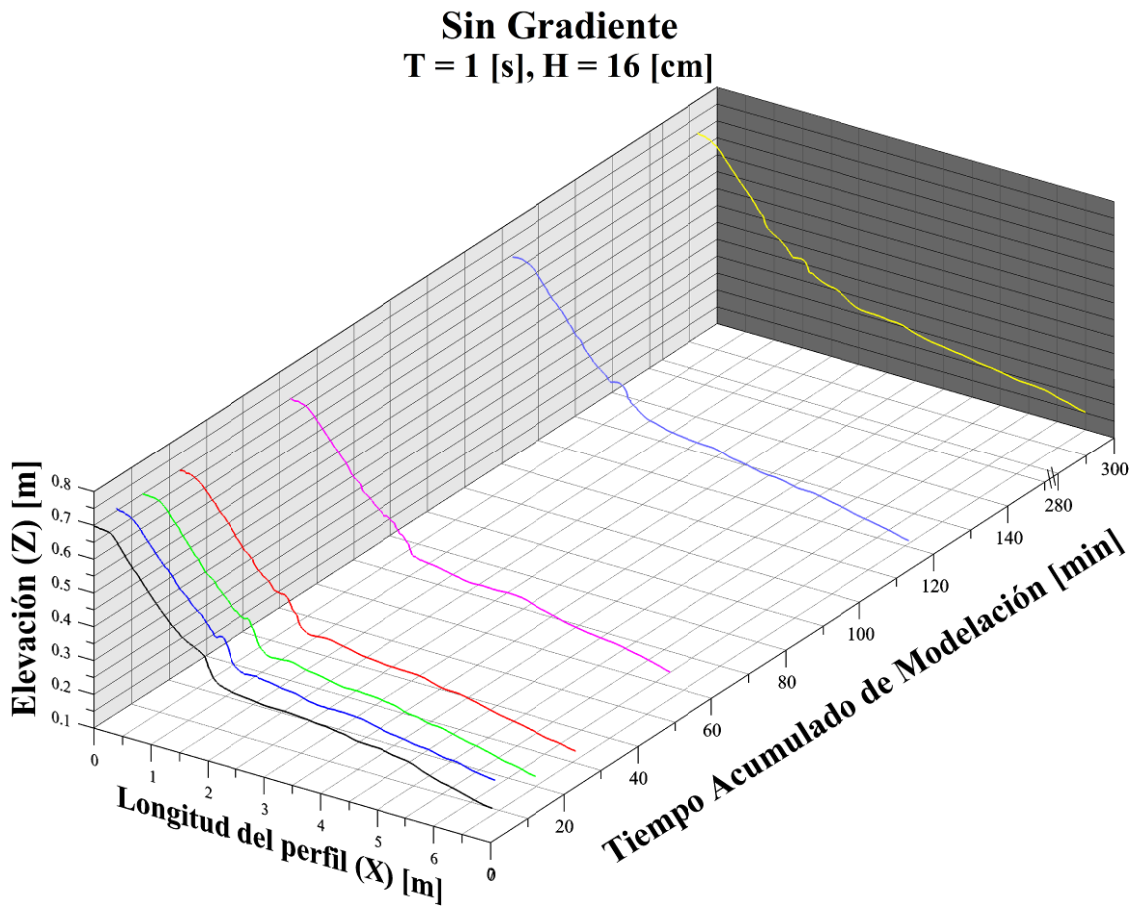


Figura VIII.3 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

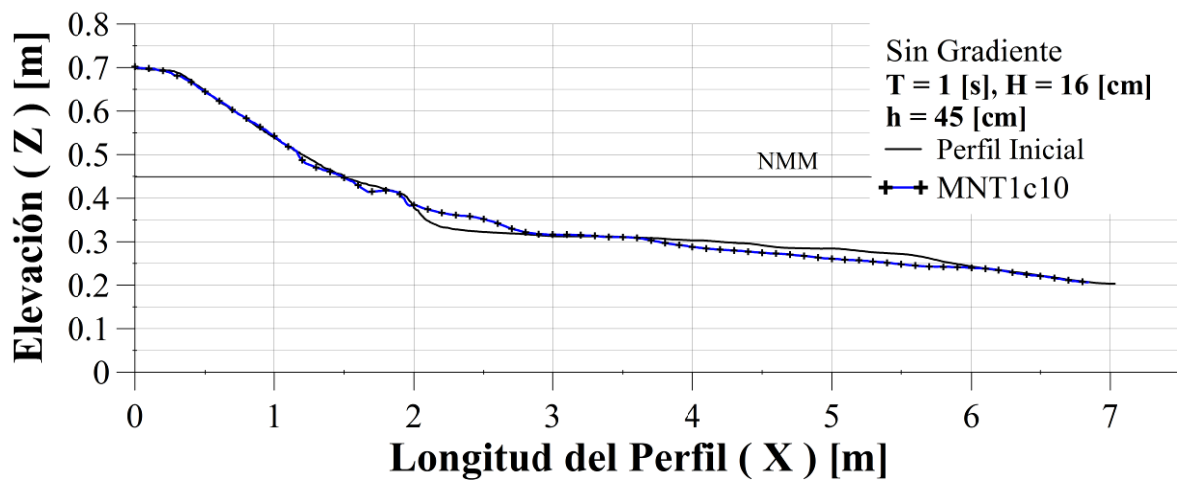


Figura VIII.4 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.3 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

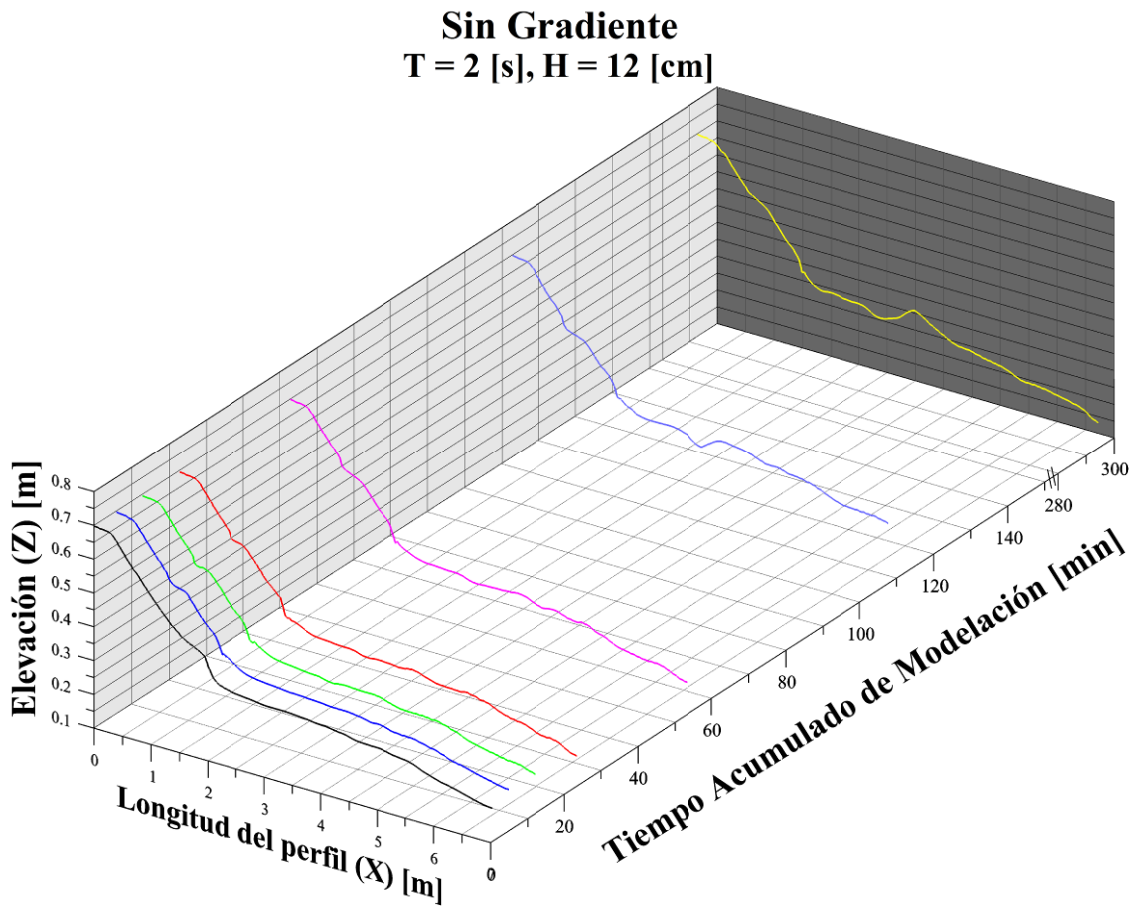


Figura VIII.5 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

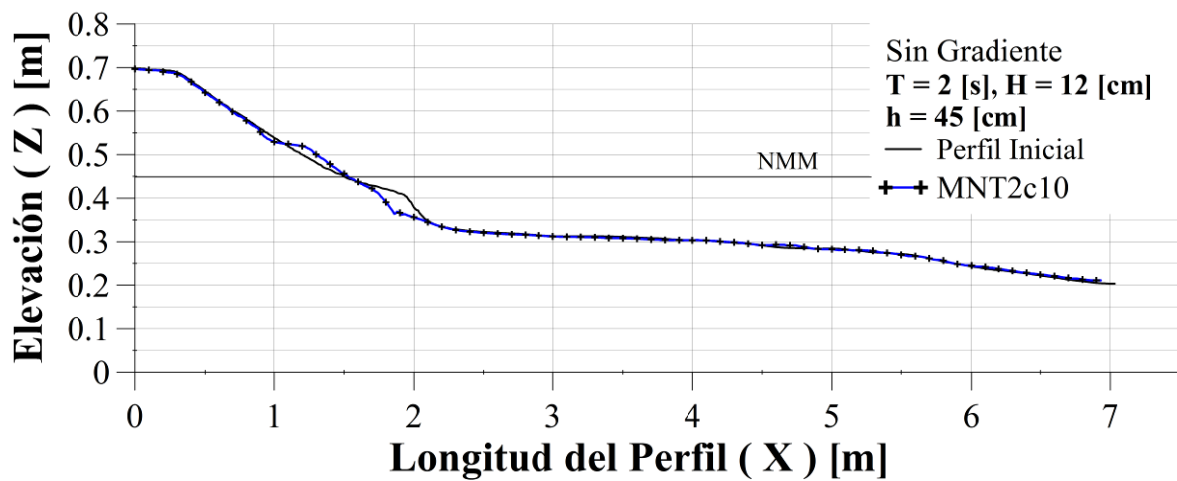


Figura VIII.6 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.4 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

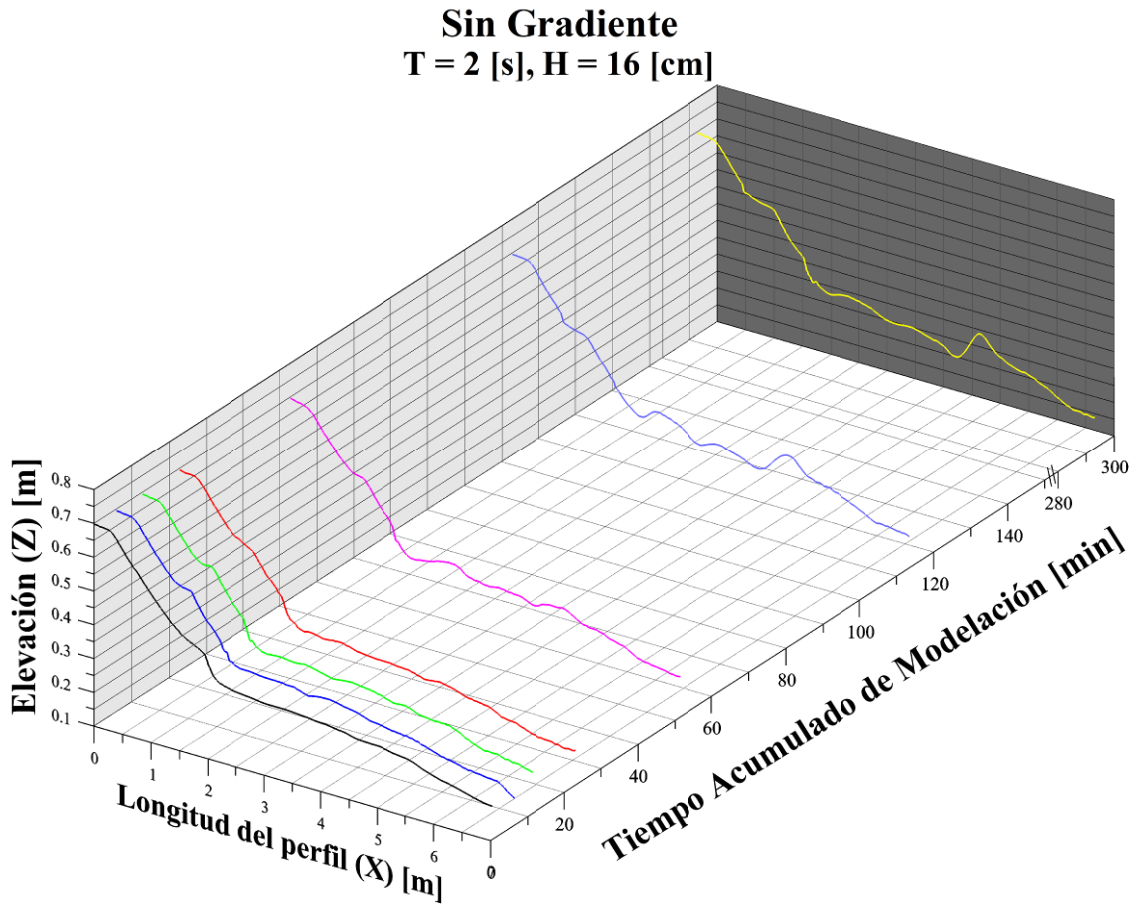


Figura VIII.7 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

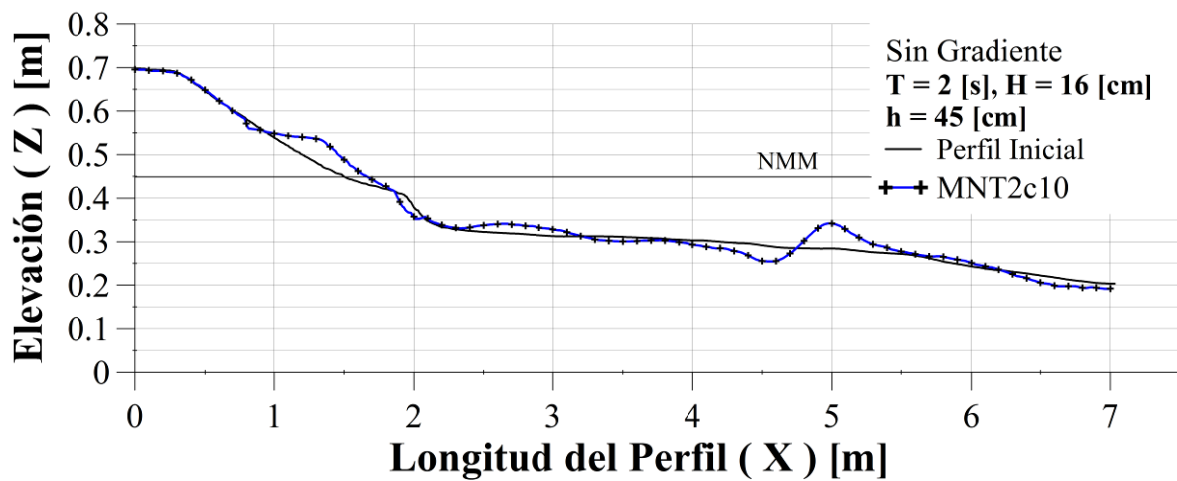


Figura VIII.8 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.5 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

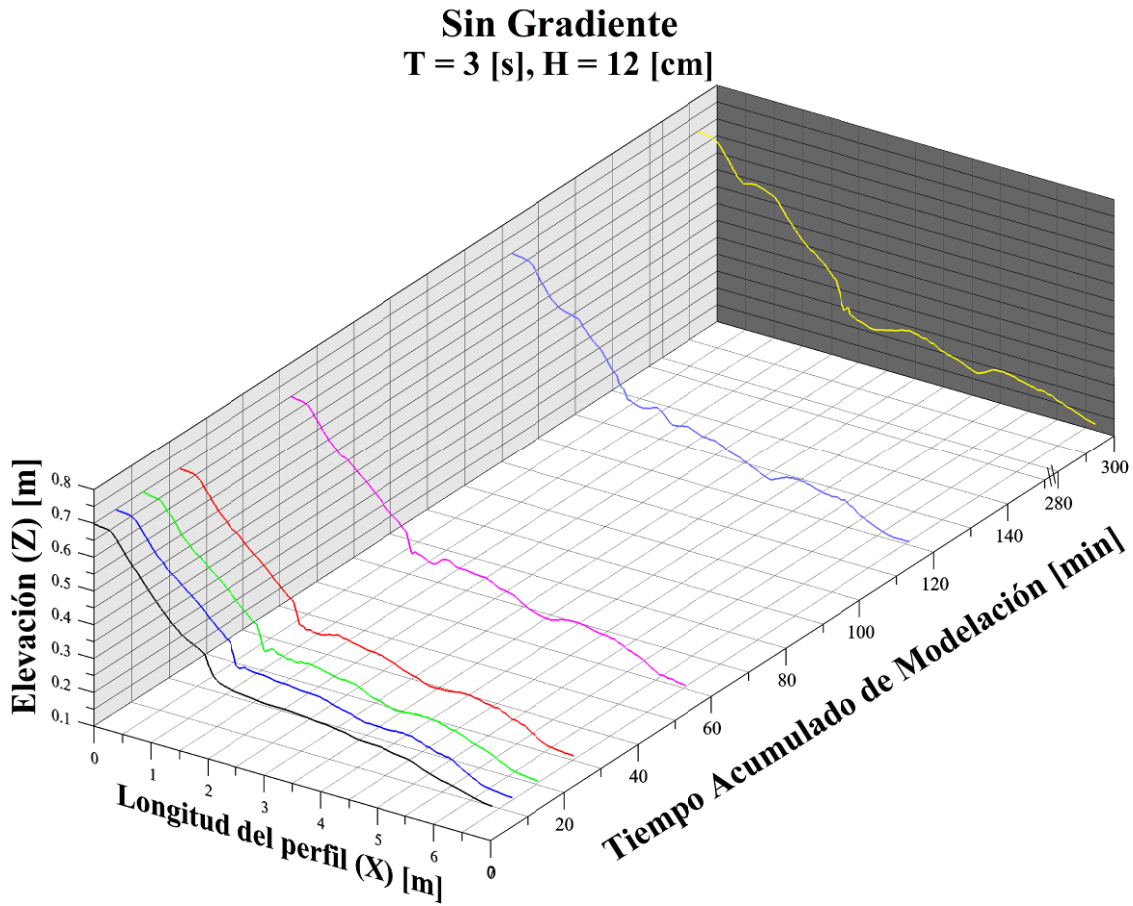


Figura VIII.9 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

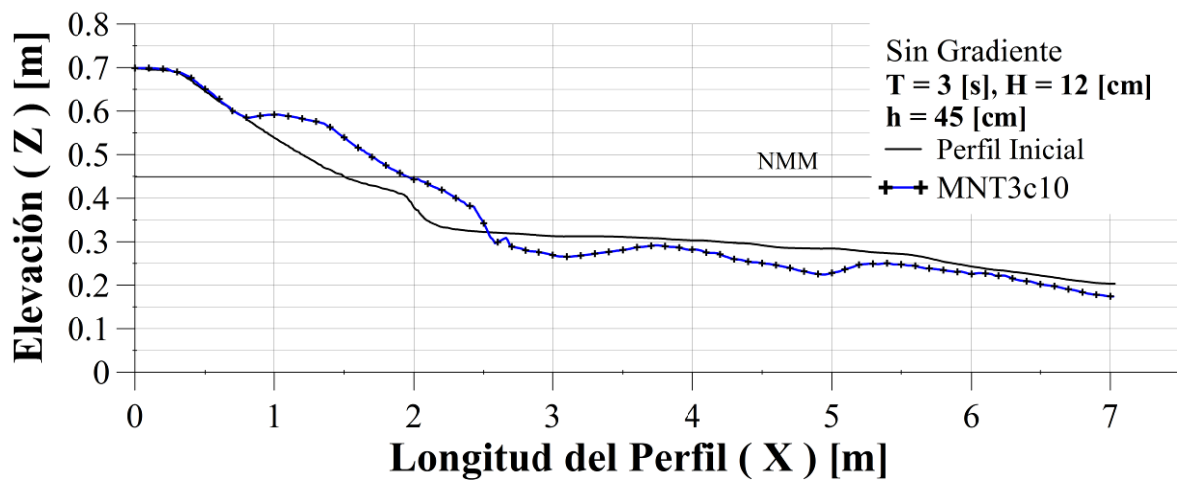


Figura VIII.10 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.6 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

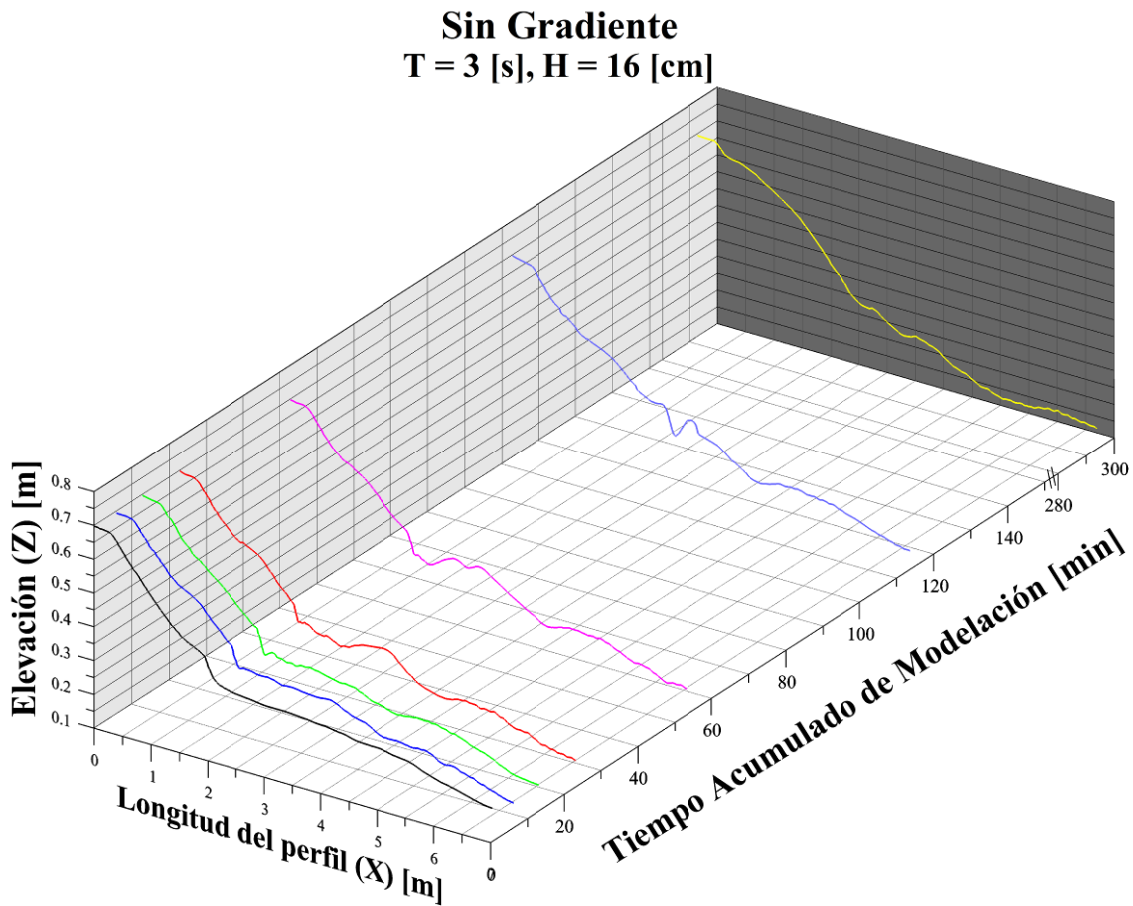


Figura VIII.11 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

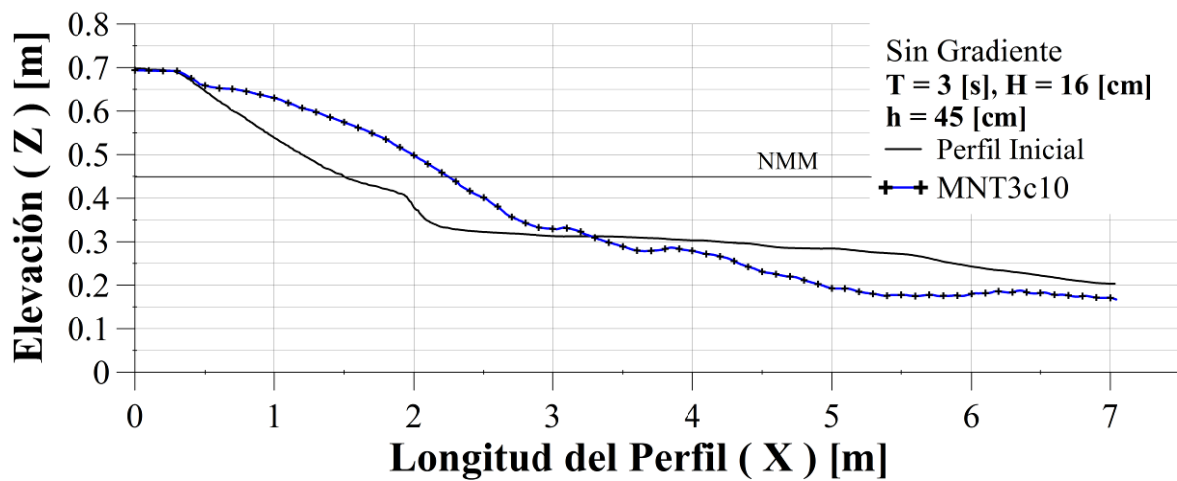


Figura VIII.12 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.7 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

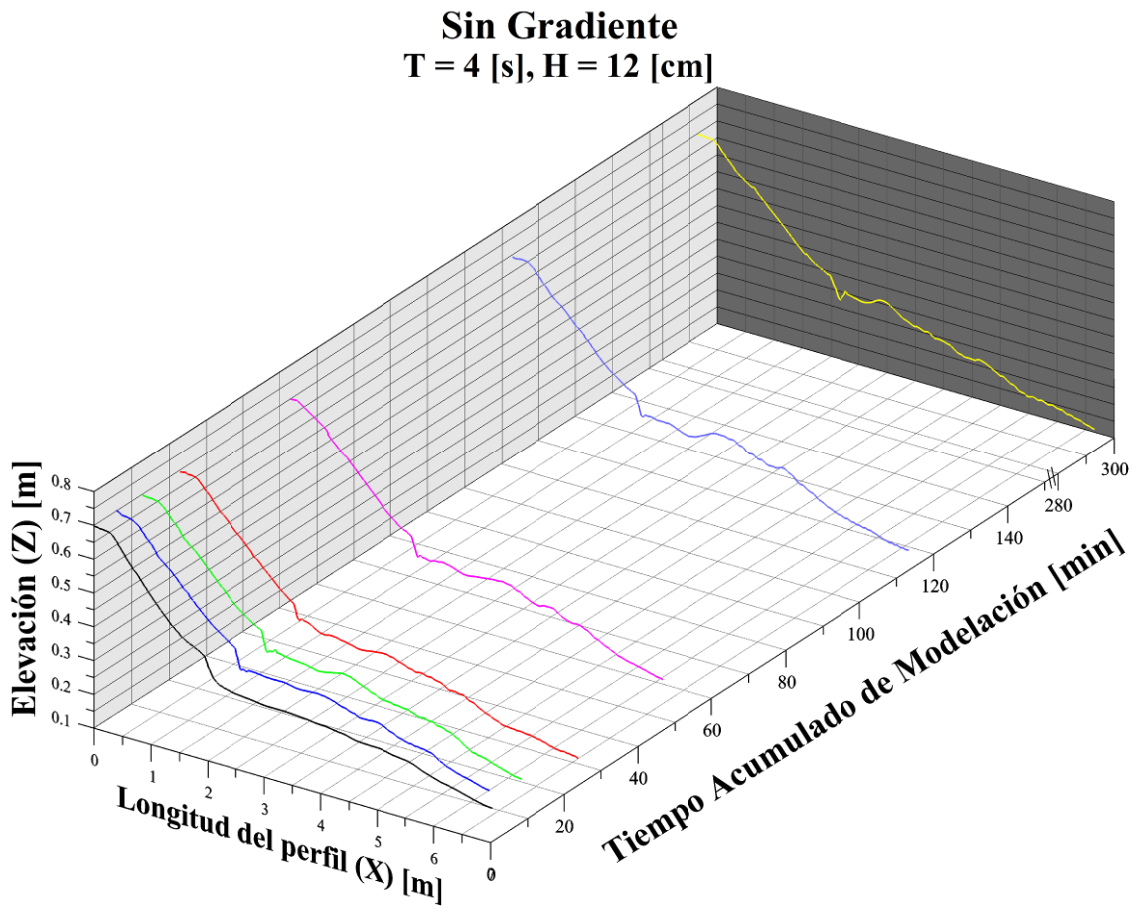


Figura VIII.13 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

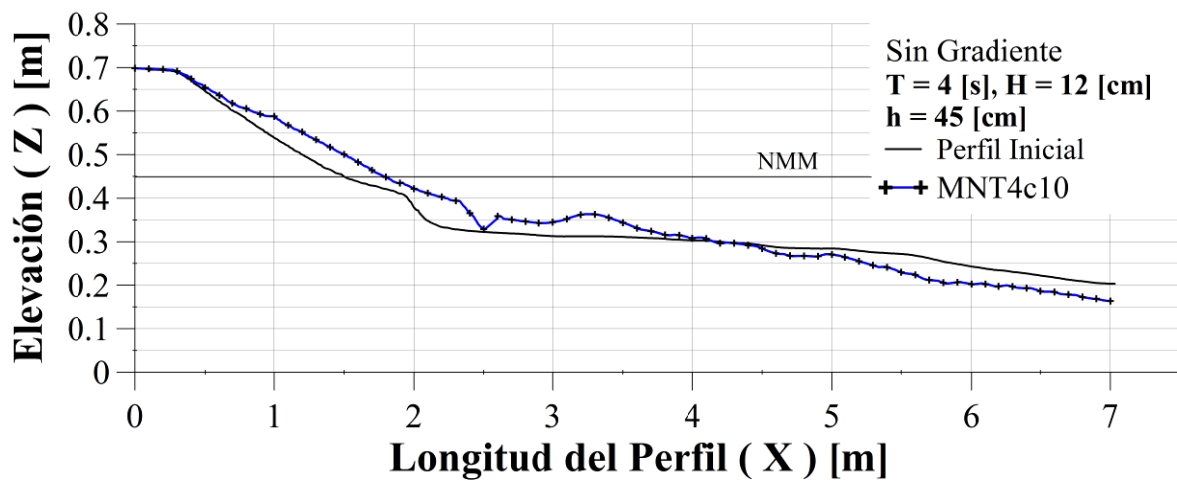


Figura VIII.14 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Sin Gradiente

**VIII.1.8 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

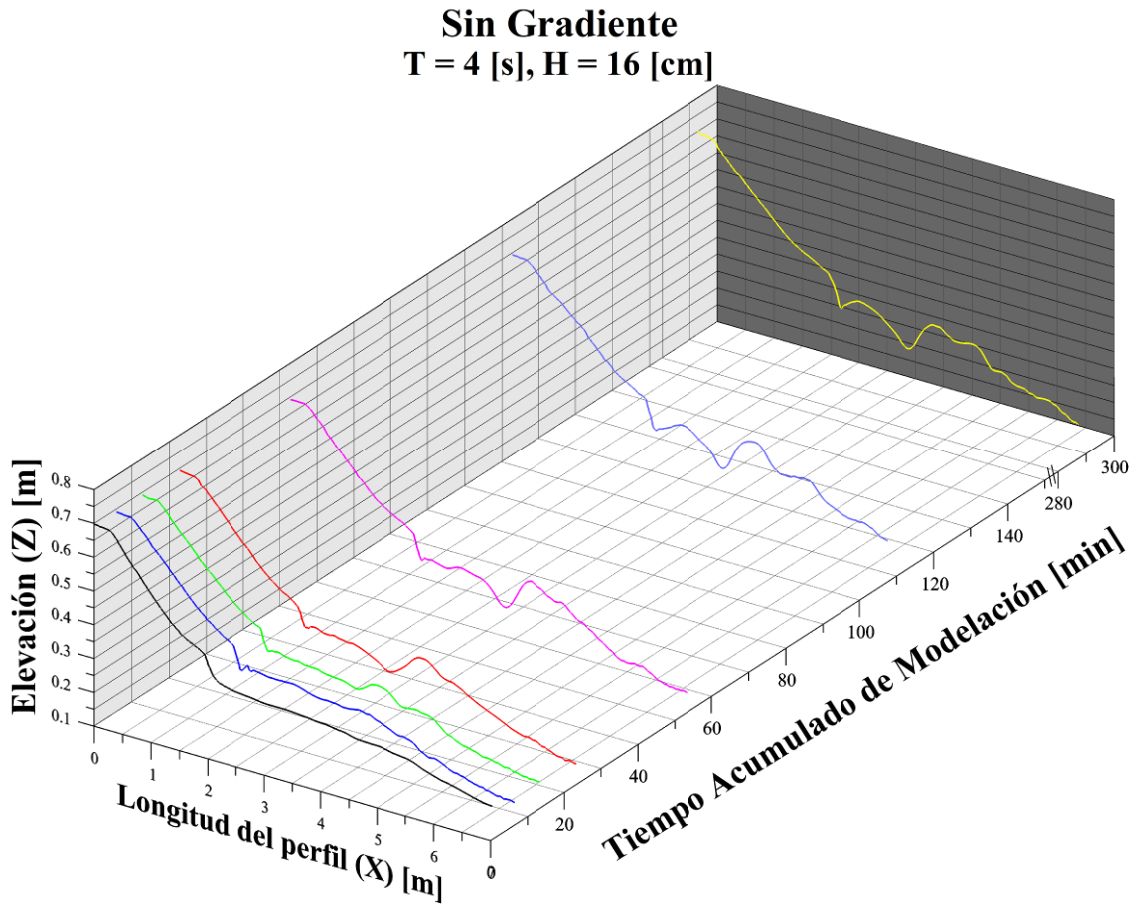


Figura VIII.15 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

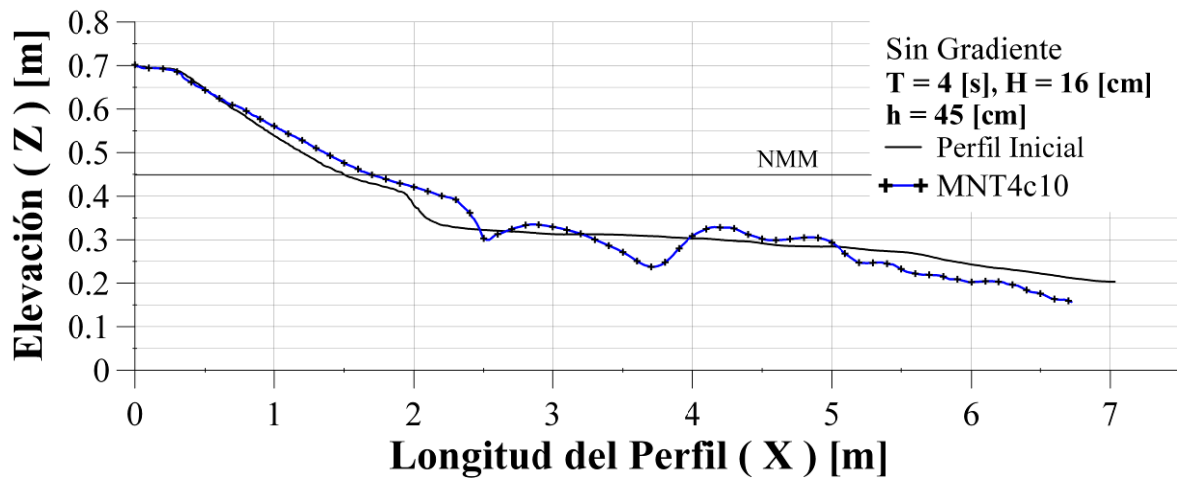


Figura VIII.16 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Sin Gradiente

## VIII.2 Gradiente Negativo

### VIII.2.1 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 12$ cm

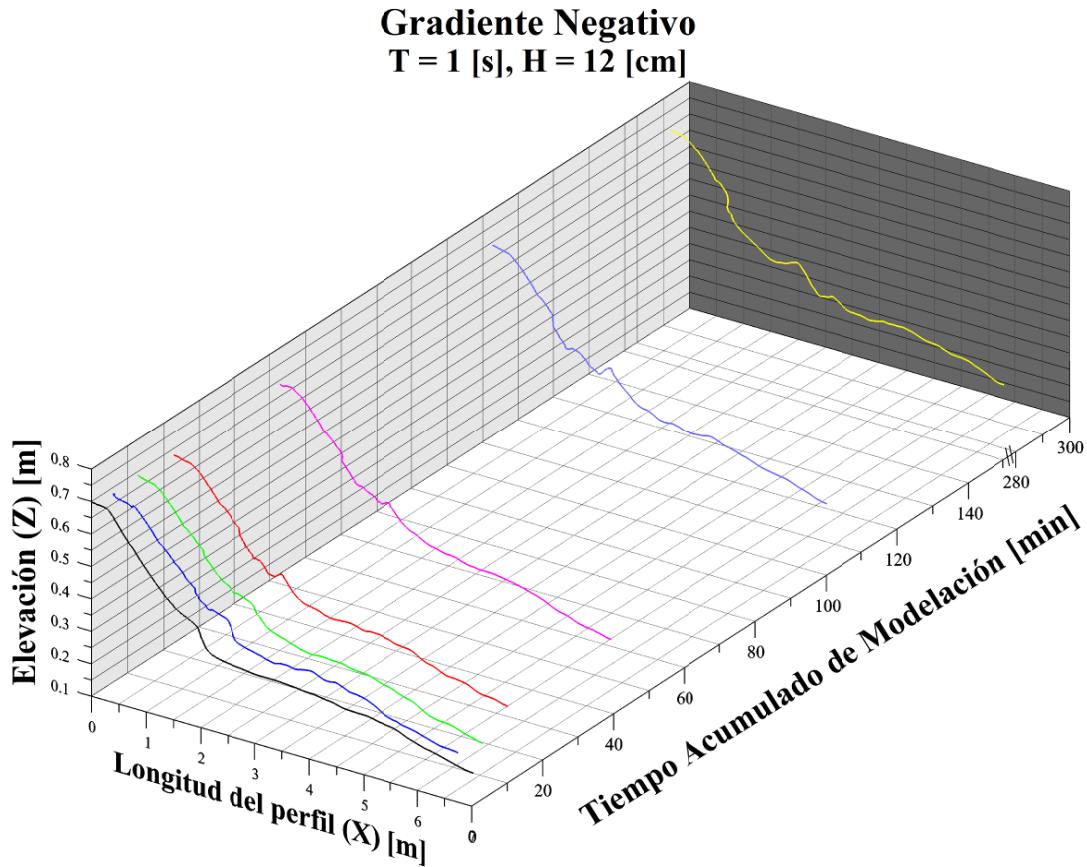


Figura VIII.17 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

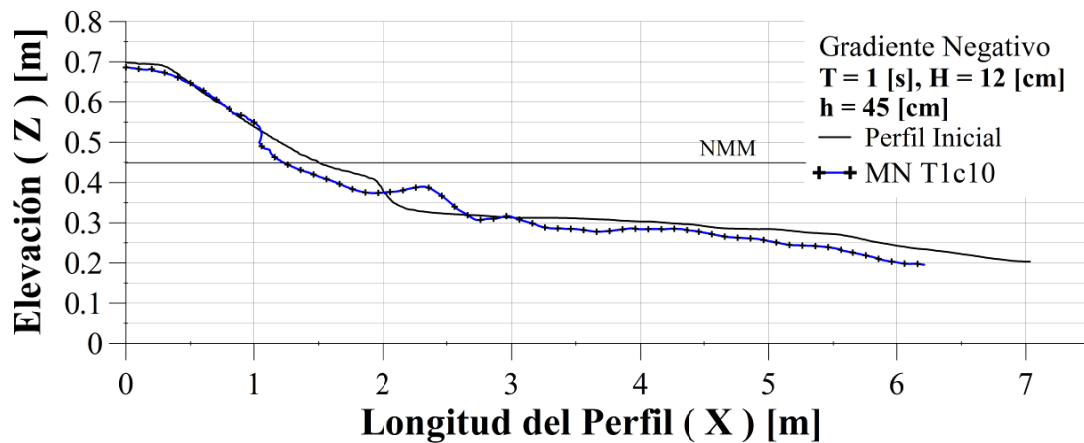


Figura VIII.18 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo



**VIII.2.2 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 1$  [s],  $H = 16$  [cm]**

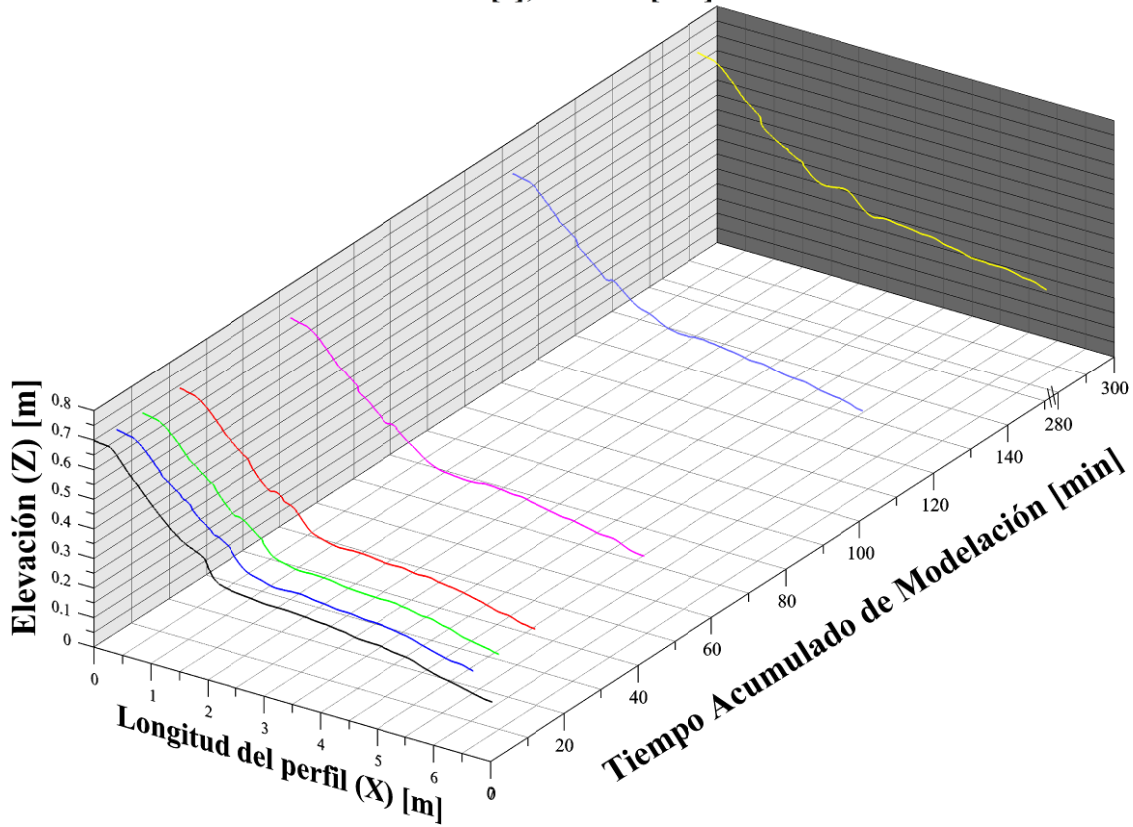


Figura VIII.19 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

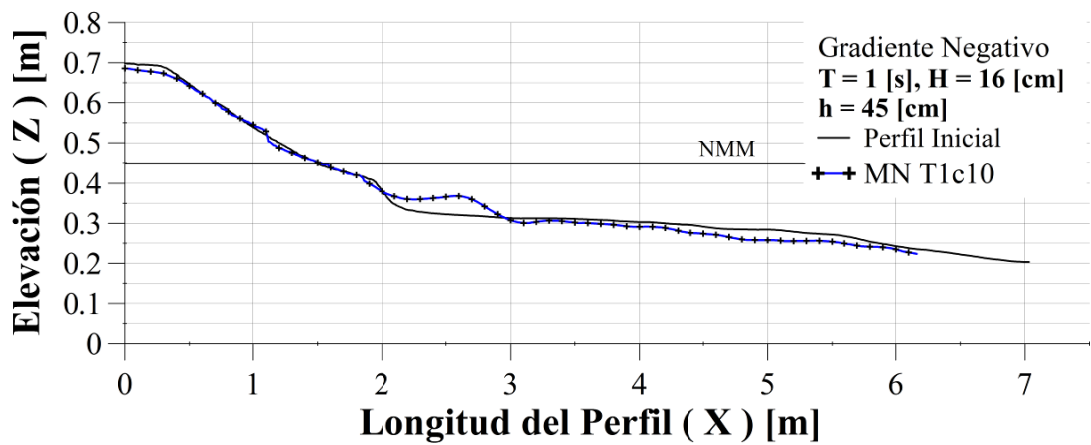


Figura VIII.20 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.3 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 2$  [s],  $H = 12$  [cm]**

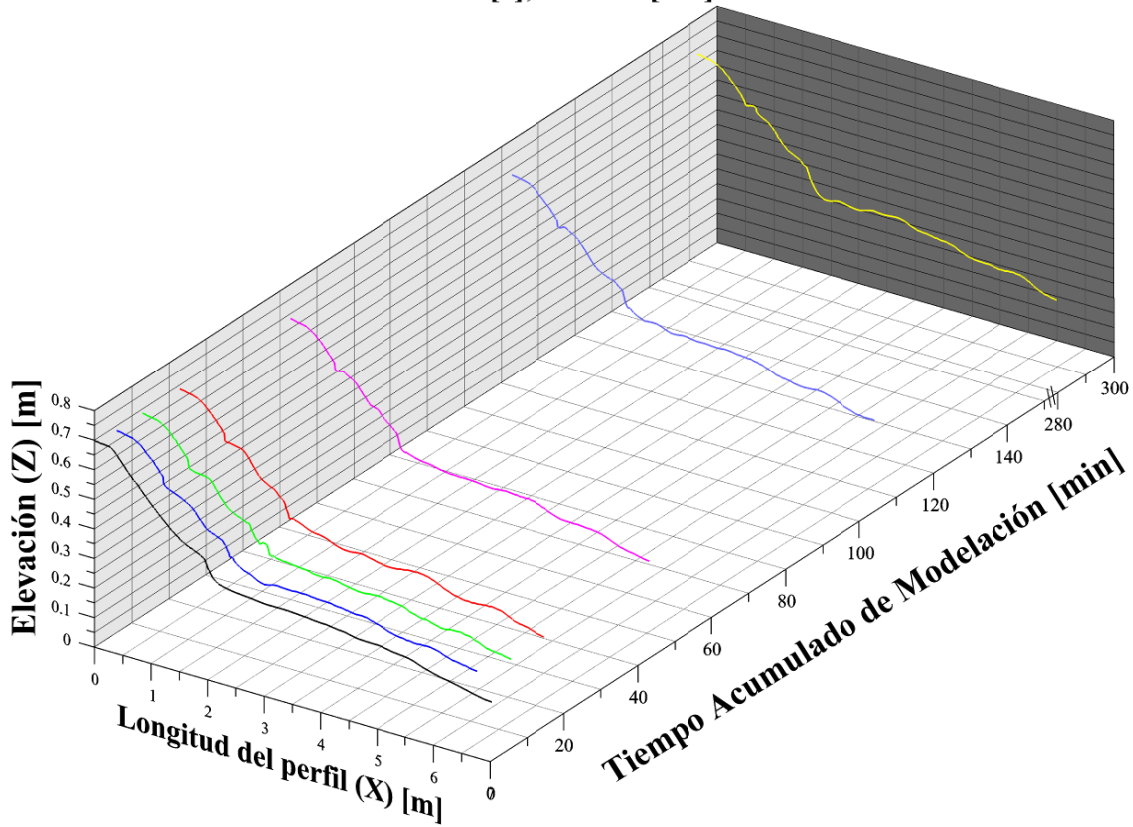


Figura VIII.21 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

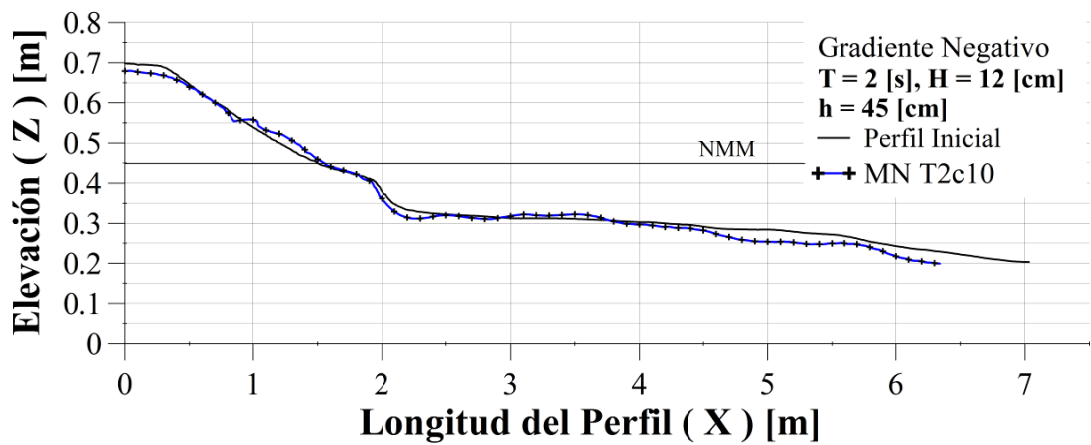


Figura VIII.22 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.4 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 2$  [s],  $H = 16$  [cm]**

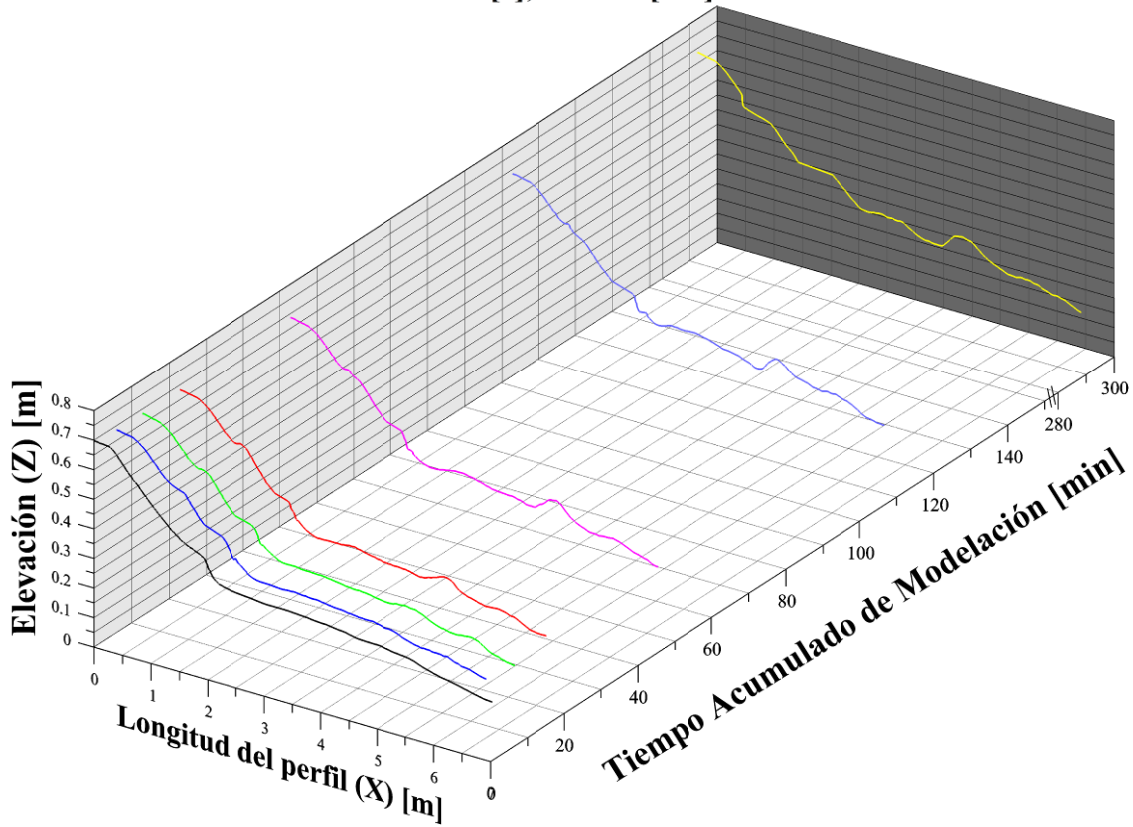


Figura VIII.23 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

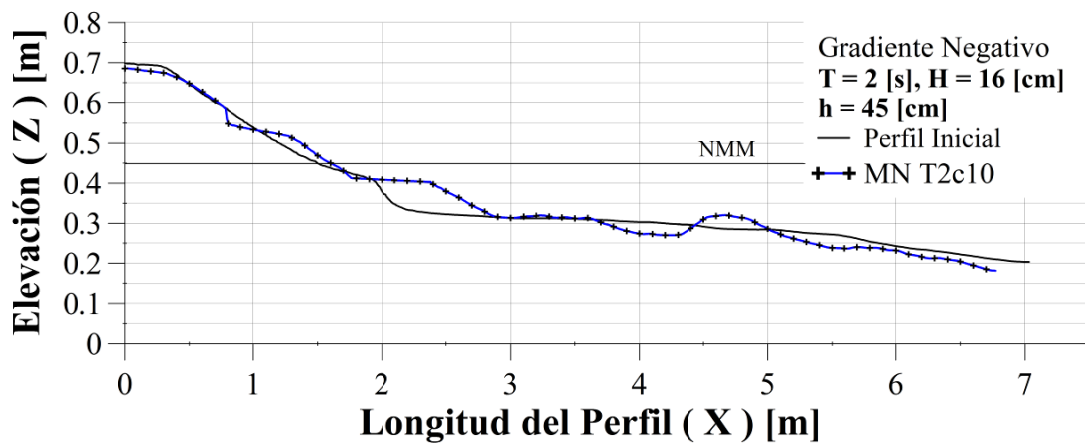


Figura VIII.24 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.5 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 3$  [s],  $H = 12$  [cm]**

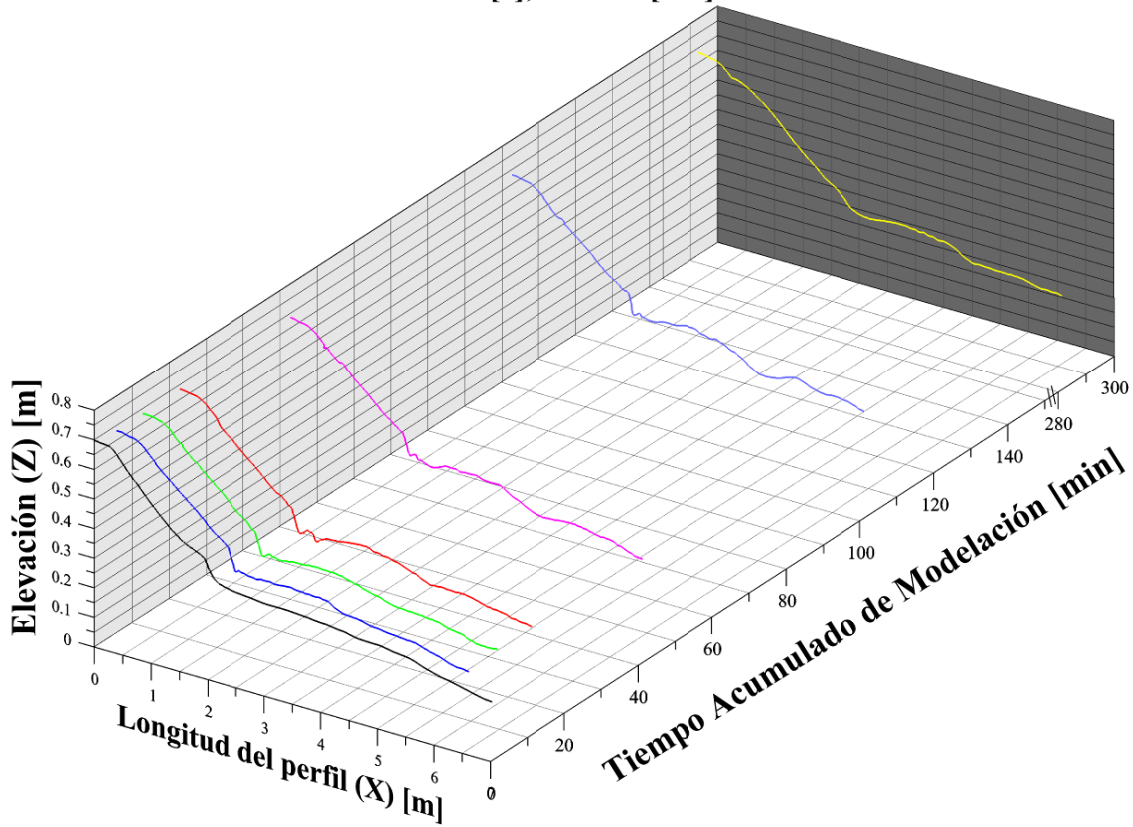


Figura VIII.25 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

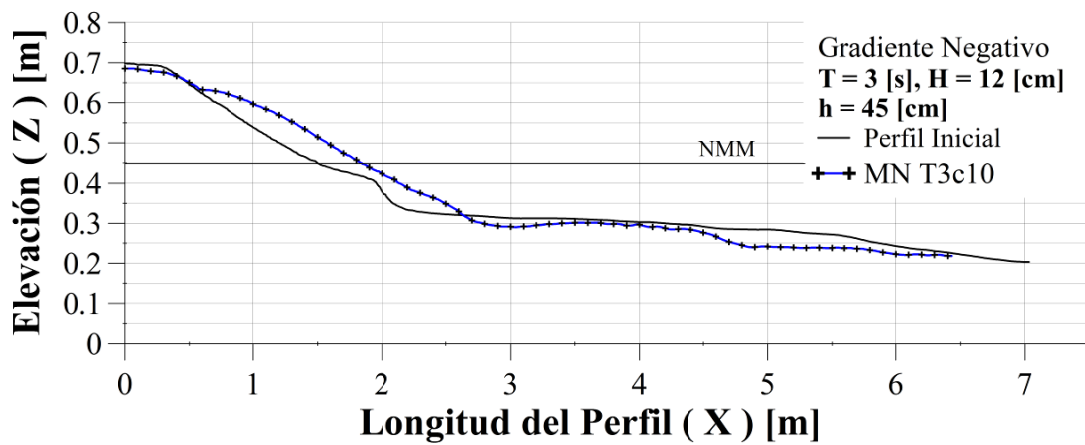


Figura VIII.26 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.6 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 3$  [s],  $H = 16$  [cm]**

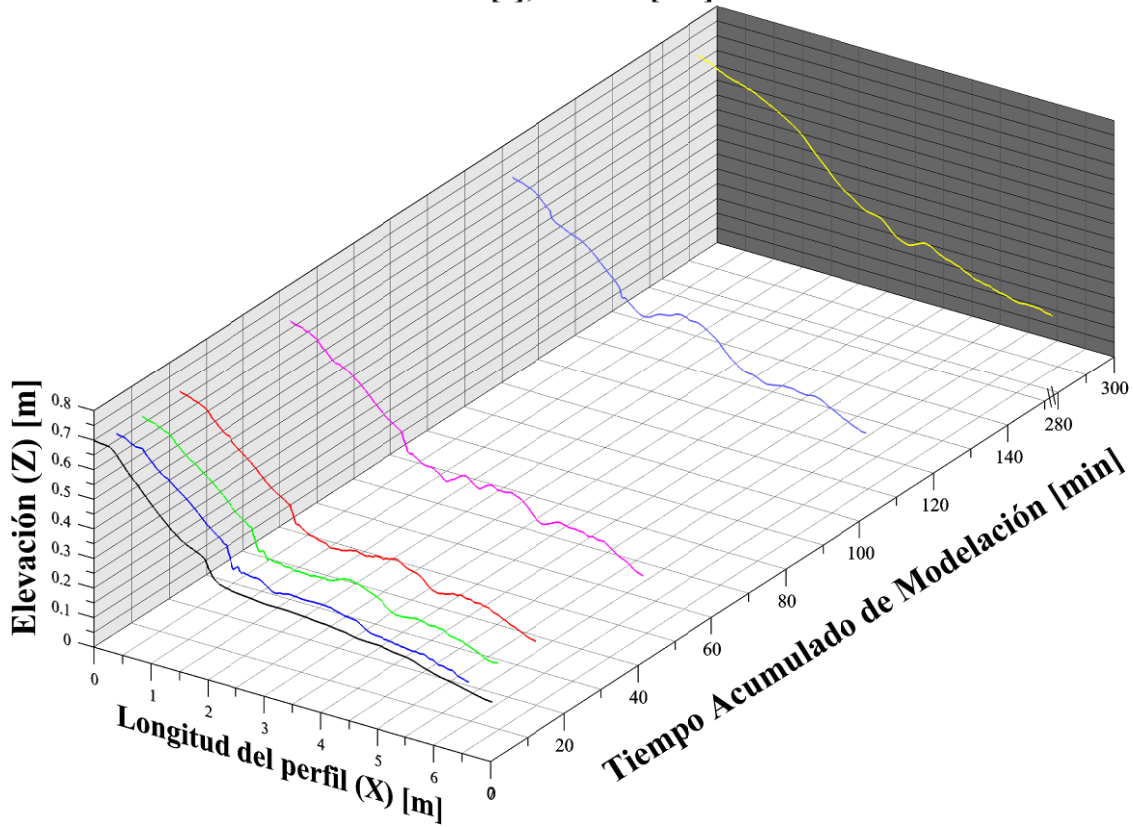


Figura VIII.27 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

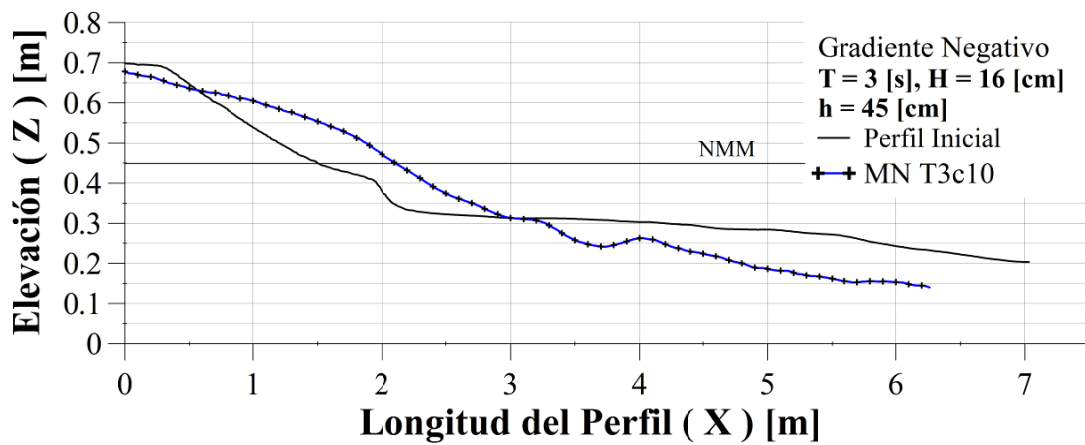


Figura VIII.28 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.7 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 4$  [s],  $H = 12$  [cm]**

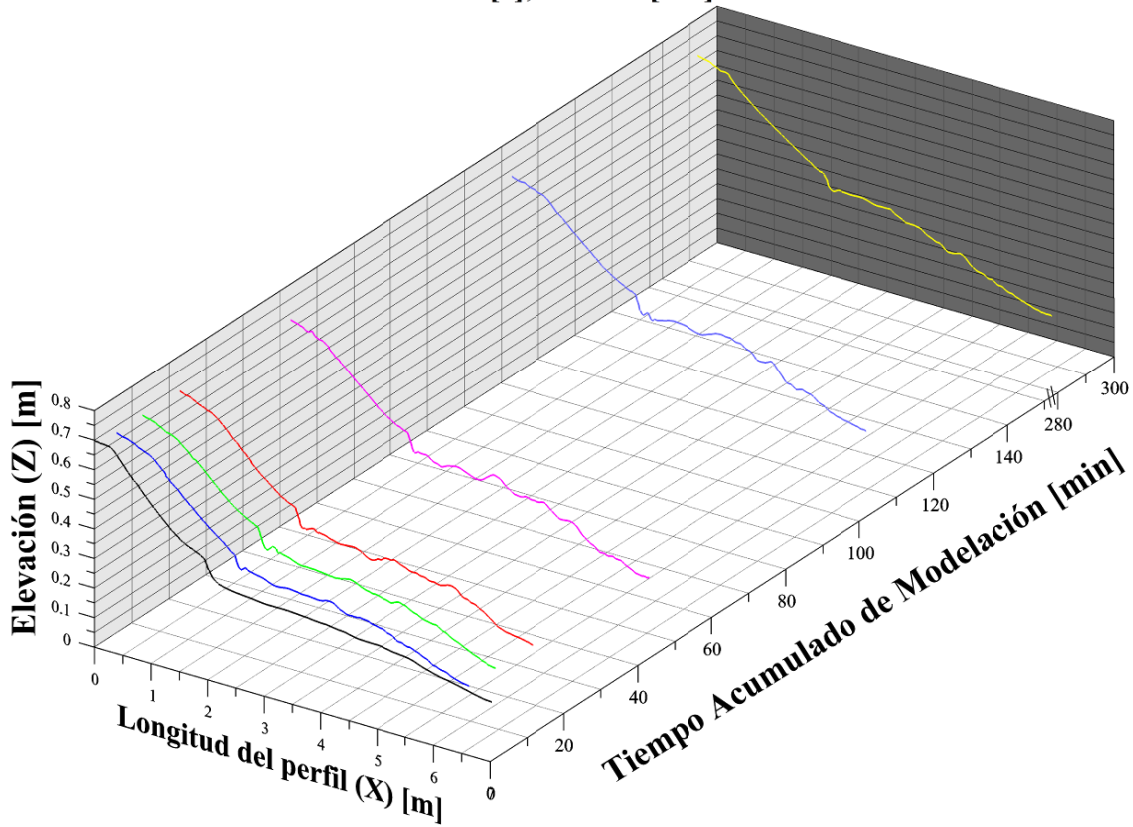


Figura VIII.29 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

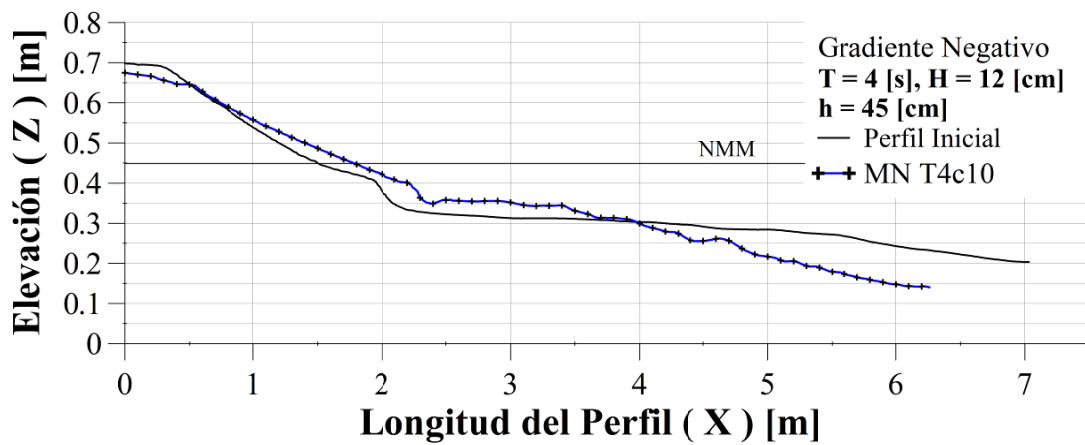


Figura VIII.30 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Negativo

**VIII.2.8 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

**Gradiente Negativo**  
 **$T = 4$  [s],  $H = 16$  [cm]**

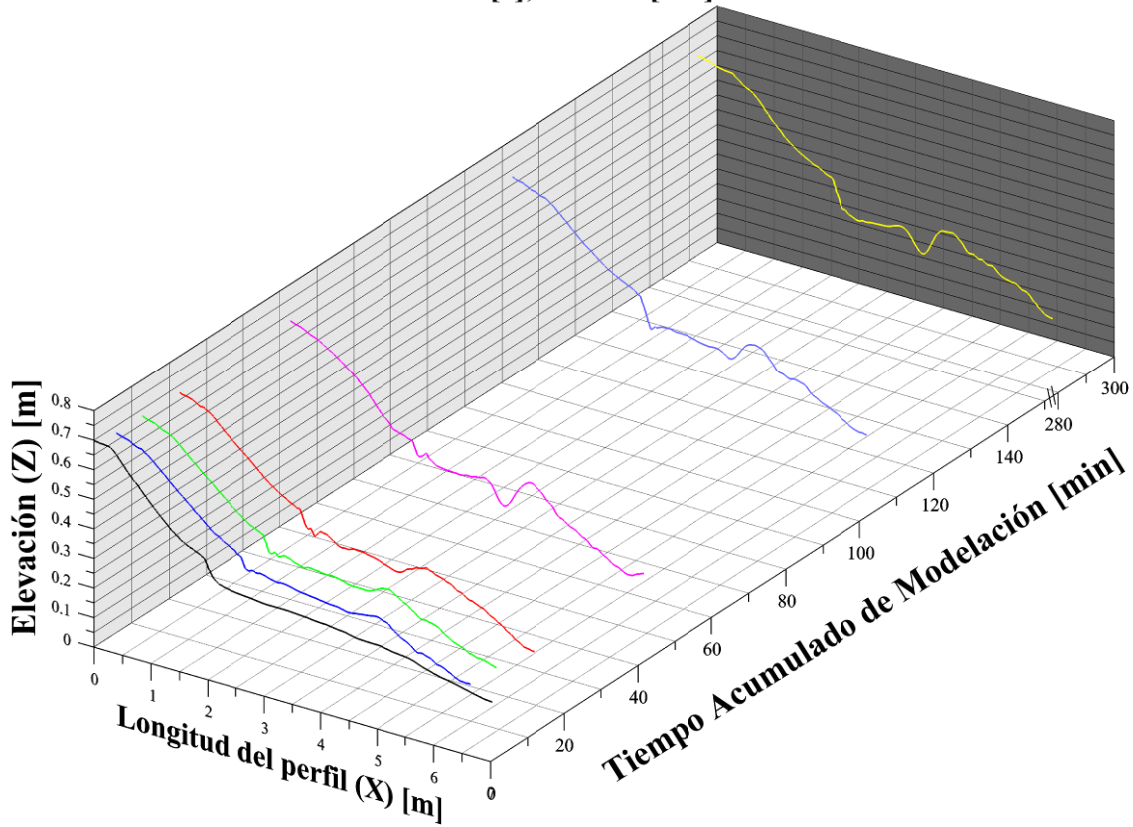


Figura VIII.31 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

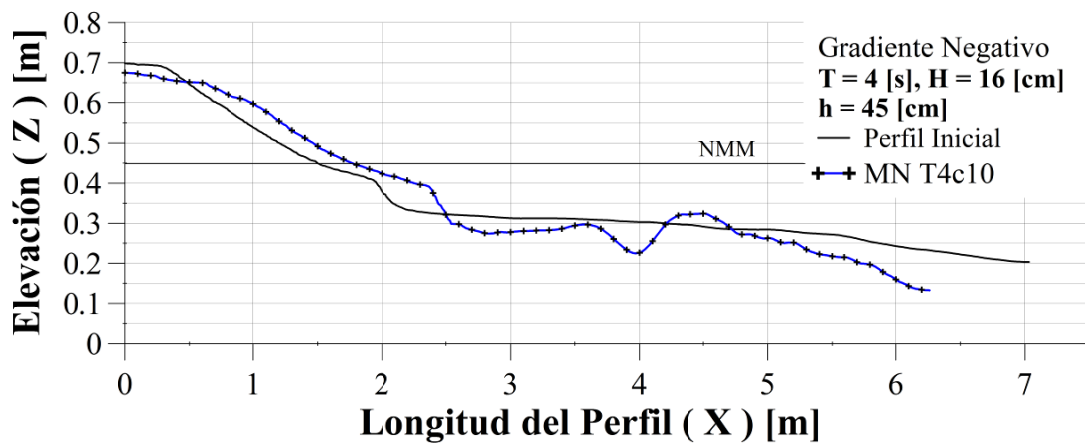


Figura VIII.32 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Negativo

### VIII.3 Gradiente Positivo

#### VIII.3.1 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo $T = 1$ s y altura de ola $H = 12$ cm

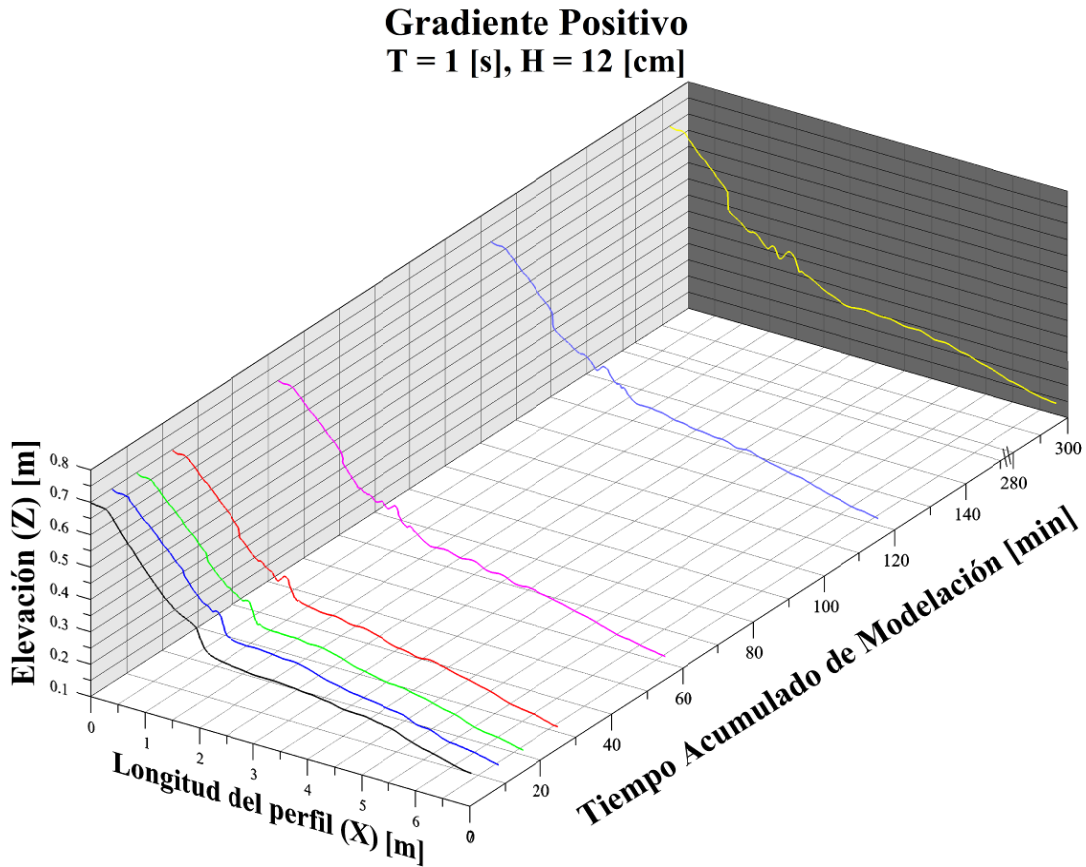


Figura VIII.33 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

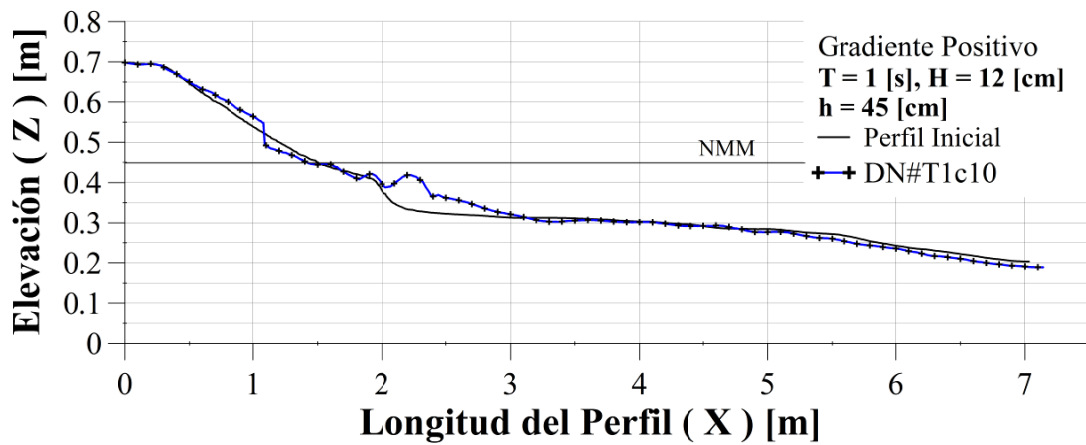


Figura VIII.34 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo



**VIII.3.2 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 1$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

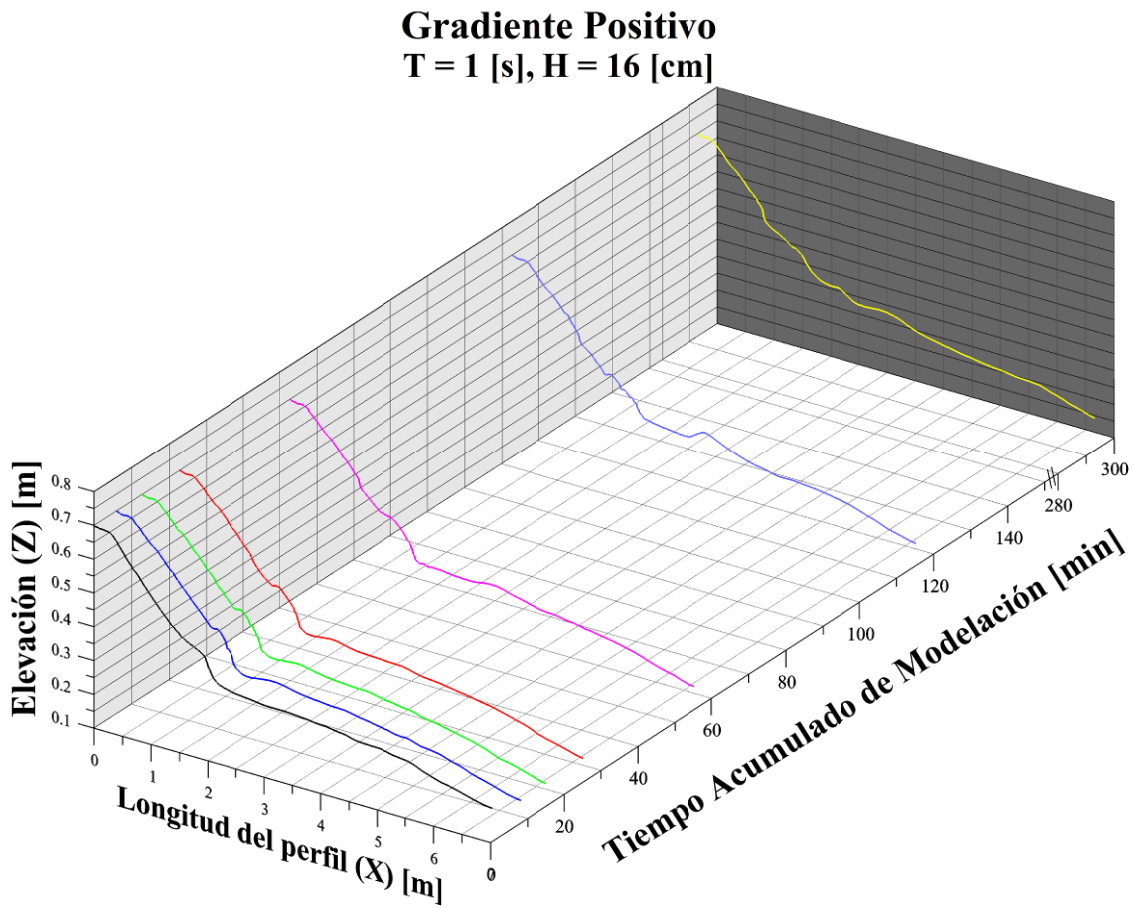


Figura VIII.35 Evolución temporal del perfil  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

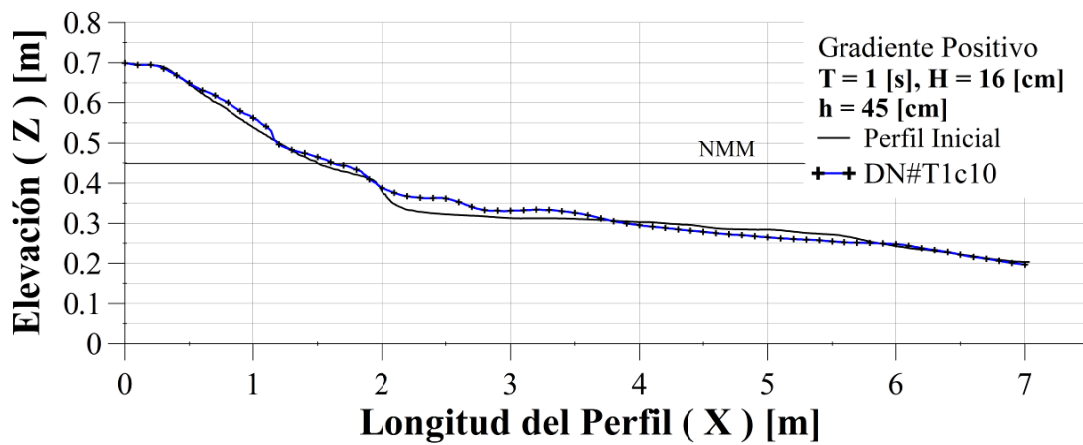


Figura VIII.36 Perfil final  $T = 1$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.3 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

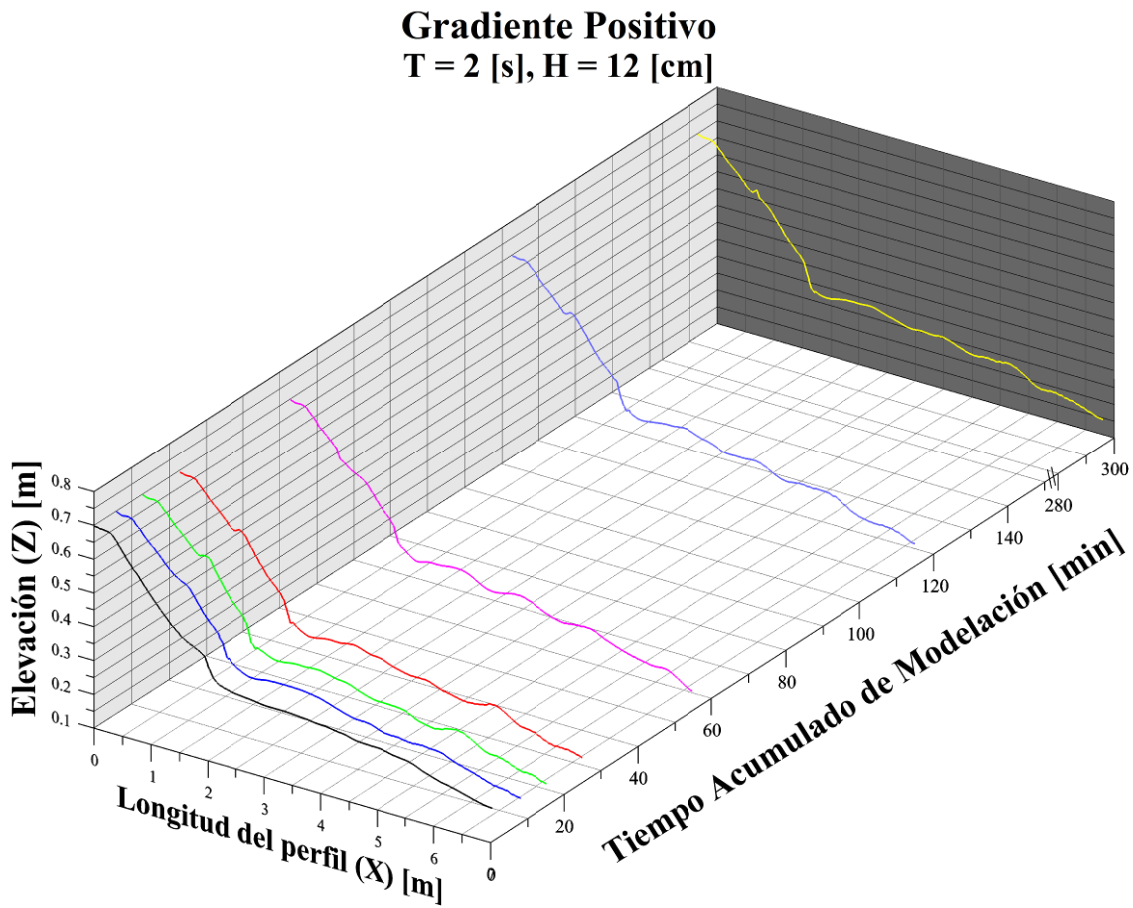


Figura VIII.37 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

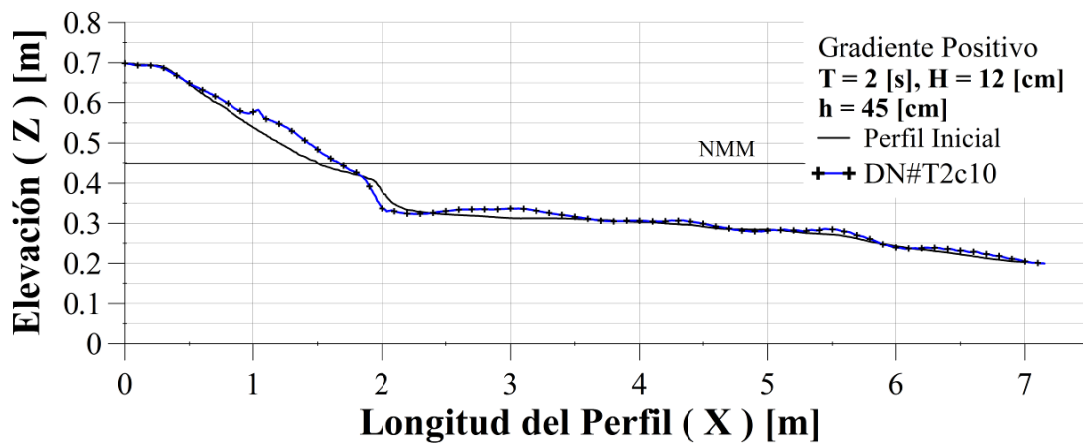


Figura VIII.38 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.4 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 2$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

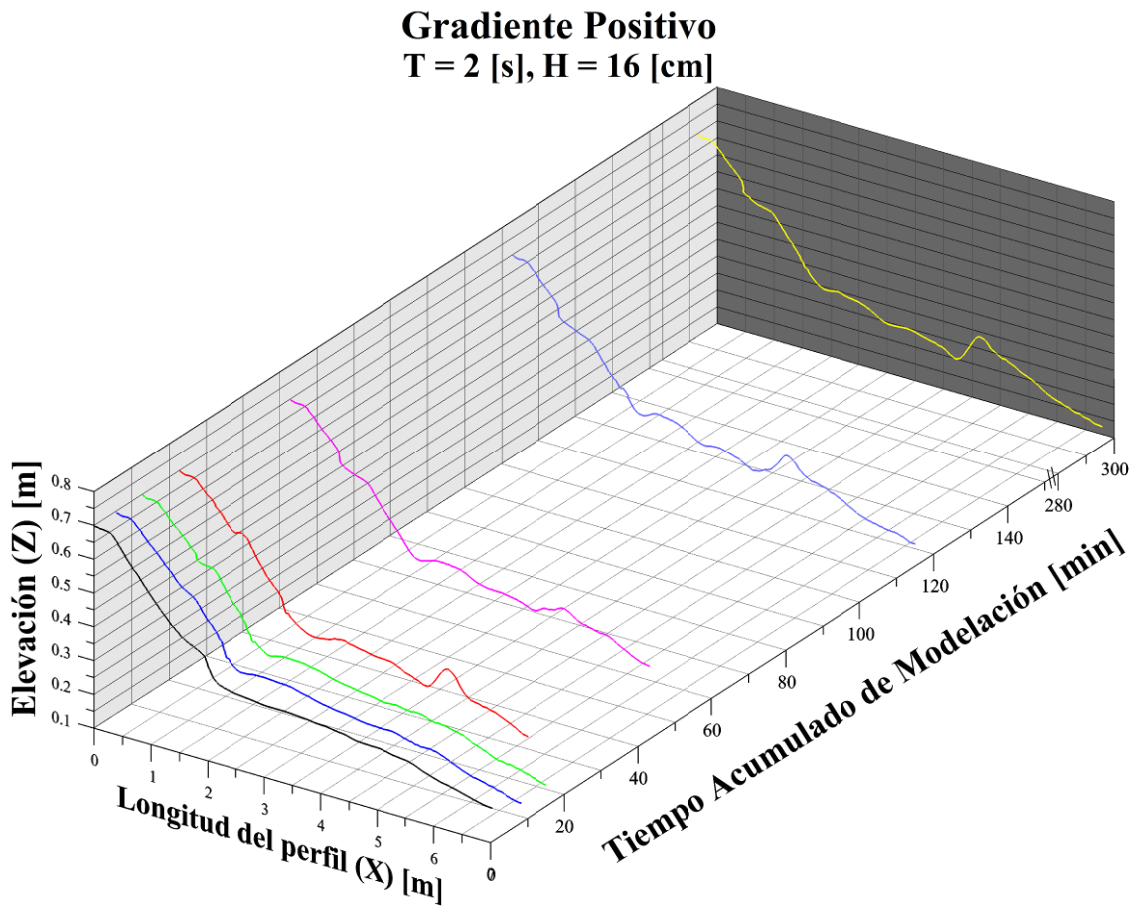


Figura VIII.39 Evolución temporal del perfil  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

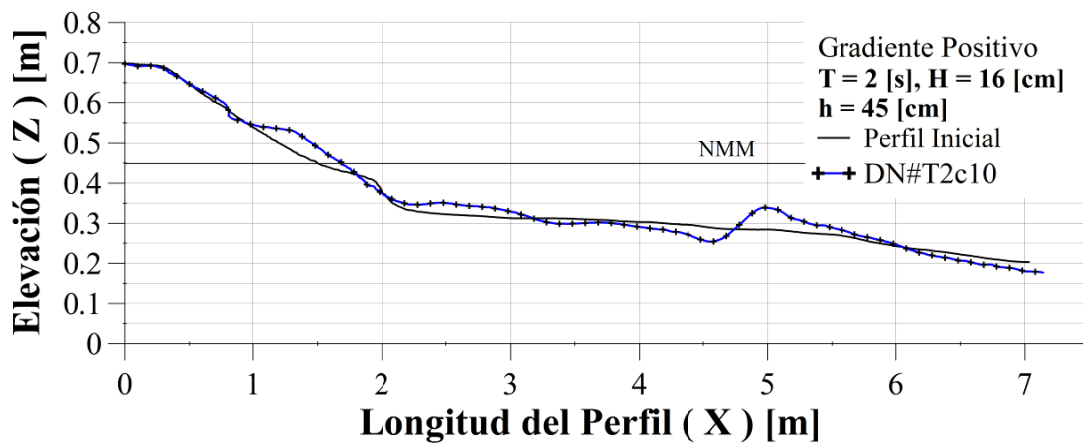


Figura VIII.40 Perfil final  $T = 2$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.5 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

**Gradiente Positivo**  
 **$T = 3$  [s],  $H = 12$  [cm]**

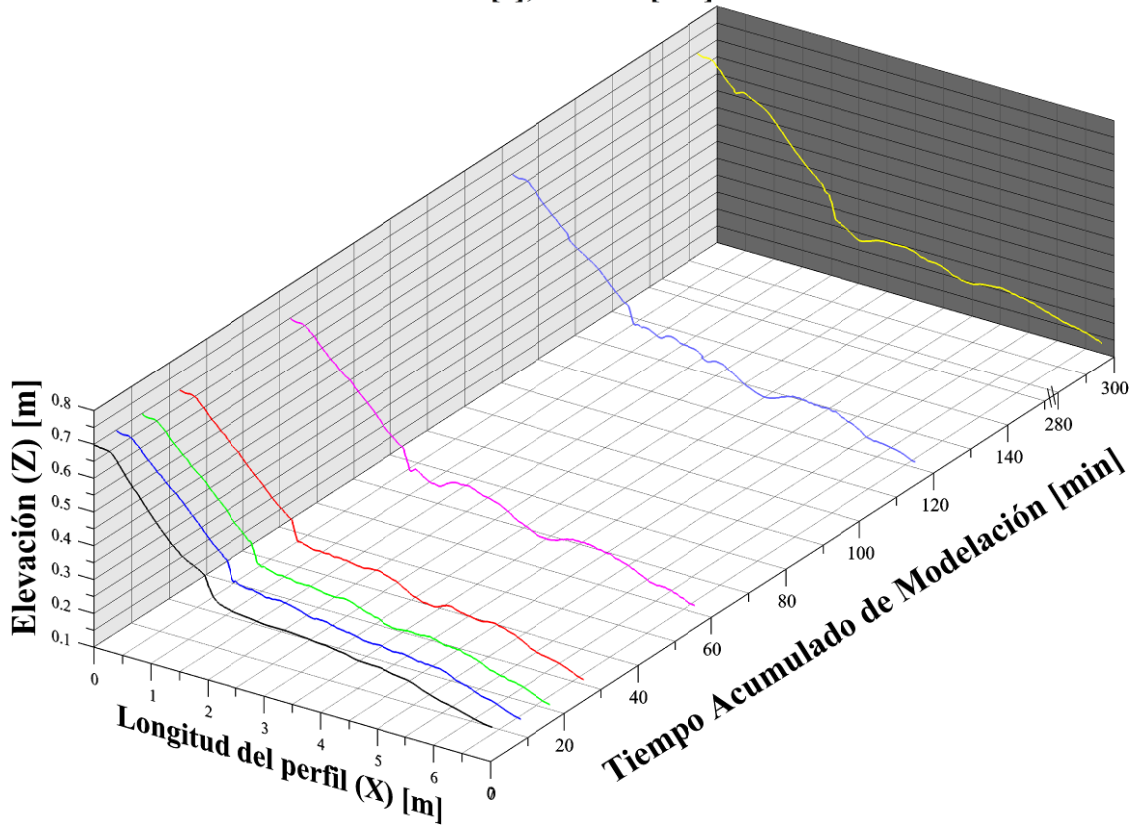


Figura VIII.41 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

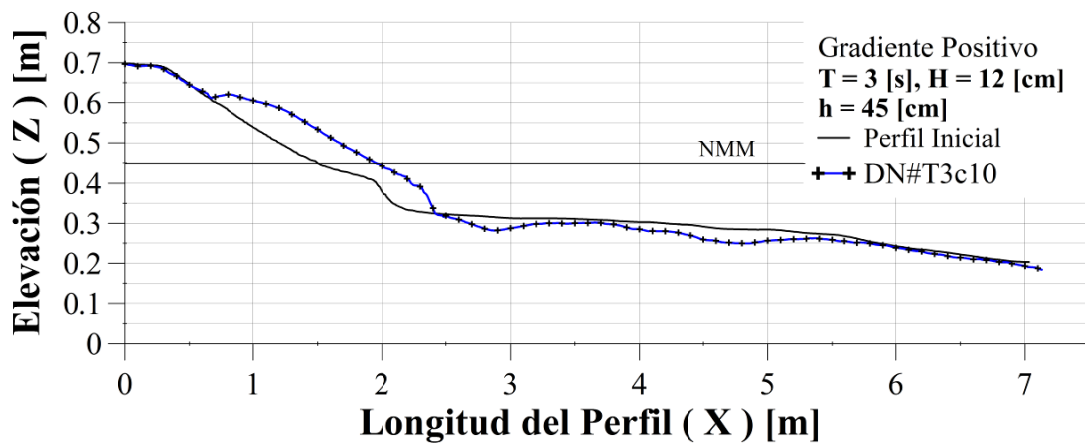


Figura VIII.42 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.6 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 3$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

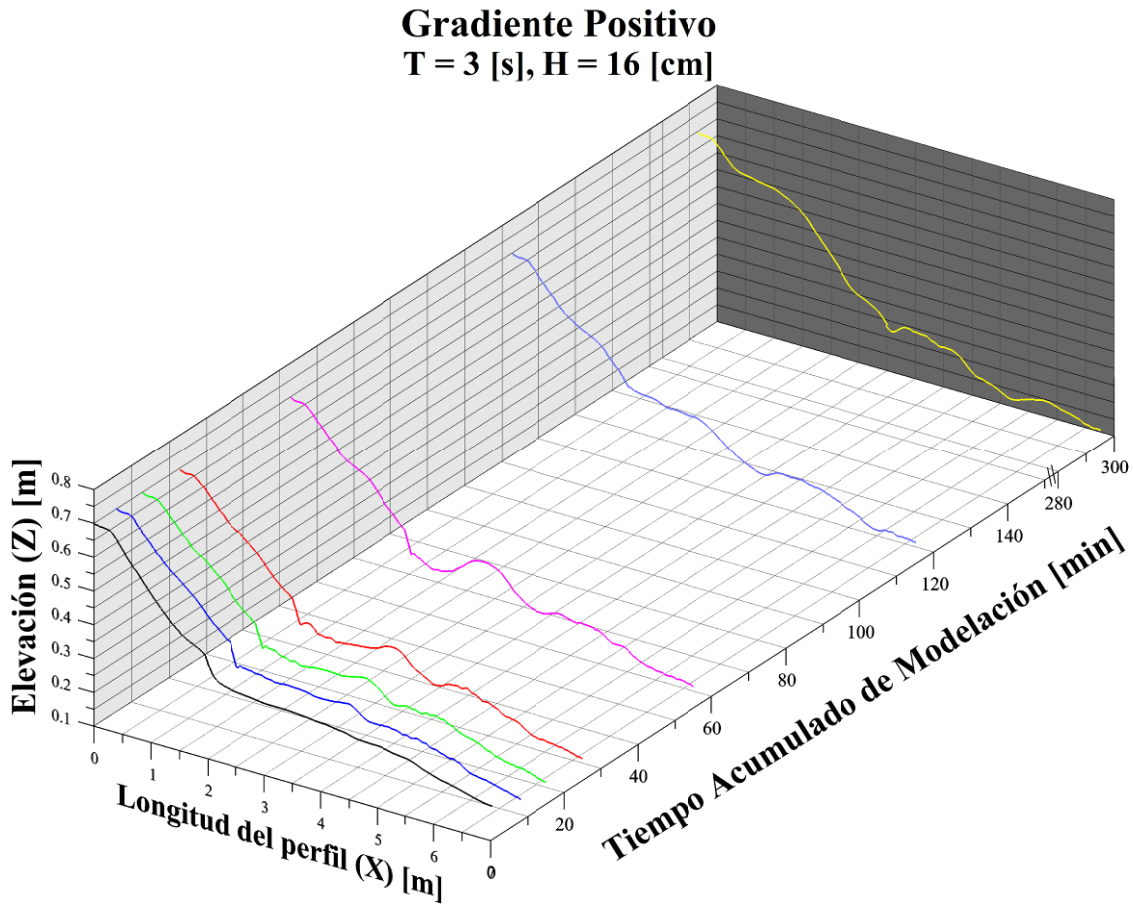


Figura VIII.43 Evolución temporal del perfil  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

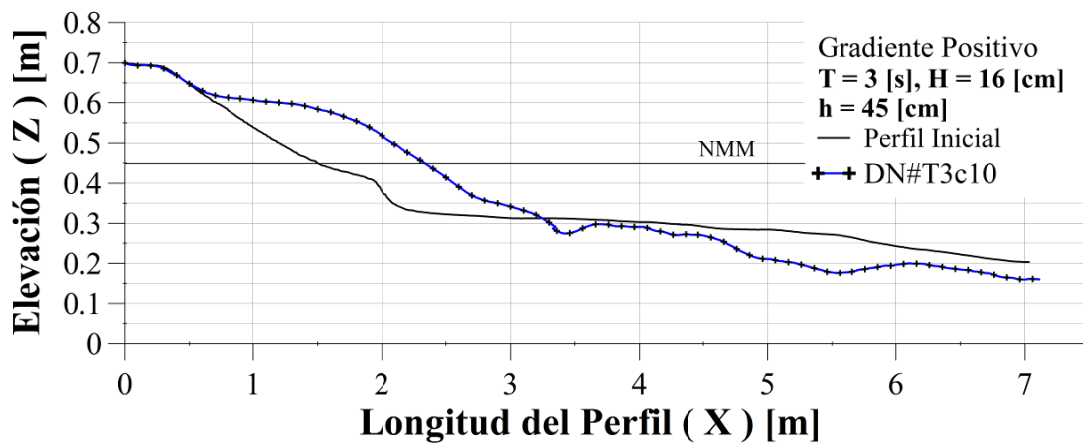


Figura VIII.44 Perfil final  $T = 3$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.7 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 12$  cm**

**Gradiente Positivo**  
 **$T = 4$  [s],  $H = 12$  [cm]**

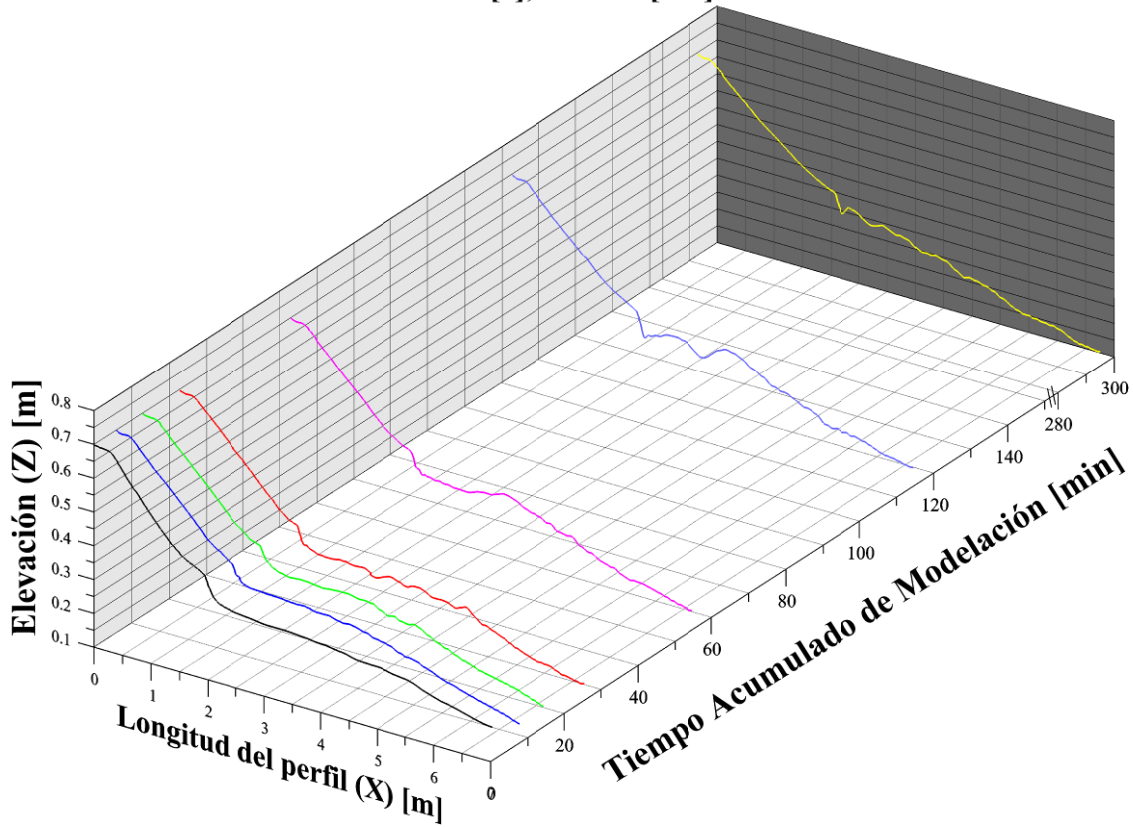


Figura VIII.45 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

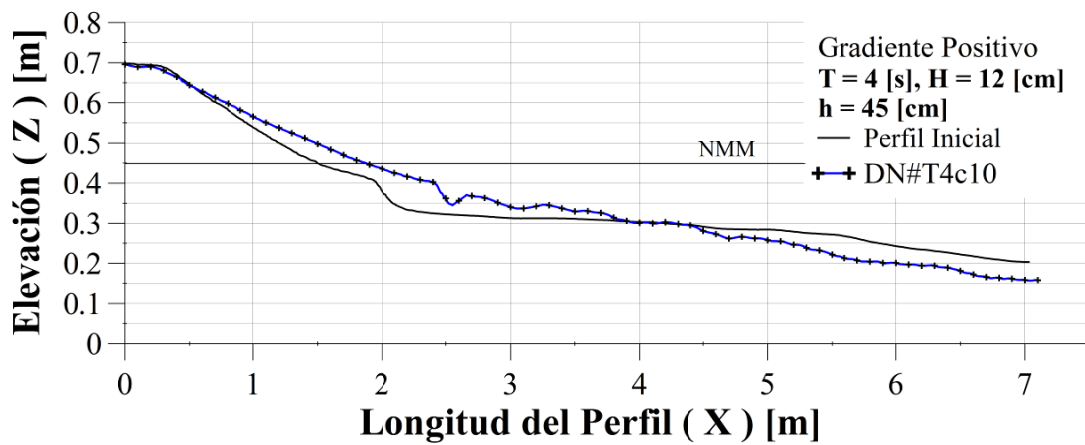


Figura VIII.46 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 12$  cm, Gradiente Positivo

**VIII.3.8 Gráficas de la evolución temporal del perfil para un periodo  $T = 4$  s y altura de ola  $H = 16$  cm**

**Gradiente Positivo**  
 **$T = 4$  [s],  $H = 16$  [cm]**

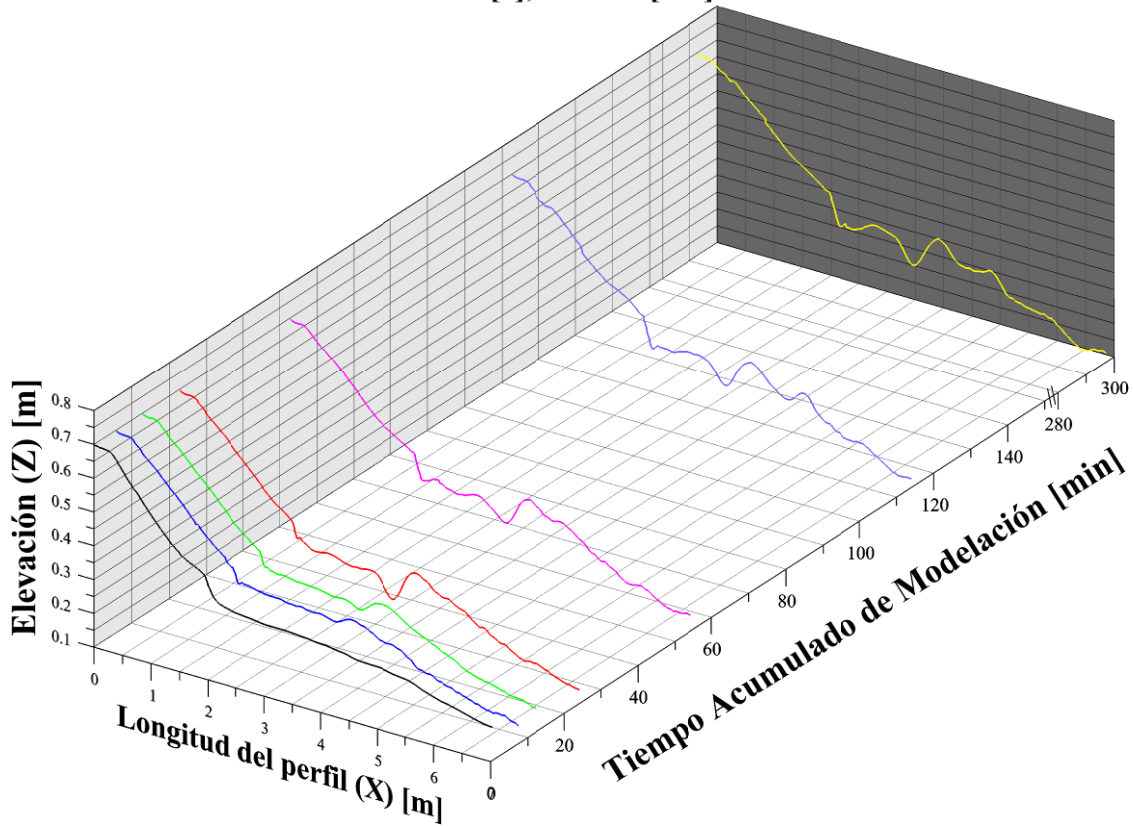


Figura VIII.47 Evolución temporal del perfil  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo

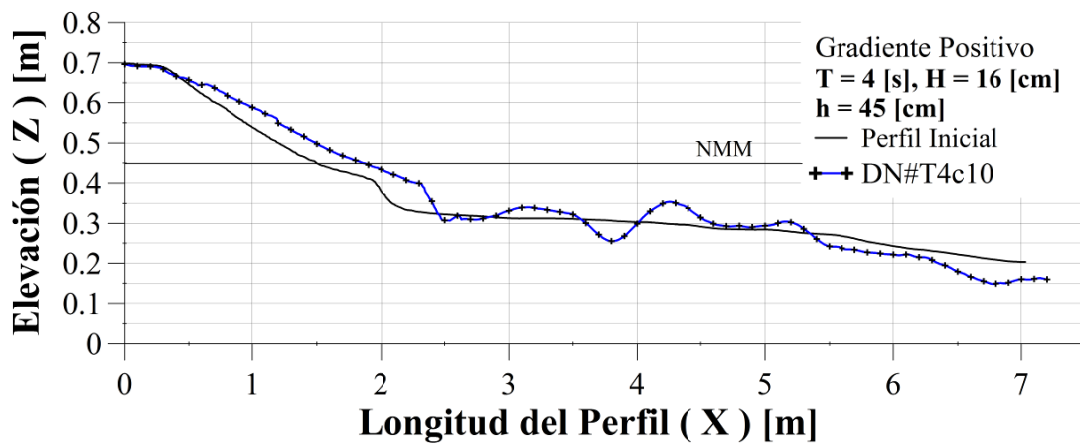


Figura VIII.48 Perfil final  $T = 4$  s,  $H = 16$  cm, Gradiente Positivo