



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de

Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MECANISMO DE GENERACIÓN DE ONDAS
INFRAGRAVITATORIAS EN UNA PLAYA CON PERFIL CON BARRA**

Eduardo Alejandro González Pacheco

Abril 2012

APROBACIÓN

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MECANISMO DE GENERACIÓN DE ONDAS INFRAGRAVITATORIAS EN UNA PLAYA CON PERFIL CON BARRA.

Eduardo Alejandro González Pacheco

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

RODRIGO CIENFUEGOS
CARRASCO

Profesor guía

MAURICIO MOLINA PEREIRA

Docente

CATALINA AGUIRRE GALAZ

Docente

DECLARACIÓN

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

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

Eduardo González Pacheco

Alumno

Rodrigo Cienfuegos Carrasco

Profesor Guía

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a:

*Mi familia por el apoyo incondicional que me ha demostrado,
por entregarme cariño y aceptarme con mis defectos y virtudes.*

*Mi bebe "Agustiny" por ser el motor de mi vida,
por alegrar cada instante con tus travesuras y cariños,
eres y serás el pilar fundamental de mi vida.*

*Rodrigo Cienfuegos por su ayuda y dedicación desinteresada,
y en nombre de él a la Pontificia Universidad Católica de Chile
especialmente al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental,
quienes me acogieron como un alumno más.*

*El Instituto Nacional de Hidráulica por proporcionarme sus instalaciones
y equipamiento técnico necesario para realización
de las experimentaciones físicas utilizadas en esta memoria.*

*A mis amigos de vida, aulas, canchas y agua,
gracias por apoyo y los momentos de alegría,
me siento muy afortunado por elegirlos como integrantes de mi familia.*

Eduardo González Pacheco

*No permitas que nadie diga que eres incapaz de hacer algo...
Si tienes un sueño, debes conservarlo...
Si quieres algo, sal a buscarlo. Y punto.*

Will Smith.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	2
2.1	CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS.....	2
2.2	ONDAS INFRAGRAVITATORIAS.....	4
2.3	GRUPO DE OLAS	6
2.4	TENSOR DE RADIACIÓN	9
2.4.1	VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR	13
3	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	18
4	METODOLOGÍA.....	19
4.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
4.2	EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL	21
4.2.1	CANAL DE OLAS.....	21
4.2.2	PALETA GENERADORA DE OLEAJE	22
4.2.3	UNIDAD DE CONTROL.....	22
4.2.4	SONDAS RESISTIVAS.....	23
4.3	MODELO NUMÉRICO	23
4.3.1	DESCRIPCIÓN SERR-1D.....	24
4.4	TECNICAS DE ANÁLISIS	27
4.4.1	DOMINIO DEL TIEMPO.....	27
4.4.2	DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	30
4.4.3	MODOS PROPIOS	31
5	RESULTADOS	34
5.1	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	34
5.1.1	ESPECTRO FORZANTE	34
5.1.2	REPETIVIDAD NIVEL BAJO.....	35
5.1.3	REPETIVIDAD NIVEL ALTO.....	37
5.1.4	COMPARACIÓN MODELACIÓN NUMÉRICA CON SERIES EXPERIMENTALES	38
5.2	PROPAGACIÓN DE OLEAJE A LO LARGO DEL CANAL	41

5.2.1	NIVEL ALTO DE REFERENCIA	42
5.2.2	NIVEL BAJO DE REFERENCIA	44
5.2.3	ANÁLISIS AMBOS NIVELES REFERENCIA.....	45
5.3	DETERMINACIÓN DE LOS MODOS PROPIOS.....	46
5.4	HISTOGRAMAS.....	48
5.5	ANÁLISIS ESPECTRAL.....	50
5.5.1	NIVEL ALTO DE REFERENCIA	50
5.5.2	NIVEL BAJO DE REFERENCIA	51
5.5.3	VARIACIÓN ESPECTRAL DE LA BANDA INFRAGRAVITATORIA	53
5.6	ALTURA DE LA OLA INFRAGRAVITATORIA.....	56
5.7	CORRELACIONES CRUZADAS.....	58
5.7.1	ANÁLISIS DE CORRELACIONES.....	60
5.7.2	PROPAGACIÓN DE LA ONDA INFRAGRAVITATORIA.....	62
6	CONCLUSIONES	65
7	GLOSARIO.....	67
9	REFERENCIAS	69
10	ANEXOS.....	73
10.1	GRÁFICOS	73
10.1.1	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	73
10.1.2	NIVEL BAJO DE REFERENCIA	73
10.1.3	NIVEL ALTO DE REFERENCIA	82
10.1.4	PROPAGACIÓN DE OLEAJE.....	92
10.2	TABLAS.....	96
10.2.1	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL, NIVEL BAJO.....	96
10.2.2	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL, NIVEL ALTO.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las ondas (Johnson, Johnson, Mansard, & Ploeg, 1978)	3
Tabla 2: Valores espectrales infragravitatorios para obtención de la amplitud.....	54
Tabla 3: Repeticiones nivel bajo.....	96
Tabla 4: Repetividad nivel alto	96
Tabla 5: Correlaciones del repeticiones del punto de control para el nivel bajo	97
Tabla 6: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=22$ [m].....	97
Tabla 7: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=30.75$ [m]	97
Tabla 8: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=31.75$ [m]	98
Tabla 9: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=36$ [m].....	98
Tabla 10: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=41.5$ [m].....	98
Tabla 11: Correlaciones de las repeticiones del punto de control para el nivel alto	99
Tabla 12: Correlaciones para repeticiones en ubicación $x=17$ [m].....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Frecuencias características asociadas a las ondas (Holthuijsen, 2007)	2
Figura 2: Grupo de olas (Holthuijsen, 2007)	6
Figura 3: Derivación del tensor de radiación (Holthuijsen, 2007)	9
Figura 4: Balance de momentum (Holthuijsen, 2007)	11
Figura 5: Gradientes del tensor de radiación, (Holthuijsen, 2007)	13
Figura 6: Balance de los gradientes de presión y tensor de radiación, (Holthuijsen, 2007)...	14
Figura 7: Variaciones del nivel medio del mar, (Holthuijsen, 2007).....	16
Figura 8: Generación de oleaje experimental, (Liu & Frigaard, 2001)	20
Figura 9: Diagrama experimental para ambos niveles de referencia	21
Figura 10: Paleta generadora de oleaje.....	22
Figura 11: Sondas resistivas	23
Figura 12: Esquema de rotura y definición de variables, (Cienfuegos & Mignot, 2009)	25
Figura 13: Zero-downcrossing, (Liu & Frigaard, 2001).....	28
Figura 14: Histogramas, (Liu & Frigaard, 2001).....	29
Figura 15: Componentes armónicos, (Holthuijsen, 2007).	30
Figura 16: Comparación de espectro generado versus el espectro teórico, (elaboración propia).....	35
Figura 17: Repetividad de señal nivel bajo $x=0$ [m], (elaboración propia)	36
Figura 18: Sensibilidad modelo numérico para el nivel bajo, (elaboración propia).....	39
Figura 19: Sensibilidad modelo numérico para el nivel alto, (elaboración propia).....	41
Figura 20: Propagación de olas a lo largo del canal nivel alto, (elaboración propia).	43
Figura 21: Propagación de olas a lo largo del canal nivel bajo, (elaboración propia).	44
Figura 23: Altura significativa a lo largo del canal, (elaboración propia).....	46
Figura 23: Modos propios asociados a su onda característica nivel alto, (elaboración propia)	47
Figura 24: Modos propios asociados a su onda característica nivel bajo, (elaboración propia).	47

Figura 25: Histogramas nivel bajo de referencia, (elaboración propia).	48
Figura 26: Histogramas nivel alto de referencia, (elaboración propia)	49
Figura 27: Análisis espectral nivel alto, (elaboración propia).	51
Figura 28: Análisis espectral nivel bajo, (elaboración propia).	52
Figura 29: Ancho de banda infragravitatoria, (elaboración propia).....	53
Figura 30: Ondas asociadas a los modos propios nivel alto, (elaboración propia).....	55
Figura 31: Ondas asociadas a los modos propios nivel bajo, (elaboración propia).....	56
Figura 32: Alturas Hrms infragravitatorias, (elaboración propia).	57
Figura 33: Factor de agrupamiento vs Hrms, (elaboración propia).	58
Figura 34 : Envoltente de señal, (elaboración propia).....	59
Figura 35: Correlación entre la envoltente de la señal y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico para el nivel alto, (elaboración propia).	60
Figura 36: Correlación entre la envoltente de la señal y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico para el nivel bajo, (elaboración propia).	61
Figura 37: Correlación entre la envoltente de la señal en la ubicación inicial y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico Nivel alto, (elaboración propia).....	63
Figura 38: Correlación entre la envoltente de la señal en la ubicación inicial y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico Nivel bajo, (elaboración propia).	64
Figura 39: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia). 74	
Figura 40: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia). 75	
Figura 41: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia). 76	
Figura 42: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia). 77	
Figura 43: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -1 [mm] Nb, (elaboración propia).... 78	
Figura 44: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia). 79	
Figura 45: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia). 80	
Figura 46 : Modelo numérico combinación 29[°] y offset -1 [mm] Nb, (elaboración propia)... 81	
Figura 47: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.1 [mm] Na, (elaboración propia). 83	
Figura 48: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.5 [mm] Na, (elaboración propia). 84	

Figura 49: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia)....	85
Figura 50: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.1 [mm] Na, (elaboración propia).	86
Figura 51: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.5 [m] Na, (elaboración propia)....	87
Figura 52: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia)....	88
Figura 53: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.5 [mm] Na, (elaboración propia).	89
Figura 54: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia)....	90
Figura 55: Sensibilidad modelo numérico para el nivel bajo para diferentes ángulos, (elaboración propia).	91
Figura 56: Sensibilidad modelo numérico para el nivel alto para diferentes ángulos, (elaboración propia).	91
Figura 57: Periodos nivel alto, (elaboración propia).....	92
Figura 58: Alturas nivel alto, (elaboración propia).....	93
Figura 59: Periodos nivel bajo, (elaboración propia).....	94
Figura 60: Alturas nivel bajo, (elaboración propia).....	95

RESUMEN

Las ondas infragravitatorias son generadas de forma natural producto de procesos de propagación y rotura de grupos de olas. Estas ondas son capaces de penetrar dársenas y regiones semicerradas generando problemas de resonancia, además de incidir importantemente en el transporte de sedimentos y la morfología de las playas.

Para estimar este tipo de ondas de baja frecuencia, se realizó un estudio experimental en el canal de olas del Instituto Nacional de Hidráulica en dos niveles de referencia considerando una batimetría cuya característica principal es la presencia de una barra longitudinal. Este análisis será contrastado con los valores entregados por el modelo numérico SERR-1D.

Los resultados proporcionados por este estudio indican la liberación de la onda asociada al grupo de olas incidentes (Bound Wave) producto de la rotura, lo que genera una onda infragravitatoria que viaja a la velocidad del grupo. A medida que se acerca la onda infragravitatoria a sectores de menor profundidad, comienza a ganar relevancia, tendiendo a converger con el bore, para posteriormente ser reflejada en la línea de costa. Cabe mencionar que una fracción de la onda Infragravitatoria es reflejada por la acción de la barra.

Esta generación está directamente relacionada con la profundidad local, observándose que para el nivel bajo las ondas de alta frecuencia del grupo son destruidas por efectos de la rotura del oleaje en la zona de la barra. En cambio, para el nivel alto, las ondas asociadas al grupo de olas persisten después de la barra, conteniendo la onda forzada una mayor cantidad de tiempo, para luego romper en sectores de menor profundidad, liberando la onda infragravitatoria.

1 **INTRODUCCIÓN**

Por lo general las ondas que inciden sobre las costas son de corto periodo (del orden de 10[s]). Sin embargo, mediciones experimentales han demostrado la presencia de ondas infragravatorias con frecuencias que oscilan entre los 0.005 y 0.05 [Hz] (Munk, 1949) y (Tucker, 1950). Este tipo de ondas son generadas en la zona de surf como resultado de la superposición de ondas de distinta frecuencia, siendo estas capaces de penetrar dársenas y regiones semicerradas dando lugar a problemas de resonancia, disminuyendo la operatividad de puertos, además de incidir importantemente en el transporte de sedimentos y la morfodinámica de las playas.

Para poder estudiar los mecanismos de generación y dinámica de estas ondas, se realizaron ensayos en el canal de olas del Instituto Nacional Hidráulica para dos niveles de profundidad que se emplearon como referencia, considerando en ambos casos las mismas condiciones de oleaje espectral. Estas experimentaciones tendrán como característica principal la conformación de una barra longitudinal en las proximidades de la costa.

A lo largo del canal olas se obtuvieron series de desnivelaciones de la superficie de agua, que permitirán analizar el comportamiento del oleaje a medida que este se acerque a la costa, estimando de esta forma la influencia que posee la barra en la generación y disipación de las ondas de baja frecuencia y alta frecuencia.

Los resultados de estos ensayos serán comparados con un modelo de propagación de oleaje (SERR-1D), que es capaz de resolver ecuaciones de Boussinesq, incluyendo la disipación de energía del oleaje en la zona de rotura.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

Para poder estudiar los procesos de generación y dinámica de las ondas infragravitatoria, es necesario en un comienzo conocer los conceptos básicos que permitan interpretar y analizar los resultados proporcionados por este estudio.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS

En el océano siempre hay un tipo de onda que pone de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfase agua-atmósfera que constituye la superficie del mar. Los mecanismos que aportan energía son de diversa naturaleza como el viento, atracciones gravitatorias, terremotos, etc. Como consecuencia de la variabilidad en las características de los distintos forzamientos mencionados, las ondas difieren tanto en su longitud como el periodo de la onda. La Figura 1 muestra el esquema de las ondas superficiales asociadas a cada frecuencia.

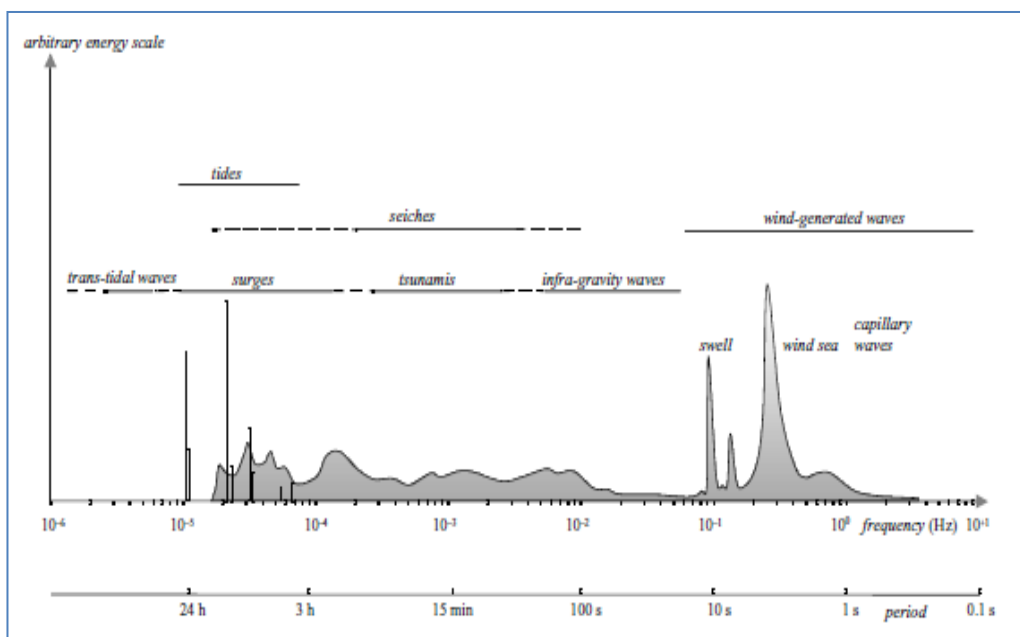


Figura 1: Frecuencias características asociadas a las ondas (Holthuijsen, 2007)

Las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas; una clasificación usa las fuerzas que generan al oleaje, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica (Tabla 1) en esta se puede distinguir:

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan el oleaje local y distante
- Los terremotos o deslizamientos superficie, generan grandes ondas conocidas como tsunamis, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.
- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas (Silva, 2005).

Tabla 1: Clasificación de las ondas (**Johnson, Johnson, Mansard, & Ploeg, 1978**)

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

2.2 ONDAS INFRAGRAVITATORIAS

Las ondas infragravitatorias son generadas en la zona de surf de forma natural por mecanismos que transforman la energía de onda corta proveniente desde aguas profundas en onda larga. En la literatura se proponen dos métodos de generación de estas ondas, los cuales se presentan a continuación

Los primeros en investigar este tipo de ondas fueron (Munk, 1949) y (Tucker, 1950) quienes sugirieron que las ondas infragravitatorias son producidas por rotura de grupos de olas que se acercan a la costa. A través de sus estudios observaron que los grupos de olas son seguidos por ondas largas después de unos 4 a 5 minutos, que es el tiempo aproximado que toma un grupo de olas en llegar a la playa y viajar de regreso como onda larga. De sus estudios (Tucker, 1950) concluyó que, “las ondas deben tener algo que empujar para acelerar el agua cuando el grupo de olas alcanza la zona de rotura, liberando una onda que viaja hacia la costa y otra que se aleja hacia mar adentro (dejando una depresión en el medio)”. A este tipo de ondas largas se les denominó Surf Beat.

(Longuet-Higgins & Stewart, 1962), a través de sus investigaciones añadieron que la generación de ondas infragravitatorias asociadas a grupos de olas se debe a las variaciones del tensor de radiación. Este fenómeno es producto del movimiento de fluido, el cual desarrolla fuerzas (de flujo de momentum) que actúan sobre la columna de agua, estas a su vez generan movimientos y desplazamientos de partículas de agua, las cuales interactúan con el medio. De sus estudios (Longuet-Higgins & Stewart, 1962) concluyeron que un grupo de olas tiene asociado una depresión del nivel promedio de la superficie libre, producto de la variación del tensor de radiación, lo que genera una disminución de la presión en la rompiente obligando a liberar la onda.

Por su parte (Symonds, Huntley, & Bowen, 1982) determinó que la variación temporal del punto de rotura incide en el cambio de las amplitudes, creando grupos de ondas los cuales pueden generar energía de ondas largas. Estas variaciones del punto de rotura se generan por cambios en tensor de radiación.

Estos estudios fueron complementados por (Baldock, Huntley, Bird, O`Hare, & Bullock, 2000) quien mediante sus experimentaciones en dos dimensiones señaló que los Surf Beats dependen de las dimensiones de la zona de surf, además de determinar la dependencia lineal entre las ondas largas y las ondas cortas. También propuso que las variaciones en la zona Swash son forzadas por la dinámica de las ondas infragravitatoria.

La propagación del grupo de olas y la onda ligada (bound wave) a lo largo costa fueron analizados por (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003) y (Baldock, 2006), cuyos resultados de las correlaciones cruzadas, evidenciaron desfases de los sub-armónicos formados a medida que decrece las profundidades, observando además, fenómenos reflexivos en la parte alta de playa.

Otros estudios realizados por (Hwung & Lin, 2007) determinaron mediante experiencias de laboratorios para dos tipos de pendientes que mientras más leves sean estas reducen la magnitud de las ondas infragravitatorias. Indicando además que la profundidad del agua y la pendiente afectan notablemente en los mecanismos de formación de ondas de baja frecuencia, mientras la profundidad sea más pequeña aparecen más evidentes las magnitudes del Surf Beats acompañado de una disminución de la energía de onda corta.

La disipación de las ondas de baja frecuencia fue investigado por (Van Dongeren, 2007), quien concluyo que las olas que se propagan como bore en la zona de surf tienden a converger con las ondas largas, disminuyendo el bore producto de la rotura de onda corta, dominando la onda infragravitatoria en la zona de Swash.

2.3 GRUPO DE OLAS

La adición de dos ondas que se propagan con idéntica amplitud y dirección con frecuencias ligeramente diferentes generan otro tipo canónico de movimiento de las ondas. Esta superficie está formada por las ondas individuales que se propagan a una celeridad ($c = L/T$)¹, que es modulada por una envolvente que avanza a la velocidad del grupo. El perfil resultante muestra el agrupamiento de las ondas individuales dando lugar al concepto de grupo de olas (Figura 2).

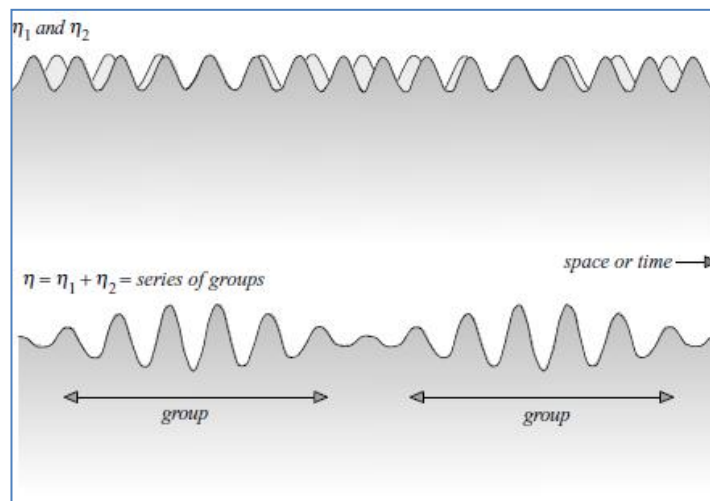


Figura 2: Grupo de olas (Holthuijsen, 2007)

Los grupos de olas que se propagan tienen asociado una onda infragravitatoria que viaja a la celeridad del grupo, esta es provocada por variaciones del tensor de radiación (capítulo 2.4). Esta onda ligada al grupo (Bound waves) al propagarse por aguas menos profundas es liberada producto de la rotura del oleaje, viajando libre (Free wave) hasta la línea de costa provocando cambios periódicos en set-up y set-down del oleaje.

Las características del agrupamiento de olas fueron descritas (Funke & Mansard, 1979), este desarrollo el concepto de SIWEH² y el factor de agrupamiento (GF).

¹ La celeridad de la onda depende la longitud y periodo de la onda.

² Smoothed Instantaneous Wave Energy History

SIWEH es una función que describe la distribución de energía ($E(t)$) a lo largo del tiempo, es una alternativa propuesta para las funciones de envolvente que son capaces de describir al grupo en los trenes de olas, reproduciendo la secuencia particular de ondas largas y cortas.

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t + \tau) Q(\tau) d\tau \quad 2-1$$

El valor de η es el desplazamiento de la superficie del agua con valor medio igual a cero y $Q(\tau)$ es la convolución rectangular de la ventana de datos. La densidad espectral del SIWEH es usada para describir el factor del agrupamiento de olas, que es el grado de actividad que experimenta el grupo.

$$GF_{siweh} = \frac{1}{\overline{E(t)}} \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} [E(t) - \overline{E(t)}]^2 dt} \quad 2-2$$

Siendo T_n la duración de la señal y $\overline{E(t)}$ es el valor medio en tiempo. Con el paso de los años (List J. , 1991) propone otra forma de estimar el factor de agrupamiento, esta expresión se basa en las alturas de la superficie del mar. Siendo σ_A la desviación estándar y $\overline{A(t)}$ la media de las amplitudes.

$$GF_A = \frac{\sqrt{2}\sigma_A}{\overline{A(t)}} \quad 2-3$$

Otro método para la obtención de la envolvente de los grupos olas es la transformada de Hilbert, la cual es capaz de describir envolvente de una señal, esta transformada es equivalente a la rotación en $\pi/2$ de cada componente armónico, la transformada de Hilbert está definida como:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad 2-4$$

La transformada de Hilbert es importante porque permite calcular la señal analítica, siendo $\hat{s}(t)$ la transformada de Hilbert de la señal $s(t)$ (τ =frecuencia) y s_a la señal analítica.

$$s_a = s(t) + i\hat{s}(t)$$

2—5

(List J. , 1991), analizó el proceso de propagación de grupos de olas desde aguas profundas hasta la línea de costa, llegando a la conclusión que el factor de agrupamiento (GF) es prácticamente constante en aguas profundas disminuyendo rápidamente en la zona de surf, observando que el agrupamiento de las olas es sensible al rompimiento del oleaje.

2.4 TENSOR DE RADIACIÓN

El transporte de momentum inducido por una onda es equivalente a una fuerza y es denominado tensor de radiación (Longuet-Higgins & Stewart, 1962), que corresponde a un exceso de flujo de momentum que actúa sobre la columna de agua, esta es creada cuando un fluido se encuentra en movimiento induciendo desplazamientos de las partículas de agua las cuales interactúan con el medio, este exceso estará determinado por la diferencia entre fuerzas generadas en la situación con y sin presencia de oleaje. Al ser aplicadas estas fuerzas en una sección transversal a su dirección se generan presiones y tensiones, que de acuerdo a las condiciones de flujo tendrán distintas implicancias en el medio.

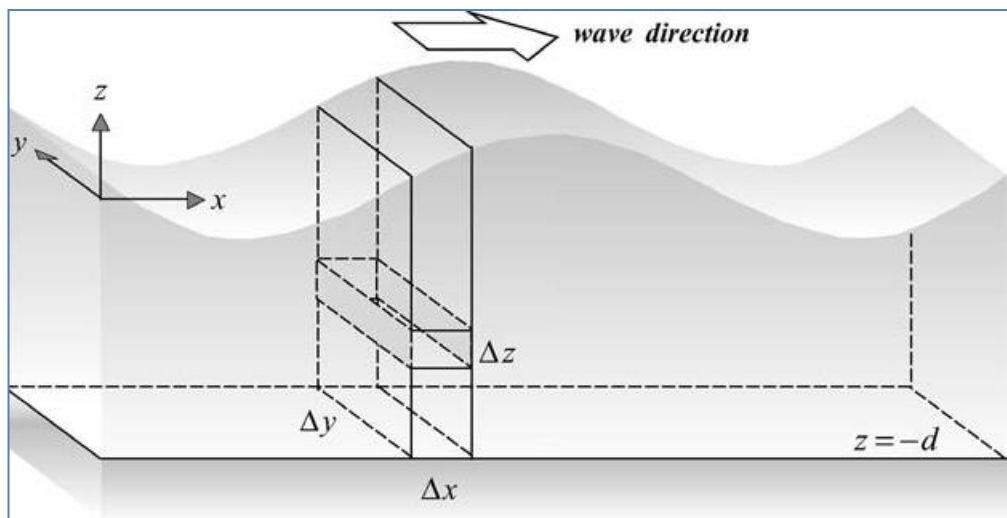


Figura 3: Derivación del tensor de radiación (Holthuijsen, 2007)

Para encontrar la expresión de esta fuerza se debe considerar un oleaje progresivo en dirección x , a través de un plano vertical $\Delta y \Delta z$ por la velocidad de la partícula u_x en un intervalo de tiempo Δt .

$$S_{xx} = \left(\int_{-d}^{\eta} (\rho u_x u_x + P_{ola}) dz \right) \Delta y \Delta t \quad 2-6$$

$\rho u_x u_x$ = Flujo de cantidad de movimiento

P_{ola} = Presión dinámica del oleaje

Considerando un ancho unitario y por una unidad de tiempo, y dado que la velocidad depende de la fase de la onda (la cual varía en el tiempo), es posible utilizar el promedio.

$$S_{xx} = \overline{\int_{-d}^{\eta} (\rho u_x u_x + P_{ola}) dz} \quad 2-7$$

$$S_{xx} = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho u_x^2 dz} + \int_{-d}^0 \bar{P}_{ola} dz + \overline{\int_0^{\eta} P_{ola} dz} \quad 2-8$$

Considerando la teoría lineal del oleaje para la columna de agua el flujo de cantidad de movimiento $\rho u_x u_x$, será:

$$\int_{-d}^{\eta} \rho u_x^2 dz = \int_{-d}^0 \rho u_x^2 dz + \int_0^{\eta} \rho u_x^2 dz \approx \int_{-d}^0 \rho u_x^2 dz = nE \quad 2-9$$

Siendo n la relación entre la velocidad de grupo de olas y la fase de la onda, y E la energía del oleaje.

En la teoría lineal del oleaje, la onda media inducida por la presión \bar{P}_{ola} es igual a cero, sin embargo en un segundo orden de aproximación no es así, esto se debe al movimiento vertical de las partículas de agua.

Para determinar la presión media de la ola se efectuará un balance vertical de momentum en la columna de agua, para un nivel z inferior a la superficie media con un oleaje propagándose en la dirección x .

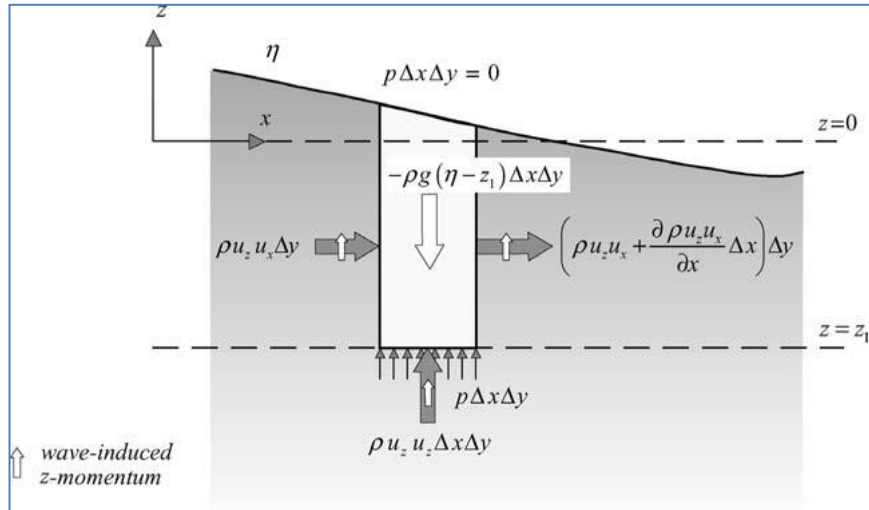


Figura 4: Balance de momentum (Holthuijsen, 2007)

En la Figura 4 se encuentra el diagrama de equilibrio de momentum, considerando la presión en la parte inferior de la columna de agua, las fuerzas de transferencia de cantidad de movimiento (dirección x) y el peso de la columna. Cabe mencionar que no se consideran los esfuerzos verticales de corte, debido a que los gradientes de velocidad orbital son muy pequeños. La ecuación de balance de momentum se presenta a continuación

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z dz \Delta x \Delta y = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z u_x dz \Delta x \Delta y + \rho u_z u_z \Delta x \Delta y - \rho g (\eta - z_1) \Delta x \Delta y + p \Delta x \Delta y \quad 2-10$$

- $\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z dz \Delta x \Delta y$ = Tasa de cambio del momentum vertical
- $-\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z u_x dz \Delta x \Delta y$ = Transferencia de momentum a través de la columna
- $\rho u_z u_z \Delta x \Delta y$ = Cantidad de flujo de momentum
- $-\rho g (\eta - z_1) \Delta x \Delta y$ = Peso de columna de agua
- $p \Delta x \Delta y$ = Fuerza de presión en la parte inferior de la columna

Asumiendo los siguientes fenómenos:

- Los efectos de la elevación de la superficie son pequeños, por lo tanto $\eta = 0$
- Condiciones estacionarias $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- Las ondas armónicas u_z y u_x están desfasadas 90° , $u_z u_x = 0$
- Área unitaria
- Presión hidrostática media

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z dz = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\eta} \rho u_z u_x dz + \rho u_z u_z - \rho g(\eta - z_1) + p \quad 2-11$$

$$0 = \rho u_z u_z - \rho g(\eta - z_1) + p \quad 2-12$$

$$\bar{P}_{ola} = -\rho u_z u_z \quad 2-13$$

Al utilizar la teoría lineal el resultado de la presión media es,

$$\int_{-d}^0 \bar{P}_{ola} dz = \int_{-d}^0 -\rho u_z^2 dz = (n-1)E \quad 2-14$$

$$\overline{\int_0^{\eta} P_{ola} dz} = \frac{1}{2}E \quad 2-15$$

Al reemplazar este resultado en la ecuación (2-8).

$$S_{xx} = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho u_x^2 dz} + \int_{-d}^0 \bar{P}_{ola} dz + \overline{\int_0^{\eta} P_{ola} dz} \quad 2-16$$

$$S_{xx} = nE + (n-1)E + \frac{1}{2}E \quad 2-17$$

$$S_{xx} = E(2n - \frac{1}{2}) \quad 2-18$$

2.4.1 VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

Las variaciones que experimenta el tensor de radiación pueden afectar el nivel medio del mar, sobre todo en la zona de surf, lo que se debe al aumento de transporte de momentum. El incremento del tensor de radiación es equivalente a ejercer una fuerza opuesta al cuerpo de agua (Figura 5).

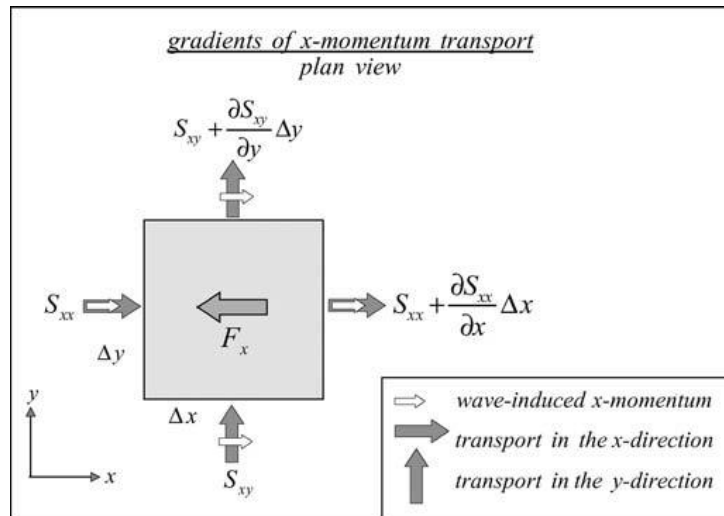


Figura 5: Gradientes del tensor de radiación, (Holthuijsen, 2007)

Esta fuerza inducida por el tensor de radiación en la dirección x es:

$$\mathbf{F}_x = -\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \quad 2-19$$

Dónde:

$\frac{\partial s_{xx}}{\partial x}$ = variación en la dirección x del tensor de radiación normal

$\frac{\partial s_{xy}}{\partial y}$ = variación en la dirección x del tensor de radiación cortante

Los índices ∂s_{xx} y ∂s_{xy} consideran el momento en sentido x , el signo negativo se debe al incremento del tensor de radiación. Al contrario cuando el tensor de radiación disminuye en la dirección x , la fuerza correspondiente es positiva. Esto es similar para la dirección y :

$$F_y = -\frac{\partial s_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial s_{yx}}{\partial x}$$

2—20

Estas fuerzas son las que generan los cambios en el nivel medio del mar y las corrientes.

Para ilustrar esto con una aplicación sencilla se debe considerar una situación unidimensional de una onda armónica acercándose a la costa en condiciones normales de incidencia. El correspondiente cambio del nivel medio del mar (denominado $\bar{\eta}$ para una profundidad d) se calcula realizando un balance de momentum considerando una columna vertical de agua con área $\Delta x \Delta y$ (Figura 6).

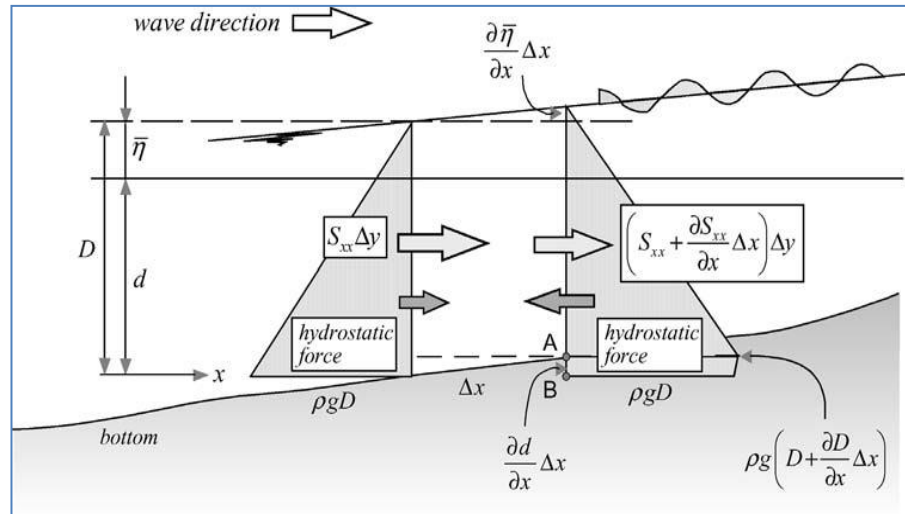


Figura 6: Balance de los gradientes de presión y tensor de radiación, (Holthuijsen, 2007)

La ecuación de conservación de momentum para la componente x , entrega un balance entre el cambio de momentum en x en un intervalo de tiempo Δt ($(\partial Q_x / \partial t) \Delta x \Delta y \Delta t$), el momento neto en un intervalo de tiempo ($-(\partial S_{xx} / \partial x) \Delta x \Delta y \Delta t$) y la producción local de cantidad de momentum en la dirección x que es la fuerza hidrostática neta.

La fuerza hidrostática neta es igual a la fuerza hidrostática en la parte izquierda (Figura 6) $1/2 \rho g D^2 \Delta y$, donde $D = d + \bar{\eta}$, menos la fuerza del lado derecho (entre el punto A y la elevación promedio de la superficie, $1/2 * \rho g [D + (\partial D / \partial x) \Delta x]^2 \Delta y$) y menos la componente horizontal de la fuerza hidrostática a lo largo del fondo (entre los puntos A y B, $\rho g [D + 1/2 * (\partial D / \partial x) \Delta x] (\partial d / \partial x) \Delta x \Delta y$). Ignorando los términos

de segundo orden la fuerza horizontal neta es $-\rho g(d + \bar{\eta}) * (\partial\bar{\eta}/\partial x)\Delta x\Delta y$, entonces la ecuación del balance de energía dividido por $\Delta x\Delta y\Delta t$ es:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} - \rho g(d + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \quad 2-21$$

Para una situación estacionaria, es decir, cuando todas las derivadas temporales son cero, esto se reduce a

$$\frac{ds_{xx}}{dx} + \rho g(d + \bar{\eta}) \frac{d\bar{\eta}}{dx} = 0 \quad 2-22$$

Asumiendo que $\bar{\eta} \ll d$

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{ds_{xx}}{dx} \quad 2-23$$

Esto implica que, si el gradiente del tensor de radiación es positivo $ds_{xx}/dx > 0$, la pendiente de la superficie media es negativa, $\partial\bar{\eta}/\partial x < 0$ (set-down), y si el gradiente del tensor de radiación es negativo, $ds_{xx}/dx < 0$ la pendiente de la superficie media es positivo, $\partial\bar{\eta}/\partial x > 0$ (set-up).

Si no se produce disipación de energía (en el caso unidimensional con incidencia normal del oleaje) las variaciones de la amplitud se deben únicamente al asomeramiento. Integrando la ecuación 2-22 tomando $\bar{\eta} = 0$ en aguas profundas, usando la ecuación de conservación de la energía para una onda en aguas someras y la expresión del tensor de radiación (ecuación 2-18) Se encuentra:

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{2} \frac{a^2 k}{\sinh(2kd)} \quad 2-24$$

El cual corresponde set-down sin disipación de energía (Longuet-Higgins & Stewart, 1962).

Aparentemente el promedio del nivel mar $\bar{\eta}$, en situación unidimensional estacionaria, sólo depende de los parámetros locales de la profundidad d , amplitud a y el número de onda k . El signo negativo muestra que el asomeramiento reduce el nivel medio del mar. Para aguas someras (cuando $\sinh(2kd) \approx 2kd$) el nivel del mar promedio es:

$$\bar{\eta} \approx -\frac{1}{16} \frac{H^2}{d}$$

2—25

Esta ecuación muestra que el set-down es proporcional al cuadrado de la altura de ola H (que generalmente es mayor hacia la costa, si las olas no rompen) e inversamente proporcional a la profundidad d , por lo que el set-down aumenta a medida que las olas se propagan sin disipación hacia la costa.

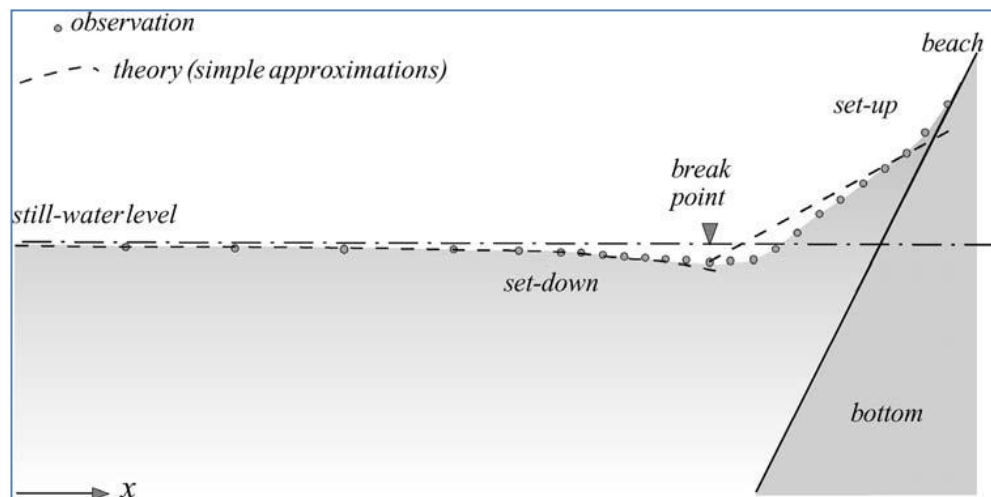


Figura 7: Variaciones del nivel medio del mar, (Holthuijsen, 2007)

En el punto de rotura, la amplitud comienza a disminuir y lo mismo ocurre con el tensor de radiación. Esto implica que $ds_{xx}/dx < 0$ y la pendiente de la superficie media cambia de signo, pasando de ser un set-down a un set-up. El set-up puede ser estimado suponiendo que el agua es poco profunda, tal que la onda es no dispersiva ($n = 1$, sustituyendo en la ecuación (2-18)) y también que la altura de ola es una fracción fija de la profundidad local ($H = \gamma(d + \bar{\eta})$), con γ constante, lo que implica la suposición de que la profundidad del agua disminuye monótonamente al acercarse a la playa), se obtiene que:

$$s_{xx} = \frac{3}{16} \rho g y^2 (d + \bar{\eta})^2 \quad 2-26$$

Sustituyendo en la ecuación de balance de momentum estacionario (ecuación 2-23)

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{3}{8} \gamma^2 \frac{d(d+\bar{\eta})}{dx} \quad \text{o} \quad \frac{d\bar{\eta}}{dx} = -K \frac{dd}{dx} \quad 2-27$$

$$K = \frac{3}{8} \gamma^2 / (1 + \frac{3}{8} \gamma^2) \quad 2-28$$

A medida que las profundidades disminuyen hacia la costa ($dd/dx < 0$), la elevación de la superficie media aumenta su pendiente ($d\bar{\eta}/dx > 0$). Integrando desde el punto de rompimiento ($d = d_b$ y $\bar{\eta}_b \approx -1/16 * H_b^2/d_b$) se obtiene el set-up con disipación de energía en función de la profundidad local:

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_b + K(d_b - d) \quad 2-29$$

Con la altura de ola y set-down en el punto de rompimiento $H_b = \gamma d_b$ y $\bar{\eta}_b \approx -1/16 * H_b^2/d_b$, se deduce que el set-up en la línea media del agua, cuando $D = d + \bar{\eta} = 0$ es:

$$\bar{\eta} = \frac{5}{16} \gamma H_b \quad 2-30$$

3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

El objetivo general de esta memoria es describir los procesos de generación y dinámica de las ondas infragravatorias, considerando la influencia de la barra longitudinal en dos niveles de profundidad.

Los objetivos específicos son:

1. Evaluar si el modelo numérico SERR-1D puede describir el comportamiento de las ondas infragravatorias, mediante la comparación de su estadística con las mediciones experimentales.
2. Determinar las frecuencias naturales de oscilación del canal de olas.
3. Determinar la relación entre las ondas infragravatorias y las ondas de corto periodo a lo largo del canal de olas.

4 **METODOLOGÍA**

Para analizar la propagación y dinámica de las ondas infragravitatorias, se obtuvieron series de tiempo de desnivelaciones mediante la realización de experimentaciones físicas y numéricas para dos niveles referenciales distintos.

En este capítulo se describirán los elementos utilizados para la generación, configuración y extracción de series de tiempo en el canal de olas del Instituto Nacional de Hidráulica. En tanto para el modelo numérico se describirán sus aplicaciones, características y condiciones a considerar para obtenciones de mejores resultados.

Estas series entregadas serán analizadas energética y estadísticamente, observando las variaciones que experimenta el oleaje en su propagación.

4.1 **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

La experimentación consta de la adquisición en laboratorio de series de desnivelaciones de la superficie libre. Para ello se propagó un oleaje espectral aleatorio tipo JONSWAP³ para dos niveles de referencia en una playa cuyo perfil posee una barra, de esta forma se busca caracterizar el comportamiento del oleaje a medida que se acerca a la costa y la importancia que ejerce la ubicación de la barra en la dinámica de las ondas infragravitatorias.

Las condiciones de oleaje a propagar en el canal tiene como característica ser aleatorio, caracterizado por un oleaje espectral tipo JONSWAP, cuyo periodo peak es 2,4 [s] y altura espectral 0.08 [m]. A partir de esta configuración se generaran las series de tiempo del oleaje incidentes, generado por la paleta.

La modelación física contempló una duración de 27 [min] registrando de ellos solo 25 [min], los primeros dos minutos no fueron contemplados en el estudio debido a que el oleaje no posee condiciones estables. Estas experimentaciones serán repetidas para ambos niveles de referencia, para así poder describir exhaustivamente el oleaje a lo largo del canal, considerando que sólo se cuenta 7 sondas resistivas para la realización del estudio.

Para la generación de dos niveles referenciales se modificaron las condiciones en situación de reposo del agua, considerando para el nivel alto una profundidad inicial

³ Joint North Sea Wave Project

0.52 [m], a diferencia del nivel bajo cuya profundidad es 0.46 [m], este procedimiento se realiza mediante el llenado y vaciado del canal de olas.

En la Figura 8 se presenta el esquema utilizado para la generación del oleaje, la señal de entrada al sistema es un oleaje espectral del tipo JONSWAP el cual depende de la altura y periodo peak, este espectro es procesado por una unidad de control que se encarga de traspasar al dominio del tiempo y posteriormente realizar una equivalencia tal que para cada centímetro de desnivelación sea igual a un volt. Esta señal es enviada a un mecanismo generador ubicado en la paleta, el cual evalúa el posicionamiento y la absorción de las ondas reflejadas mediante sensores, para luego enviar una señal al sistema hidráulico (pistón) generador.

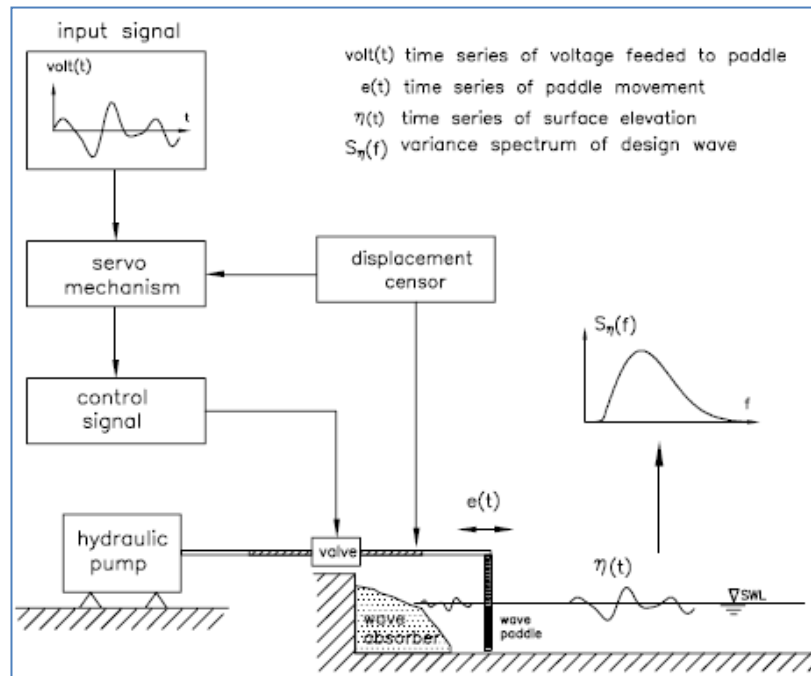


Figura 8: Generación de oleaje experimental, (Liu & Frigaard, 2001)

La extracción de series de tiempo de desnivelación a lo largo del canal se realizó teniendo como punto de referencia el posicionamiento de la sonda más cercana a la paleta generadora de oleaje, a los 5 [m] de distancia, desde esta ubicación desde ahora los 0 [m] se comenzaron a obtener series de tiempo disminuyendo paulatinamente la distancia de extracción en la zona de asomeramiento y rotura, obteniendo un total de 71 registros para el nivel alto y 81 en nivel bajo (ver Figura 9).

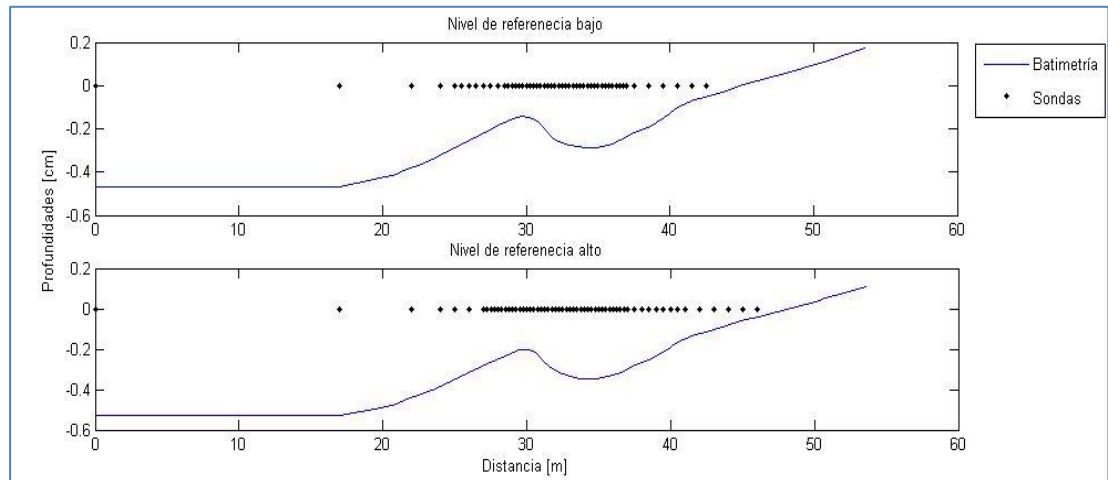


Figura 9: Diagrama experimental para ambos niveles de referencia

4.2 EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 CANAL DE OLAS

Para la obtención de datos experimentales que permitieran describir y caracterizar las ondas infragravitatorias, se utilizó el canal de olas del Instituto Nacional de Hidráulica que posee 70 [m] de largo y 1.5 [m] de ancho. Este canal posee dos secciones que se describen a continuación:

- La primera sección abarca desde la zona de generación del oleaje hasta los 23 [m], esta sección tiene como característica principal que el fondo es plano.
- La segunda sección tiene pendiente variable representando una playa de perfil con barra, esta zona tiene un extensión total de 37 [m].

El canal de olas es de hormigón en toda su extensión, existiendo sólo una pequeña fracción de la pared que posee vidrios, en la parte final de la segunda sección del canal, cuya finalidad principal es observar la interacción del oleaje con estructuras costeras. Para efectos de esta memoria esta zona no posee ninguna implicancia.

El fondo confeccionado en el canal de olas tiene como característica fundamental la inclusión de una barra y para efectos de este estudio se generaron dos profundidades distintas, al modificar el nivel de referencia (Figura 9).

4.2.2 PALETA GENERADORA DE OLEAJE

Este dispositivo es muy importante, porque es el encargado de generar el oleaje, posee una superficie de $2.25 [m^2]$ y su movimiento es generado por un pistón que es controlado por una unidad control. La paleta cuenta con cuatro sensores que permiten obtener información del nivel de la superficie libre, estos sensores forman parte de un sistema de absorción AWACS (Active Wave Absorption Control System), el cual se complementa con una unidad de control que retroalimenta las señales de movimiento de la paleta con los datos de los sensores. Este sistema está elaborado y diseñado por DHI⁴.



Figura 10: Paleta generadora de oleaje

4.2.3 UNIDAD DE CONTROL

Es el sistema central encargado del control y la configuración de las características del oleaje a generar por la paleta, en este se configura las condiciones espectrales, las cuales serán traspasadas al dominio del tiempo, permitiendo la reproducción de la serie de oleaje deseada. Además este sistema es el encargado de la calibración y almacenamientos de los datos obtenidos por las sondas.

⁴ Danish Hydraulics Institute

4.2.4 SONDAS RESISTIVAS

Para la extracción de las series de superficies libre, se contó con el apoyo de 7 sondas resistivas, diseñadas por el DHI, las cuales se conectan a sus respectivas tarjetas codificadoras de señal. Las señales receptionadas por estas tarjetas son traspasadas a la unidad de control, desde la cual se extraer las series temporales. Estas sondas son calibradas para una ganancia tal, que la señal obtenida cumpla que por cada volt que capte la sonda, el codificador indique un centímetro de superficie libre, esta calibración se debe hacer durante cada día de modelación o cada cambio de nivel del agua.



Figura 11: Sondas resistivas

4.3 MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico utilizado para la propagación de oleaje es el SERR-1D (Cienfuegos, 2005); (Cienfuegos, Rodrigo; Barthélemy, E.; Bonneton, P., 2006); (Cienfuegos, Rodrigo; Barthélemy, E.; Bonneton, P., 2007), este ha sido concebido para calcular la propagación de ondas en zonas costeras y ha sido validado para propagar olas por batimetrías variadas (Cienfuegos R. , 2006b). Este resuelve ecuaciones del tipo de Boussinesq integrando los términos espaciales, usando volúmenes finitos e integrando en el tiempo con el método Runge-Kutta de cuarto orden.

4.3.1 DESCRIPCIÓN SERR-1D

Este modelo se caracteriza por la incorporación de la dispersión de frecuencias evitando errores de truncamiento al realizar esquemas numéricos de alto orden en tiempo y espacio, Incluyendo la energía de disipación por efectos de la rotura y la fricción del fondo, las ecuaciones de conservación de masa y momentum se escriben de la siguiente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) - D_h = 0 \quad 4-1$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial u^2}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \Gamma_d - \frac{1}{h} D_{hu} + \frac{\tau_b}{\rho h} = 0 \quad 4-2$$

Donde ρ es la densidad del agua, h es la profundidad, u es la velocidad promedio en la horizontal, D_h y D_{hu} representan funciones de rotura inducida que se explicaran mas adelante, Γ_d contiene todos los términos difusivos, τ_b es el esfuerzo cortante en el fondo y g la aceleración de gravedad. Las variables x y t denotan coordenadas espaciales y temporales.

La energía de disipación inducida por los mecanismos de rotura se introduce a través de los términos difusivos, D_h y D_{hu} , aplicado localmente en el segmento l_r al comienzo de cresta de la ola (Figura 12). Para activar el proceso de rotura se requiere explícitamente un criterio, el utilizado es el propuesto por (Schäffer, Madsen, & Deigaard, 1993), este se activa cuando la media del ángulo de rotura (Φ) es mayor $\Phi_b = 31^\circ$ poniendo en marcha los procesos de rompimiento, estos términos adicionales dejan de usarse cuando los valores caen por debajo de los $\Phi_0 = 8^\circ$. Estos valores han sido calibrados con los valores (Ting & Kirby, 1994) a traves de experimentaciones de onda regular de (Cienfuegos, 2005); (2006b).

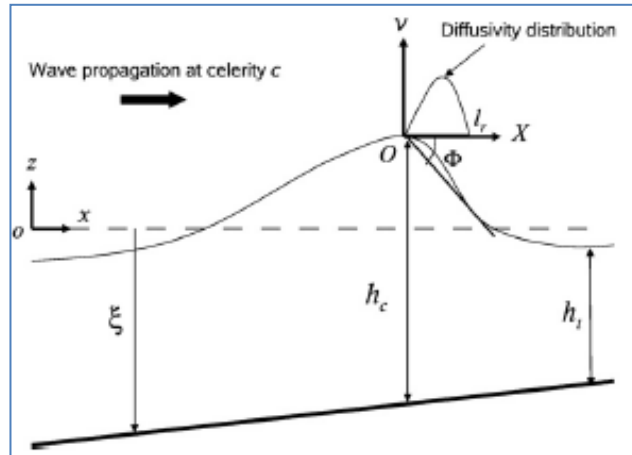


Figura 12: Esquema de rotura y definición de variables, (Cienfuegos & Mignot, 2009)

La forma matemática de D_h y D_{hu} es escogida para garantizar la completa preservación de la masa y momentum, activando y distribuyendo después de la zona de rotura. Estas ideas se basan en conceptos previamente analizados por (Zelt, 1991) y (Kennedy, Chen, Kirby, & Dalrymple, 2000) quienes introdujeron el término difusivo en la ecuación de conservación de momentum. Estos se escriben de esta forma:

$$D_h = \frac{\partial}{\partial X} \left(v_h \frac{\partial h}{\partial X} \right) \quad 4-3$$

$$D_{hu} = \frac{\partial}{\partial X} \left(v_{hu} \frac{\partial hu}{\partial X} \right) \quad 4-4$$

Donde v_h y v_{hu} son funciones de difusividad expresadas en (Cienfuegos, 2005); (2006); (2007).

$$v_h(X) = -\delta_h cd \exp \left(\frac{X}{l_r} - 1 \right) \left[\left(\frac{X}{l_r} - 1 \right) + \left(\frac{X}{l_r} - 1 \right)^2 \right] \quad 4-5$$

$$v_{hu}(X) = -\delta_{hu} cd \exp \left(\frac{X}{l_r} - 1 \right) \left[\left(\frac{X}{l_r} - 1 \right) + \left(\frac{X}{l_r} - 1 \right)^2 \right] \quad 4-6$$

Donde δ_h y δ_{hu} son coeficientes escalares constantes, c y d son características de la velocidad y del largo de la escala, X es la coordenada horizontal asociada a la cresta de ola en movimiento en el marco de referencia $(0, X)$, y l_r es la extensión de los términos activos posterior a la rotura (Figura 12). El largo de la escala d en el

modelo es estimado con el valor promedio entre las crestas (h_c) y la depresión (h_t) de la profundidad y la velocidad es $c = \sqrt{gd}$.

El término de la difusión en la ecuación de conservación de la masa puede estimar el aumento de la transferencia por rompimiento del frente de olas entre la cresta y depresión posterior a ruptura. Esto está acorde a observaciones empíricas que asociaron la cantidad de energía adicional a los efectos generados por la vorticidad en la zona de rotura (Dutykh & Dias, 2007).

Los valores numéricos de los parámetros del modelo calibrado por (Ting & Kirby, 1994) experimentados por (Cienfuegos, 2005); (2006); (2007; Cienfuegos, Rodrigo; Barthélemy, E.; Bonneton, P., 2007) son

$$\delta_h = 3.4 \quad 4-7$$

$$\delta_{nu} = 34 \quad 4-8$$

$$\frac{l_r}{d} = 0.82 \quad 4-9$$

Finalmente para la estimación de la tensión de corte en el fondo se utiliza el modelo de fricción (Grant & Madsen, 1979)

$$\tau_b = \frac{1}{2} C_f \rho u |u| \quad 4-10$$

Donde C_f es el coeficiente de rugosidad relativa, teniendo un coeficiente de Manning igual a n .

$$C_f = \frac{2gn^2}{n^{1/3}} \quad 4-11$$

4.4 TECNICAS DE ANÁLISIS

4.4.1 DOMINIO DEL TIEMPO

Para la caracterización del oleaje se debe tener en cuenta que en la mayoría de las ocasiones se trata de un proceso irregular, es decir, las alturas, periodos y direcciones no siempre son las mismas. Por este motivo es necesario definir un intervalo de tiempo durante el cual es posible asumir que las propiedades estadísticas del oleaje son estacionarias (estado de mar). Este intervalo de tiempo debe ser lo suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionariedad y lo suficientemente largo para que la muestra tenga un número representativo de olas para su tratamiento según (Holthuijsen, 2007) alrededor de 15 y 30 [min].

Existen diferentes alternativas para la definición de ola, el método de cruces ascendentes por cero (zero-upcrossing), método de cruces descendentes por cero (zero-downcrossing) y el método de las crestas. La metodología utilizada en esta memoria para definición de las olas será el cruces descendentes por cero, que consiste en el perfil de superficie libre entre dos cruces descendentes por cero de forma sucesiva, siendo cero el nivel referencia.

Para la utilización de este método en primer lugar se debe obtener el nivel medio de la superficie del mar definiéndola como la línea de referencia cero. A continuación, se realizará la búsqueda del punto en donde se cruza el nivel cero en forma descendente tomando este como punto inicial, la búsqueda continua hasta encontrar el próximo punto de cruce descendente por cero, siendo este el final e inicio de otro ola (Figura 13).

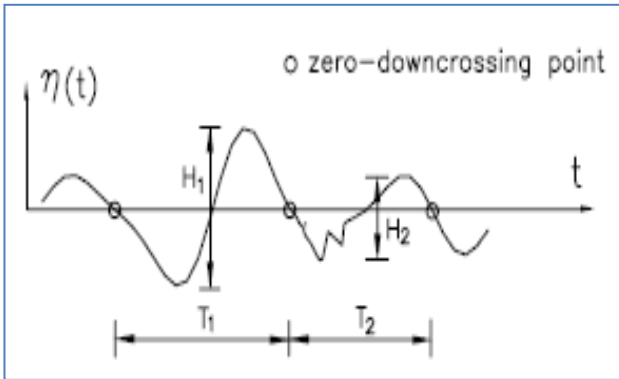


Figura 13: Zero-downcrossing, (Liu & Frigaard, 2001)

La distancia entre ambos puntos adyacentes se define como el periodo de las ondas y la distancia vertical entre el punto máximo y mínimo se denominara altura de ola. Estos criterios permiten caracterizar el registro de oleaje mediante un conjunto de alturas de olas y periodos sobre el cual se realizara un análisis estadístico de forma que el proceso quede caracterizado por un solo valor.

Para representar la alturas de oleaje se utilizaran 3 tipos de alturas; la altura media (4—12), que es promedio todas las alturas (N). La altura media cuadrática H_{rms} (4—13) y la altura significativa $H_{1/3}$ o H_s (4—14), que es el promedio de las alturas del tercio superior de oleaje.

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad 4-12$$

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad 4-13$$

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad 4-14$$

Los periodos que se utilizaran para caracterizar el oleaje serán el periodo medio \bar{T} (4—15), el periodo medio cuadrático T_{rms} (4—16) y el periodo significado $T_{1/3}$ o T_s (4—17) que es la media aritmética asociado al tercio superior de las olas.

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

4—15

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i^2}$$

4—16

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j$$

4—17

Estos resultados pueden ser agrupados en histogramas los cuales tiene la capacidad de representar una gran cantidad de oleaje, indicando el número de olas para cada intervalo. Agregando además que en ciertas condiciones variables del oleaje sigue una distribución de probabilidades conocida, la cual queda definida con algunos parámetros estadísticos conocidos.

El oleaje tipo Swell sigue una distribución tipo Rayleigh, de igual forma esta presenta bastantes limitaciones en aguas menos profundas (Figura 14).

La función de probabilidad de tipo Rayleigh es:

$$f(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right)$$

4—18

$$x = \frac{H}{\bar{H}}$$

4—19

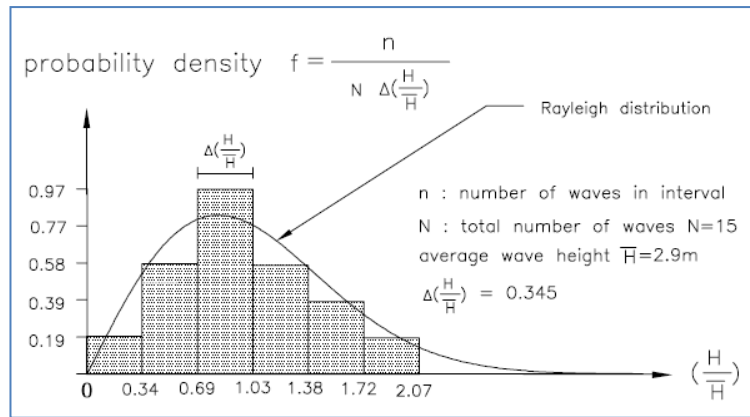


Figura 14: Histogramas, (Liu & Frigaard, 2001).

4.4.2 DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El análisis espectral de oleaje consiste en asumir que la superficie del agua puede representarse como la suma infinita de oscilaciones de carácter regular, con diferentes amplitudes (alturas), frecuencias (períodos) y direcciones.

Esto se puede reproducir exactamente como la suma de un gran número de componentes armónicos (una serie de Fourier). Siendo a_i la amplitud, f_i la frecuencia y α_i la fase.

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

4—20

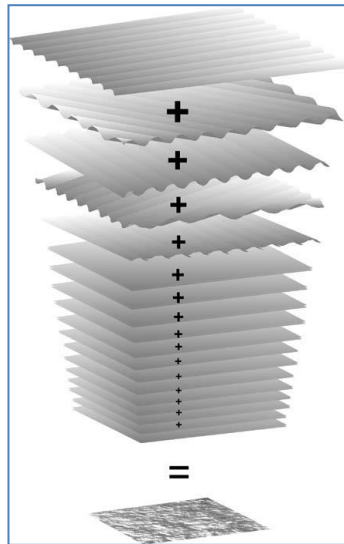


Figura 15: Componentes armónicos, (Holthuijsen, 2007).

El análisis espectral es una técnica de descomposición de un fenómeno físico complejos en sus componentes individuales con respecto a la frecuencia. Cada una de estas componentes tiene asociada una densidad espectral de energía, cuya magnitud es proporcional a la altura de la señal sinusoidal.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

4—21

El objeto de describir olas como un espectro, no es tanto describir en detalle la superficie del mar, sino más bien describirla como un proceso estocástico⁵, es decir, para caracterizar todas las posibles observaciones que se podrían haber hecho en condiciones reales.

La ventaja de esta representación es que se pueden graficar en forma simultánea todas las componentes de frecuencia presentes en un estado de mar.

4.4.3 MODOS PROPIOS

Las ondas largas en zonas costeras son capaces de excitar los modos naturales de vibración en zonas semiencerradas y cerradas (canal de olas). Las ondas al quedar encerradas entre las estructuras entran en resonancia induciendo la amplificación de ondas generando problemas de sobrepaso e inundaciones.

Para estimar las oscilaciones naturales del canal de olas se determinarán los valores propios asociados a las ecuaciones lineales homogéneas en aguas someras (4-22 y 4-23), suponiendo soluciones armónicas, obteniendo así un problema de contorno con variables espaciales. De este modo se tienen las ecuaciones que consideran velocidad del fluido en el canal $u(x, t)$ y la altura de ola $\eta(x, t)$ con respecto al nivel medio (h_0).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h(x)u(x, t)) = 0 \quad 4-22$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad 4-23$$

Donde g es la gravedad y $h(x)$ es nivel medio del agua. Al realizar una sustitución simple entre la ecuación 4-22 y 4-23 se obtiene:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - g \frac{\partial^2}{\partial x^2} (h(x)u(x, t)) = 0 \quad 4-24$$

⁵ Concepto matemático que sirve para la caracterización de una sucesión de variables aleatorias que evolucionan en función de otra variable.

La solución de la velocidad se puede expresar como la multiplicación de dos funciones, una con dependencia espacial y otra con dependencia temporal $u(x, t) = X(x)T(t)$. Si se consideran soluciones periódicas en el tiempo $T(t) = e^{i\omega t}$, con lo cual solo se busca resolver la parte espacial. Así, la solución se escribe como $u(x, t) = \bar{u}e^{i\omega t}$, al reemplazar en la ecuación 4-24 y derivar la parte temporal se obtiene una ecuación diferencial ordinaria.

$$\frac{\omega^2}{g}\bar{u} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}(h(x)\bar{u}) = 0 \quad 4-25$$

$$\frac{\omega^2}{g}\bar{u}h(x) + h(x)\frac{\partial^2}{\partial x^2}(h(x)\bar{u}) = 0 \quad 4-26$$

Realizando el cambio de variable $U = \bar{u}h(x)$

$$\frac{\omega^2}{g}U + h(x)\frac{\partial^2}{\partial x^2}U = 0 \quad 4-27$$

La ecuación no tiene solución exacta, ya que posee condiciones de borde que definen al sistema. La primera corresponde al límite de la pared, en donde se ubica la paleta generadora, en esta la velocidad del fluido es cero ($x=0$). Además, cuando la altura de agua con respecto al fondo es nula ($x=L$) la velocidad del fluido también lo es.

Resolviendo la ecuación 4-27 se deben conocer el valor de la frecuencias naturales del canal (ω), para ello se discretiza la ecuación diferencial ordinaria, utilizando el método de diferencias finitas.

$$U = U_i$$

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{\Delta x^2}$$

Obteniendo:

$$h_i \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{\omega^2}{g}U_i = 0 \quad 4-28$$

$$h_i U_{i+1} - 2h_i U_i + h_i U_{i-1} + \Delta x^2 \frac{\omega^2}{g} U_i = 0 \quad 4-29$$

$$h_i U_{i+1} - 2h_i U_i + h_i U_{i-1} + \lambda U_i = 0 \quad 4-30$$

$$-h_i U_{i+1} + 2h_i U_i - h_i U_{i-1} = \lambda U_i \quad 4-31$$

Donde $\lambda = \Delta x^2 \frac{\omega^2}{g}$ y el subíndice i desde 2 hasta N-1, por las condiciones de borde.

Esto se puede escribir como un sistema de ecuaciones de tal forma

$$A\vec{v} = \lambda\vec{v} \quad 4-32$$

Donde \vec{v} corresponde al vector propio de la matriz A y el valor propio asociado es λ . De esta forma se podrán obtener las mayores frecuencias naturales del canal.

5 RESULTADOS

5.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para validar los resultados experimentales y numéricos en ambos niveles de referencia, se analizó la repetitividad de la experimentación en el tiempo y el comportamiento estadístico del modelo numérico en contraste a los registros obtenidos de la modelación física.

Para ello se evaluó las correlaciones experimentales y las características espectrales observadas a la mayor profundidad, además de los resultados de la altura de oleaje, periodo y nivel medio del modelo numérico.

5.1.1 ESPECTRO FORZANTE

Para comprobar que el espectro generado en el canal de olas es el indicado en el sistema de control, se compararon los resultados teóricos del espectro JONSWAP con los proporcionados a mayor profundidad en ambos niveles de referencia (Figura 16), teniendo en consideración que a estas profundidades no se experimentan variaciones espectrales por las características del fondo del canal (fondo Horizontal).

Para ambos niveles de referencia se evidencia un excelente comportamiento en la zona angosta del espectro, teniendo frecuencias peaks de 0.4 [Hz], estos valores son coherentes considerando los parámetros ingresados en la unidad de control. Además se observan variaciones en la zona infragravitatoria de los espectros, que se deben a ondas de largo periodo que se encuentran atrapadas por diferentes motivos en el canal, estos se estudiarán en los próximos capítulos.

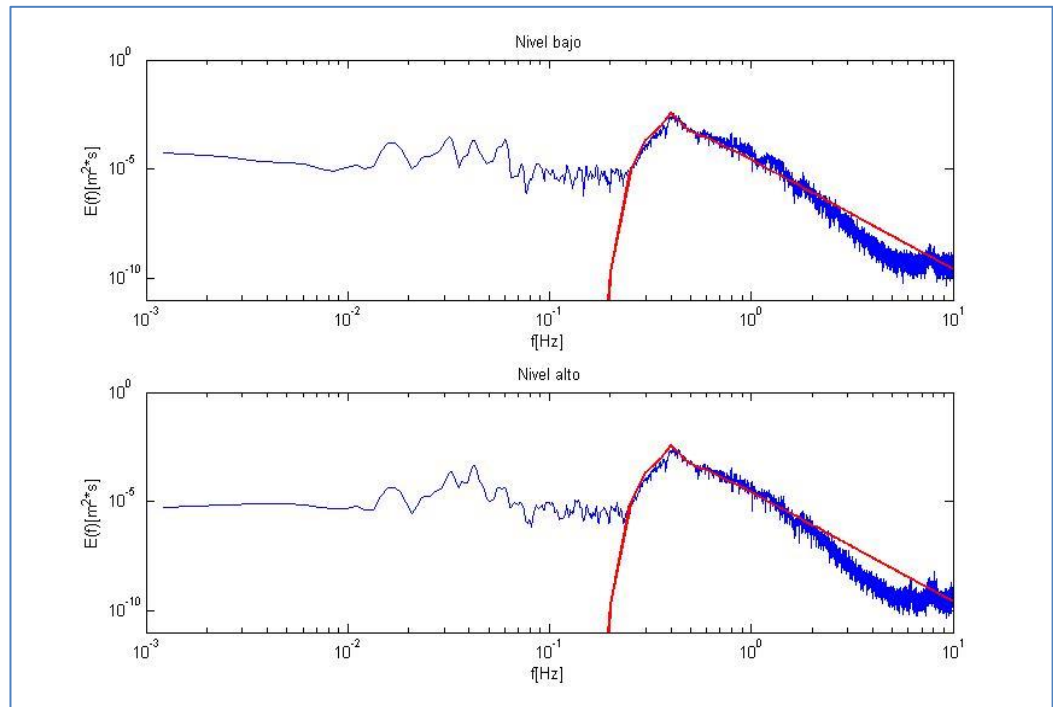


Figura 16: Comparación de espectro generado versus el espectro teórico, (elaboración propia)
En azul espectro experimental
En rojo espectro teórico JONSWAP

5.1.2 REPETIVIDAD NIVEL BAJO

El nivel bajo cuenta con un total de 76 series de desnivelaciones a lo largo del canal de los cuales 10 ubicaciones son repeticiones, Tabla 3, en estas posiciones se evaluó las covarianzas entre dos series de desnivelación ubicadas en idéntica posición espacial. La covarianza es una medida de dispersión conjunta entre dos variables estadísticas

Observando los resultados obtenidos del coeficiente de correlación o covarianza para cada una de las repeticiones (capítulo 10.2.1) se pueden apreciar que:

- Para la ubicación inicial ($X=0$ [m]) se obtuvieron variaciones de 0.1-0.4 [%] entre cada uno ellos, siendo la correlación máxima un 99.83 [%] y la mínima un 99.48 [%] (Tabla 5): Correlaciones del repeticiones del punto de control para el nivel bajo. Estos resultados son satisfactorios para cada una de combinaciones de repeticiones.

- Las correlaciones obtenidos antes del punto de máxima elevación de la barra (Tabla 6) poseen valores de un 99.7 y 99.6 [%] a los 17 y 22 [m], estas resultados manifiestan un excelente comportamiento, teniendo en consideración los efectos del asomeramiento en la propagación del oleaje.
- Los valores obtenidos en la máxima elevación de barra, experimentan correlaciones de un 95 y 98 [%] a los 30.75 y 31.75 [m] (Tabla 7 y Tabla 8), estos resultados son aceptables teniendo en consideración los efectos no lineales y la alta turbulencia experimentada por efecto de la rotura del oleaje.
- Al aproximarse el oleaje a la línea de costa los resultado poseen un 86 y 97 [%] en las 36 y 41.5 [m] (Tabla 9 y Tabla 10). Esta disminución de las correlaciones se encuentran asociados a posibles problemáticas relacionadas a disminución de profundidades de las sondas resistivas que son incapaces de registrar en la parte alta de la playa.
- La disminución de las correlaciones en la zona de rotura y en la parte alta de la playa es producto de procesos de turbulentos generados por la rotura del oleaje que son replicables en el tiempo. esta turbulencia es mucha mayor en parte alta de la playa.

De este análisis se puede concluir que los resultados proporcionados por la modelación experimental son repetibles en el tiempo (Figura 17) y pueden ser considerados para el análisis y validación del modelo numérico.

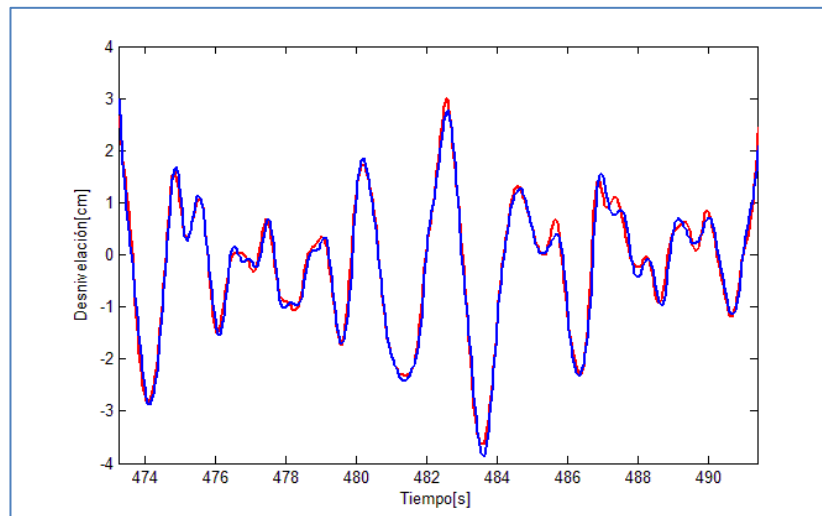


Figura 17: Repetibilidad de señal nivel bajo $x=0$ [m], (elaboración propia)
Series de desnivelación de la superficie libre obtenidas en la misma ubicación para dos modelaciones físicas.

5.1.3 REPETIVIDAD NIVEL ALTO

El nivel alto cuenta con un total de 71 series de desnivelaciones a largo del canal, teniendo en 5 de sus ubicaciones repeticiones de series de tiempo (Tabla 4). Para cada una de estas repeticiones se medirá el grado de dispersión mediante la utilización de covariancia, utilizando la misma metodología del nivel inferior.

Las correlaciones para cada una de las repeticiones se pueden observar en los anexos (capítulo 10.2.2), de ellos se concluye lo siguiente:

- En el punto inicial se concentran la mayor cantidad de repeticiones, teniendo un total de 7 repeticiones (Tabla 11), en estas series se pueden apreciar correlaciones de orden del 99 [%] teniendo solo diferentes en el primer decimal, siendo la máxima diferencia un 0.4 [%].
- A los 17 y 22 [m] del canal las repeticiones se poseen correlaciones que varían 98.6 y 99.6 [%] (Tabla 12).
- En el punto más elevado de la barra (30 [m]) se evidencia un leve cambio en su resultado teniendo un 93,9 [%] de correlación, esto se debe a los afectos de asomeramiento y posible rotura de oleaje (turbulencia) generados por la disminución de profundidades.
- En la ubicación más cercana a la línea de costa presenta correlaciones de un 97 [%] a los 35 [m] del canal. Esta disminución se debe a la mayor persistencia de la rotura.

Como se mencionó en el punto anterior, las correlaciones tienden a disminuir a medida que el oleaje se acerca a la costa, pero de igual forma presentan resultados óptimos para asumir que el experimento puede repetirse en el tiempo y ser de utilidad para los análisis presentados a continuación.

5.1.4 COMPARACIÓN MODELACIÓN NUMÉRICA CON SERIES EXPERIMENTALES

Para una validación más exhaustiva del comportamiento de las series de tiempo se efectuaron modelaciones numéricas que permitirán contrastar estadísticamente los resultados obtenidos.

El modelo SERR-1D (Cienfuegos, Barthélemy, & Bonneton, 2010) cuenta con varios parámetros de entrada, los cuales servirán para efectuar una mejor configuración de este, para ello es necesario ingreso de oleaje espectral, batimetría, periodo offshore, pendiente de la playa y ángulo de rotura de oleaje.

Para la configuración del modelo SERR-1D se utilizaron las mismas características del modelo experimental. Los factores a evaluar son los producidos por el ángulo crítico de rotura del oleaje y offset (condición de borde vertical). Las simulaciones realizadas para ambos niveles de referencias fueron sensibilizadas para 3 ángulos de roturas de oleaje las cuales son: 25,28 y 29 [°] y los offset -1, -0.1 y -0.5 [mm].

5.1.4.1 COMPARACIÓN MODELO NUMERICO NIVEL BAJO

Para el nivel de referencia menor se obtuvieron resultados en 8 de las 9 simulaciones realizadas, siendo la modelación cuya configuración poseía un ángulo de rotura de 25 [°] y un offset de -1[mm], la única en la que no se obtuvieron resultados por problemas de inestabilidad numérica.

Al apreciar las figuras del anexo 10.1.2, se observan los resultados entregados por la modelación numérica y experimental, estos muestran excelentes valores de altura significativa y periodo de oleaje para todas las combinaciones analizadas de ángulo crítico y offset a lo largo del canal. En cambio las variaciones del nivel medio del mar son más sensibles a las modificaciones de los parámetros analizados.

Por este motivo se evaluó la sensibilidad que manifiesta el modelo numérico SERR-1D a las variaciones de sus parámetros de entrada, considerando como referencia los resultados del nivel mar entregados por la modelación física, que muestran una gran dispersión de sus resultados especialmente en la zona post-barra.

En la Figura 18 se presentan los resultados del nivel medio del mar a lo largo del canal para las modelaciones numéricas y experimentales, considerando dos ángulos críticos de rotura (28 y 29 [°]) y las tres condiciones de offset, en este se puede apreciar que entre más elevado sea el valor del offset (el signo negativo denota disminución del nivel) más inferiores serán los valores del nivel medio (color

verde), por el contrario entre menor sea el valor de offset más elevado serán los resultados del nivel medio (color azul).

Al observar ambos ángulos críticos de rotura de oleaje se aprecia que el offset que mejor describe el comportamiento del nivel del mar tiene un valor de -0.5 [mm]. Por este motivo se analizó los resultados que proporciona el modelo numérico al mantener constante el valor de offset (Figura 55), evidenciando muy poca sensibilidad a la modificación del ángulo crítico.

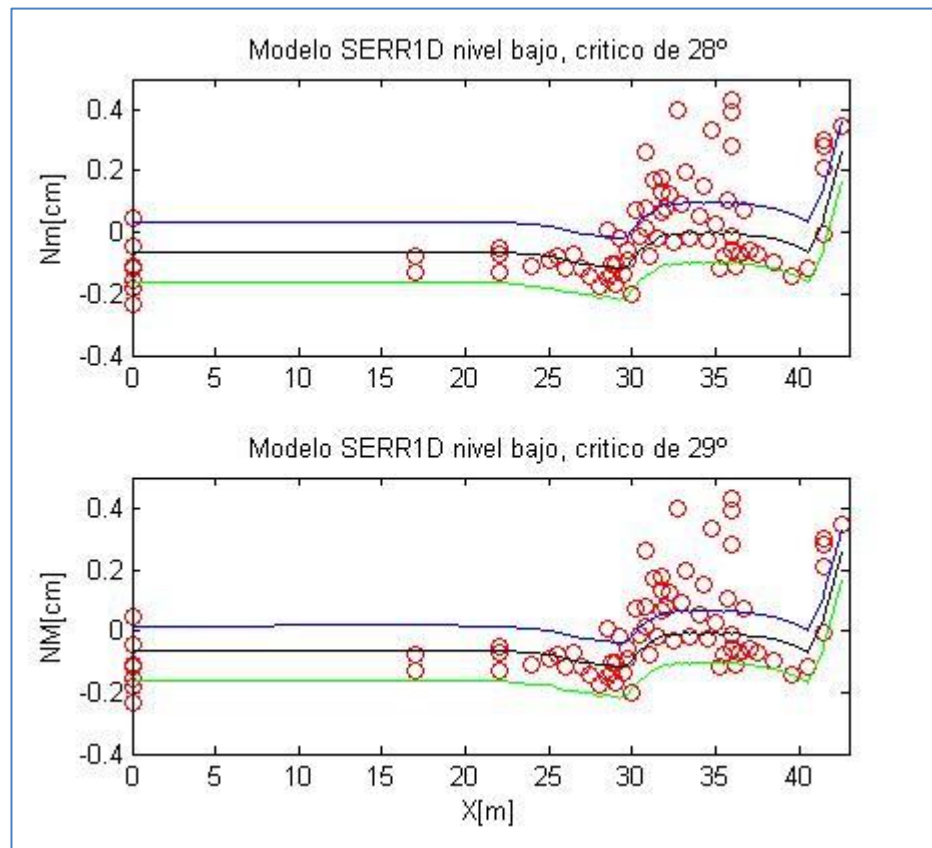


Figura 18: Sensibilidad modelo numérico para el nivel bajo, (elaboración propia).

En círculo negro (●) datos experimentales,

Línea azul (—) offset -0.1 [mm],

Línea negra (—) offset -0.5 [mm]

Y línea verde (—) offset -1 [mm].

Estos resultados (Figura 18) manifiestan un buen comportamiento del modelo numérico SERR-1D para condiciones de ángulo crítico 28 [°] y offset de -0.5 [mm]. Cabe mencionar que en la zona de rotura se evidencia variaciones en nivel medio del mar producto de la turbulencia asociado a la rotura del oleaje, por este motivo se descartarán la sondas cuyos resultados del nivel medio del mar sean muy distantes a los entregados en ubicaciones cercanas.

De esta manera se obtendrán buenos resultados considerando de igual forma que los resultados estadísticos del modelo numérico y experimental presentan valores adecuados (capítulo 10.1.2). De esta forma la cantidad de sondas elegidas son 37 para este nivel de referencia.

5.1.4.2 COMPARACIÓN MODELO NUMERICO NIVEL ALTO

Al igual que nivel de referencia anterior se realizaron un total de 9 modelaciones numéricas de las cuales 8 se obtuvieron resultados, en la combinación de ángulo crítico de 29 [°] y offset de -0.1 [mm] no se obtuvieron resultados por inestabilidad del modelo.

Al observar las figuras del anexo 10.1.3, en donde se muestran las variables estadísticas del oleaje para el modelo experimental y numérico, se puede distinguir que la altura y el periodo del oleaje entregan valores excelentes en ambas modelaciones, sin embargo de igual forma que el capítulo anterior, el nivel medio experimenta variaciones en la zona de asomeramiento y post barra. Por este motivo se realizó un análisis de sensibilidad para las combinaciones de ángulo rotura crítico y offset teniendo como referencia los resultados del nivel medio del mar de la experimentación física.

Al realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del modelo numérico SERR-1D (Figura 19), se puede evidenciar que el valor que mejor se ajusta a los resultados experimentales tiene asociado un offset de -0.5 [mm], al igual que el nivel anterior, por este motivo se evaluó la sensibilidad de este valor a la modificación de sus condiciones de rotura crítica de oleaje (Figura 56), observando que las variaciones en el ángulo crítico de rotura no presentan modificaciones en los resultados del nivel medio del mar.

De estas forma la configuración del modelo numero quedará determinada por un Angulo critico de 28 [°] y un offset -0.5 [mm].En este nivel se dejaron 37 series de desnivelación, producto de las variaciones observadas del nivel medio del mar en la zona de rotura, estas variaciones como se menciona en capitulo anterior estas asociadas a fenómenos turbulentos que no son reproducibles en tiempo.

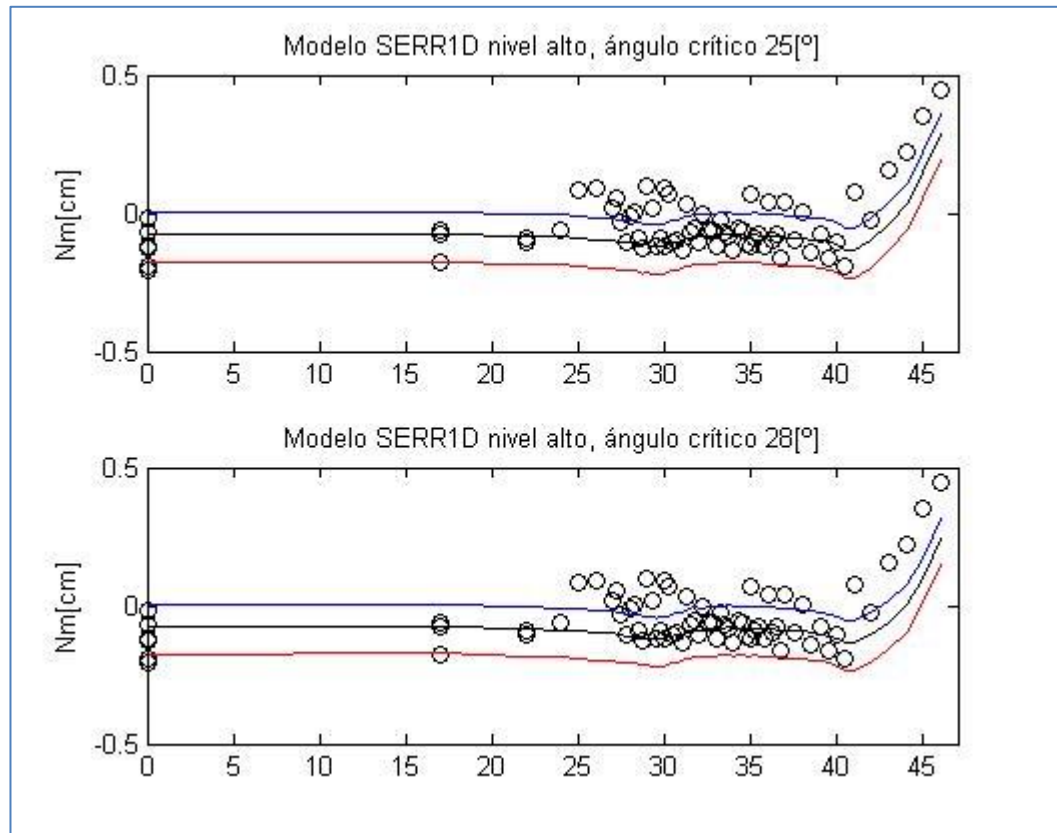


Figura 19: Sensibilidad modelo numérico para el nivel alto, (elaboración propia)

En círculo negro (●) datos experimentales,

Línea azul (—) offset -0.1 [mm],

Línea negra (—) offset -0.5 [mm]

Y línea roja (—) offset -1[mm].

5.2 PROPAGACIÓN DE OLAJE A LO LARGO DEL CANAL

A medida que el oleaje se propaga a lo largo del canal experimenta diversos fenómenos, debido al decaimiento de las profundidades, por este motivo se realizó un análisis estadístico que busca describir el comportamiento del oleaje en ambas experimentaciones. Para ello se obtuvieron las variaciones del nivel medio del mar, de la altura significativa y periodo de oleaje.

5.2.1 NIVEL ALTO DE REFERENCIA

Al observar la Figura 58 se puede ver que desde los 0 a 17 [m] de distancia, el oleaje no experimenta modificaciones en su altura, esto se debe a que el fondo es plano y horizontal.

A medida que este avanza a lo largo del canal se pueden observar pequeños aumentos en la altura significativa, que están directamente relacionados con disminución de las profundidades entre los 17 y 30 [m], generando que la longitud de onda se acorte concentrando toda su energía en menores distancias aumentando consigo la altura de oleaje. Estas variaciones tienen asociadas pequeños cambios del tensor de radiación que generan una disminución del nivel medio del mar (Figura 20).

A los 30 [m] de distancia se encuentra el mayor valor de altura significativa (9.2 [cm]) la cual está directamente relacionado con el punto más elevado de la barra, además se experimenta las mayores disminuciones del nivel medio y marca el inicio de decaimiento del periodo del oleaje (Figura 57), este punto de inflexión es generado por la rotura, la cual se debe a dos fenómenos, uno es exceso de energía potencial, en el cual la ola no es capaz de aumentar más su altura, por lo tanto se vuelve inestable y libera su energía en forma de rotura, el segundo concepto de rompimiento se debe a que las velocidades horizontales de las partículas son mayores que la celeridad de la onda.

Entre los 30 y 35 [m] se puede observar una disminución paulatina de la altura significativa producto de la turbulencia provocada por la rotura, Estas rompientes van disminuyendo lentamente su altura hasta desaparecer a los 35 [m], debido al aumento de las profundidades en la zona post barra. El nivel mar se eleva debido a la disminución del tensor de radiación (Figura 20). Por su parte el periodo de olas disminuye debido a la generación de armónicos (alta de frecuencia) y la convergencia de las olas en la parte alta de la playa.

Entre los 35 y 42 [m] el oleaje vuelve a experimentar el fenómeno de asomeramiento aumentando consigo las alturas debido a la disminución de profundidades a los 42 [m], alcanzando una altura 8.7 [cm], para luego colapsar nuevamente liberando su energía como bore, disminuyendo sus alturas hasta la línea de la costa. El nivel medio disminuye (Figura 20) debido al asomeramiento.

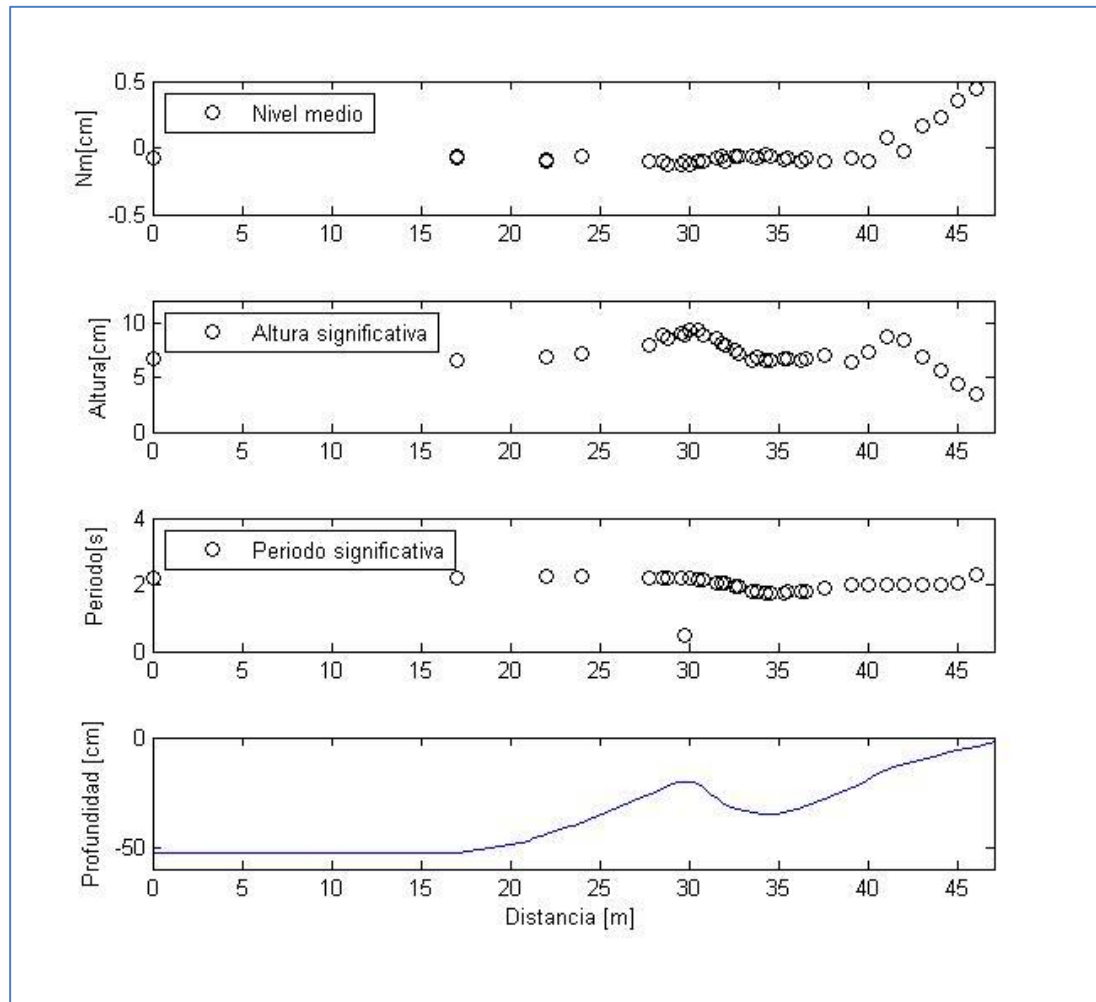


Figura 20: Propagación de olas a lo largo del canal nivel alto, (elaboración propia).

Desde los 42 [m] de distancia hasta la línea de costa se experimenta una disminución del altura de la ola debido a la propagación de la ola rota o bore, el cual disipa su energía en la parte alta de playa, esta disminución de altura aumenta el set-up del oleaje alcanzando el máximo valor.

5.2.2 NIVEL BAJO DE REFERENCIA

A medida que el oleaje se propaga desde la paleta generadora del canal se puede apreciar (Figura 21), que desde los 0 a los 17 [m] no se experimentan variaciones en la altura del oleaje ni en el nivel medio del mar debido a que en este sector el fondo no posee diferencias de cotas en todo su extensión.

Desde los 17 hasta los 29 [m] se experimentan el fenómeno de asomeramiento aumentando consigo la altura del oleaje, disminuyendo además por conservación de cantidad de movimiento el nivel mar. A los 29 [m] de distancia del canal se observa la mayor altura significativa y el menor nivel del mar, marcando el inicio de la rotura del oleaje, cabe mencionar que en esta ubicación no se encuentra el punto más elevado de la barra

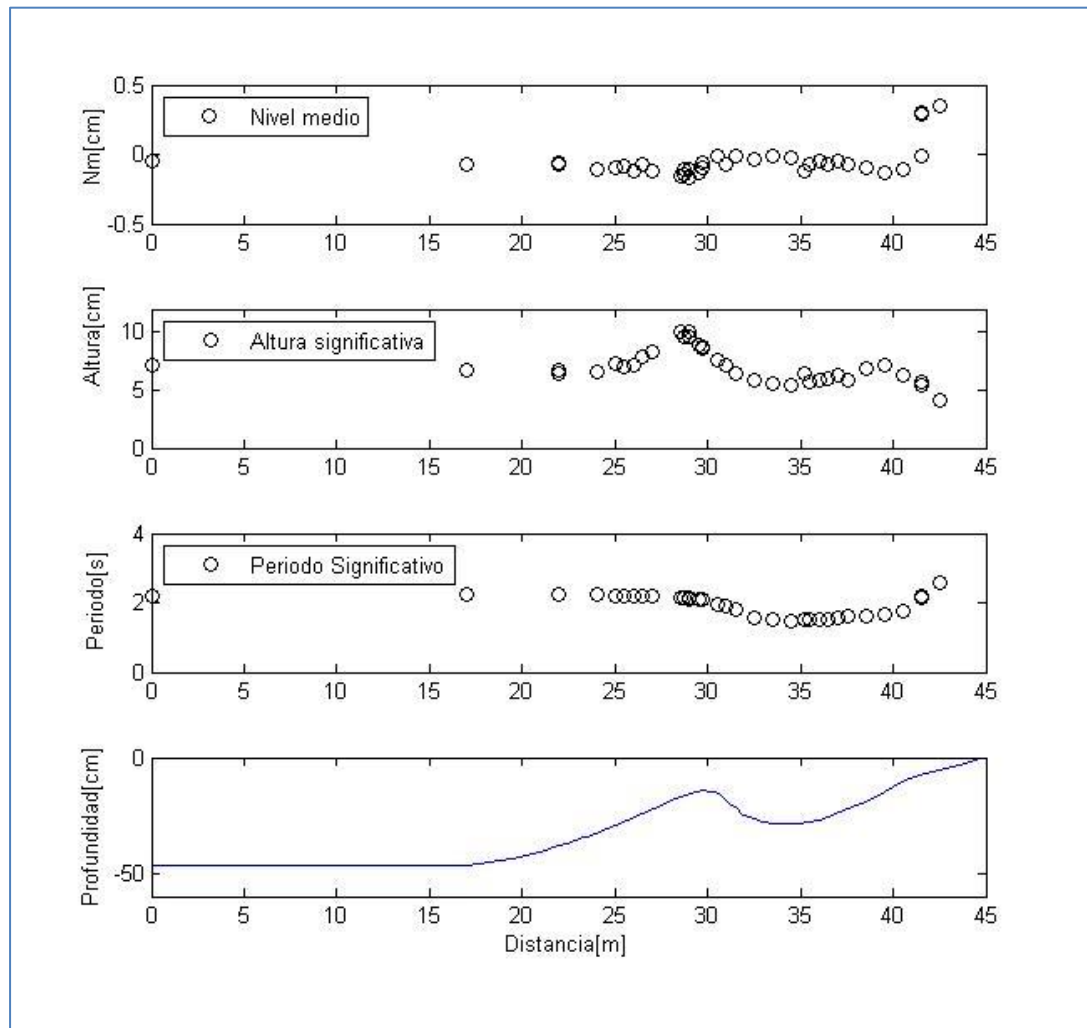


Figura 21: Propagación de olas a lo largo del canal nivel bajo, (elaboración propia).

Desde los 29 [m] a 39 [m], la altura del oleaje decae producto de la rotura y la propagación de este en forma de bore, aumentando consigo el nivel del mar. A los 39 [m] se experimenta un leve aumento de la altura significativa la cual es generada por la disminución de las profundidades, esta pequeña elevación y posterior decaimiento, desde los 40 [m], se debe a que un porcentaje menor de olas vuelve a recomponerse como movimiento oscilatorio, siendo este mucho menor que el observado en el nivel anterior (capítulo 5.2.1).

Desde los 40 [m] hasta la línea de costa se manifiestan menores alturas de oleaje producto del avance de las rompientes y su pérdida de energía asociado, generando un aumento del nivel medio mar (set-up) producto de las disminuciones de profundidades.

5.2.3 ANÁLISIS AMBOS NIVELES REFERENCIA

Al observar las variaciones de la altura significativa (Figura 20 y Figura 21), las cuales dependen de la profundidad local y por ende también de la modificación del nivel de referencia, se evidencian diferencias importantes a lo largo del canal. Por este motivo se efectuó una comparación entre ambos niveles de referencia considerando que el espectro forzante posee idénticas características.

Al comparar las variaciones experimentadas por la altura de oleaje, se puede decir que:

- El nivel de referencia bajo comienza la rotura del oleaje un metro antes que el nivel alto.
- En el nivel alto de referencia se puede observar dos zonas de roturas bien marcadas, como consecuencia de la reconstrucción de oleaje generada por el aumento de profundidades (35[m]). A diferencia el nivel bajo que evidencia una gran zona de rotura, teniendo pequeñas elevaciones posteriores que son generados por un porcentaje menor de olas que si se recomponen su oscilación.
- Las mayores alturas significativas de oleaje se experimentan para el menor nivel de referencia alcanzando los 10 [cm], al contrario del nivel alto que experimentan alturas significativas máximas 9.3 [cm].
- En los dos casos se aprecia el efecto de la barra sobre la propagación del oleaje, observándose asomeramiento y disipación sobre la barra, y luego en la parte final de la playa.

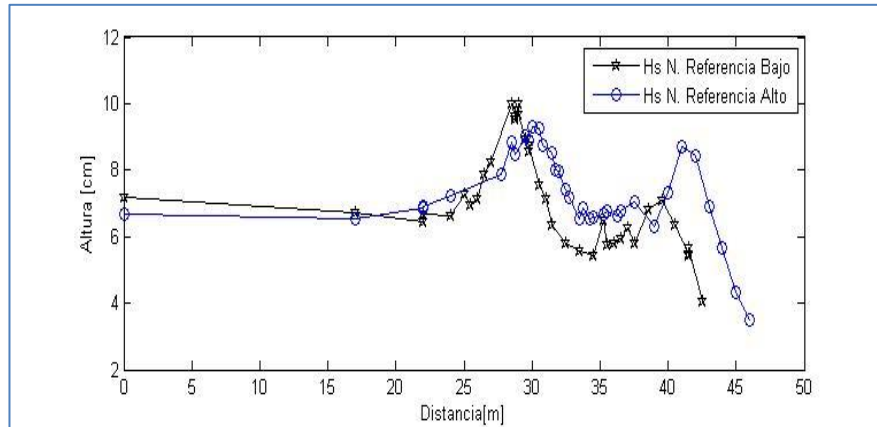


Figura 22: Altura significativa a lo largo del canal, (elaboración propia).

5.3 DETERMINACIÓN DE LOS MODOS PROPIOS

Mediante las ecuaciones propuestas en el capítulo 4.4.3 se confeccionó una rutina capaz de obtener las frecuencias naturales de oscilación del canal para ambos niveles de referencia, para ello se obtuvieron los modos y vectores propios relacionado al sistemas de ecuaciones planteado.

Para ello se utilizó una discretización de $\Delta x = 0.05$ [m], teniendo profundidades diferentes a lo largo del canal para ambos niveles, el nivel alto de referencia presenta frecuencias naturales asociadas a los primeros tres modos propios. Estos valores son: $f_1 = 0.0175$ [Hz], $f_2 = 0.0311$ [Hz] y $f_3 = 0.0436$ [Hz] (Figura 23).

Las frecuencias relacionadas al nivel bajo de referencia para los tres primeros modos son $f_1 = 0.0179$ [Hz], $f_2 = 0.0323$ [Hz] y $f_3 = 0.0433$ [Hz] (Figura 24).

Al comparar ambos resultados se puede observar que las frecuencias naturales son muy similares (presentando variaciones del tercer decimal) en ambos niveles de referencia, estas frecuencias modifican solo los valores de la onda asociadas a los modos propios de vibración a lo largo del canal.

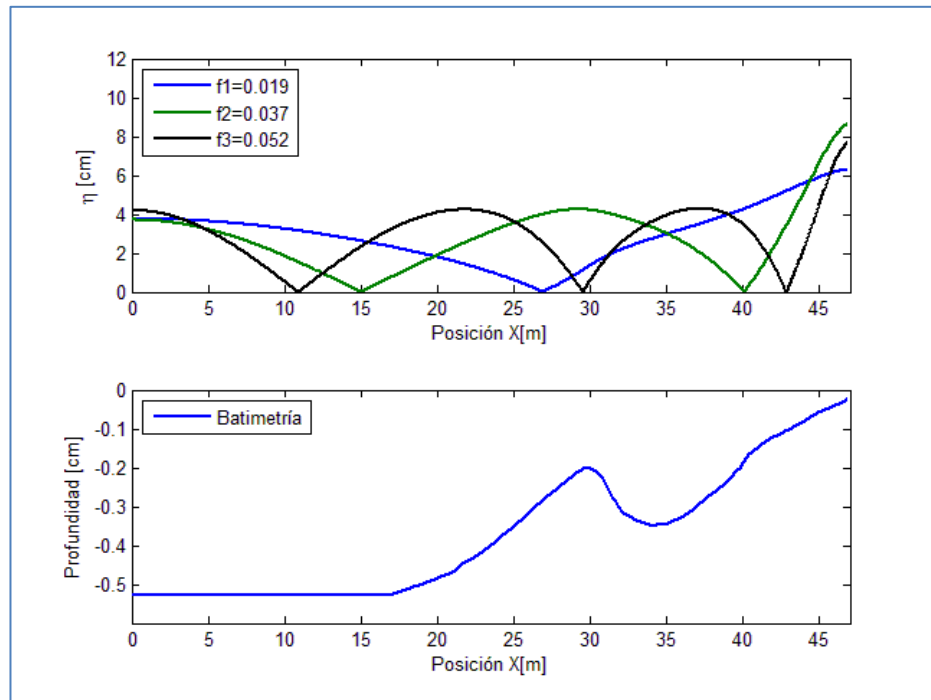


Figura 23: Modos propios asociados a su onda característica nivel alto, (elaboración propia)

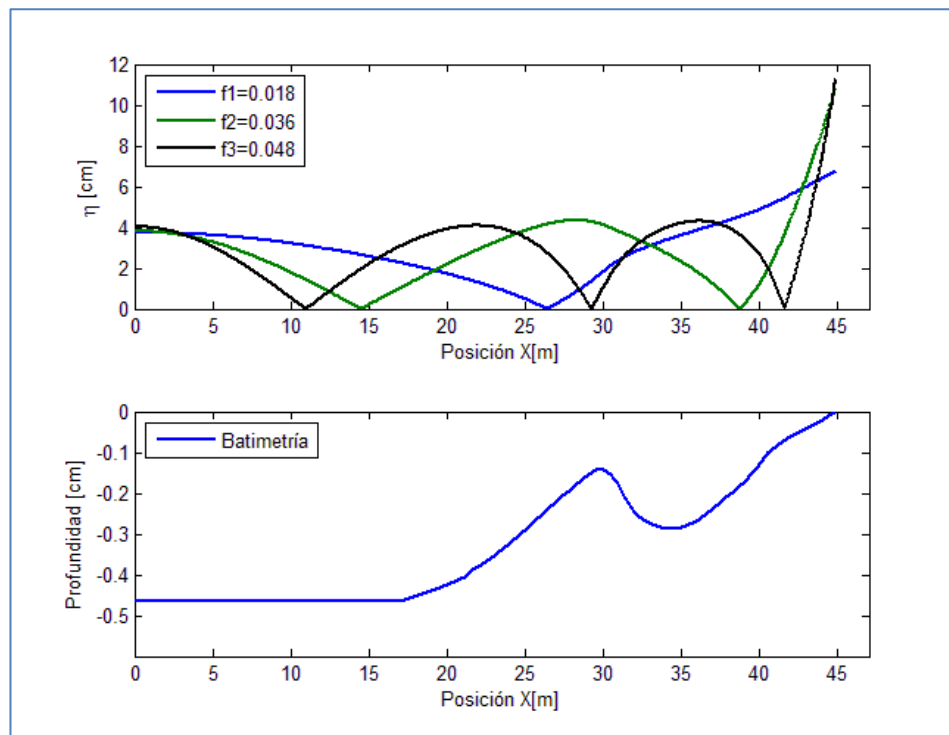


Figura 24: Modos propios asociados a su onda característica nivel bajo, (elaboración propia).

5.4 HISTOGRAMAS

Al analizar las variables asociados al oleaje podemos evidenciar que en algunos casos posee distribuciones de probabilidades conocidas.

En este caso se analizaran ambos niveles de referencia utilizando 8 series de desnivelaciones que varían a lo largo del canal, de esta forma se observará el comportamiento del oleaje en función de su distribución de probabilidades.

Para ello se utilizaran histogramas de altura de oleaje normalizado en conjunto a la distribución de probabilidades del tipo Rayleigh, estos histogramas tiene como características el poder representar grandes cantidades de oleaje en forma reducida, además de representar la distribución estadística de las alturas de oleaje

Al analizar las distribuciones de probabilidad normalizada de ambos niveles de referencia (Figura 25 y Figura 26), se observa que un comienzo el oleaje posee un comportamiento que se ajusta perfectamente a una distribución de tipo Rayleigh, que es producto de uniformidad de este sector (fondo horizontal). Cabe mencionar que la distribución del tipo Rayleigh es capaz describir estadísticamente al oleaje en aguas profundas, teniendo algunas limitaciones en aguas de menor profundidad.

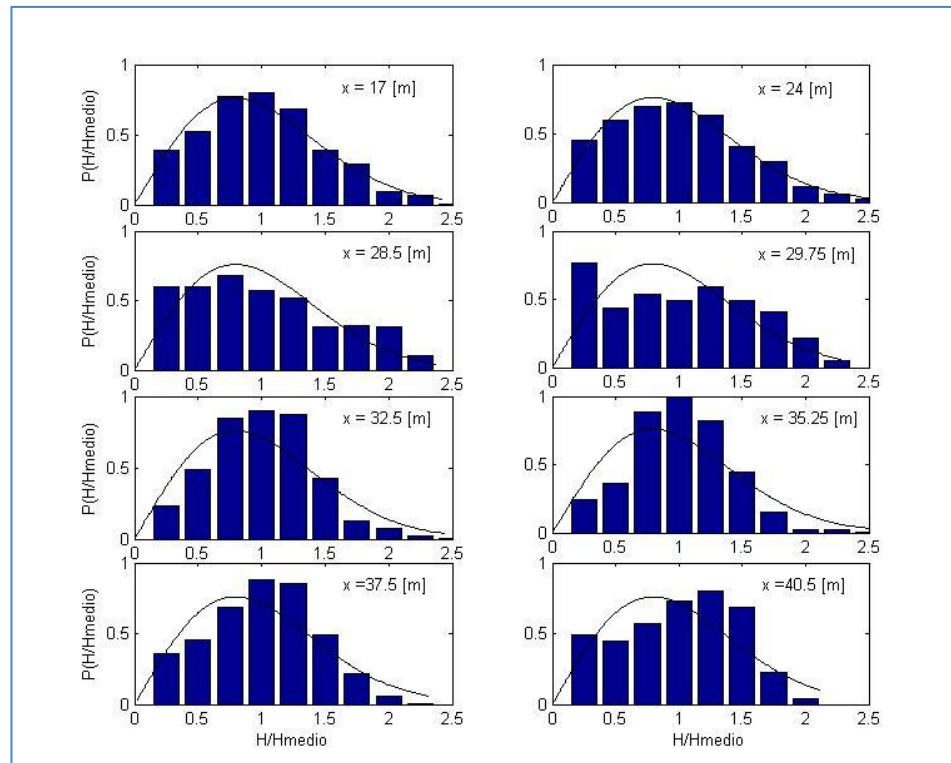


Figura 25: Histogramas nivel bajo de referencia, (elaboración propia).

A medida que el oleaje comienza a sentir el fondo y genera asomeramiento se comienzan a experimentar modificaciones en la distribución de probabilidades de altura de oleaje normalizada, debido a que esta distribución no toma en cuenta las variaciones experimentadas por el fondo.

Los mayores contrastes experimentados por los histogramas y la probabilidad de Rayleigh se producen en las zonas cuyas profundidades son menores, teniendo consigo mayores efectos del asomeramiento y posterior rompimiento del oleaje aumento con esto la no linealidad. Este se evidencia en nivel de referencia menor el cual posee mayores efectos no lineales (Figura 25).

En cambio en el nivel de referencia alto (Figura 26) se aprecia que al propagarse el oleaje en el canal presenta mejores ajuste de la distribución, esto se debe principalmente a que sus profundidades son mayores teniendo una zona de regeneración de la onda ente 33 y 37 [m] de distancia.

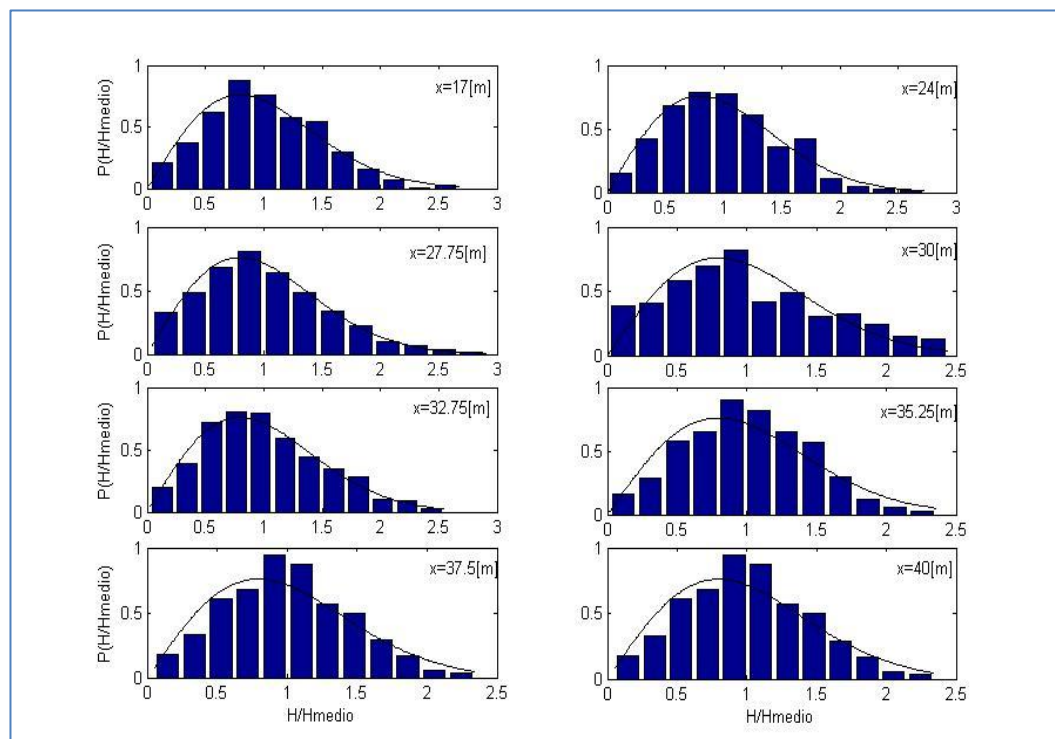


Figura 26: Histogramas nivel alto de referencia, (elaboración propia)

5.5 ANÁLISIS ESPECTRAL

Para el análisis espectral se evaluaron los cambios de las energías asociados a la zona gravitatoria e infragravitatoria del espectro, para ello se analizarán 6 ubicaciones a lo largo del canal.

Para la zona gravitatoria del espectro en ambas experimentaciones, se observaran mayores energías espectrales ligadas a frecuencias de 0.4 [Hz], cuyo valor está relacionado con las características utilizadas para la elaboración del espectro JONSWAP generado por paleta.

5.5.1 NIVEL ALTO DE REFERENCIA

En un comienzo los espectros de energía ubicados a los 0 y 17 [m] (Figura 27) no experimentan variaciones en la zona gravitacional, teniendo peaks asociados a las condiciones de entrada del sistema de generación (0.41 [f] y 30 [cm²s]), esta energía espectral aumenta en la zona de asomeramiento (24 [m]) debido a la disminución de profundidades alcanzando peaks energéticos de 36.4 [cm²s].

En el punto de rompimiento (x=30 [m]) y en la zona de rompientes (x=35.5 [m]) se evidencian la presencia de más de un peak energético, debido a transferencia de energía generada por los procesos de rotura, observando una disminución de la energía asociado a la frecuencia de entrada y un pequeño aumento en dos frecuencias mayores. En la parte alta de playa el espectro se caracteriza por una disminución de la energía asociada a la frecuencia forzante, distribuyendo su energía en la zona de mayor frecuencia, este fenómeno es típico en la zona de asomeramiento en donde los procesos no lineales generan armónicos.

Al mirar la región infragravitatoria de los espectros, se observa la presencia de peaks energéticos ligados a las frecuencias naturales del canal descritas en el capítulo 5.3, estas ponen en evidencia la presencia ondas largas reflejadas dentro del canal.

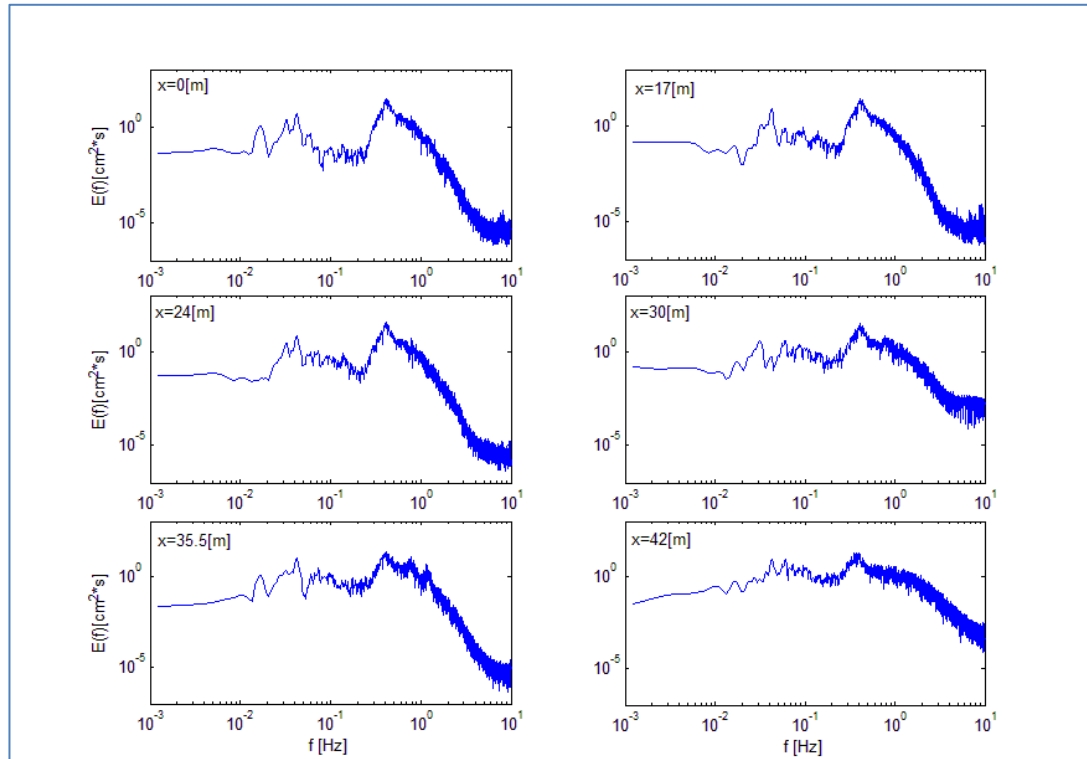


Figura 27: Análisis espectral nivel alto, (elaboración propia).

5.5.2 NIVEL BAJO DE REFERENCIA

Al observar la propagación espectral de oleaje para el nivel bajo, se puede apreciar (Figura 28) que un comienzo entre 0 y 17 [m] el oleaje no experimenta variaciones en la zona gravitatoria del espectro, teniendo las mismas condiciones espectrales configuradas en sistema de generación, al igual que el nivel alto.

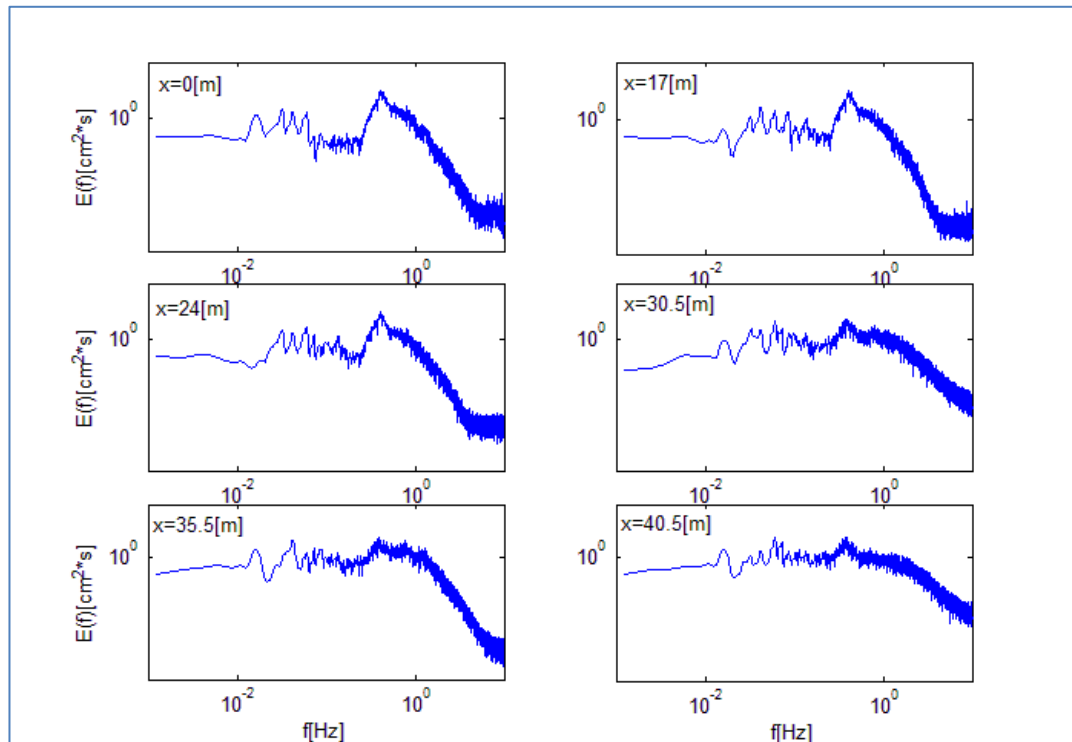


Figura 28: Análisis espectral nivel bajo, (elaboración propia).

Las variaciones espectrales comienzan conforme el oleaje comienza a sentir el fondo, a los 24 [m] se puede observar peaks energéticos de 30 [cm^2s] que al avanzar en canal se transfieren frecuencia mayores ($x=30.5$ [m]) producto de armónicos no lineales, generando pequeños peaks de menor energía en la zona de surf ($x=35$ [m]), esta distribución de energía en frecuencias mayores se acrecienta más en la parte alta de playa.

Al observar las variaciones que experimentan los espectros en la banda infragravitatoria, se pueden evidenciar las frecuencias naturales del canal (Figura 24) y un cuarto peaks asociado a los 0.059 [Hz]. En el capítulo siguiente se observará el comportamiento de estas frecuencias espectrales y se comparan con los resultados teóricos entregados en el capítulo 5.3.

5.5.3 VARIACIÓN ESPECTRAL DE LA BANDA INFRAGRAVITATORIA

Para conocer los cambios experimentados de la amplitud espectral de las ondas infragravitatorias a lo largo del canal, se realizó un filtro paso bajo para cada una de las series de desnivelaciones, obteniendo las ondas infragravitatorias inferiores de 0.030 [Hz]. Para posteriormente estimar las amplitudes asociados a las principales frecuencias naturales del canal para ambos niveles referenciales.

La amplitud asociada a cada frecuencia se estima obteniendo:

$$a(fn) = \sqrt{2 \int_{fn-df}^{fn+df} s(f) df} \quad 5-1$$

Considerando df variable para cada una de las frecuencias naturales (Figura 29), permitirá observar las variaciones a lo largo del canal de las ondas atrapadas.

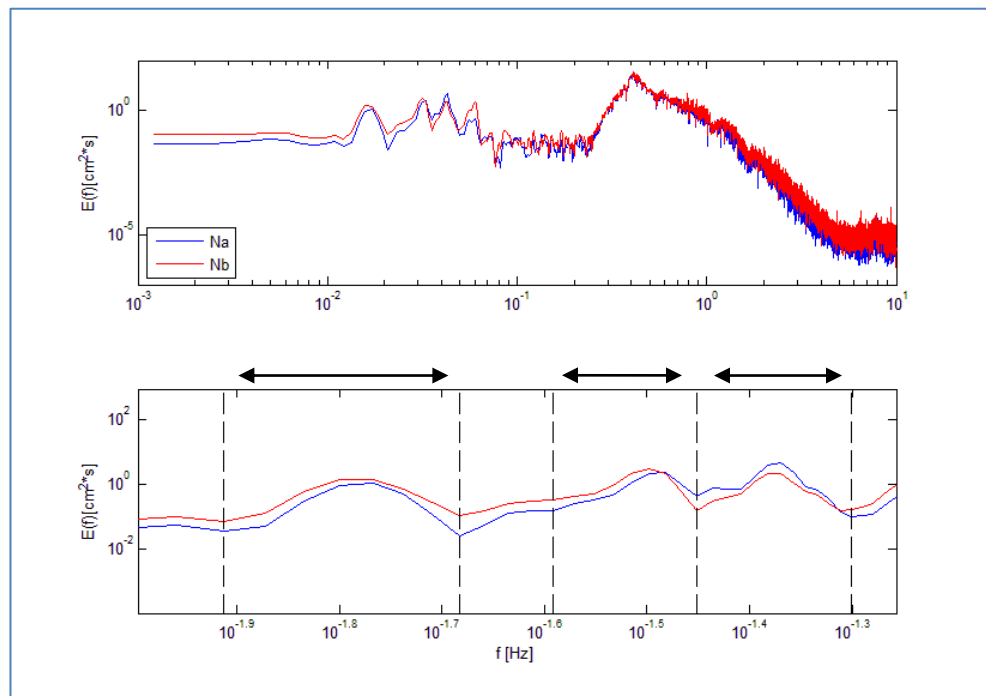


Figura 29: Ancho de banda infragravitatoria, (elaboración propia).

En rojo el nivel bajo de referencia

En azul el nivel alto de referencia

Al analizar los valores peaks otorgados por el análisis de los modos propios y compararlos con los obtenidos gráficamente, se manifiestan variaciones del cuarto decimal, siendo estos muy parecidos e incluso no experimentando variaciones considerativas entre un nivel y otro. Es por este motivo que el rango seleccionado en la Tabla 2 poseen los mismos valores para ambos niveles experimentados.

Tabla 2: Valores espectrales infragravitorios para obtención de la amplitud

modo	Frecuencia Natural		Frecuencia Peak		Rango [Hz]
	Nivel alto	Nivel bajo	Nivel alto	Nivel bajo	
1	0.0175	0.0174	0.017	0.0164	[0.0012-0.0208]
2	0.0311	0.0318	0.032	0.0317	[0.0256-0.0354]
3	0.0436	0.0418	0.042	0.0427	[0.0354-0.0500]

Las amplitudes obtenidas serán comparadas con los resultados teóricos de los modos propios que tienen asociado una onda característica.

Para el nivel alto y bajo (Figura 30 y Figura 31) los valores proporcionados de la amplitud para la primera frecuencia natural (F1) son acordes a los obtenidos del análisis de modos propios del canal, además el resultado numérico para esta frecuencia evidencia excelente concordancia en ambos niveles. Esta frecuencia presenta su único nodo antes de punto más elevado de la barra (30 [m]).

La segunda frecuencia natural en ambos niveles (F2), presenta resultados experimentales de excelente comportamiento en la banda infragravitatoria en zona post-barra, ajustándose de forma muy similar a la onda teórica propuesta en el capítulo 5.3. En cambio los resultados del modelo numérico no son coherentes a los propuestos teóricamente presentando solo un nodo en la zona de asomeramiento, a diferencia de los resultados experimentales y teóricos, estos muestran dos nodos, uno a los 17 [m] y el otro en la parte alta del canal.

La tercera frecuencia natural para ambos niveles (F3) proporciona amplitudes de la onda infragravitatoria que se encuentran amplificadas con respecto onda obtenida teóricamente (Figura 30 y Figura 31). En cambio el modelo numerico para el nivel alto se ajusta de manera muy similar a la onda, experimentando problemas solo en la zona nodal, la cual está desfasada 2 [m]. El nivel bajo tiene resultados numéricos que no poseen fluctuaciones ni efectos nodales, como si muestra la propagación de la onda atrapada.

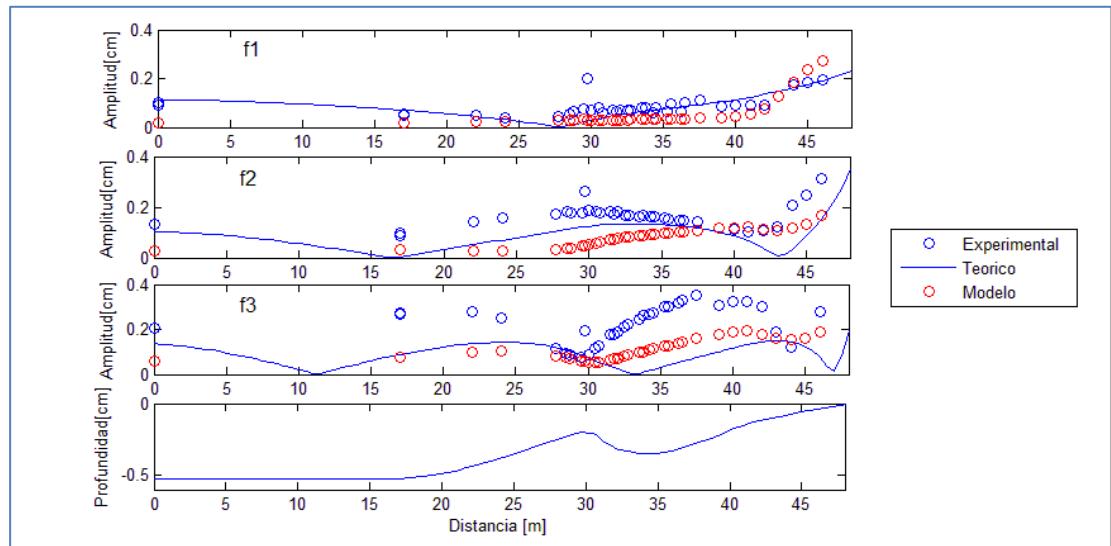


Figura 30: Ondas asociadas a los modos propios nivel alto, (elaboración propia).

Las variaciones evidenciadas entre los valores entregados por el modelo numérico y los propuestos teóricamente se deben principalmente a las condiciones de borde que presenta el modelo numérico, debido a que este no toma en consideración la paleta generadora de oleaje, no considerando algunas olas que se encuentran atrapadas dentro del canal, por este motivo es esperable que el modelo numérico no sea capaz de reproducir a cabalidad algunos procesos observados en el canal de olas.

Además en ambos niveles de referencia se observan mayores amplitudes en la propagación del tercer modo de vibrar, este incremento es producto de efectos reflexivos provocados por la barra. Estos efectos generan dos zonas de reflexión, la primera entre la barra y la paleta de generación, y la segunda entre la parte alta playa y barra, estas ondas genera cambios en las resonancia del canal amplificando este modo propio.

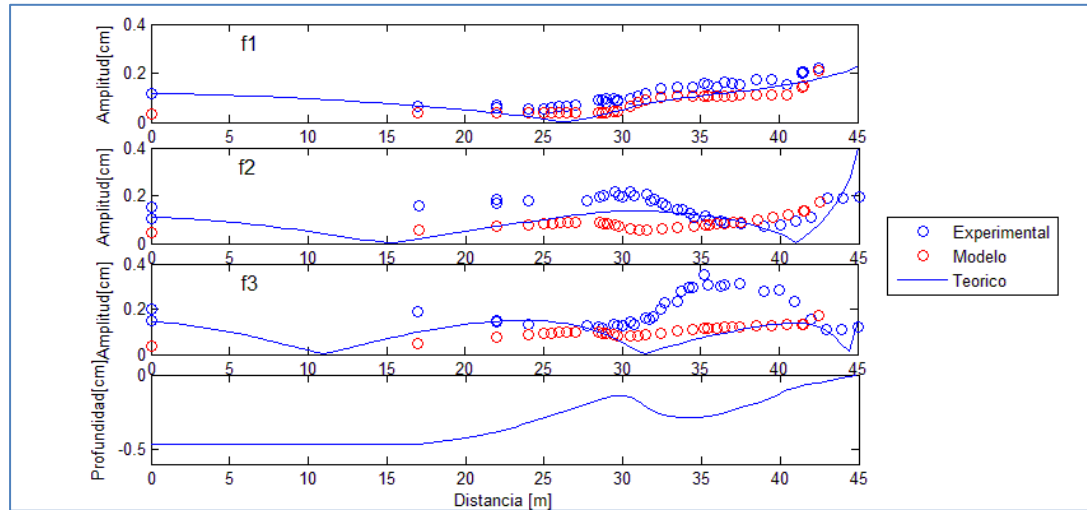


Figura 31: Ondas asociadas a los modos propios nivel bajo, (elaboración propia).

5.6 ALTURA DE LA OLA INFRAGRAVITATORIA

A partir de la utilización del filtro paso bajo, separando las frecuencias menores y mayores a 0.03 [Hz], se obtuvo la altura media cuadrática para la baja y alta frecuencia (Figura 32), observando sus variaciones a lo largo del canal para ambas condiciones experimentadas.

Al apreciar los resultados obtenidos de la altura media cuadrática (Hrms) para ambos casos experimentados, se observa que la alta frecuencia contribuye con mayores energías en zona de asomeramiento y rotura, disminuyendo paulatinamente a medida que se acerca a la parte alta de la playa. Las bajas frecuencias por el contrario aumentan gradualmente a medida que se propagan a lo largo del canal siendo más relevante en la zona de Swash. Además se observan que las mayores Hrms ligadas a ondas infragravitatorias se manifiestan en nivel bajo de referencia observando también pequeños peaks en la zona de la barra.

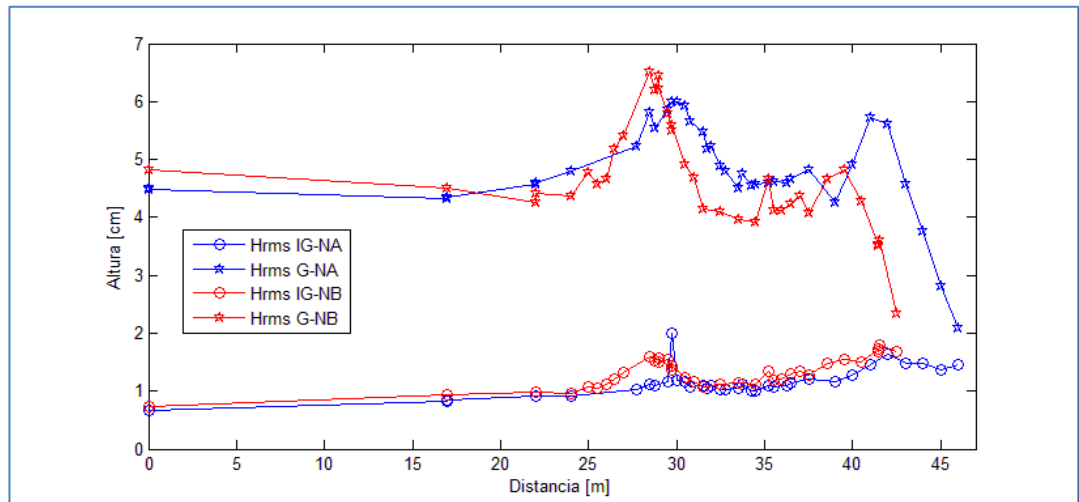


Figura 32: Alturas Hrms infragravitatorias, (elaboración propia).

En la Figura 33 se encuentran representados los porcentajes de altura media cuadrática de las ondas infragravitatorias y el cambio de factor de agrupamiento (capítulo 2.3) con relación al valor experimentado en la aguas profundas para ambos niveles experimentados.

Para el nivel alto se puede apreciar que a medida que se propaga el tren de olas experimenta un leve aumento en la zona de asomeramiento experimentando pequeñas fluctuaciones en la zona de rotura, disminuyendo en la parte alta de la playa (zona de Swash). En cambio el porcentaje de Hrms de la onda infragravitatoria comienza a ganar más relevancia a medida que propaga la onda después de la zona de rotura siendo más importantes en la zona de Swash elevándose a un 60% de la altura total, este aumento está ligado a la disminución del factor de grupo.

Para el nivel bajo las variaciones del factor de grupo (Figura 33) a lo largo del canal experimentan fluctuaciones en la zona de asomeramiento disminuyendo a los 25 [m] del canal para posteriormente aumentar previo a la rotura del oleaje, en donde esta vuelve a descender a los 30 [m], luego de esto se observa un incremento en la zona post barra debido al aumento de las profundidades y recomposición de la onda oscilatoria, para finalmente disminuir por efectos del segundo punto de rompimiento (Figura 22). El porcentaje de Hrms de la onda infragravitatoria a medida que se propaga experimenta un incremento teniendo mayor relevancia en la zona Swash, cabe mencionar que para este nivel de referencia las ondas infragravitatorias son mayores que las observadas en el nivel alto.

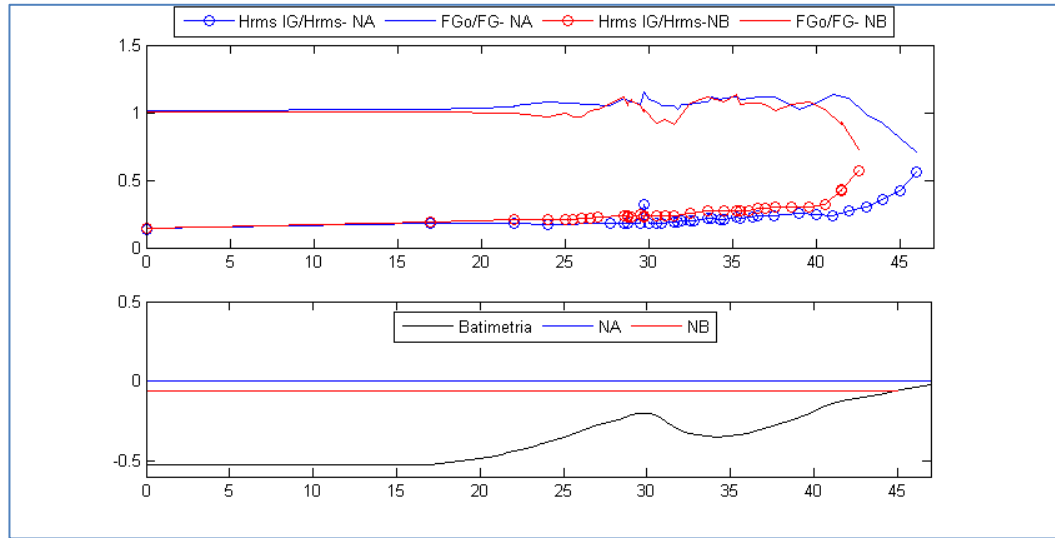


Figura 33: Factor de agrupamiento vs Hrms, (elaboración propia).

5.7 CORRELACIONES CRUZADAS

Para analizar la dinámica de las ondas infragravitatorias se estimaron las correlaciones cruzadas entre la envolvente de señal de alta frecuencia y la onda larga ligada al grupo de olas (bound wave), utilizando la metodología propuesta por (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003). Para ello se separaron los señales en alta η^{hf} y baja frecuencia η^{lf} utilizando el filtro pasa bajo para frecuencias inferiores a los 0.03 [Hz]. La amplitud de la envolvente del grupo de olas está asociada a la siguiente relación:

$$|A| = |\eta^{hf}(t) + iT\{\eta^{hf}\}|^{lf} \quad 5-2$$

Esta será utilizada para obtención de las correlaciones existentes entre la envolvente del grupo de olas de alta frecuencia y las ondas de largas asociadas al grupo de olas. Un ejemplo de la envolvente y su onda larga asociada se puede apreciar en la Figura 34.

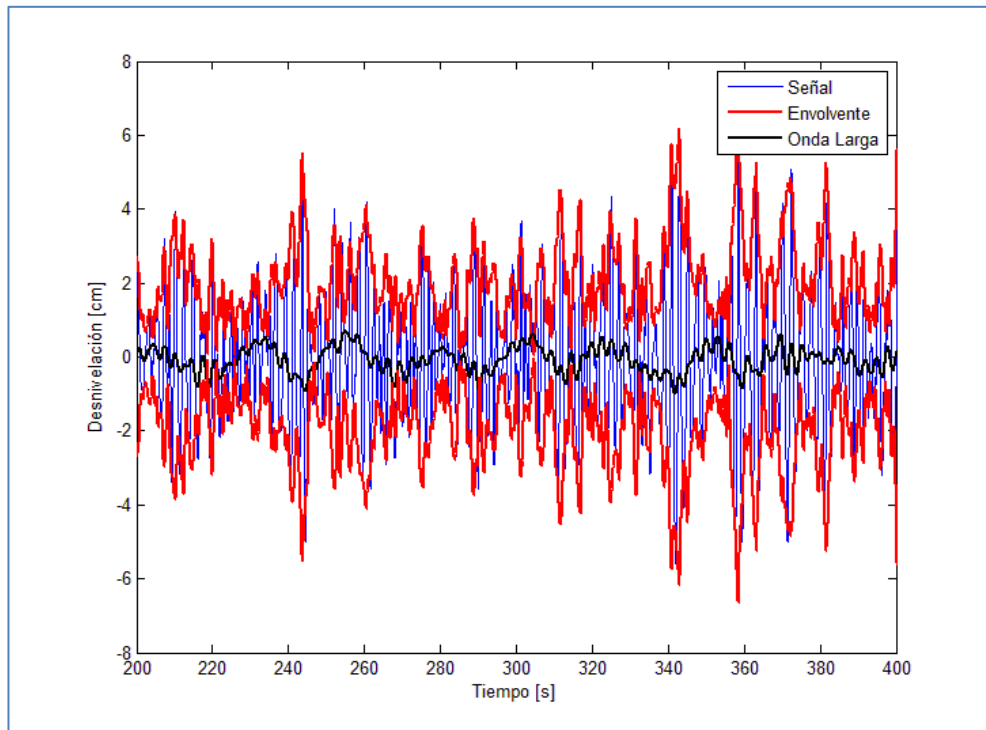


Figura 34 : Envoltura de señal, (elaboración propia).

El análisis de correlaciones cruzadas permite una alta resolución de los datos experimentales presentando funciones cuasi-continuas en el espacio. La función de correlación, (Bendat & Piersol, 1986); (Oppenheim & Schafer, 1989), para dos señales aleatorias $V(t)$ e $Y(t)$ de un proceso estacionario con media igual a cero se puede escribir como:

$$R_{VY} = \frac{\langle V(t)Y(t+\tau) \rangle}{\sigma_V \sigma_Y} \quad 5-3$$

Donde τ es tiempo de retraso y σ_V e σ_Y las desviaciones estándar. Las correlaciones cruzadas se aplicaran para dos tipos de combinaciones en ambos niveles de referencia, estos valores fluctuarán entre 1 y -1.

5.7.1 ANÁLISIS DE CORRELACIONES

Al analizar los resultados de las correlaciones cruzadas entre la amplitud de la envolvente del grupo de olas y la onda larga ligada al grupo de olas (Bound wave), para ambos niveles de referencia (Figura 35 y Figura 36), agregando además los resultados numéricos proporcionados por el modelo SERRD1, se pueden observar que en ambas experiencias existen correlaciones positivas que son precedidas por resultados negativos entorno de los 0 [s], éstas se mantienen mientras el grupo de olas se propaga a lo largo del canal sin que se produzca rotura, este fenómeno a sido descrito por (Nielsen & Baldock, 2009) quien estudio las ondas largas forzadas con forma de N, estas formas de oscilaciones asociados al grupo son provocadas en sectores transitorios entre un fondo plano y zonas donde las ondas libres forzadas se han vuelto completamente separadas por sus diferencias de velocidad.

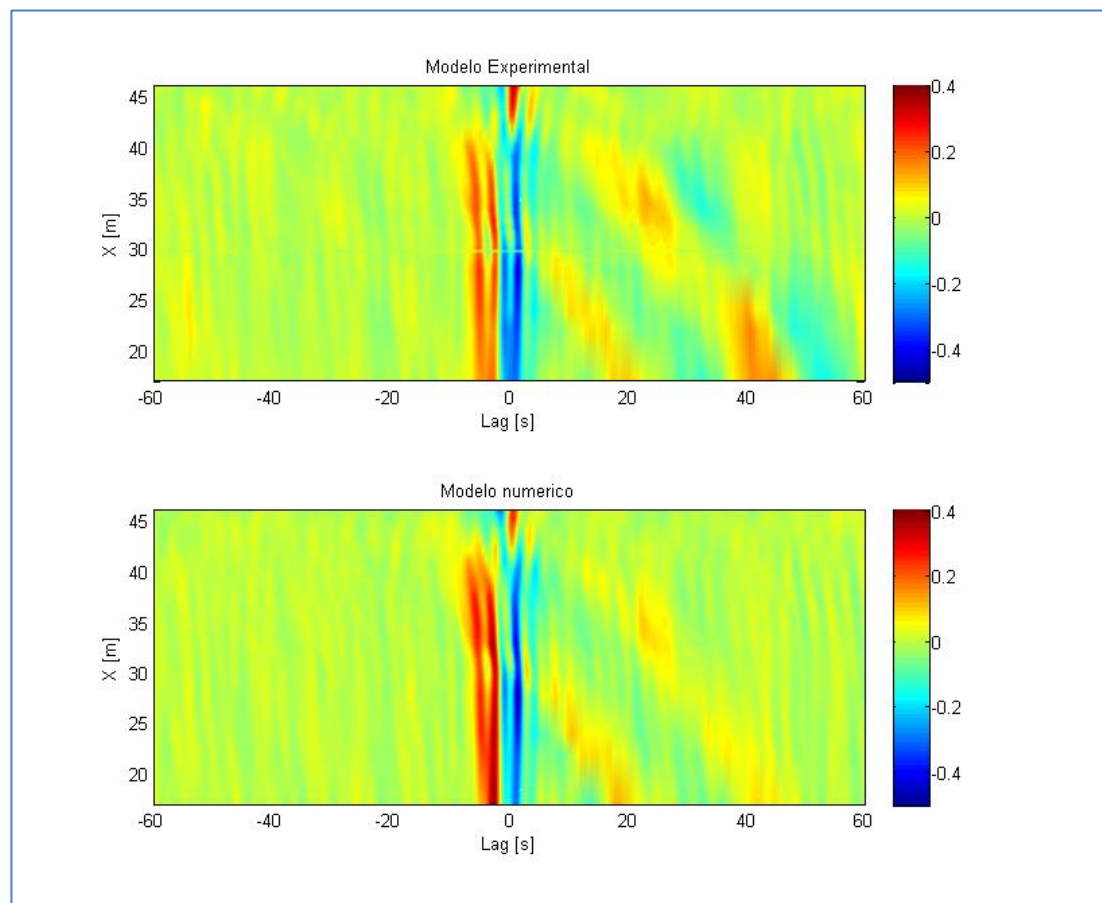


Figura 35: Correlación entre la envolvente de la señal y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico para el nivel alto, (elaboración propia).

A medida que el grupo de olas se propagan con su respectiva onda larga, se evidencian diferencias entre ambos niveles. Al seguir las correlaciones negativas del nivel alto se pueden observar variaciones a partir de los 30 [m] evidenciando un desplazamiento en tiempo generado por un retardo de la onda infragravitatoria con respecto a la envolvente de las ondas de alta frecuencia por efectos del asomeramiento, este fenómeno también ha sido observado por (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003) y (Lara, Ruju, & Losada, 2010). Por el contrario los resultados proporcionados para el nivel bajo sufren cambios inversos en las correlaciones a partir de los 30 [m] provocados por procesos de rotura de las ondas de alta frecuencia.

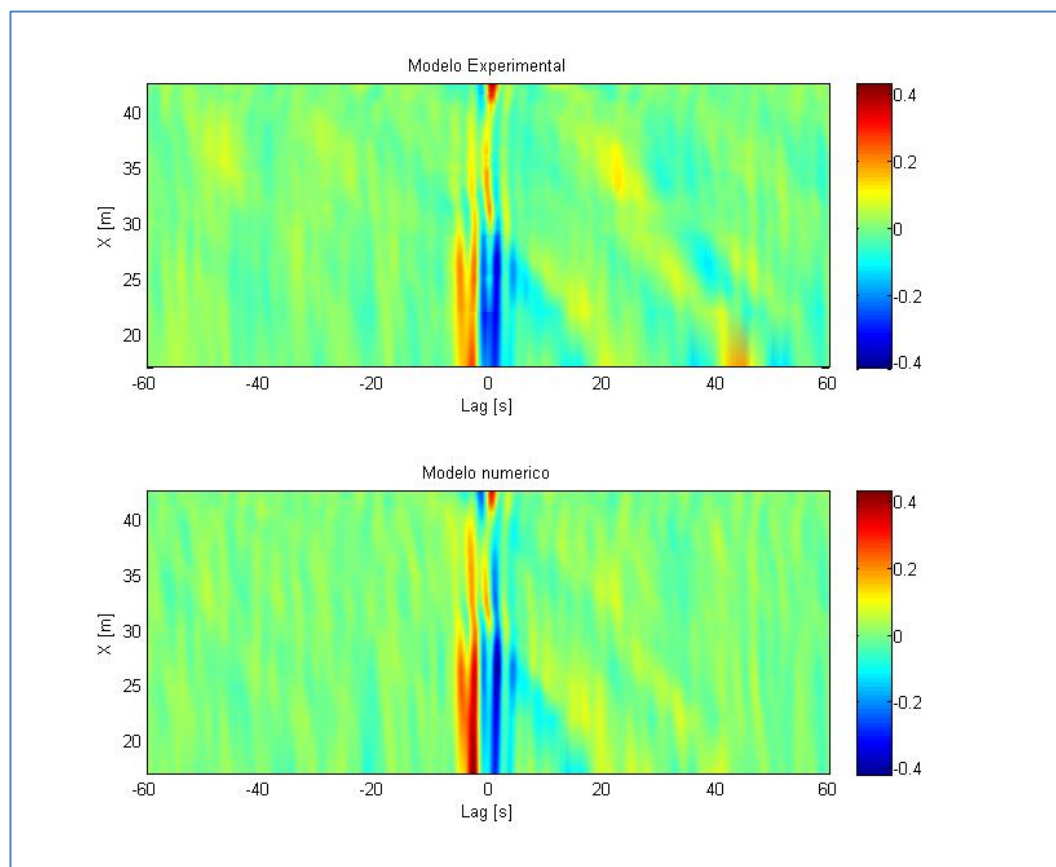


Figura 36: Correlación entre la envolvente de la señal y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico para el nivel bajo, (elaboración propia).

Las correlaciones positivas en la parte alta de la playa están fuertemente relacionadas con los procesos de asomeramiento y rotura. Estos resultados difieren entre ambas experiencias debido a los cambios evidenciados en su punto de rompiente (ver capítulos anteriores), situándose para el nivel alto a los 40 [m] a diferente del nivel bajo ubicado a los 30 [m] de distancia. Estas correlaciones son generadas por ondas cortas que al propagarse a zonas menos profundas se asomeran, aumentando sus crestas (peraltan), para luego romper por la disminución de profundidades, generando una disminución del agrupamiento de las olas (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003).

Este fenómeno también ha sido estudiado por (Van Dongeren, 2007), quien postula que los frentes olas que se propagan frente del bore experimenta una corriente en dirección opuesta que genera el decaimiento de las ondas de alta frecuencia. A su vez la onda larga que se propaga por efectos del asomeramiento aumenta su altura para luego romper, tendiendo a converger con el bore conforme decrecen las profundidades (Van Dongeren, 2007) y (Lara, Ruju, & Losada, 2010).

La onda reflejada en la línea de costa retorna como onda libre a una celeridad (\sqrt{gh}) hasta la barra (30 [m]), lugar en donde amplifica su celeridad debido al encuentro con la segunda zona de reflexión. Por su cuenta la onda libre reflejada en la zona de barra viaja libre hasta aguas más profundas. Estos resultados son contrarios a los presentados por (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003) quien en una playa con perfil de barra no evidencia fenómenos de reflexión generados por efectos de barra.

5.7.2 PROPAGACIÓN DE LA ONDA INFRAGRAVITATORIA

Para visualizar la propagación de la ondas infragravitatorias se realizaron análisis de correlaciones cruzadas entre la envolvente de las ondas de alta frecuencia en la ubicación inicial (offshore) y la onda infragravitatoria para cada una de las posiciones a lo largo del canal (Figura 37 y Figura 38), estos resultados serán presentados tanto para la experimentación física como para el modelo numérico SERR1D.

Para ambos casos experimentados se pueden observar que las ondas de baja frecuencia persisten la zona de rotura de las ondas cortas, propagándose para luego reflejar en la línea de costa, este tipo reflexión en la parte alta de la playa han sido reportadas (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003), (Baldock, 2006) y (Lara, Ruju, & Losada, 2010), además nuevamente se aprecian efectos reflexivos en la zona de la barra para ambos casos experimentados.

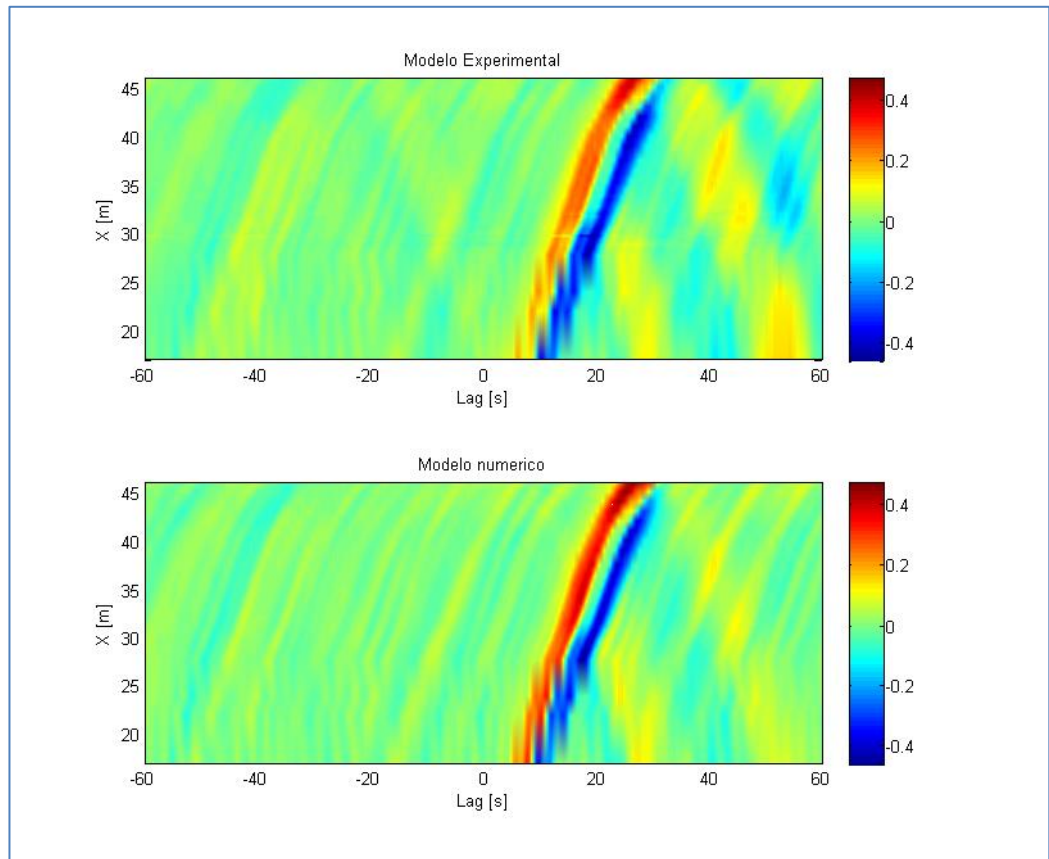


Figura 37: Correlación entre la envolvente de la señal en la ubicación inicial y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico Nivel alto, (elaboración propia)

A partir de los 17 [m] (cambio de profundidades), se observan correlaciones positivas seguidas de negativas que avanzan en el tiempo hasta la línea de costa, estas correlaciones positivas a diferencia de lo planteado por (List J. H., 1992) son generadas por la presencia de ondas libres, que preceden a las envolventes de onda corta, que se generan e irradian mientras estas se propagan en profundidades variables (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003), este fenómeno es descrito con claridad por (Nielsen & Baldock, 2009) Pág. 60.

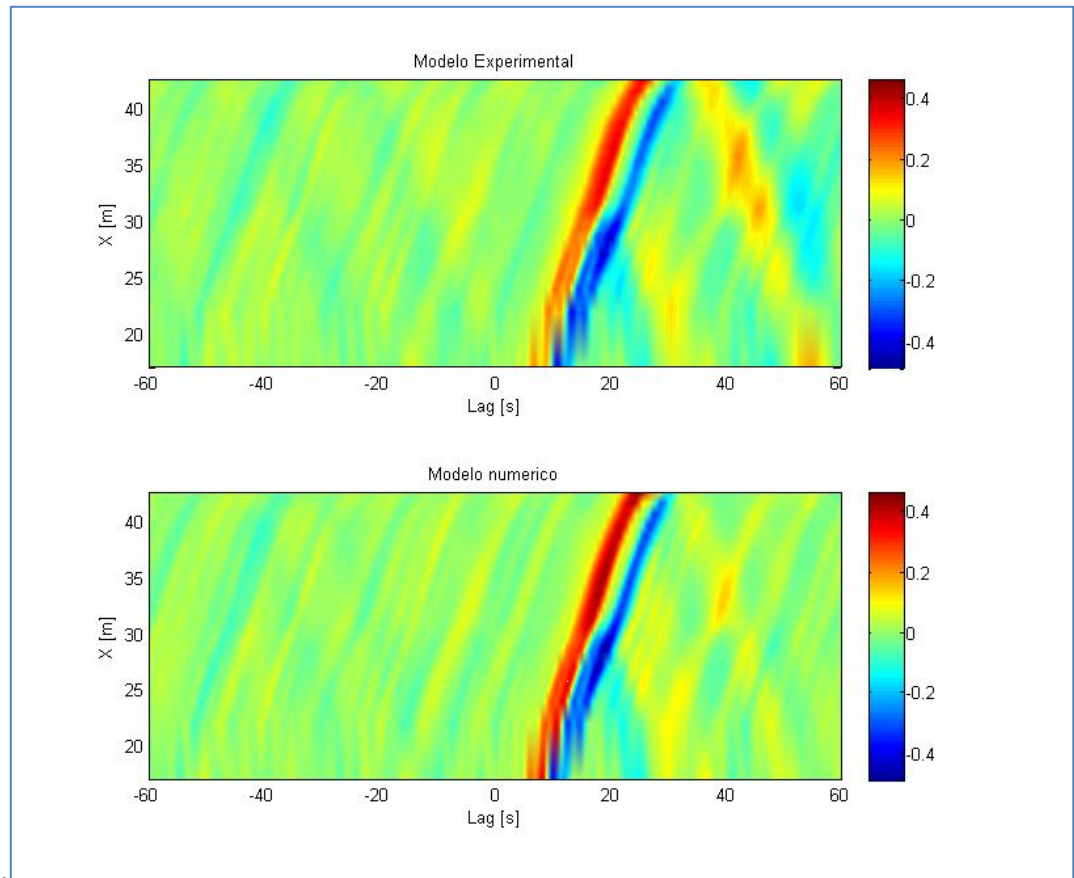


Figura 38: Correlación entre la envolvente de la señal en la ubicación inicial y las ondas infragravitatorias en cada posición para los resultados experimentales y modelo numérico Nivel bajo, (elaboración propia).

6 CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas por el estudio experimental del mecanismo de generación de ondas infragravitatoria son las siguientes:

- Las ondas Infragravitatorias son generadas por el rompimiento de ondas de alta frecuencias que liberan la onda larga asociado al grupo de olas (bound wave). Esta generación está directamente relacionada con la profundidad local, observando que para el nivel bajo las ondas de alta frecuencias del grupo son destruidas por efectos rotura del oleaje en la zona barra (correlaciones positivas). En cambio para el nivel alto las ondas asociadas al grupo de olas persistes después de la barra (correlaciones positivas) teniendo consigo la onda forzada una mayor cantidad de tiempo, para luego romper en sectores más altos liberando la onda infragravitatoria.
- Las ondas infragravitatorias se propagan a la velocidad del grupo (cg) para luego ser reflejadas en la línea de costa y viajar como ondas libres a celeridad \sqrt{gh} hacia mayores profundidades. Cabe mencionar que además se producen efectos reflexivos generados por la barra, a diferencia de los estudios (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003) quien para una playa con barra no evidencia este fenómeno de reflexión. Por otra parte, en estudios con pendiente de fondo suave, se observan solo una zona de reflexión en la línea de costa (Baldock, 2006)
- La envolvente del grupo de olas de alta frecuencia y la onda infragravitatoria antes de la ruptura evidencian en ambos niveles correlaciones positivas que son precedidas por resultados negativos entorno de los 0 [s] estos resultados confirman las afirmaciones de (Janssen, Battjes, & Van Dongeren, 2003) y (Nielsen & Baldock, 2009) sobre las ondas largas en forma de N, estas son formadas en sectores transitorios entre un fondo horizontal y zonas donde las ondas libres forzadas se han vuelto completamente separadas por sus diferencias de velocidad. Posterior al rompimiento de las ondas de alta frecuencia se observa que la onda infragravitatoria convergen con el bore conforme decrecen las profundidades (Van Dongeren, 2007) y (Lara, Ruju, & Losada, 2010).
- Al observar los resultados del esquema numérico utilizado para describir el comportamiento de las oscilaciones naturales, el cual manifiesta un excelente comportamiento para su primer modo, se llega a la conclusión que las variaciones de amplitudes a lo largo del canal de esta frecuencia son determinadas por la batimetría del canal.

- Para efectos del análisis los resultados proporcionados por el modelo numérico SERR-1D son capaces de representar de excelente manera la generación, propagación y disipación de las ondas infragravitatorias.

7

GLOSARIO

Playa (Beach):	Acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de los sedimentos debido a la acción del oleaje.
Zona costera:	Comprende el área de plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos vienen determinados por la dinámica marina.
Perfil de Playa:	Se define como la variación de la profundidad del agua, con la distancia a la línea de costa, en dirección normal a la misma.
Barra Longitudinal	Acumulación de arena cuasi paralela a la línea de costa.
Ola Rota (Bore):	El origen del término bore proviene de la onda que se propaga como un resalto hidráulico móvil a profundidades menores, generados tras la rotura.
Zona de rotura:	Es la porción de la zona interior en la que se produce la rotura del oleaje. Si el oleaje fuera regular, se denominaría Línea de Rotura.
Zona de Rompientes (Surf Zone):	Porción del área interior en la que se propagan los bores producidos por la rotura
Zona de Acenso-Descenso:	Porción de la zona interior sobre la que se produce la alternancia de ascenso y descenso del oleaje, quedando el fondo cubierto y descubierto alternativamente por el oleaje.

Zona Interior:	Comprende la zona entre el máximo ascenso del oleaje en la playa y el límite hacia el mar de la rotura del oleaje. Incluye las zonas de ascenso-descenso, de rompientes y de rotura.
Onda Infragravitatoria:	Ondas de gravedad de periodo superior a los 30 segundos, generadas por grupos de ondas gravitatorias y controladas por la gravedad y la fricción.
Onda Gravitatoria:	Son las ondas generadas por el viento y controladas por la gravedad y la fricción. Corresponden a la banda del espectro de energía entre 1 y 25 segundos, aproximadamente.
Set-Up:	Ascenso del nivel medio que se produce en la zona de rompientes.
Set-Down:	Descenso del nivel medio que se produce por los procesos de asomeramiento antes de la rotura de las olas, con un mínimo en la zona de rotura.

9 REFERENCIAS

- Baldock, T. E. (2006). *Long wave generation by the shoaling and breaking of transient wave groups on a beach*. Proceedings of Royal Society A doi:10.1098/rspa.2005.1642.
- Baldock, T. E., O'hare, T. J., & Huntley, D. A. (2004). *Long wave forcing on a barred beach*. J. Fluid Mech, vol. 503, pp. 321–343.
- Baldock, T., Huntley, D., Bird, P., O'Hare, T., & Bullock, G. (2000). *Breakpoint generated surf beat induced by bichromatic waves groups*. Coastal Engineering, Vol 39, Pag 243-242.
- Bellotti, G., Briganti, R., Beltrami, G. M., & Franco, L. (2012). *Modal analysis of semi-enclosed basins*. Coastal Engineering 64 (2012) 16–25.
- Bendat, J., & Piersol, A. (1986). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. New York: John Wiley and Sons.
- Cienfuegos, R. (2005). *Modélisation numérique des houles bidimensionnelles et du déferlement bathymétrique*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.
- Cienfuegos, R. (2006b). *Nonlinear surf zone wave properties as estimated from Boussinesq modelling: Random waves and complex bathymetries*. Proc., 30th Int. Conf. Coastal. Eng., ASCE, Reston, Va.
- Cienfuegos, R., & Mignot, E. (2009). *On the application of a Boussinesq model to river flows including shocks*. Coastal Engineering 56 (2009) 23–31.
- Cienfuegos, Rodrigo; Barthélemy, E.; Bonneton, P. (2006). *A fourth order compact finite volume scheme for fully nonlinear and weakly dispersive Boussinesq-type equations. Part I: Model development and analysis*. International Journal for Numerical Methods in Fluids 2006; 51:1217–1253.
- Cienfuegos, Rodrigo; Barthélemy, E.; Bonneton, P. (2007). *A fourth-order compact finite volume scheme for fully nonlinear and weakly dispersive Boussinesq-type equations. Part II: Boundary conditions and validation*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53 (9): 1423–1455, 2007.
- Cienfuegos, R., Barthélemy, E., & Bonneton, P. (2010). *A wave-breaking model for Boussinesq-type equations including roller effects in the mass conservation equation*. J. Waterw. Port Coastal Oc.Eng.

- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Advanced series on ocean Engineering, Vol 2.
- Dong, G., Ma, X., Xu, J., Ma, Y., & Wang, G. (2009). *Experimental study of the transformation of bound long waves over a mild slope with ambient currents*. Coastal Engineering, Vol.56, Pag.1035–1042.
- Duarte, L. (2008). *Estudio experimental del mecanismo de generación de ondas largas en una playa de pendiente suave*. Santiago: Memoria de titulación Ingeniería Civil con Diploma en Ingeniería Hidráulica, Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile .
- Dutykh, D., & Dias, F. (2007). *Viscous potential free-surface flows in a fluid layer of infinite depth*. Comptes Rendus Mathematique, Vol.345, Pag. 113-118.
- Funke, E. R., & Mansard, E. P. (1979). *On the synthesis of realistic sea states*. Ottawa, Canada: Hydraulics Laboratory Report LTR-HY-66, National Res.Council of Canada.
- Goda, Y. (s.f.). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol 15.
- Grant, W., & Madsen, O. (1979). *Combined wave and current interaction with a rough bottom*. Journal of Geophysical Research, Vol 84, Pag. 1797–1808.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waves*. Cambridge.
- Hwung, H.-H., & Lin, Y.-H. (2007). Investigation of the generation of infra-gravity waves. Wave Motion, Vol. 45, Pag. 119-132.
- Janssen, T. T., Battjes, J. A., & Van Dongeren, A. R. (2003). *Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom*. Journal of Geophysical Research Vol.108, doi:10.1029/2002JC001515.
- Johnson, Johnson, R., Mansard, E., & Ploeg, J. (1978). *Effects of wave grouping on breakwater*. Coastal Engineering.
- Karunarathna, H., & J. Chadwick, A. (2006). *On low-frequency waves in the surf and wash*. Ocean Engineering 34: 2115–2123.
- Kennedy, A., Chen, Q., Kirby, J., & Dalrymple, R. (2000). *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 2000; 126(1):39–48.

- Lara, J. L., Ruju, A., & Losada, I. J. (2010). *Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach*. Proceedings of the Royal Society, A 467, Pag. 1215-1242.
- List, J. (1991). Wave groupiness variations in the nearshore. *Coastal Engineering*, Vol. 15, Pag. 475-496.
- List, J. H. (1992). *A Model for the Generation of Two-dimensional Surf Beat*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pag. 5623-5635.
- Liu, Z., & Frigaard, P. (2001). *Generation and analysis of random waves*. Aalborg Universitet.
- Longuet-Higgins, M., & Stewart, R. (1962). *Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat"*. *J. Fluid. Mech.* 13, Pag 481-504.
- Mase, H. (1989). *Groupiness Factor and Wave Height Distribution*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 115.
- Munk, W. (1949). *Surf beat*. *Trans. Am. Geophys. Union* 30, Pag 849-854.
- Nielsen, P., & Baldock, T. E. (2009). *V-Shaped surf beat understood in terms of transient forced long waves*. *Coastal Engineering* 57 (2010) 71–73.
- Oppenheim, A., & Schaffer, R. (1989). *Discrete-Time Signal Processing*. Pearson 3 Edición.
- Peregrine, D. (1967). *Long Waves on a Beach*. *J. fluid Mech*, Vol 27, Part 2, Pag. 815-827.
- Sallenger, A. H., & Holman, R. A. (1987). *Infragravity Waves Over a Natural Barred Profile*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, Pag 531-95.
- Schäffer, H., Madsen, P., & Deigaard, R. (1993). *A Boussinesq model for waves breaking in shallow water*. *Coastal Engineering* Vol 20, Pag 185–202.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Svendsen, I. (2004). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. *Advanced Series on Ocean Engineering* Vol. 24.
- Symonds, G., Huntley, G., & Bowen, A. (1982). *Two-Dimensional Surf Beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint*. *Journal of Geophysical research* 87, Pag 492-498.

Ting, F., & Kirby, J. (1994). *Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone*. Coastal Engineering Vol 24, Pag. 51–80.

Tucker, M. (1950). Surf beat: Sea waves of 1 to 5 min period. *Royal Naval Scientific Service*.

UNICAN. (2000). *Documento de referencia, Volumen 1: Dinámicas*. Universidad de Cantabria.

UNICAN. (2000). *Documento de referencia, Volumen 2: Procesos litorales*. Universidad de Cantabria.

Van Dongeren. (2007). *Shoaling and shoreline dissipation of low-frequency waves*. Journal of Geophysical Research Vol. 112, doi:10.1029/2006JC003701.

Zelt, J. (1991). *The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves*. Coastal Engineering 1991; 15:205 –246.

10 ANEXOS

10.1 GRÁFICOS

10.1.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

10.1.2 NIVEL BAJO DE REFERENCIA

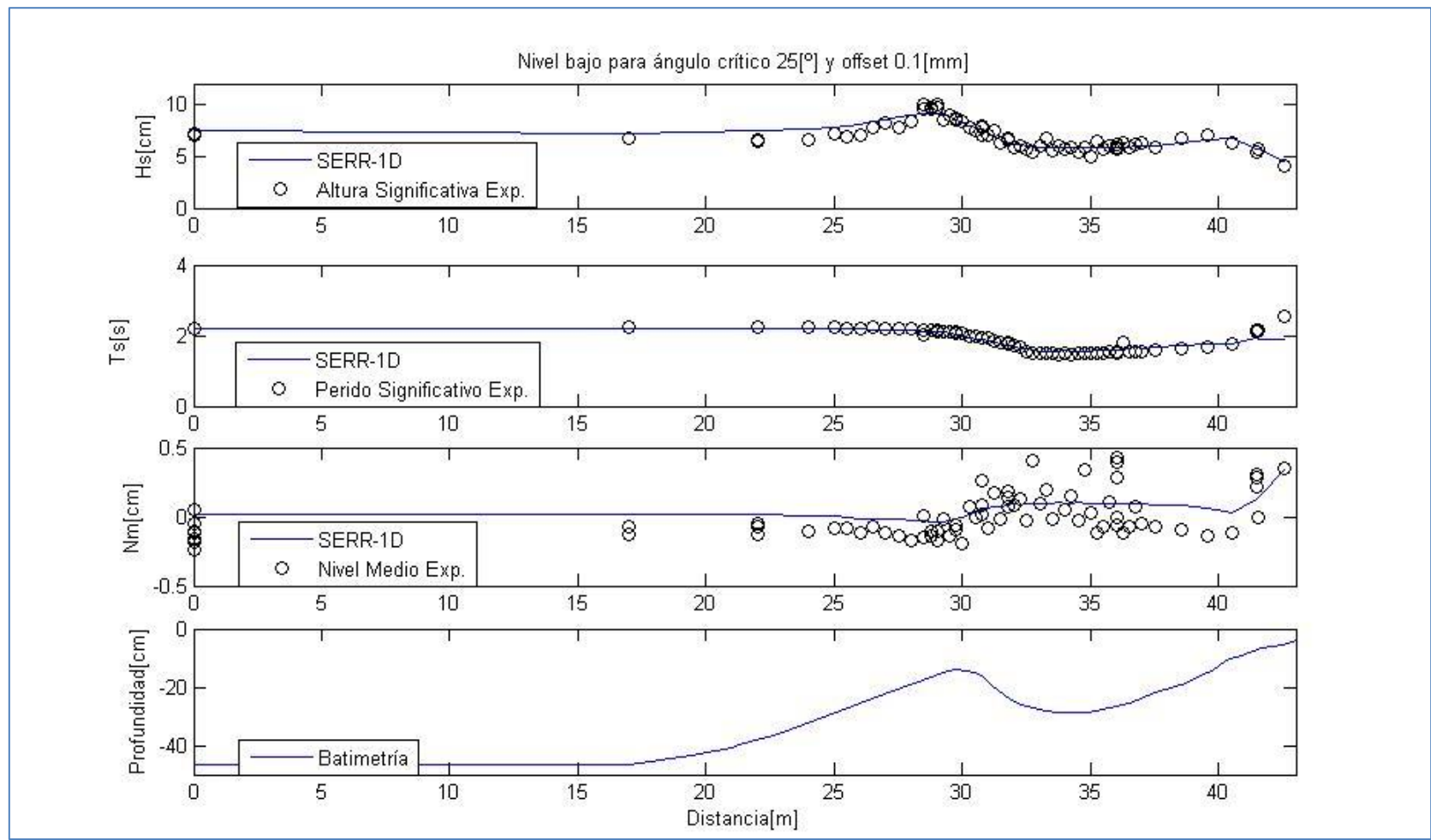


Figura 39: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia).

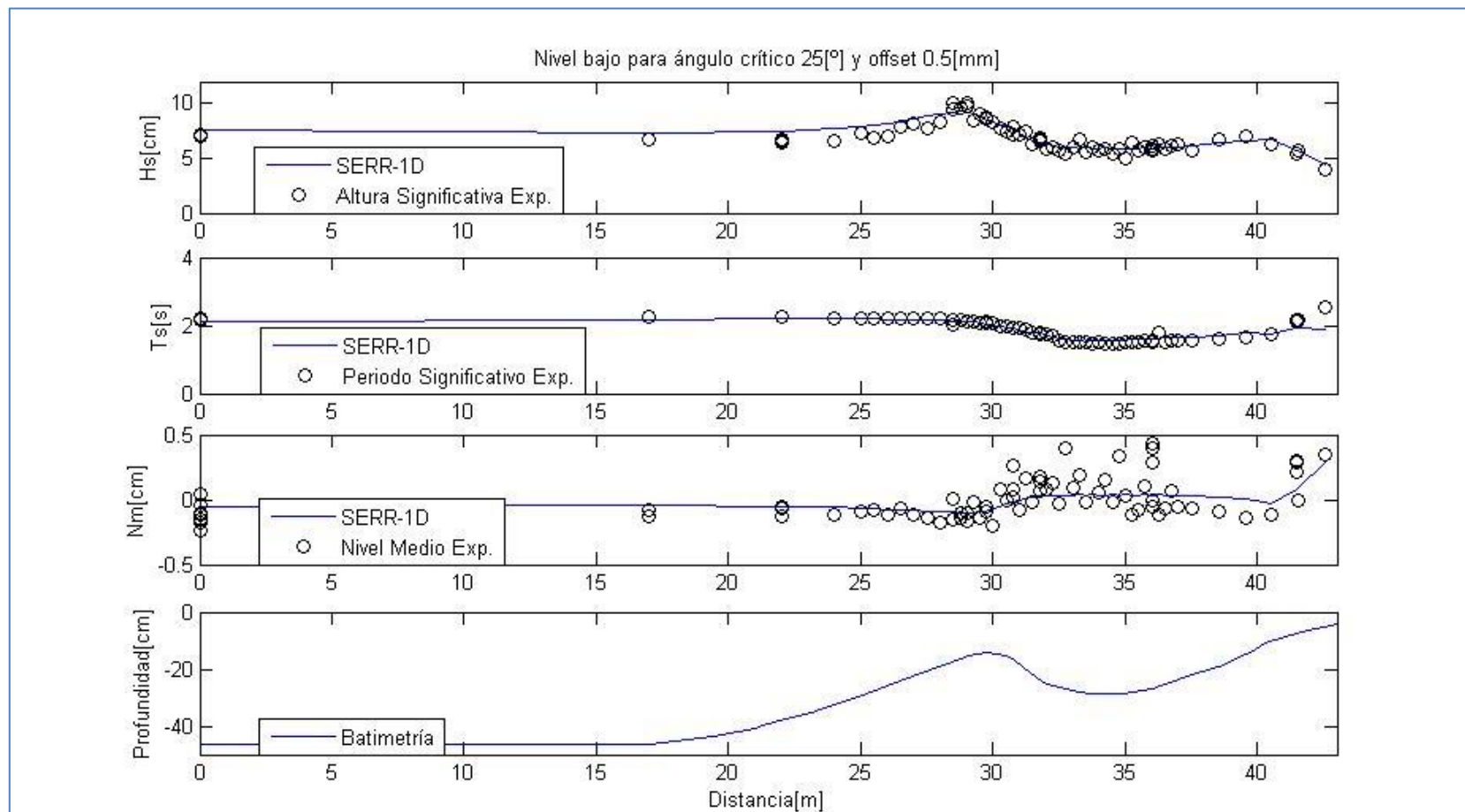


Figura 40: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia).

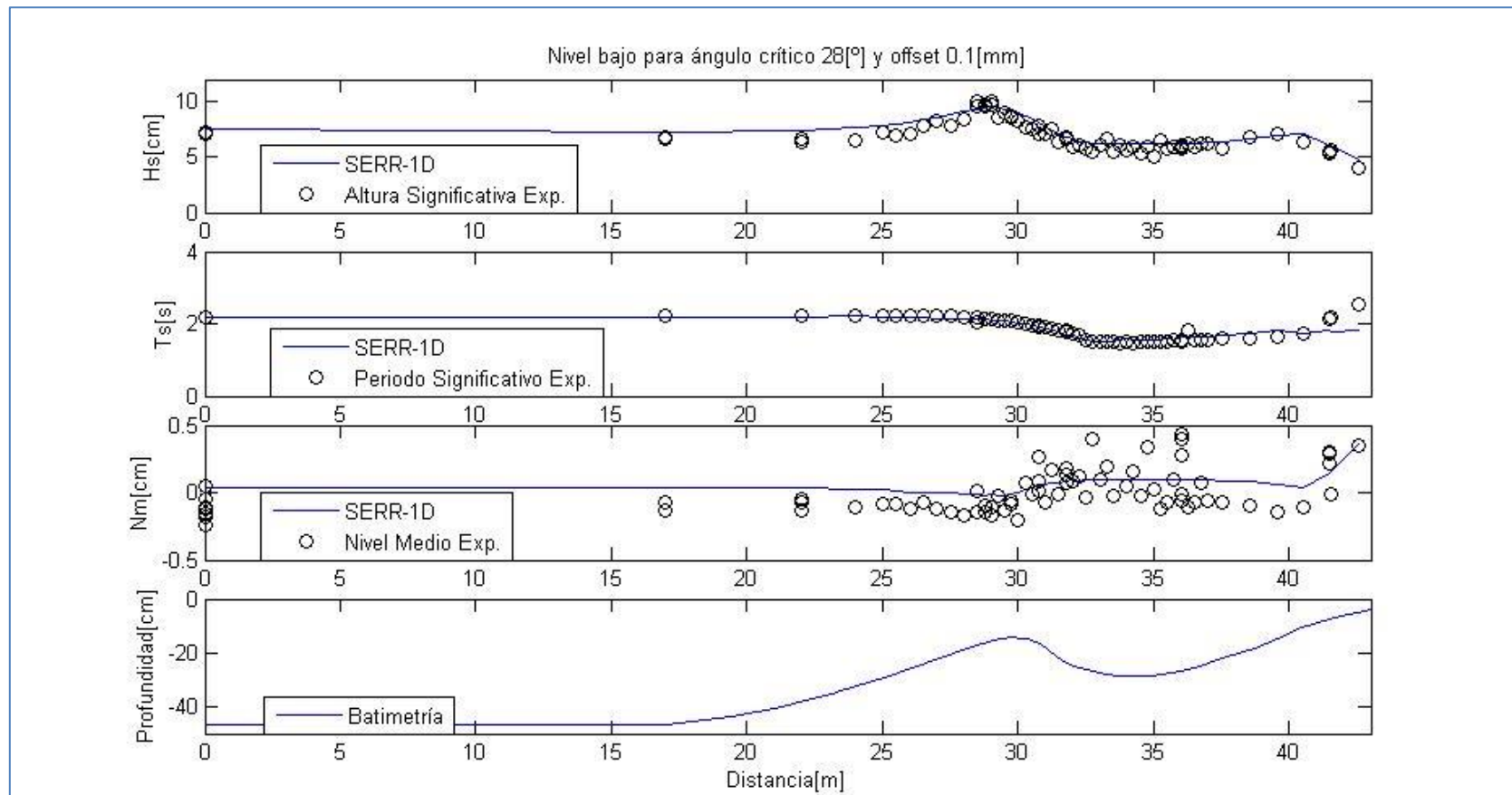


Figura 41: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia).

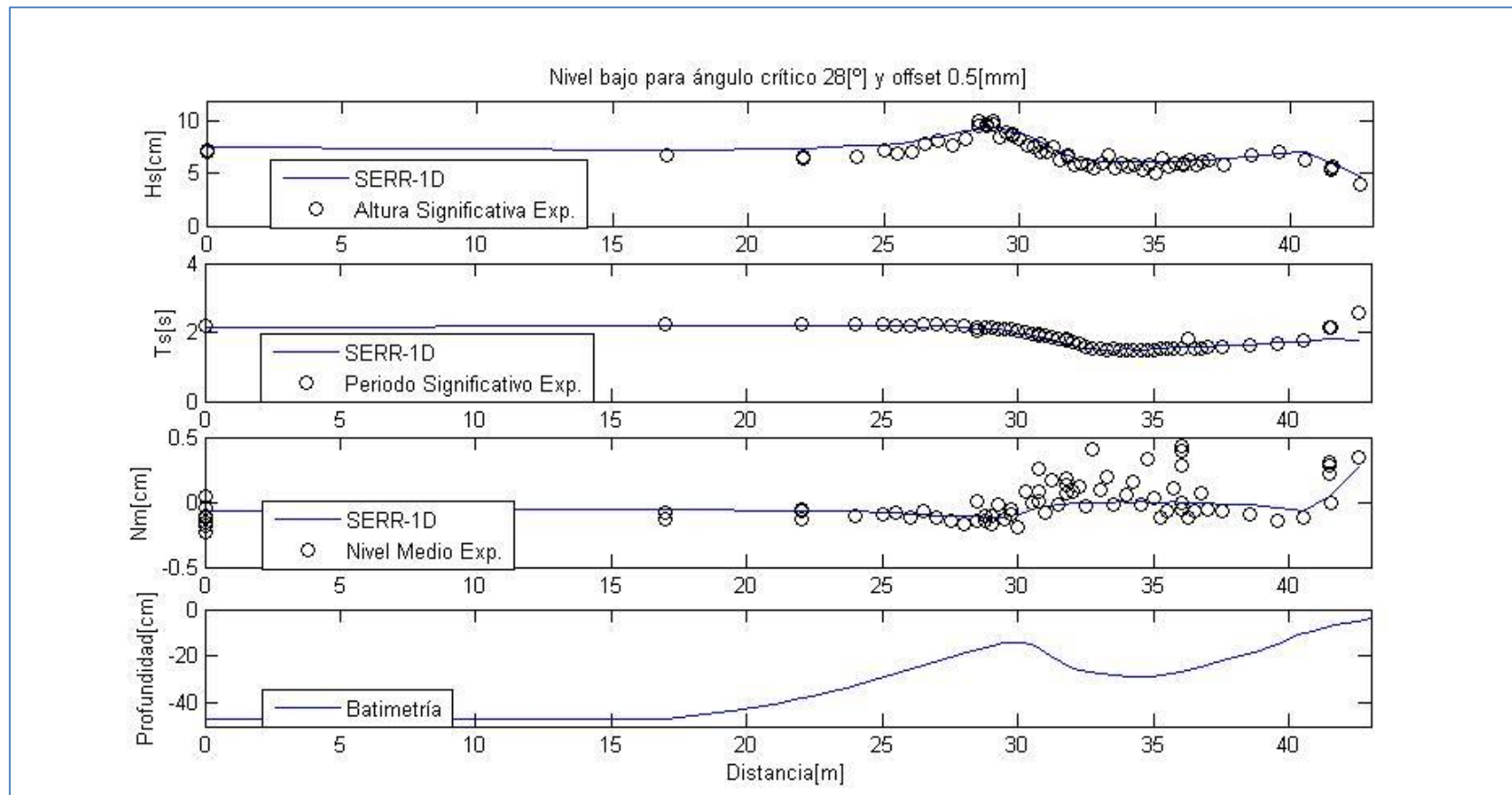


Figura 42: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia).

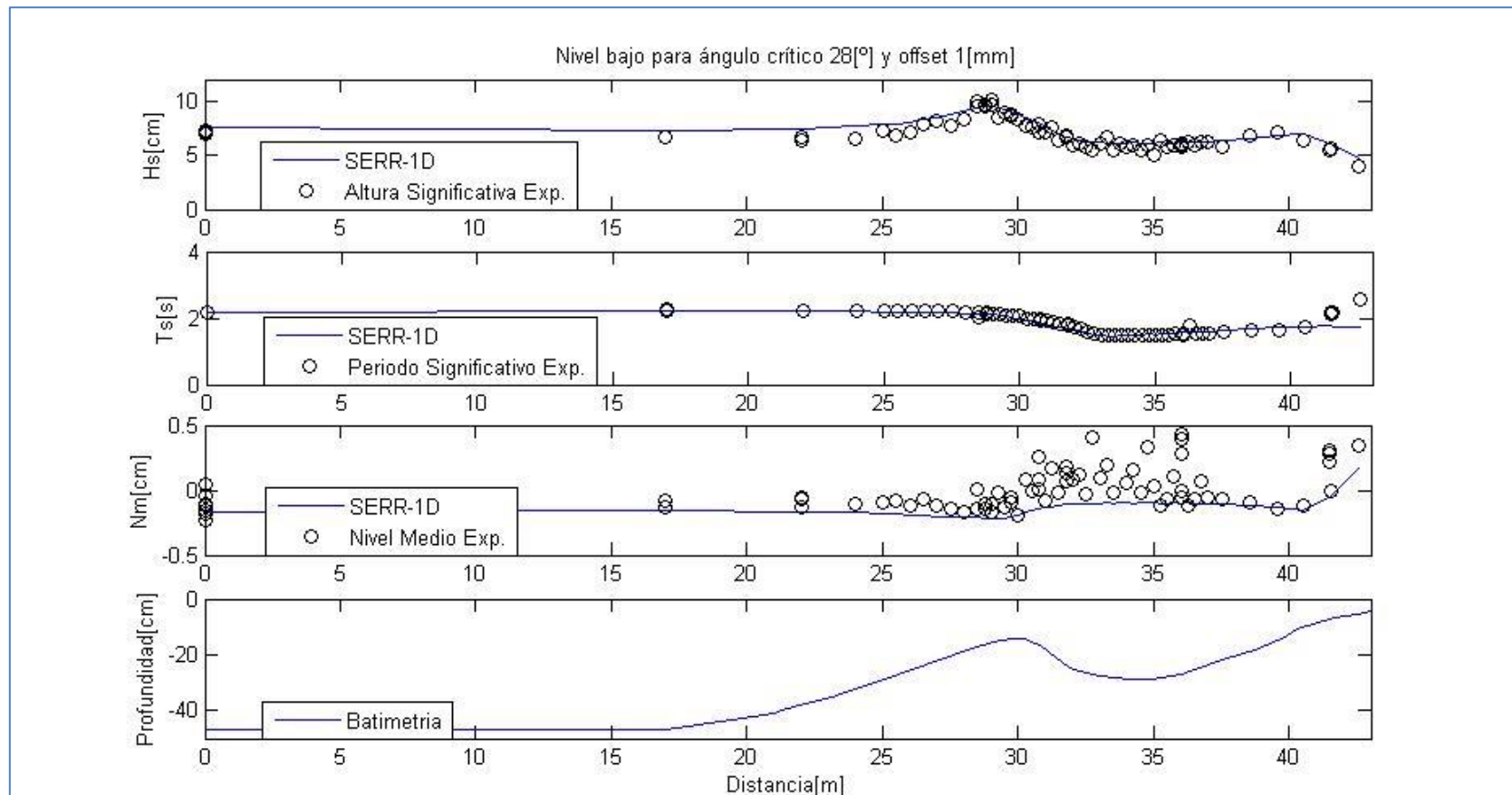


Figura 43: Modelo numérico combinación 28° y offset -1 [mm] Nb, (elaboración propia).

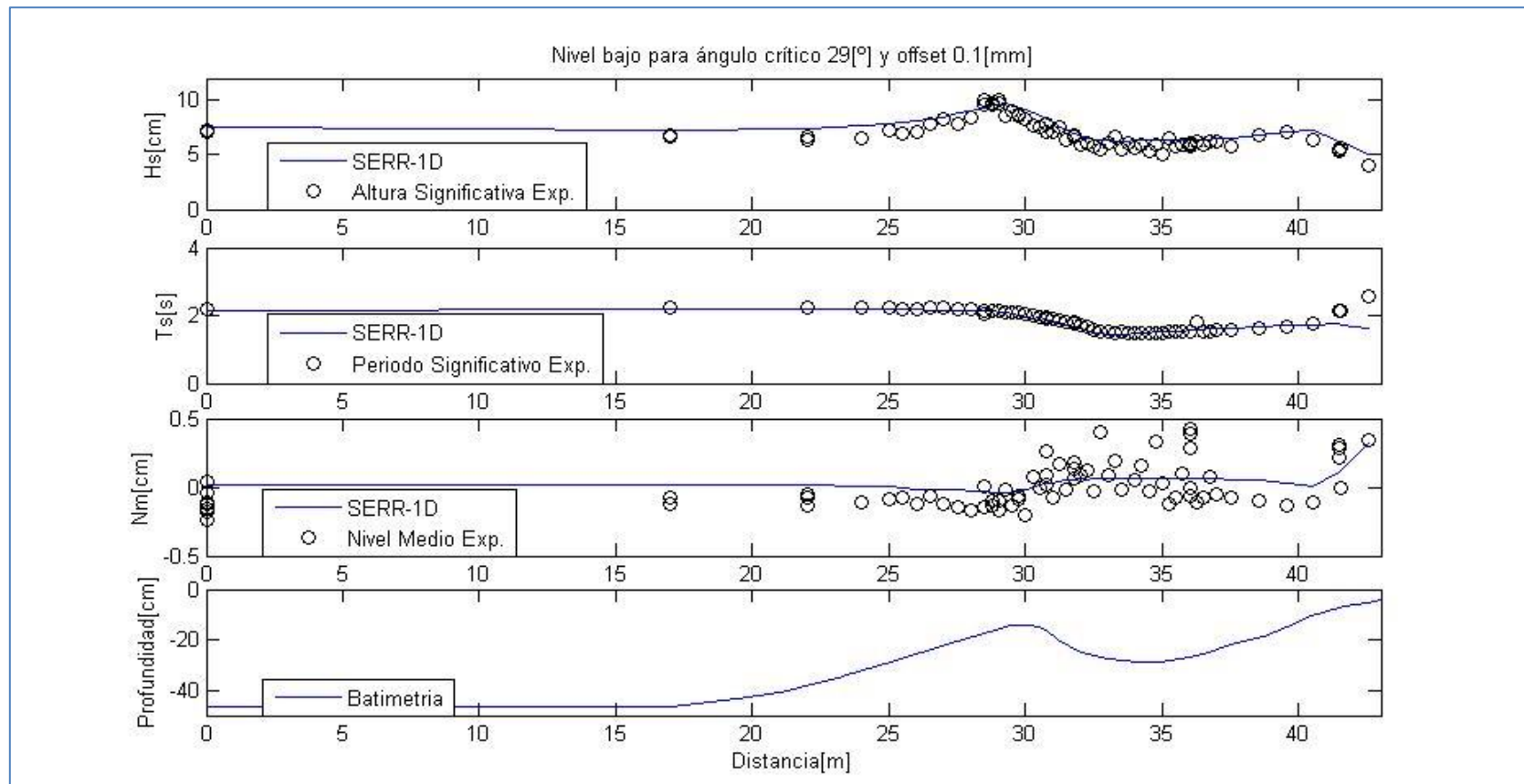


Figura 44: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.1 [mm] Nb, (elaboración propia).

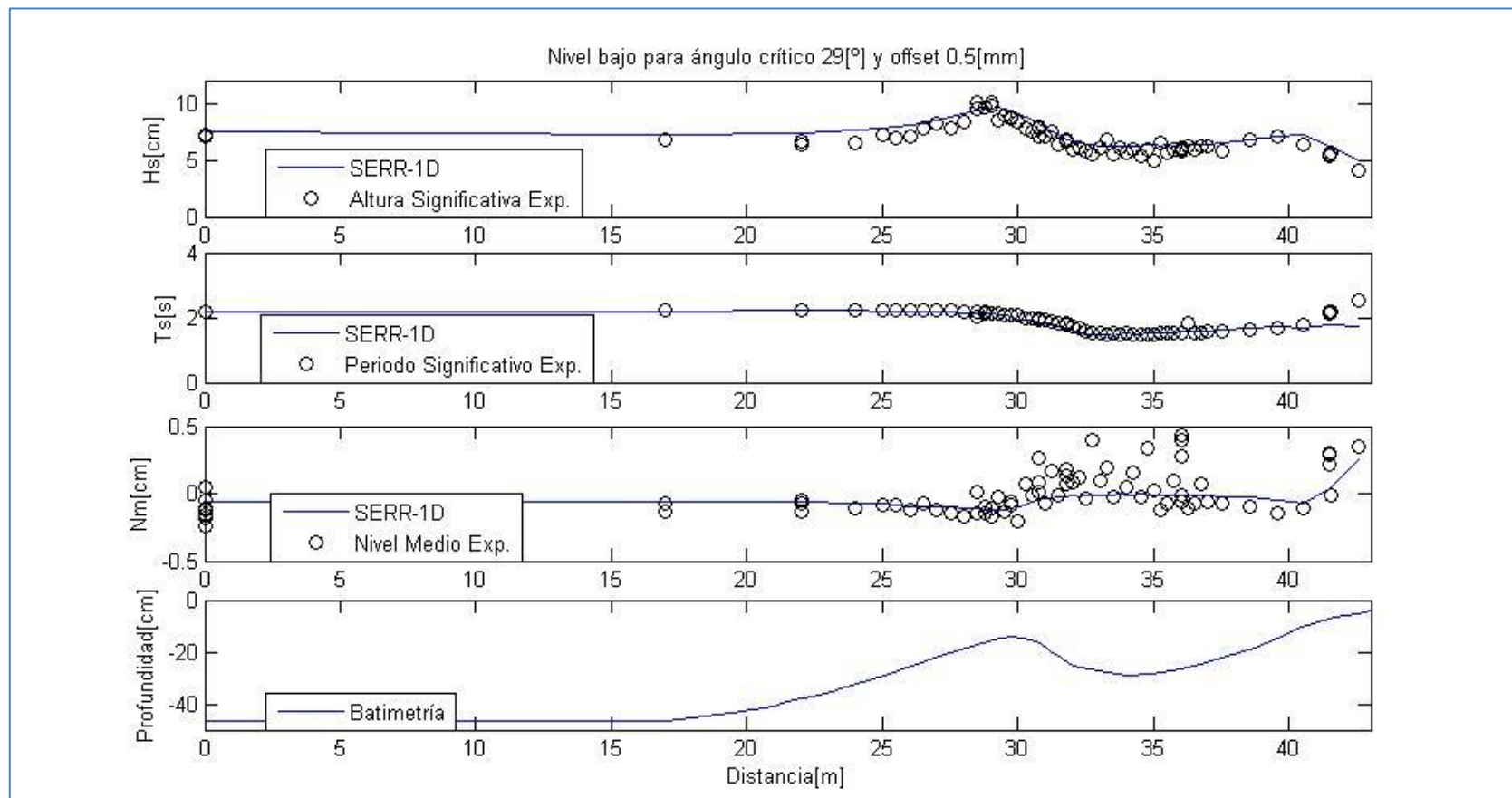


Figura 45: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.5 [mm] Nb, (elaboración propia).

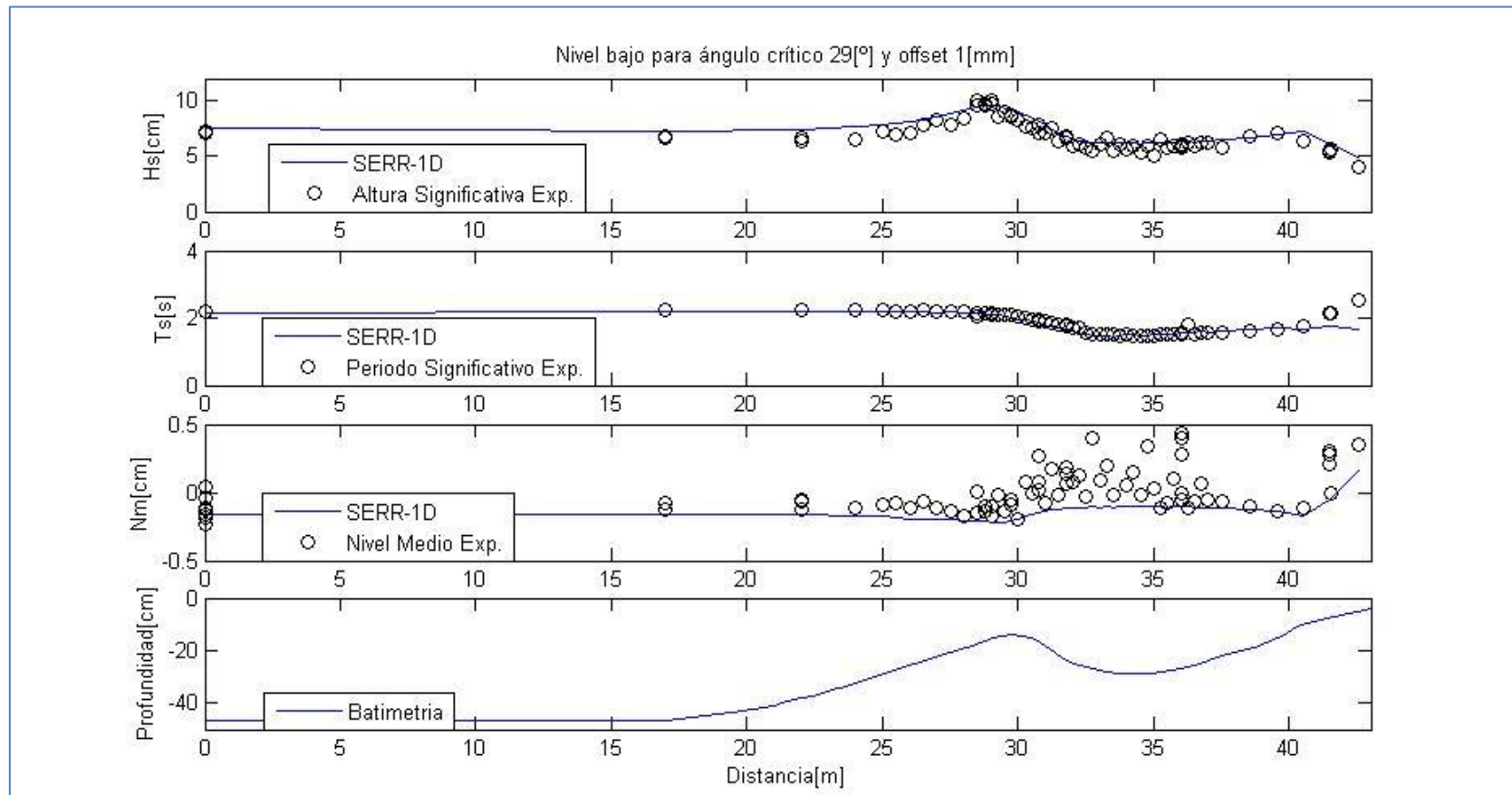


Figura 46 : Modelo numérico combinación 29[°] y offset -1 [mm] Nb, (elaboración propia).

10.1.3 NIVEL ALTO DE REFERENCIA

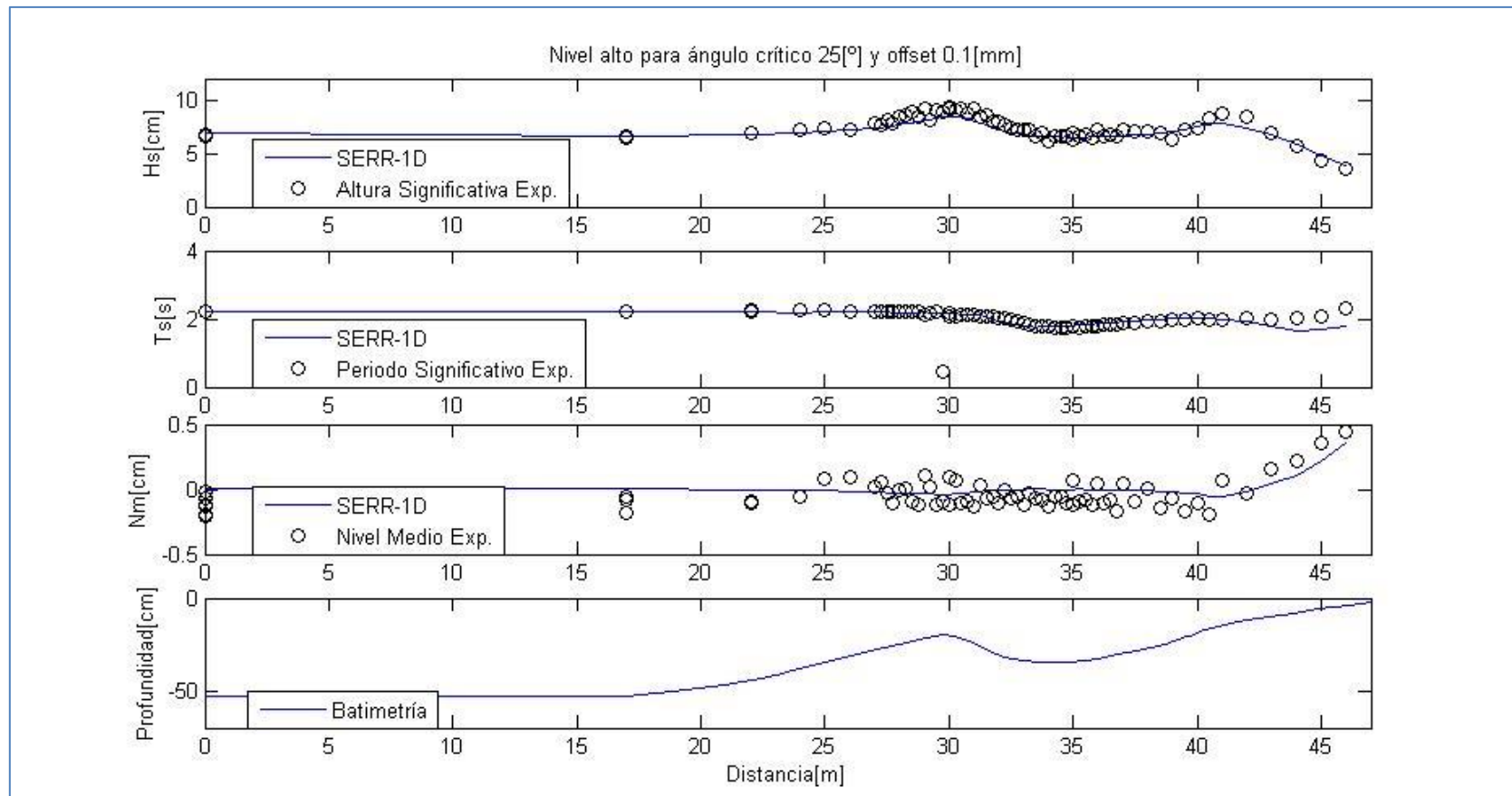


Figura 47: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.1 [mm] Na, (elaboración propia).

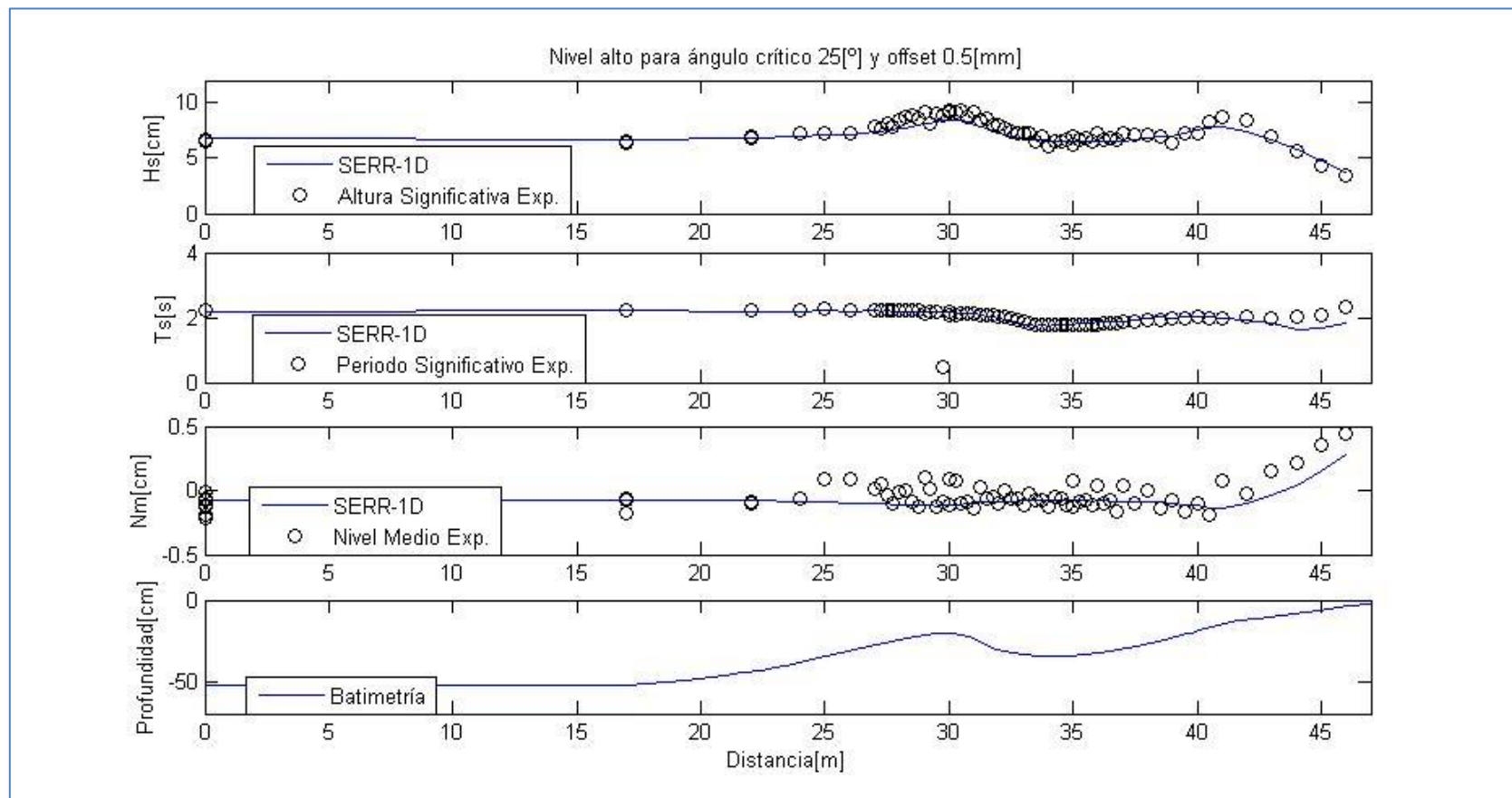


Figura 48: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -0.5 [mm] Na, (elaboración propia).

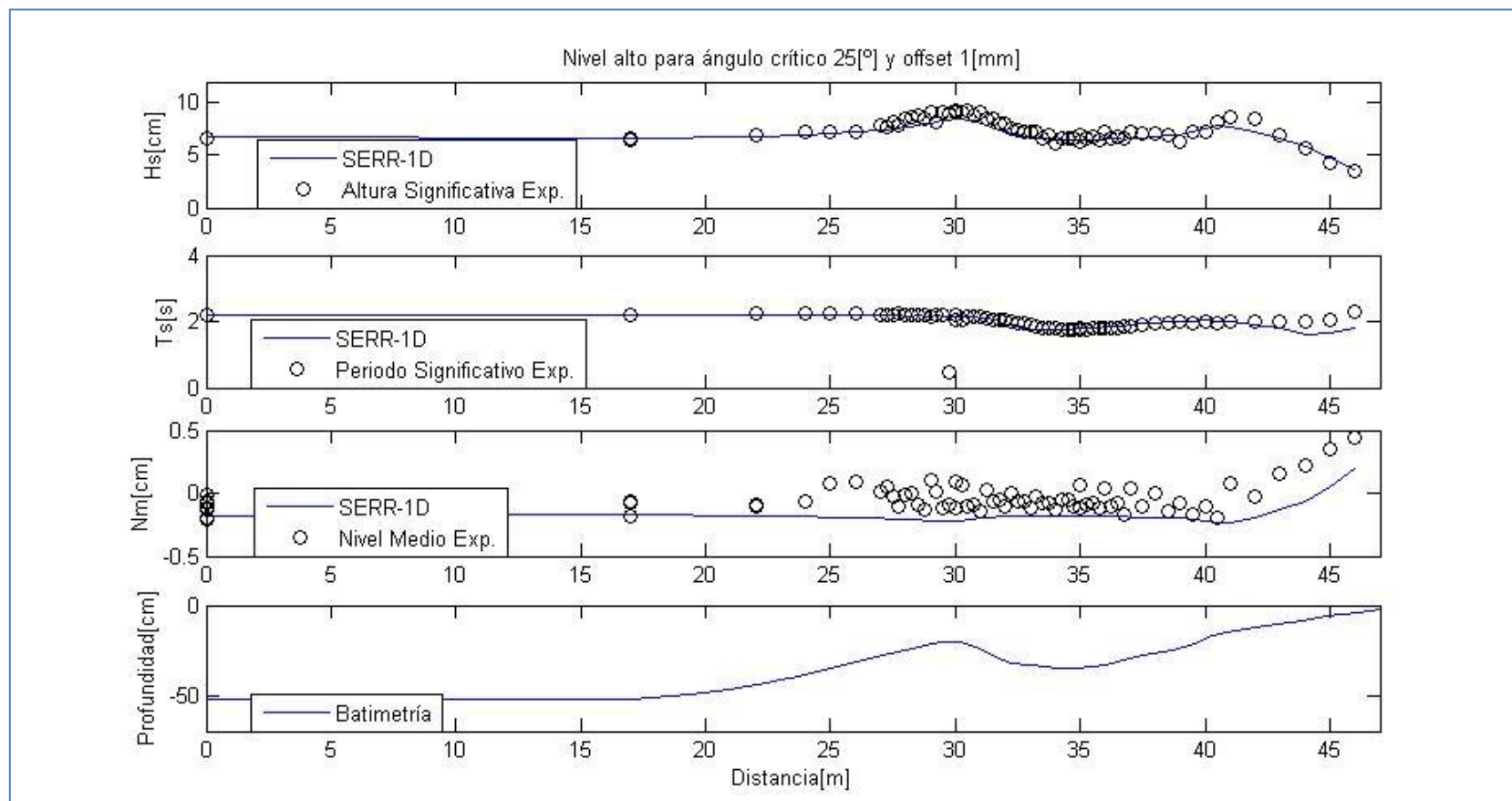


Figura 49: Modelo numérico combinación 25[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia).

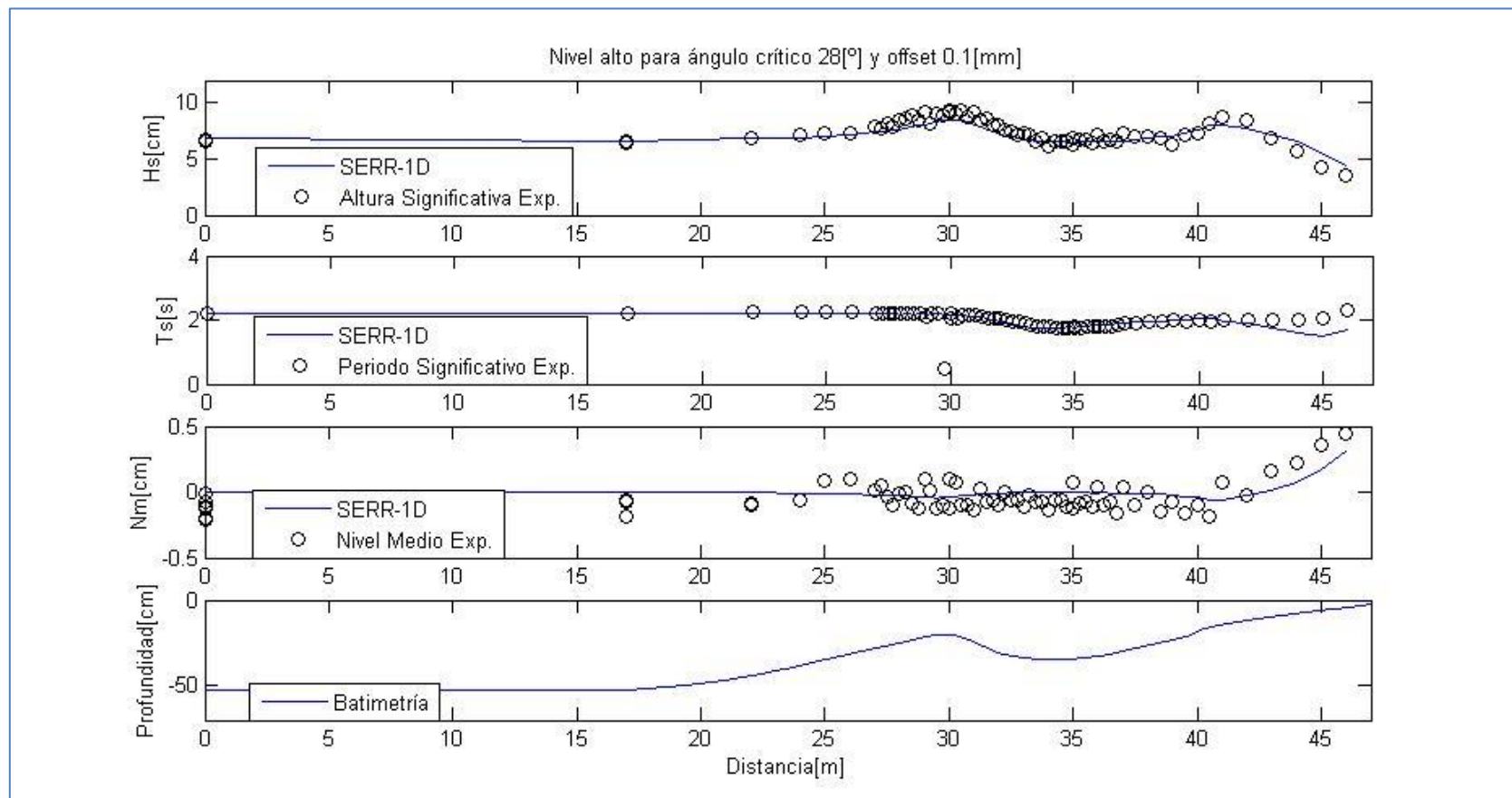


Figura 50: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.1 [mm] Na, (elaboración propia).

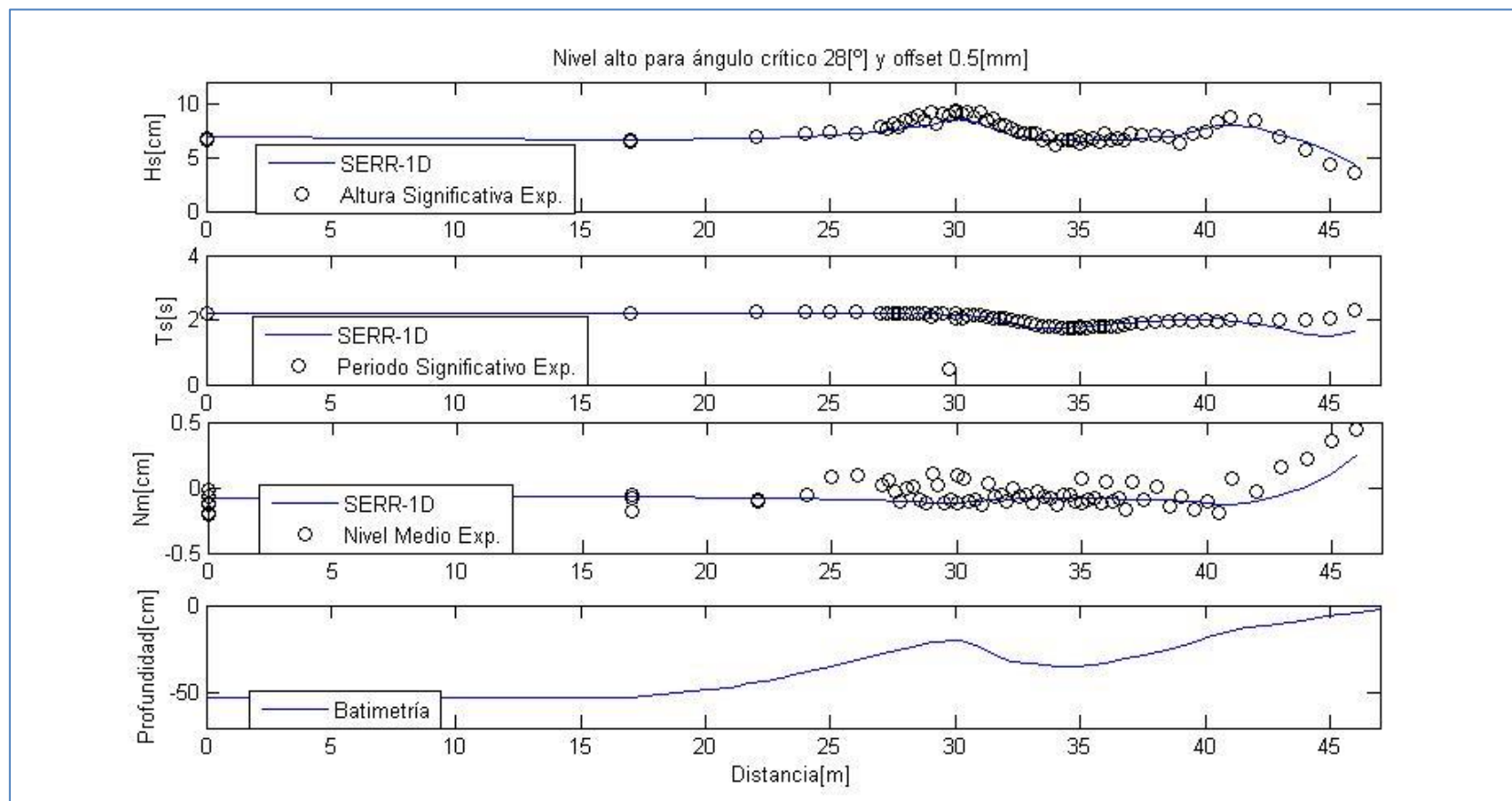


Figura 51: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -0.5 [m] Na, (elaboración propia).

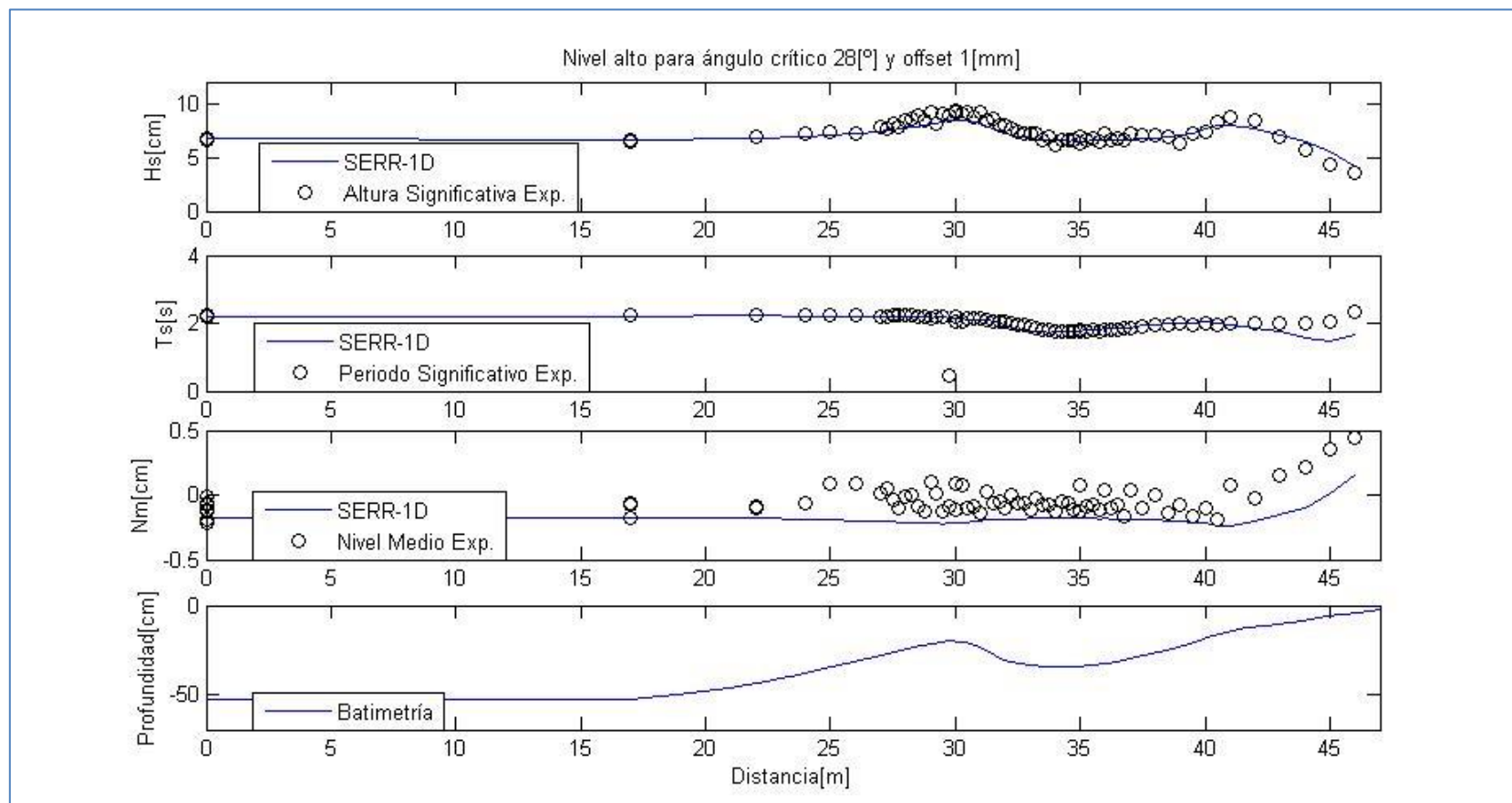


Figura 52: Modelo numérico combinación 28[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia).

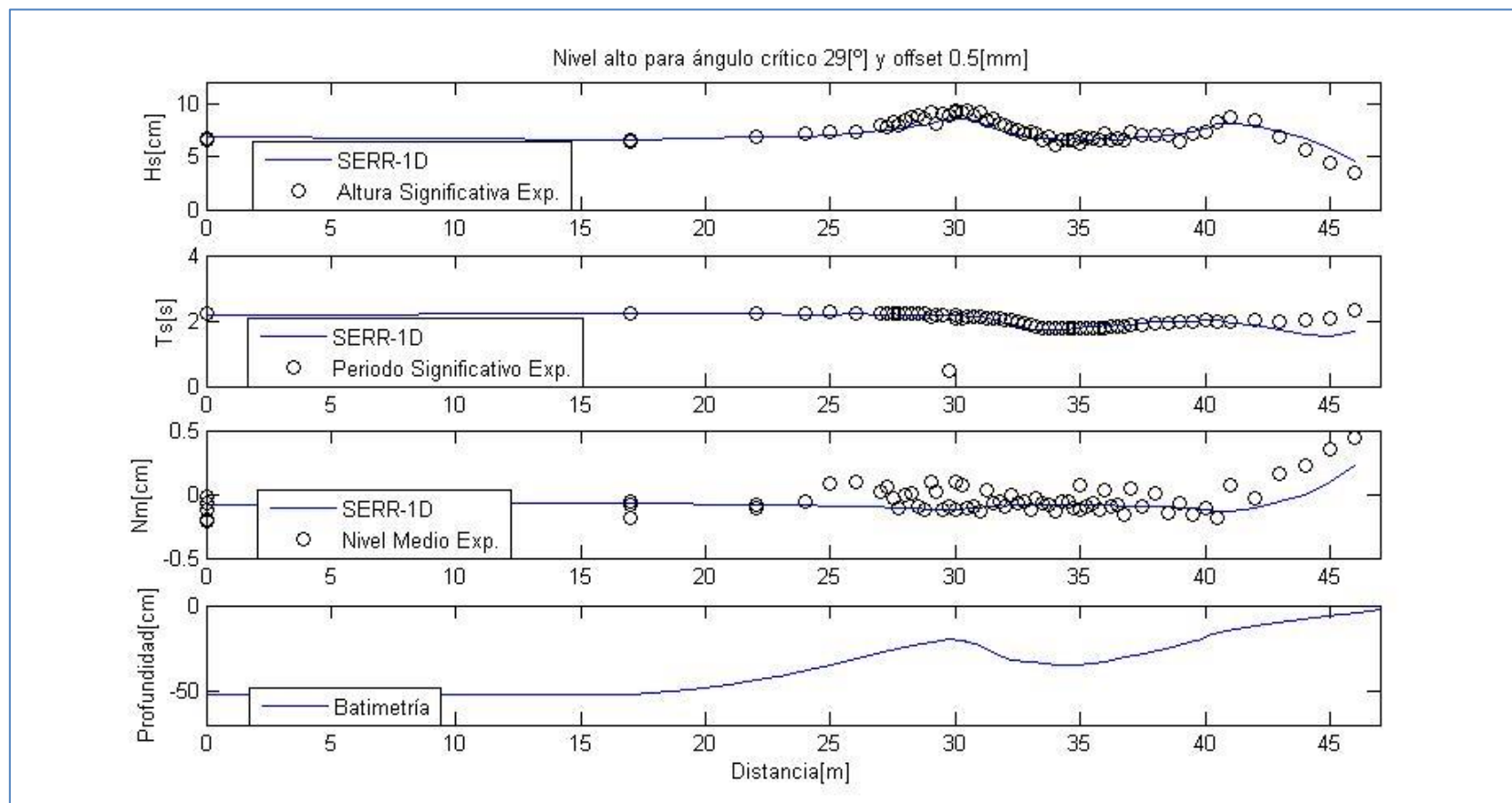


Figura 53: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -0.5 [mm] Na, (elaboración propia).

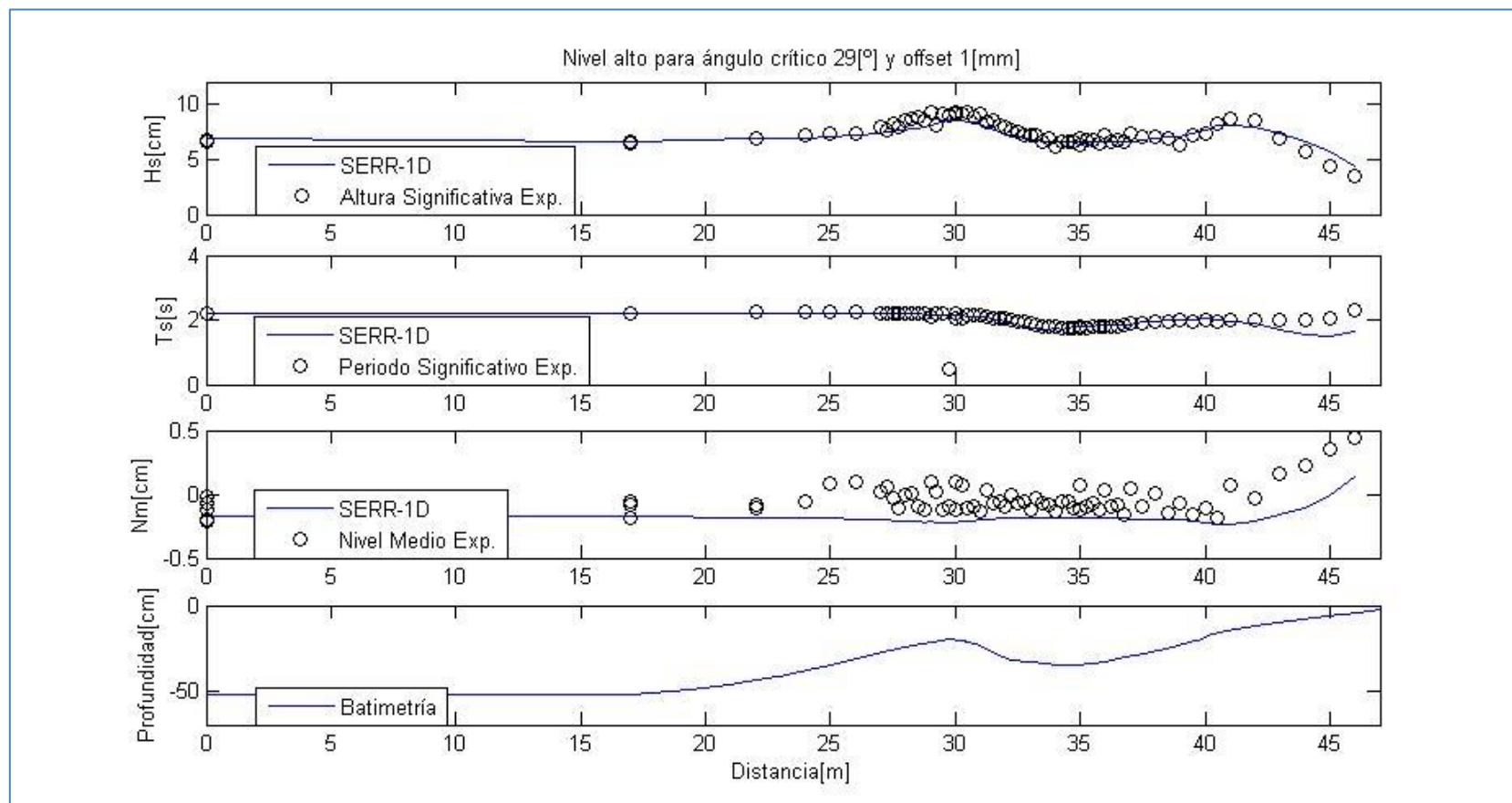


Figura 54: Modelo numérico combinación 29[°] y offset -1 [mm] Na, (elaboración propia).

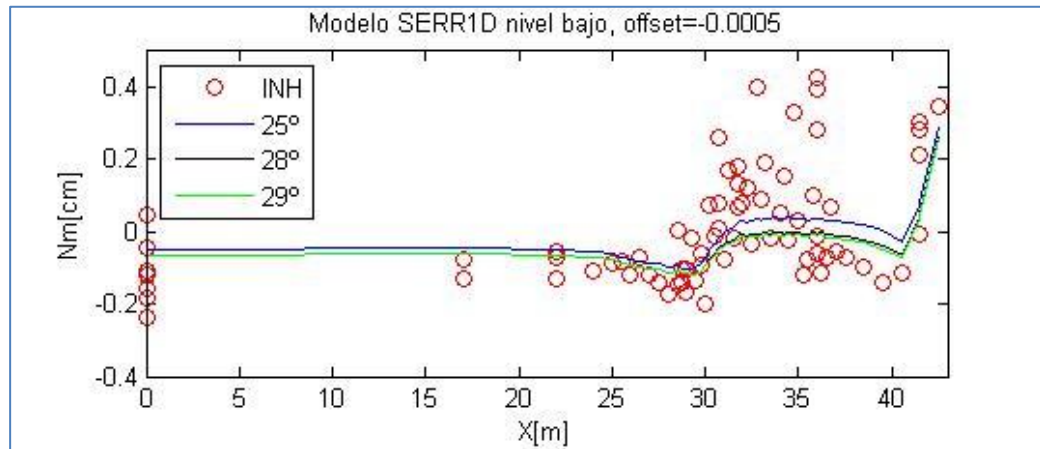


Figura 55: Sensibilidad modelo numérico para el nivel bajo para diferentes ángulos, (elaboración propia).

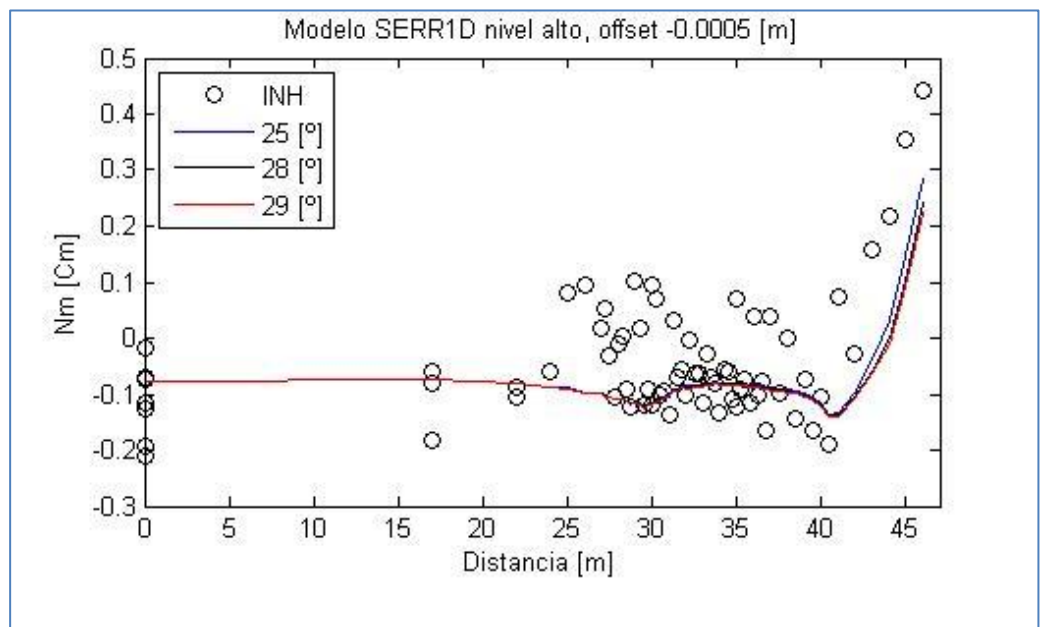


Figura 56: Sensibilidad modelo numérico para el nivel alto para diferentes ángulos, (elaboración propia).

10.1.4 PROPAGACIÓN DE OLAJE

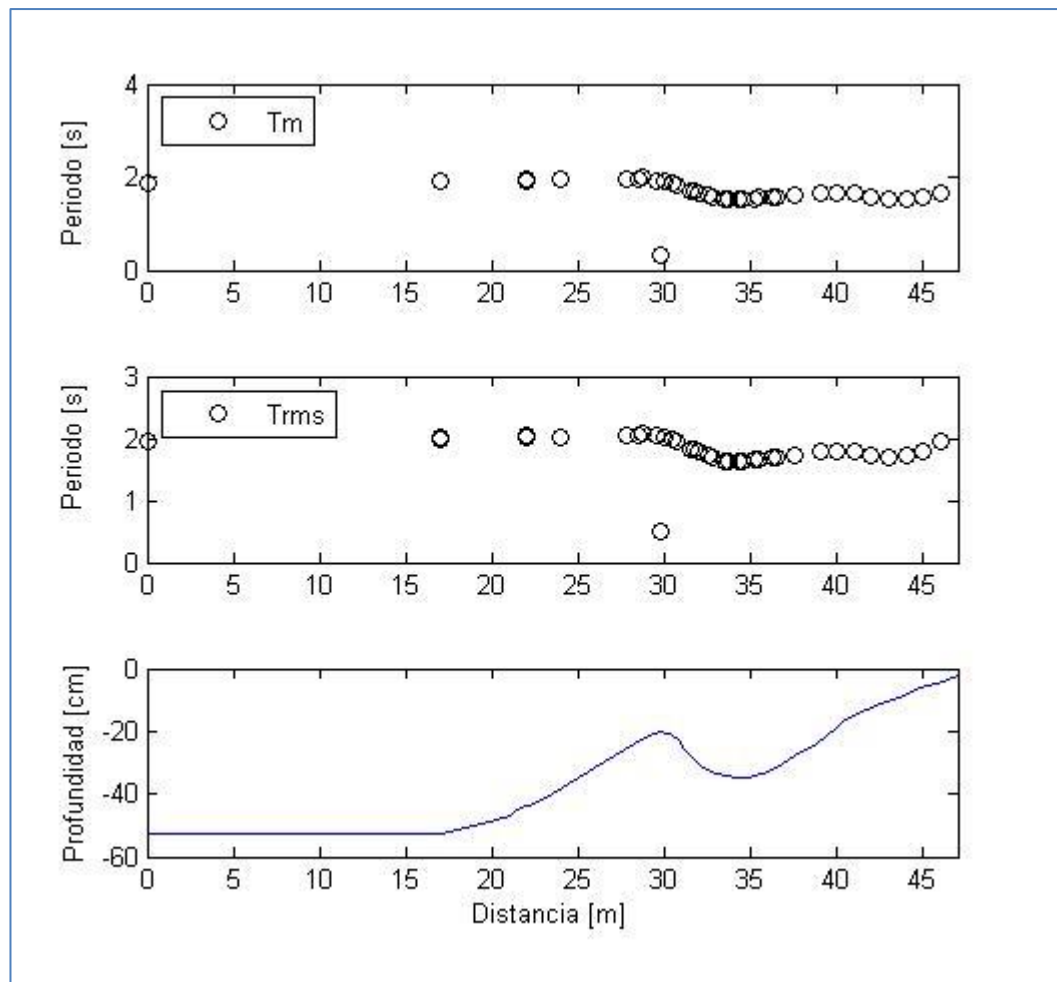


Figura 57: Periodos nivel alto, (elaboración propia).

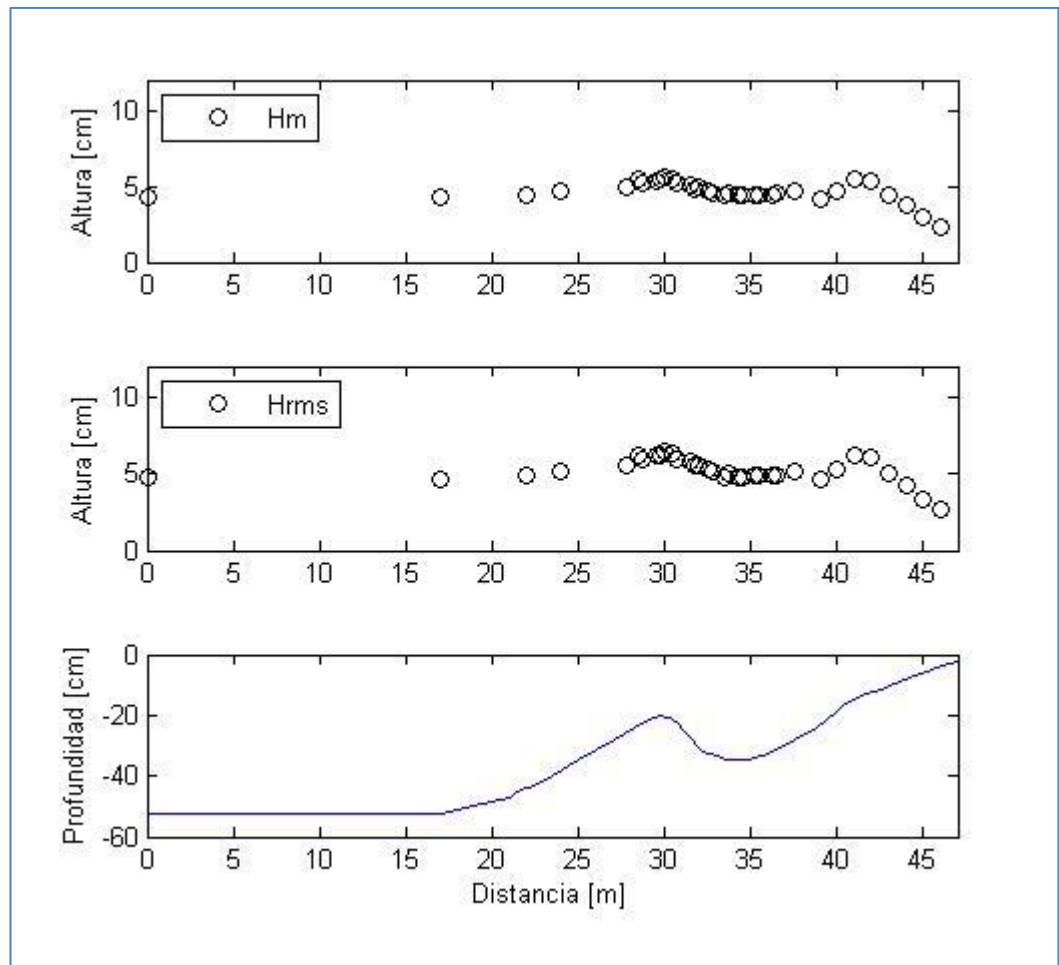


Figura 58: Alturas nivel alto, (elaboración propia).

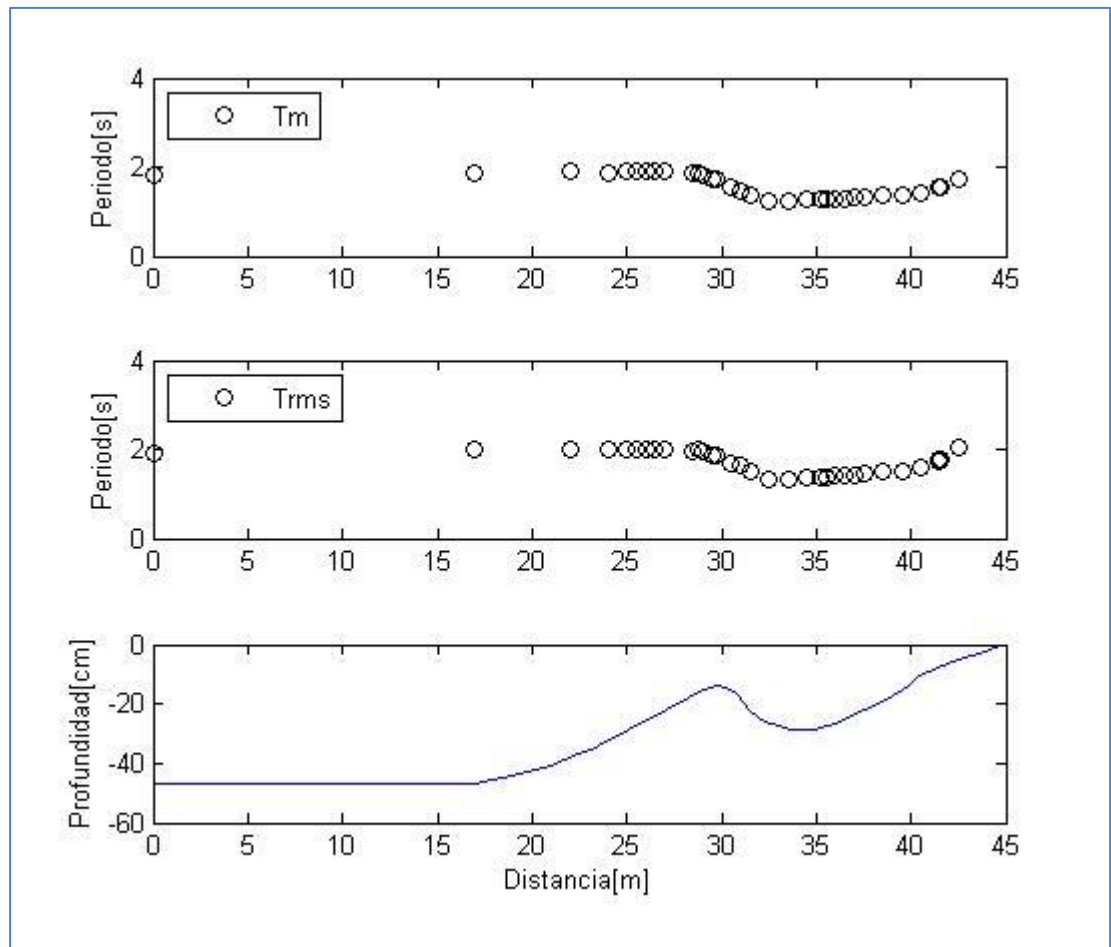


Figura 59: Periodos nivel bajo, (elaboración propia).

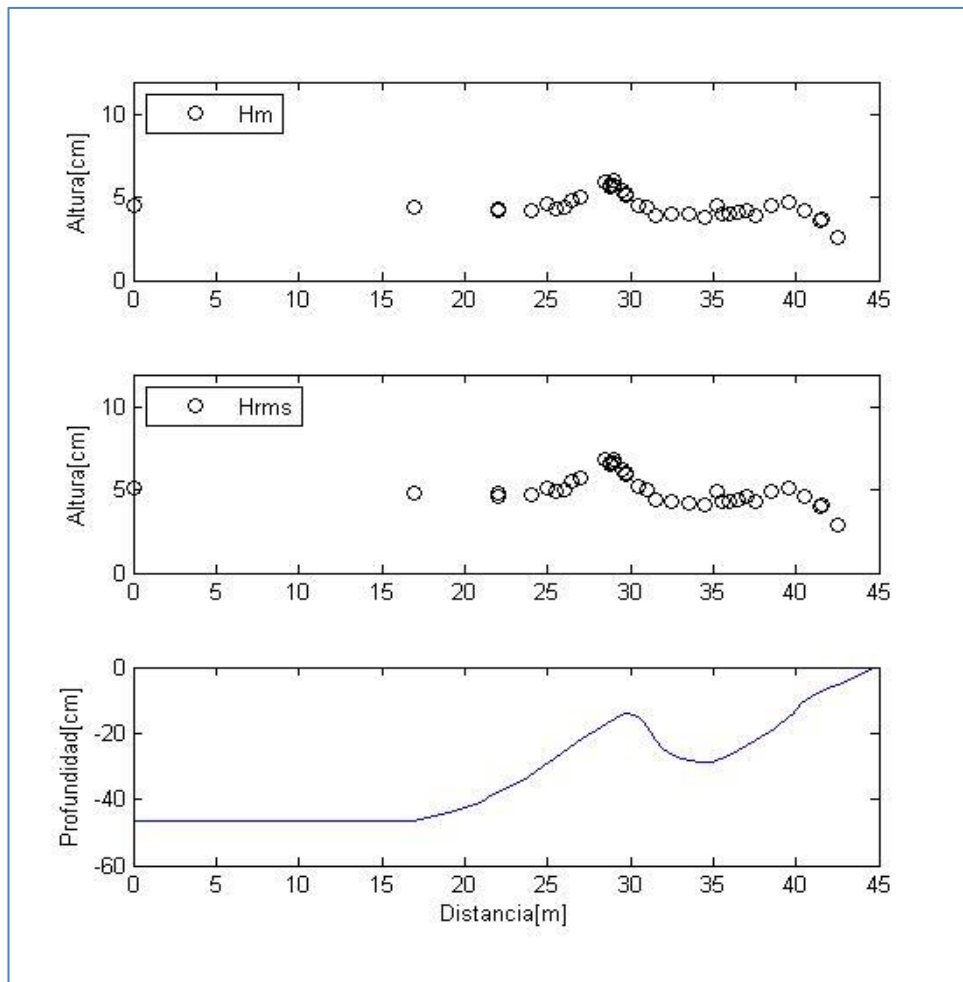


Figura 60: Alturas nivel bajo, (elaboración propia).

10.2 TABLAS

10.2.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL, NIVEL BAJO

Tabla 3: Repeticiones nivel bajo

Nº	Ubicación [x]	Repeticiones
1	0	7
2	17	2
3	22	3
4	28.5	2
5	29	2
6	29.75	2
7	30.75	3
8	31.75	3
9	36	5
10	41.5	4

Fuente: elaboración propia

Tabla 4: Repetividad nivel alto

Nº	Ubicación [x]	Repeticiones
1	0	7
2	17	3
3	22	2
4	30	2
5	35	2

Fuente: elaboración propia

Tabla 5: Correlaciones del repeticiones del punto de control para el nivel bajo

Correlaciones		Repeticiones						
		1	2	3	4	5	6	7
Repeticiones	1	--	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.8
	2	99.7	--	99.7	99.5	99.6	99.6	99.6
	3	99.7	99.7	--	99.5	99.6	99.5	99.6
	4	99.7	99.5	99.5	--	99.8	99.8	99.7
	5	99.7	99.6	99.6	99.8	--	99.8	99.8
	6	99.7	99.6	99.5	99.8	99.8	--	99.8
	7	99.8	99.6	99.6	99.7	99.8	99.8	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 6: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=22 [m]

Correlaciones		Repeticiones		
		1	2	3
Repeticiones	1	--	99.6	99.6
	2	99.6	--	99.7
	3	99.6	99.7	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 7: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=30.75 [m]

Correlaciones		Repeticiones		
		1	2	3
Repeticiones	1	--	98.0	95.6
	2	98.0	--	96.2
	3	95.6	96.2	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 8: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=31.75 [m]

Correlaciones		Repeticiones		
		1	2	3
Repeticiones	1	--	98.1	96.6
	2	98.1	--	97.6
	3	96.6	97.6	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 9: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=36 [m]

Correlaciones		Repeticiones				
		1	2	3	4	5
Repeticiones	1	--	83.8	85.8	83.6	84.4
	2	83.8	--	97.0	97.8	96.8
	3	85.8	97.0	--	96.7	95.5
	4	83.6	97.8	96.7	--	98.2
	5	84.4	96.8	95.5	98.2	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 10: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=41.5 [m]

Correlaciones		Repeticiones			
		1	2	3	4
Repeticiones	1	--	97.4	95.7	88.6
	2	97.4	--	95.7	86.3
	3	95.7	95.7	--	86.2
	4	88.6	86.3	86.2	--

Fuente: elaboración propia

10.2.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL, NIVEL ALTO

Tabla 11: Correlaciones de las repeticiones del punto de control para el nivel alto

Correlaciones		Repeticiones						
		1	2	3	4	5	6	7
Repeticiones	1	--	99.5	99.4	99.6	99.7	99.6	99.6
	2	99.5	--	99.0	99.5	99.5	99.6	99.5
	3	99.4	99.0	--	99.7	99.7	99.6	99.7
	4	99.6	99.5	99.7	--	99.9	99.9	99.8
	5	99.7	99.5	99.7	99.9	--	99.8	99.8
	6	99.6	99.6	99.6	99.9	99.8	--	99.9
	7	99.6	99.5	99.7	99.8	99.8	99.9	--

Fuente: elaboración propia

Tabla 12: Correlaciones para repeticiones en ubicación x=17 [m]

Correlaciones		Repeticiones		
		1	2	3
Repeticiones	1	--	99.0	99.8
	2	99.0	--	98.6
	3	99.8	98.6	--

Fuente: elaboración propia