

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



Modificación del transporte de sedimento y la formación de  
ondulitas debido a estructuras similares a un arte de cultivo.

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

PRESENTA

**ERICK SALOMÓN TRUJILLO CARRERA**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. OCTUBRE, 2011

MODIFICACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO Y LA FORMACIÓN  
DE ONDULITAS DEBIDO A ESTRUCTURAS SIMILARES A UN ARTE DE  
CULTIVO

TESIS

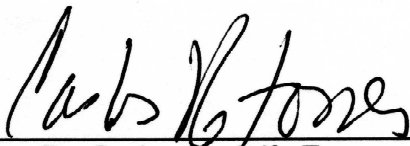
Que para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

Presenta  
**ERICK SALOMÓN TRUJILLO CARRERA**

Aprobada por:



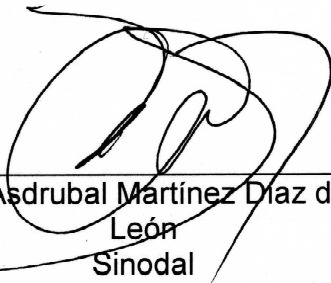
Dr. Rafael Hernández Walls  
Director de tesis



Dr. Carlos Rodolfo Torres  
Navarrete  
Sinodal



M.C. Luis Felipe Navarro  
Olache  
Sinodal

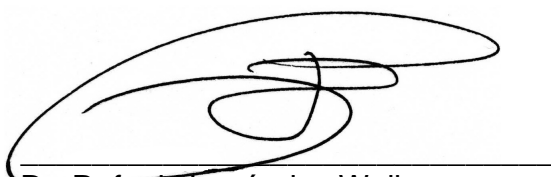


Dr. Asdrubal Martínez Díaz de  
León  
Sinodal

**RESUMEN** de la tesis de **Erick Salomón Trujillo Carrera**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA. Ensenada, Baja California, México. Octubre 2011.

**Modificación del transporte de sedimento y la formación de ondulitas debido a estructuras similares a un arte de cultivo.**

Resumen aprobado por:



Dr. Rafael Hernández Walls  
Director

La acuicultura se considera un medio de aprovisionamiento de diversos productos marinos, entre los que se encuentran los bivalvos. Estos organismos son filtradores, y una de las técnicas para su cultivo es la suspensión de los organismos, cuya unidad básica de producción consiste en una estructura denominada sarta. Dada la importancia de entender las características del sedimento situado bajo el arte de cultivo, se diseñaron una serie de experimentos con el fin de conocer la forma del transporte de sedimento, que involucra la formación de ondulitas, y el comportamiento del campo de velocidades alrededor de un arte de cultivo. Estos experimentos se llevaron a cabo en el canal de olas del laboratorio de Fluidos Geofísicos de la Facultad de Ciencias Marinas. En el canal de olas se pueden realizar experimentos bajo condiciones controladas de oleaje, en donde se conocen las principales características del tren de olas generado.

Se propuso una estructura que simulara un arte de cultivo y este arte de cultivo se colocó dentro del canal de olas y se midieron las velocidades del flujo oscilatorio producido por el generador de olas, para lo que se midió la separación entre las sartas (tres separaciones distintas). Los resultados obtenidos de la modificación en los perfiles de las velocidades de la ola, de la formación de las ondulitas y del tipo de transporte de sedimento como consecuencia de las velocidades de flujo oscilatorio presentes, indican que se deben a la presencia del arte de cultivo como causa principal. Ésto podría

servir para conseguir una alimentación más favorable para los bivalvos que forman parte de un cultivo. Por tanto, este trabajo, puede ser tomado con las consideraciones de una primera aproximación a este tipo de fenómenos, y debido a lo cual, una mayor realización de ejercicios de este tipo, no queda descartada para un futuro.

Palabras clave: transporte de sedimento, ondulitas (ripples), arte de cultivo, generador de olas, canal de olas, onda monocromática, perfil de velocidades de la ola.

**ABSTRACT** from the thesis presented by **Erick Salomón Trujillo Carrera** as a partial requirement to obtain the MASTERS degree on COASTAL OCEANOGRAPHY SCIENCE. Ensenada, Baja California, Mexico. October 2011.

Aquaculture is seen as a means of supply of various marine products, among which are bivalves. These organisms are filter feeders. One of the most common techniques for its culture is the bivalves' suspension. The main production unit of suspension is "the string". Due the importance of understanding the characteristics of sediment beneath the culture equipment, several experiments were designed to know the sediment transport path. This path is related with the ripples formation and the velocities field behavior which are also around the culture equipment. These experiments were performed in the Geophysical fluids laboratory wave flume of Ciencias Marinas Faculty. The wave flume allows running experiments under wave controlled conditions so the wave train main characteristics are well known. A structure to emulate culture equipment was proposed. This structure was place inside the wave flume and the velocity field generated for the wave train was measured. To accomplish these measures it was necessary to also measure the gap between strings (three different gaps). The results in modify profiles, ripples formation and sediment transport path as a result of oscillatory flow velocities point to strong relationship to the presence of the structure. This result could help in a better feeding of bivalves. The present work should be taken with considerations of a first approach to this phenomenon due to which, more exercises of this kind is not ruled out a future

**Keywords:** Sediment transport, ripples, culture equipment, wave generator, wave flume, monochromatic wave, wave velocities profile.

## **Dedicatoria**

A Tere, el conocimiento llega de diferentes formas.

“Y también a todos los que estudian, enseñan o admiran la prodigiosa ciencia de las medidas, de las funciones, de los movimientos y de las fuerzas.” Malba Tahan (1949).

## Agradecimientos

Quisiera agradecer a quienes de una u otra forma han hecho que el camino haya tomado esta dirección.

En primera instancia al Conacyt, por el apoyo económico recibido.

Casi como un ejercicio cronológico, a continuación mis agradecimientos.

En Ensenada

A las instituciones

Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California, por aceptarme como alumno.

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, por el uso de sus recursos académicos.

A los profesores:

Eduardo Santamaría del Ángel, Roberto Millán Núñez, Francisco Delgadillo Hinojosa, Martín Hernández Ayón, por la formación recibida, dentro y fuera de los salones de clases.

A los sinodales

Carlos Torres Navarrete, Luis Navarro Olache por el apoyo recibo en la parte experimental y económica, en el desarrollo de este trabajo.

Asdrúbal Martínez por su tiempo e ideas para este trabajo.

Al director de la tesis

Rafael Hernández Walls por su aceptación de la dirección de tesis.

A mis amigos y compañeros

Massyel Soledad Ramírez y Alexandro Orosco por su apoyo en los grupos de estudio.

Miryam Juárez por su apoyo moral.

Javier Sánchez por su ayuda en la adecuación a la ciudad.

Víctor Ruiz por su valiosa traducción de las matemáticas.

Karina Barba por el Apoyo técnico.

Vicente Ferreira también por apoyo técnico.

A los demás compañeros de la maestría, Anahí, Violeta, Martha, Carlos, Melody, etc.

Especialmente a Angélica Arce pues sin su valioso apoyo no sería posible la presentación de este trabajo.

En el DF

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por la formación recibida.

A Juan Francisco Nava Aguirre que se aprendió primero la ciudad de Ensenada para que no me perdiera.

A Rocío y Rubén por recordarme los fundamentos.

En Tabasco

A Hilda y Salomón mis padres, a mis sobrinos que me dieron nuevos bríos y a mis hermanos.

A los nombres que indudablemente hacen falta.

Quiero por último agradecer a Teresa Nuche por su apoyo y fe en este trabajo. Sin ti no se habría podido completar.

## Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.1.1 <i>Transporte de sedimento</i> .....	2
1.1.1.1 Caída de granos a través de flujos estacionarios.....	3
1.1.1.2 Inicio del movimiento del grano.....	5
1.1.1.3 Tipos de movimiento de grano.....	9
1.1.1.3.1 Rodante o de deslizamiento.....	9
1.1.1.3.2 Saltación.....	10
1.1.1.3.3 Suspensión.....	10
1.1.1.4 Categorías del sedimento transportado.....	11
1.1.1.4.1 Carga de fondo.....	11
1.1.1.4.2 Carga suspendida.....	13
1.1.1.4.3 Carga de lavado.....	14
1.1.2 <i>Cultivo de Bivalvos</i> .....	14
1.1.2.1 Métodos de cultivo.....	17
1.1.2.1.1 Tipo Balsa.....	18
1.1.2.1.2 Tipo columpio.....	19
1.1.2.1.3 Tipo Estante.....	20
1.1.3 <i>Canal de olas</i> .....	21
1.1.3.1 Tipos de generadores de olas.....	22
1.1.3.1.1 Placa con bisagra.....	22
1.1.3.1.2 Tipo pistón.....	23
1.2 HIPÓTESIS.....	26
1.3 OBJETIVOS.....	27
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	27
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	27
<b>2 MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
2.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS PREVIAS.....	28
2.2 METODOLOGÍA.....	34
2.2.1 <i>Estructura de simulación de un arte de cultivo</i> .....	35
2.2.2 <i>Lecho arenoso</i> .....	36
2.2.3 <i>Arreglo experimental</i> .....	37
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
3.1 RESULTADOS PARA LOS PERFILES DE VELOCIDADES.....	41
3.2 RESULTADOS A PARTIR DE LOS CÁLCULOS TEÓRICOS.....	47
3.2.1 <i>Separación 10 cm, Periodo de la ola 3.20 s.</i> .....	48
Experimento 3020E.....	48
Experimento sv3020 (Con el lecho arenoso presente).....	49
3.2.2 <i>Separación 10 cm, Periodo de la ola 1.89 s.</i> .....	50
Experimento 3030E.....	50

## Contenido

Experimento sv3030 (Con el lecho arenoso presente) .....	51
3.2.3 <i>Separación 10 cm, Periodo de la ola 1.38 s.</i> .....	53
Experimento 3040E .....	53
Experimento tv3040 (Con el lecho arenoso presente) .....	54
3.2.4 <i>Separación 2 esferas, Periodo de la ola 3.20 s.</i> .....	56
Experimento l3020 .....	56
Experimento r3020 (Con el lecho arenoso presente) .....	57
3.2.5 <i>Separación 2 esferas, Periodo de la ola 1.89 s.</i> .....	58
Experimento l3030 .....	58
Experimento r3030 (Con el lecho arenoso presente) .....	60
3.2.6 <i>Separación 2 esferas, Periodo de la ola 1.39 s.</i> .....	62
Experimento l3040 .....	62
Experimento r3040 (Con el lecho arenoso presente) .....	63
3.2.7 <i>Separación 20 cm, Periodo de la ola 3.20 s.</i> .....	65
Experimento O3020 .....	65
Experimento p3020 (Con el lecho arenoso presente) .....	66
3.2.8 <i>Separación 20 cm, Periodo de la ola 1.89 s.</i> .....	67
Experimento O3030 .....	67
Experimento p3030 (Con el lecho arenoso presente) .....	68
3.2.9 <i>Separación 20 cm, Periodo de la ola 1.38 s.</i> .....	70
Experimento O3040 .....	70
Experimento q3040 (Con el lecho arenoso presente) .....	72
3.3 MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDULITAS .....	74
3.4 PRUEBA T DE STUDENT .....	80
<b>4 DISCUSIÓN .....</b>	<b>82</b>
4.1 PERFILES DE LA OLA .....	82
Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 3.20 s. ....	82
Velocidad en la dirección de propagación de la ola. ....	82
Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje. ....	83
Velocidad en la dirección vertical. ....	83
Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 1.89 s. ....	84
Velocidad en la dirección de propagación de la ola. ....	84
Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje. ....	84
Velocidad en la dirección vertical. ....	84
Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 1.39 s. ....	85
Velocidad en la dirección de propagación de la ola. ....	85
Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje. ....	85
Velocidad en la dirección vertical. ....	85
4.2 FORMACIÓN DE ONDULITAS .....	86
4.2.1 <i>Experimentos en la posición de 20, Periodo de la ola 3.20 s.</i> .....	86
4.2.2 <i>Separación entre las esferas de 10 cm.</i> .....	86
4.2.2.1 Prueba t de Student .....	88
4.2.3 <i>Separación entre las esferas de 15 cm.</i> .....	89
4.2.3.1 Prueba t de Student .....	91
4.2.4 <i>Separación entre las esferas de 20 cm.</i> .....	92
4.2.4.1 Prueba t de Student .....	94
4.3 RUGOSIDAD .....	94
4.3.1 <i>Separación entre las esferas de 10 cm.</i> .....	95
4.3.2 <i>Separación entre las esferas de 15 cm.</i> .....	97
4.3.3 <i>Separación entre las esferas de 20 cm.</i> .....	99
4.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE EXPERIMENTACIÓN POR SECCIONES .....	100
4.4.1 <i>Primer fragmento entre columnas 0 y 1.</i> .....	101
Características de las ondulitas .....	101
Rugosidad .....	102

## Contenido

4.4.2 Segundo fragmento Columnas 1 a 2 .....	103
Características de las ondulitas .....	103
Rugosidad .....	105
4.4.3 Tercer fragmento Columnas 2 a 4.....	105
Características de las ondulitas .....	105
Rugosidad .....	107
4.5 DISCUSIÓN GENERAL .....	107
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>115</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>125</b>
ANEXO: INCERTIDUMBRES .....	126

## Lista de Tablas

Tabla I.- Relación entre el coeficiente de arrastre $C_D$ y la velocidad de caída $\omega_s$ con respecto al tipo de flujo.....	30
Tabla II Posiciones donde se colocó el sensor ADV, para la medición de las velocidades de la ola, en cada uno de los experimentos.....	39
Tabla III Relación de experimentos. ....	40
Tabla IV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. ....	48
Tabla V Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. ....	48
Tabla VI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	49
Tabla VII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	50
Tabla VIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. ....	50
Tabla IX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. ....	51
Tabla X Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	52
Tabla XI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	53
Tabla XII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. ....	53
Tabla XIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. ....	54
Tabla XIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	55
Tabla XV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	55
Tabla XVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. ....	56
Tabla XVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola.....	57

## Tablas

Tabla XVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	58
Tabla XIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	58
Tabla XX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. ....	59
Tabla XXI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. ....	59
Tabla XXII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	60
Tabla XXIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	61
Tabla XXIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. ....	62
Tabla XXV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. ....	63
Tabla XXVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	63
Tabla XXVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	64
Tabla XXVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. ....	65
Tabla XXIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. ....	65
Tabla XXX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	66
Tabla XXXI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	67
Tabla XXXII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. ....	68
Tabla XXXIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. ....	68
Tabla XXXIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos. ....	70
Tabla XXXV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20	

## Tablas

cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	70
Tabla XXXVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola.....	71
Tabla XXXVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola.....	71
Tabla XXXVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	72
Tabla XXXIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	73
Tabla XL Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 10 cm. ....	75
Tabla XLI Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 10 cm. ....	76
Tabla XLII Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	77
Tabla XLIII Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 20 cm. ....	77
Tabla XLIV Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	78
Tabla XLV Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 20 cm. ....	79
Tabla XLVI Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 10 cm. ....	80
Tabla XLVII Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 15 cm. ....	81
Tabla XLVIII Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 20 cm. ....	82
Tabla XLIX Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	88
Tabla L Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para $h=30$ cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....	88

## Tablas

<b>Tabla LI Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para <math>h=30</math> cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 15 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....</b>	<b>90</b>
<b>Tabla LII Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para <math>h=30</math> cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 15 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....</b>	<b>91</b>
<b>Tabla LIII Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para <math>h=30</math> cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....</b>	<b>93</b>
<b>Tabla LIV Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para <math>h=30</math> cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.....</b>	<b>93</b>
<b>Tabla LV Parámetros principales medidos en el desarrollo y/o en la elaboración de cada experimento. ....</b>	<b>126</b>
<b>Tabla LVI Errores en la frecuencia y periodo con respecto a la posición del selector de frecuencias .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabla LVII Parámetros derivados de cálculos realizados con los datos medidos en los experimentos.....</b>	<b>127</b>

## Lista de Figuras

- Figura 1** Relación esperada entre la velocidad de caída y el diámetro de granos de cuarzo en agua a 20 °C de acuerdo con a) la expresión  $U_g = (\rho_s - \rho) g d^2 / C_1 v + (0.75 C_2 (\rho_s - \rho) g d)^{0.5}$  y b) Autores previos (datos de Ferguson y Church, 2004). Las líneas rectas en ambas graficas muestran la tendencia asintótica de esferas suaves (Ley de Stokes con  $C_1 = 18$ , coeficiente de arrastre constante  $C_2 = 0.4$ ). Los puntos etiquetados como FIASC son los valores experimentales de la conferencia inter agencias federales de sedimentación de los Estados Unidos. Las curvas superiores, de en medio y las bajas son en a) para granos esféricos, naturales y granulados. Usando  $C_1$  y  $C_2$  mostrados en la leyenda. Las curvas superiores y de en medio en b) son la relación de Dietrich (1982) para esferas y granos naturales respectivamente, la curva de más abajo es la ecuación de Cheng (1997). (Tomado de Leeder 2011) ..... 4
- Figura 2** Diagrama del balance de momentos de fuerza para el arrastre de un grano pivoteando en un ángulo  $\phi$  sobre un grano adyacente de tamaño similar en una pendiente del lecho con un ángulo  $\beta$ .  $F_d$ ,  $F_1$  y  $F_g$  son las fuerzas de arrastre, suspensión y gravedad respectivamente. En el equilibrio  $F_g \sin \beta + F_d = (F_g \cos \beta - F_1) \tan \phi$ . Según Bridge y Bennett, 1992. (Tomado de Leeder 2011) ..... 6
- Figura 3** La variación del umbral de la velocidad de cizalla necesaria para que se inicie el movimiento de granos con densidad del cuarzo a 20 °C. (Tomado de Leeder 2011)..... 7
- Figura 4** Variación del umbral del esfuerzo de cizalla adimensional versus el número de Reynolds de grano para un flujo de agua a 20 °C sobre una gran variedad de tamaños de grano con densidad de cuarzo. (Modificado de Miller et al., 1977, mediante la sustitución de los puntos de datos por una envolvente de datos.), (Tomado de Leeder 2011)..... 8
- Figura 5** Diagrama para mostrar varios modos de transporte de sedimento. (Tomado de Leeder 2011)..... 9
- Figura 6** Diagrama para ilustrar la división del sedimento transportado en carga de fondo y carga en suspensión. a) y b) las aéreas punteadas representan estallidos dentro de la capa límite del fluido que se está moviendo hacia arriba en el flujo y lleva sedimento suspendido junto con él. c) ilustración del empuje aplicado por el fluido que se necesita para mantener la saltación. Simbología:  $m_w$  y  $m_s$ , las masas de agua y grano, respectivamente;  $v'$ , velocidad vertical turbulenta;  $u$ , velocidad de flujo;  $u_n$  velocidad efectiva al centro del empuje para la carga de fondo;  $y_n$ , altura de un sobre el lecho;  $U_1$  velocidad de los granos entrantes;  $V_0$ , velocidad de los granos salientes;  $U'$ , velocidad del grano perdida en el impacto, según Bagnold, 1973. (Tomado de Leeder 2011)..... 12
- Figura 7** Artes de cultivo a) Cría en varas; b) Siembra directa en el fondo; c) Columpio; d) Balsa; e) Estante. (Tomado de Ramos, 1987) ..... 16
- Figura 8** Artes de cultivo f) Canasta; g) Bolsa de malla; h) Marco de malla. (Tomado de Ramos, 1987) ..... 16
- Figura 9** Tipos de sarta a) Con espaciadores; b) Anudadas. (Tomado de Ramos, 1987) ..... 17
- Figura 10** Arte de cultivo tipo Balsa. (Tomado de Ramos, 1987) ..... 19
- Figura 11** Arte de cultivo tipo Columpio. (Tomado de Ramos, 1987) ..... 20
- Figura 12** Arte de cultivo tipo Estante. (Tomado de Ramos, 1987)..... 21
- Figura 13** Geometría de los generadores de olas. a) Generador de olas del tipo placa con bisagra, b) Generador de olas del tipo pistón. (Tomado de O'Dea et al., 2007) ..... 24
- Figura 14** Canal de olas en el laboratorio de Fluidos Geofísicos. .... 25
- Figura 15** Arreglo de esferas en el laboratorio para la simulación de condiciones en un arte de cultivo..... 36
- Figura 16** Arreglo experimental. Las esferas simulan la presencia de una estructura similar a un arte de cultivo. A la izquierda de las esferas se encuentra el sensor

## Figuras

ADV, el cual está conectado a la interface de lectura (bloque amarillo). La computadora registra los datos obtenidos por el ADV. ....	38
Figura 17 Esquema para los experimentos realizados en la sección 5 del canal de olas. Los asteriscos (*) con los números a los lados representan los lugares de medición de las velocidades de ola y los que no tienen números a los lados representan los centros de las esferas. ....	41
Figura 18 Sección del canal donde se muestra el sistema de referencia usado para la nomenclatura de las velocidades medidas por el ADV. La velocidad en la dirección "x" es la misma que la tomada por la ola incidente, la velocidad en la dirección "y" es transversal a las paredes del canal y la velocidad en la dirección "z" es a lo largo de la columna de agua. ....	42
Figura 19 Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección de propagación de la ola, del experimento con condiciones experimentales: 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo. ....	43
Figura 20 Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección "y", perpendicular a las paredes laterales del canal, del experimento con condiciones experimentales: 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo. ....	45
Figura 21 Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección "z", a lo largo de la columna de agua, del experimento con condiciones experimentales 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo. ....	46
Figura 22 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento sv3020. ....	49
Figura 23 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento sv3030. ....	51
Figura 24 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento tv3040. ....	54
Figura 25 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3020. ....	57
Figura 26 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3030. ....	60
Figura 27 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3040. ....	64
Figura 28 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento p3020. ....	66
Figura 29 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento p3030. Vista superior. ....	69
Figura 30 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento q3040. ....	74
Figura 31 Ondulitas formadas en el experimento r3040. Las condiciones experimentales fueron, periodo de la ola 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	74
Figura 32 Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 10 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos	

## Figuras

experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. .... 95

**Figura 33** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 10 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. .... 96

**Figura 34** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 15 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. .... 97

**Figura 35** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 15 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. .... 98

**Figura 36** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 20 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. .... 99

**Figura 37** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 20 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos

## Figuras

representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos. ....	100
<b>Figura 38</b> Arreglo de esferas con el esquema de los puntos de medición superpuesto en la imagen. También se muestra en la parte inferior de la superposición los fragmentos considerados para la descripción del área de experimentación.....	101
<b>Figura 39</b> Primer fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	102
<b>Figura 40</b> Segundo fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	104
<b>Figura 41</b> Tercer fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm. ....	106
<b>Figura 42</b> Comparación de los diferentes perfiles de las velocidades en la dirección de propagación de la ola. Estas velocidades corresponden al punto de medición 33 y a periodo de la ola de 1.89 s. a) Separación entre las esferas de 10 cm, b) Separación entre las esferas de 15 cm, c) Separación entre las esferas de 20 cm, d) Separación entre las esferas de 10 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal, e) Separación entre las esferas de 15 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal, f) Separación entre las esferas de 20 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal. ....	109
<b>Figura 43</b> Atributos morfológicos de las formaciones en el lecho arenoso a escala pequeña para flujo oscilatorio. Las tres clasificaciones propuestas son (SSR) Ondulitas simétricas pequeñas, (ASR) Ondulitas asimétricas pequeñas y (ALR) Ondulitas asimétricas grandes. (Tomado de Dumas et al., 2005).....	113
<b>Figura 44</b> Esquema de formación de las Ondulitas para un periodo de 1.39 s, y separación entre las esferas de 20 cm. ....	114
<b>Figura 45</b> Imagen que muestra los resultados de formación de las ondulitas para un periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 20 cm. ....	114

## 1 Introducción

Con el desarrollo de la tecnología y las condiciones de vida en general, ocurridas mayormente a finales del siglo pasado y principios del presente, se ha modificado la manera en el que las poblaciones humanas crecen y se desarrollan, resultando en un aumento en la tasa de crecimiento de las poblaciones humanas. Esto se ha reflejado en un aumento en la demanda de recursos (alimentación, vivienda, energía, etc.). Uno de estos recursos, está relacionado con la demanda de los productos marinos para la alimentación. La provisión natural de estos productos se da mediante la captura, por lo que surgió la necesidad de poder proveer de estos productos de otras formas. La acuicultura es una alternativa para la provisión de productos marinos. Ésta se remonta a culturas tan antiguas como la china. En la cultura griega y romana se mencionan actividades relacionadas con la acuicultura (Wheaton, 1982). Un ejemplo de la aplicación de la acuicultura es el cultivo de Bivalvos.

El presente trabajo está conformado por tres elementos distintos sin relación aparente: Las artes de cultivo de bivalvos, la descripción del fenómeno del transporte de sedimento, y un canal de olas como instrumento mecánico para la simulación de éstas. Estos tres elementos se conjugan en la realización y análisis de los experimentos que sirven de base a este trabajo.

## **1.1 Antecedentes**

### **1.1.1 Transporte de sedimento**

El estudio del transporte de sedimentos entendido como la interacción entre el líquido y el sedimento es muy antiguo, desde los griegos ya se hace referencia a este tipo de estudios. Los ingenieros romanos utilizaban los principios de Bernouilli. En 1830 el geólogo escocés Charles Lyell notó la importancia de investigar la formación de Ondulitas. Posteriormente, la explotación del conocimiento de la dinámica de fluidos se reflejó en el desarrollo de áreas más técnicas. Este conocimiento de la dinámica de fluidos es necesario para poder explicar los procesos físicos involucrados en el transporte de sedimento en agua y aire (Leeder, 2011).

Se reconocen dos tipos de lechos de sedimento, los granulados sin cohesión presente y los cohesivos. El primer tipo incluye todos los sistemas de transporte compuestos por granos sólidos que se mantienen en contacto con los granos adyacentes en las fronteras del fluido debidos solo a efectos gravitacionales. Este campo del transporte de sedimentos es conocido como “loose boundary hydraulics”, lo cual los distingue del movimiento del fluido por sí mismo. El segundo tipo se aplica comúnmente a lechos de barro cohesivo donde placas pequeñas de arcilla son atraídas por fuerzas electrostáticas que son más grandes comparadas con las fuerzas gravitacionales (McLean, 1992).

El transporte de sedimento es un aspecto crítico de los procesos de la superficie de la tierra y tiene una miríada de aplicaciones ambientales e

### Modificación...

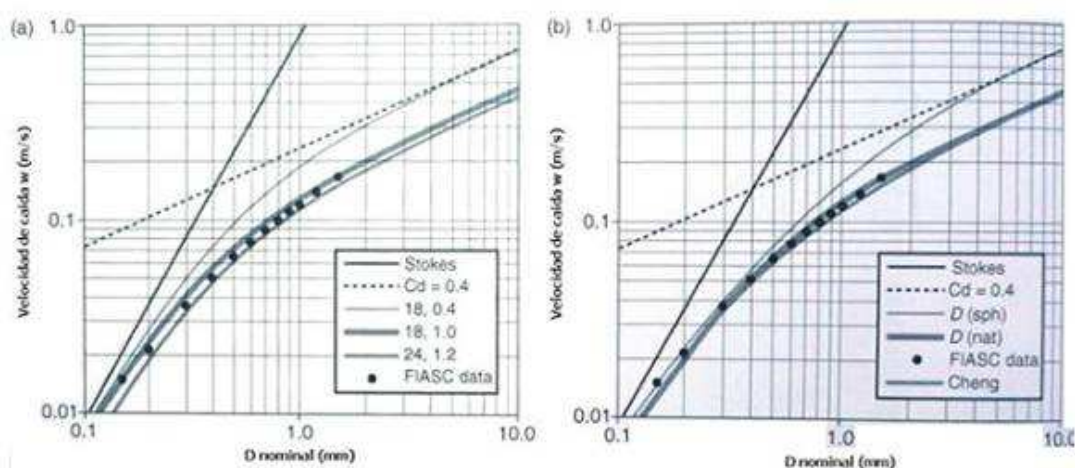
ingenieriles. Ya que el sedimento tiene una amplia gama de tamaño, el transporte de determinadas clases de sedimentos a nivel local debe ser referido tanto al suministro de diferentes fracciones de tamaño de grano desde distintos puntos del flujo ascendente o de otro tipo y la energía disponible para el transporte. No será posible, por lo tanto, llegar a priori a una teoría general de transporte de sedimento debido a que tanto la fuente, el suministro y el fenómeno de transporte deben ser determinados de manera independiente. Como se puede ver, es una cuestión diferente cuando el transporte másico de sedimento es considerado independientemente del tamaño de grano. Por lo que todos los sistemas experimentales deben ser clasificados como limitados por suministro o limitados por transporte (Leeder, 2011).

#### **1.1.1.1 Caída de granos a través de flujos estacionarios**

La caída de granos a través de agua estática o de muy poco movimiento, es muy común en la naturaleza. Por ejemplo, las conchas de organismos pelágicos que se hunden en el océano. Generalmente si introducimos granos de cierta densidad  $\sigma$  dentro de un líquido estático de densidad  $\rho$ , si además  $\sigma > \rho$ , entonces los granos se empezarán a acelerar hasta alcanzar una velocidad conocida como la velocidad de caída terminal. En general se cumple, que la velocidad de caída se incrementa con el tamaño del grano, pero este incremento decae conforme el coeficiente de arrastre  $C_D$ , toma un valor constante de 0.4, para pequeño y grandes tamaños de grano (Figura 1). Esta disminución en la tasa de caída y la constancia del coeficiente de arrastre es

Modificación...

debido al inicio y pleno desarrollo de la separación del flujo turbulento alrededor de los granos a un número de Reynolds crítico de grano apropiado de granos de ~ 5 mm en agua a 20 °C. Una predicción muy acertada de la velocidad de caída fue realizada por G. G. Stokes, su expresión física a menudo conocida como la ley de Stokes. Aunque las restricciones de la ecuación de Stokes la hacen prácticamente inútil, se utiliza la ley de Stokes como una buena aproximación para algunas situaciones. Los resultados para una expresión más general derivada del análisis dimensional (Leeder, 2011).



**Figura 1** Relación esperada entre la velocidad de caída y el diámetro de granos de cuarzo en agua a 20 °C de acuerdo con a) la expresión  $U_g = (\rho_s - \rho) g d^2 / C_1 v + (0.75 C_2 (\rho_s - \rho) g d)^{0.5}$  y b) Autores previos (datos de Ferguson y Church, 2004) . Las líneas rectas en ambas graficas muestran la tendencia asintótica de esferas suaves (Ley de Stokes con  $C_1 = 18$ , coeficiente de arrastre constante  $C_2 = 0.4$ ). Los puntos etiquetados como FIASC son los valores experimentales de la conferencia inter agencias federales de sedimentación de los Estados Unidos. Las curvas superiores, de en medio y las bajas son en a) para granos esféricos, naturales y granulados. Usando  $C_1$  y  $C_2$  mostrados en la leyenda. Las curvas superiores y de en medio en b) son la relación de Dietrich (1982) para esferas y granos naturales respectivamente, la curva de más abajo es la ecuación de Cheng (1997). (Tomado de Leeder 2011)

En muchos sistemas naturales, los problemas surgen debidos a la presencia de arreglos de granos de múltiples tamaños, rugosos y no esféricos. El problema

### Modificación...

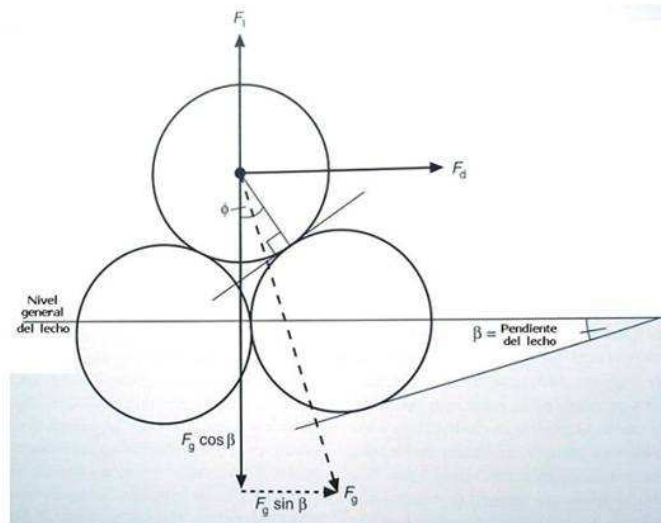
de esfericidad puede ser resuelto mediante el recurso de experimentos muy específicos, particularmente cuando están presentes fragmentos de granos biológicos irregulares a números de Reynolds de grano grandes (Leeder, 2011).

En cuanto a la dinámica del transporte de sedimentos por el fluido en movimiento, esto se debe al cambio de cantidad de movimiento entre el grano y el líquido, por lo que las fuerzas son creadas en el proceso de transporte. Están involucradas tres componentes de esfuerzo de la fuerza del fluido aplicada: un esfuerzo de cizalla lleva a un transporte de granos por rodamiento, cercano al lecho; una fuerza de suspensión del fluido hace que los granos se levanten del lecho y la gravedad los hace regresar; un impulso hacia arriba por aceleración turbulenta favorece la suspensión en el cuerpo del fluido (Leeder, 2011).

#### **1.1.1.2 Inicio del movimiento del grano.**

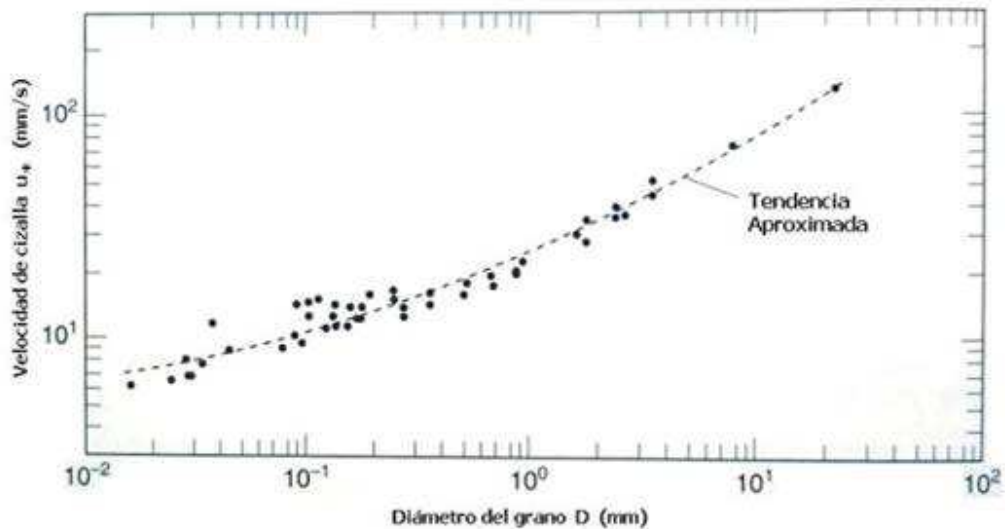
El transporte de sedimento se inicia cuando la velocidad de cizalla sobre el lecho, sobrepasa un punto crítico, conocido como umbral de movimiento. El umbral crítico de velocidad de cizalla de los granos bajo análisis se usa para definir la etapa del transporte, esta etapa se expresa como la tasa en el umbral crítico de velocidad de cizalla dividido por la velocidad de cizalla. Mucha atención se ha tenido en encontrar el umbral crítico del movimiento del grano, ya que es un parámetro muy práctico para aplicaciones ingenieriles (Bridge y Bennett, 1992, 1995).

Modificación...



**Figura 2 Diagrama del balance de momentos de fuerza para el arrastre de un grano pivoteando en un ángulo  $\varphi$  sobre un grano adyacente de tamaño similar en una pendiente del lecho con un ángulo  $\beta$ .  $F_d$ ,  $F_1$  y  $F_g$  son las fuerzas de arrastre, suspensión y gravedad respectivamente. En el equilibrio  $F_g \sin \beta + F_d = (F_g \cos \beta - F_1) \tan \varphi$ . Según Bridge y Bennett, 1992. (Tomado de Leeder 2011)**

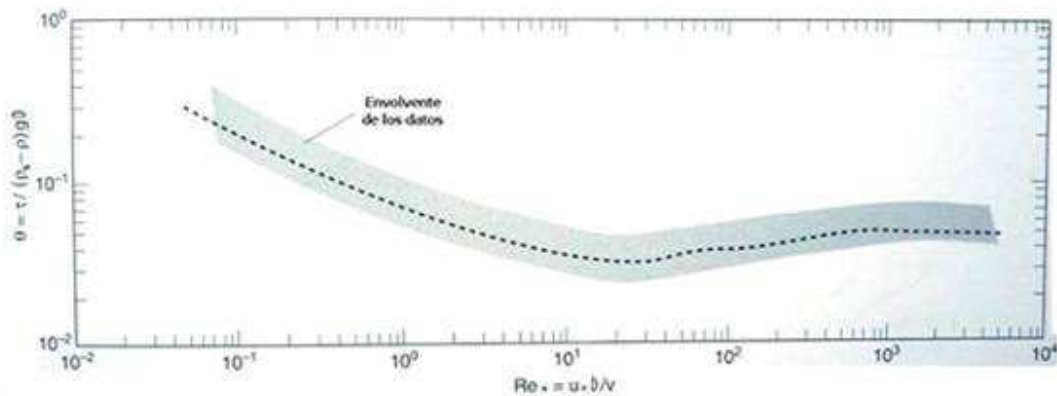
En el umbral la fuerza de sustentación es comparable con la fuerza de arrastre cuando el grano se encuentra en el lecho (Figura 2). Sin embargo, es muy complicado determinar teóricamente el esfuerzo de cizalla crítico para el movimiento del grano, a pesar de los atractivos iniciales de utilizar el enfoque de los "momentos de fuerza". Esto se debe a la gran cantidad de variables involucradas, uno de los más impredecibles que el grado de exposición de los granos individuales, no importando cuan cuidadosa sea la preparación de aplanado del lecho para los experimentos. Por lo que las condiciones críticas para el inicio del movimiento de las partículas deben ser determinadas experimentalmente. El enfoque más sencillo involucra la medición de la velocidad de cizalla del flujo contra el diámetro del grano (Figura 3).



**Figura 3** La variación del umbral de la velocidad de cizalla necesaria para que se inicie el movimiento de granos con densidad del cuarzo a 20 °C. (Tomado de Leeder 2011)

Con el fin de tener la mayor generalidad, los resultados experimentales deben ser aplicables a un amplio intervalo de fluidos y partículas. A partir de los primeros principios las condiciones críticas de esfuerzo de cizalla para el movimiento,  $\tau_c$ , debe depender de la gravedad,  $g$ , del diámetro de grano,  $D$ , o de su radio,  $r$ , la masa inmersa del grano,  $(\rho_s - \rho)$ , viscosidad cinemática del fluido,  $\nu$ , y el esfuerzo de cizalla aplicado en el lecho,  $\tau$ , o la velocidad de cizalla,  $u_*$ . Entonces  $\tau_c = f(g, D, (\rho_s - \rho), \nu, \tau)$ . Estas cantidades se encuentran dentro de dos grupos adimensionales con el propósito de mostrar resultados experimentales: el esfuerzo crítico de cizalla adimensional  $\theta_c = \tau / g D (\rho_s - \rho)$  también conocido como parámetro de Shields y El numero de Reynolds para granos  $Re_g = u_* D / \nu$  (Figura 4).

Modificación...



**Figura 4** Variación del umbral del esfuerzo de cizalla adimensional versus el número de Reynolds de grano para un flujo de agua a 20 °C sobre una gran variedad de tamaños de grano con densidad de cuarzo. (Modificado de Miller et al., 1977, mediante la sustitución de los puntos de datos por una envolvente de datos.), (Tomado de Leeder 2011)

En una visión más general, el umbral en el flujo turbulento es mejor considerado en su conjunto como la interacción entre dos variables. La primera comprende la característica de movimiento inicial de un determinado material en el lecho en un fluido de viscosidad y la densidad dados. Cada grano es susceptible a un esfuerzo instantáneo característico, el peso y disposición de los granos tienen una distribución probabilística, debido a la aleatoriedad en la forma del lecho. La segunda variable es la aplicación local del esfuerzo instantáneo de cizalla sobre el lecho causados por eventos de explosión y barrido. Esto también tiene una distribución probabilística (Grass, 1970).

El umbral de movimiento de sedimento en olas y flujos combinados tiene sus propios problemas relacionados con las peculiaridades de los flujos oscilatorios de la capa límite y con las interacciones entre estos y cualquier flujo inducido por las mareas. Estos problemas solo pueden ser resueltos mediante experimentos detallados y específicos, al igual que los problemas debido a las

Modificación...

formas irregulares y de baja densidad de granos de carbonato biogénico (Dietrich, 1982).

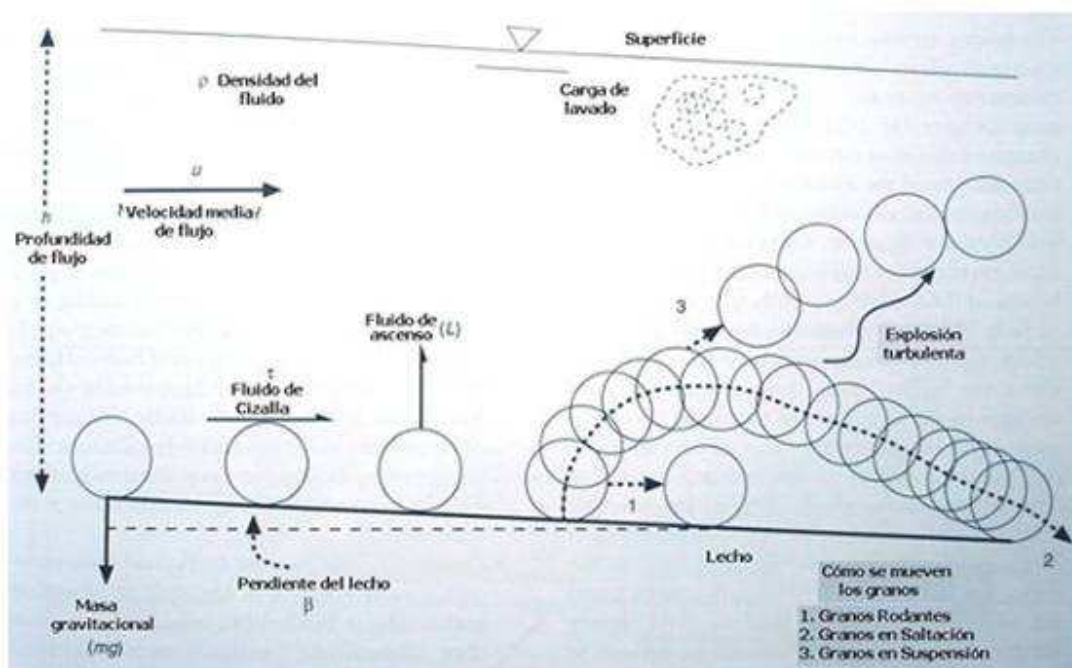


Figura 5 Diagrama para mostrar varios modos de transporte de sedimento. (Tomado de Leeder 2011)

### 1.1.1.3 Tipos de movimiento de grano

Cuando el umbral de movimiento es excedido es imposible seguir individualmente el camino de cada grano, en particular cuando se encuentran dentro de una muchedumbre de otros granos. Solo mediante la aplicación de habilidosas técnicas fotográficas es que se tiene una idea completa de los tipos de trayectorias que siguen los granos, (Figura 5). (Leeder, 2011)

#### 1.1.1.3.1 Rodante o de deslizamiento

Los granos tienen contacto continuo con el lecho. En el aire, los granos rodantes se mantienen en movimiento en un efecto como de arrastre o

Modificación...

reptación debido a los impactos con los granos en saltación (Ledeeer, 2011; Reeve, 2004).

#### **1.1.1.3.2 Saltación**

Los granos se elevan abruptamente del lecho ( $45^\circ$ ), ascendiendo a una altura de algunos diámetros de grano, después descienden al lecho en una trayectoria de un ángulo más pequeño ( $10^\circ$ ). La saltación puede ocurrir en flujos laminares o turbulentos. El giro del grano causa un efecto de suspensión extra, conocido como efecto Magno, que probablemente ayuda al ascenso y descenso más abrupto de las partículas. Un grano en saltación puede experimentar un empuje hacia arriba debido a la ruptura turbulenta del fluido en la parte descendente de una trayectoria, un estado de incipiente suspensión (Ledeeer, 2011; Reeve, 2004).

#### **1.1.1.3.3 Suspensión**

Los granos se mueven dentro de las explosiones de advección dentro de la capa interna de líquido, moviéndose hacia arriba con las explosiones y hacia abajo con el barrido. Por lo que, las trayectorias que sigue el grano son mucho más largas, altas e irregulares que en la saltación (Ledeeer, 2011).

Las proporciones variantes de tiempo que toman estos tres tipos de trayectoria, el alto y largo de la trayectoria y la velocidad media del grano, están en función directa de la etapa del transporte. Trayectorias características del grano solamente ocurren cuando no tienen interacciones; conforme la etapa del

Modificación...

transporte se incrementa, más granos son arrastrados y ocurren interacciones y colisiones grano a grano. El inicio de la completa suspensión ocurre cuando el intercambio de momento de impulso turbulento excede la fuerza debida al peso del grano que se encuentra en saltación. Sin embargo para sedimentos finos menores a 1 mm están protegidos de la suspensión debido a que primero se mueven dentro de la subcapa viscosa (Ledeeer, 2011).

#### **1.1.1.4 Categorías del sedimento transportado.**

Cuando el sedimento ya ha sido transportado puede ser clasificado, según Ledeeer (2011) de la siguiente forma:

##### **1.1.1.4.1 Carga de fondo**

También es conocido como de carga de tracción, incluye granos rodantes, granos en saltación y granos en saltación por colisión interrumpida. Los granos reciben un empuje de fluido aplicado que mantiene la saltación y éstos transfieren momento a la superficie del lecho estacionario mediante el contacto sólido-sólido (Figura 6).

Modificación...

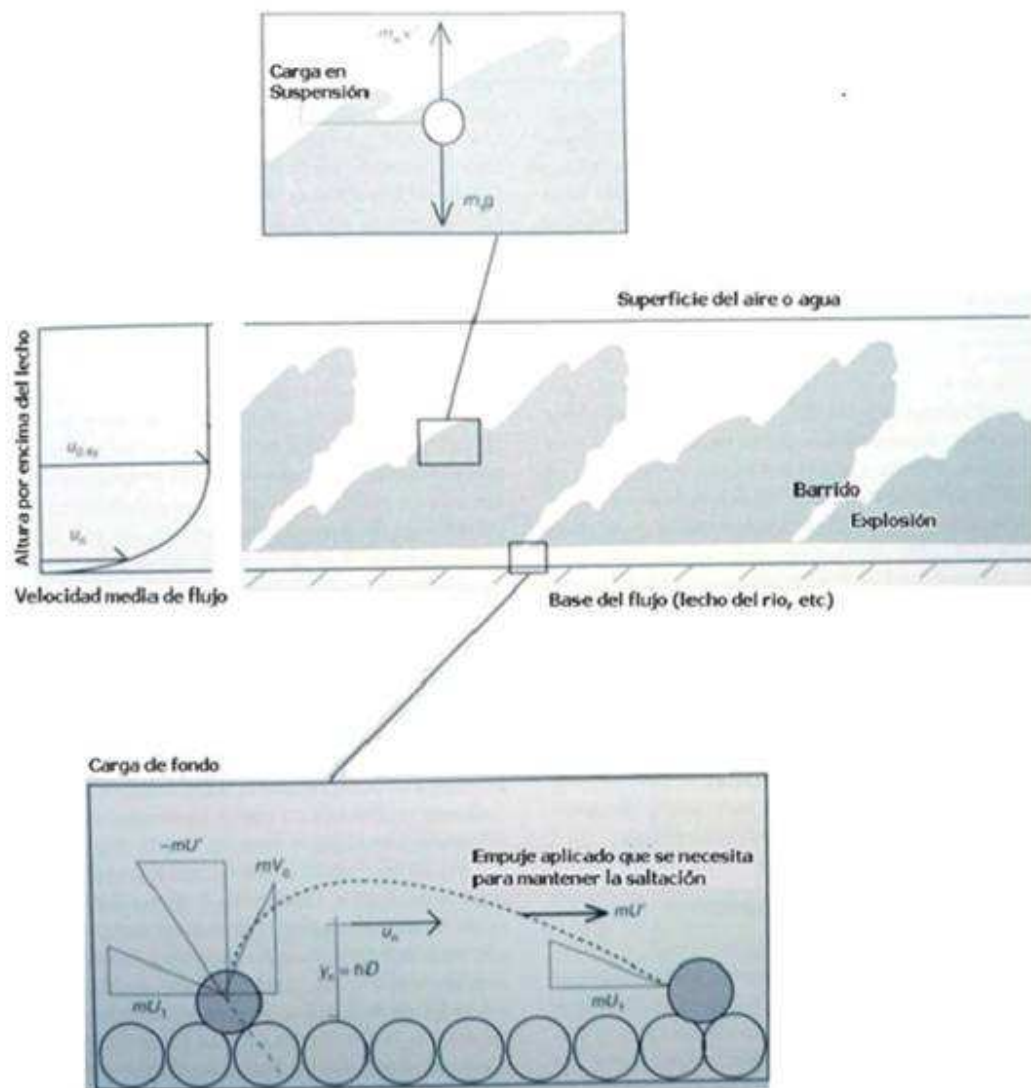


Figura 6 Diagrama para ilustrar la división del sedimento transportado en carga de fondo y carga en suspensión. a) y b) las aéreas punteadas representan estallidos dentro de la capa límite del fluido que se está moviendo hacia arriba en el flujo y lleva sedimento suspendido junto con él. c) ilustración del empuje aplicado por el fluido que se necesita para mantener la saltación. Simbología:  $m_w$  y  $m_s$ , las masas de agua y grano, respectivamente;  $v'$ , velocidad vertical turbulenta;  $u$ , velocidad de flujo;  $u_n$  velocidad efectiva al centro del empuje para la carga de fondo;  $y_n$ , altura de un sobre el lecho;  $U_1$  velocidad de los granos entrantes;  $V_0$ , velocidad de los granos salientes;  $U'$ , velocidad del grano perdida en el impacto, según Bagnold, 1973. (Tomado de Leeder 2011)

La tasa de cambio de este momento sobre unidad de área por unidad de tiempo debe ser igual al peso sumergido de los granos de la carga de fondo (o del

Modificación...

lecho del fondo). Por lo tanto, la definición de carga de fondo (“bedload”) es tanto posicional (o estática) como dinámica. El transporte del sedimento del lecho de carga puede tener efectos marcados sobre la distribución de la velocidad de un fluido con una altura desde la superficie del lecho. Esto se muestra claramente mediante el transporte del viento, donde las medidas de velocidad dentro y justo encima de la zona del lecho de carga muestran que según incrementa la fuerza del viento por encima del umbral de movimiento, claramente hay un retardo en la velocidad del aire en el centro de gravedad de la zona del lecho de carga. El retardo se enriquece un 20% aproximadamente de la velocidad de flujo del aire puro esperada por la ecuación de Karman-Prandtl para flujo turbulento en ausencia de traslado de sólidos: esto es explicable por la transferencia de momento del fluido al sólido durante la saltación. Un efecto similar podría ser presentado en flujos de agua, sin embargo, aunque ha sido computarizada teóricamente, el efecto es difícil de medir por la delgadez de la zona del lecho de carga bajo el agua (Bagnold, 1973).

#### **1.1.1.4.2 Carga suspendida**

Incluye todos los granos que se mantienen en alto (no depositados) por la turbulencia del fluido (Figura 6) de manera que la fuerza del peso de los granos suspendidos está en equilibrio por una transferencia de momento hacia arriba desde remolinos del fluido. El proceso es más eficiente en agua que en aire

Modificación...

debido a (i) el contraste de densidad entre el flujo de grano y el agua, y (ii) la alta viscosidad molecular del agua (Bagnold, 1973).

#### **1.1.1.4.3 Carga de lavado**

Carga de lavado es un término amplio empleado para describir a largo plazo los gradientes de arcillas finas suspendidas presentes en flujos de agua. El polvo de carga es un término equivalente para flujos atmosféricos que pueden transportar sedimento durante miles de kilómetros en la capa límite planetaria (Ledeeer, 2011).

#### **1.1.2 Cultivo de Bivalvos**

En el siglo pasado la tendencia por el cultivo de bivalvos se ha incrementado notablemente, en parte debido a la sobreexplotación de sus bancos naturales, a la contaminación de estos y a la demanda creciente de este tipo de productos. (Bardach, et al. 1974). Esto ha conducido al desarrollo de técnicas de cultivo tanto de fondo como de suspensión, esto se ha visto reflejado en un incremento en la producción muy por arriba de los niveles naturales.

Los métodos más primitivos de este tipo de cultivos, consiste en esparcir conchas limpias en un fondo, en aéreas que son susceptibles de fijación antes de que esta ocurra, obteniendo cosechas 2 o 3 años después. Los métodos utilizados actualmente, con mejores rendimientos se distinguen del anterior, que es conocido como de "cama", por usar artes de cultivo tridimensionales. Como por ejemplo, las larvas de ostión fijadas en estacas de bambú rectas clavadas

### Modificación...

en el fondo marino, la cual era más adecuada ya que protegía a los ostiones de depredadores bentónicos y ofrecía una mayor área de fijación.

Japón es uno de los países con mayores rendimientos en el ostricultivo, en donde los métodos más utilizados son cría en varas, siembra directa sobre el fondo, balsas, bastidores o estantes y palangres o columpios (Figura 7). Los dos primeros son los métodos más primitivos. Las demás, han evolucionado a partir de estos y se conocen como métodos de cultivo de suspensión (Koganezawa, 1979). Aunque existen en el mundo muchas variaciones sobre estos tipos de arte de cultivo, podemos referirnos a ellos como artes de cultivo básicos. Además, en particular estas artes de cultivo se han diseñado para ser alimentadas con semillas sueltas de estos organismos, de tal forma que se pueden manejar individualmente (Figura 8).

Modificación...

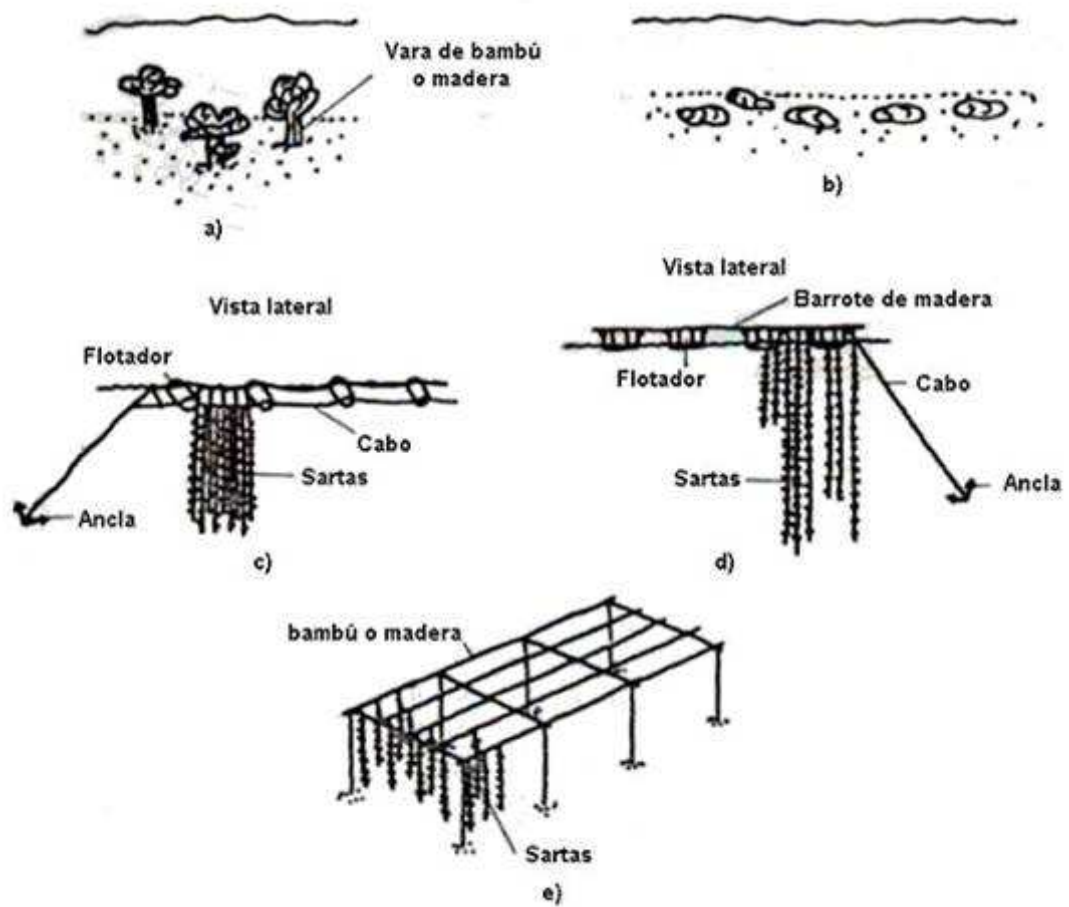


Figura 7 Artes de cultivo a) Cría en varas; b) Siembra directa en el fondo; c) Columpio; d) Balsa; e) Estante. (Tomado de Ramos, 1987)

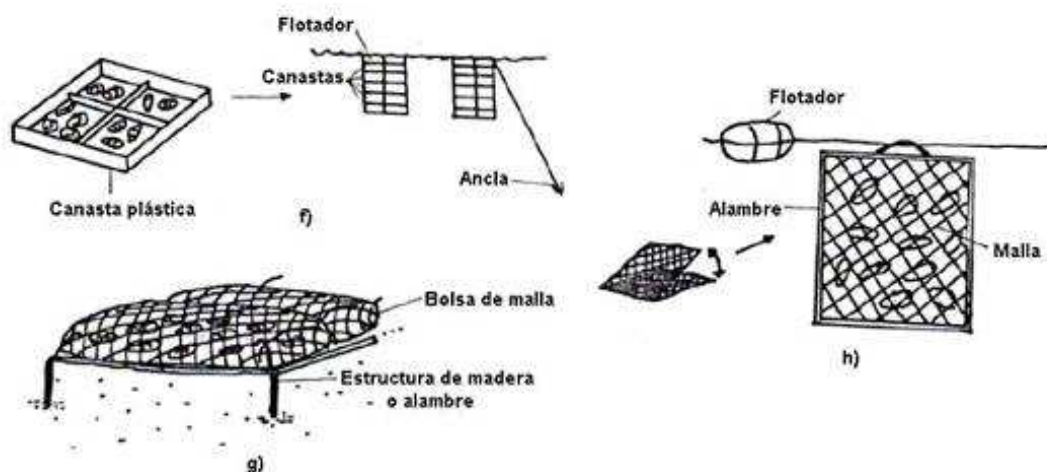


Figura 8 Artes de cultivo f) Canasta; g) Bolsa de malla; h) Marco de malla. (Tomado de Ramos, 1987)

### 1.1.2.1 Métodos de cultivo

En México, y en particular en la península de Baja California, se utilizan todas estas artes, con excepción del cultivo en varas y siembra directa sobre el fondo.

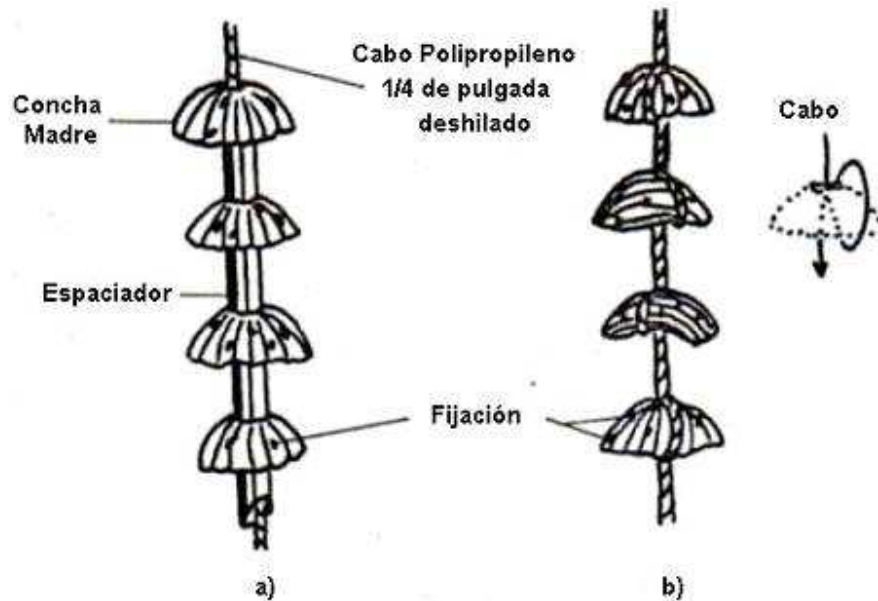


Figura 9 Tipos de sarta a) Con espaciadores; b) Anudadas. (Tomado de Ramos, 1987)

Los artes de cultivo tipo balsa, columpio y estante, utilizan la misma unidad básica de producción. Las larvas de estos bivalvos, en particular la del ostión, se fijan en una concha que es comúnmente conocida como la “concha madre”. Estas conchas a su vez se atan a una cuerda de polipropileno que pasa por un agujero realizado previamente al centro de la concha y se mantienen separadas por un espacio de unos 15 cm. La separación se hace mediante un tubo de plástico o anudando las conchas a la cuerda (Figura 9). Esta estructura es conocida con el nombre de sarta, sus características generales de estructura varían de acuerdo a las condiciones donde están localizadas y a las

Modificación...

necesidades de cada cultivo. En el cultivo de la Bahía de San Quintín, se utilizan sartas de aproximadamente 1.5 metros (Ramos, 1987). Las artes de cultivo constituidas por sartas pueden ser descritas de la siguiente forma según Ramos (1987).

#### **1.1.2.1.1 Tipo Balsa**

Consiste básicamente en una estructura flotante compuesta por dos vigas de madera, soportadas sobre flotadores alargados, y una serie de barrotos de madera transversales de los que cuelgan sartas con ostiones (Figura 10). Este tipo de artes de cultivo es propicio para zonas donde no se presenta un fuerte oleaje, como por ejemplo zonas bien protegidas como la Bahía de San Quintín, hasta zonas semiprotegidas como la Bahía de Todos Santos. La longitud de las sartas dependerá de la profundidad que se encuentre en la zona donde se realiza el cultivo. El sistema de anclaje, debe ser bastante eficiente y orientado en dirección de la corriente, ya que debido a la forma misma de la balsa, esta puede presentar gran resistencia al oleaje y al viento. En general la configuración de amarre de las balsas se realiza en serie y su anclaje es de proa a popa (Koganezawa, 1979). El sistema de anclaje es lo suficientemente eficiente para evitar la deriva de las mismas.

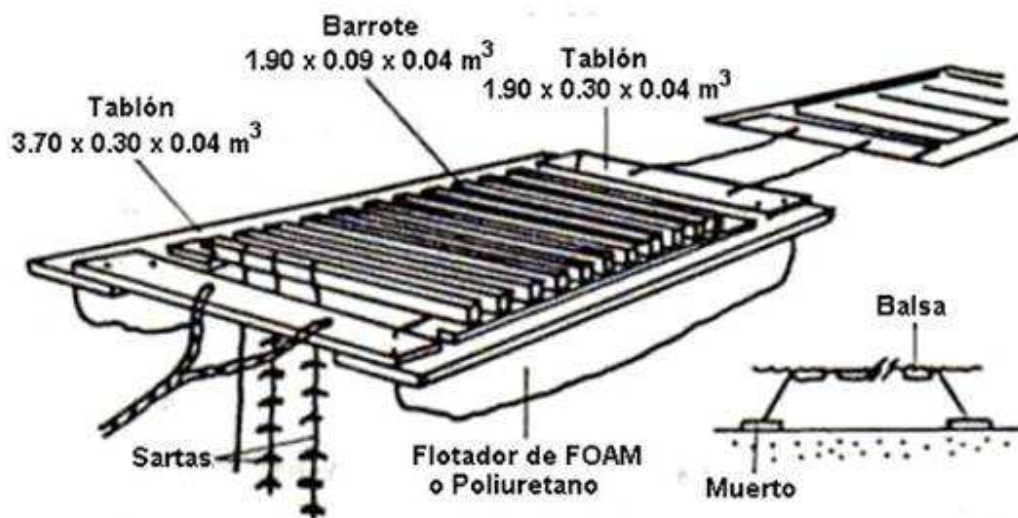


Figura 10 Arte de cultivo tipo Balsa. (Tomado de Ramos, 1987)

#### 1.1.2.1.2 Tipo columpio

Típicamente está compuesto por flotadores, cabo de polipropileno de  $\frac{3}{4}$ ", sistema de anclaje y sartas. Aquí, las sartas cuelgan de las líneas de cabo que van de un flotador a otro (Figura 11). Al igual que en las balsas, los flotadores se colocan en serie uno tras otro. El número de flotadores dependerá de las necesidades de cada cultivo, así como de las características locales del área. La longitud de las líneas que van de flotador a flotador, dependerá de la capacidad de los mismos. Este arte de cultivo es una modificación del tipo balsa, sin embargo suele utilizarse en zonas con mayores profundidades que el arte de cultivo tipo Balsa, en profundidades mayores a 10 metros. Este método presenta menos rigidez y por consiguiente menor resistencia al oleaje y corrientes. Además, tiene pocas estructuras que emergen, por lo que disminuye también la resistencia al viento. Su mantenimiento es prácticamente el mismo que requiere uno del tipo balsa, solo presentan una mayor dificultad en su

Modificación...

reparación cuando es necesaria. Sin embargo debido a que presentan menor superficie de apoyo para las aves, son más limpios.

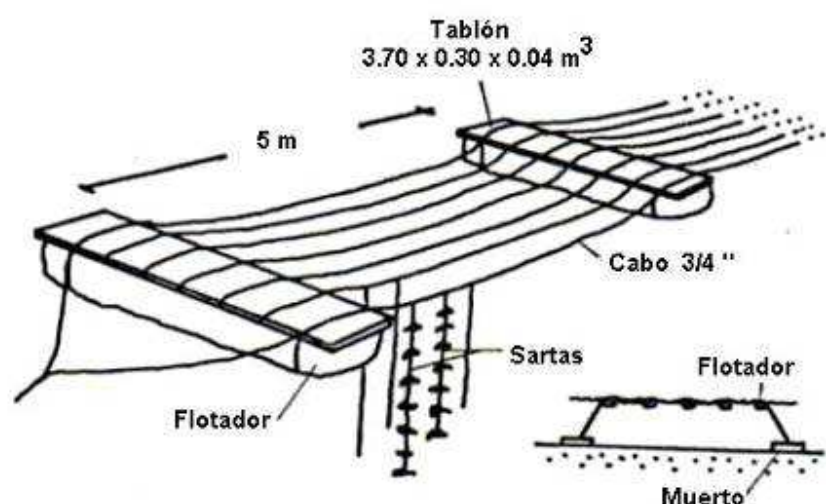


Figura 11 Arte de cultivo tipo Columpio. (Tomado de Ramos, 1987)

### 1.1.2.1.3 Tipo Estante

Consiste básicamente en una serie de tubos sobre los que cuelgan las sartas (Figura 12). Se construye con tubos de plástico ABS. Las bases del estante se construyen con un tubo de 2 pulgadas de diámetro, para que formen un marco. Este marco tiene una altura de 1.5 a 2 metro y se entierran en el lodo de 0.5 a 1 metro de profundidad. Estas estructuras se colocan en grupos de 5 que se encuentran en serie entre ellas y la distancia que existente entre ellas es de aproximadamente 1.25 metros. Transversalmente se colocan sobre ellas tubos de 1 ½", sobre los cuales se cuelgan las sartas. Generalmente las estructuras son reforzadas con estacones de madera para darle mayor rigidez al estante. Con este tipo de arte de cultivo, el monitoreo de las artes debe ser más

Modificación...

continuo, sobre todo si se encuentra en una zona en la que el flujo de marea es fuerte. Los estantes pueden ser equilibrados por las mareas, si no se encuentran bien anclados.

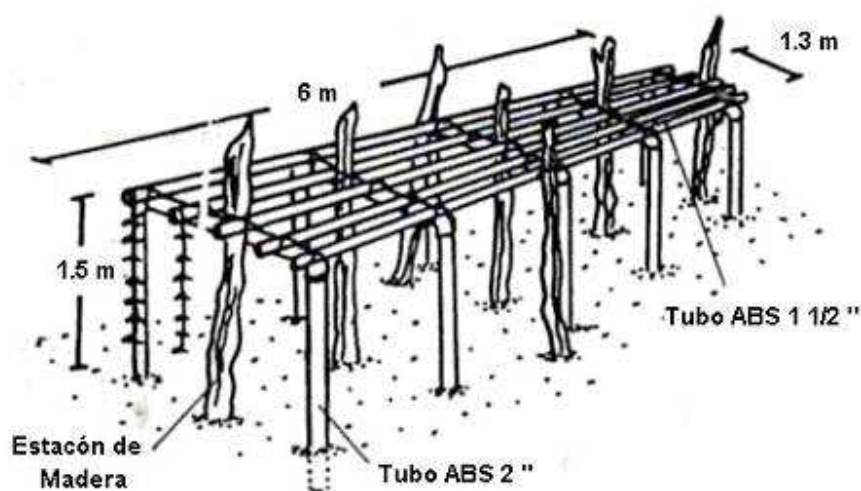


Figura 12 Arte de cultivo tipo Estante. (Tomado de Ramos, 1987)

### 1.1.3. Canal de olas

Dadas las difíciles condiciones que en ocasiones se presentan para hacer una medición apropiada de los diferentes elementos que componen un fenómeno físico en el océano, y en la franja de mayor interacción de éste con tierra firme, conocida en general como la zona costera, se ha recurrido a mimetizar estos fenómenos de manera experimental utilizando diferentes tipos de artilugios o arreglos experimentales, principalmente mecánicos (Jarno-Druaux et al., 2004). Uno de estos sistemas es el canal de olas, también llamado “water flume” (McMahon, 2008).

## Modificación...

Un canal de olas es (Figura 14), en general, un sistema mecánico constituido por un tanque de agua, preferentemente rectangular, que puede ser construido de diversos materiales. Para la elección de estos materiales, se tienden a escoger aquellos que, además de resistencia, favorezcan la visualización y/o medición de los fenómenos físicos mimetizados en el tanque; por lo que en muchos casos este material de construcción suele ser de un material transparente, como por ejemplo el vidrio o el Polimetilmetacrilato (acrílico). En uno de sus extremos se coloca un generador de olas mecánico (O'Dea et al., 2007). A continuación se describirán con más detalle los principales tipos de generadores de olas.

### **1.1.3.1 Tipos de generadores de olas**

En el campo de la investigación científica, estos generadores son principalmente de dos tipos. Placa de bisagra y pistón.

#### ***1.1.3.1.1 Placa con bisagra***

Este tipo de generador de olas, está compuesto por una placa (paleta) fija al canal por una bisagra (Figura 13). Se encuentran en tanques de olas profundas, la profundidad del agua es grande comparada con la longitud de onda de las olas generadas (O'Dea et al., 2007). La razón por la que se seleccionan de esta forma está relacionado con que el movimiento del generador de olas debe ser, principalmente, horizontal y debe aproximarse, idealmente a la variación del movimiento orbital horizontal de la ola, con la profundidad debajo de la

### Modificación...

superficie libre. En aguas profundas ( $\lambda < h$ ), esta variación tiende a ser exponencial con la profundidad, mientras que en aguas muy poco profundas ( $\lambda \gg h$ ) hay un pequeño decaimiento de la órbita horizontal, desde la superficie hasta el fondo. En este tipo de generadores de olas la variación lineal del movimiento se escoge, para aproximar el movimiento deseado en el intervalo de longitudes de onda diseñados (O'Dea et al., 2007). Es decir, el generador de olas se construye en función de las longitudes de onda que se requieran.

Algunos de estos generadores de olas se construyen con dos placas para una mejor aproximación de la variación exponencial del movimiento orbital horizontal con respecto de la profundidad. Esto, a pesar del aumento en la complejidad del sistema y en el consiguiente incremento en el coste.

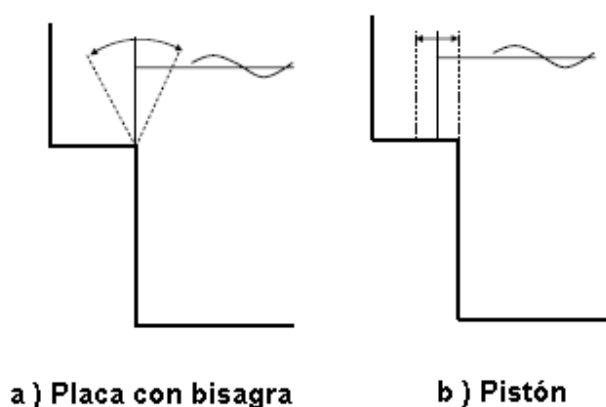
Este tipo de generador de olas es el que se encuentra en el canal de olas del laboratorio de fluidos geofísicos (Figura 14).

#### **1.1.3.1.2 Tipo pistón**

Este tipo de generador de olas está formado por un pistón con una placa móvil en el extremo, que genera la ola (Figura 13). A diferencia del generador de olas anterior, éste se encuentra comúnmente en tanques poco profundos utilizados para estudiar olas que son cercanas a la costa y tsunamis (O'Dea et al., 2007). Al igual que en el generador de olas tipo placa de bisagra, la selección de éste, está relacionada a que el movimiento del generador es principalmente

Modificación...

horizontal y debe aproximarse, idealmente a la variación del movimiento orbital horizontal de la ola, con la profundidad debajo de la superficie libre.



**Figura 13 Geometría de los generadores de olas. a) Generador de olas del tipo placa con bisagra, b) Generador de olas del tipo pistón. (Tomado de O'Dea et al., 2007)**

Este tipo de generadores de olas, también han sido construidos con articulaciones horizontales, para una mejor aproximación en la variación de fase cuando se generan olas oblicuas (Burchart et al., 1986), aunque esto hace mecanismos muy complicados.

No obstante, se debe tener en cuenta que ningún tipo de generador de olas coincide exactamente con el movimiento orbital deseado en las olas generadas. Esto resulta en una perturbación local, que aunque no se propaga extensamente, si estará presente, sobre todo enfrente del generador de olas (O'Dea et al., 2007).

Estos dos tipos son muy usados debido a su sencillez en la construcción y en el control en la generación de olas, ya que permite regular la magnitud del

Modificación...

desplazamiento de la paleta o pistón y la frecuencia de dicho desplazamiento. Existen también otros generadores de olas, empleados fundamentalmente para entretenimiento; tal es el caso del conocido como bola de olas, el cual permite un menor control en la generación de la ola y en sus características.



**Figura 14 Canal de olas en el laboratorio de Fluidos Geofísicos.**

Un canal de olas, dependiendo de la instalación y/o en su forma de construcción, permite hacer desde experimentos completamente cualitativos, en los que solo se hacen observaciones del fenómeno físico, hasta experimentos en los cuales se hacen mediciones con instrumentación que puede ser muy sofisticada (Hudspeth y Guenther 2009). Por este motivo, pueden ser usados en un amplio intervalo de aplicaciones, desde temas puramente pedagógicos hasta temas de investigación que incluyan fenómenos de transporte (Fernando et al., 2008).

## Modificación...

Muchos sistemas de canal de olas tienen como principal instrumento de medición el sistema PIV (“Particle Image Velocimetry”), por ser la medición de la velocidad y dirección del flujo, así como de las partículas que el flujo lleva consigo, uno de los principales objetivos experimentales. Sin embargo, la tecnología de medición que se puede utilizar es muy diversa; por ejemplo: “3D Laser Doppler Velocimeter” (LDV), “Laser Induced Fluorescence” (LIF), Sonar, ADV (“acoustic Doppler Velocimetry”) o incluso imagen y/o video analógico (Voropayev et al., 2008).

Como ya se ha mencionado la unidad básica de crecimiento de organismos bivalvos, está compuesta por la colocación consecutiva de “conchas madre”, ya sea anudadas por un cabo o separadas por un tubo de plástico, conocida como sarta. La colocación de estas sartas sobre el lecho marino podría afectar la dinámica del transporte de sedimento que se encuentra por debajo de ellas. Esto también puede afectar la forma en que los organismos se alimentan. Este es el primer trabajo que directamente aborda el problema de la dinámica del transporte de sedimento en conjunción de la presencia de un arte de cultivo. En el presente trabajo se simula un arte de cultivo de forma idealizada como una primera aproximación a este problema en particular.

### **1.2 Hipótesis**

Una estructura suspendida sobre un lecho arenoso, tal como un arte de cultivo de ostiones en una laguna costera, afecta los patrones de velocidades de los flujos de agua que le rodean. En particular, cuando los artes de cultivo están

sujetos a la acción del oleaje, la estructura compuesta por estos artes, afecta el transcurso natural del agua. Tanto el perfil de la ola, como las magnitudes de las velocidades se ven afectadas por la sola presencia del arte de cultivo. Dependiendo de las características del oleaje, periodo, longitud de onda, las magnitudes de las velocidades del oleaje, pueden incrementarse o disminuir.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

1. Demostrar que un arte de cultivo en suspensión tiene un efecto en la formación de ondulitas y por ende en los perfiles verticales del campo de velocidad, los cuales pueden afectar el transporte de nutrientes a los organismos cultivados.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Determinar el cambio en los perfiles (la afectación en las magnitudes y patrones) de velocidades del flujo debido a la presencia de una estructura similar a un arte de cultivo.
2. Determinar el cambio en las características de las ondulitas debidas a la presencia del arte de cultivo bajo condiciones de oleaje.
3. Determinar las configuraciones del arte de cultivo con mayor presencia de transporte de sedimento.

## **2 Métodos**

### **2.1 Consideraciones teóricas previas**

Con el fin de encontrar los valores esperados de la longitud (ripple wave length) y altura (ripple wave height) de las ondulitas obtenidas en los experimentos a partir de los valores de velocidades obtenidas. Como se requiere encontrar el régimen de flujo, se necesita encontrar la velocidad de fricción debida a la ola  $u_{*w}$ , pues nuestro experimento está constituido por la acción de las olas. Según Soulsby (1997), la velocidad de fricción debida a la ola

$$u_{*w} = \left( \frac{\tau_{ws}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde  $\tau_{ws}$  es el esfuerzo de cizalla sobre el lecho y  $\rho$  es la densidad del agua. Alternativamente la velocidad de fricción debida a la ola también se puede calcular a partir de

$$u_{*w} = \left( \frac{f_{ws}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} u_b \quad (2)$$

donde el valor de la velocidad orbital de fondo  $u_b$  es el valor medido de la velocidad cercana al fondo en los experimentos y  $f_{ws}$  es el factor de fricción debido a la ola. Para los cálculos los valores de  $u_b$  que se utilizaron fueron tomados de las velocidades medidas muy cerca del fondo, que correspondían con el nivel 1 en las mediciones (Figura 17).

Modificación...

Sabemos que la velocidad con la que cae una partícula inmersa en un fluido es  $\omega_s$ , entonces podemos definir un número de Reynolds en términos de esta velocidad de caída, tal y como se indica en la ecuación 3

$$\text{Re} = \frac{\omega_s D}{\nu} \quad (3)$$

donde  $D$  es el tamaño del grano utilizado en los experimentos y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua. El número de Reynolds también puede definirse en términos de la velocidad de fricción,  $u_{*w}$ , tal y como se indica en la ecuación 4,

$$\text{Re} = \frac{u_{*w} D}{\nu} \quad (4)$$

Para el caso de movimiento vertical podemos hacer la siguiente aproximación.

$$u_{*w} = \omega_s \quad (5)$$

Esta velocidad (ecuación 5) también se puede ver como la velocidad crítica para superar el umbral de movimiento del sedimento (Komar y Miller, 1973, 1975). Una de las consideraciones necesarias para analizar el movimiento de los granos de arena, es tomar la forma geométrica de los granos como esferas, según la aproximación teórica hecha por Bagnold (1966), y para mezclas de varios tamaños de granos por Bridge et al. (1992, 1995).

La velocidad de caída  $\omega_s$  para una esfera de diámetro  $D$  es dada en la ecuación

6

Modificación...

$$\omega_s = \sqrt{\frac{4(s-1)gD}{3C_D}} \quad (6)$$

Donde  $s = \rho_s / \rho$  es la densidad relativa al fluido en que está inmerso el sedimento. La velocidad de caída está ligada al coeficiente de arrastre  $C_D$ , este coeficiente se puede definir en términos del número de Reynolds según los criterios de la Tabla I.

**Tabla I.- Relación entre el coeficiente de arrastre  $C_D$  y la velocidad de caída  $\omega_s$  con respecto al tipo de flujo.**

$C_D$	$\omega_s$	Tipo de flujo
$\frac{24}{Re}$ (teórico)	$\frac{1}{18} (s-1) \frac{g D^2}{\nu}$	Laminar $Re < 0.5$
$\approx 0.4$ (experimental)	$\sqrt{3} (s-1) g D$	Turbulento $Re > 10^3$

Sin embargo, para nuestros experimentos, desconocemos el régimen de flujo, por lo que debemos encontrar el valor de la velocidad de caída  $\omega_s$ . Para estimar el valor de  $u_{*w}$ , para ello podemos utilizar la forma general de  $\omega_s$  y podemos utilizar la ecuación (2) para comparar el valor obtenido.

En ambos casos nos encontramos con una restricción pues debemos utilizar un valor para el factor de fricción debido a las olas  $f_{ws}$  o un valor para el coeficiente de arrastre  $C_D$ . Debido a las características de los experimentos utilizaremos la expresión propuesta por Fredse et al. (1992), dada en la ecuación 7, para encontrar el valor del coeficiente de arrastre.

Modificación...

$$C_D = 1.4 + \frac{36}{\text{Re}} \quad (7)$$

Al sustituir la ecuación (7) anterior en la ecuación (6) la expresión para  $\omega_s$  se transforma en

$$\omega_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{36\nu}{D}\right)^2 + 7.5(s-1)gD} - \frac{36\nu}{D}}{2.8} \quad (8)$$

donde  $g$  es el valor de la atracción de la gravedad. Con la ecuación (8) podemos estimar  $u_{*w}$ , ya que  $u_{*w}$  es aproximadamente  $\omega_s$ .

Por último tomaremos el valor de la rugosidad del lecho  $k_s$  según Reeve et al (2004). Ecuación 9,

$$k_s = 2.5 D_{50} = 2.5 D \quad (9)$$

Por lo que, mediante el uso de la ecuación (9), ya se pueden estimar los valores del número de Reynolds de rugosidad, el cual es dado por el cociente de la ecuación 10

$$\text{Re}_r = \frac{u_{*w} k_s}{\nu} \quad (10)$$

Con lo que se determinará el régimen de flujo presente, este valor nos permitirá evaluar el valor de la rugosidad  $z_0$ , mediante los criterios dados por la ecuación 11.

Modificación...

$$z_0 = \begin{cases} \frac{\nu}{9 u_{*w}} & \text{flujo laminar} & \frac{u_{*w} k_s}{\nu} \leq 5 \\ \frac{k_s}{30} & \text{flujo turbulento} & \frac{u_{*w} k_s}{\nu} \geq 70 \\ \frac{\nu}{9 u_{*w}} + \frac{k_s}{30} & \text{flujo transitorio} & 5 < \frac{u_{*w} k_s}{\nu} < 70 \end{cases} \quad (11)$$

Al conocer  $z_0$  y utilizando una ecuación alterna para el coeficiente de arrastre  $C_D$ , ecuación 12, según Reeve et al (2004).

$$C_D = \left[ \frac{0.4}{1 + \ln \frac{z_0}{h}} \right]^2 \quad (12)$$

donde  $h$  es la profundidad de la columna de agua en la ecuación (12).

Por otra parte, además de las ecuaciones (1) y (2), la siguiente ecuación del esfuerzo de cizalla en el fondo, ecuación 13, puede ser usada para relacionar la velocidad de fricción con la velocidad orbital en el fondo.

$$\tau_{ws} = \rho C_D u_b^2 \quad (13)$$

La ecuación (13), puede resultar en una forma alternativa de estimar el número de Reynolds de rugosidad.

Con lo anterior se ha estimado el régimen de flujo, la velocidad de fricción, la rugosidad y el coeficiente de arrastre. Ahora se puede determinar el esfuerzo de corte debido al oleaje, para lo cual se puede utilizar la siguiente ecuación 14.

Modificación...

$$\tau_{ws} = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2 \quad (14)$$

donde  $f_w$  que es el factor de fricción debido a la ola. Bajo los resultados obtenidos en los experimentos y de la revisión hecha de la literatura relacionada con el tema, se considera que el fluido es turbulento, pues en los casos en los cuales el fluido presenta un régimen de tipo laminar no se presentan ninguna de las etapas del transporte de sedimento. El transporte de sedimento en régimen laminar es nulo. Debido a lo anterior la expresión dada en la ecuación 15 para el factor de fricción Soulsby (1997) es

$$f_w = f_{wr} = 1.39 \left( \frac{A}{z_0} \right)^{-0.52} \quad (15)$$

Con esta expresión (ecuación 15) podemos conocer los valores de  $\tau_w$ .

Finalmente las características de las ondulitas generadas por las olas se pueden estimar a partir del parámetro de fricción de Shields (1936).

$$\theta_{ws} = \frac{\tau_{ws}}{((\rho_s - \rho) g D)} = \frac{\tau_{ws}}{(s-1) g D} \quad (16)$$

Y los parámetros de intensidad de flujo

$$\Psi = \frac{u_b^2}{(s-1) g D} \quad (17)$$

al conocer estos dos parámetros adimensionales (ecuaciones 16 y 17) y aplicar los siguientes criterios dados en Neilsen (1992).

Modificación...

$$\lambda_r = \Delta_r = 0 \quad \text{para } \theta_{ws} < \theta_{cr} \quad (18)$$

$$\lambda_r = \Delta_r = 0 \quad \text{para } \theta_{ws} > 0.831 \quad \text{ó } \Psi > 156 \quad (18)$$

$$\Delta_r = \left( 0.275 - 0.022 \Psi^{1/2} \right) A \quad \text{para } \Psi < 156 \quad (19)$$

$$\lambda_r = \frac{\Delta_r}{\left( 0.182 - 0.24 \theta_{ws}^{1.5} \right)} \quad \text{para } \theta_{ws} < 0.831 \quad (20)$$

Debido a que en los experimentos se observó la formación de las ondulitas, tomaremos las ecuaciones (19) y (20), para encontrar los valores esperados de la longitud y altura de las ondulitas.

## 2.2 Metodología

Aún cuando el canal de oleaje utilizado fue construido para fines académicos y no de investigación, Este canal puede ser utilizado en experimentos controlados bajo ciertas condiciones de uso, tal y como lo sugiere el estudio de Trujillo et al (2010). Trujillo et al (2010) realizan una caracterización del canal de oleaje con el fin de encontrar bajo que condiciones este canal reproduce ondas monocromáticas, encontrando que solo bajo ciertas condiciones se pueden generar ondas monocromaticas. Tales parámetros son los siguientes: posiciones del selector de frecuencias en 20, 30 y 40 que corresponden a periodos del oleaje generado de 3.2 s, 1.89 s y 1.38 s, respectivamente, y usando una profundidad de la columna de agua de 30 cm (Trujillo et al., 2010).

Tales experimentos se realizaron bajo los tres escenarios siguientes: Una serie de experimentos como preparación previa para la formación de ondulitas, basados en los parámetros usados experimentalmente por Testik et al. (2006).

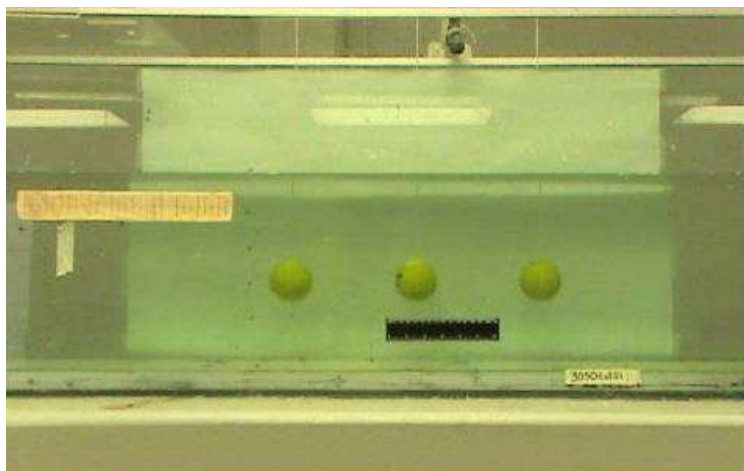
### Modificación...

La segunda serie de experimentos fueron realizados con los parámetros antes mencionados, e introduciendo una estructura de simulación, con la intención de emular un arte de cultivo, y medir las velocidades presentes en los experimentos, en diferentes puntos dentro de la sección de experimentación. La tercera serie de experimentos también cuentan con la presencia de la estructura de simulación, incluyendo además, un lecho arenoso. Este lecho arenoso, pretende emular un fondo que puede presentar transporte de partículas que pertenecen a este lecho arenoso.

Los experimentos se llevaron a cabo en la sección central del canal de olas del laboratorio de fluidos geofísicos. Cabe mencionar que las dimensiones de dicho canal de olas son  $1400 \times 55 \times 30 \text{ cm}^3$  y está compuesto por nueve secciones. La sección central del canal, nombrada con el número 5 fue la designada como área de experimentación (Trujillo et al. 2010).

#### **2.2.1 Estructura de simulación de un arte de cultivo**

Con la intención de simular los posibles efectos sobre el fondo debidos a un arte de cultivo, se introdujo dentro del área de experimentación, una estructura compuesta por tres bolas de tenis, las cuales en lo sucesivo se les nombrará como “esferas”. Dichas esferas, se rellenaron con arena, la misma utilizada para el lecho arenoso de los experimentos posteriores, para aumentar su densidad y evitar que flotarán debido al material del que están construidas.



**Figura 15** Arreglo de esferas en el laboratorio para la simulación de condiciones en un arte de cultivo.

La estructura de simulación constó de tres esferas colocadas consecutivamente. Estas esferas pendían de un cordón de fibra sintética y fueron colocadas a una altura de 12 cm sobre el nivel del fondo del canal de olas, con respecto de sus centros (Figura 15).

Tres diferentes arreglos con respecto a la distancia entre las esferas se probaron. Separación entre las esferas de 10 cm, la distancia equivalente a dos esferas, aproximadamente 15 cm, y 20 cm.

### **2.2.2 Lecho arenoso**

En la última serie de experimentos se incluyó un lecho arenoso que cubría todo el fondo de la sección 5, del canal de olas. Para el tamaño de grano de la arena que conformó este lecho, se utilizaron los tamaños encontrados en los experimento de prueba previos, así como tamaños de grano cercanos a los utilizados por Voropayev et al. (2007, 2008), en sus experimentos.

### Modificación...

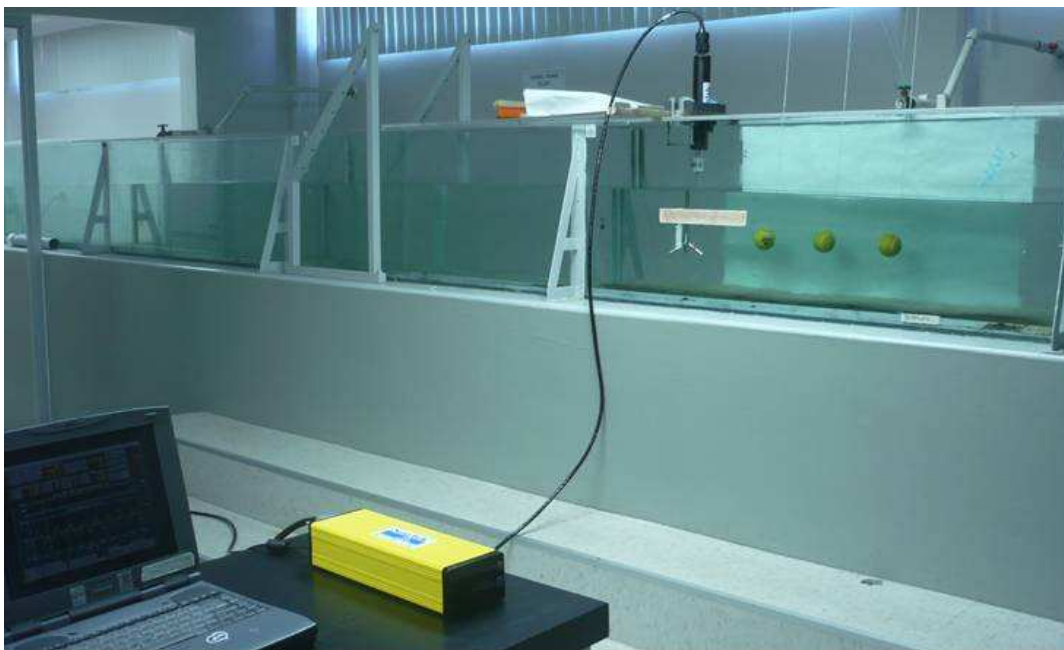
El tamaño de grano que se utilizó para los experimentos se fijó entre 355 y 250 micrómetros, cuya equivalencia en escala phi es de 1.5 y 2 phi, respectivamente. La arena utilizada fue tomada directamente de la playa, y se le realizó un proceso de tamizado, para separar los tamaños no deseados de arena, además de las posibles impurezas presentes en la misma.

El volumen de arena tamizado fue de aproximadamente  $0.022 \text{ m}^3$ , el cual fue un volumen suficiente para cubrir completamente el fondo de la sección 5. En estos experimentos, las esferas fueron colocadas a una altura de 12 cm por encima del nivel del lecho arenoso.

Para cada experimento en el cual estaba presente el lecho arenoso, la arena se encontraba nivelada, para que no presentara ningún borde o arruga sobre su superficie.

### **2.2.3 Arreglo experimental**

El arreglo experimental básico es muy similar al utilizado en los experimentos de capítulo anterior. De nuevo se utilizó un sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimetry), para tomar las mediciones de las velocidades (Figura 16).



**Figura 16 Arreglo experimental. Las esferas simulan la presencia de una estructura similar a un arte de cultivo. A la izquierda de las esferas se encuentra el sensor ADV, el cual está conectado a la interface de lectura (bloque amarillo). La computadora registra los datos obtenidos por el ADV.**

El sensor de ADV, se colocó en cada una de las posiciones descritas en la Tabla II. Por razones de operatividad se dividió el área de experimentación en 5 columnas y 3 niveles. Las mediciones de las velocidades se hicieron en cada una de las intersecciones de estas dos clasificaciones del área de experimentación. La columna nombrada como “cero”, es la columna donde se espera no haya ningún tipo de afectación debida a la estructura presente y solo a la acción de la ola misma. Se nombró como columna “uno”, aquella que se encuentra justo por delante de la primera esfera, con el fin de medir los posibles efectos encontrados por delante de la estructura (Testik et al., 2005). La columna “dos”, fue la medición hecha justo en medio de las dos primeras esferas, para conocer la posible respuesta de las velocidades de la ola debidas

## Modificación...

a la presencia de estas dos primeras esferas. La columna “tres”, también se trató de una medición entre esferas, en este caso las esferas dos y tres de la estructura de simulación, al igual que el caso anterior, con el fin de conocer las afectaciones en las velocidades de la ola debidas a la presencia de la estructura de simulación. Por último la columna “cuatro”, corresponde a mediciones hechas por detrás de la última esfera. Con la intención de medir tanto los efectos debidos a la estructura de simulación como los debidos a la ola probablemente reflejada en el fondo del canal (Testik et al., 2007). La Tabla II muestra un resumen de las posiciones de medición.

**Tabla II Posiciones donde se colocó el sensor ADV, para la medición de las velocidades de la ola, en cada uno de los experimentos.**

Mediciones	Columna 0	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
Nivel 3	03	13	23	33	43
Nivel 2	02	12	22	32	42
Nivel 1	01	11	21	31	41

Como ya se ha mencionado antes, para los experimentos en los cuales se encontraba la presencia de un lecho arenoso, el fondo del canal se cubrió con una capa de arena. Dicha capa de arena, fue nivelada antes de llevarse a cabo cada experimento.

Se llevaron a cabo 19 experimentos, con una profundidad de la columna de agua de 30 cm. Estos experimentos cubrieron tres periodos distintos de generación de la ola, encontrados a partir de los experimentos de prueba y de los valores utilizados por Testik *et al.* (2006), las tres diferentes distancias de

Modificación...

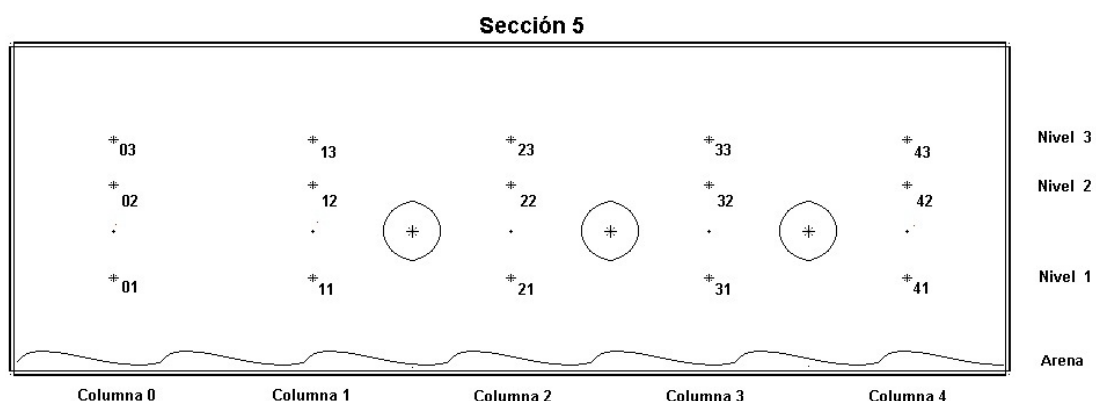
separación entre las esferas y con y sin presencia del lecho arenoso. La Tabla III muestra los nombres de los experimentos, con respecto de los parámetros de frecuencia de la ola y distancia de separación entre las esferas.

**Tabla III Relación de experimentos.**

Experimentos		Separación de 10 cm.	Separación 2 esferas.	Separación de 20 cm.
Posición del selector en 20. Periodo 3.20 s.	Con lecho arenoso	sv3020	r3020	p3020
	Sin lecho arenoso	3020E	l3020	O3020
Posición del selector en 30. Periodo 1.89 s.	Con lecho arenoso	sv3030	r3030	p3030
	Sin lecho arenoso	3030E	l3030	O3030
Posición del selector en 40. Periodo 1.38 s.	Con lecho arenoso	tv3040	r3040	q3040
	Sin lecho arenoso	3040E	l3040	O3040

Experimentos en los cuales no se tenía la presencia de un lecho arenoso, son los que fueron nombrados de la siguiente forma 3020E, 3030E, 3040E, l3020, l3030, l3040, O3020, O3030, O3040 y los experimentos en los cuales sí se tuvo un lecho arenoso fueron nombrados de la siguiente manera p3020, p3030, q3040, r3020, r3030, r3040, sv3020, sv3030, tv3040, para un total de 18 experimentos.

El esquema de las mediciones hechas por el sensor ADV, así como la conformación de las esferas para la simulación del arte de cultivo, en la sección 5 del canal de olas se muestra en la Figura 17.



**Figura 17** Esquema para los experimentos realizados en la sección 5 del canal de olas. Los asteriscos (\*) con los números a los lados representan los lugares de medición de las velocidades de ola y los que no tienen números a los lados representan los centros de las esferas.

### 3 Resultados

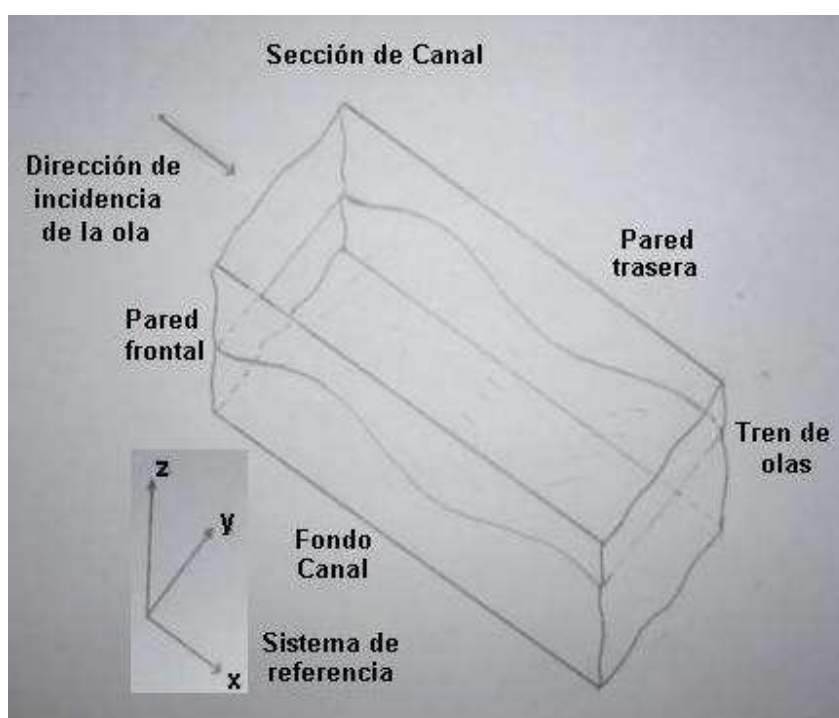
#### 3.1 Resultados para los perfiles de velocidades

Como ya se ha mencionado antes, se realizaron mediciones de velocidades en los diferentes puntos mencionados en la Figura 17. De tal forma, que se obtuvieron valores de las velocidades para cada una de las columnas y cada nivel (Figura 17).

Se tomaron mediciones durante tres minutos a una velocidad de muestreo de diez cuentas por segundo, por lo que se obtuvo una base de datos de 1800 elementos por punto de medición. Estos datos fueron analizados mediante la transformada de Fourier discreta con lo que se obtuvo la frecuencia y periodo de la señal presente en estos datos, con esto se pudo hacer la reconstrucción de los perfiles de la ola a partir de los datos experimentales obtenidos.

## Modificación...

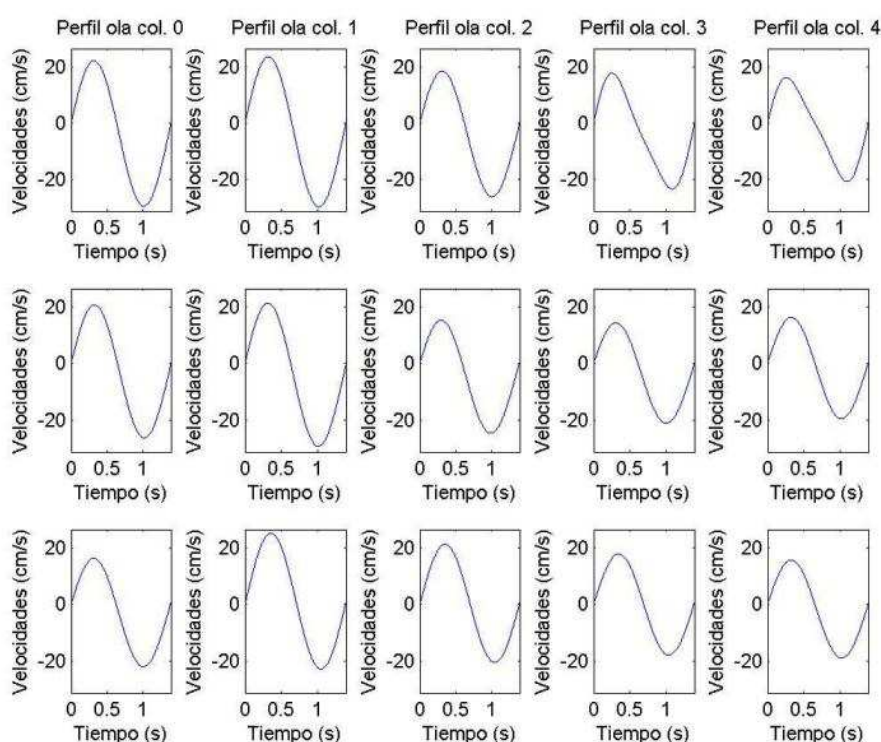
El sensor de medición de las velocidades, el ADV (Acoustic Doppler Velocimetry), mide los valores de velocidad en las tres direcciones geométricas “x”, “y” y “z”. Por conveniencia en la medición de las velocidades se escogió a la dirección en “x” como la dirección de propagación del tren de olas. Por lo que los valores de las velocidades en la dirección “y” corresponden a la dirección transversal al eje mayor al canal de olas, por último los valores de la velocidades en la dirección “z”, corresponden a la dirección de la columna de agua (Figura 18).



**Figura 18** Sección del canal donde se muestra el sistema de referencia usado para la nomenclatura de las velocidades medidas por el ADV. La velocidad en la dirección “x” es la misma que la tomada por la ola incidente, la velocidad en la dirección “y” es transversal a las paredes del canal y la velocidad en la dirección “z” es a lo largo de la columna de agua.

Modificación...

En las figuras elaboradas para mostrar los perfiles de velocidades, cada subgráfica, corresponde a cada uno de los puntos de medición, en el área de experimentación. La primera columna de izquierda a derecha corresponde a la columna cero, siendo la última columna en este mismo sentido la denominada con el numero 4.



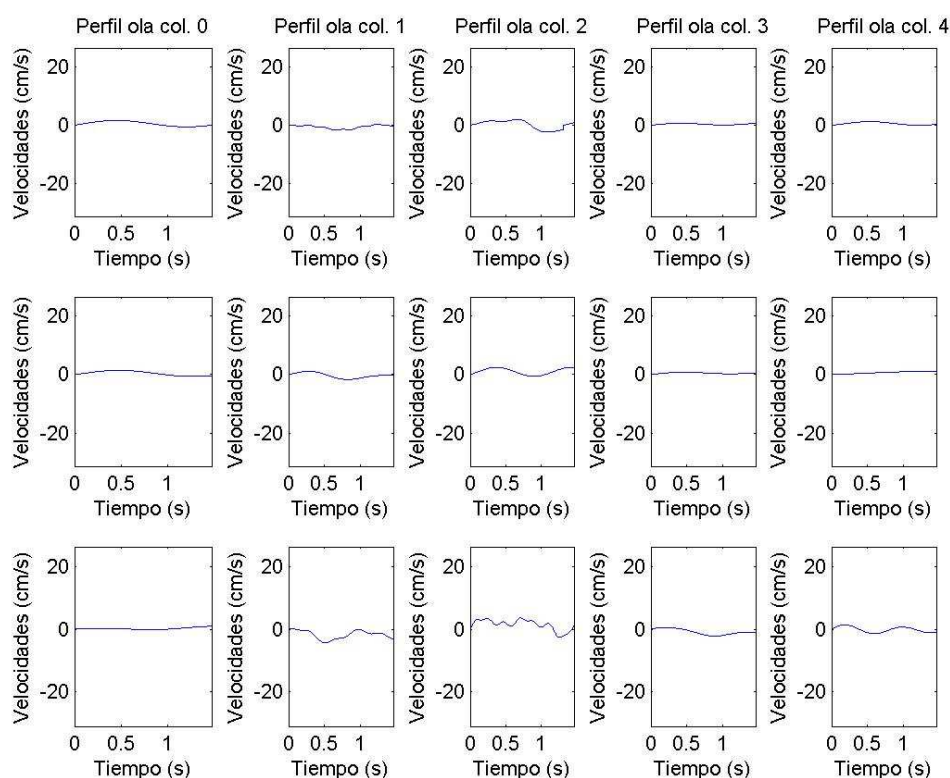
**Figura 19** Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección de propagación de la ola, del experimento con condiciones experimentales: 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo.

En la Figura 19 se muestran los resultados de la interpolación de perfiles a partir de los datos experimentales, para las velocidades en dirección de propagación de la ola (dirección "x"). Las condiciones experimentales para la

Modificación...

generación del tren de olas fueron 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s.

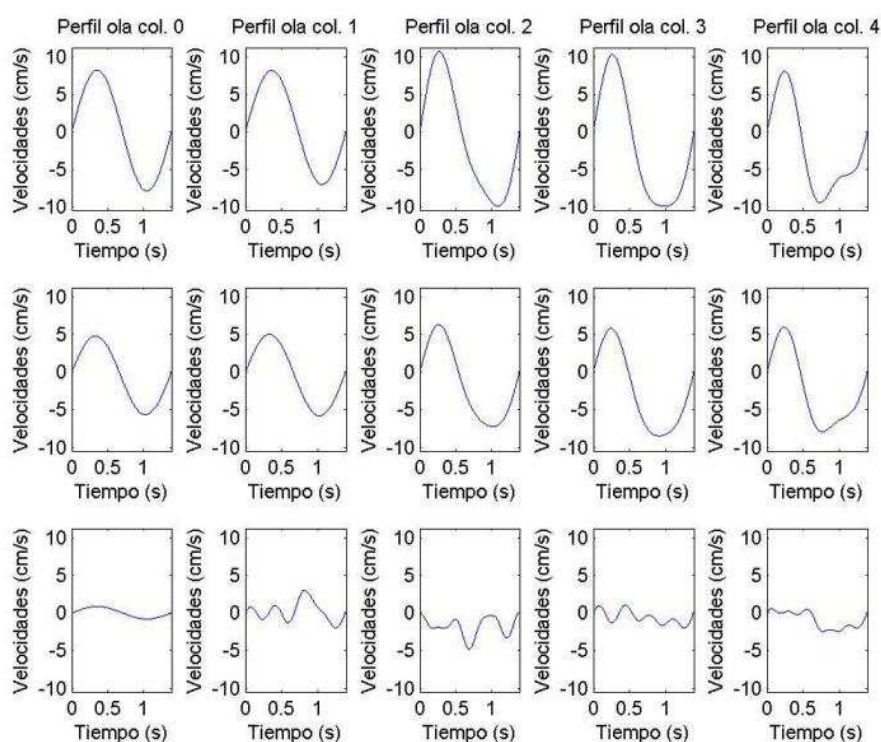
En la primera columna se puede observar el perfil de velocidades de la ola puramente debido al generador de olas. Se observa, también, el comportamiento de este perfil de velocidades a lo largo de la columna de agua. Como ya se ha mencionado antes, las siguientes columnas corresponden a las columnas nombradas con los números 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En éstas se observa el cambio en los comportamientos de los perfiles de la ola, por lo que en primera instancia, se denota un efecto en los perfiles de velocidades debido a la presencia del arte de cultivo. En la discusión de resultados, se abundará un poco más sobre el tema.



**Figura 20** Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección “y”, perpendicular a las paredes laterales del canal, del experimento con condiciones experimentales: 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo.

Para las velocidades en dirección “y” (Figura 20), de igual manera que en los resultados anteriores, en la primera columna se puede observar el perfil de velocidades de la ola puramente debido al generador de olas. Se observa, también, el comportamiento de este perfil de velocidades a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, en lo concerniente a las posteriores columnas, se notan cambios más abruptos o agudizados en los comportamientos de los perfiles de las velocidades. En la sección de discusión se ahondará un poco más en ello.

Modificación...



**Figura 21** Imagen en la que se muestran los perfiles para la velocidad en la dirección “z”, a lo largo de la columna de agua, del experimento con condiciones experimentales 30 cm de altura en la columna de agua, separación entre las esferas de 15 cm, y periodo de la ola de 1.39 s. La primera columna de izquierda a derecha no tiene sobre ella ningún efecto debido a la estructura del arte de cultivo. Las siguientes columnas corresponden a datos medidos en presencia del arte de cultivo.

Las velocidades en la dirección “z”, se muestran en la Figura 21, también en la primera columna se puede observar el perfil de velocidades puramente debida al generador de olas. En las subsecuentes columnas se observa, el cambio en el comportamiento del perfil de las velocidades, siendo los de cambios más abruptos los correspondientes al nivel 1 en las mediciones. En la sección de discusiones se comentara más sobre estos resultados.

### **3.2 Resultados a partir de los cálculos teóricos**

Con los valores de las velocidades obtenidas a partir de las mediciones hechas con el sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimetry), se obtuvieron las velocidades en el fondo. Con estos valores de velocidades, se hicieron los cálculos para obtener los valores de diferentes magnitudes físicas, listadas en las tablas subsecuentes (Tabla IV a Tabla XXXIX). Los renglones en las tablas corresponden a las cinco columnas de medición. El primer renglón es el conjunto de cálculos a partir de la teoría y el valor de velocidad en el fondo, dado en centímetros por segundo, para la columna “cero”, donde no está presente la estructura de simulación. El segundo renglón representa los cálculos y la velocidad en el fondo para la columna “uno”, justo por delante de la ubicación de la primera esfera. El tercer renglón corresponde a los valores de velocidad en el fondo y los calculados para la columna “dos”, dicha columna se encontraba en el medio de la primera y segunda esfera. El cuarto renglón son los valores que corresponden a la columna “tres”, colocada en medio de la segunda y tercer esfera. Por último, el quinto renglón, corresponde a los valores para la columna “cuatro”, colocada justo al final de la estructura de simulación. Se han nombrado, como una convención solo aplicable a este documento, a las velocidades que tienen el sentido positivo del eje “x” de referencia como, fase positiva de la ola. A las velocidades en sentido contrario al eje “x”, como la fase negativa de la ola.

### 3.2.1 Separación 10 cm, Periodo de la ola 3.20 s.

#### *Experimento 3020E*

**Tabla IV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento	3020E Separación 10 cm					
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $F_w$	Parámetro de Shields $\theta_{ws}$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
13.96	0.20	3.95E-04	2.31	12.70	4.21	rodante
14.50	0.19	4.18E-04	2.29	12.61	4.38	rodante
13.92	0.20	3.94E-04	2.31	12.71	4.20	rodante
14.30	0.20	4.10E-04	2.30	12.64	4.32	rodante
15.64	0.19	4.68E-04	2.26	12.41	4.72	Suspensión

**Tabla V Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento	3020E Separación 10 cm					
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $F_w$	Parámetro de Shields $\theta_{ws}$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
13.62	0.20	3.81E-04	2.32	12.76	4.11	rodante
15.12	0.19	4.45E-04	2.27	12.50	4.56	Suspensión
15.78	0.19	4.74E-04	2.25	12.38	4.76	Suspensión
16.06	0.18	4.87E-04	2.25	12.34	4.85	Suspensión
14.92	0.19	4.36E-04	2.28	12.53	4.50	rodante

Se obtuvieron valores equivalentes para la fase positiva de la ola y la fase negativa de la ola (Tabla IV y Tabla V). La teoría empleada predice que habrá transporte de los granos del sedimento, mayormente en forma rodante para la fase positiva de la ola y en suspensión para la fase negativa de la ola

(Balasubramanian et al., 2008). Por lo que para los experimentos donde se encuentra el lecho arenoso se espera haya formación de ondulitas arenosas.

### **Experimento sv3020 (Con el lecho arenoso presente)**



**Figura 22** Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento sv3020.

**Tabla VI** Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.

Experimento	sv3020	Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta_{ws}$	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
9.72	0.18	1.76E-04	2.44	13.43	4.95	Sin movimiento
9.84	0.18	1.80E-04	2.44	13.41	5.01	Sin movimiento
11.04	0.17	2.13E-04	2.40	13.20	5.62	Sin movimiento
13.72	0.15	2.94E-04	2.32	12.74	6.99	Sin movimiento
10.36	0.18	1.94E-04	2.42	13.32	5.28	Sin movimiento

En este experimento, no se espera que se presente transporte de los granos, para ambos casos, fase positiva de la ola y fase negativa de la ola (Tabla VI y Tabla VII). Encontrándose el valor más cercano para el transporte en la

Modificación...

columna 3. En los resultados experimentales se comprobaron estos resultados teóricos ya que no se obtuvo la formación de las ondulitas (Figura 22).

**Tabla VII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento sv3020		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
12.82	0.16	2.66E-04	2.35	12.90	6.53	Sin movimiento
11.82	0.17	2.35E-04	2.38	13.07	6.02	Sin movimiento
11.52	0.17	2.27E-04	2.39	13.12	5.87	Sin movimiento
13.50	0.15	2.87E-04	2.33	12.78	6.88	Sin movimiento
9.94	0.18	1.82E-04	2.44	13.39	5.06	Sin movimiento

### 3.2.2 Separación 10 cm, Periodo de la ola 1.89 s.

#### **Experimento 3030E**

**Tabla VIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento 3030E		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
29.46	0.13	1.19E-03	1.82	10.02	8.89	Saltación
5.40	0.33	9.70E-05	2.58	14.18	1.63	Sin movimiento
5.68	0.32	1.05E-04	2.57	14.13	1.71	Sin movimiento
9.36	0.24	2.19E-04	2.46	13.49	2.82	Sin movimiento
12.42	0.21	3.33E-04	2.36	12.96	3.75	rodante

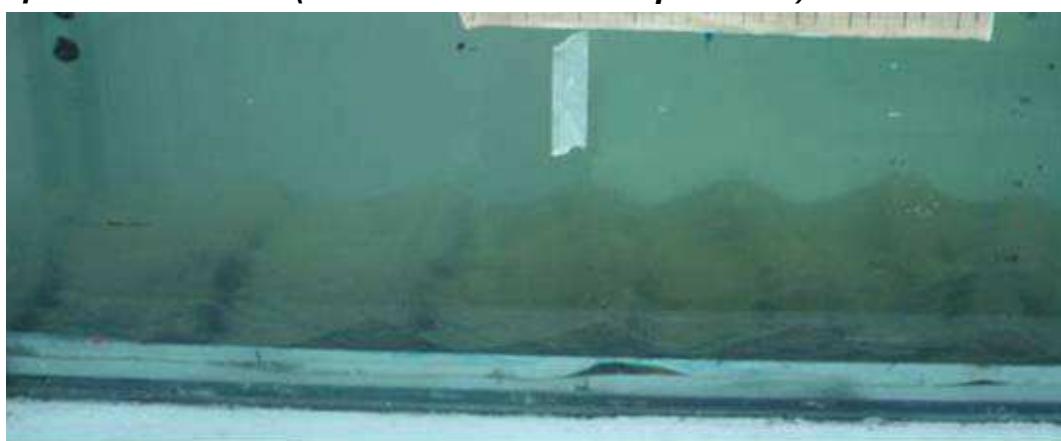
Modificación...

Para este experimento solo se encontró que existe predicción de transporte en la columna cero y en la columna 4 para la fase positiva de la ola (Tabla VIII) y transporte en la fase negativa de la ola en la columna cero (Tabla IX), cuando la ola se encuentra libre. Manteniéndose estático en el centro del área de experimentación.

**Tabla IX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento	3030E	Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta_{ws}$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
24.68	0.15	9.19E-04	1.97	10.85	7.45	Saltación
5.80	0.31	1.08E-04	2.57	14.11	1.75	Sin movimiento
4.78	0.35	8.10E-05	2.60	14.28	1.44	Sin movimiento
9.18	0.25	2.13E-04	2.46	13.52	2.77	Sin movimiento
9.66	0.24	2.29E-04	2.45	13.44	2.91	Sin movimiento

**Experimento sv3030 (Con el lecho arenoso presente)**



**Figura 23 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento sv3030.**

## Modificación...

Se encontraron valores de velocidad de la fase positiva de la ola, muy grandes en la primera y última columna. Y aunque se espera transporte en las columnas 1 y 3, no se espera transporte en la columna 2. Por lo que de nuevo, parece como si la estructura de simulación funcionara casi como un bloque (Tabla X). En el caso de la fase negativa de la ola, los valores de las velocidades encontradas son en promedio mayores a las velocidades encontradas para la fase positiva de la ola. Solo no se espera que haya transporte en la columna 3 (Tabla XI).

**Tabla X Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento sv3030		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $fw$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
41.34	0.11	1.97E-03	1.45	7.97	12.47	Saltación
15.46	0.19	4.60E-04	2.26	12.44	4.67	Suspensión
11.42	0.22	2.94E-04	2.39	13.14	3.45	Sin movimiento
16.50	0.18	5.06E-04	2.23	12.26	4.98	Suspensión
34.18	0.12	1.49E-03	1.68	9.21	10.31	Saltación

En el experimento se observó la formación de ondulitas muy rápidamente, aproximadamente a los 5 minutos de iniciado el experimento (Figura 23). Las ondulitas formadas son de mayor magnitud que los formados en los experimentos en las posiciones de 20 cm y 2 esferas de separación. Se observó también la formación de una hondonada al final de la estructura de simulación, aunque las ondulitas conservaron su forma y tamaño.

**Tabla XI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento sv3030		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
31.94	0.13	1.35E-03	1.75	9.59	9.64	Saltación
20.10	0.16	6.78E-04	2.12	11.64	6.07	Saltación
18.56	0.17	6.03E-04	2.17	11.90	5.60	Saltación
6.86	0.29	1.38E-04	2.53	13.92	2.07	Sin movimiento
34.18	0.12	1.49E-03	1.68	9.21	10.31	Saltación

### 3.2.3 Separación 10 cm, Periodo de la ola 1.38 s.

#### **Experimento 3040E**

**Tabla XII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento 3040E		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
20.30	0.16	6.88E-04	2.11	11.60	6.13	Saltación
15.48	0.19	4.61E-04	2.26	12.44	4.67	Suspensión
10.10	0.24	2.45E-04	2.43	13.37	3.05	Sin movimiento
11.98	0.22	3.15E-04	2.37	13.04	3.62	Rodante
12.76	0.21	3.46E-04	2.35	12.91	3.85	Rodante

Se observó que solo para la columna central (columna 2) no se espera encontrar transporte. Se espera que los granos estén en suspensión en la columna 1, donde empieza la estructura de simulación, y rodante en las dos

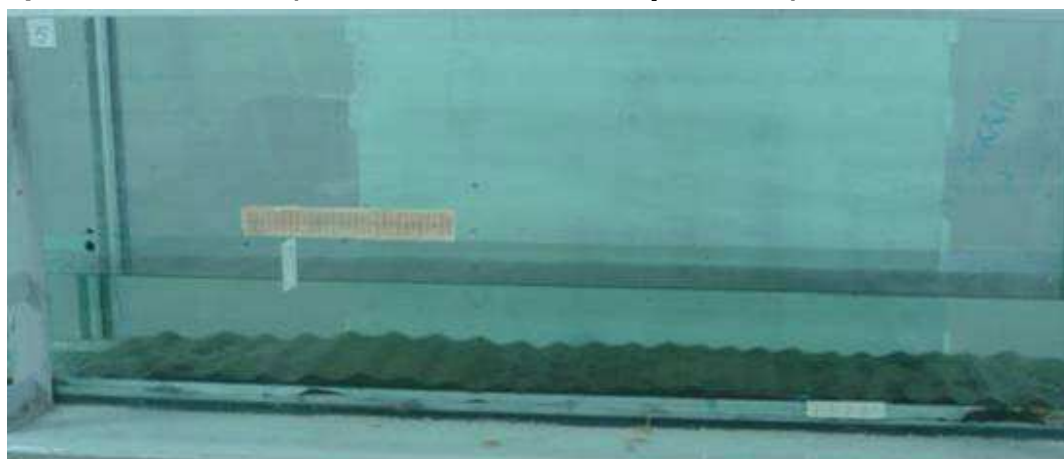
Modificación...

últimas columnas, para la fase positiva de la ola (Tabla XII). Para la fase negativa de la ola, se espera tener más transporte, ya que en todas las columnas se espera transporte, siendo la menor magnitud en las columnas 2 y 3 (Tabla XIII).

**Tabla XIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento 3040E		Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta_{ws}$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda_r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
20.86	0.16	7.17E-04	2.09	11.51	6.29	Saltación
16.80	0.18	5.20E-04	2.22	12.21	5.07	Suspensión
13.82	0.20	3.90E-04	2.32	12.72	4.17	Rodante
13.42	0.20	3.73E-04	2.33	12.79	4.05	Rodante
15.14	0.19	4.46E-04	2.27	12.49	4.57	Suspensión

**Experimento tv3040 (Con el lecho arenoso presente)**



**Figura 24 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento tv3040.**

## Modificación...

Para la fase positiva de la ola, si se espera que haya transporte de sedimento, sin embargo los valores de las velocidades son relativamente pequeños, solo en las columnas 0 y 4, se espera haya mayor transporte (Tabla XIV). En la fase negativa de la ola, los valores de las velocidades encontrados son mayores a los encontrados para la fase positiva de la ola, por lo que se espera una mayor tasa de transporte (Tabla XV).

**Tabla XIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	tv3040	Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
18.78	0.20	7.23E-04	2.16	11.87	4.14	Saltación
12.24	0.25	3.83E-04	2.37	13.00	2.70	rodante
12.20	0.25	3.82E-04	2.37	13.00	2.69	rodante
11.82	0.26	3.64E-04	2.38	13.07	2.60	rodante
23.74	0.18	1.02E-03	2.00	11.01	5.23	Saltación

**Tabla XV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	tv3040	Separación 10 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
17.42	0.21	6.46E-04	2.20	12.10	3.84	Saltación
11.76	0.26	3.61E-04	2.38	13.08	2.59	rodante
12.92	0.24	4.15E-04	2.34	12.88	2.85	rodante
14.72	0.23	5.04E-04	2.29	12.57	3.24	Suspensión
17.38	0.21	6.44E-04	2.20	12.11	3.83	Saltación

En los resultados experimentales, se obtuvieron la formación de ondulitas de similares características a las obtenidas en el experimento realizado con la misma frecuencia pero para la separación de 2 esferas. Al principio y al final del área de experimentación, las ondulitas aparecen de manera irregular, tomando las primeras ondulitas (las más cercanas a la formación de la ola) la forma de ondulitas asimétricas pequeñas (ASR) y largas (ALR). Las ondulitas del centro del área de experimentación formaron barras bien definidas, paralelas entre si y perpendiculares a las paredes del canal (Figura 24). Además se observaron hondonadas por debajo del inicio y el final de la estructura de simulación.

### 3.2.4 Separación 2 esferas, Periodo de la ola 3.20 s

#### **Experimento I3020**

No se espera encontrar ningún tipo de transporte, ya que no se alcanza la velocidad crítica para el movimiento (Tabla XVI y Tabla XVII).

**Tabla XVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola.**

Experimento	I3020	Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
7.20	0.28	1.48E-04	2.52	13.87	2.17	Sin movimiento
7.10	0.28	1.45E-04	2.53	13.88	2.14	Sin movimiento
6.52	0.30	1.28E-04	2.55	13.98	1.97	Sin movimiento
6.54	0.29	1.29E-04	2.54	13.98	1.97	Sin movimiento
6.38	0.30	1.24E-04	2.55	14.01	1.93	Sin movimiento

Modificación...

**Tabla XVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola.**

Experimento I3020		Separación 2 esferas					
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta_{ws}$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda_r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte	
8.50	0.26	1.90E-04	2.48	13.64	2.56	Sin movimiento	
5.98	0.31	1.13E-04	2.56	14.08	1.80	Sin movimiento	
7.06	0.28	1.44E-04	2.53	13.89	2.13	Sin movimiento	
6.78	0.29	1.36E-04	2.54	13.94	2.05	Sin movimiento	
6.26	0.30	1.21E-04	2.55	14.03	1.89	Sin movimiento	

***Experimento r3020 (Con el lecho arenoso presente)***



**Figura 25 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3020.**

Los valores de las velocidades para la fase positiva de la ola no son de la magnitud necesaria para que se presente el transporte de sedimento (Tabla XVIII). Resultados similares en los valores de las velocidades se obtuvieron para la fase negativa de la ola (Tabla XIX). En las observaciones de laboratorio

Modificación...

para este experimento no se registró la formación de ondulitas en el lecho arenoso (Figura 25).

**Tabla XVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento r3020		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
8.00	0.20	1.32E-04	2.50	13.73	4.07	Sin movimiento
10.96	0.17	2.11E-04	2.41	13.22	5.58	Sin movimiento
7.78	0.21	1.27E-04	2.51	13.77	3.96	Sin movimiento
12.20	0.16	2.47E-04	2.37	13.00	6.21	Sin movimiento
5.50	0.25	7.59E-05	2.58	14.16	2.80	Sin movimiento

**Tabla XIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento r3020		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
8.32	0.20	1.40E-04	2.49	13.67	4.24	Sin movimiento
10.84	0.17	2.07E-04	2.41	13.24	5.52	Sin movimiento
7.78	0.21	1.27E-04	2.51	13.77	3.96	Sin movimiento
7.76	0.21	1.26E-04	2.51	13.77	3.95	Sin movimiento
8.34	0.20	1.41E-04	2.49	13.67	4.25	Sin movimiento

### 3.2.5 Separación 2 esferas, Periodo de la ola 1.89 s.

#### **Experimento I3030**

Los resultados se muestran cual si se tratara de dos movimientos diferentes, para la fase positiva de la ola. Saltación para las dos primeras columnas, sin

Modificación...

movimiento en la columna del centro y granos rodantes para las dos columnas finales (Tabla XX).

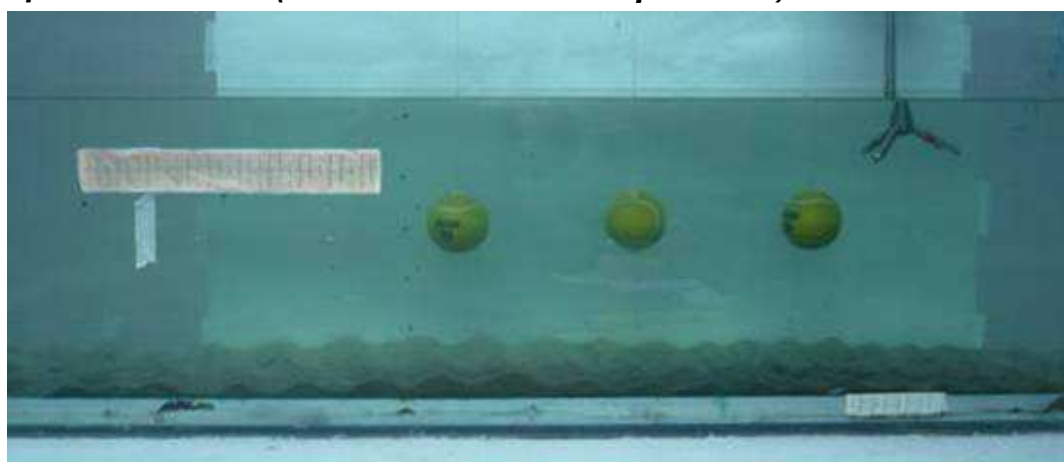
**Tabla XX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola.**

Experimento I3030		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
23.66	0.15	8.63E-04	2.01	11.02	7.14	Saltación
21.14	0.16	7.31E-04	2.09	11.46	6.38	Saltación
7.00	0.28	1.42E-04	2.53	13.90	2.11	Sin movimiento
13.12	0.21	3.61E-04	2.34	12.84	3.96	Rodante
12.60	0.21	3.40E-04	2.35	12.93	3.80	Rodante

En el caso de la fase negativa de la ola se espera tener transporte en todas las columnas siendo las más pronunciadas la columna cero y la columna 3 (Tabla XXI).

**Tabla XXI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola.**

Experimento I3030		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
24.08	0.15	8.86E-04	1.99	10.95	7.27	Saltación
14.64	0.19	4.24E-04	2.29	12.58	4.42	Rodante
17.16	0.18	5.37E-04	2.21	12.15	5.18	Suspensión
21.62	0.16	7.56E-04	2.07	11.38	6.52	Saltación
13.64	0.20	3.82E-04	2.32	12.75	4.12	Rodante

**Experimento r3030 (Con el lecho arenoso presente)**

**Figura 26 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3030.**

En el caso de la fase positiva de la ola solo se espera encontrar transporte en las columnas 0 y 1, donde prácticamente no hay efectos de la estructura de simulación. También se espera una absoluta ausencia de transporte, ya que los valores encontrados de velocidad para las columnas 2, 3 y 4, son menores a la velocidad crítica para que se presente el transporte (Tabla XXII).

**Tabla XXII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	r3030	Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ $w_s$	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
20.12	0.16	6.79E-04	2.12	11.63	6.07	Saltación
14.38	0.20	4.13E-04	2.30	12.63	4.34	Rodante
5.44	0.32	9.80E-05	2.58	14.17	1.64	Sin movimiento
7.84	0.27	1.68E-04	2.50	13.76	2.37	Sin movimiento
9.98	0.24	2.41E-04	2.44	13.39	3.01	Sin movimiento

Modificación...

Para la fase negativa de la ola las velocidades son, también, muy pequeñas en comparación con la velocidad crítica, por lo que no se espera haya ningún tipo de transporte, por debajo de la estructura y solo esperando transporte de los granos en forma rodante para las columnas 0 y 4 (Tabla XXIII).

**Tabla XXIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento r3030		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
12.68	0.21	3.43E-04	2.35	12.92	3.83	Rodante
10.52	0.23	2.60E-04	2.42	13.29	3.17	Sin movimiento
3.88	0.39	5.95E-05	2.63	14.44	1.17	Sin movimiento
9.00	0.25	2.07E-04	2.47	13.56	2.72	Sin movimiento
14.90	0.19	4.36E-04	2.28	12.54	4.50	Rodante

Al contrario de lo esperado, con marcadas ausencias de transporte, en los resultados experimentales sí se obtuvo la formación de ondulitas (Figura 26), aunque en un tiempo mayor al que se obtuvo en experimentos previos sin la estructura de simulación. La duración del experimento fue de aproximadamente dos horas, tiempo en el cual se presentó la formación de ondulitas en la parte inicial de la estructura de simulación. A pesar de que el fenómeno se presentó retardado, tal vez, por efecto de la estructura, la formación de las ondulitas se encontró bien definida. Se especula en este caso que la estructura ha hecho las veces de una barrera física, funcionando como un solo bloque para estas

condiciones experimentales. Estas ondulitas se difuminaban a lo largo del área de experimentación, sobre todo por debajo de la estructura de simulación. Por lo que, podemos decir que sí se presentó transporte de sedimento.

### 3.2.6 Separación 2 esferas, Periodo de la ola 1.39 s.

#### **Experimento I3040**

Se espera tener transporte en todas las columnas, con la columna 1 con la mayor energía para el transporte, para la fase positiva de la ola. En la columna 1 es donde empieza la estructura de simulación (Tabla XXIV). Para la fase negativa de la ola, los mayores valores de velocidad se encuentran al principio del área de experimentación (columnas 0, 1, y 2). El mayor valor de la velocidad se encuentra en la columna 1 (Tabla XXV).

**Tabla XXIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola.**

Experimento	I3040	Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
17.96	0.17	5.74E-04	2.19	12.01	5.42	Suspensión
20.76	0.16	7.12E-04	2.10	11.52	6.26	Saltación
16.86	0.18	5.23E-04	2.22	12.20	5.09	Suspensión
13.22	0.20	3.65E-04	2.33	12.83	3.99	rodante
11.78	0.22	3.08E-04	2.38	13.08	3.55	rodante

**Tabla XXV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola.**

Experimento I3040		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
18.36	0.17	5.93E-04	2.17	11.94	5.54	Saltación
20.88	0.16	7.18E-04	2.09	11.50	6.30	Saltación
18.92	0.17	6.20E-04	2.16	11.84	5.71	Saltación
16.70	0.18	5.16E-04	2.22	12.23	5.04	Suspensión
18.06	0.17	5.79E-04	2.18	11.99	5.45	Suspensión

### ***Experimento r3040 (Con el lecho arenoso presente)***

En este experimento los valores de las velocidades de la fase positiva de la ola y la fase negativa de la ola, son tales que se espera haya transporte de los granos en forma de saltación. Son en promedio los mayores de las velocidades de la ola encontrados (Tabla XXVI y Tabla XXVII).

**Tabla XXVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento r3040		Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
19.44	0.20	7.60E-04	2.14	11.75	4.28	Saltación
28.18	0.16	1.32E-03	1.86	10.24	6.21	Saltación
27.10	0.17	1.24E-03	1.90	10.43	5.97	Saltación
27.42	0.16	1.27E-03	1.89	10.37	6.04	Saltación
18.48	0.20	7.05E-04	2.17	11.92	4.07	Saltación

**Tabla XXVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación de 2 esferas, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	r3040	Separación 2 esferas				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $fw$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
23.82	0.18	1.03E-03	2.00	11.00	5.25	Saltación
21.04	0.19	8.55E-04	2.09	11.48	4.63	Saltación
24.48	0.17	1.07E-03	1.98	10.88	5.39	Saltación
22.00	0.18	9.13E-04	2.06	11.31	4.85	Saltación
21.24	0.19	8.67E-04	2.08	11.44	4.68	Saltación

En los resultados experimentales (Figura 27), se observa una buena formación de ondulitas en forma de barras (SSR) (Dumas et al., 2005), a lo largo de los dos primeros tercios del área de experimentación, las crestas de las barras no formaron una línea recta sino que tomaron una forma aproximada a una "s". En el último tercio del área de experimentación se encontraron ondulitas asimétricas pequeñas (ASR) y largas (ALR).



**Figura 27 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento r3040.**

### 3.2.7 Separación 20 cm, Periodo de la ola 3.20 s.

#### **Experimento O3020**

Las velocidades de la ola no alcanzan el valor necesario para que se presente el transporte de sedimento (Tabla XXVIII y Tabla XXIX).

**Tabla XXVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento		O3020 Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta_{ws}$	$\Delta r$ (cm)	$\lambda_r$ (cm)	$A$ (cm)	
7.36	0.28	1.53E-04	2.52	13.84	2.22	Sin movimiento
7.30	0.28	1.51E-04	2.52	13.85	2.20	Sin movimiento
6.96	0.29	1.41E-04	2.53	13.91	2.10	Sin movimiento
6.04	0.31	1.14E-04	2.56	14.07	1.82	Sin movimiento
8.42	0.26	1.87E-04	2.49	13.66	2.54	Sin movimiento

**Tabla XXIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento		O3020 Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta_{ws}$	$\Delta r$ (cm)	$\lambda_r$ (cm)	$A$ (cm)	
8.50	0.26	1.90E-04	2.48	13.64	2.56	Sin movimiento
8.48	0.26	1.89E-04	2.48	13.65	2.56	Sin movimiento
6.80	0.29	1.36E-04	2.54	13.94	2.05	Sin movimiento
6.42	0.30	1.25E-04	2.55	14.00	1.94	Sin movimiento
7.24	0.28	1.50E-04	2.52	13.86	2.18	Sin movimiento

**Experimento p3020 (Con el lecho arenoso presente)**

**Figura 28** Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento p3020.

Para la fase positiva de la ola se espera haya transporte solo en la columna 1 (Tabla XXX). Para la fase negativa de la ola se espera que haya transporte en las dos primeras columnas (Tabla XXXI). En los resultados de laboratorio se encontró que no hubo formación de ondulitas, lo que implica el nulo transporte para este experimento (Figura 28).

**Tabla XXX** Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.

Experimento	p3020	Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
10.68	0.23	2.66E-04	2.41	13.27	3.22	Sin movimiento
15.40	0.19	4.57E-04	2.27	12.45	4.65	Suspensión
7.64	0.27	1.62E-04	2.51	13.79	2.31	Sin movimiento
6.26	0.30	1.21E-04	2.55	14.03	1.89	Sin movimiento
4.14	0.37	6.54E-05	2.62	14.39	1.25	Sin movimiento

**Tabla XXXI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 20 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento p3020		Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
17.54	0.18	5.54E-04	2.20	12.08	5.29	Suspensión
11.90	0.22	3.12E-04	2.38	13.05	3.59	rodante
9.06	0.25	2.09E-04	2.47	13.54	2.73	Sin movimiento
8.98	0.25	2.06E-04	2.47	13.56	2.71	Sin movimiento
5.34	0.33	9.54E-05	2.58	14.19	1.61	Sin movimiento

### 3.2.8 Separación 20 cm, Periodo de la ola 1.89 s.

#### **Experimento O3030**

Para la fase positiva de la ola, el valor mayor de la velocidad de la ola se encuentra cuando no hay ninguna afectación por parte de la estructura de simulación. Los siguientes valores de velocidad mayores se encuentran en la columna del centro y del fondo del área de experimentación respectivamente (Tabla XXXII). En el caso de la onda que se aleja, contrasta que no se espera ningún tipo de transporte en la columna cero, la velocidad de mayor magnitud se encuentra en la columna 1. En este caso, se encontró una configuración muy distinta a la de la fase positiva de la ola, con velocidades menores para el transporte y una distribución distinta de este (Tabla XXXIII).

**Tabla XXXII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento		Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta_{ws}$	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
30.42	0.13	1.25E-03	1.79	9.86	9.18	Saltación
15.82	0.19	4.76E-04	2.25	12.38	4.77	Suspensión
19.40	0.17	6.44E-04	2.14	11.76	5.85	Saltación
12.02	0.21	3.17E-04	2.37	13.03	3.63	Rodante
18.84	0.17	6.16E-04	2.16	11.86	5.69	Saltación

**Tabla XXXIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento		Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
$u$ (cm/s)	$f_w$	$\theta_{ws}$	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	$A$ (cm)	
11.02	0.22	2.79E-04	2.40	13.21	3.33	Sin movimiento
21.30	0.16	7.39E-04	2.08	11.43	6.43	Saltación
17.20	0.18	5.39E-04	2.21	12.14	5.19	Suspensión
11.06	0.22	2.80E-04	2.40	13.20	3.34	Sin movimiento
14.28	0.20	4.09E-04	2.30	12.64	4.31	Rodante

### ***Experimento p3030 (Con el lecho arenoso presente)***

La predicción teórica para los valores de velocidad de la fase positiva de la ola, muestra que se encontrara transporte de sedimento para este experimento (Tabla XXXIV). Así, como para la fase negativa de la ola, con excepción de la columna 3 en la cual no se espera tener transporte de sedimento (Tabla XXXV). En los resultados experimentales se obtuvo la formación de ondulitas (Figura 29). Pero, no se observó una distribución homogénea de la formación de estas,

## Modificación...

como en los experimentos donde no hay estructura de simulación. Se muestran tres etapas de secciones de ondulitas. En la primera sección, en donde la ola se aproxima sin obstáculo alguno, las ondulitas son considerablemente más grandes a aquellos en donde no hay estructura de simulación. En la segunda sección, muy cerca del inicio de la estructura de simulación, Las ondulitas son muy pequeñas aunque de fácil reconocimiento, pero encontrándose dentro de una hondonada que se forma al realizarse el experimento. En la tercera sección, a partir del centro de la estructura de simulación, se observa la incipiente formación de las ondulitas, con si el fenómeno de formación de las mismas estuviera en su primera etapa y no por las mas de dos horas en que se llevó a cabo el experimento. En esta sección las ondulitas no son fácilmente reconocibles. Además, en general se observa un transporte de la arena hacia ambos lados del área de experimentación, cubriendo casi hasta la mitad las dos secciones adyacentes. Tomando en cuenta que al principio del experimento la arena solo cubría el área de experimentación.



**Figura 29 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento p3030. Vista superior.**

**Tabla XXXIV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento		p3030					Separación 20 cm	
Velocidad								
en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte		
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta$ r (cm)	$\lambda$ r (cm)	A (cm)			
42.88	0.11	2.08E-03	1.40	7.70	12.94	Saltación		
37.68	0.12	1.72E-03	1.57	8.60	11.37	Saltación		
23.06	0.15	8.31E-04	2.02	11.13	6.96	Saltación		
15.34	0.19	4.55E-04	2.27	12.46	4.63	Suspensión		
28.46	0.14	1.13E-03	1.86	10.19	8.59	Saltación		

**Tabla XXXV Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento		p3030					Separación 20 cm	
Velocidad								
en el fondo	Coeficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte		
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta$ r (cm)	$\lambda$ r (cm)	A (cm)			
38.92	0.12	1.80E-03	1.53	8.39	11.74	Saltación		
30.92	0.13	1.28E-03	1.78	9.77	9.33	Saltación		
16.08	0.18	4.88E-04	2.24	12.33	4.85	Suspensión		
9.48	0.24	2.23E-04	2.45	13.47	2.86	Sin movimiento		
25.08	0.15	9.41E-04	1.96	10.78	7.57	Saltación		

### 3.2.9 Separación 20 cm, Periodo de la ola 1.38 s.

#### **Experimento O3040**

La fase positiva de la ola sin el efecto de la estructura de simulación, no es capaz de generar transporte de sedimento. Sin embargo, se encuentra un salto importante en los valores de velocidades cuando existe un efecto debido a la

Modificación...

estructura de simulación, en los que ya se espera haya transporte de sedimento (Tabla XXXVI).

**Tabla XXXVI Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola.**

Experimento		Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	A (cm)	
6.04	0.31	1.14E-04	2.56	14.07	1.82	Sin movimiento
21.48	0.16	7.48E-04	2.07	11.40	6.48	Saltación
14.10	0.20	4.01E-04	2.31	12.67	4.25	rodante
23.20	0.15	8.39E-04	2.02	11.10	7.00	Saltación
14.68	0.19	4.26E-04	2.29	12.57	4.43	rodante

**Tabla XXXVII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola.**

Experimento		Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	A (cm)	
20.40	0.16	6.93E-04	2.11	11.59	6.16	Saltación
10.94	0.23	2.76E-04	2.41	13.22	3.30	Sin movimiento
8.70	0.25	1.96E-04	2.48	13.61	2.63	Sin movimiento
23.70	0.15	8.66E-04	2.00	11.02	7.15	Saltación
17.68	0.18	5.61E-04	2.19	12.06	5.34	Suspensión

Pero lo datos obtenidos para la fase negativa de la ola, no se espera movimiento para las columnas 1 y 2. Solo se espera transporte cuando no hay efecto de la estructura de simulación y en las dos últimas columnas de medición (Tabla XXXVII).

**Experimento q3040 (Con el lecho arenoso presente)**

Los valores de velocidad para la fase positiva de la ola en las diferentes secciones, son tales que se espera tener transporte de sedimento en cada columna, teniéndose el valor más bajo de velocidad en la columna 3 (Tabla XXXVIII).

**Tabla XXXVIII Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase positiva de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	q3040	Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta$ r (cm)	Longitud ondulita $\lambda$ r (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
21.30	0.16	7.39E-04	2.08	11.43	6.43	Saltación
25.36	0.15	9.57E-04	1.95	10.73	7.65	Saltación
15.40	0.19	4.57E-04	2.27	12.45	4.65	Suspensión
12.56	0.21	3.38E-04	2.36	12.94	3.79	Rodante
20.36	0.16	6.91E-04	2.11	11.59	6.14	Saltación

En el caso de la fase negativa de la ola, los valores de velocidad, también hacen esperar transporte de sedimento en toda el área de experimentación a excepción de la columna central en la que la velocidad rebasa la velocidad crítica para el movimiento (Tabla XXXIX).

**Tabla XXXIX Resultados de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm, para la fase negativa de la ola. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

Experimento	q3040	Separación 20 cm				
Velocidad en el fondo $u$ (cm/s)	Coefficiente de fricción $f_w$	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital $A$ (cm)	Tipo de transporte
18.00	0.17	5.76E-04	2.18	12.00	5.43	Suspensión
19.14	0.17	6.31E-04	2.15	11.80	5.78	Saltación
10.38	0.23	2.55E-04	2.42	13.32	3.13	Sin movimiento
15.84	0.19	4.77E-04	2.25	12.37	4.78	Suspensión
18.28	0.17	5.89E-04	2.18	11.95	5.52	Saltación

En los resultados experimentales sí se obtuvo la formación de ondulitas en la misma forma que en los experimentos con ausencia de estructura de simulación (Figura 30). Sin embargo, cuando el experimento se desarrollo durante un tiempo mayor al de solo la obtención de ondulitas, se encontró una modificación en la distribución de las ondulitas. Con en el experimento p3030 se observaron tres zonas marcadas. Conformadas por la parte primera del lecho arenoso en la dirección incidente de la ola. En esta zona y en la zona final después de la estructura de simulación se encontraron formaciones el tipo “cono de huevo” y no la formación clásica de barras paralelas. Estas ondulitas pueden ser clasificadas como una combinación de ondulitas pequeñas asimétricas (ASR) y ondulitas largas asimétricas (ALR), (Leeder 2011, Dumas et al, 2005). En la zona central se encontró la formación de ondulitas en forma de barras, clasificadas como ondulitas pequeñas simétricas (SSR).

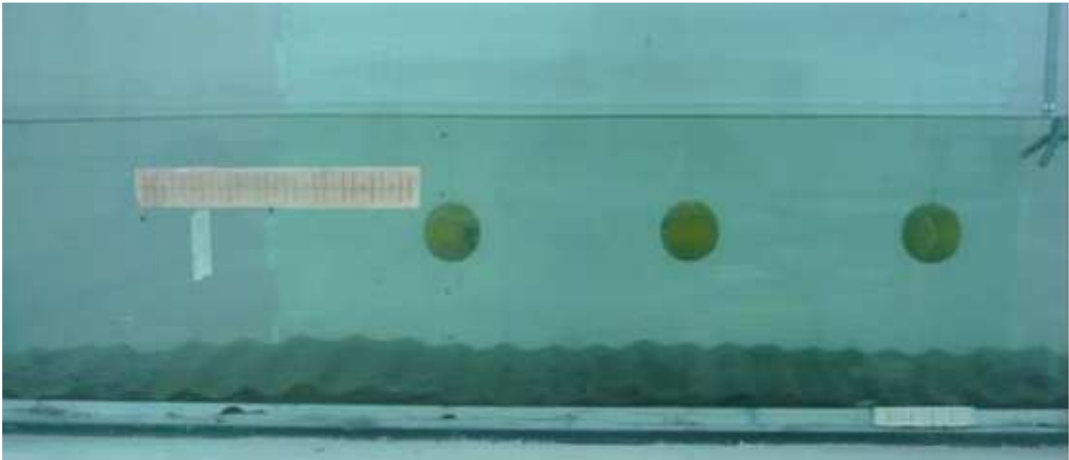


Figura 30 Resultados experimentales en la formación de Ondulitas, para el experimento q3040.

### ***3.3 Medición de las características de las ondulitas***

En los experimentos que se obtuvo formación de las ondulitas (Figura 31) durante el desarrollo del mismo:

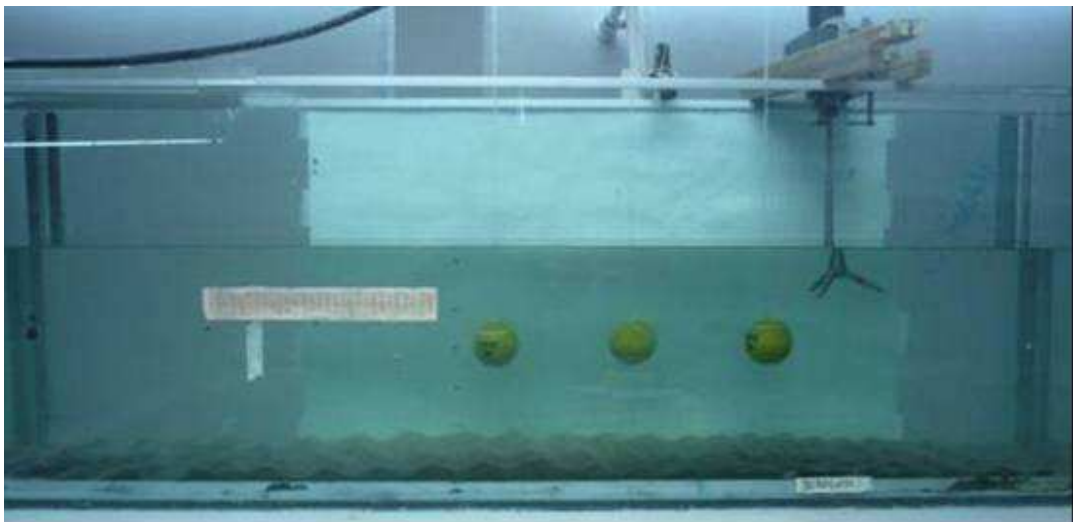


Figura 31 Ondulitas formadas en el experimento r3040. Las condiciones experimentales fueron, periodo de la ola 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm.

Modificación...

Se tomaron mediciones de las dos características principales de las ondulitas: el alto y la longitud de onda. De estos resultados se obtuvieron las Tabla XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV, XLV.

**Tabla XL Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 10 cm.**

Experimento sv3030 Separación 10 cm		
Longitud (cm) $\lambda_r$	Alto (cm) $\Delta_r$	Rugosidad $\Delta_r^2 / \lambda_r$
11.5	2.3	0.460
13.5	3.0	0.667
13.0	2.5	0.481
12.5	2.5	0.500
12.0	2.1	0.368
13.0	2.5	0.481
14.0	1.7	0.206
8.5	1.5	0.265
8.5	1.8	0.381
7.5	1.5	0.300
8.0	1.5	0.281
9.0	1.8	0.360
11.0	2.0	0.364

**Tabla XLI Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 10 cm.**

Experimento tv3040 Separación 10 cm		
Longitud (cm) $\lambda_r$	Alto (cm) $\Delta_r$	Rugosidad $\Delta_r^2 / \lambda_r$
5.5	1.5	0.409
4.0	0.5	0.063
6.0	1.5	0.375
7.0	1.2	0.206
7.0	1.5	0.321
7.0	1.5	0.321
6.5	1.0	0.154
6.2	1.0	0.161
5.8	1.0	0.172
5.5	1.2	0.262
5.5	1.0	0.182
5.0	1.2	0.288
5.0	1.0	0.200
5.0	1.2	0.288
4.5	1.0	0.222
4.5	0.7	0.109
4.5	0.5	0.056
4.5	1.0	0.222
5.0	0.8	0.128
6.2	1.0	0.161
6.0	0.8	0.107
6.2	1.2	0.232

**Tabla XLII Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 15 cm.**

Experimento r3030 Separación 15 cm		
Longitud (cm)	Alto (cm)	Rugosidad
$\lambda_r$	$\Delta_r$	$\Delta_r^2 / \lambda_r$
8.0	1.5	0.281
8.0	1.5	0.281
8.0	1.3	0.211
7.0	1.2	0.206
6.5	1.0	0.154
6.0	1.0	0.167
5.5	1.2	0.262
5.5	1.0	0.182

**Tabla XLIII Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.89 s y separación entre las esferas de 20 cm.**

Experimento p3030 Separación 20 cm		
Longitud (cm)	Alto (cm)	Rugosidad
$\lambda_r$	$\Delta_r$	$\Delta_r^2 / \lambda_r$
9.5	1.0	0.105
10.0	2.5	0.625
11.0	2.0	0.364
13.0	2.5	0.481
11.5	1.5	0.196
11.5	1.5	0.196
7.5	1.5	0.300
8.0	1.5	0.281
8.5	2.0	0.471
8.0	1.5	0.281
6.5	1.0	0.154
5.0	1.0	0.200

**Tabla XLIV Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm.**

Experimento r3040 Separación 15 cm		
Longitud (cm) $\lambda_r$	Alto (cm) $\Delta_r$	Rugosidad $\Delta_r^2 / \lambda_r$
6.0	1.2	0.240
9.0	2.0	0.444
7.0	2.0	0.571
7.0	1.5	0.321
7.0	1.5	0.321
7.0	1.5	0.321
6.2	1.2	0.232
6.8	1.5	0.331
7.5	1.8	0.432
6.5	1.4	0.302
6.5	1.2	0.222
5.5	1.0	0.182
5.0	1.0	0.200
4.0	0.7	0.123
6.0	1.5	0.375
4.0	1.0	0.250
5.5	1.3	0.307
4.5	1.2	0.320
5.0	1.3	0.338
5.5	1.2	0.262
5.0	1.2	0.288

**Tabla XLV Medición de la longitud y altura de las ondulitas, así como, el resultado de la rugosidad a partir de estos valores. Las condiciones experimentales con la que se obtuvo la formación de las ondulitas fueron: periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 20 cm.**

Experimento q3040 Separación 20 cm		
Longitud (cm) $\Lambda_r$	Alto (cm) $\Delta_r$	Rugosidad $\Delta_r^2 / \Lambda_r$
8.0	1.0	0.125
5.5	0.8	0.116
6.0	1.2	0.240
6.0	1.2	0.240
6.5	1.5	0.346
6.5	1.2	0.222
6.5	1.2	0.222
7.0	1.2	0.206
6.5	1.2	0.222
6.0	0.8	0.107
6.0	1.0	0.167
5.5	1.2	0.262
6.0	1.2	0.240
5.0	1.0	0.200
5.0	1.0	0.200
4.5	0.9	0.180
5.5	0.8	0.116
5.5	1.0	0.182
5.5	0.8	0.116
4.5	1.2	0.320
5.0	1.0	0.200
5.0	1.2	0.288
5.5	1.2	0.262
6.0	1.0	0.167

La discusión de estos resultados se tratará en las secciones de formación de las ondulitas y rugosidad, que se más encuentran adelante en el texto, en la sección de discusión de resultados.

### 3.4 Prueba t de Student

Con el fin de saber si existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos de longitud de onda y altura de la ondulita, calculados a partir de las mediciones de velocidades y aquellos datos obtenidos de las mediciones experimentales. Se realizó una prueba t, dicha prueba compara la concordancia entre las medias de un par de conjuntos de datos, no necesariamente con la misma cardinalidad, es decir el mismo número de elementos. Las siguientes Tabla XLVI, XLVII y XLVIII, muestran los resultados de las pruebas estadísticas realizadas para las condiciones experimentales en las cuales se obtuvo la formación de las ondulitas.

**Tabla XLVI Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 10 cm.**

Características comparadas.	Media grupo 1 (cm/s)	Media grupo 2 (cm/s)	Valor t	p	Interpretación
Longitud experimental 303010 vs. Longitud teórico 303010	10.923 1	11.127 8	-0.173 7	8.64E-01	no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias
Alto experimental 303010 vs. Alto teórico 303010	2.053 8	2.025 2	0.120 7	9.05E-01	no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias
Longitud experimental 304010 vs. Longitud teórico 304010	5.563 6	12.467 4	-16.111 2	1.03E-14	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias
Alto experimental 304010 vs. Alto teórico 304010	1.059 1	2.269 0	-8.976 3	2.71E-09	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias

## Modificación...

Según los resultados, para la prueba t mostrados en la Tabla XLVI, para los periodos de ola de 1.89 s, no existe diferencia entre los datos experimentales y los datos calculados a partir de las mediciones de velocidad.

Sin embargo, para el periodo de ola de 1.39 s, la prueba estadística si muestra una diferencia significativa entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos obtenidos de los cálculos.

**Tabla XLVII Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 15 cm.**

	Media grupo 1	Media grupo 2	Valor t	p	Interpretación
Longitud experimental 303015 vs. Longitud teórico 303015	6.812 5	13.231 5	-11.332 6	2.09E-07	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias
Alto experimental 303015 vs. Alto teórico 303015	1.212 5	2.408 1	-11.167 8	2.43E-07	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias
Longitud experimental 304015 vs. Longitud teórico 304015	6.023 8	11.081 9	-8.922 2	4.34E-09	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias
Alto experimental 304015 vs. Alto teórico 304015	1.342 9	2.016 8	-4.561 7	1.27E-04	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias

Es interesante, observar, que la prueba estadística arroja resultados de discordancia estadística entre los datos encontrados experimentalmente y los datos calculados (Tabla XLVII). Pues en todos los resultados existen diferencias, que son estadísticamente significativas entre los datos experimentales y los datos calculados a partir de las mediciones de velocidad.

**Tabla XLVIII Resultados obtenidos en la prueba t de Student para la comparación de datos los datos de altura y longitud de onda de la ondulita, para la separación entre las esferas de 20 cm.**

	Media grupo 1	Media grupo 2	Valor t	p	Interpretación
Longitud experimental 303020 vs. Longitud teórico 303020	9.166 7	10.286 0	-0.916 9	3.74E-01	no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias
Alto experimental 303020 vs. Alto teórico 303020	1.625 0	1.907 7	-1.088 6	2.94E-01	no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias
Longitud experimental 304020 vs. Longitud teórico 304020	5.791 7	12.059 0	-16.151 2	2.12E-15	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias
Alto experimental 304020 vs. Alto teórico 304020	1.075 0	2.194 7	-13.342 8	2.11E-13	hay diferencias estadísticamente significativa entre las medias

Los resultados de la prueba estadística en la Tabla XLVIII, muestran que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la altura y longitud de onda de las ondulitas de los datos medidos experimentalmente, son respecto de los datos, para estos mismos parámetros, obtenidos mediante cálculos hechos con la teoría antes discutida, para el periodo de la ola de 1.89 s.

## 4 Discusión

### 4.1 Perfiles de la Ola

**Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 3.20 s.**

***Velocidad en la dirección de propagación de la ola.***

### Modificación...

Las mayores modificaciones en los perfiles de velocidad se dieron en los puntos de medición 21, 22, 23, 31, 32, 33. En estos puntos de medición se observa que, en general, no se conservan las características del perfil de velocidades, mostradas en la columna donde no se encuentra colocado el arte de cultivo. En los puntos de medición, en el nivel 1, muestran resultados en los que los perfiles se mantienen dentro del mismo intervalo de magnitud, estos perfiles, conservan en la mayoría de los casos la misma forma. Por lo que, no se puede, a partir de los resultados encontrados, inferir el comportamiento que tendrá el perfil de velocidades.

#### ***Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje.***

Los perfiles de las velocidades tienen sus cambios más abruptos en los puntos de medición 22, 23, 32 y 33. Los valores de las velocidades aumentan en todos los casos para estos puntos. Los mayores contrastes se observan en los puntos pertenecientes a la columna 2.

#### ***Velocidad en la dirección vertical.***

La mayor modificación de los perfiles se observa en los puntos de medición 12, 13, 22, 23, 32, y 33. Para la separación entre las esferas de 15 cm, en el punto de medición 23 las magnitudes de las velocidades aumentan más de diez veces.

**Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 1.89 s.*****Velocidad en la dirección de propagación de la ola.***

Las modificaciones de los perfiles de velocidades se dan en las columnas donde se encuentra presente el arte de cultivo. Estas modificaciones no siguen ningún comportamiento. En los diferentes experimentos se obtuvieron diferentes perfiles de las velocidades. Las magnitudes de las velocidades, también oscilan, pudiendo llegar a ser mayores a las encontradas en la columna donde no hay presencia del arte de cultivo. O por el contrario, se puede observar a lo largo del mismo nivel como la magnitud de la velocidad decrecen en la zona donde hay mayor influencia del arte de cultivo.

***Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje.***

Los puntos de medición 12, 13, 22, 23, 32, y 33, son los que presentan la mayor modificación en los perfiles de las velocidades. Dándose casos, como en la separación de 10 cm entre las esferas, donde el valor de las velocidades en el punto de medición 23, aumenta más de diez veces en magnitud.

***Velocidad en la dirección vertical.***

Los perfiles de las velocidades se modifican en los puntos de medición donde existe presencia del arte de cultivo, exceptuando los puntos correspondientes al nivel 1. Las magnitudes de las velocidades aumentan en estos puntos y las

### Modificación...

formas de los perfiles se modifican. Modificándose incluso el periodo del perfil de las velocidades.

#### **Condiciones experimentales de altura de la columna de agua de 30 cm, y periodo de 1.39 s.**

##### ***Velocidad en la dirección de propagación de la ola.***

Las modificaciones de los perfiles de velocidades se dan en las columnas donde se encuentra presente el arte de cultivo. Sin embargo, los perfiles obtenidos se muestran menos “turbulentos”, que para el periodo de 1.89 s. En las condiciones de separación de 15 cm entre las esferas, para la columna 1 las magnitudes de las velocidades parecen aumentar en su valor, pero mantienen la forma del perfil.

##### ***Velocidad en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del oleaje.***

Los puntos de medición que se encontraban bajo la influencia del arte de cultivo son los que presentan la mayor modificación en los perfiles de las velocidades. Dándose casos, como en la separación de 10 cm entre las esferas, donde el valor de las velocidades en el punto de medición 43, aumenta más de quince veces en magnitud.

##### ***Velocidad en la dirección vertical.***

Los perfiles de las velocidades se modifican en donde existe la presencia del arte de cultivo. Notándose aumento en las magnitudes de las velocidades en los puntos de medición 23 y 22, en la columna 2. También se observan efectos del

Modificación...

arte de cultivo sobre las velocidades, en la columna 4. En todos los casos presentados, las magnitudes de las velocidades se desvanecen en los puntos de medición que corresponden al nivel 1.

Todos los resultados obtenidos de los perfiles se muestran en el anexo B.

## **4.2 Formación de Ondulitas**

### **4.2.1 Experimentos en la posición de 20, Periodo de la ola 3.20 s.**

Los experimentos realizados con las frecuencias del selector en la posición de 20, Periodo de la ola 3.20 s. no se obtuvo formación de las ondulitas por los que no se pudieron comparar los estimados del largo y alto de las ondulitas.

### **4.2.2 Separación entre las esferas de 10 cm.**

Las longitudes teóricas tienen un perfil suavizado. En el caso de la posición del selector en 30 se observa un mayor tamaño de longitud de la ondulita en la columna 3 y los valores más pequeños en las columnas 0 y 4, siendo la longitud esperada más corta en la columna 0, que es donde no hay afectación debida a la estructura.

Las longitudes experimentales muestran una mayor fluctuación de los valores medidos. En ambos casos el valor medido de la longitud de la ondulita en donde todavía no existe ningún efecto de la estructura es menor que el mayor tamaño encontrado.

### Modificación...

La mayor fluctuación encontrada en los valores medidos de la longitud de la ondulita fue para la posición del selector de 30. Siendo también en esta posición donde se midieron los valores más altos. En ambos casos se observa una disminución marcada en los valores encontrados en las columnas 3 y 4, recordando que hay una esfera en medio de esas dos columnas de medición, pareciera que es un efecto acumulado de la estructura en lecho arenoso.

También se observa un cambio en el comportamiento de las longitudes teóricas de los dos experimentos y de las longitudes experimentales encontradas.

Las alturas teóricas de la ondulita se comportan más suavemente encontrándose los valores más pequeños en las columnas 0 y 4, que es donde no se espera que haya afectación debida a la estructura presente en los experimentos. Los valores más altos los encontramos en la columna 3 (Tabla XLIX).

Los valores experimentales encontrados para la posición del selector de 30 se aproximan bastante a los valores teóricos, sin embargo, el perfil que forman es más fluctuante, encontrándose una disminución en los valores alrededor de las columnas 3 y 4. En el caso de la posición 40 en el selector, los valores son menores que los encontrados en el experimento anterior. Tal vez, debido a que se espera que el tren de olas sea más energético y a la existencia de una estructura, se dando un efecto de lavado (Tabla L).

**Tabla XLIX Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 10 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

sv3030	3030	10 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	A (cm)	
36.64	0.12	1.66E-03	1.60	8.78	11.06	Saltación
17.78	0.18	5.69E-04	2.19	12.04	5.37	Suspensión
14.99	0.20	4.48E-04	2.28	12.52	4.52	Suspensión
11.68	0.23	3.22E-04	2.38	13.09	3.52	rodante
34.18	0.12	1.49E-03	1.68	9.21	10.31	Saltación

**Tabla L Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 10 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

sv3040	3040	10 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo	Coefficiente de fricción	Parámetro de Shields	Altura ondulita	Longitud ondulita	Excursión orbital	Tipo de transporte
u (cm/s)	fw	$\theta$ ws	$\Delta r$ (cm)	$\lambda r$ (cm)	A (cm)	
18.10	0.20	6.84E-04	2.18	11.98	3.99	Saltación
12.00	0.25	3.72E-04	2.37	13.04	2.64	rodante
12.56	0.25	3.98E-04	2.36	12.94	2.77	rodante
13.27	0.24	4.34E-04	2.33	12.82	2.92	rodante
20.56	0.19	8.33E-04	2.10	11.56	4.53	Saltación

#### 4.2.2.1 Prueba t de Student

La Tabla XLVI muestra que no hay diferencia entre los datos experimentales para los y los datos calculados a partir de las mediciones de velocidad, para los periodos de ola de 1.89 s. Pero si muestra una diferencia significativa entre los

### Modificación...

datos obtenidos experimentalmente y los datos obtenidos de los cálculos, para el periodo de la ola de 1.39s. Esto puede significar que para olas con menor periodo y mayor frecuencia, la estructura está modificando los patrones de formación de las ondulitas. Pues los datos teóricos, obtenidos en los cálculos son para condiciones en donde no está presente el arte de cultivo, en nuestro caso la estructura de simulación.

#### **4.2.3 Separación entre las esferas de 15 cm.**

Las longitudes experimentales se mantienen en un mismo intervalo de magnitud. Se encontraron los valores esperados bajos en la columna 0, donde no existe ningún tipo de influencia debida a la estructura. Es contrastante observar que el valor más bajo esperado para la longitud en la posición de 40 se encuentra en la misma columna que el valor más alto esperado para la posición de 30.

Los valores experimentales de la longitud de las ondulitas encontrados son marcadamente menores que los valores esperados. El perfil que presentan los valores experimentales y los valores teóricos son completamente diferentes, no correspondiéndose incluso los valores de los experimentos entre sí. Lo que se observa es una fluctuación mayor entre los valores encontrados para el experimento en la posición del selector en 40. En el caso del experimento en la posición del selector en 30 se encontró que el valor mayor de la longitud de la

Modificación...

ondulita se encontró al principio del área de experimentación, lo cual es alrededor de la columna 0.

En la comparación de alturas, se observan comportamientos similares que los encontrados para los valores de las longitudes de las ondulitas. Los valores experimentales y esperados de las alturas de las ondulitas son más cercanos para estos dos experimentos. En el caso de la posición de 30 en el selector, se obtuvo el mayor valor para la medición más cercana a la columna 0, y un posterior decremento en los valores y los valores menores al rededor de la columna 3 (Tabla LI). En el caso del experimento de la posición del selector en 40, también se observa una marcada fluctuación en los valores medidos, en general se observa una disminución neta de los valores, pero no se observa un comportamiento marcado (Tabla LII).

**Tabla LI Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para h=30 cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 15 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

r3030	3030	15 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
16.40	0.19	5.11E-04	2.23	12.28	4.95	Suspensión
12.45	0.21	3.37E-04	2.36	12.96	3.76	rodante
4.66	0.36	7.87E-05	2.60	14.30	1.41	sin movimiento
8.42	0.26	1.87E-04	2.49	13.66	2.54	sin movimiento
12.44	0.21	3.38E-04	2.36	12.96	3.75	rodante

**Tabla LII Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 15 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

r3040	3040	15 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
21.63	0.19	8.94E-04	2.07	11.37	4.76	Saltación
24.61	0.18	1.09E-03	1.98	10.86	5.42	Saltación
25.79	0.17	1.16E-03	1.94	10.66	5.68	Saltación
24.71	0.17	1.09E-03	1.97	10.84	5.44	Saltación
19.86	0.20	7.86E-04	2.13	11.68	4.37	Saltación

#### 4.2.3.1 Prueba t de Student

Los resultados de la prueba estadística mostrados en la Tabla XLVII muestran resultados de discordancia estadística entre los datos encontrados experimentalmente y los datos calculados. Esto podría significar que la presencia del arte de cultivo altera completamente el régimen de velocidades del flujo. En el caso de periodo de la ola de 1.89 s, y al ver los resultados mostrados en la Tabla LI y la Tabla LII se puede distinguir que se anula el transporte de sedimento. Los valores de velocidad pasan de ser, en la columna 0, suficientes para que se presente el transporte a valores, en las columnas siguientes, donde las velocidades no son las suficientes para que se pueda dar el transporte de sedimento. En el caso de periodo de la ola de 1.39 s, se muestra una respuesta contraria, los valores de velocidades aumentan donde la influencia de la estructura de simulación es más marcada. Estos aumentos en los valores de las velocidades se presentan sobre todo bajo las columnas 1, 2 y

3. Se observa, que las esferas, hacen un efecto sobre las velocidades aumentando su valor. De mayor manera, que para los experimentos con la separación entre las esferas de 10 cm, existe mayor influencia por parte la estructura de simulación sobre el flujo general de la ola.

#### **4.2.4 Separación entre las esferas de 20 cm.**

Los valores esperados de la longitud de las ondulitas son mayores a los encontrados experimentalmente. En el caso de la posición del selector de 30 el menor valor esperado se encontró en la columna 0, que es donde no existe ninguna afectación por la estructura y el valor mayor se encontró en la columna 3. Para la posición del selector de 40 el perfil de los valores es más suave y los valores mayores y menores de la longitud de la ondulita están en las columnas 2 y 1 respectivamente.

En el caso de los datos experimentales para la posición del selector de 30, los valores medidos son más fluctuantes, encontrándose un valor bajo de la longitud de la ondulita el rededor de la columna 0, sin embargo los valores más bajos alrededor de las columnas 2 y 4. Un pequeño incremento del valor alrededor de la columna 3. Para la posición de selector en 40, se observa un perfil variante pero en un intervalo menor que el anterior experimento. El mayor valor para la longitud de la ondulita se encontró alrededor de la columna 0. Los valores obtenidos experimentalmente para este caso, son menores que los valores esperados.

Para las alturas se observa un comportamiento igual al de las longitudes de las ondulitas. Para los datos experimentales en la posición del selector de 30 se encontraron los valores mayores antes y después de la columna 1. Valores bajos alrededor de las columnas 2 y 3 (Tabla LIII). En la posición del selector de 40 los datos experimentales son menores que los valores del anterior experimento a excepción de los valores tomados alrededor de la última columna y en la columna 0 en donde los valores son muy similares (Tabla LIV).

**Tabla LIII Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 30 y separación entre las esferas de 20 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

p3030	3030	20 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
40.90	0.11	1.94E-03	1.46	8.05	12.34	Saltación
34.30	0.13	1.50E-03	1.67	9.19	10.35	Saltación
19.57	0.17	6.59E-04	2.13	11.73	5.91	Saltación
12.41	0.22	3.39E-04	2.36	12.97	3.74	rodante
26.77	0.14	1.04E-03	1.91	10.49	8.08	Saltación

**Tabla LIV Resultados de los promediados para la ola de los cálculos hechos a partir de las velocidades en el fondo para  $h=30$  cm, posición del selector en 40 y separación entre las esferas de 20 cm. Con el lecho arenoso presente en los experimentos.**

q3040	3040	20 cm	Teórico			
Velocidad en el fondo u (cm/s)	Coefficiente de fricción fw	Parámetro de Shields $\theta$ ws	Altura ondulita $\Delta r$ (cm)	Longitud ondulita $\lambda r$ (cm)	Excursión orbital A (cm)	Tipo de transporte
19.65	0.17	6.58E-04	2.13	11.72	5.93	Saltación
22.25	0.16	7.94E-04	2.05	11.27	6.71	Saltación
12.89	0.21	3.56E-04	2.34	12.88	3.89	rodante
14.20	0.20	4.07E-04	2.30	12.66	4.28	rodante
19.32	0.17	6.40E-04	2.14	11.77	5.83	Saltación

#### **4.2.4.1 Prueba t de Student**

La Tabla XLVIII muestra que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los datos experimentales y los datos calculados a partir de las velocidades. Con este resultado, se puede argumentar que la estructura de simulación del arte de cultivo, no representa ningún cambio en los patrones de formación de las ondulitas. En contraparte, para el periodo de la ola de 1.39 s, muestra que la estructura de simulación si ejerce influencia sobre los patrones de formación de las ondulitas como un cambio en las magnitudes de las velocidades comparadas a las magnitudes esperadas de las velocidades en ausencia de la estructura de simulación (Tabla LIII y Tabla LIV).

La distribución y magnitudes de las velocidades para ambos experimentos, no poseen ninguna concordancia entre ellas. Pues en el caso del periodo de 1.89 s, el mayor valor de velocidad se encontró en la columna 0. El mayor valor de velocidad para el periodo de la ola de 1.39 s, fue en la columna 1. Los menores valores de velocidad se encontraron en las columnas 3 y 2 respectivamente.

#### **4.3 Rugosidad**

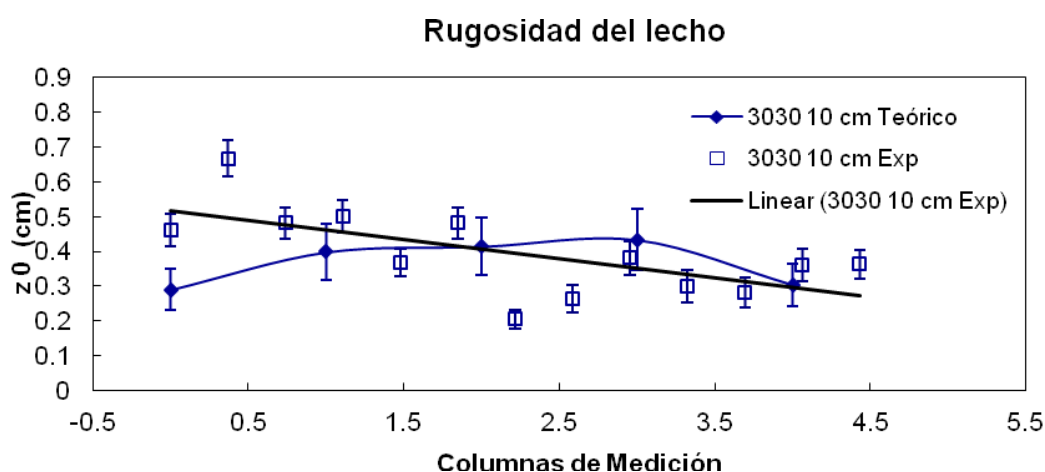
Un parámetro que relaciona el largo de la ondulita con el ancho de la ondulita es el parámetro de rugosidad hidráulica (Grant y Madsen, 1982). Las variables involucradas para el cálculo de la rugosidad hidráulica se muestran en la ecuación 21.

Modificación...

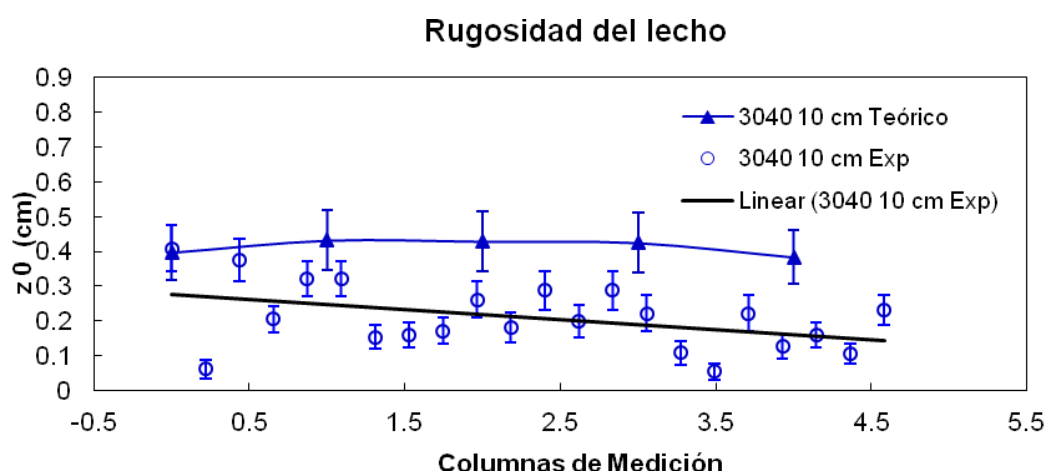
$$z_0 = \frac{(\text{altura de la ondulita})^2}{\text{longitud de la ondulita}} \quad (21)$$

Las Figura 32, 33 y 34 presentan los valores calculados para la rugosidad para las tres diferentes separaciones de las esferas en la estructura. Con estos valores se obtuvieron los perfiles de comportamiento de las rugosidades.

#### 4.3.1 Separación entre las esferas de 10 cm.



**Figura 32 Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 10 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.**



**Figura 33** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 10 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.

El comportamiento de la rugosidad en los casos teóricos tiene una evolución bastante suave encontrándose los valores más pequeños de la rugosidad al principio y al final del área de experimentación. Los mayores valores de la rugosidad en el caso teórico se presentan en las columnas de medición 2 y 3 (Figura 32 y Figura 33).

Los valores de la rugosidad experimentales muestran un comportamiento muy irregular al contrario de lo encontrado para los datos teóricos. Se encontró además un valor muy alto para la posición del selector de 30 y un valor muy pequeño en la posición del selector de 40 en la zona de experimentación ubicada por delante de la columna 0. Los valores más bajos para la posición del

Modificación...

selector de 30 esta alrededor de las columnas 2 y 3 y después otra disminución de los valores alrededor de las columnas tres y cuatro. En la posición del selector de 40 presenta su valor más bajo entre las columnas 2 y 3.

#### 4.3.2 Separación entre las esferas de 15 cm.

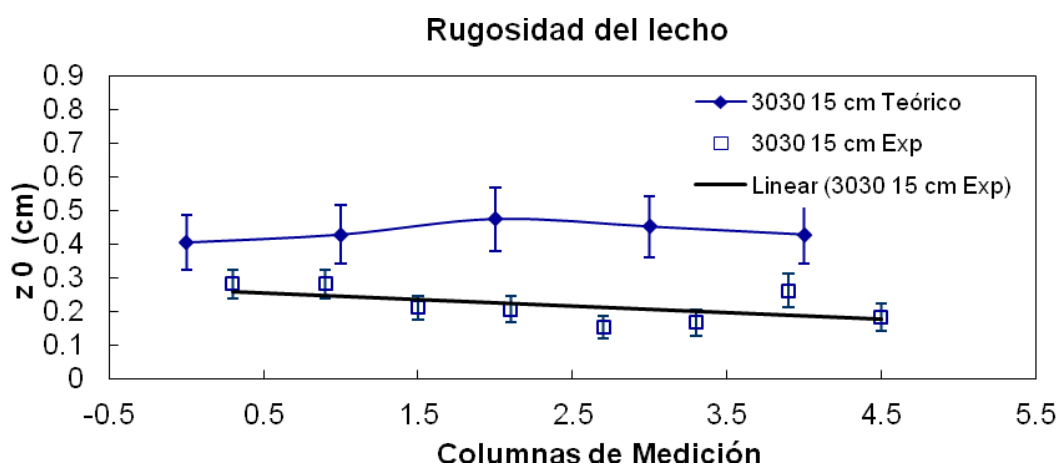
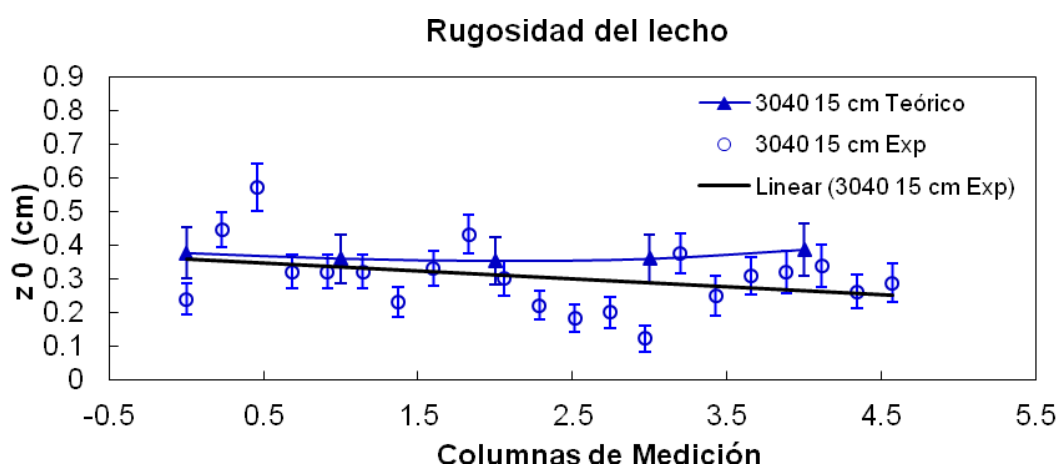


Figura 34 Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 15 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.



**Figura 35** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 15 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.

Los valores teóricos para los experimentos con la separación de 15 cm entre las esferas muestran un comportamiento suave. En los casos experimentales los valores de la rugosidad encontrados muestran comportamiento más irregular (Figura 34 y Figura 35). Los valores para la posición del selector de 40 son los que más cambian a lo largo del área de medición. Para la posición del selector de 30, los valores encontrados son los más bajos. En ambos casos el valor más pequeño encontrado de la rugosidad esta alrededor de la columna 3 y un ligero incremento alrededor de la columna 4.

### 4.3.3 Separación entre las esferas de 20 cm.

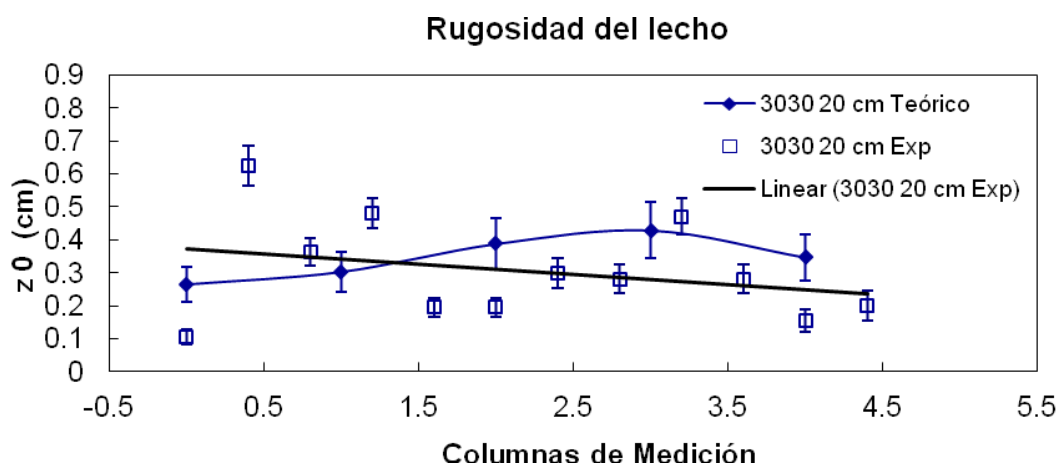
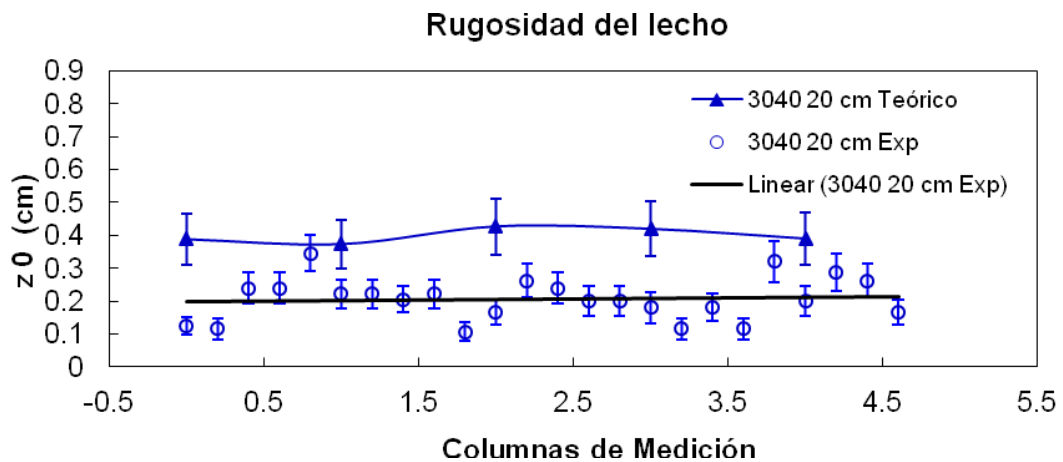


Figura 36 Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 20 cm, posición del selector manual de frecuencias de 30, correspondiente a un periodo de 1.89 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.

Para los experimentos con distancia de separación de las esferas de 20 cm, los datos teóricos de la rugosidad calculados tienen un comportamiento muy suave y muy similar entre ellos (Figura 36 y Figura 37). El experimento para la posición del selector de 30 presenta la mayor fluctuación de los valores de rugosidad siendo los valores más altos alrededor de la columna 1 y la columna 3. Valores bajos del rugosidad alrededor de las columnas 2 y 3, los valores más bajos se encontraron alrededor de las columnas 0 y 4, que es donde se espera haya menor influencia debida a la estructura presente en el experimento.



**Figura 37** Comparación de las rugosidades de las ondulitas, para condiciones experimentales en donde se obtuvo la formación de las mismas. Las condiciones experimentales corresponden a la separación entre las esferas de 20 cm, posición del selector manual de frecuencias de 40, correspondiente a un periodo de 1.39 s. Los valores de rugosidades se obtuvieron a partir de los datos experimentales de longitud y altura de las ondulitas. La línea azul con símbolos sólidos representa los datos para la rugosidad obtenidos de cálculos a partir de las velocidades medidas experimentalmente. La línea azul con símbolos huecos representa los datos de rugosidad medidos directamente durante los experimentos. La línea negra muestra la tendencia de los datos experimentales representados en la línea azul con los símbolos huecos.

#### **4.4 Descripción del área de experimentación por secciones.**

Debido, principalmente a las características observadas en los experimentos y a la posición dentro del área de experimentación de la estructura de simulación, se ha decidió dividir la discusión de los resultados obtenidos y observados en las siguientes secciones o fragmentos (Figura 38).

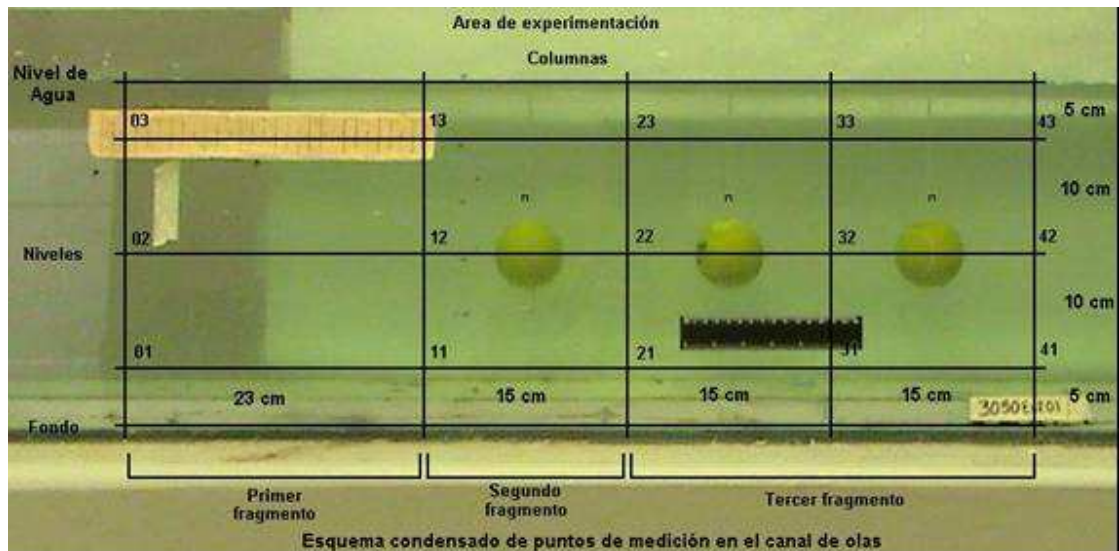


Figura 38 Arreglo de esferas con el esquema de los puntos de medición superpuesto en la imagen. También se muestra en la parte inferior de la superposición los fragmentos considerados para la descripción del área de experimentación.

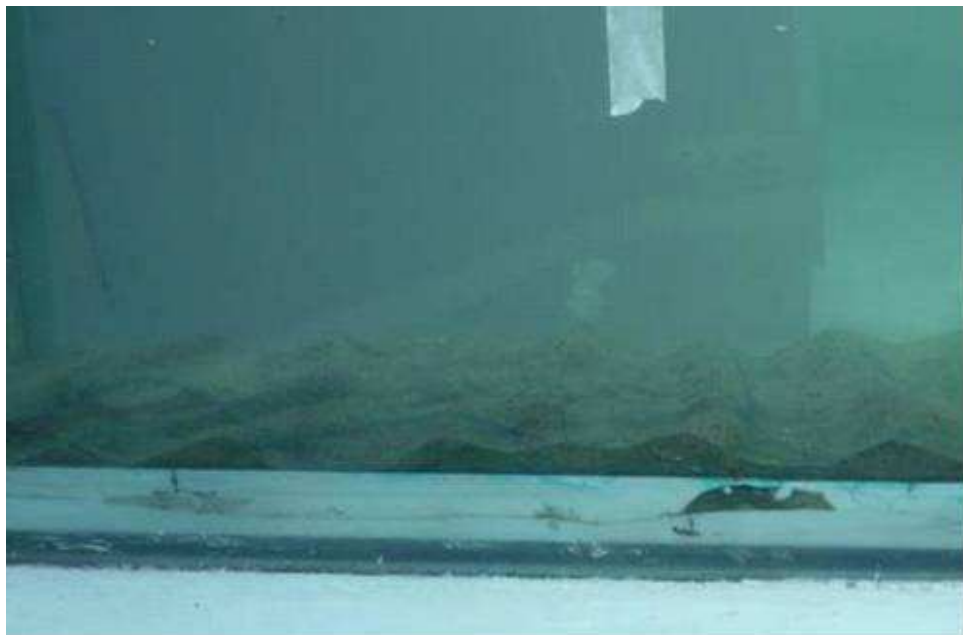
#### 4.4.1 Primer fragmento entre columnas 0 y 1.

##### Características de las ondulitas

En los resultados experimentales se observa una franja de transición por delante de la columna cero y antes de llegar a la columna 1 (Figura 39). En los datos experimentales existe un aumento o disminución de los valores encontrado para distintos experimentos, no presentan tendencia en ningún sentido, pero en la mayor parte de los experimentos se observa un cambio bien marcado, en los valores de altura y longitud de onda de las ondulitas. En particular, en los diversos experimentos para los valores de la longitud de las ondulitas, se observa que para la separación entre las esferas de 10 cm, en el periodo de 1.89 s, hubo un aumento general de los valores encontrados; en el periodo de 1.39 s hubo una disminución de los valores encontrados. Separación entre las esferas de 15 cm, en el periodo de 1.89 s, los valores encontrados se

Modificación...

mantuvieron sin variación aparente. Sin embargo, para el periodo de 1.39 s, los valores de la longitud de las ondulitas aumentaron. En la comparación de las alturas de las ondulitas, estas siguieron el mismo patrón de comportamiento que el mencionado arriba para la longitud de las ondulitas, a excepción de la separación entre las esferas de 20 cm, en donde los valores de longitud de onda aumentaron para el periodo de 1.89, y tuvieron un cambio abrupto de primero un valor muy pequeño y después un valor muy grande, para el periodo de 1.39 s.



**Figura 39** Primer fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm.

### **Rugosidad**

En las Figura 32 y 33 de la rugosidad del lecho para la separación de 10 cm entre las esferas estos cambios bien marcados de aumento o disminución justo

### Modificación...

por delante de las columna 0 son más observables, en el periodo de 1.89 s se observa un aumento en el valor de la rugosidad y en el periodo de 1.39 se observa una disminución de este valor. Para la separación de 15 cm entre las esferas, también hay cambio marcado de aumento y disminución en los valores de la rugosidad, que se da de forma contraria a la separación de 10 cm entre las esferas, para el periodo de 1.89 s se observa una ligera disminución en el valor de la rugosidad, para el periodo de 1.39 s, se presenta aumento en los valores de la rugosidad. En la separación de 20 cm entre las esferas, se presentan aumentos en los valores de la rugosidad en ambos casos, el más marcado para la posición del selector de 30, periodo de la ola de 1.89 s.

#### **4.4.2 Segundo fragmento Columnas 1 a 2**

##### **Características de las ondulitas**

En esta segunda sección, comprendida entre las columnas de medición 1 y 2 (Figura 40). Para las longitudes de las ondulitas. En la separación de 10 cm entre las esferas: para el periodo de 1.89 s, el valor disminuye y se presenta la formación de una hondonada en esa zona del área de experimentación. Para el periodo de 1.39 s, empieza una disminución en las magnitudes de la longitud de las ondulitas. Para las alturas de las ondulitas, se presenta una disminución en los dos casos, también una hondonada menos marcada.

En la separación de 15 cm entre las esferas, las longitudes de las ondulitas empiezan a disminuir para el periodo de 1.89 s, y en el periodo de 1.39 s, se

Modificación...

forma una hondonada en esa sección. En lo concerniente a las alturas de las ondulitas para el periodo de 1.89 s empieza la hondonada de esta sección, la hondonada va aumentando a su proximidad con la columna 2 en el periodo de 1.39 s.



**Figura 40 Segundo fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm.**

En la separación de 20 cm entre las esferas, las longitudes de las ondulitas muestran un pequeño pico o incremento en su magnitud en el periodo de 1.89 s, sin embargo las longitudes de las ondulitas se mantienen en valores constantes para el periodo de 1.39 s. Las alturas de las ondulitas muestran el inicio de la formación de una hondonada para el periodo de 1.89 s, esta hondonada muestra un mayor desarrollo para el periodo de 1.39 s.

### **Rugosidad**

En la Figura 32 y 33 de rugosidad del lecho para la separación de 10 cm entre las esferas. Se muestra la presencia de una hondonada para los dos periodos en los que se formaron las ondulitas.

En el caso de la separación 15 cm entre las esferas, se inicia la formación una pequeña hondonada en el periodo de 1.89 s, y solo fluctuaciones de los valores de rugosidad sin ninguna tendencia clara se presentan en el periodo de 1.39 s (Figura 34 y Figura 35).

Las Figura 36 y 37 para la separación 20 cm entre esferas muestran el inicio de de formación de una hondonada en el periodo de 1.89 s. Los valores de la rugosidad se mantienen para el periodo de 1.39 s.

#### **4.4.3 Tercer fragmento Columnas 2 a 4**

En esta zona de área de experimentación se observaron los mayores efectos de la estructura de simulación. Pareciera que se presenta un efecto de deslave alrededor de estas columnas, como si la estructura de simulación estuviera favoreciendo la permanente remoción de sedimento.

#### **Características de las ondulitas**

Para la separación entre las esferas de 10 cm. Las longitudes de las ondulitas muestran una hondonada muy marcada y un cambio muy importante en sus valores para el periodo de 1.89 s. y una pequeña hondonada en el periodo de

Modificación...

1.39 s. Para las alturas de las ondulitas también se observa un comportamiento similar pero menos marcado.

Para la separación entre las esferas de 15 cm (Figura 41). Solo se observa disminución de las magnitudes de las longitudes de las ondulitas para el periodo de 1.89 s y una pequeña hondonada justo hasta la columna 4. Las alturas de las ondulitas presentan el mismo comportamiento que las longitudes de las ondulitas, mostrándose que los valores de ambos experimentos son más próximos entre ellos.



**Figura 41** Tercer fragmento o subsección del área de experimentación para el experimento r3040. Condiciones experimentales, periodo 1.39 s y separación entre las esferas de 15 cm.

Para la separación de 20 cm entre las esferas. Las longitudes de las ondulitas muestran una hondonada muy marcada para el periodo de 1.89 s, con un ligero aumento muy cerca de la columna 3. En el caso del periodo de 1.39 s, los valores de las longitudes de las ondulitas se mantienen. Las alturas de las ondulitas muestran hondonada con un pico alrededor de la columna 3 para el

Modificación...

periodo de 1.89 s, 30. Para el periodo de 1.39 s, los valores de las alturas se mantienen.

### **Rugosidad**

Para la separación entre las esferas de 10 cm, las Figura 32 y 33 de rugosidad muestra valores menores con un ligero pico en columna 3 para el periodo de 1.89 s. También valores menores con una caída entre las columnas 2 y 3 para el periodo de 1.39 s.

Para la separación entre las esferas de 15 cm, la Figura 34 y 35 de rugosidad muestra que sus valores se mantienen para el periodo de 1.89 s. Muestran, además, una fluctuación mayor para el periodo de 1.39 s, que, sin embargo, no muestran un comportamiento marcado.

Para la separación entre las esferas de 20 cm, la Figura 36 y 37 de rugosidad muestra valores menores con un pico alrededor de la columna 3 para el periodo de 1.89 s. se muestra también que los valores de la rugosidad se mantienen y se presenta un pequeño aumento en los valores alrededor de la columna 4, para el periodo de 1.39 s.

### ***4.5 Discusión general***

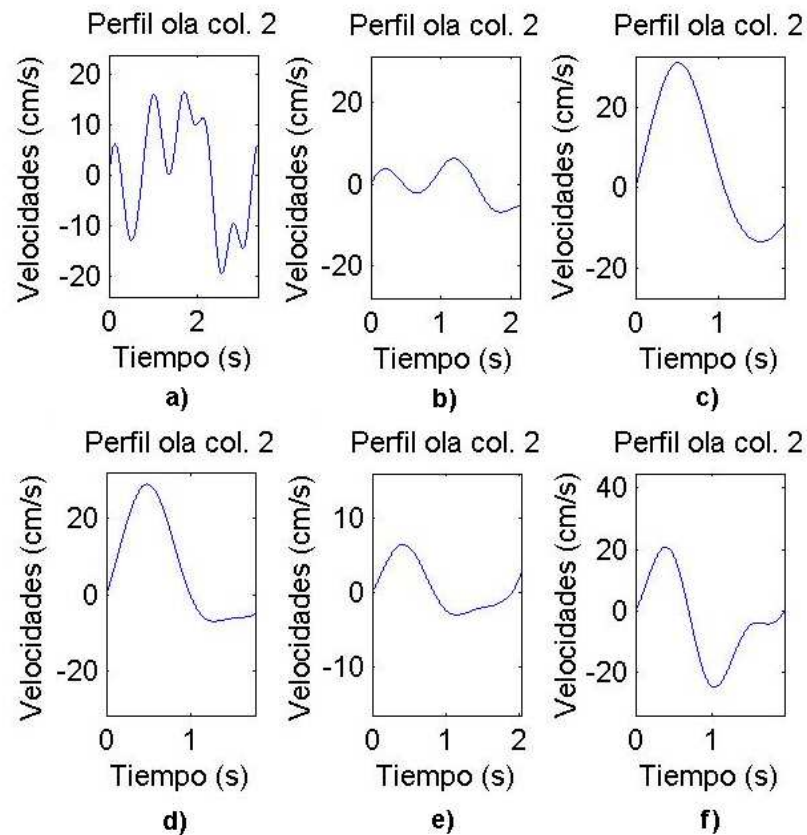
El sensor de medición de las velocidades, el ADV (Acoustic Doppler Velocimetry), mide los valores de velocidad en las tres direcciones geométricas “x”, “y” y “z”. Las mediciones se dividieron principalmente en columnas. Las

### Modificación...

columnas de izquierda a derecha corresponden a la nomenclatura de cero a cuatro. Siendo la columna cero, donde el tren de olas se encuentra libre de efectos, más allá, de los correspondientes al natural desenvolvimiento del canal de olas. Las siguientes columnas (1 a 4), tienen presentes los efectos debidos a la presencia del arte de cultivo.

En general se observa que para las diferentes condiciones experimentales, los resultados y afectaciones debidos a la presencia del arte de cultivo, son completamente distintos. Pues en las diferentes combinaciones de periodos del tren de olas, separación entre las esferas y presencia o no del lecho arenoso, los perfiles de las velocidades resultantes son diferentes para los diferentes puntos de medición. Los resultados de estas diferentes combinaciones de condiciones experimentales no pueden ser comparados columna a columna y punto a punto.

Modificación...



**Figura 42** Comparación de los diferentes perfiles de las velocidades en la dirección de propagación de la ola. Estas velocidades corresponden al punto de medición 33 y a periodo de la ola de 1.89 s. a) Separación entre las esferas de 10 cm, b) Separación entre las esferas de 15 cm, c) Separación entre las esferas de 20 cm, d) Separación entre las esferas de 10 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal, e) Separación entre las esferas de 15 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal, f) Separación entre las esferas de 20 cm con el lecho arenoso presente en el fondo del canal.

Pues, por ejemplo, en la Figura 42, se muestran los perfiles de las velocidades resultantes medidas en el punto de medición 33, en la dirección de incidencia del tren de olas. Ninguno de los perfiles mantiene el comportamiento de los demás perfiles de velocidades. Incluso si se comparan los resultados de los perfiles de velocidades de las mismas condiciones de separación entre las esferas y periodo de la ola, con presencia y en ausencia del lecho arenoso, tampoco se observa similar comportamiento de los perfiles de velocidades. Solo

### Modificación...

basándose en una de las condiciones experimentales, ya sea separación entre las esferas o periodo de la ola, con las que se generaron los experimentos, no se puede inferir el comportamiento que se tendrá en el perfil de velocidades resultante.

Con los resultados de la medición de las velocidades se hicieron una serie de cálculos basados en las ecuaciones descritas en la sección de "Consideraciones teóricas previas". Uno de los resultados más importantes a partir de estos cálculos, para el presente trabajo, es el tipo de transporte que corresponde a los valores de las velocidades medidos (Fentie et al., 2004).

Tomando como referencia el periodo del tren de olas, para el periodo de 3.20 s, en general las velocidades encontradas no son suficientes para alcanzar la velocidad de umbral (Komar et al., 1973) de movimiento, por lo que se confirmó la ausencia de formación de las ondulitas. Sin embargo, al contrario de los resultados generales de los demás experimentos con este mismo periodo, en ausencia del lecho arenoso en el fondo del canal, las velocidades medidas si rebasan la velocidad de umbral de movimiento, para el experimento 3020E, con separación de 10 cm entre las esferas. Esto significa, por lo menos, para las características de este experimento, la presencia del lecho arenoso modifica, en magnitud, las velocidades del flujo cercanas al fondo del canal.

En los experimentos con periodo de la ola de 1.89 s, son más visibles, los efectos debidos a la presencia del arte de cultivo. En los seis diferentes

### Modificación...

experimentos para este periodo, resultados de las velocidades obtenidas son completamente distintos. En los experimentos, con separación entre las esferas de 10 cm y sin lecho arenoso presente, las velocidades por debajo del arte de cultivo no son suficientes para rebasar la velocidad de umbral de movimiento. Sin embargo, cuando se encuentra presente el lecho arenoso, las velocidades se convierten en tales, que se rebasa la velocidad de umbral de movimiento. Para las condiciones experimentales, con separación de 15 cm entre las esferas, sucede lo opuesto a lo mencionado para la separación de 10 cm entre las esferas. Sin presencia del lecho arenoso, las magnitudes de las velocidades rebasan el umbral para que exista el movimiento. Con presencia del lecho arenoso, las magnitudes de las velocidades caen, de tal forma, que ya no se espera que haya transporte en la zona de influencia del arte de cultivo. Con la separación de 20 cm entre las esferas, no se observa ninguno de los comportamientos anteriores. Ahora se nota que, las magnitudes de las velocidades, aumentan con la presencia del lecho arenoso, con la única excepción, de los valores de velocidad correspondientes al punto de medición 13, que se mantienen dentro del mismo intervalo de magnitud.

Para el periodo de ola de 1.38 s, en la separación entre las esferas de 10 cm, las magnitudes de las velocidades cambian en presencia o ausencia del lecho arenoso. No obstante, no se observa un efecto concreto, es decir, para algunos puntos de medición las velocidades aumentan, en comparación de su contraparte y para los puntos restantes las magnitudes disminuyen, por lo que

### Modificación...

no hay efecto fijo. Lo que sí, se mantiene es una mayor magnitud de las velocidades en el sentido contrario con el que incide el tren de olas. Con la separación entre las esferas de 15 cm, en general se observa un aumento en las magnitudes de las velocidades de la ola cuando se encuentra presente el lecho arenoso. Al igual que el caso anterior, las magnitudes mayores de las velocidades de la ola, son en la fase negativa del tren de olas. Para la separación entre las esferas de 20 cm, las velocidades en ausencia del lecho arenoso, parecen ser caóticas, en el sentido, de diferir mucho entre punto y punto de medición. Por el contrario, con el lecho arenoso presente, este comportamiento se reduce, notándose un menor cambio, en las magnitudes de las velocidades, entre punto y punto de medición.

Por último, la formación de las ondulitas no se presentó en la manera que se esperaba con respecto, a lo previsto por la teoría (Leeder, 2011), la clasificación de los atributos morfológicos de las ondulitas se muestra en la Figura 43.

SMALL-SCALE BED FORMS: $\lambda < 20$ cm	$< 40$ cm/s -0-4 cm/s	$< 40$ cm/s -5-10 cm/s	$< 40$ cm/s > 10 cm/s
Bed form	Symmetric small ripples (SSR) regular, 2D, symmetrical, shrap crests, straight flanks, broad troughs	SSR + asymmetric small ripples (ASR) more irregular, 2-2.5D, still symmetrical rounder crests, some straight and some biconvex flanks	ASR + asymmetric large ripples irregular, 3D, asymmetrical, larger $\lambda$ and height, round biconvex profiles, pronounced scour on lower end of stoss
Symmetry index	-1.2	-1.5	
Dip of lee side	11-18°		*24-27° dip of lee side increases with increasing $Uu$
Roundness index	0.44	-0.50	> 0.50
Ripple index	generally between 8-12 for all bed forms		
Orbital diameter/ wavelength	8-15	8-15	8-15

Figura 43 Atributos morfológicos de las formaciones en el lecho arenoso a escala pequeña para flujo oscilatorio. Las tres clasificaciones propuestas son (SSR) Ondulitas simétricas pequeñas, (ASR) Ondulitas asimétricas pequeñas y (ALR) Ondulitas asimétricas grandes. (Tomado de Dumas et al., 2005)

En general, los resultados de formación de las ondulitas, cuando la hubo (Alexander et al., 2001), mostraron secciones de formación o divisiones a lo largo del área de experimentación, por lo que, secciones atrás, se dio una descripción de cada una de ellas. Estas secciones se diferenciaron entre si, por tener el mismo tipo de formación (Figura 44 y Figura 45). De los resultados obtenidos se puede decir que la presencia de la estructura del arte de cultivo, hizo las veces, de “escavado” o erosión en la arena que se encontraba por debajo del arte de cultivo. En general, las características que definen las ondulitas, longitud y altura de la ondulita, fueron menores a las esperadas en condiciones libres de la presencia del arte de cultivo. Estos resultados, también se ven reflejados en la magnitud de la rugosidad, pues, al igual que las otras dos características de las ondulitas su magnitud es menor (Testik et al., 2007).

Modificación...

En particular, la presencia del arte de cultivo, parece favorecer, para los periodos de la ola de 1.89 s y 1.39 s, la turbulencia alrededor de la esferas y cercanos al fondo del canal. Otra técnica de medición de velocidades, distinta al ADV, podría ser útil para corroborar lo anteriormente dicho.

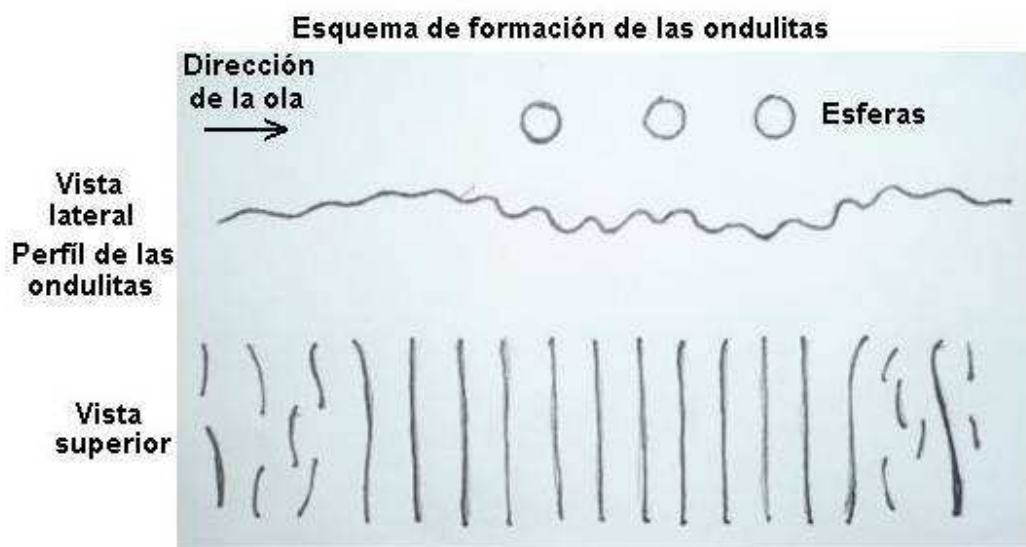


Figura 44 Esquema de formación de las Ondulitas para un periodo de 1.39 s, y separación entre las esferas de 20 cm.

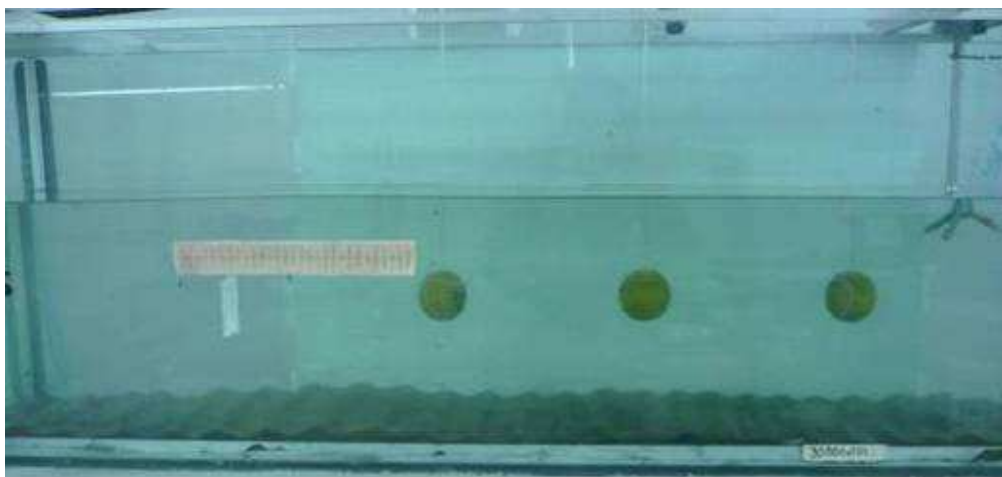


Figura 45 Imagen que muestra los resultados de formación de las ondulitas para un periodo de 1.39 s y separación entre las esferas de 20 cm.

## 5 Conclusiones

En el canal de olas del laboratorio de fluidos geofísicos de la Facultad de Ciencias Marinas, es posible lograr la formación de Ondulitas (Ripples) arenosas. Las condiciones optimas de formación de dichas ondulitas son tamaño de grano entre 355  $\mu$ m y 250  $\mu$ m, altura de la columna de agua de 30 cm y periodo del tren de olas de 3.20 s, 1.89 s y 1.39 s. Futuros experimentos podrían realizarse para acotar el intervalo del tamaño de grano para la formación de las ondulitas.

Se seleccionaron puntos de medición de las velocidades del flujo representativos para poder comparar los datos en ausencia del arte de cultivo y los datos que pudieron verse afectados debido a la presencia del arte de cultivo. Sin embargo, estos puntos fueron seleccionados para que el sensor ADV, no tuviera efectos sobre los datos medidos. Tomando en cuenta estas consideraciones fue posible medir estas velocidades en los diferentes puntos de medición.

Al comparar el perfil de las velocidades obtenidas en las mediciones hechas en la columna cero, donde el tren de olas avanza sin obstáculos, con las mediciones hechas en las columnas uno a cuatro, se concluye, que la sola presencia del arte de cultivo modifica el perfil y la magnitud de las velocidades

### Modificación...

de flujo oscilatorio que pasa por él. También, se concluye que, la presencia del lecho arenoso afecta el comportamiento, magnitud y perfil, de las velocidades cercanas al fondo del canal de olas. La sección 2.3.1 de resultados de los perfiles interpolados a partir de las mediciones y en el anexo B, se muestran gráficamente los resultados que llevan a la conclusión de cambio de magnitud y perfil de las velocidades en ausencia y presencia del arte de cultivo, mientras que los resultados a partir de los cálculos de la sección 2.3.2 muestran que existe afectación del comportamiento de las velocidades cercanas al fondo.

En los casos y condiciones en las cuales se logró la formación de ondulitas, estas se pudieron medir directamente del área de experimentación. Se pudo igualmente, relacionar las características morfológicas principales de las ondulitas mediante el cálculo de la rugosidad (Grant y Madsen, 1982). Contando ya con la presencia del arte de cultivo en el área de experimentación, las condiciones bajo las cuales se formaron las ondulitas se vieron modificadas. Teniéndose esta formación para periodos del tren de olas de 1.89 s y 1.39 s. Además, se concluye que, si bien, si se formaron las ondulitas, estas cambiaron, no tanto en forma como en tamaño. Se obtuvo, que, las características de altura y longitud de las ondulitas, fueron de magnitudes menores a las esperadas en ausencia del arte de cultivo. La teoría utilizada muestra que los valores de las características principales de las ondulitas deben ser mayores a las obtenidas para las velocidades cercanas al fondo, asimismo el valor de la rugosidad también disminuyó con respecto al esperado

### Modificación...

teóricamente y en el caso del periodo del tren de olas de 3.20 s, simplemente no se obtuvieron ondulitas. Por lo que, el arte de cultivo, puede también, efectuar un proceso de escarbado sobre el lecho arenoso. Este puede ser un resultado importante porque significaría que el arte de cultivo efectúa una acción sobre el fondo y remover el sedimento que se encuentra por debajo del arte de cultivo.

Para las diferentes condiciones experimentales, bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas, se concluye que los experimentos que presentaron una mayor movilidad de sedimento por las velocidades encontradas, fueron los experimentos p3030, q3040, r3040 y sv3030. Estos experimentos corresponden a condiciones de separación entre esferas de 20 cm y periodos 1.89 s y 1.39 s, para los dos primeros experimentos mencionados, periodo de 1.39 s y separación de 15 cm entre las esferas para el experimento r3040 y periodo de 1.89 s y separación entre esferas de 10 cm para el experimento sv3030. Por último, se concluye que, de acuerdo a los resultados obtenidos, el experimento que mejores características de transporte de sedimento en suspensión presenta, es el experimento l3040. Por lo que las mejores condiciones experimentales para el transporte de sedimento fueron periodo 1.39 s y 15 cm de separación entre las esferas.

Para confirmar la veracidad de los resultados aquí presentados, surge la necesidad de la repetición y reelaboración de los experimentos realizados. El arreglo experimental utilizado se diseñó tratando de cubrir la mayor generalidad

### Modificación...

de los experimentos. Este diseño cubrió de la forma más robusta posible los fenómenos físicos a estudiar. Por lo que se uso como base para el diseño experimental, las experiencias previas de grupos de investigación tales como Soulsby (1995), Bennett y Bridge (1995), Dumas et al., (2005), Testik et al., (2006) y Voropayev et al., (2007, 2008), por nombrar algunos investigadores y grupos de investigación. Sin embargo, los experimentos podrían mejorarse para confirmar los resultados aquí presentados. Como una forma de mejora en la realización de los experimentos, se propone una distinta clasificación de las características de los experimento, para acotar los fenómenos físicos a estudiar. Reducir el ancho del intervalo del tamaño de grano e incrementar la instrumentación utilizada para la toma de datos. Este incremento en la instrumentación utilizada, puede conllevar a la utilización de otros equipos de medición que utilicen un principio de toma de datos distinto al utilizado en la realización de los experimentos.

**REFERENCIAS**

- Alexander, J., Bridge, J.S., Cheel, R.J., Leclair, S.F., 2001. Bed forms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds. *Sedimentology*, 48, 133-152.
- Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*. 422-I.
- Bagnold, R. A., 1973. The Nature of Saltation and of 'Bed-Load' Transport in Water. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 332 (1591), 473-504.
- Baird, D. C., 1991. Experimentación: una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos. México: Prentice-Hall Hispanoamericana. 207 pp.
- Balasubramanian S., Voropayev S.I., Fernando H.J.S., 2008. Grain sorting and decay of sand ripples under oscillatory flow and turbulence. *Journal of Turbulence*, 9 (17), 1–19.
- Bardach, J.E., Ryther, J.H., McLarney, W.O., 1974. *Aquaculture. The farming and husbandry of fresh water and marine organisms*. 1<sup>st</sup> Ed. New York: Wiley-Interscience. 884 pp.
- Bennett, S.J., Bridge, J.S., 1995. An experimental study of flow, bedload transport and bed topography under conditions of erosion and deposition and comparison with theoretical models. *Sedimentology*, 42, 117-146.
- Bennett, S.J., Bridge, J.S., 1995. The geometry and dynamics of low-relief bed forms in heterogeneous sediment in a laboratory channel, and their relationship to water flow and sediment transport. *Journal of Sedimentary Research*, A65, 29-39.

## Referencias

- Bennett, S.J., Bridge, J.S., Best, J.L., 1998. The fluid and sediment dynamics of upper-stage plane beds. *Journal of Geophysics Research*, 103, 1239-1274.\*
- Bridge, J.S., Bennett, S.J., 1992. A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes and densities, *Water Resources Research*, 28, 337-363.
- Cheng, N. S., 1997. Simplified Settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 149-152.
- Coastal Engineering Research Center (U.S.), 1984. *Shore protection manual*. 4ta Ed. Vol . 2. Washington, D.C.: Department of the Army, U.S.Government Printing Office. 1088 pp.
- Dietrich, W.E., 1982. Settling velocity of Natural Particles, *Water Resources Research*, 18, 1615-1626.
- Dumas, S., Arnott, R.W.C., Southard, J.B., 2005. Experiments of oscillatory-flow and combined-flow bed forms: implications for interpreting parts of the shallow-marine sedimentary record. *Journal of Sedimentary Research* , 75(3), 501-513.
- Fentie, B., Yu, B., Rose., C. W., 2004. Comparison of seven particle settling velocity formulae for erosion modeling. *In: Proc., 13th Int. Soil Conservation Organization Conference, ISCO, Brisbane, Australia*.
- Ferguson, R.I., Church, M., 2004. A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 74, 933-937.
- Fernando H.J.S., Samarawickrama S.P., Balasubramanian S., Hettiarachchi S.S.L., Voropayev S., 2008. Effects of porous barriers such as coral reefs

## Referencias

- on coastal wave propagation. *Journal of Hydro-environment Research*, 1, 187-194.
- Fredse, J., Deigaard, R., 1992. *Mechanics of Coastal sediment transport (Advanced Series on Ocean Engineering)*. 1<sup>st</sup> ed. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd. 393 pp.
- Grant, W. D., Madsen, O. S., 1982. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1), 469-481.
- Grass, A.J., 1970. Initial Instability of Fine Bed Sand. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 96 (HY3), 619-632.
- Hudspeth R. T., Guenther R. B., 2009 .Wavemaker Theories. *In: Y. C. Kim, ed. Handbook of coastal and ocean engineering*. Los Angeles, USA: California State University, Chapter 2 25-56.
- Jarno-Druaux A., Brossard J., Marin F., 2004. Dynamical evolution of ripples in a wave channel. *European Journal of Mechanics. B/Fluids*, 23, 695-708.
- Koganezawa, A., 1979. The Status of Pacific Oyster Culture in Japan. *In: T.V.R. Pillay, & W. Dill, eds. Advances in Aquaculture*. England: Fishing News Books Ltd. Survey, Chapter IV 332–337.
- Komar, P. D., Miller, M. C., 1973. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *Journal of Sedimentary Research*, 43, 1101-1110.
- Komar, P. D., Miller, M. C., 1975. The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stresses under waves. *Journal of Sedimentary Research*, 45, 697-703.
- Leeder, M.R., 2011. *Sedimentology and Sedimentary Basins: From Turbulence to Tectonics*. Second Ed., Oxford ; Malden, MA : Wiley-Blackwell. Chapter

## Referencias

6 & 7. 113-170 & 668-689.

McLean, S. R., 1992. On the Calculation of suspended load for noncohesive sediments. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4), 5759-5770.

McMahon, J., 2008. Piston-type Laboratory Wave Generator, The UNSW@ADFA Journal of Undergraduate Engineering Research, 1 (1), 1-7.

Miller, M. C., McCave, I. N., Komar, P. D., 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24 (4), 507-527.

Neilsen, P., 1992. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport (Advanced Series on Ocean Engineering). 1<sup>st</sup> ed. Singapore: World Scientific Publishing. Vol. 4. 340 pp.

O'Dea, J.F., Newman, J.N., 2007. Numerical Studies of Directional Wavemaker Performance. *In: 28th American Towing Tank Conference*, Ann Arbor , Michigan.

Open University, The, 1999. Waves, tides and shallow-water processes. 2da. Open University Oceanography Team, eds. New York: Pergamon. 227 pp.

Ramos A., H. R., 1987. *Determinación del arte más rentable para el cultivo a nivel comercial del ostión japonés (Crassostrea gigas), en la Bahía de San Quintín*. Tesis de Licenciatura, F. C. M., U. A. B. C.

Reeve, D., Chadwick, A., Fleming, C., 2004. Coastal Engineering: processes, theory and design practice. First Ed. London, Spon Press. 461 pp.

Shields, A., 1936 (in English). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung [Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement]. *Mitteilungen*

## Referencias

*der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*. 26. Berlin: Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau.

Soulsby, R.L., 1997. *Dynamics of Marine Sands. A Manual for Practical Applications*. London: Thomas Telford. 249 pp.

Soulsby, R.L., Whitehouse, R.J.S., 1997. Threshold of sediment motion in coastal environments. *Proc. Pacific Coasts and Ports 97 Conf.*, Christchurch, University of Canterbury, New Zealand, 144-154.

Soulsby, R.L., Hamm, L, Klopman, G, Myrhaug, D., Simons, R.R., Thomas, G. P., 1993. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21, 41-69.\*

Testik F.Y., Voropayev S.I., Fernando H.J.S., 2005. Adjustment of sand ripples under changing water waves. *Physics of Fluids*, 17(7), 072104-072104-8.

Testik F.Y., Voropayev, S.I., Fernando H.J.S., 2005. Flow around a short horizontal bottom cylinder under steady and oscillatory flows. *Physics of Fluids*, 17(4), 047103-047103-12.

Testik F.Y., Voropayev S.I., Fernando H.J.S. Balasubramanian S., 2006. Self-similarity of asymmetric sand-ripple profiles formed under nonlinear shoaling waves. *Physics of Fluids*, 18 (10), 108101-108101-4.

Testik F.Y., Voropayev S.I., Fernando H.J.S., S. Balasubramanian, 2007. Mine burial in the shoaling zone: scaling of laboratory results to oceanic situations. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(1), 204-213.

Testik F.Y., Voropayev S.I., Fernando H.J.S., Balasubramanian S., 2007. Sand ripples dynamics and degradation under oscillatory flow and turbulence. In: C.M. Dohmen-Janssen, S.J.M.H. Hulscher, eds. *Rivers, Coastal and*

## Referencias

- Estuarine Morphodynamics: RCEM* 2007. the Netherlands: Taylor & Francis/Balkema, 379-385.
- Trujillo-Carrera, E. S., Hernández-Walls, R., Navarro-Olache, L. F. 2010. Caracterización de un canal de olas: reporte de laboratorio. Memorias del V congreso de Ingeniería Física. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Trujillo-Carrera, E. S., Hernández-Walls, R., Navarro-Olache, L. F. 2010. Characterization of gravity waves under controlled conditions. Sociedad Mexicana de Física. (sometido).
- Voropayev S.I., Balasubramanian S., Fernando H.J.S., 2008. Grain sorting on sand ripples in heterogeneous sediments. *Journal of Visualization*, 11(1), 3-8.
- Voropayev S.I., Testik F.Y. Fernando H.J.S., Balasubramanian S., 2007. Sediment transport, ripple dynamics and object burial under shoaling waves. In: B.J. Geurts, H. Clercx, W. Uijttewaai, eds. *Particle-Laden Flow: From Geophysical to Kolmogorov Scales*. the Netherlands: Springer, 15-27.
- Wheaton, F., 1982. *Acuicultura diseño y construcción de sistemas*. México: AGT Editor, S. A. 704 pp.

## **ANEXO**

En la presente sección se ha agregado un anexo que muestra las incertidumbres asociadas a cada una de las variables empleadas en el presente trabajo. Se ha tratado de agrupar en una sola tabla las mediciones hechas en los experimentos. Así como las incertidumbres propagadas a las variables obtenidas a partir de los cálculos en la última tabla.

**Anexo: Incertidumbres**

En el presente anexo se muestran las tablas con las incertidumbres de medición de las variables experimentales. En la Tabla LV se muestran los valores de incertidumbre asociados a los principales parámetros.

**Tabla LV Parámetros principales medidos en el desarrollo y/o en la elaboración de cada experimento.**

Parámetro	± Error	Unidades
Velocidades medidas por el ADV	0.25	cm
Altura de la columna de agua	1	cm
Profundidad de llenado	1	cm
Frecuencia del selector	3	%
Tamaño de grano	1.53E-02	cm
Longitud de la ola	5	%
Altura de la ola	5	%
longitud ondulita	0.3	cm
altura ondulita	0.2	cm
Separación entre las esferas	0.5	cm

En la Tabla LVI se muestra la incertidumbre equivalente para cada posición del selector en los que se llevaron a cabo los experimentos. La propagación de la incertidumbre se realizó según el criterio mencionado por Baird, 1991.

**Tabla LVI Errores en la frecuencia y periodo con respecto a la posición del selector de frecuencias**

Posición Selector	Frecuencias (Hz) ±	Periodo (s)±
20	9.77E-03	9.41E-02
30	9.77E-03	3.65E-02
40	9.77E-03	1.82E-02
50	1.95E-02	1.97E-02
60	9.77E-03	6.55E-03
70	9.77E-03	4.61E-03
80	9.77E-03	3.34E-03

## Anexo

En la Tabla LVII se muestra la incertidumbre expandida para los las magnitudes calculadas a partir de las mediciones hechas en el laboratorio. Esta expansión de la incertidumbre se realizo de acuerdo a los criterios de Baird, 1991.

**Tabla LVII Parámetros derivados de cálculos realizados con los datos medidos en los experimentos.**

Parámetro	Error	Unidades
Excursión orbital	4.00	%
Coeficiente de Fricción	5.61	%
Rugosidad	20.18	%
Parámetro de Shields	9.91	%
Clasificación de aguas		
h=15	11.67	%
h=20	10.00	%
h=25	9.00	%
h=30	8.33	%

