



*UNIVERSIDAD MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO*



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE UNA CORTINA
DE BURBUJAS EN APLICACIONES EN INGENIERÍA
COSTERA”**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.**

PRESENTA:

ERNESTO RAMÓN CORNELIO MARTÍNEZ

DIRECTORA DE TESIS:

**DOCTORA EN INGENIERÍA ALICIA AGUILAR CORONA
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

CODIRECTOR DE TESIS:

**DOCTOR EN INGENIERÍA BERNARDO FIGUEROA ESPINOZA.
Universidad Nacional Autónoma de México**



Morelia Michoacán abril 2024

Dedicatoria.

Primero que nada, me gustaría comenzar con mencionar a mis padres quienes fueron mi principal apoyo durante toda mi formación profesional, a mi madre que siempre creyó en mí y fue mi apoyo para siempre seguir adelante. De mi madre aprendí a nunca dejar que nadie me diga lo que tengo que hacer sin importar nada. A mi padre quien fue, es y será siempre mi ejemplo a seguir, de él aprendí a siempre trabajar duro y nunca rendirme para lograr mis objetivos. De ellos aprendí a nunca abandonar mi camino.

A mis hermanos María Irene, Miriam Alejandra y Sergio Francisco, y a mis sobrinos Julieta y Eliel, quienes siempre están ahí para mí en las buenas y en las malas, siempre me impulsan a seguir adelante.

A mis tíos, primos, sobrinos porque siempre me brindan su apoyo incondicional, y por siempre estar en los momentos difíciles.

A mis amigos y compañeros, por siempre alentarme a seguir adelante, por brindarme su amistad incondicional y dejarme formar parte de su círculo social. Por los grandes momentos y recuerdos que llevaré siempre conmigo.

Agradecimientos:

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi asesora de tesis, la Dra. Alicia Aguilar Corona por sus enseñanzas que me brindó para poder formarme como un maestro en ciencias en ingeniería, por todo su apoyo, paciencia y orientación durante estos 2 años de ardua labor en mi proceso de formación.

Agradezco de antemano también a mi codirector de tesis el Dr. Bernardo Figueroa Espinoza por todo su orientación y sus enseñanzas brindadas además de todo el apoyo que me brindó en la estancia realizada en el Instituto de Ingeniería Laboratorio de Procesos Costeros de la UNAM del campus Sisal-Yucatán.

También me gustaría agradecer a todos los profesores que me brindaron parte de su conocimiento durante mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica que me abrió sus puertas para formarme como ingeniero mecánico, así mismo también al posgrado de la facultad por permitirme formar parte de este.

Agradezco también al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para así poder cubrir mis gastos durante este periodo de mi vida. Finalmente, un agradecimiento al proyecto UNAM-DGAPA IN103321.

Índice

Contenido

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos:.....	3
Índice.....	4
Índice de Figuras.....	6
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Objetivo.....	10
Objetivos específicos.....	10
Justificación.....	11
Hipótesis.....	12
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO.....	13
1.1.- Introducción.....	14
1.2.- Antecedentes.....	16
CAPÍTULO II.- SOFTWARE Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN.....	19
2.1.- Introducción.....	20
2.1.1.- ¿Qué es el CFD?.....	20
2.1.2.- OpenFoam.....	20
2.2.- Flujo multifásico.....	22
2.3.- Descripción del solver utilizado.....	23
2.3.1.- Ecuación de continuidad.....	24
2.3.2.-Ecuación del momento.....	24
2.3.3.-Ecuación para la interfase.....	25
2.3.4.- Código InterFoam.....	25
2.4.-Modelo de turbulencia.....	30
2.4.1.- Turbulencia.....	30
2.4.2.- Modelos de turbulencia.....	31
2.5.- Modelo de turbulencia utilizado.....	32
2.6.- Dominio numérico e independencia de malla.....	35
2.7.- Simulaciones Realizadas.....	39
2.8.- Prueba de tamaño del dominio y de las recirculaciones.....	39

2.9.-Prueba de independencia de malla	42
CAPÍTULO III.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL PRIMER CASO: CORTINA DE BURBUJAS Y COLUMNA DE AGUA EN REPOSO.	43
3.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	44
3.2.- Perfiles verticales de velocidades	44
3.3.- <i>Comparación de los resultados de la simulación con datos experimentales para los perfiles de velocidad vertical.</i>	47
3.4.- <i>Comparación con los datos de Fanneløp (1991).</i>	49
3.5.- <i>Número de Froude.</i>	56
3.6.- <i>Número de Froude para velocidades verticales.</i>	56
3.7.- Perfiles de velocidad horizontal.....	59
CAPÍTULO IV.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL SEGUNDO CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON OLEAJE.	66
4.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	67
4.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con oleaje.....	68
4.3.- Gráficas de los perfiles verticales.....	69
CAPÍTULO V. - RESULTADOS OBTENIDOS DEL TERCER CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON CORRIENTE.	75
5.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	76
5.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con corriente.....	76
5.3.- Perfiles verticales.....	77
5.4.- Perfiles horizontales.....	81
CAPÍTULO VI. - RESULTADOS OBTENIDOS DEL CUARTO CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON OLEAJE Y CORRIENTE.	82
6.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	83
6.2.- Medición de las recirculaciones generadas por la cortina.....	84
6.3.- Perfiles verticales.....	84
6.4.- Perfiles horizontales.....	87
DISCUSIÓN	88
CONCLUSIÓN	88
PRODUCTOS GENERADOS.	91

Índice de Figuras

Figura 1.1.- Imagen de la erosión de la arena en la zona costera de sisal Yucatán México (20 de mayo del 2023).....	15
Figura 1.2.1.- Burbujas utilizadas como barrera neumática de protección contra el petróleo, Fijita, I. (2016 October) Bubble curtain for blocking spilled oil in water surface. In 2016 (Techno-Ocean, pp. 354-359). IEEE.....	17
Figura 1.2.2.- Cortina de burbujas usadas para la aireación de aguas estancadas, Mendzil, A (2018). Micro bubble curtains: impact in Sediment Dispersal	17
Figura 2.1.- a) openFOAM.org y b) openFOAM.com.....	22
Figura 2.6.1.- Dominio de la simulación.....	36
Figura 2.6.2.- Malla del dominio para el caso de columna de agua en reposo.....	36
Figura 2.6.3.- Dominio de simulación para la interacción de olas y burbujas, donde $h=0.4m$	37
Figura 2.6.4.- Mallado de la simulación para el caso 2 y 3 (mallado por bloques).....	38
Figura 2.8.1.- Prueba de tamaño de recirculación para distintos tamaños de X (longitud efectiva del dominio).....	41
Figura 3.3.1.- Prueba de independencia de malla.....	42
Figura 3.1.1.- Esquema de recirculación provocado por la inyección de burbujas en el contenedor (L longitud de recirculación).....	44
Figura 3.2.1.- Gráficas individuales para los perfiles de velocidad para todas las velocidades analizadas para las posiciones x , a) $h/2$, b) h , c) h^2 , d) $h^{5/2}$, e) h^3 , f) h^4 y g) h^5 para diferentes valores de flujo de aire. En h se muestra los resultados para todas estas posiciones, pero para un solo flujo de aire ($V_{aire}=1.1033$ m/s).....	46
Figura 3.2.1.- Gráficas individuales para los perfiles verticales de u para una $V_{aire} = 1.1033$ m/s.....	46
Figura 3.3.1.- Comparación de los perfiles verticales obtenidos en este trabajo con los datos experimentales realizados por Covarrubias et al., (2022) para velocidades horizontales (u) para las posiciones a) $x = h/2$, b) $x = h^{5/2}$ y c) $x = h^5$	48
Figura 3.4.1.- Gráficos de los perfiles de velocidad verticales para velocidades horizontales realizados por Fanneløp et al (1991).....	50
Figura 3.4.2.- Resultados de los perfiles verticales de la componente u , en base al formato de Fanneløp (1991) para las velocidades de 0.97m/s, 0.37m/s y 0.174m/s.....	51
Figura 3.4.3.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de 0.87×10^{-3} m ² /s utilizado por Fanneløp (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.....	53
Figura 3.4.4.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de 1.85×10^{-3} m ² /s utilizado por Fanneløp (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.....	54
Figura 3.4.5.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de 4.47×10^{-3} m ² /s utilizado por Fanneløp (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.....	55
Figura 3.6.1.- Gráfica de los números de Froude para a) $h/2$, b) $5h/2$ y c) $5h$	57

Figura 3.6.2.- Número de Froude para los valores de la simulación a las posiciones h , $3h/2$, $2h$, $3h$, $7h/2$, $4h$ y $5h$ (línea azul).....	58
Figura 3.7.1.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $1m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).....	59
Figura 3.7.2.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $1.1033m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).	61
Figura 3.7.3.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $1.5m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).....	62
Figura 3.7.4.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $2m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).....	63
Figura 3.7.5.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $2.5m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).....	64
Figura 3.7.6.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una V_{aire} de $2.79m/s$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).....	65
Figura 4.1.1.- Esquema general de la cortina de burbujas y su interacción con el oleaje.	67
Figura 4.1.2.- mezcla de los tres casos de la oscilación principal de la cortina con oleaje.	68
Figura 4.2.1.- Dominio de la simulación para el segundo caso.....	66
Figura 4.2.2.- Gráfica de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con la influencia de oleaje, antes y después de la cortina de burbujas.....	69
Figura 4.3.1. Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	70
Figura 4.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	71
Figura 4.4.1.- Perfiles horizontales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	73
Figura 5.1.- En esta imagen se puede apreciar un esquema general de la cortina de burbujas y su interacción con la corriente, el cual provoca por la fuerza y velocidad de este que la cortina se incline en dirección de la corriente.....	76
Figura 5.2.- Tamaño de la recirculación antes y después de la cortina con respecto a la velocidad de entrada de aire adimensionalizada de aire (V_{air}/\sqrt{gh}) para la condición de corriente.....	77
Figura 5.3.1.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	78
Figura 5.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	79
Figura 5.4.1.- Perfiles horizontales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	81
Figura 6.1.1.- Esquema de la interacción de la cortina de burbujas con la influencia de corriente y oleaje.....	83
Figura 6.2.1.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas.....	84
Figura 6.3.1.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	85
Figura 6.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	86
Figura 6.4.1.- Perfiles verticales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{aire} = 1m/s$ y b) $V_{aire} = 2.79m/s$	87

Resumen

El uso de cortinas de burbujas tiene una amplia gama de aplicaciones. Este trabajo fue motivado por una serie de aplicaciones de la mecánica de fluidos computacional a la ingeniería costera. Un ejemplo de esto es el problema creciente de la erosión en los puertos, playas y costas. Se realiza un estudio numérico en 2D de la implementación de una cortina de burbujas en un canal. Cuatro casos de la interacción con la cortina de burbujas son estudiados: 1) columna de agua en reposo, 2) interacción con oleaje, 3) interacción con corriente, 4) combinación de oleaje y corriente. El tamaño de las recirculaciones a ambos lados del punto de inyección es determinado, y se presentan perfiles asimétricos aguas abajo y arriba. Los perfiles verticales y horizontales son obtenidos para las velocidades en la componente x y z para todos los casos estudiados y se establece la influencia relativa de las perturbaciones de velocidad causadas para todos los casos estudiados.

Palabras clave: Modelado numérico, cortina de aire, tamaño de recirculación, erosión, interacción con corriente y oleaje, flujo burbujeante.

Abstract

The use of bubble curtains has a wide range of applications. This work was motivated by a series of computational fluid dynamics applications in coastal engineering. An example of this is the growing problem of erosion in ports, beaches, and coastlines. A 2D numerical study of the implementation of a bubble curtain in a channel is conducted. Four cases of interaction with the bubble curtain are studied: 1) static water column, 2) interaction with waves, 3) interaction with current, 4) combination of waves and current. The size of the recirculations on both sides of the injection point is determined, and asymmetric profiles downstream and upstream are presented. Vertical and horizontal profiles are obtained for the velocities in the x and z components for all studied cases, establishing the relative influence of velocity perturbations caused for all studied cases.

Keywords: Numerical modeling, air curtain, recirculation size, erosion, current and wave interaction, bubbly flow.

Objetivo

El objetivo general de este trabajo es estudiar y analizar las interacciones de una cortina de burbujas con agua en reposo, con oleaje, con corriente, así como con corriente y oleaje, mediante simulación numérica (OpenFOAM®) en una configuración 2D.

Objetivos específicos

- Estudiar el método de VoF para flujos bifásicos burbujeantes.
- Hacer simulaciones en configuración de canal, con un muro de burbujas 2D.
- Estudiar y analizar la longitud de recirculación para determinar el tamaño efectivo del dominio.
- Estudiar la interacción de este tipo de sistemas con la influencia de oleaje y con la influencia de oleaje y corriente.
- Determinar las relaciones cuantitativas entre la cortina de burbujas y el agua.
- Validar los resultados de la simulación.
- Análisis de resultados.

Justificación

Las recirculaciones causadas por las cortinas de burbujas se han analizado y estudiado desde principios del siglo XIX con fines de aplicación de contención de partículas suspendidas en agua como el petróleo y también como barreras neumáticas, donde se han obtenido resultados interesantes. Para nuestro caso se realiza un estudio numérico donde pretende analizar las velocidades y tamaños de recirculación causados por este tipo de sistemas los cuales se validarán con resultados experimentales encontrados en la bibliografía, lo cual permitirá ahorrar recurso en la construcción de un modelo experimental que puede resultar muy costoso. Esta propuesta nace de la motivación de estudios anteriores en aplicaciones para la retención o contención de granos de arena que puedan estar entrando o saliendo en demasía de puntos estratégicos de las zonas costeras a estudiar, aunado a esto se pretende analizar el beneficio que se puede obtener al emplear este tipo de sistemas en presencia de corrientes y oleaje ya que este es el principal factor a tener en cuenta en nuestro estudio.

Hipótesis

Las velocidades ascendentes y las corrientes (recirculaciones) ocasionadas por una cortina de burbujas, pueden proporcionar ventajas tales como: reducir la fuerza de las olas, reducir la velocidad de corriente del mar, disminuir la fuerza de impacto de la ola rompiente sobre la playa, además de funcionar como barrera retenedora de partículas en suspensión (erosión y sedimentación de la arena). Las cortinas de burbujas se han estudiado para tratar de dar solución a los problemas ya mencionados, donde se han encontrado que estas generan capos de velocidad a ambos lados de esta que además generan recirculaciones las cuales pueden ser usadas para muchos fines prácticos, como para la retención de partículas en suspensión. Al realizar la simulación permitirá determinar el efecto de la cortina sobre la hidrodinámica del agua en estado de reposo y bajo el efecto de las olas y la corriente, esto con el fin de observar el grado de influencia de la cortina sobre la columna de agua para estos casos de estudio, donde se ha encontrado que la influencia de estas puede llegar hasta un valor de 10h para los casos 3D. Las magnitudes de las velocidades se provocadas por esta cortina, se estudiarán para estas condiciones, además de que se comparan con datos experimentales pero solo para el caso de columna de aunque en reposo.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1.- Introducción	13
1.2.- Antecedentes	15

1.1.- Introducción

Las variaciones en el nivel del mar, oleaje y corrientes marítimas responsables del transporte de sedimento y de los cambios en la morfología de las playas, influyen de gran manera en las zonas costeras. La zona litoral de las regiones costeras es la zona donde se manifiestan los mayores efectos de los procesos marinos. Efectos como el cambio de la morfología de las costas, los procesos de erosión y de crecimiento de playas son bastante notorios en diversas escalas geográficas y de tiempo. Normalmente, este proceso se da en equilibrio de manera natural, ya que la arena es transportada de un lugar a otro y esto provoca el aumento o disminución de la playa dependiendo de la época del año. Sin embargo, el proceso natural de acreción y erosión ha pasado a ser sólo de erosión para muchas zonas costeras existentes en nuestro planeta, lo cual lleva a un problema muy grave. Los procesos que ocurren en las costas y gobiernan la dinámica litoral, tal como la variación de aporte de sedimentos y los cambios del oleaje, así como las corrientes marinas causando cambios en la forma de las playas como pueden ser variaciones en el ancho, pendiente y largo de estas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo en las épocas de lluvias cuando los cambios son más intensos, principalmente por el creciente aumento de intensidad del oleaje.

El cambio climático ha traído consigo grandes fenómenos ambientales, de los cuales el más conocido es el calentamiento global que ha provocado grandes afectaciones a lo largo de todo el planeta. Los cambios climáticos coaccionados por el calentamiento global condujeron a fluctuaciones de corto o largo tiempo que afectan las áreas costeras y actualmente se registra un ascenso del nivel del mar. La expansión térmica de los océanos, la pérdida de masa de hielo terrestre y el cambio en el almacenamiento de agua en tierra. Aproximadamente el 30% de la tasa de aumento observada se debe a la expansión térmica de los océanos y 55% resulta del deshielo terrestre, aunque la reciente aceleración del deshielo de los glaciares y la pérdida de masa de hielo de las capas de hielo aumenta esta última contribución hasta el 80% en los últimos cinco años tal como lo menciona Casenave *et al* (2010). Estas variaciones están acompañadas por cambios en la temperatura del aire que pueden afectar las intensidades y frecuencias de las tormentas, produciendo el aumento de la erosión costera, cuyos efectos pueden conducir a la pérdida de vidas y propiedades cercanas al mar. El calentamiento global debido al efecto invernadero, producido por el aumento de CO₂ y otros gases, conducirán a un incremento en el nivel del mar por el efecto combinado de la expansión térmica de los océanos y la fusión de los glaciares de montaña (pérdidas de masa de los glaciares). Los potenciales impactos principales, debidos a la elevación del mar conducen a cambios en el área costera, que incluyen inundación, incremento en el retroceso costero, e intrusión salina en los acuíferos y estuarios. Las áreas de peligrosidad geológica, referidas a inundación permanente y/o episódica, pueden ser obtenidos a partir de información geológica costera, oceanográfica y climatológica de las zonas costeras (Kokot *et al.*, 2004).

Actualmente, el papel de la actividad antropogénica también ha contribuido a modificar la zona litoral, desde el momento que se construyen vías de comunicación, infraestructura energética y petrolera, hoteles, casas, restaurantes, etc. en su parte continental (supraplaya), hasta la construcción de muelles, espigones, escolleras, rompeolas en la parte marina (infraplaya) alterando el transporte de sedimentos que entran o salen de las zonas costeras todo esto como consecuencias de la modificación en la última zona litoral que se encuentra entre la playa y el mar, que se produce por la construcción de estas infraestructuras. La erosión costera ha provocado la reducción de playas, la pérdida de ecosistemas (manglares, la destrucción de sitios de anidación de tortugas marinas, la intrusión salina, entre otros problemas), también provocando un impacto en obras civiles como carreteras, líneas eléctricas, casas habitación, e infraestructura petrolera (Torres Rodríguez *et al.*, 2010).

Más de la mitad de las playas de arena del mundo están en riesgo de desaparecer a finales de siglo como consecuencia de la erosión costera. En tan sólo 30 años, el mar le ganará un promedio de 100 metros a las playas de arena en el mundo, como consecuencia de la subida del nivel del mar, en el peor de los casos, esta cifra podría más que duplicarse para finales de este siglo. Según algunos estudios realizados (EL UNIVERSAL, 2020) Chile, México y Argentina son de los países que más serán afectados. A nivel mundial, naciones como Australia, Canadá y China también están en riesgo de perder una parte importante de sus litorales arenosos.



Figuras 1.1.- Imagen de la erosión de la arena en la zona costera de Sisal Yucatán México (20 de mayo del 2023).

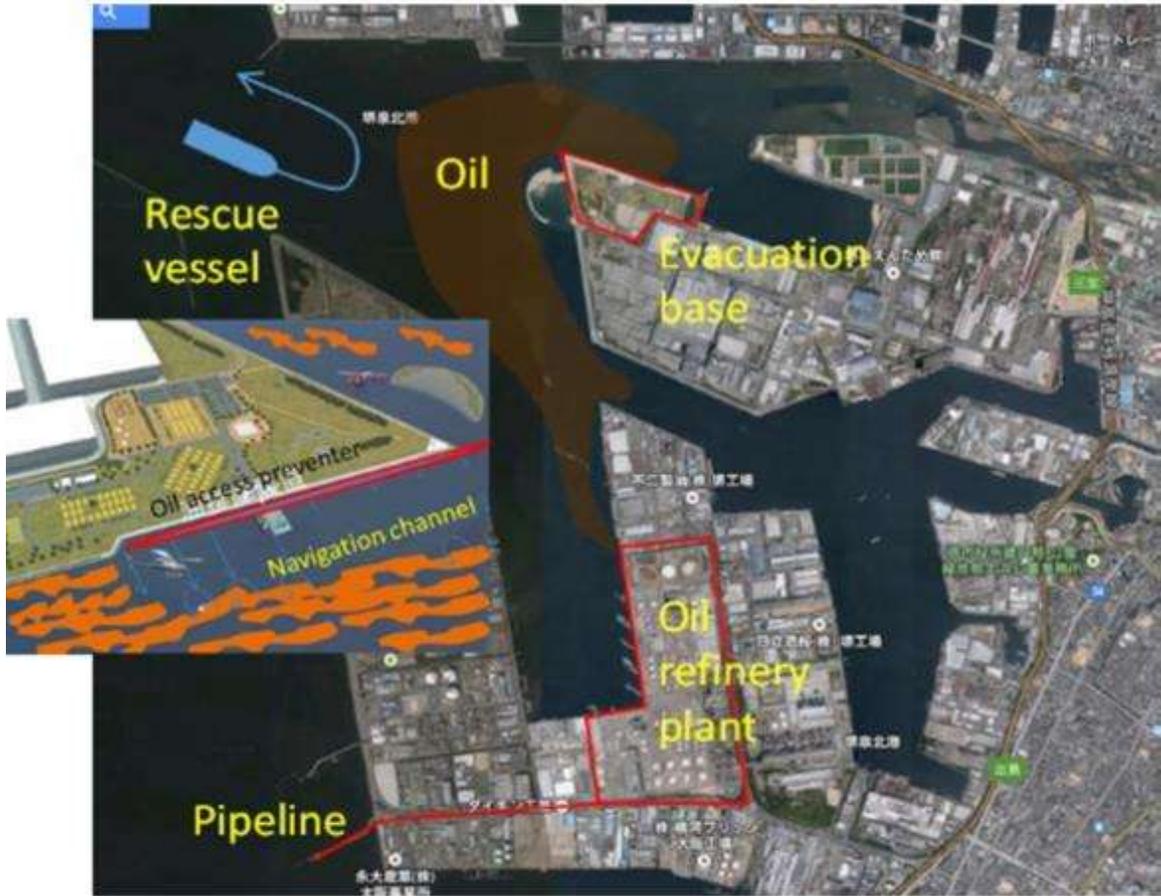
La erosión costera es un problema presente en muchos sitios en todo el mundo presente a lo largo de toda la línea costera, este es causado tanto por efectos naturales como por actividades humanas. La erosión costera depende fuertemente del tipo de costa (clima, niveles de oleaje, composición de los sedimentos, pendiente de la playa). La erosión costera consta tanto de componentes transversales como longitudinales. Durante eventos extremos con altos niveles de oleaje, la erosión de las dunas puede llegar hasta los 5 metros, este es principalmente un proceso transversal que lleva los sedimentos de la parte frontal inmóvil de la duna hacia el

sistema litoral móvil. Los valores de erosión calculados están dentro del orden de los 20 m³/m para un nivel de oleaje de 1 m y hasta 200 m³/m para un nivel de 5 m o más alto que este, (Van Rijn 2011).

Una de las consecuencias más ciertas del calentamiento global es el aumento del nivel del mar global. La inundación resultante debido al incremento del nivel del mar afectará gravemente a las áreas más bajas, se tiene contemplado que al menos 100 millones de personas viven en promedio a un metro del nivel del mar que son estas las que corren mayor riesgo. Aunado a una amenaza adicional que afecta a algunos de los bienes raíces más desarrollados y económicamente valiosos será una aceleración de la erosión de las playas de arena. A medida que se pierde la playa, las estructuras fijas más cercanas al mar se exponen cada vez más al impacto directo de las olas y esta se dañará o destruirá, a menos que se tomen medidas protectoras costosas. Durante mucho tiempo se ha especulado que la tasa subyacente de erosión de las playas de arena a largo plazo es dos órdenes de magnitud mayor que la tasa de aumento del nivel del mar, por lo que cualquier aumento significativo del nivel del mar tiene consecuencias desastrosas para los habitantes de la costa (Zhang *et al.*, 2004).

1.2.- Antecedentes

Las cortinas de burbujas se usan comúnmente para generar circulación y mezcla en un cuerpo líquido. Estas se han utilizado para muchos fines prácticos, por ejemplo, como barreras neumáticas de protección para detener derrames de petróleo (Fujita 2016) ver Figura 1.2.1, para la aireación en aguas estancadas, para la desestratificación de depósitos y para evitar la formación de hielo en lagos y cuencas portuarias (Thijssen *et al.*, 2019) ver Figura 1.2.2. Uno de los primeros estudios de cortina de burbujas data de los años 60s, donde se estudiaron por primera vez este tipo de sistemas para analizar las corrientes producidas por una cortina de aire en aguas profundas, (Bulson 1961 y Taylor 1955). Así como también usando este tipo de sistemas como rompeolas (Taylor 1955). Datos experimentales encontrados implican que la creación de una cortina de burbujas puede reducir o anular la altura de las olas, produciendo así un rompeolas como lo hizo Bulson (1963). Bulson (1969) a partir de estudios analíticos y experimentales formuló un diseño para la velocidad superficial y el espesor de la corriente horizontal producida por una cortina de burbujas, y para la cantidad de aire libre necesaria para suprimir olas de longitud y altura conocidas



Figuras 1.2.1- Burbujas utilizadas como barrera neumática de protección contra el petróleo, Fuente: Fijita, I. (2016 October) Bubble curtain for blocking spilled oil in water surface. In 2016 (Techno-Ocean, pp. 354-359). IEEE.



Figuras 1.2.2.- Cortina de burbujas usadas para la aireación de aguas estancadas, Fuente: Mendzil, A (2018). Micro bubble curtains: impact in Sediment Dispersal

No obstante, proporcionar un flujo continuo con alto gasto volumétrico de aire para la producción de estas cortinas de burbujas utilizadas como rompeolas consume mucha energía además de un coste muy elevado de instalación para que estas puedan ser implementadas de manera eficaz. Por consiguiente, llevar a cabo este tipo de metodologías para la protección de las estructuras costeras o de alta mar contra una tormenta ocasional, difícilmente puede justificar la gran instalación de compresores y tuberías necesarias para amortiguar las olas. Sin embargo, con un flujo bajo de aire la corriente superficial que es generada por la cortina de burbujas ascendente que amortigua las olas podría tener otros efectos beneficiosos, por ejemplo, para bloquear los hidrocarburos flotantes como petróleo o aceite de las instalaciones terrestres tal como lo propuso Fujita (2016) y estudió la eficacia de las cortinas de burbujas para restringir el movimiento de sedimentos en el agua de mar (Menzil 2018).

Para nuestro caso nos centraremos en determinar el grado de recirculación que se genera con una cortina de burbujas a una cierta profundidad con flujos bajos de aire. Uno de los experimentos realizados a gran escala con cortinas de burbujas bidimensionales conocido en la literatura es el de Bulson (1963), quien utilizó un tanque de prueba que tenía una profundidad de 25 pies (la profundidad de la fuente era ligeramente inferior), una longitud de 1300 pies y una anchura de 48 pies. Las mediciones de la corriente superficial (en ausencia de olas) se realizaron a distancias de hasta 60 pies (es decir, unas 2,5 veces la profundidad), donde se comprobó que la velocidad era aproximadamente el 5% del valor inicial (máximo).

Se conoce que los penachos de burbujas a menudo presentan un movimiento errante (Fannelop *et al.*, 1991). Las zonas de recirculación de gran amplitud es un proceso turbulento de un orden de macro escala causado por los efectos de las paredes del tanque cuando las paredes horizontales de la instalación no están a una distancia relativamente grande en comparación con el diámetro de la pluma de burbujas (Milgram 1983; Fannelop 1991). Fannelop (1991) quien realizó una serie de experimentos con una columna de agua en reposo y determinó a través de estos la influencia que producía la cortina sobre el agua circundante, determinado de este modo los perfiles de velocidad de velocidades perpendiculares a la cortina. Tal como hizo Fannelop (1991) en este trabajo también se determinaron dichos perfiles de velocidad vertical, así como los perfiles horizontales. Del mismo modo también se obtuvieron estos perfiles para la cortina con la influencia de oleaje, corriente y bajo el efecto de ambos parámetros.

CAPÍTULO II.- SOFTWARE Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN.

CAPÍTULO II.- SOFTWARE Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN.	18
2.1.- Introducción	19
2.1.1.- ¿Qué es el CFD?	19
2.1.2.- OpenFoam	19
2.2.-Flujo multifásico.	21
2.3.- Descripción del solver utilizado.	22
2.3.1.- Ecuación de continuidad.	23
2.3.2.-Ecuación del momento	23
2.3.3.-Ecuación para la interfase	23
2.3.4.- Código InterFoam.	24
2.4.-Modelo de turbulencia.	29
2.4.1.- Turbulencia.	29
2.4.2.- Modelos de turbulencia	30
2.5.- Modelo de turbulencia utilizado.	32
2.6.- Generación del dominio y malla.	34
2.7.- Simulaciones Realizadas.	38
2.8.- Prueba de tamaño del dominio y de las recirculaciones.	38
2.9.-Prueba de independencia de malla.	41

2.1.- Introducción

2.1.1.- ¿Qué es el CFD?

CFD, o dinámica de fluidos computacional, es una herramienta que integra la mecánica de fluidos con métodos numéricos para abordar diversos fenómenos de transporte, como el flujo de fluidos, calor o masa, así como interacciones más complejas como la combustión, reacciones químicas y Aeroacústica. Surgió con el avance de la computación, que permitió utilizar algoritmos numéricos para resolver problemas reales, fusionando dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos tienen su origen en la mecánica de fluidos y pueden ser abordadas mediante distintos métodos numéricos.

2.1.2.- OpenFoam

Para el presente trabajo se realizó una simulación en el software OpenFOAM®, las simulaciones numéricas se realizan en un sistema de 2D. OpenFOAM® es un software que utiliza un código abierto, que usa la discretización de volumen finito (formulación "Volume of Fluid" o VoF). El modelo de turbulencia utilizado para la simulación fue el RANS en concreto el de $k-\epsilon$, el cual se abordará más adelante. Todo esto aplicado a una simulación de flujo multifásico, para nuestro caso un flujo de dos fases (agua y aire). Para nuestro estudio se tomaron 4 casos los cuales serán explicados más a detalle en los capítulos posteriores, aquí solo daremos una descripción general de cada uno de éstos, los cuales son:

1. Cortina de burbujas con una columna de agua en reposo.
2. Cortina de burbujas con oleaje.
3. Cortina de burbujas con corriente
4. Cortina de burbujas con corriente y oleaje.

Las olas se generaron a partir de la teoría de Stokes de segundo orden (Kundu, 2015).

La fundación OpenFOAM® es la organización que posee los derechos de autor del software, así como la documentación del mismo, el cual tiene como objetivo gestionar y distribuir OpenFOAM® como software de acceso libre con código abierto en beneficio de sus usuarios (dirigido principalmente a la investigación). Es una empresa registrada, la cual solo está limitada por garantía, con sede en Inglaterra. Esta como tal, no tiene capital social ni accionistas, sino más bien miembros individuales comprometidos con el software libre de código abierto, quienes dirigen la organización de forma voluntaria. No cuenta con empleados y los beneficios

anuales se quedan en la organización y no se distribuyen entre los miembros. OpenFOAM® es una marca registrada de OpenCFD Ltd, licenciada a la fundación OpenFOAM en 2011 para que pudiera distribuir su software bajo ese nombre [1]. OpenFOAM® es uno de los principales programas de código abierto para dinámica de fluidos computacional (CFD), distribuido exclusivamente bajo la Licencia Pública General (GPL). Esta licencia brinda a los usuarios la libertad de modificar y redistribuir el software, garantizando su uso gratuito, esto siempre dentro de los términos de la licencia.

OpenFOAM está constituido por una gran biblioteca base, que ofrece las capacidades básicas del código, para dar solución a problemas generales como:

- *Tensor y operaciones de campo.*
- *Discretización de ecuaciones diferenciales parciales usando una sintaxis legible por humanos.*
- *Solución de sistemas lineales.*
- *Solución de ecuaciones diferenciales ordinarias.*
- *Paralelización automática de operaciones de alto nivel.*
- *Malla dinámica.*
- *Modelos físicos generales.*
- *Modelos de medios porosos.*
- *Modelos reológicos.*
- *Modelos de flujos compresibles / térmicos*
- *Modelos de reacción química y cinética.*
- *Métodos de seguimiento de partículas lagrangianas.*
- *Modelos de transferencia de calor radiactivo.*
- *Modelos de turbulencia.*
 - *Simulación por medio de las Ecuaciones de Navier-Stokes.*
 - *Simulación de grandes remolinos (LES) y simulación de remolinos separados (DES, DDES, etc.).*

Las capacidades proporcionadas por la biblioteca se usan luego para desarrollar aplicaciones. Las aplicaciones se escriben usando la sintaxis de alto nivel con la cual ya viene prescrita el software, que tiene como objetivo reproducir la notación matemática convencional. Existen dos categorías de aplicaciones:

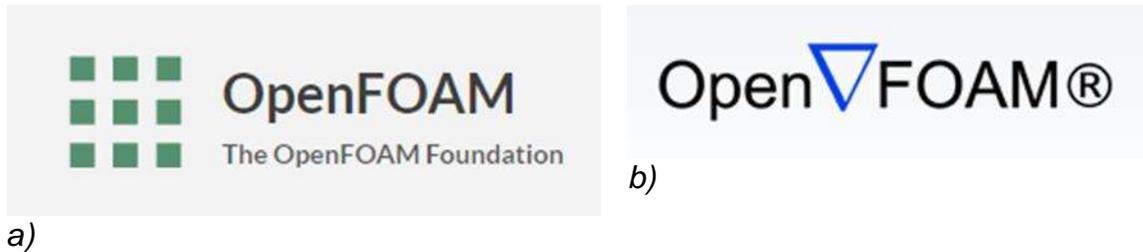
- **Solvers:** realizan el cálculo real para resolver un problema específico de mecánica continua.
- **Utilidades:** se utilizan para preparar la malla, configurar la simulación, procesar los resultados y realizar operaciones distintas a la solución del problema.

Cada aplicación proporciona capacidades específicas: por ejemplo, la aplicación llamada BlockMesh (perteneciente a las utilidades) se usa para generar mallas de un archivo de entrada proporcionado por el usuario, mientras que otra aplicación

llamada IcoFoam (perteneciente a los solvers) diseñado para simulaciones transitorias de flujo laminar incompresible.

Cabe señalar que con cada versión nueva lanzada de *OpenFOAM*® se optimizan algunas de sus características además de que se añaden algunas nuevas y se eliminan/renuevan algunas obsoletas.

En cuanto a las versiones de *OpenFOAM*® debemos mencionar que se tienen 2 versiones las cuales son OpenFOAM.COM y OpenFOAM.org, Figura 2.1



Figuras 2.1.- a) *openFOAM.org* y b) *openFOAM.com*

Básicamente, ambos son dos bifurcaciones del mismo software, con algún código añadido o eliminado. La contribución de la comunidad es mayor en la versión de OpenFOAM.org y algunos solucionadores avanzados se añaden en la versión de OpenFOAM.com. Para un uso básico o de aprendizaje, ambas versiones son casi iguales. Generalmente la versión de OpenFOAM.org es la más utilizada, ya que se utiliza más en el mundo académico y es más accesible (la documentación y tutoriales), por ende, para nuestro caso de estudio se utilizó la versión de OpenFOAM.org que esta más dirigida hacia la investigación

2.2.- Flujo multifásico.

Un flujo multifásico es un flujo donde ocurre el mezclado de fluidos de diferentes fases, los cuales pueden ser agua, petróleo, gas, entre otros. El flujo de fluido multifásico es un factor complejo, importante para comprender cómo es que ocurren muchos fenómenos en la naturaleza y en procesos industriales. A grandes rasgos el uso de simulaciones de alta resolución para estudiar el flujo multifásico entre un líquido y un gas, en las que la interfaz gas-líquido está nítidamente resuelta, se ha convertido en una alternativa relativamente buena con enfoques recientes para analizar a gran detalle la física de estos flujos. Los intentos de simular con éxito diversas situaciones de flujo multifásico han dado lugar a una amplia variedad de enfoques numéricos, cada uno de ellos basados en resultados obtenidos de forma experimental, tratando de emular de forma eficiente los resultados obtenidos en campo (Prosperetti *et al.*, 2009).

Entre los distintos enfoques numéricos de códigos que se utilizan para simular flujos multifásicos, una metodología VoF de código abierto llamada interFoam

(perteneciente al software de simulación de fluidos de OpenFOAM®, este código forma parte de un conjunto de librerías C++) ha estado ganando una cantidad creciente de atención y uso en el campo de la investigación científica. Como se ha documentado recientemente en la literatura, donde una de las primeras aplicaciones de este tipo de solucionador VoF, donde se investiga computacional y experimentalmente un chorro de agua circular precipitado a ángulos poco profundos sobre una piscina. En el cual se analizaron las interacciones entre el aire y el chorro de agua donde se observaron cavidades de aire, creadas por una fuerte agitación, Deshpande (2012).

2.3.- Descripción del solver utilizado.

Nuestro estudio se realizó utilizando un Solver llamado InterFoam, que es un solucionador para 2 fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles que utiliza un enfoque de captura de interfaz basado en la fracción de fase VOF (volumen de fluido), el cual puede funcionar con movimiento de malla opcional y cambios de topología de malla, incluido el remallado adaptativo. Para nuestro caso se consideró una interfaz líquido-aire, el cual se resolvió a través de interFoam que como se mencionó anteriormente una de sus características es que es un Solver para 2 fluidos incompresibles. Estrictamente, se debería considerar la compresibilidad del aire, sin embargo, en el caso de aguas poco profundas (a número de Mach pequeño), este efecto puede considerarse insignificante.

El solucionador resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para dos fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles. Esto significa que las propiedades de los materiales son constantes en la región ocupada por uno de los dos fluidos, excepto en la interfase (Greenshields, 2015). Como se mencionó anteriormente el solver se basa en un enfoque de volumen de fluido (VoF) modificado, que incorpora un término de flujo de compresión interfacial para mitigar los efectos de la difuminación numérica de la interfaz. Sin embargo, la evaluación de este solver se limita a las pruebas de validación de interés específico para los usuarios del código. Sin embargo, existen trabajos anteriores que estudiaron el alcance de su aplicabilidad a una amplia gama de situaciones de flujo multifásico. En estos trabajos se evaluaron simulaciones de flujos dominados por la inercia con grandes relaciones de densidad donde los resultados arrojaron una excelente concordancia con los resultados analíticos y experimentales. En dichos casos se analizó la región donde la tensión superficial es importante, ya que la coherencia de la formulación presión-tensión superficial y la precisión de la curvatura juegan un papel importante, tal como establecieron Francois *et al.*, (2006). Aunado a todo esto los principales productos de estos trabajos fueron, en primer lugar, que el algoritmo de interFoam resuelve de forma adecuada estas zonas de importancia y a su vez garantiza una formulación coherente de la presión y la tensión superficial sobre estas; en segundo

lugar, las curvaturas calculadas por el solucionador convergen a un valor ligeramente menor a 10% diferente del valor analítico, en este sentido existe un margen de mejora claramente apreciable, (Deshpande *et al.*, 2012). A continuación, se presentan las ecuaciones que se discretizan y posteriormente se resuelven en Interfoam, usando VoF:

2.3.1.- Ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad de densidad constante es:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

2.3.2.-Ecuación del momento

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tij}) + \rho g_i + f_{\sigma i}, \quad (2)$$

donde u_i representa la velocidad, g_i la aceleración de la gravedad, ρ la presión y τ_{ij} y τ_{tij} son los tensores de esfuerzos viscosos y turbulentos. $f_{\sigma i}$, es la tensión superficial.

La particularidad del método VoF, es que la densidad ρ está definida por:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

α es 1 dentro del fluido 1 con la densidad ρ_1 y 0 dentro del fluido 2 con la densidad ρ_2 . En la interfase entre los dos fluidos α varía entre 0 y 1.

La tensión superficial $f_{\sigma i}$, se modela como una fuerza superficial continua. Esta es calculada como:

$$f_{\sigma i} = \sigma k \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (4)$$

σ es la constante de tensión superficial y k la curvatura. La curvatura puede aproximarse de la siguiente manera:

$$k = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (5)$$

2.3.3.-Ecuación para la interfase

Para saber dónde está la interfase entre los dos fluidos, hay que resolver una ecuación adicional para α .

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

La ecuación puede considerarse como la conservación de los componentes de la mezcla a lo largo de la trayectoria de una parcela de fluido.

2.3.4.- Código InterFoam.

Se presenta el esquema general del código interFoam (similar en todas las librerías de OpenFOAM®). Donde se especifica la biblioteca de utilidades que utiliza el solver interFoam para la solución del modelo numérico, biblioteca que se puede encontrar en cualquier versión de OpenFOAM®. El esquema general del solver para la solución de un modelo de dos fases cuyos rasgos principales ya fueron mencionados anteriormente se encuentra esquematizado a continuación donde comienza con la descripción general del software así como una breve reseña de la licencia, después un enlistado de las bibliotecas ya mencionadas, seguido e algunas otras que pueden ser utilizadas por el modelo solver dependiendo del modelo y/o las sustancias y fases a utilizar, entre otros aspectos de que dependen del modelo a utilizar.

```
/*-----*\
===== |
\\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\ /Operation | Website: https://openfoam.org
\\ /And | Copyright (C) 2011-2020 OpenFOAM Foundation
\\ /M anipulation |
```

License

This file is part of OpenFOAM.

OpenFOAM is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

OpenFOAM is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.

You should have received a copy of the GNU General Public License along with OpenFOAM. If not, see <<http://www.gnu.org/licenses/>>.

Application

interFoam

Description

Solver for 2 incompressible, isothermal immiscible fluids using a VOF (volume of fluid) phase-fraction based interface capturing approach, with optional mesh motion and mesh topology changes including adaptive re-meshing.

-----/

```
#include "fvCFD.H"
#include "dynamicFvMesh.H"
#include "CMULES.H"
#include "EulerDdtScheme.H"
#include "localEulerDdtScheme.H"
#include "CrankNicolsonDdtScheme.H"
#include "subCycle.H"
#include "immiscibleIncompressibleTwoPhaseMixture.H"
#include "turbulentTransportModel.H"
#include "pimpleControl.H"
#include "fvOptions.H"
#include "CorrectPhi.H"
#include "fvcSmooth.H"

// * * * * *

int main(int argc, char *argv[])
{
    #include "postProcess.H"

    #include "setRootCaseLists.H"
    #include "createTime.H"
    #include "createDynamicFvMesh.H"
```

```

#include "initContinuityErrs.H"
#include "createDyMControls.H"
#include "createFields.H"
#include "createAlphaFluxes.H"
#include "initCorrectPhi.H"
#include "createUfIfPresent.H"

turbulence->validate();

if (!LTS)
{
    #include "CourantNo.H"
    #include "setInitialDeltaT.H"
}

// * * * * * //
Info<< "\nStarting time loop\n" << endl;

while (runTime.run())
{
    #include "readDyMControls.H"

    if (LTS)
    {
        #include "setRDeltaT.H"
    }
    else
    {
        #include "CourantNo.H"
        #include "alphaCourantNo.H"
        #include "setDeltaT.H"
    }

    runTime++;

    Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;

    // --- Pressure-velocity PIMPLE corrector loop

```

```

while (pimple.loop())
{
    if (pimple.firstIter() || moveMeshOuterCorrectors)
    {
        mesh.update();

        if (mesh.changing())
        {
            // Do not apply previous time-step mesh compression flux
            // if the mesh topology changed
            if (mesh.topoChanging())
            {
                talphaPhi1Corr0.clear();
            }

            gh = (g & mesh.C()) - ghRef;
            ghf = (g & mesh.Cf()) - ghRef;

            MRF.update();

            if (correctPhi)
            {
                // Calculate absolute flux
                // from the mapped surface velocity
                phi = mesh.Sf() & Uf();

                #include "correctPhi.H"

                // Make the flux relative to the mesh motion
                fvc::makeRelative(phi, U);

                mixture.correct();
            }

            if (checkMeshCourantNo)
            {
                #include "meshCourantNo.H"
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}

#include "alphaControls.H"
#include "alphaEqnSubCycle.H"

mixture.correct();

#include "UEqn.H"

// --- Pressure corrector loop
while (pimple.correct())
{
    #include "pEqn.H"
}

if (pimple.turbCorr())
{
    turbulence->correct();
}
}

runTime.write();

Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"
    << "   ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"
    << nl << endl;
}

Info<< "End\n" << endl;

return 0;
}

// *****

```

2.4.-Modelo de turbulencia.

2.4.1.- Turbulencia.

La turbulencia es una característica física común de los flujos de fluidos. De este modo se puede decir que la turbulencia es un movimiento irregular con distintas escalas, con variaciones de apariencia aleatoria tanto en tiempo como en espacio, por lo que se pueden obtener distintos promedios estadísticos del mismo flujo turbulento. Por ejemplo, en el diseño de turbinas eólicas, el conocimiento de la turbulencia en el flujo de entrada y en las capas límite de las palas es importante para el rendimiento; en los motores de combustión interna, la turbulencia aumenta la mezcla de aire-combustible mejorando la eficiencia global y reduciendo las emisiones; y en el diseño de aviones, retrasar la aparición de vórtices en las capas límite e incrementando el tamaño de estas sobre las superficies de las alas permite reducir el consumo de combustible; en los análisis geostroficóicos permite saber las condiciones del océano, como puede ser los efectos de los flujos de aire sobre la fuerza de las olas y las corrientes marinas causadas por el cambio de estación, de este modo se pueden predecir (hasta cierto punto) las trayectorias de huracanes y diversos fenómenos marinos. Estos ejemplos, y un gran número de otras aplicaciones, demuestran la importancia de determinar el efecto de la turbulencia en el rendimiento de los dispositivos de ingeniería y justifican el continuo interés por desarrollar técnicas para simular y predecir los flujos turbulentos. Los datos obtenidos de la comparación de los experimentos y las simulaciones de la turbulencia se han utilizado históricamente para calibrar modelos sencillos de ingeniería, como los basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS).

En los últimos años, con la disponibilidad de grandes y diversos conjuntos de datos y al gran avance en la computación, los investigadores han comenzado a explorar métodos para mejorar sistemáticamente a los modelos de turbulencia agregando más características a estos, con el objetivo de cuantificar y reducir las incertidumbres del modelo. Existen trabajos que examinan los últimos avances en la limitación de las incertidumbres en los modelos RANS mediante restricciones físicas, en la adopción de la inferencia estadística para caracterizar los coeficientes del modelo y estimar la discrepancia, y en el uso del aprendizaje sobre los métodos numéricos para mejorar los modelos de turbulencia. Donde hacen énfasis sobre la explotación de los conocimientos básicos sobre modelización de turbulencias y restricciones físicas, sobre los cuales los investigadores pueden utilizar enfoques basados en datos de estos conocimientos para obtener modelos predictivos útiles, (Duraisamy *et al.*, 2018).

2.4.2.- Modelos de turbulencia

La resolución de problemas mediante CFD por lo general suelen constar de cuatro componentes principales, los cuales son: generación de la geometría y la malla, establecimiento de un modelo físico, resolución del problema y posprocesamiento de los datos calculados. Desafortunadamente, para resolver numéricamente un problema CFD resolviendo todas las escalas necesarias se requiere una malla extremadamente fina, del orden $Re^{-3/4}$, lo cual se traduce en un número gigantesco de nodos para cualquier problema práctico. El uso de modelos de turbulencia permite usar mallas más gruesas (menos nodos), y las escalas pequeñas se calculan con modelos teóricos o empíricos. El problema surge de que se intenta modelizar fenómenos muy complejos con un modelo lo más simple posible, pero sin dejar de captar la esencia de la física pertinente del fenómeno.

Por ende, al tratar de seleccionar un modelo de turbulencia adecuado, el cual nos resuelva de una manera eficaz nuestra simulación tenemos que tener en cuenta muchos aspectos relacionados a la física de nuestro fenómeno a modelar. La complejidad de estos modelos se debe a la naturaleza de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes es una ecuación en derivadas parciales tridimensional inherentemente no lineal y dependiente del tiempo.

La turbulencia como definición general puede considerarse como una inestabilidad del flujo laminar que se produce a altos números de Reynolds (Re). Estas inestabilidades tienen su origen en las interacciones entre los términos inerciales no lineales y los términos viscosos de la ecuación de Navier-Stokes. Estas interacciones son rotacionales, totalmente dependientes del tiempo y totalmente tridimensionales. Las interacciones rotacionales y tridimensionales están mutuamente conectadas a través de la presencia de los vórtices. Todo esto aunado a que la turbulencia se puede tratar como un proceso aleatorio en el tiempo. Otra característica importante de un flujo turbulento es que los vórtices se desplazan a lo largo del flujo, teniendo una duración que suele ser muy larga (dependiendo de su tamaño). De ahí que algunas magnitudes turbulentas no puedan especificarse como locales. Esto significa simplemente que la historia aguas arriba del flujo es también de gran importancia, (Sodja 2007).

Existen diferentes tipos de esquemas de solución dentro de los métodos numéricos para dar solución a los modelos de turbulencia, cada uno con enfoques similares, pero haciendo énfasis en distintos puntos de la turbulencia. Los modelos de turbulencia pueden clasificarse de varias maneras. El más general es el ordenado según el número de ecuaciones diferenciales resueltas además de las ecuaciones

de flujo medio, (Reynolds 1976). De las cuales se presenta la siguiente clasificación (ver también Karthik 2011):

1. Modelos de ecuación cero. - modelos que utilizan sólo el válido para el campo de velocidad media, y sin ecuaciones diferenciales parciales de turbulencia.
2. Modelos de una ecuación - modelos que incluyen una ecuación adicional relativa a la escala de velocidad de turbulencia.
3. Modelos de dos ecuaciones - modelos que incorporan una ecuación diferencial parcial adicional relacionado con una escala de longitud de turbulencia.
4. Modelos de ecuaciones de esfuerzo. - modelos que implican ecuaciones diferenciales parciales para todos los componentes del tensor de esfuerzo turbulento.
5. Simulaciones de grandes remolinos: cálculos de la estructura tridimensional de grandes remolinos dependiente del tiempo y un modelo de bajo nivel para la turbulencia a pequeña escala.

El número de clasificación denota el número de ecuaciones diferenciales parciales adicionales que se están resolviendo.

2.5.- Modelo de turbulencia utilizado.

Modelo de turbulencia seleccionado fue le RANS el k-ε. Esta serie de ecuaciones se describe de la siguiente manera:

La ecuación de la energía cinética turbulenta, k

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \epsilon \quad (7)$$

k = energía cinética turbulenta [m²s⁻²]

D_k = Difusividad efectiva para k [-]

P = Tasa de producción de energía cinética turbulenta [m²s⁻³]

ε = Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta [m²s⁻³]

La ecuación de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta, ε

$$\frac{D}{Dt}(\rho \epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} \left(P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot u \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

Donde

- D_ϵ = Difusividad efectiva para ϵ [-]
 C_1 = Coeficiente del modelo [-]
 C_2 = Coeficiente del modelo [-]

La ecuación de la viscosidad turbulenta, ν_t

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

Donde

- C_μ = Coeficiente modelo de la viscosidad turbulenta [-]
 ν_t = Viscosidad turbulenta [m^2s^{-1}]

Implementación de OpenFOAM®

Ecuaciones

La tasa de disipación de energía cinética turbulenta, ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho\epsilon) + \nabla \cdot (\alpha\rho u\epsilon) - \nabla^2 (\alpha\rho D_\epsilon \epsilon) = C_1\alpha\rho G \frac{\epsilon}{k} - \left[\left(\frac{2}{3}C_1 - C_{3,RDT} \right) \alpha\rho \nabla \cdot u\epsilon \right] - \left(C_2\alpha\rho \frac{\epsilon}{k} \epsilon \right) + S_\epsilon + S_{fvOptions} \quad (10)$$

Donde

- α = Fracción de fase de la fase dada [-]
 ρ = Densidad del fluido [kgm^{-3}]
 G = Tasa de producción de energía cinética turbulenta debida a la parte anisótropa del tensor de esfuerzo de Reynolds [m^2s^{-3}]
 D_ϵ = Difusividad efectiva para ϵ [-]
 C_1 = Coeficiente del modelo [s]
 C_2 = Coeficiente del modelo [-]
 $C_{3,RDT}$ = Coeficiente del término de compresión de la teoría de la distorsión rápida [-]

S_ϵ = Término fuente interno para ϵ

$S_{fvOptions}$ = Términos fuente introducidos por el diccionario fvOptions para ϵ

La ecuación de la energía cinética turbulenta, k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho k) + \nabla \cdot (\alpha\rho uk) - \nabla^2(\alpha\rho D_k k) = \alpha\rho G - \left(\frac{2}{3}\alpha\rho\nabla \cdot uk\right) - \left(\alpha\rho\frac{\epsilon}{k}k\right) + S_k + S_{fvOptions}$$

Donde:

S_k = Término fuente interno para k .

$S_{fvOptions}$ = Términos fuente introducidos por el diccionario fvOptions para k .

2.6.- Dominio numérico e independencia de malla.

Las simulaciones numéricas se realizan en un sistema de 2D utilizando un código abierto que usa la discretización de volumen finito OpenFOAM®. Como ya se mencionó anteriormente nuestro estudio se realizó utilizando el solver llamado InterFoam, que es un solucionador para 2 fluidos incompresibles (formulación "Volume of Fluid" o VoF). Estrictamente, se debe considerar la compresibilidad del aire, sin embargo, en el caso de aguas poco profundas, este efecto puede considerarse insignificante. El modelo de turbulencia utilizado para la simulación fue el RANS con el modelo de turbulencia el de $k-\epsilon$.

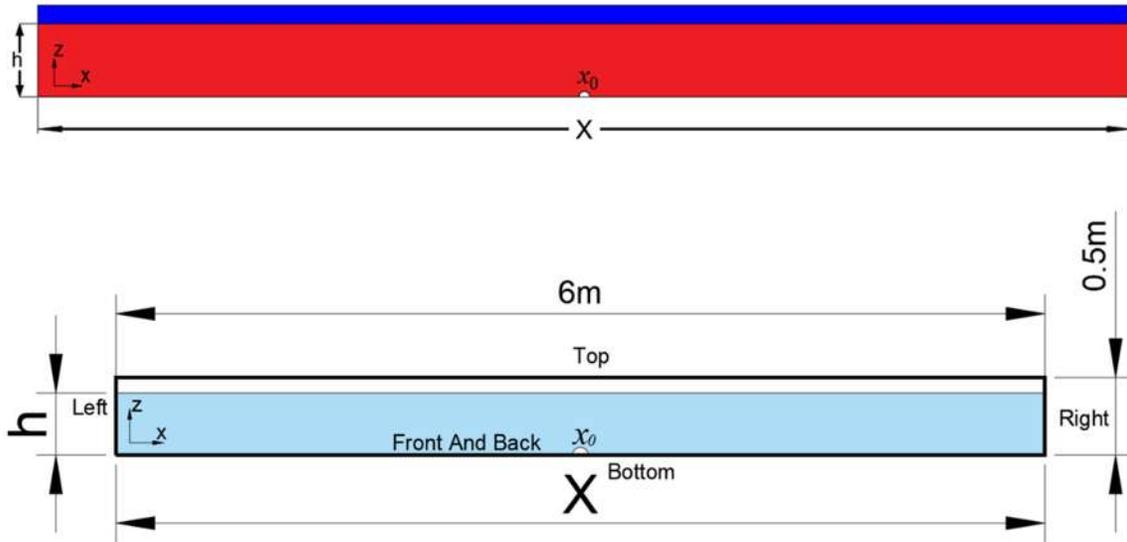
La creación de la malla se realizó a partir de blockMesh, que es un archivo dentro de OpenFoam™ que permite la creación de geometrías simples, así como de su respectiva malla. Las simulaciones realizadas se dividen en tres clases las cuales fueron:

1. Cortina de burbujas con agua en reposo.
2. Cortina de burbujas con oleaje.
3. Cortina de burbujas con corriente.
4. Cortina de burbuja con corriente y oleaje.

1.- Cortina de burbujas con agua en reposo.

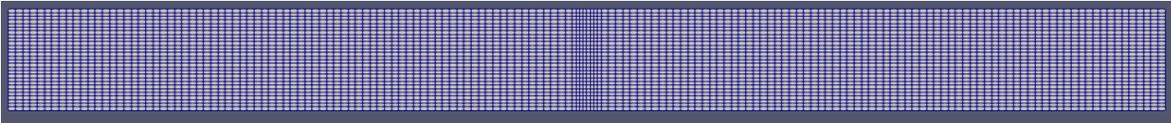
Para el primer caso con la columna de agua en reposo, la cortina de burbujas se origina en el centro de la longitud total del canal (X) y es denotada por x_0 , h es la profundidad de la columna de agua ($h = 0.4\text{m}$) y la altura total de dominio es de 0.5m , tal como se observa en la Figura 2.6.1.

Las condiciones de frontera utilizadas son Left, Right y Bottom, las cuales son consideradas como paredes con condición de no deslizamiento, Top que es considerada como salida, x_0 es una región o "parche" de la malla donde se establece una condición de entrada/salida de velocidad constante (Inlet), la cual corresponde al punto de inyección del aire y las fronteras denominadas Front y Back tienen condición de frontera empty, para planos de simetría que no se resuelven.



Figuras 2.6.1.- Dominio de la simulación.

La malla utilizada para el primer caso fue una malla rectangular uniforme en casi todo el largo del dominio con excepción en el punto de inyección de las burbujas, donde ésta fue un poco más fina, Figura 2.6.2.



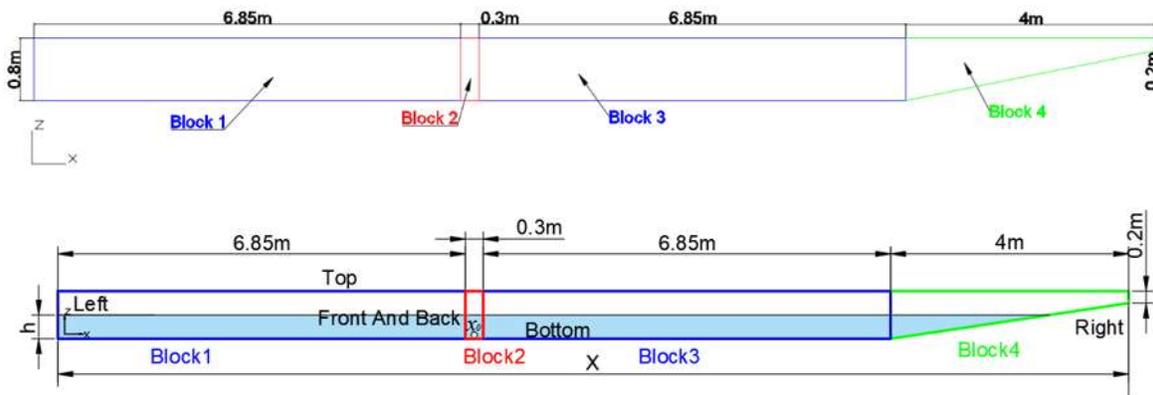
Figuras 2.6.2.- Malla del dominio para el caso de columna de agua en reposo.

En esta primera etapa de las simulaciones, al igual que para las otras 3, la forma en cómo se introdujo la cortina de burbujas fue a través de TopoSet y createPatch -overwrite, con las cuales se define una región de la malla la cual se comportará como entrada. Primero con ayuda de topoSet se fija un punto sobre la malla para la inserción de las burbujas, después con createPatch -overwrite se sobre escribe la malla y la geometría para introducir el aire a través del punto previamente fijado. La introducción de la columna de agua se hace a través de alpha.water que es un archivo dentro de OpenFOAM® para fijar una zona la cual estará llena de agua. Una vez introducido este último archivo sólo se necesita el archivo setFieldsDict para definir la regiones de agua en el dominio.

2.- Cortina de burbujas con oleaje.

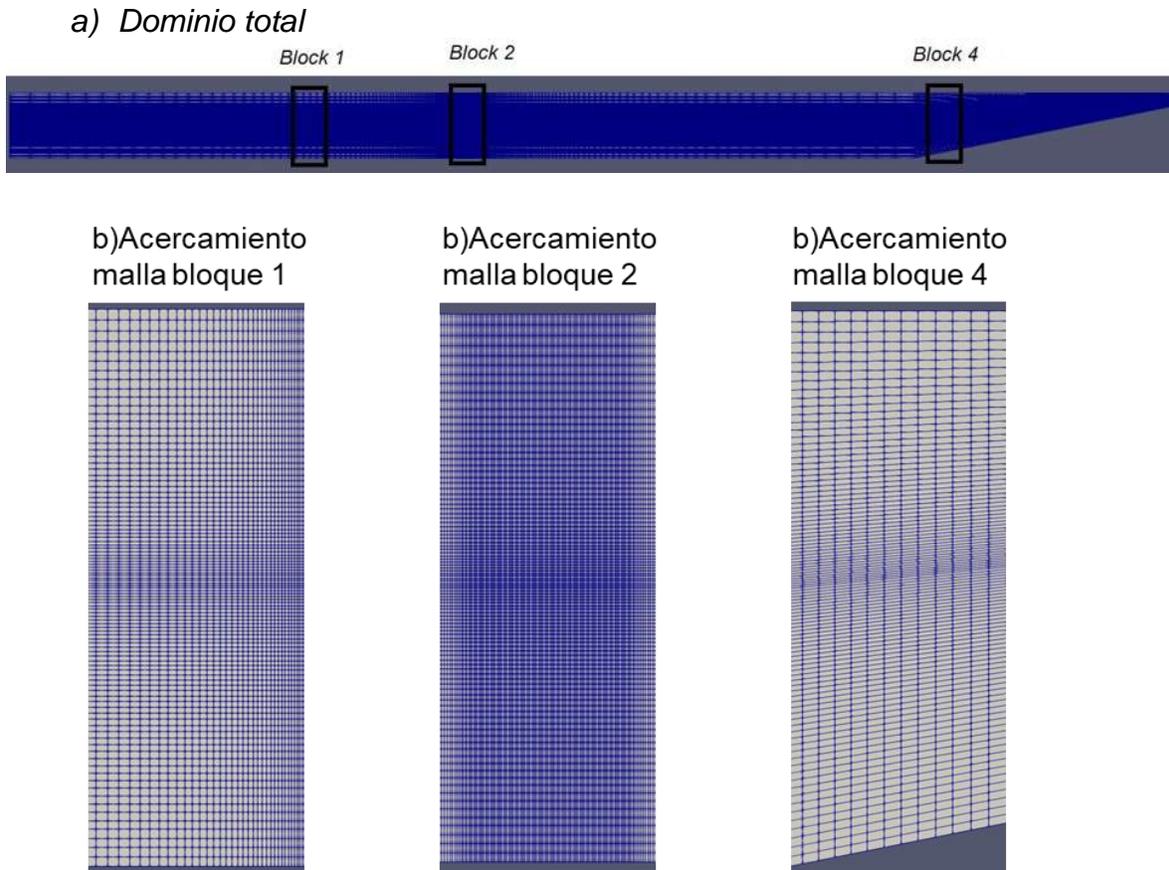
Para el segundo caso se introdujeron olas a nuestra simulación, las cuales fueron construidas con teoría de Stokes de segundo orden, con condiciones de frontera de

no deslizamiento, las olas se generaron a través de wavesProperties el cual utiliza libwaves.so dentro de OpenFOAM® para la generación de estas. Para este se agregó una rampa (tratando de emular la playa) para amortiguar las olas generadas por el software y que de este modo el eventual retorno ocasionado por el rebote en las paredes no influenciara la interacción de la cortina de burbujas y las olas que es nuestro punto de estudio. También para este punto, la malla se dividió en cuatro partes las cuales fueron: zona antes del punto de inyección, punto de inyección, zona después del punto de inyección y rampa (inclinación). La zona antes del punto de inyección y después de este tiene la misma longitud y malla, y las cuatro partes comparten la misma altura de dominio que es de 0.8m, tal como se muestra en la Figura 2.6.3.



Figuras 2.6.3.- Dominio de simulación para la interacción de olas y burbujas, donde $h=0.4m$.

El punto de inyección x_0 se encuentra en que se encuentra en el centro del bloque 2, el cual tiene un tamaño de malla más fino en comparación con los otros 3 bloques donde el crecimiento de malla fue gradual desde el centro hacia los extremos teniendo un total de 76962 nodos distribuidos a lo largo de todo el dominio Figura 2.6.4. La altura de columna de agua es de $h = 0.4m$, Las condiciones de frontera utilizadas son Left, Right y Bottom, las cuales son consideradas como paredes con condición de no deslizamiento, Top es considerada como salida, inlet (x_0) es el punto de inyección del aire y Front And Back tiene condición de frontera empty.



Figuras 2.6.4.- Mallado de la simulación para el caso 2 y 3 (mallado por bloques)

3.- Cortina de burbujas con corriente.

Para el caso de la malla utilizada con corriente, la forma de construcción de las burbujas fue la misma que para el caso anterior (Figura 2.6.4). Se introdujo una condición de velocidad de corriente promedio U_{Mean} en pared lateral izquierda definida como left esto a través de las condiciones de U_{orig} (velocidad de entrada).

4.- Cortina de burbujas con corriente y oleaje.

Para este caso las olas son construidas con teoría de Stokes de segundo orden y condiciones de frontera de no deslizamiento. La corriente se introduce con una condición de velocidad de corriente promedio de U_{Mean} . Se utilizan las mismas condiciones de frontera y de mallado que para el caso de cortina de burbujas con oleaje.

2.7.- Simulaciones Realizadas.

Como se mencionó anteriormente en el apartado de creación de la malla nuestros casos de estudio se dividen en 4 los cuales son cortina de burbujas con: columna de agua en reposo, con oleaje, con corriente y con oleaje y corriente. En la Tabla 2.7.1. Se detallan las condiciones de las simulaciones realizadas para velocidades de entrada de aire en un rango de 1 a 2.79 m/s. Además, se incluyen tres velocidades específicas de entrada de aire (0.97, 0.37 y 0.174) con fin de validar los resultados de este trabajo con los datos presentados por Fannelop (1991). Estos últimos tres valores son equivalentes a los experimentos 3D, es decir, tienen el mismo flujo por unidad de profundidad que el experimento en cuestión.

Tabla 2.7.1.- Simulaciones realizadas.

Velocidades (m/s)	Cortina con Columna de Agua en Reposo	Cortina con Oleaje (altura de ola 10 y 15 cm)	Cortina con Corriente (UMean = 0.1 m/s)	Cortina con Oleaje y corriente (altura de ola 10 y 15 cm)
1	x	x	x	x
1.1033	x	x	x	x
1.5	x	x	x	x
2	x	x	x	x
2.5	x	x	x	x
2.79	x	x	x	x
0.174 (<i>Fanneløp</i>)	x			
0.37 (<i>Fanneløp</i>)	x			
0.97 (<i>Fanneløp</i>)	x			

2.8.- Prueba de tamaño del dominio y de las recirculaciones.

Utilizando el dominio mostrado en la Figura 2.6.1 se introduce el flujo de aire a 1.5 m/s, esto produce recirculaciones simétricas en ambos lados de la cortina, como se muestra en la Figura 2.8.1. La longitud de recirculación (L) es medida de la línea de inyección de aire al extremo (derecho o izquierdo) hasta donde se termina la recirculación. Las dimensiones de estas recirculaciones dependen del flujo de aire, forma de inyección de aire y de las dimensiones del contenedor. Con el fin de determinar la longitud total del dominio efectiva a utilizar, donde las paredes

laterales no afectan el tamaño de las recirculaciones, se estudian diferentes relaciones de X/h , donde X es la longitud total del tanque y h es la profundidad del agua. Diecisiete tamaños de dominio son utilizados: $X/h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18$ y 20 .

Todas las simulaciones se realizaron con una profundidad de agua de $h=0.4\text{m}$, esto con la finalidad de encontrar el largo efectivo donde las paredes laterales ya no influyen en el tamaño de la recirculación ocasionada por la cortina de burbujas. Los resultados obtenidos de la prueba de recirculación se presentan en la Tabla 2.8.1 y en la Figura 2.8.1.

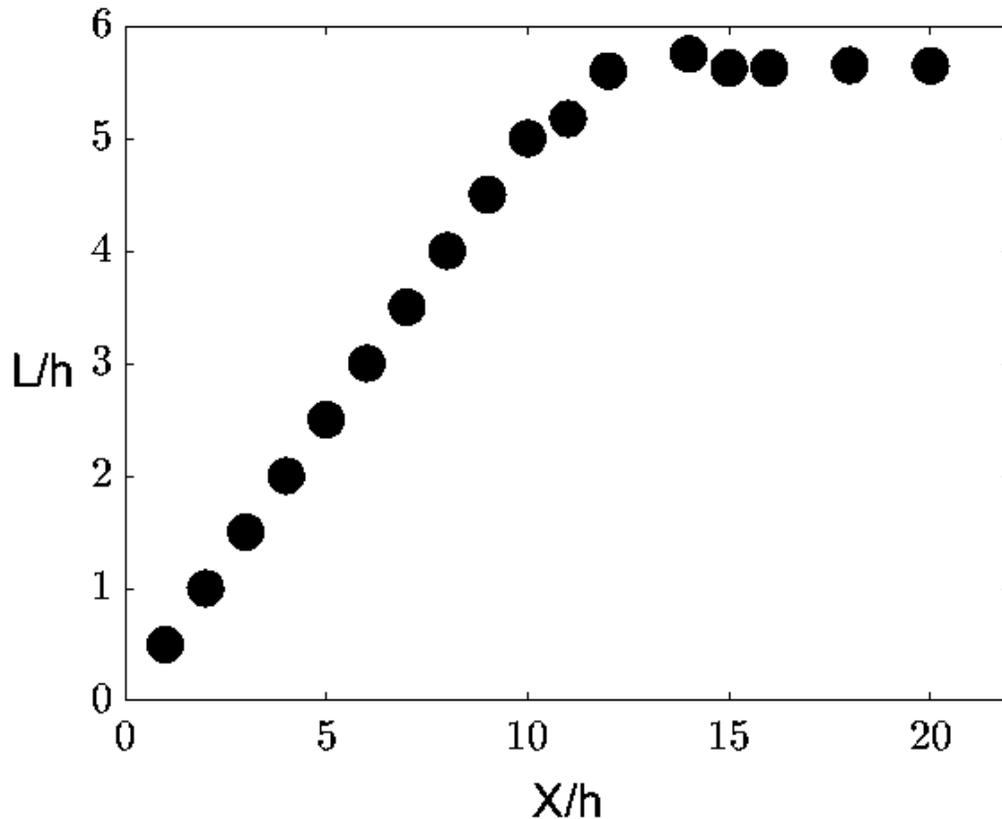
Tabla 2.8.1.- Tamaños del dominio(X) y longitud de recirculación (L), en base a h (profundidad de columna de agua).

X/h	L/h	X (largo total en m)
1	0.5	0.4
2	1	0.8
3	1.5	1.2
4	2	1.6
5	2.5	2
6	3	2.4
7	3.5	2.8
8	4	3.2
9	4.5	3.6
10	5	4
11	5.175	4.4
12	5.6	4.8
14	5.75	5.6
15	5.625	6
16	5.625	6.4
18	5.65	7.2
20	5.645	8

En esta tabla se puede observar que la longitud de recirculación ocasionada por la cortina de burbujas tiende a tener casi un valor constante a partir de $x=6\text{m}$, donde la longitud de recirculación se encuentra a $L/h=5.625$, la cual es medida desde el punto de inyección de las burbujas (centro de nuestro dominio) a una de las paredes laterales del tanque.

En la Figura 2.8.1. se puede observar el gráfico correspondiente a la Tabla 2.8.1, qué es la representación adimensional de nuestra prueba efectiva de tamaño de

dominio con respecto al tamaño de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas.

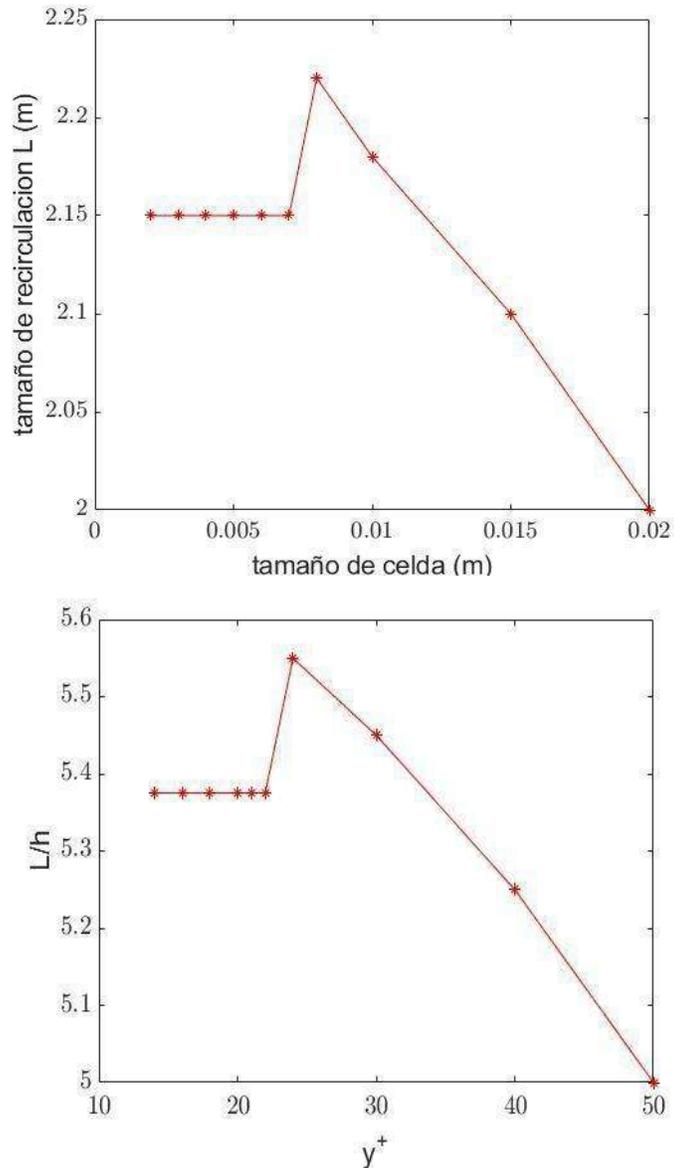


Figuras 2.8.1.- Prueba de tamaño de recirculación para distintos tamaños de X (longitud efectiva del dominio).

De la Figura 2.8.1. Se puede observar que la longitud de recirculación ocasionada por la cortina de burbujas tiende a tener casi un valor constante a partir de $X = 5.4h$ (o bien de un valor de $X = 14h$, o $7h$ para cada lado desde el punto de inyección o centro del dominio). De estos resultados se encontró que la longitud de recirculación (L) se encuentra a $L/h=5.625$ ($L=5.625h$, que es menor a $7h$ que es largo que tiene el dominio del centro o punto de inyección hacia cada uno de los extremos). Por lo cual se puede estimar un largo efectivo de nuestro dominio a $x/h = 14$.

2.9.-Prueba de independencia de malla.

El estudio de independencia de malla se realizó con dos diferentes tamaños efectivos de nuestro dominio de tanque, los cuales fueron de relación $X/h = 12$ y 24 . En la Figura 2.9.1, se puede observar los resultados obtenidos, donde se ve que para una $y^+ = 10$ cerca de la zona de inyección las longitudes de circulación ya no se ven influenciadas por el tamaño de malla.



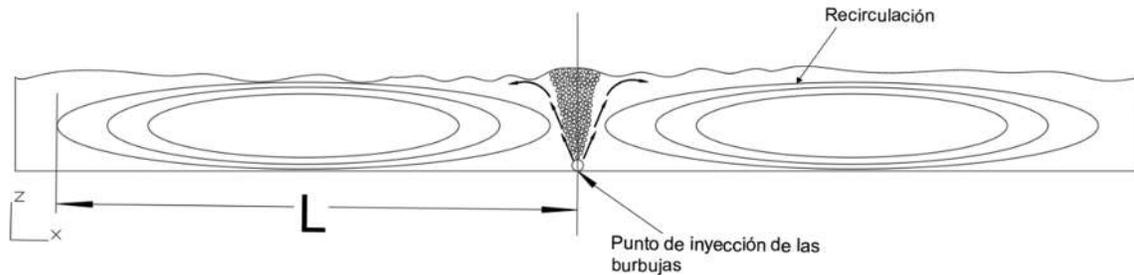
Figuras 2.9.1.- Prueba de independencia de malla.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL PRIMER CASO: CORTINA DE BURBUJAS Y COLUMNA DE AGUA EN REPOSO.

3.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	44
3.2.- Perfiles verticales de velocidades	44
3.3.- <i>Comparación de los resultados de la simulación con datos experimentales para los perfiles de velocidad vertical.</i>	47
3.4.- <i>Comparación con los datos de Fanneløp.</i>	49
3.5.- Perfiles de velocidad horizontal.	57
3.6.- Número de Froude.	66
3.7.- <i>Número de Froude para velocidades verticales.</i>	66

3.1.- Proceso de ascenso de burbujas.

Para el primer caso con la cortina de burbujas y la columna de agua en reposo, como primer paso se realizó la prueba de independencia de malla, después se realizó la prueba de longitud efectiva de nuestro dominio y posteriormente se obtuvieron las velocidades verticales y horizontales, lo cual quedará detallado más adelante. El proceso de ascenso de las burbujas genera recirculaciones en ambos lados del contenedor como se muestra en la Figura 3.1.1.



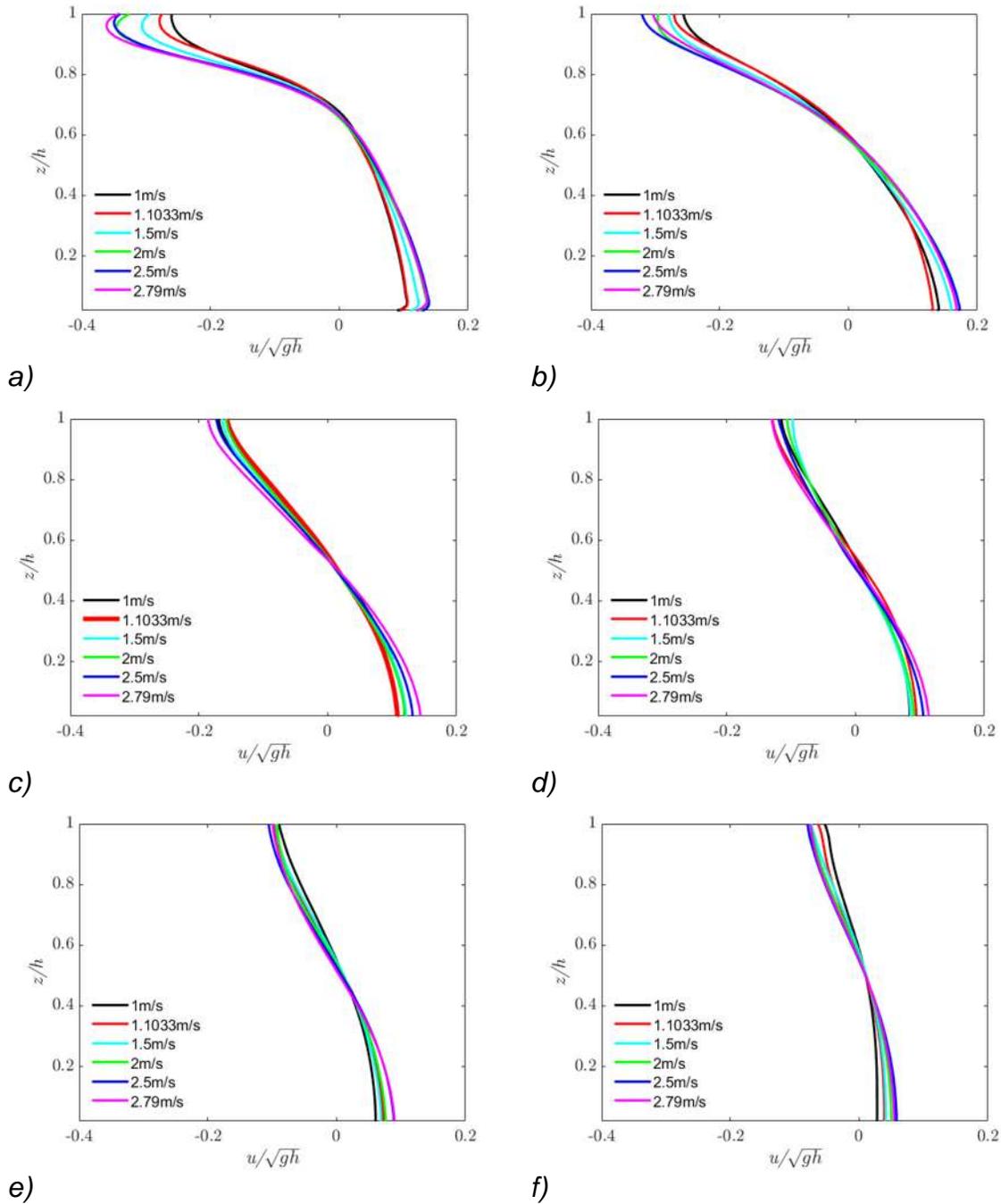
Figuras 3.1.1.- Esquema de recirculación provocado por la inyección de burbujas en el contenedor (L longitud de recirculación).

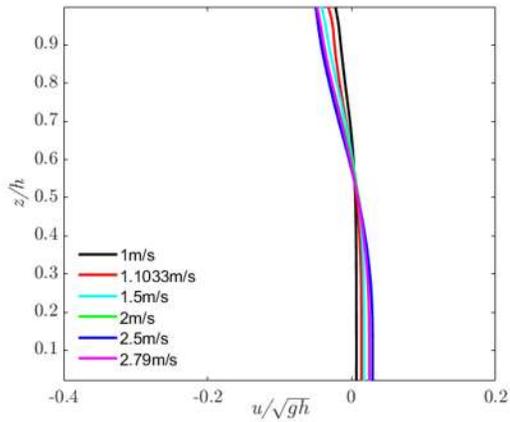
Estas recirculaciones (L) ocasionadas por el ascenso de estas burbujas son iguales en ambos lados de la cortina. Esto debido a que el agua en un principio se encuentra en reposo y a que solo está influenciada por la cortina de burbujas emergente y ascendente, además de que la distancia de cada una de las paredes laterales al centro (origen de la cortina de burbujas) es la misma.

3.2.- Perfiles verticales de velocidades

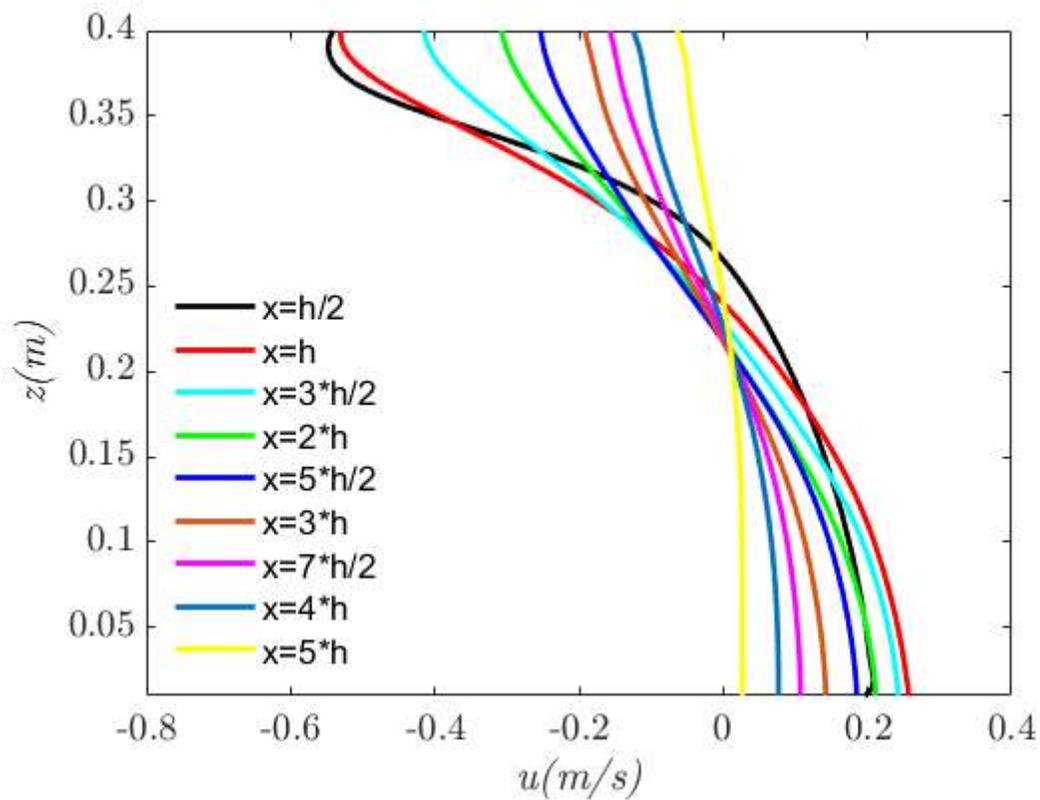
Uno de los parámetros importantes a tener en cuenta en cuanto a la dinámica de este tipo de sistemas, son los campos de velocidades, así como las magnitudes de estas a ciertas distancias del punto de inyección de las burbujas. Para este primer caso se realizaron mediciones de velocidad de la componente u para las distancias $x = h/2, h, h^{*3}/2, h^{*2}, h^{*5}/2, h^{*3}, h^{*7}/2, h^{*4}$ y h^{*5} , las cuales son porciones específicas para la comparación con resultados experimentales abordadas más adelante. Los resultados se muestran en la Figura 3.2.1. En la cual se muestran los resultados de los perfiles verticales para velocidades horizontales (perpendiculares a la cortina u) arrojados por la simulación, donde x es la distancia del punto de inyección a uno de los extremos del dominio, z la altura medida del fondo a la superficie libre del agua, h la altura de columna de agua 0.4m, g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s) y u las velocidades verticales generadas por la cortina. El

tiempo de simulación fue de 2 minutos de los cuales solo se consideran los tiempos después del segundo 10, a partir de este tiempo las velocidades se promediaron para los pasos de tiempo restantes.





g)
Figuras 3.2.1.- Gráficas individuales para los perfiles verticales de velocidad u adimensional para todas las velocidades analizadas para las posiciones x , a) $h/2$, b) h , c) h^*2 , d) $h^*5/2$, e) h^*3 , f) h^*4 y g) h^*5 para diferentes valores de flujo de aire ($V_{\text{aire}} = 1.1033 \text{ m/s}$).

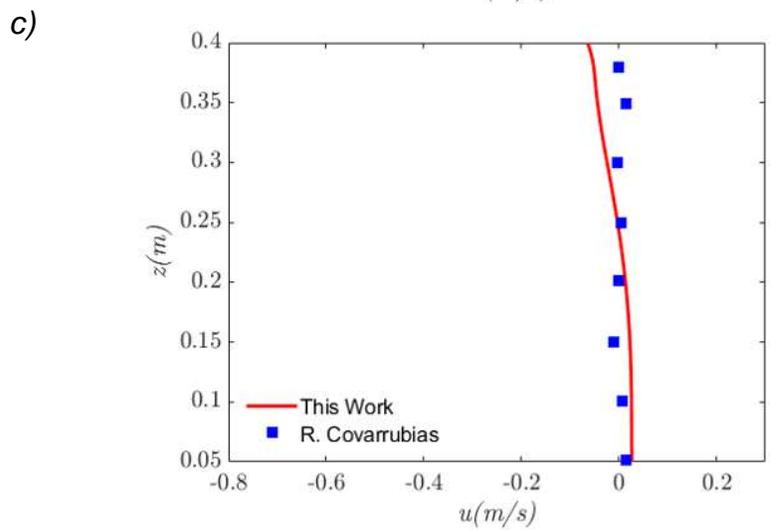
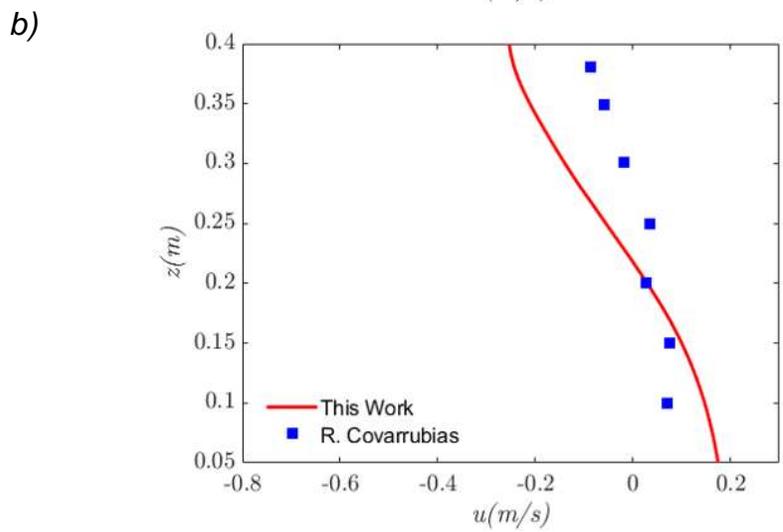
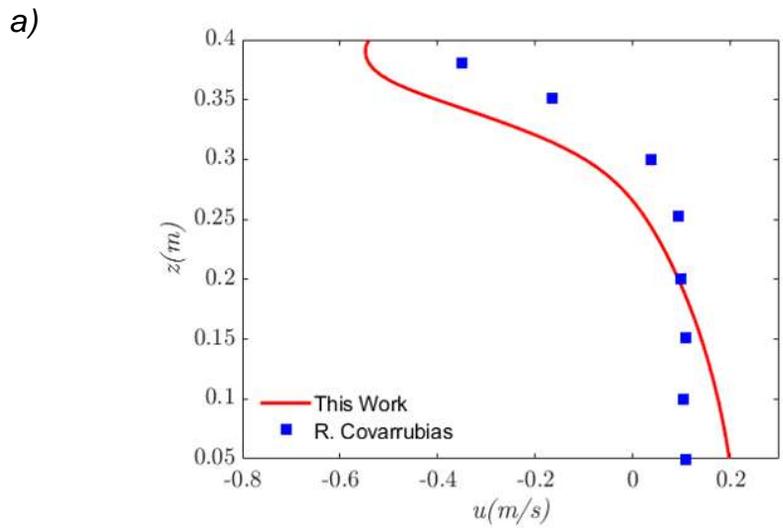


Figuras 3.2.2.- Gráficas individuales para los perfiles verticales de u para una $V_{\text{aire}} = 1.1033 \text{ m/s}$.

En la Figura 3.2.2. donde se pueden apreciar todos los perfiles para las distintas posiciones aquí representadas para un solo flujo de aire ($V_{\text{aire}} = 0.1033 \text{ m/s}$), en su forma no adimensional. Donde se puede apreciar que todos los perfiles de velocidades cambian de un valor positivo a un valor negativo en un punto cercano, pero a su vez un poco por encima de la mitad de la altura total de la columna de agua ($h = 0.25\text{m}$). Esto indica la influencia de las recirculaciones ocasionadas por la cortina de burbujas, donde para que estas existan debe haber un cambio en la dirección de las velocidades para que de este modo se puedan completar las elipses formadas por estas recirculaciones. También si vemos la gráfica 3.2.1 a) se puede ver que las velocidades parten de un valor cercano a 0.2m/s en el fondo del tanque y que encuentran un valor máximo en la superficie de este que es aproximadamente de -0.55m/s . Además de esto también se puede apreciar mirando una por una los resultados de las gráficas que los mayores valores de velocidades horizontales (u) causados por las velocidades ascendentes de la cortina de burbujas, se encuentran en la superficie libre. Aunado a que las velocidades van de decayendo desde el (punto de inyección) a medida que nos alejamos de este, como se puede ver en la figura 3.2.1 donde las mayores velocidades están $x = h/2$ y estas van decreciendo a medida que nos alejamos hasta encontrar las menores velocidades en $x = 5 \cdot h$ donde el rango de velocidades (u) va de 0.015 a -0.035 m/s . Y a medida que más nos alejamos estas velocidades van acercándose a cero.

3.3.- Comparación de los resultados de la simulación con datos experimentales para los perfiles de velocidad vertical.

Una vez capturados estos resultados se procedió a hacer la comparación con datos experimentales obtenidos por Rodrigo et al (UNAM-SISAL 2022), estos resultados fueron obtenidos a través de pruebas experimentales realizadas en el canal de pruebas que se encuentra en el laboratorio de ingeniería y procesos costeros de la unidad académica de la UNAM campus SISAL-YUCATÁN (LIPC-UNAM-SISAL). Este canal tiene unas dimensiones de 40m de largo por 0.8m de ancho y 1.27m de alto. Estos resultados fueron obtenidos por el maestro en ciencias Brayan Rodrigo Covarrubias estudiante del doctorado en ingeniería y procesos costeros de este campus para obtener el grado de Doctor en el área. Los resultados aquí comparados fueron extraídos a partir de las mediciones experimentales a distancias específicas de la cortina de burbujas las cuales fueron a $x = h/2$, $h \cdot 5/2$ y $h \cdot 5$, con una profundidad de columna de agua de $h = 0.4\text{m}$ iguales a los valores de la simulación. Las cuales se presentan en la Figura 3.3.1.



Figuras 3.3.1.- Comparación de los perfiles verticales obtenidos en este trabajo con los datos experimentales realizados por Covarrubias *et al.*, (2022) para

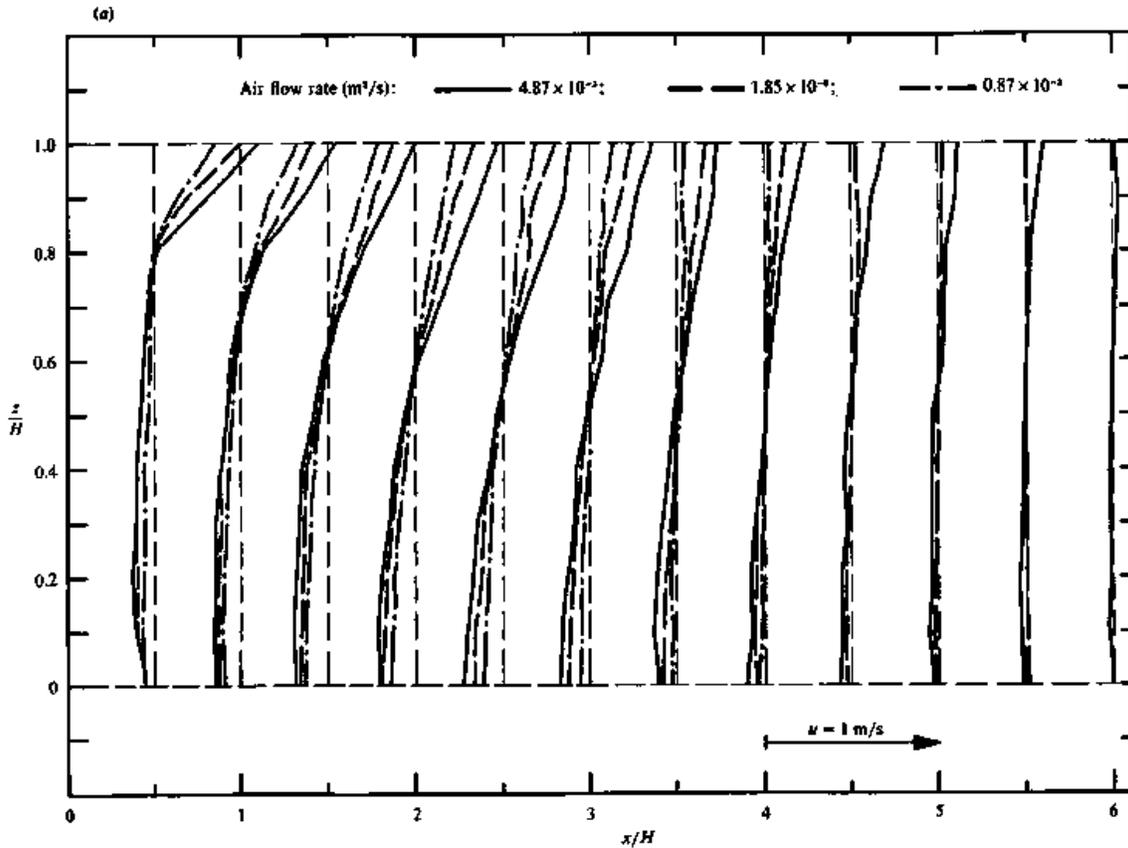
velocidades horizontales (u) para las posiciones a) $x = h/2$, b) $x = h^*5/2$ y c) $x = h^*5$.

De las comparaciones realizadas en estas gráficas se puede observar una gran similitud entre los datos experimentales y los resultados arrojados por la simulación. El porcentaje de error entre los datos experimentales y la simulación para la Figura 3.3.1 a) es de 5%, mientras que para los resultados de la Figura 3.3.1 b) el porcentaje de error es de 2.5% y para la Figura 3.3.1 c) el porcentaje de error es de 4.5%. Esto indica gran concordancia entre los datos experimentales (Covarrubias *et al.*, 2022) y los obtenidos en este trabajo.

3.4.- Comparación con los datos de Fanneløp (1991).

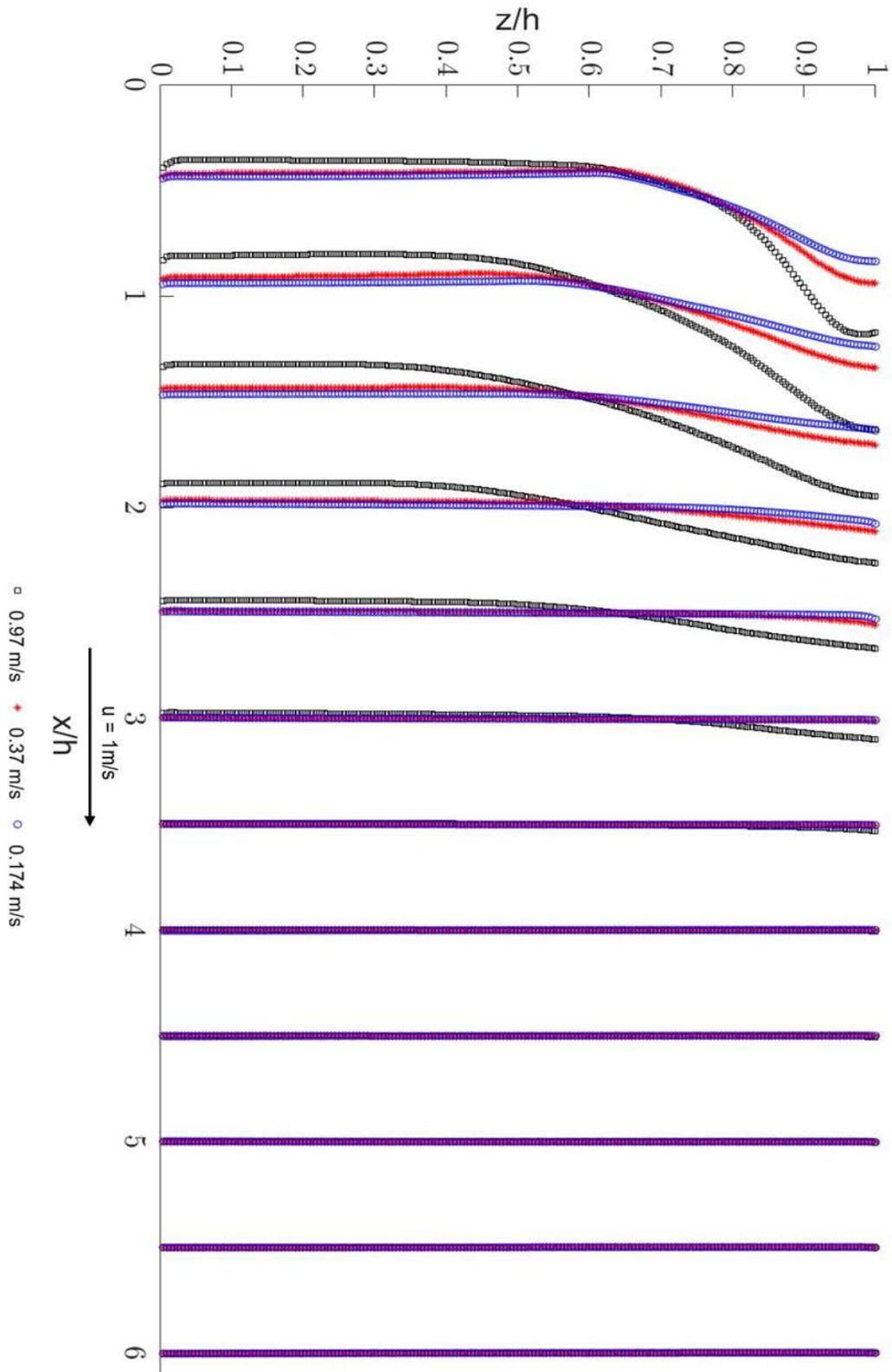
Otra serie de experimentos conocidos en la literatura son los realizados por Fanneløp *et al.* (1991), donde se realizaron una serie de experimentos en un canal de 1m de alto por 1 m de ancho y 40 m de largo. Donde se utilizó además una altura de columna de agua de 1m para la realización de estos experimentos, es este trabajo se obtuvieron los perfiles verticales de velocidades horizontales (u) parecidos a los ya presentados anteriormente. Aunque cabe mencionar que estos perfiles aquí examinados son presentados todos en una sola gráfica además de que Fanneløp (1991) utilizó una caudal por unidad de área y no una velocidad para estos perfiles, Figura 3.4.1. En la cual se pueden observar las comparaciones que realizó Fanneløp (1991) para tres flujos de aire diferentes las cuales son $4.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $0.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. En este trabajo se obtuvieron gráficas de perfiles verticales para las mismas distancias de la cortina de burbujas las cuales fueron medidas a $x/H = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5$ y 6 (H formato Fanneløp para nuestro caso se utilizó h), para las alturas adimensionales de z/H (z más alta 1m, $H = 1$) la cual va de 0 a 1.

Para realizar las validaciones correspondientes con estos datos, se realizaron una serie más de simulaciones para la cortina de burbujas con el agua en reposo utilizando los mismos valores que Fanneløp (1991). Para los cuales se utilizó un largo de canal lo suficientemente grande para que los rebotes de las paredes no jueguen un papel relevante en el tamaño de las recirculaciones y por ende en las magnitudes de las velocidades (el cual se analizó en apartados anteriores), el cual fue de 20 m. Como las simulaciones son en 2D se calculó un flujo por unidad de profundidad equivalente en estas simulaciones y por último se utilizó un alto de columna de agua de 1 m igual al que utilizó Fanneløp (1991).



Figuras 3.4.1.- Gráficos de los perfiles de velocidad verticales para velocidades horizontales realizados por Fanneløp (1991).

Como se puede observar en la Figura 3.4.1 la cual es la gráfica de los perfiles de velocidad de Fanneløp, donde como se mencionó anteriormente utilizó una sola gráfica para representar los distintos caudales a distancias específicas de la cortina. En este trabajo se ajustaron los gastos utilizados por Fanneløp (1991) a velocidades de entrada de aire (0.97 m/s, 0.37 m/s y 0.174 m/s), con el fin de validación. La comparación se muestra en la Figura 3.4.2. donde se encuentran los perfiles verticales de la componente u (dirección x) para una altura adimensional (z/h) con respecto a la distancia del punto de inyección hacia la pared (x/h).



Figuras 3.4.2.- Resultados de los perfiles verticales de la componente u , en base al formato de Fanneløp (1991) para las velocidades de 0.97m/s, 0.37m/s y 0.174m/s.

Como se puede ver en las Figuras 3.4.1 (perfiles verticales obtenidos por Fanneløp 1991), los resultados de las gráficas muestran resultados para caudales de $4.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $0.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, los cuales fueron ajustados a velocidades equivalentes de 0.97m/s, 0.37m/s y 0.174m/s en la Figura 3.4.2 (perfiles verticales obtenidos de la simulación). De los cuales se puede ver una gran concordancia en cuanto a las gráficas, pero estos perfiles también se compararon individualmente como se muestra en la Tabla 3.4.1.

Tabla 3.4.1.- Equivalencia entre los caudales de Fanneløp (1991) y las velocidades de la simulación.

<i>Caudal Fanneløp-1991</i>	<i>Velocidad Simulación</i>
$0.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	0.174 m/s
$1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	0.37 m/s
$4.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	0.97 m/s

La primera comparación es la realizada entre los valores de la primera fila que son $0.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y 0.174 m/s que es la velocidad más baja comparada, los resultados se muestran en la Figura 3.4.3. La segunda comparación es la realizada entre los valores de la segunda fila que son $1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y 0.37 m/s, los resultados se muestran en la Figura 3.4.4. La tercera comparación es la realizada entre los valores de la última fila que son $4.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y 0.97 m/s que es la velocidad de flujo más alto, los resultados se muestran en la Figura 3.4.5.

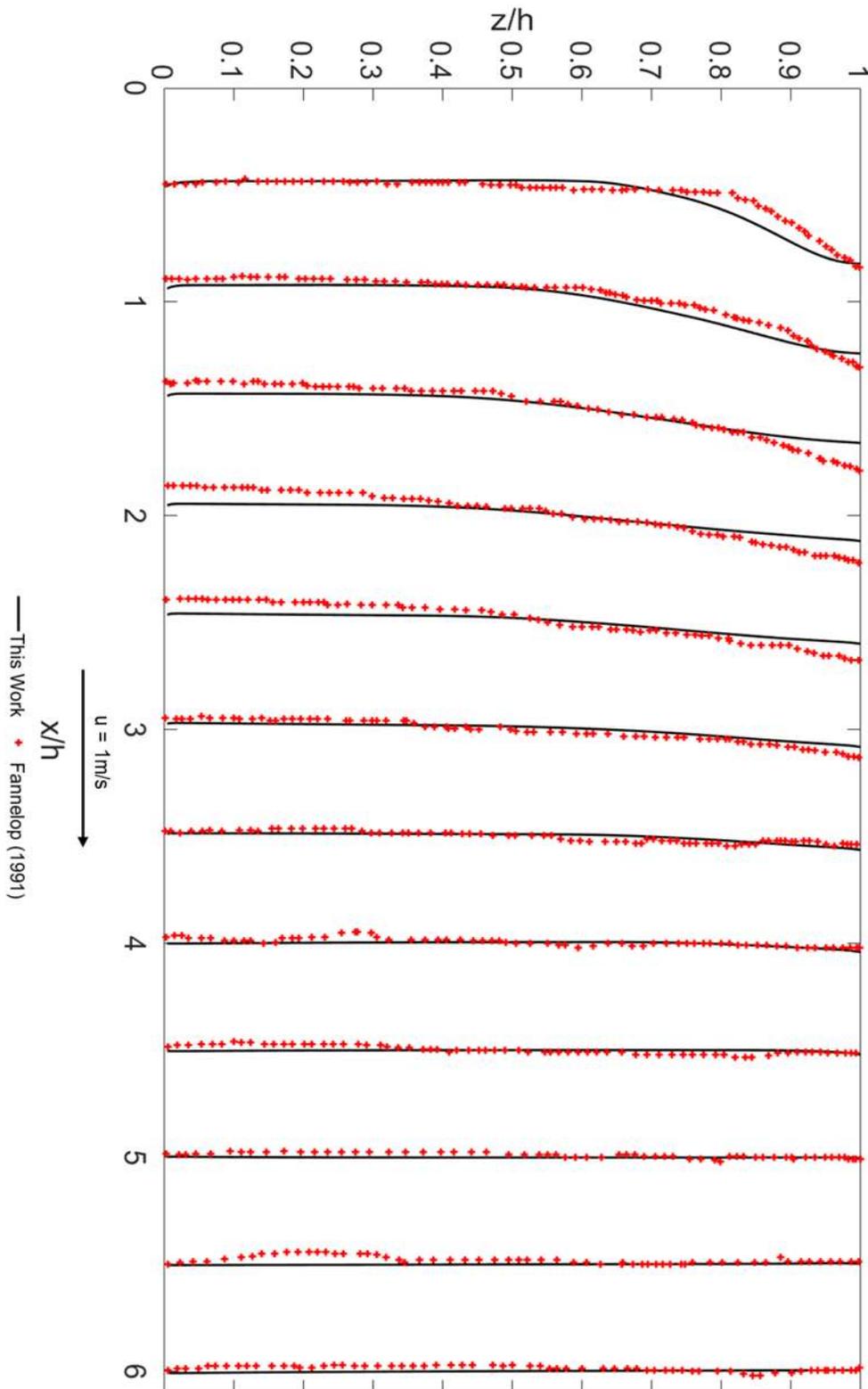
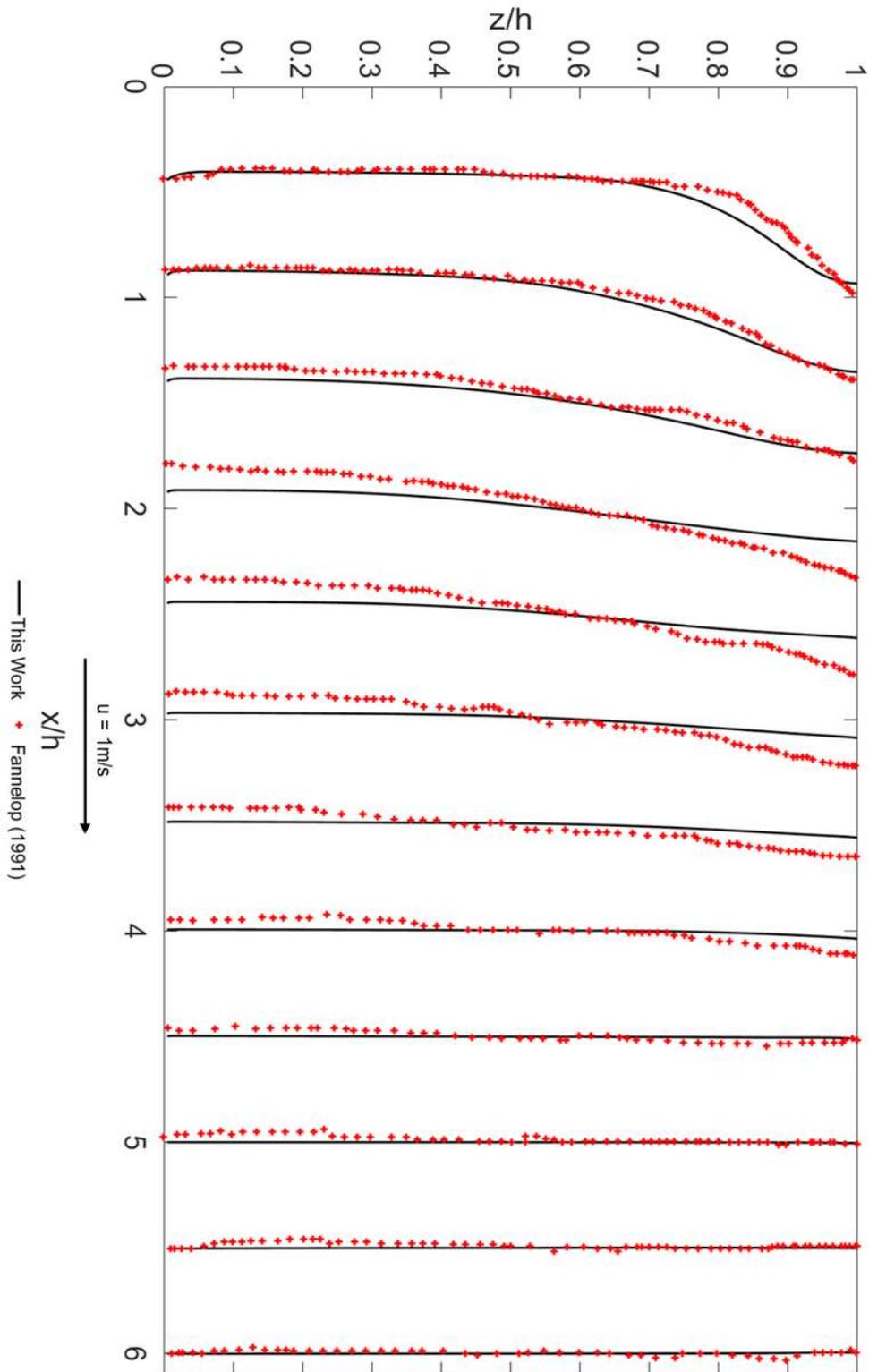
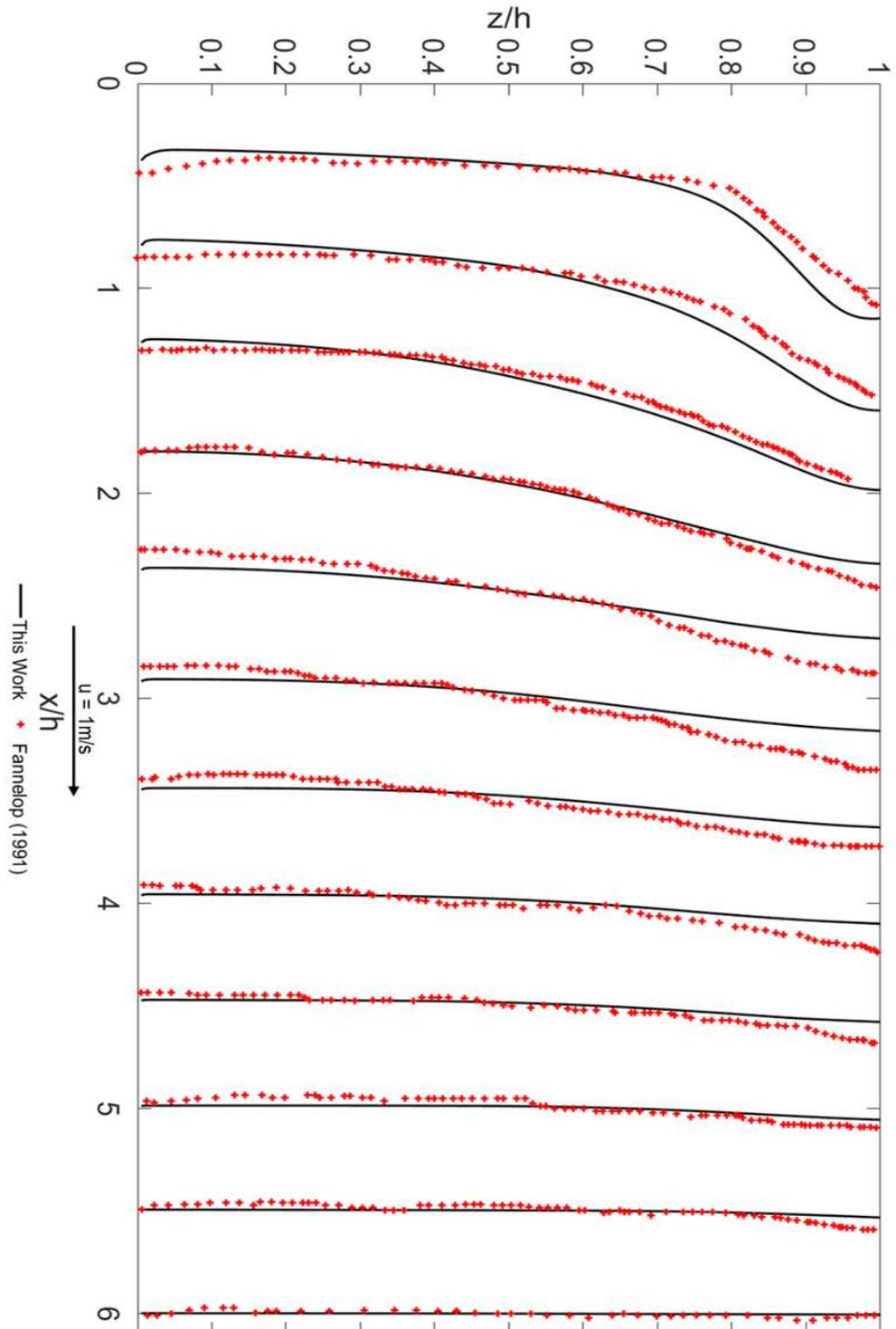


Figura 3.4.3.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de $0.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ utilizado por Fanneløp (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.



Figuras 3.4.4.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de $1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ utilizado por Fannelop (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.



Figuras 3.4.5.- Comparación de los perfiles verticales de la componente u , para el flujo de $4.47 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ utilizado por Fanneløp (1991), cruces rojas y el obtenido en este trabajo, línea negra.

De las comparaciones realizadas en las Figuras 3.4.3, 3.4.4 y 3.4.5, podemos observar una gran relación entre los valores obtenidos por Fanneløp y los obtenidos de las simulaciones. Donde además de ver que los valores son muy próximos entre sí también, se puede ver que el cambio de sentido en las velocidades perpendiculares a la cortina, se encuentran en ambos casos un poco por encima de la mitad del valor total de la columna de agua que es aproximadamente a 0.55 m. Esto debido a que se ajustó la altura de columna de agua a $h = 1$ m para que coincidiera con los parámetros de los experimentos realizados por Fanneløp (1991).

3.5.- Número de Froude.

Otra variable importante que nos habla acerca de cómo se comporta nuestro modelo es el número de Froude, el cual es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. El número de Froude se determina de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g * h}}$$

Donde:

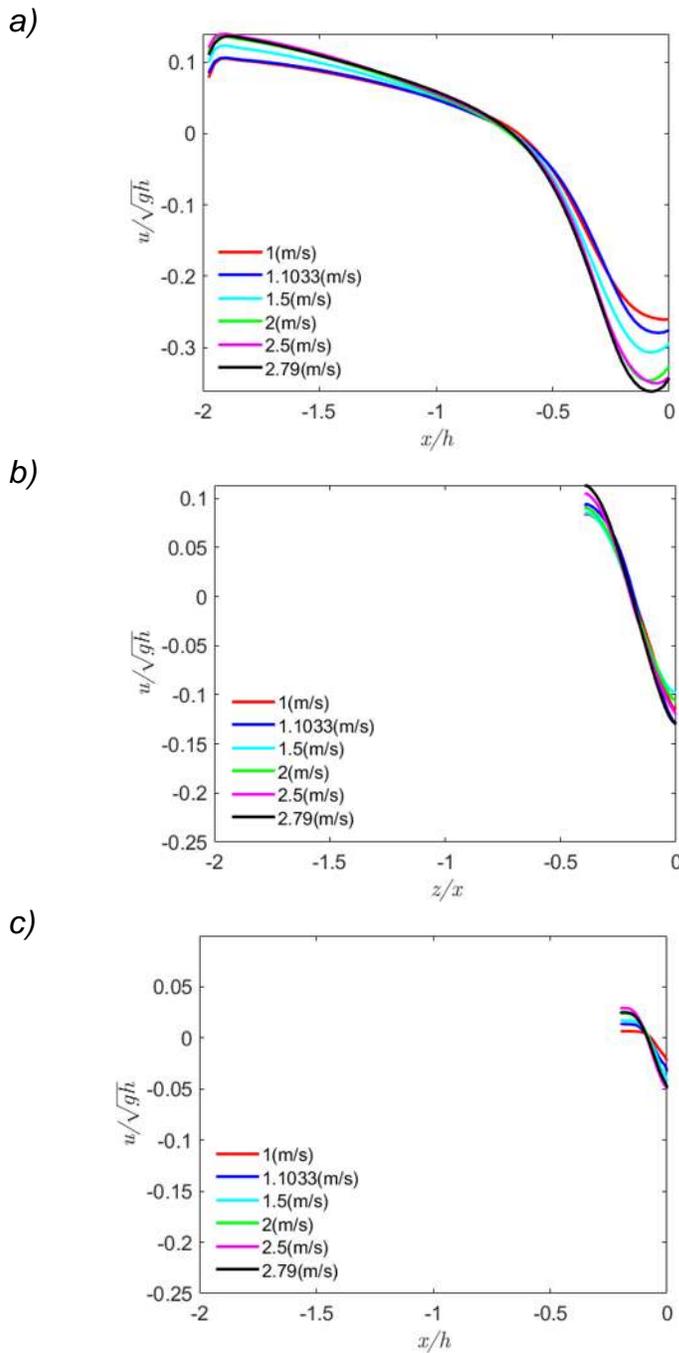
u = velocidad perpendicular al flujo de burbujas.

g = aceleración de la gravedad.

h = altura de la columna de agua.

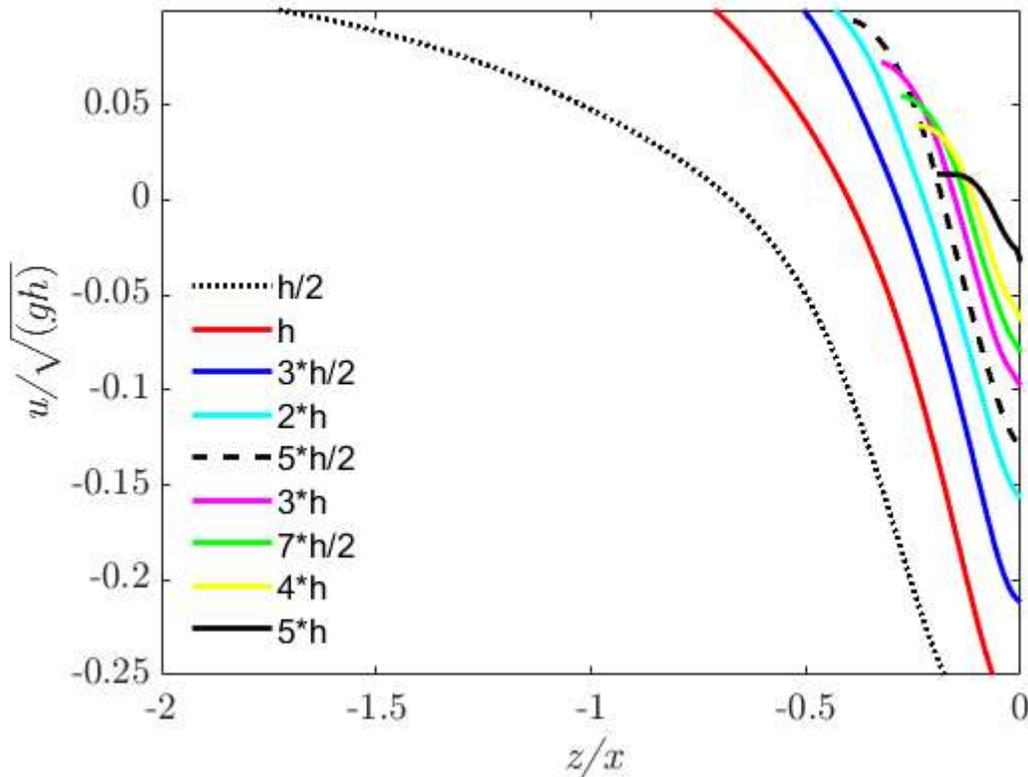
3.6.- Número de Froude para velocidades verticales.

A partir de los resultados presentados en el Capítulo 3.2 de los perfiles verticales de las velocidades horizontales (u), aquí se presentan en su forma adimensional con el número de Froude. Estas gráficas muestran las curvas de velocidades de la componente u para cada posición en donde se puede observar donde estas cambian de dirección y donde estas tiene una mayor magnitud espacial de la recirculación.



Figuras 3.6.1.- Gráfica de los números de Froude para a) $h/2$, b) $5h/2$ y c) $5h$.

En la Figura 3.7.1 se pueden observar los valores del número de Froude para las posiciones $h/2$, $5h/2$ y $5h$, para todas las velocidades analizadas respectivamente. En la Figura 3.7.2 se muestran los resultados para todos los las posiciones del número de Froude ($h/2$, h , $3h/2$, $2h$, $5h/2$, $3h$, $7h/2$, $4h$ y $5h$) para una sola velocidad ($V_{\text{aire}} = 1.1033 \text{ m/s}$).



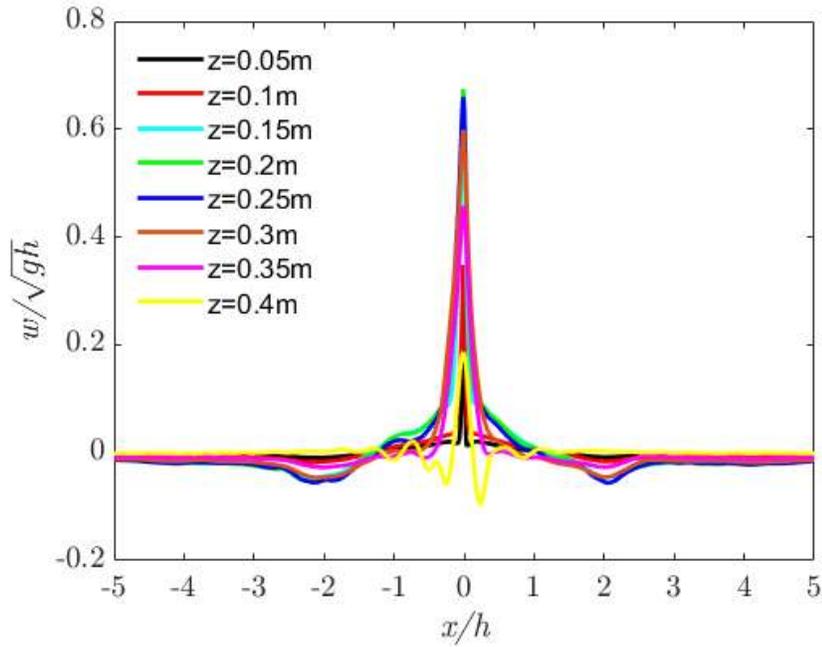
Figuras 3.6.2.- Número de Froude para los valores de la simulación a las posiciones h , $3h/2$, $2h$, $3h$, $7h/2$, $4h$ y $5h$.

Los marcadores negros representan las distancias de interés, ya que con estas se puede dar un panorama general del comportamiento de las *velocidades* u .

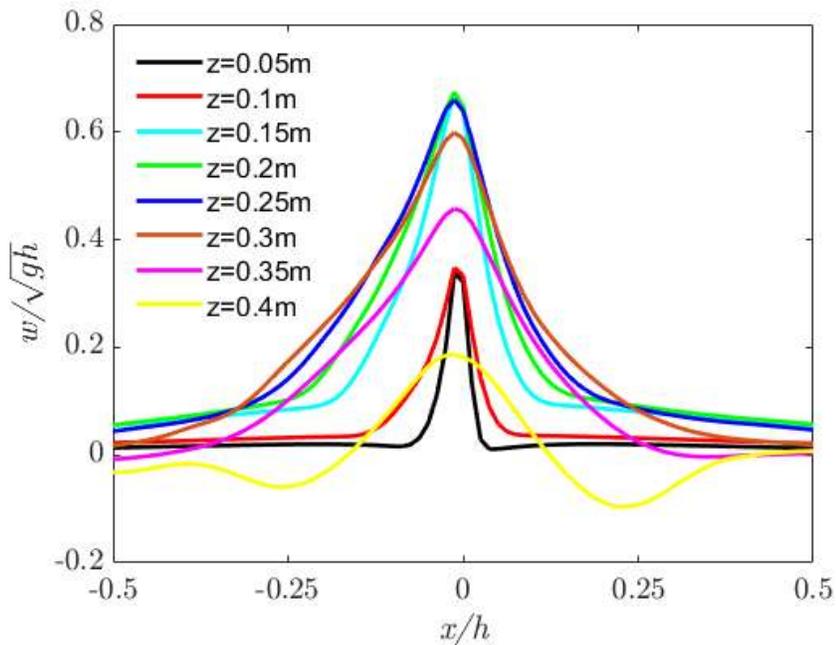
3.7.- Perfiles de velocidad horizontal.

De los datos obtenidos a través de la simulación también se obtuvieron los perfiles horizontales de la componente w a distintas alturas z , de las cuales son presentadas en su forma adimensional a través de las relaciones de w/\sqrt{gh} y x/h , en la Figura 3.5.1.

a)



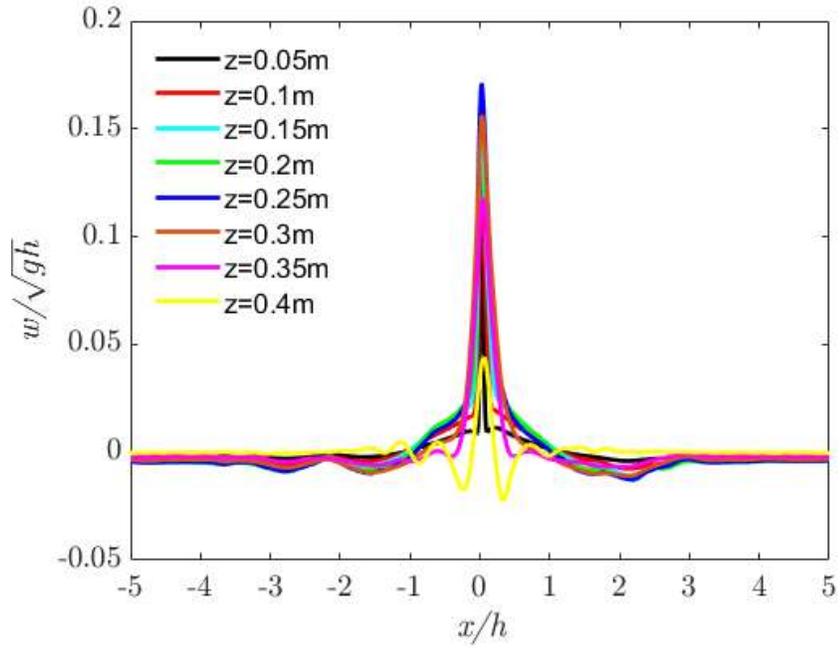
b)



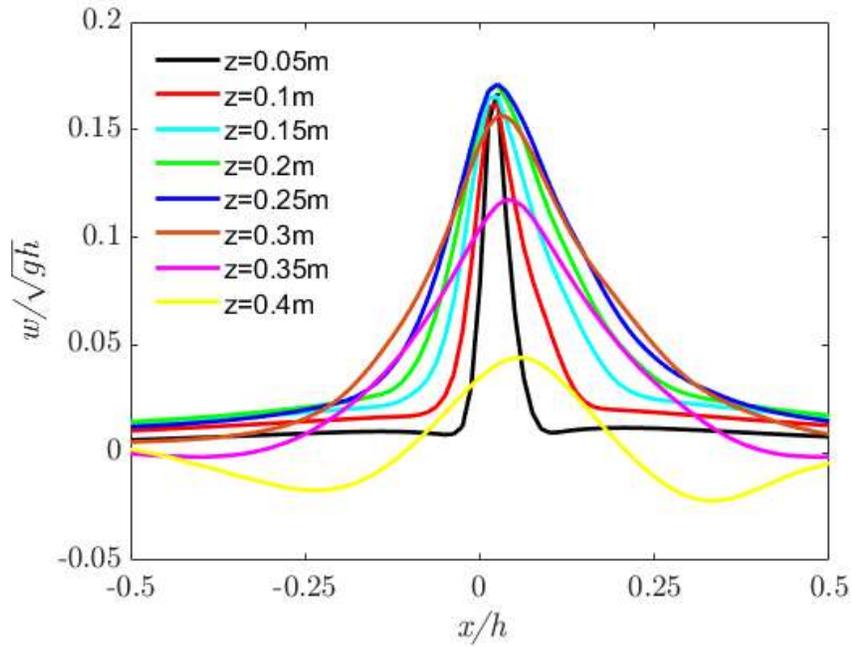
Figuras 3.7.1.- Gráfica de los perfiles horizontales para w a una $V_{\text{aire}} = 1 \text{ m/s}$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).

De la Figura 3.5.1, se puede ver que las velocidades ascendentes (w) mayores se encuentran cerca o justo en el punto de inyección de la columna de burbujas, además de que las mayores velocidades se encuentran justo por encima de la mitad de la altura total de la columna de agua (por encima del punto $z = 0.2\text{m}$). La presentación de estas velocidades para todos los flujos utilizados se puede ver en la Figura 3.5.2. a la 3.5.6.

a)

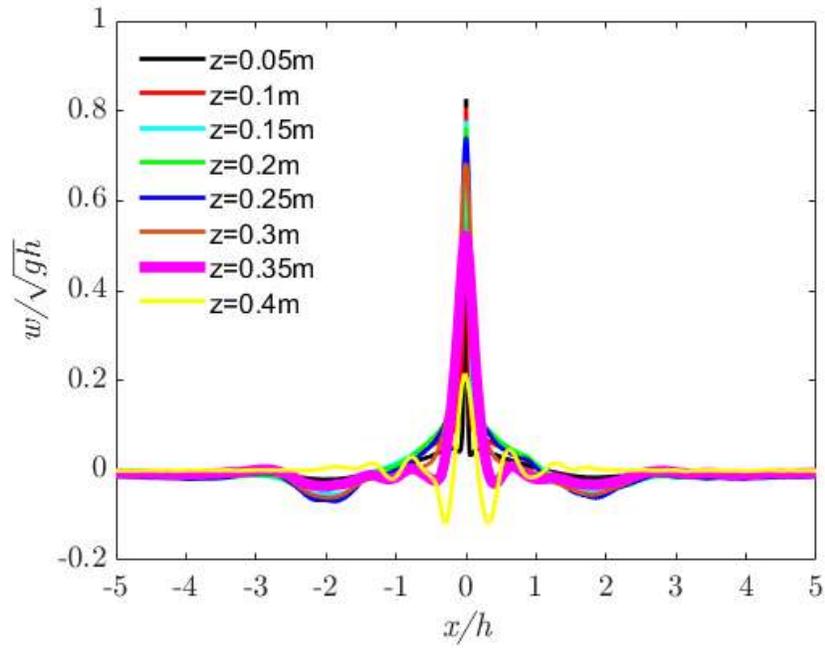


b)

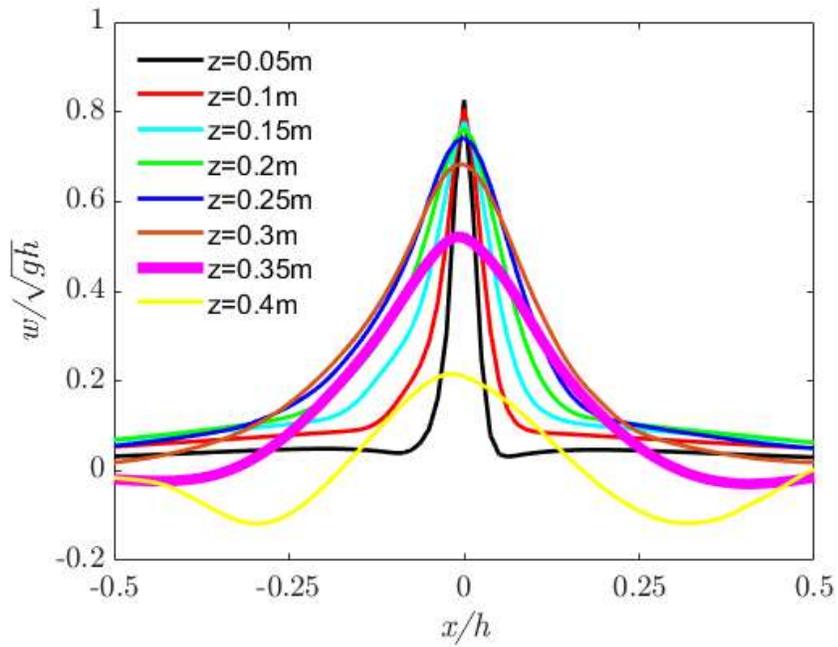


Figuras 3.7.2.- Perfiles verticales a $V_{\text{aire}} = 1.1033\text{ m/s}$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).

a)

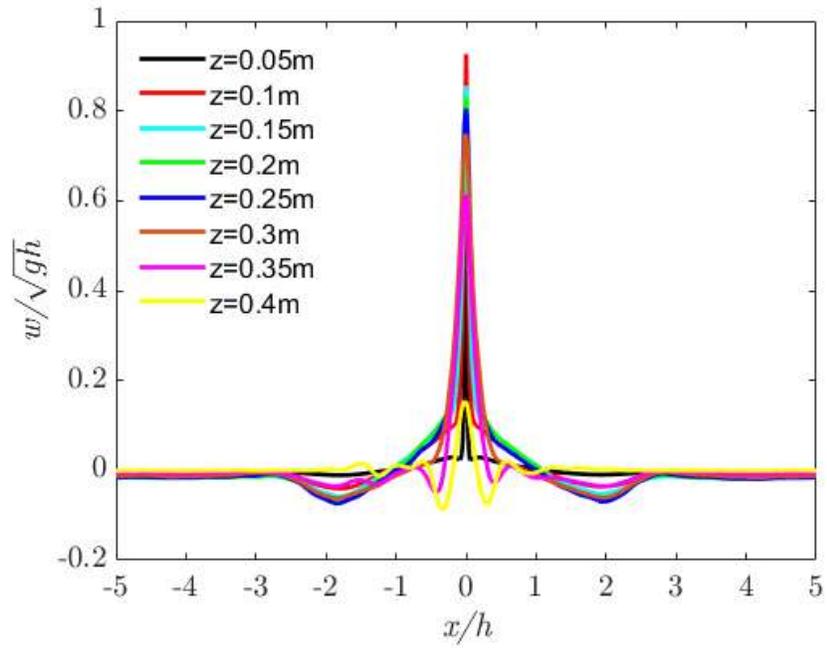


b)

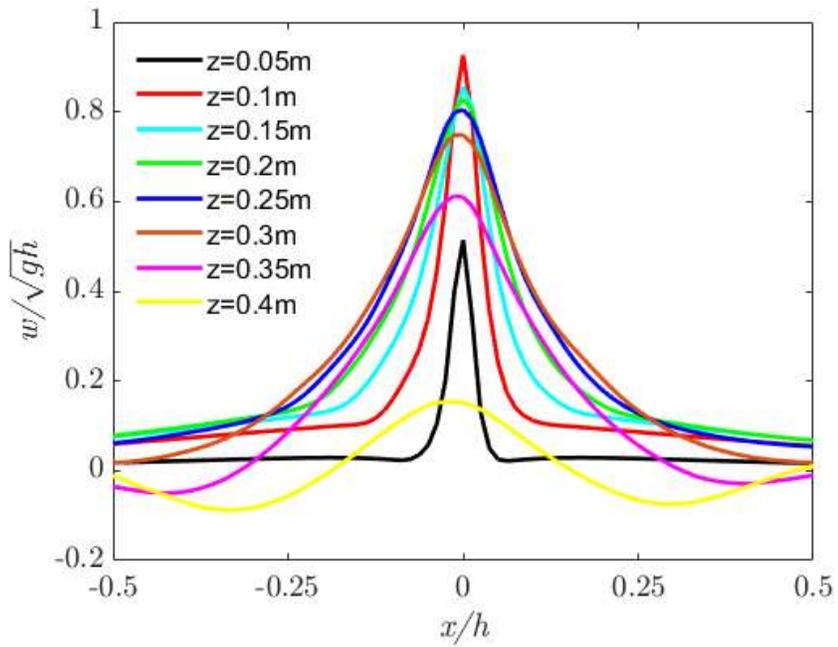


Figuras 3.7.3.- Perfiles verticales a $V_{\text{aire}} = 1.5 \text{ m/s}$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).

a)

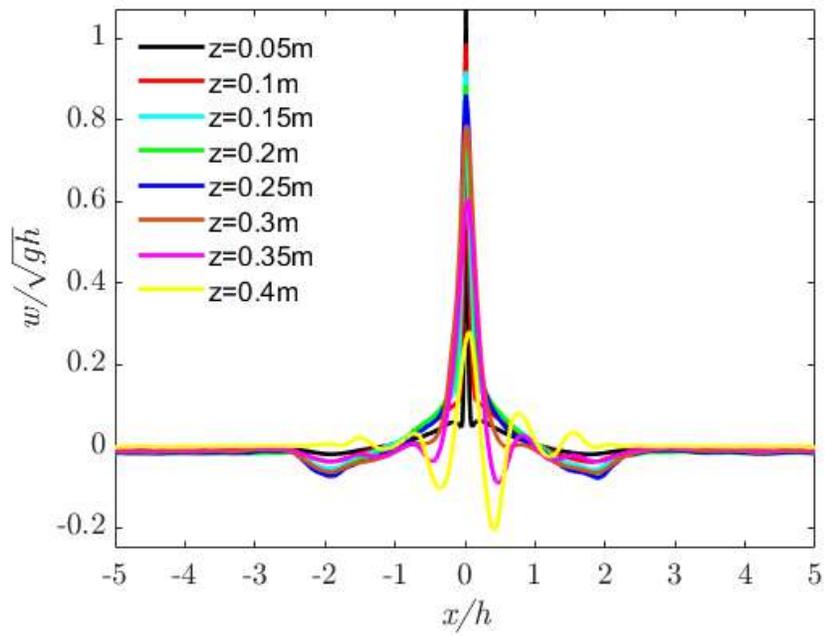


b)

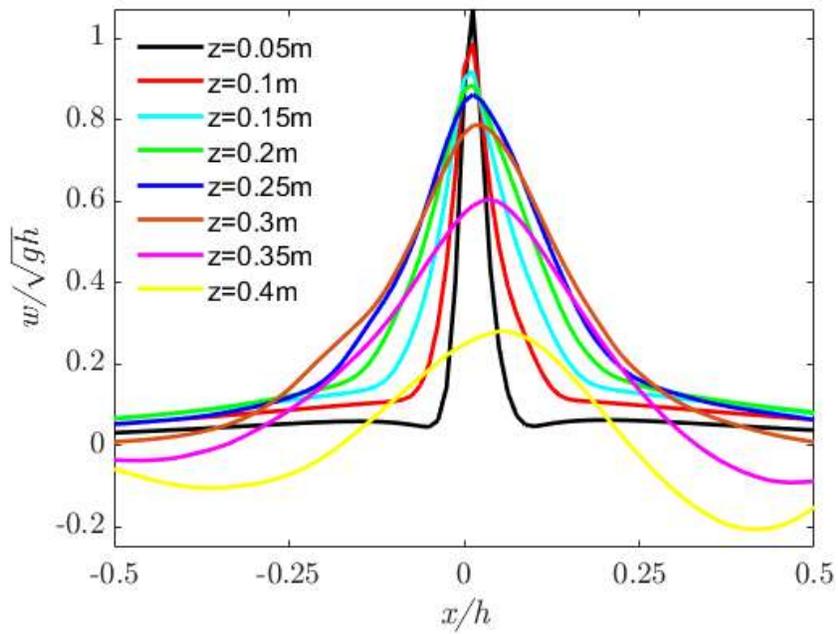


Figuras 3.7.4.- Perfiles verticales a $V_{\text{aire}} = 2 \text{ m/s}$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).

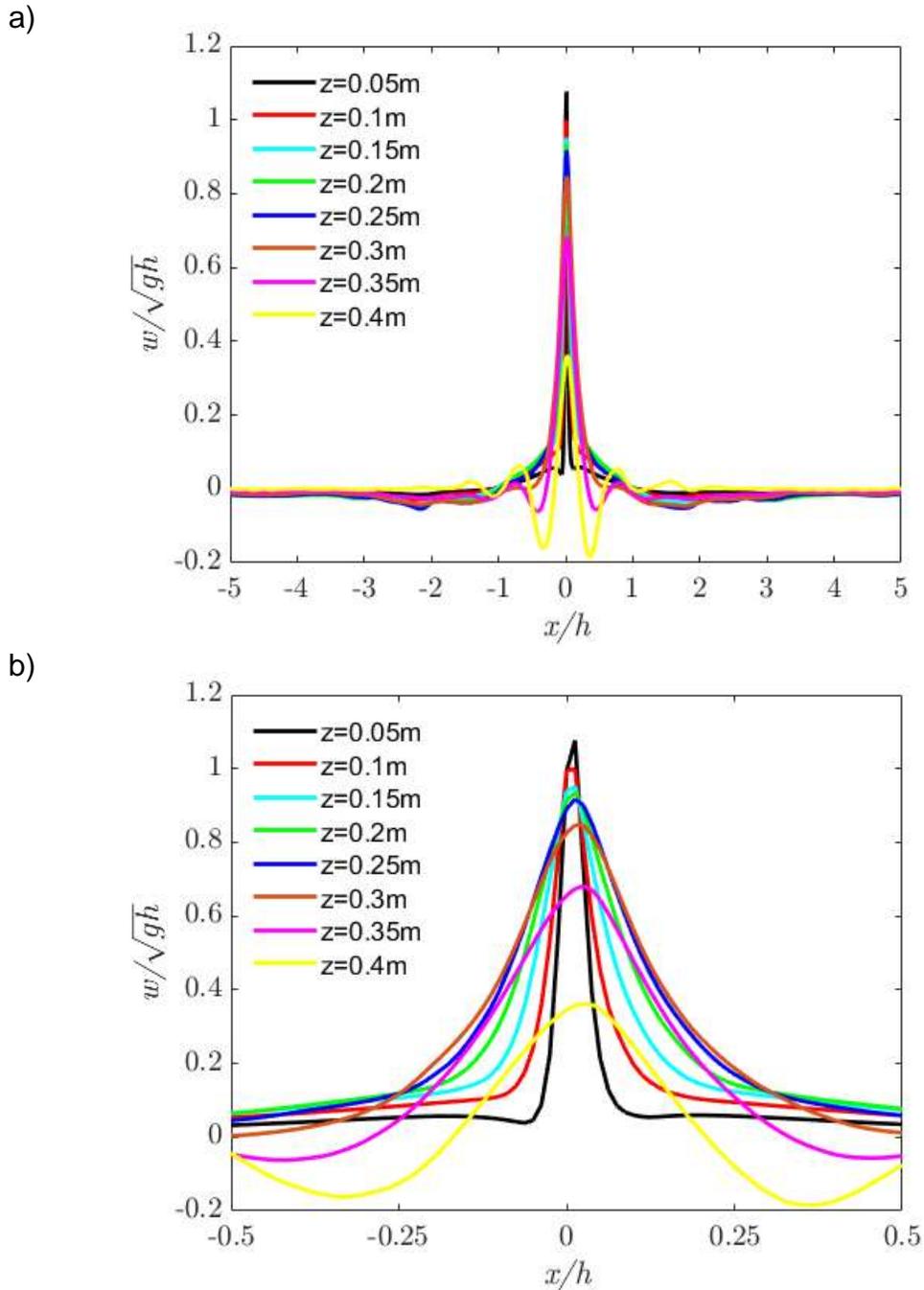
a)



b)



Figuras 3.7.5.- Perfiles verticales a $V_{\text{aire}} = 2.5 \text{ m/s}$ a) vista general, b) acercamiento (zoom).



Figuras 3.7.6.- Perfiles verticales a $V_{\text{aire}} = 2.79$ m/s a) vista general, b) acercamiento (zoom).

De los resultados de estos perfiles horizontales de velocidades verticales (w) se puede ver que las curvas de velocidades siguen un comportamiento gaussiano excepto por las que están más cerca de la superficie (línea amarilla y morada) y la que están más cerca del fondo (línea negra y café). Esto debido a las condiciones de no deslizamiento en el fondo y a la oscilación del agua en la superficie (creación de pequeñas olas).

CAPÍTULO IV.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL SEGUNDO CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON OLEAJE.

4.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	70
4.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con oleaje.	71
4.3.- Gráficas de los perfiles verticales	73
4.4.- Perfiles horizontales.	76

4.1.- Proceso de ascenso de burbujas.

Para el segundo caso con la cortina de burbujas con la influencia de oleaje, como primer paso se realizó la medición de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas antes y después de esta, ya que al contar con el oleaje proveniente desde el extremo izquierdo del dominio esto causaba recirculaciones más grandes después de la cortina que las que se crean antes de esta. Posteriormente, se obtuvieron las velocidades verticales y horizontales, lo cual quedará detallado más adelante. El proceso de ascenso de las burbujas en el cual se emplearon varios flujos de aire el cual genera recirculaciones en ambos lados del contenedor como se muestra en la Figura 4.1.1 y 4.1.2. La cortina tiene un movimiento oscilatorio donde el conjunto de burbujas se pueden encontrar a la derecha a la izquierda en el centro del punto de inyección.

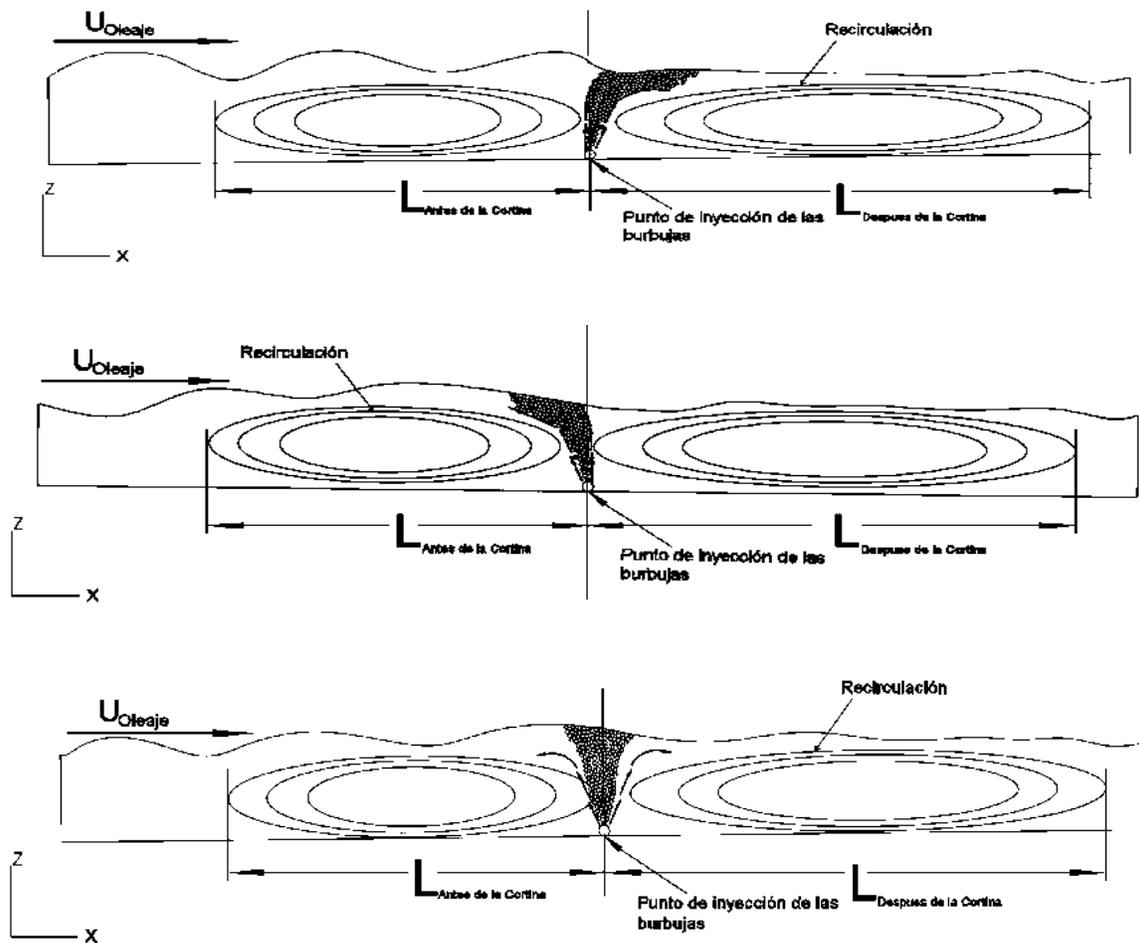


Figura 4.1.1.- Esquema general de la cortina de burbujas y su interacción con el oleaje.

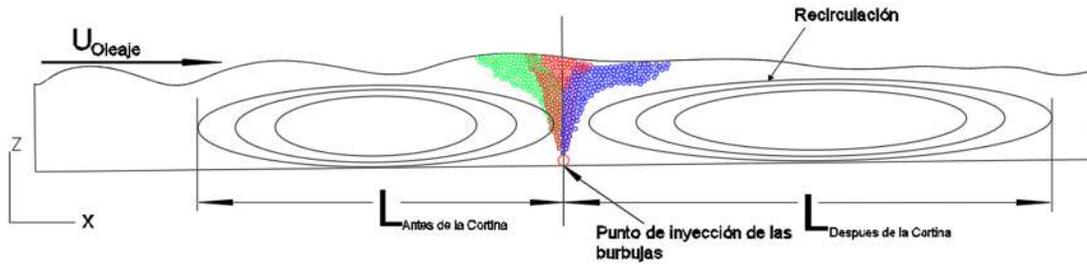


Figura 4.1.2.- Mezcla de los tres casos de la oscilación principal de la cortina con oleaje.

4.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con oleaje.

Para este caso donde se introdujeron olas a la simulación, las cuales tanto su forma de introducirlas tanto la descripción del dominio y la malla ya fue especificada en el Capítulo 2. El dominio de la simulación se puede apreciar en la Figura 4.2.1.

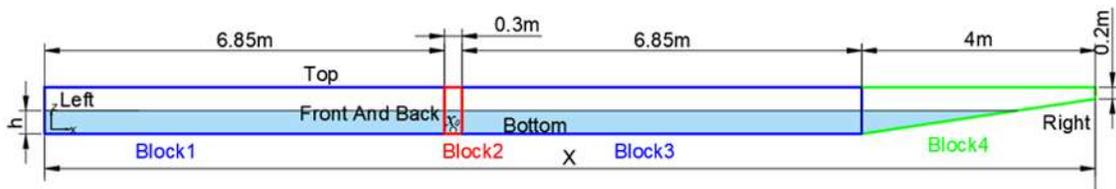


Figura 4.2.1.- Dominio de la simulación para el segundo caso.

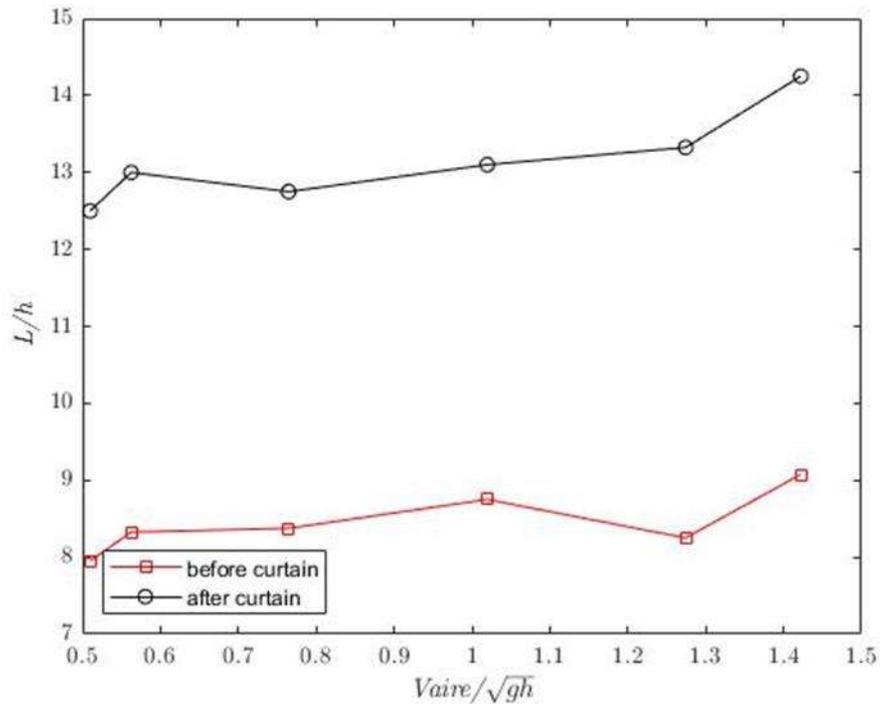
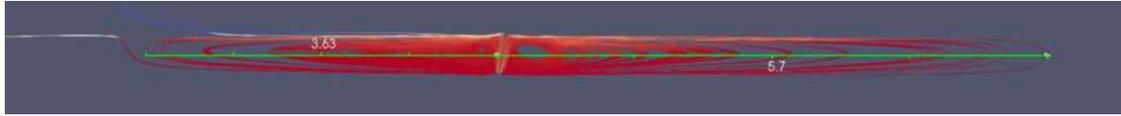


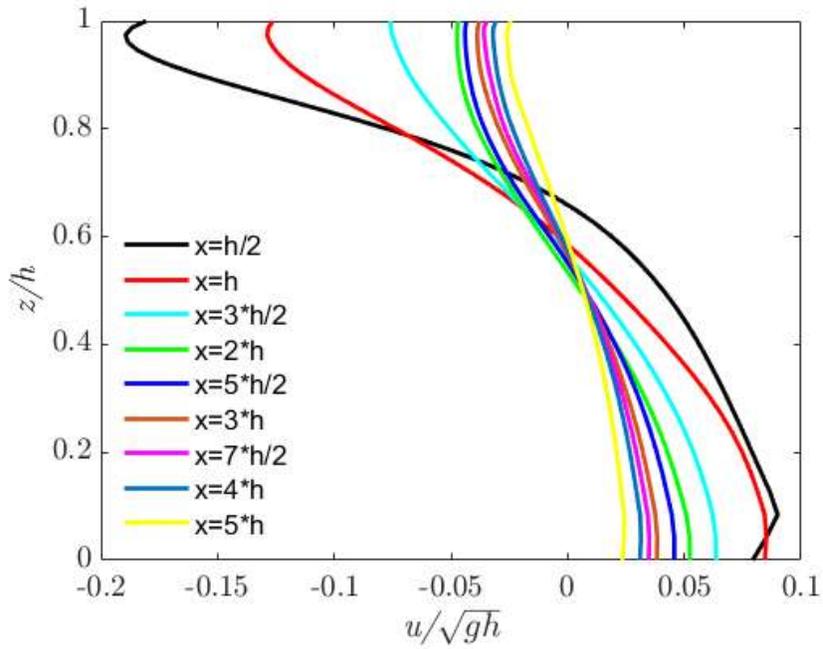
Figura 4.2.2.- Gráfica de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con la influencia de oleaje, antes y después de la cortina de burbujas

En la Figura 4.2.2 se puede observar que el tamaño de las recirculaciones después de la cortina es más grandes que antes de esta, lo cual es un efecto de la presencia de la ola.

4.3.- Gráficas de los perfiles verticales.

Se obtuvieron los perfiles verticales de u los cuales se muestran en la Figura 4.3.1 y 4.3.2. para el flujo de aire más bajo (1 m/s) y la más alto (2.79 m/s) para el caso antes y después de la cortina de burbujas, respectivamente. El tiempo de simulación fue de 1 minuto, de los cuales se tomaron los tiempos después del segundo 10 (después de que se desarrollaran 5 olas) para tener un perfil de olas definido el cual ya se encontrara interactuando con la cortina sin tener tantas variaciones. De este modo también el dominio es mas largo para que así las olas llegaran a la cortina una vez que esta ya se encontrara desarrollada.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

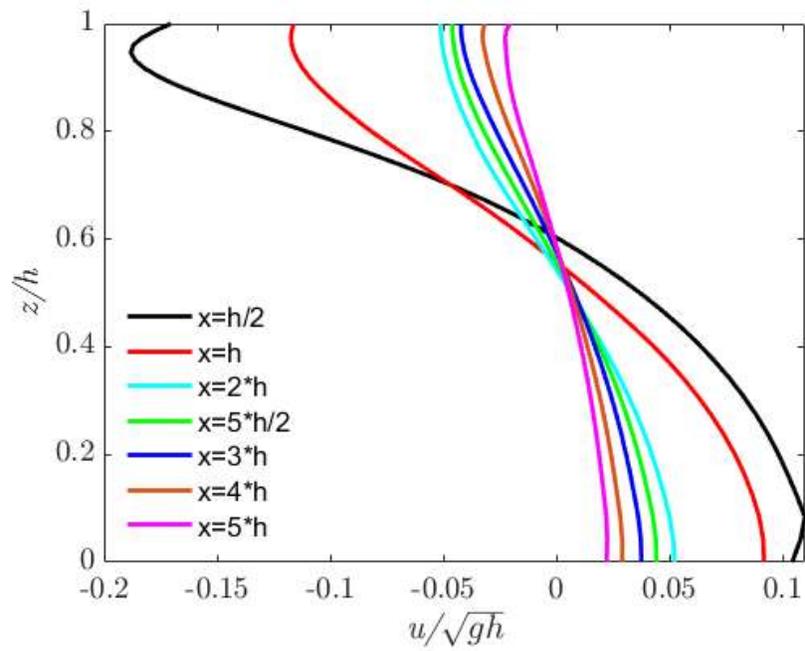
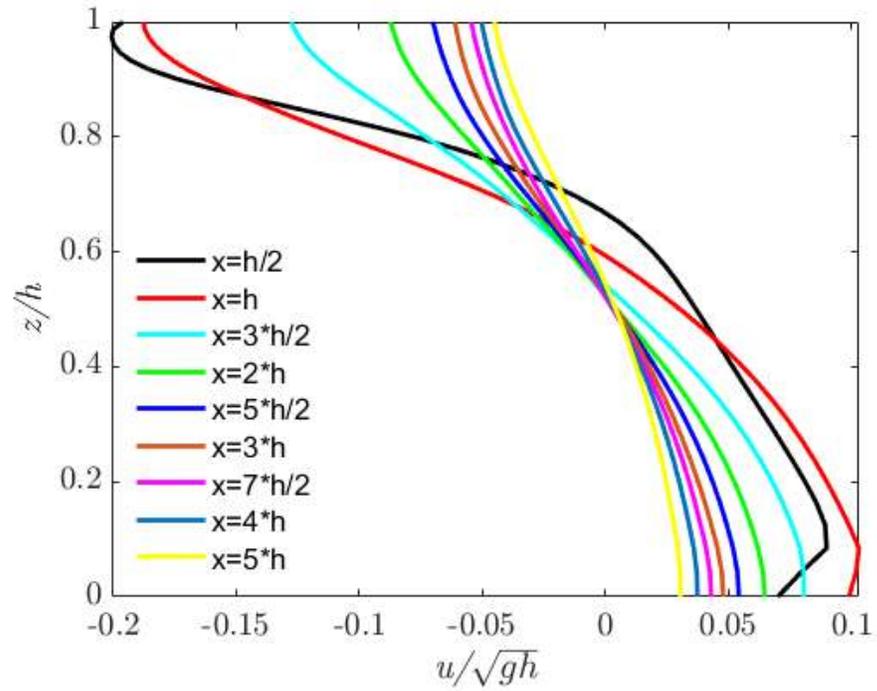


Figura 4.3.1.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

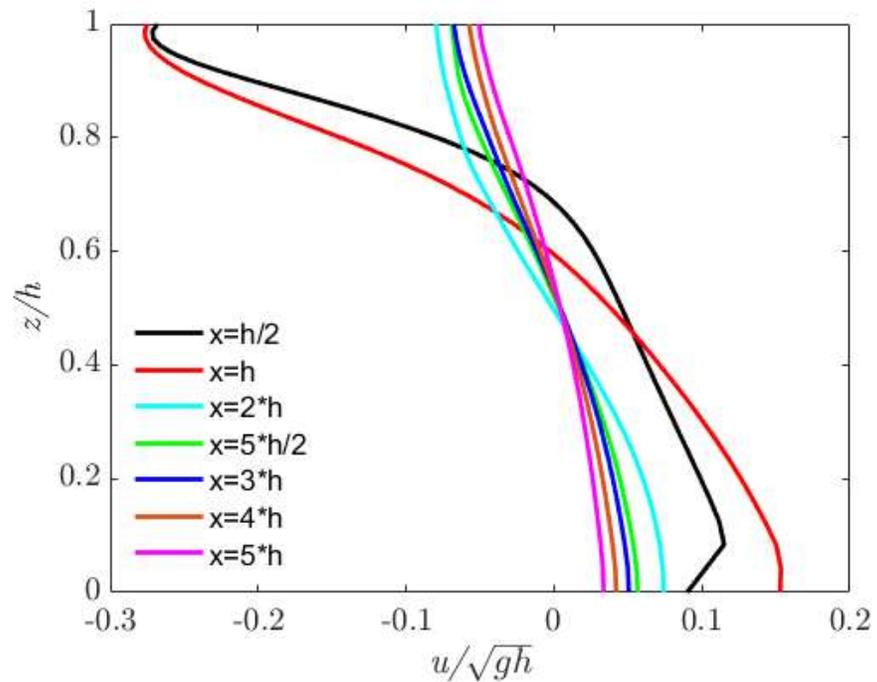


Figura 4.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1 \text{ m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79 \text{ m/s}$.

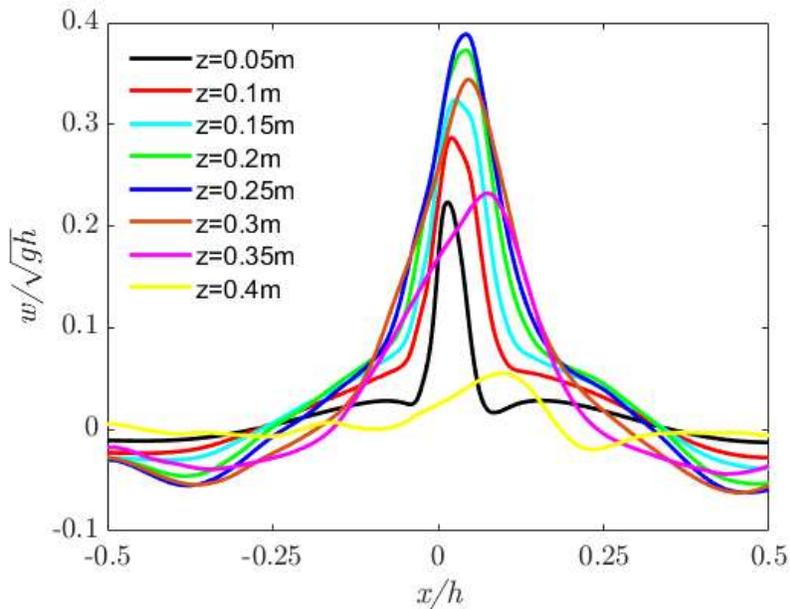
En la Figura 4.3.1 se puede observar que los valores obtenidos para los dos flujos no varían mucho uno con respecto de otro como se vio también en el caso cortina de burbujas con columna de agua en reposo. Con respecto a las magnitudes obtenidas de las velocidades si se puede observar un claro cambio ya que para el caso de columna en reposo la magnitud más alta de estas llegaba a $u/\sqrt{gh} = 0.4$ mientras que para este segundo caso la magnitud más grande es de $u/\sqrt{gh} = 0.18$.

Comparando las Figuras 4.3.1 antes de la columna y 4.3.2 después de la columna, se puede observar algo similar a lo anterior mencionado donde vemos que la afectación de las olas es claramente evidente ya que el valor de las magnitudes de las velocidades es más grande después de la cortina que antes de esta.

4.4.- Perfiles horizontales.

También se obtuvieron los perfiles horizontales para w tal como se muestra en la Figura 4.4.1. Para el caso de flujo más alto se observa una doble cresta a la derecha del punto de inyección esto debido a la presencia de las olas.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

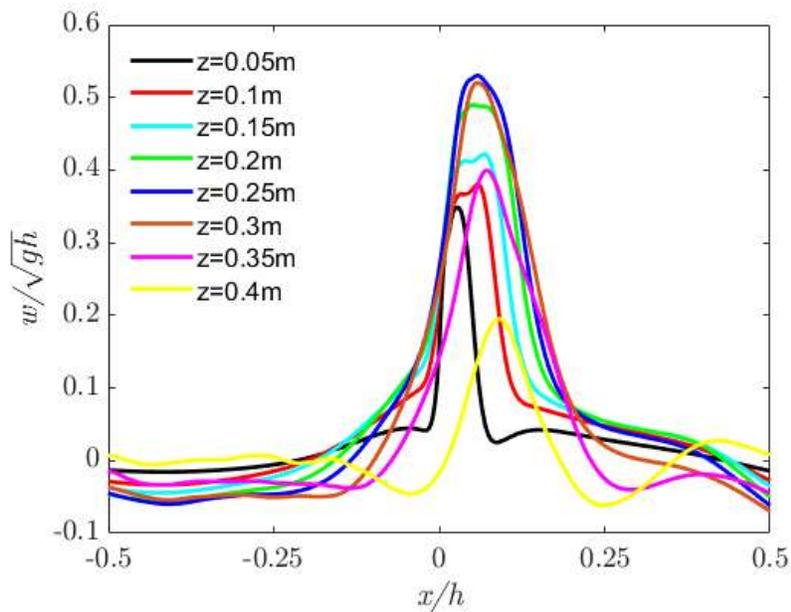


Figura 4.4.1.- Perfiles horizontales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1 \text{ m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79 \text{ m/s}$.

Si los comparamos con los perfiles horizontales obtenidos en el primer caso columna de gua en reposo y este segundo caso (cortina con olas) se puede ver

como para el primer caso donde las mayores velocidades ascendentes se encontraban justo en el punto de inyección de las burbujas (en el punto $x_0=0$), ahora para este segundo caso se encuentran un poco después de este punto. Esto debido a la influencia de las olas las cuales hacen que estas velocidades junto con el perfil libre ocasionado por las burbujas ascendentes se muevan de un poco a la derecha. Ya que las olas son generadas a partir de la izquierda de nuestro dominio y estas se mueven de izquierda a derecha. Además de que el comportamiento gaussiano que seguían las curvas en el anterior caso aquí ya no es tan evidente, si bien algunas curvas aún siguen teniendo este comportamiento ya no son tantas como en el primer caso ahora son menos las que presentan este comportamiento.

CAPÍTULO V. - RESULTADOS OBTENIDOS DEL TERCER CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON CORRIENTE.

5.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	79
5.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con corriente.	79
4.3.- Gráficas de los perfiles verticales	80
5.4.- Perfiles horizontales.	84

5.1.- Proceso de ascenso de burbujas.

Para el tercer caso con la cortina de burbujas con la influencia de corriente. Como primer paso se realizó la medición de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas antes y después de esta, ya que al contar con corriente proveniente desde el extremo izquierdo del dominio esto causaba recirculaciones más grandes después de la cortina que las que se crean antes de esta. Para este caso la corriente provoca una inclinación hacia el lado de la dirección de la corriente sobre la cortina. Posteriormente, se obtuvieron las velocidades verticales y horizontales, lo cual quedará detallado más adelante. El proceso de ascenso de las burbujas en el cual, se emplearon varios flujos de aire, genera recirculaciones en ambos lados del contenedor como se muestra en la Figura 5.1.1.

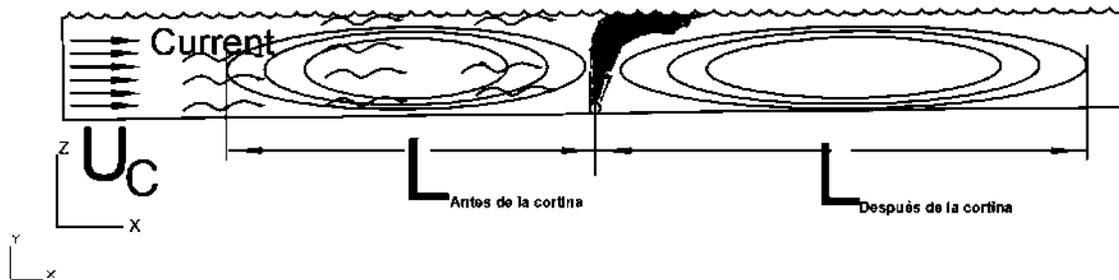


Figura 5.1.- En esta imagen se puede apreciar un esquema general de la cortina de burbujas y su interacción con la corriente.

5.2.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con corriente.

Para este caso donde se introdujo corriente a la simulación ($U_{mean} = 0.1$ m/s), la cual tanto su forma de introducirlas tanto la descripción del dominio y la malla ya fue especificada en el Capítulo 2 (ver Figura 2.6.3 y 2.6.4).

En la Figura 5.2 se muestra la longitud de la recirculación antes y después de la cortina con respecto a la velocidad de entrada de aire adimensional, para la condición de corriente. Se observa que la longitud de la recirculación después de la cortina es más grande que antes de esta y su efecto es mayor comparado con el causado por la introducción de oleaje.

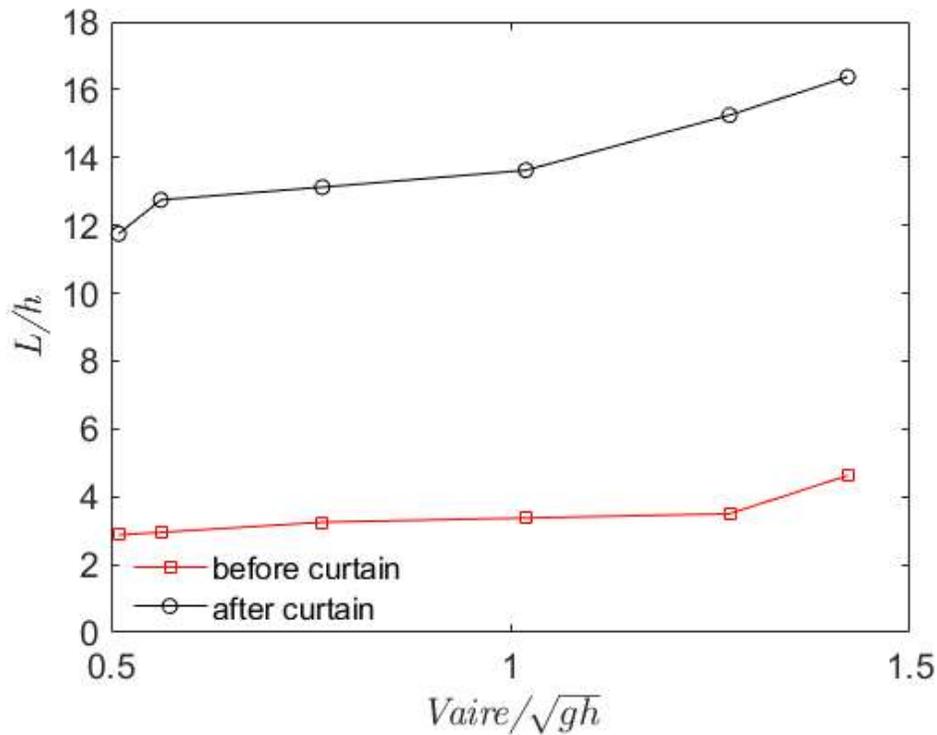
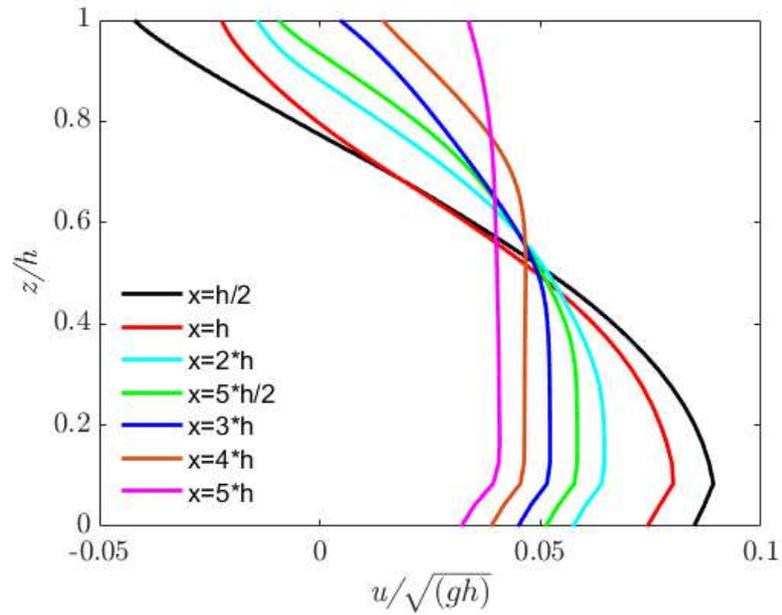


Figura 5.2- Tamaño de la recirculación antes y después de la cortina con respecto a la velocidad de entrada de aire adimensionalizada ($V_{\text{aire}}/\sqrt{gh}$) para la condición de corriente.

5.3.- Perfiles verticales

En la Figura 5.3.1 antes de la cortina y Figura 5.3.2 después de la cortina se muestran los perfiles adimensionales de u para los flujos de aire de $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$. El tiempo de simulación fue de 1 minuto, de los cuales se tomaron los tiempos después del segundo 10 (igual que para el caso anterior) para que la interacción entre la cortina y la corriente ya se encontrara bien establecida, y así no tener tantas variaciones en el perfil de la cortina. De este modo también el dominio es más largo para que así la cortina se encontrara desarrollada antes de que la corriente llegue a esta.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

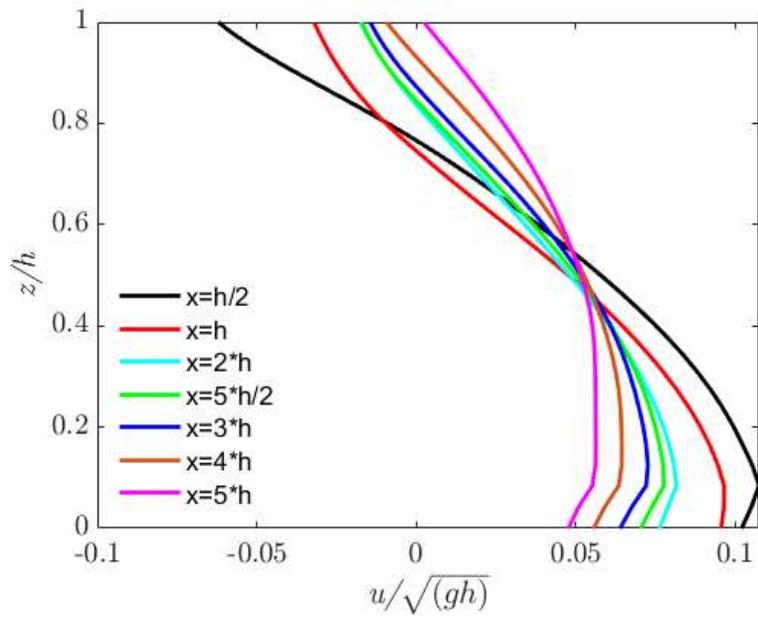
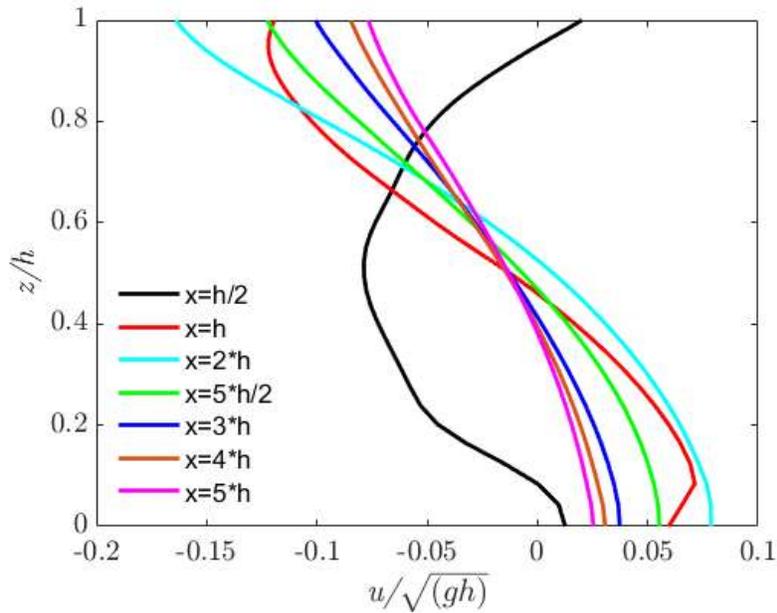


Figura 5.3.1.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1 \text{ m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79 \text{ m/s}$.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

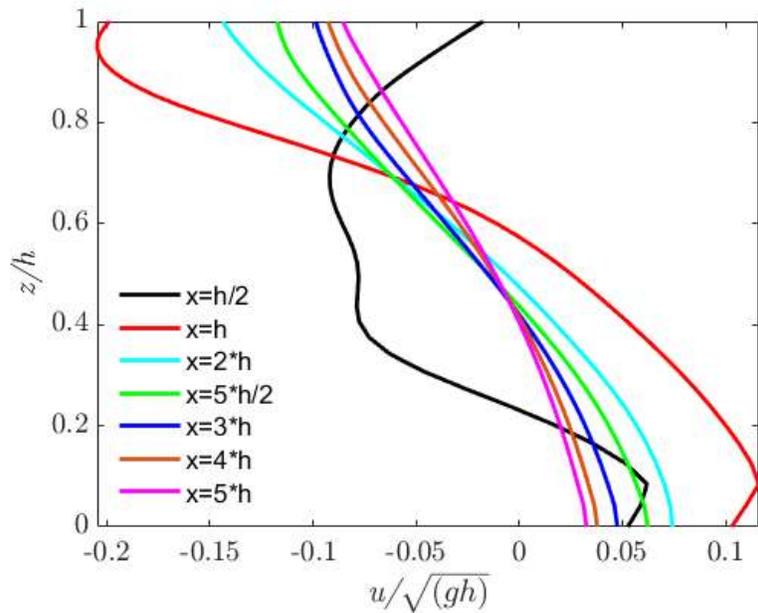


Figura 5.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

En de la Figura 5.3.1 se puede observar que los valores obtenidos para los dos flujos como en el caso anterior (cortina de burbujas con influencia de oleaje) presentan variaciones en cuanto a la distribución de la curva y también en la magnitud de las velocidades, debido a que la velocidad de entrada de aire en la

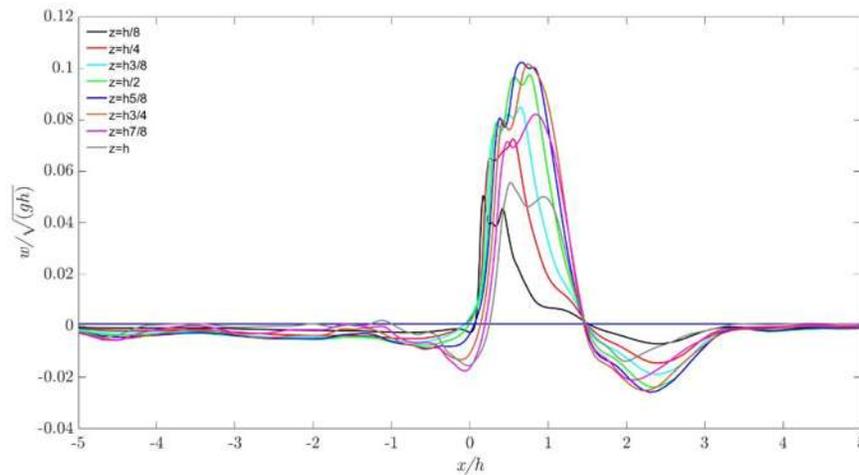
Figura 5.3.1 b) es mayor que la de la Figura 5.3.1 a). Aunque para este caso, si hablamos de las magnitudes obtenidas de las velocidades si se puede observar un claro cambio ya que para el caso de columna de agua en reposo la magnitud más alta de estas llegaba a $u/\sqrt{gh} = 0.4$ mientras que para este caso la magnitud más grande es de $u/\sqrt{gh} = 0.06$.

Para los gráficos de la Figura 5.3.2 se observa que las magnitudes de u después de la columna de burbujas son menores que las magnitudes obtenidas en el caso de columna de agua en reposo y con la influencia del oleaje. Mencionado lo anterior se determina que el impacto de la corriente sobre la cortina es mayor que el causado por las olas. Un cambio importante se observa en la curva de $x=h/2$, la cual está más cerca de columna de burbujas y sufre un cambio de sentido debido a la inclinación que sufre la cortina de burbujas por el efecto de la corriente.

5.4.- Perfiles horizontales.

En la Figura 5.4.1 se muestran los perfiles horizontales para la componente w adimensionalizada para el flujo de aire de a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$, para un rango de alturas de $z = 0.05$ a $z = 0.4\text{m}$. Se observa que los valores más altos de w/\sqrt{gh} se encuentran a la derecha del punto de inyección esto debido a la inclinación de la cortina de burbujas por efecto de la corriente. Así mismo se observan varias crestas, a diferencia de los casos anteriores donde sólo existía una, las cuales aumentan en número con la velocidad del aire.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

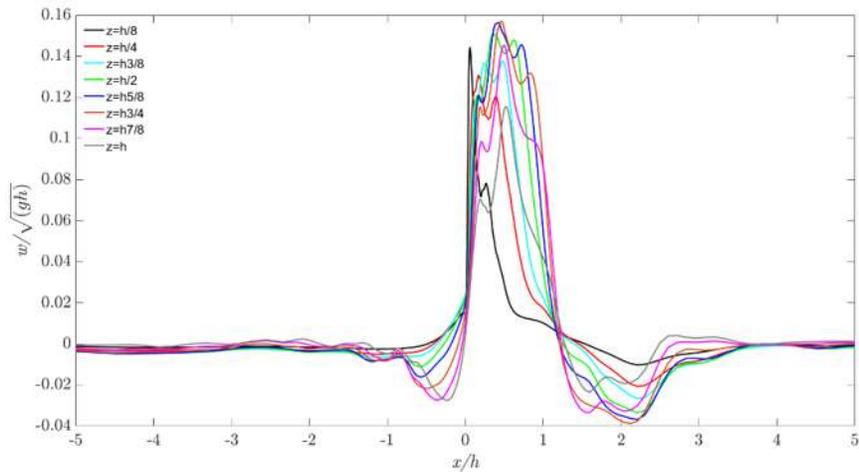


Figura 5.4.1.- Perfiles horizontales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

CAPÍTULO VI. - RESULTADOS OBTENIDOS DEL CUARTO CASO: CORTINA DE BURBUJAS CON OLEAJE Y CORRIENTE.

6.1.- Proceso de ascenso de burbujas.	86
6.2.- Medición de las recirculaciones generadas por la cortina.	87
6.3.- Perfiles verticales.	88
6.4.- Perfiles horizontales.	91

6.1.- Proceso de ascenso de burbujas.

En este caso se estudia el comportamiento de la cortina de burbujas bajo la influencia de oleaje y corriente. Como primer paso se realizó la medición de las recirculaciones causadas por la cortina de burbujas antes y después de esta, ya que al contar con el oleaje y corriente proveniente desde el extremo izquierdo del dominio esto causa recirculaciones más grandes después de la cortina que las que se crean antes de esta. Posteriormente, se obtuvieron los perfiles verticales y horizontales de u y w . La Figura 6.1.1. representa el efecto que tiene la corriente y el oleaje sobre la cortina de burbujas el cual es de una franca inclinación en el sentido de la corriente.

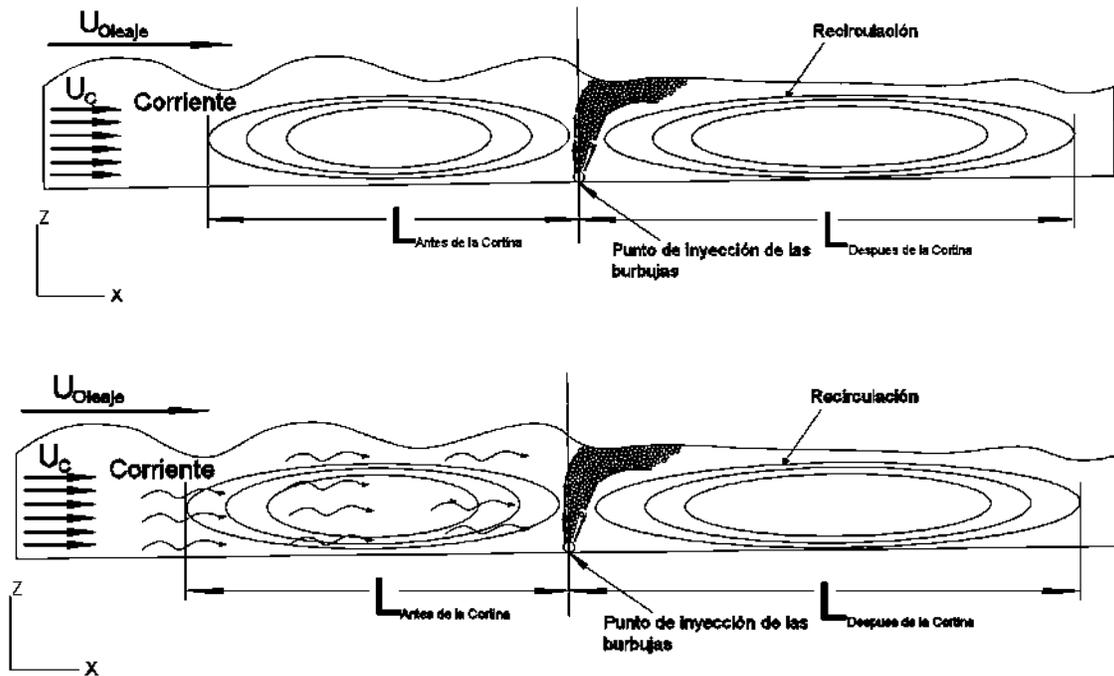


Figura 6.1.1.- Esquema de la interacción de la cortina de burbujas con la influencia de corriente y oleaje.

6.2.- Medición de las recirculaciones generadas por la cortina.

La influencia de corriente y oleaje proveniente de izquierda a derecha, ocasiona que las recirculaciones sean más grandes después de la cortina que antes de esta. El resultado de estas mediciones se puede observar en la Figura 6.2.1. Con respecto a la magnitud son similares al caso de corriente por lo que podría suponerse que el efecto de la corriente es preponderante con respecto al del oleaje. Esta asimetría de las recirculaciones puede ser muy relevante en casos prácticos de ingeniería costera.

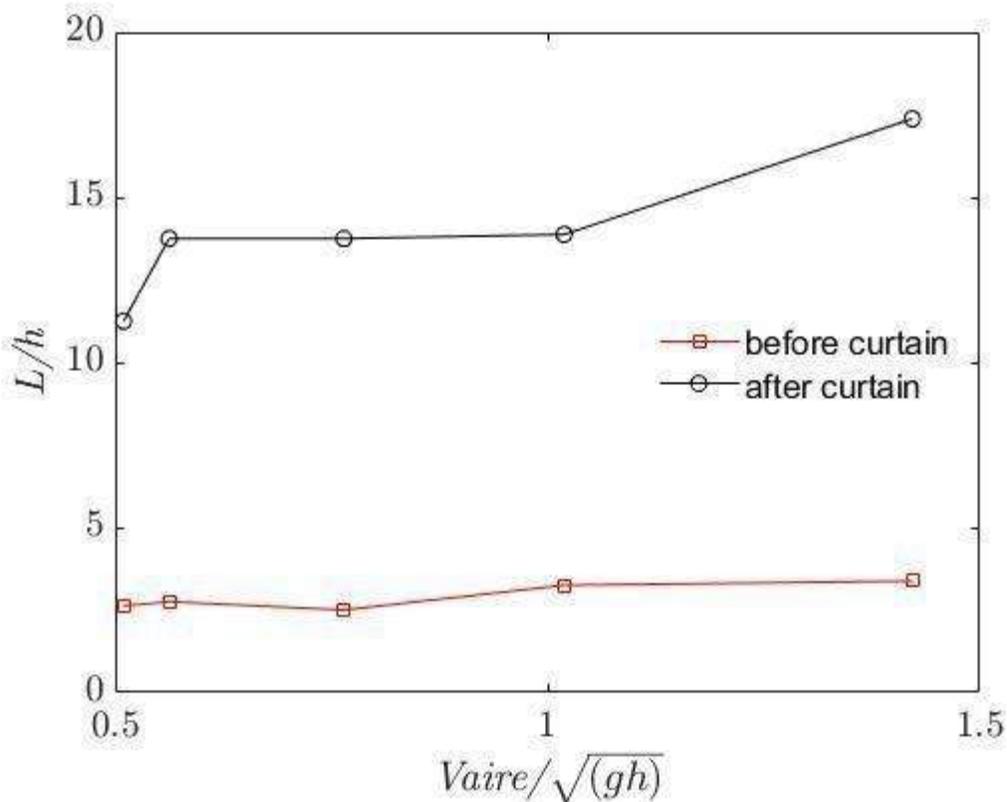


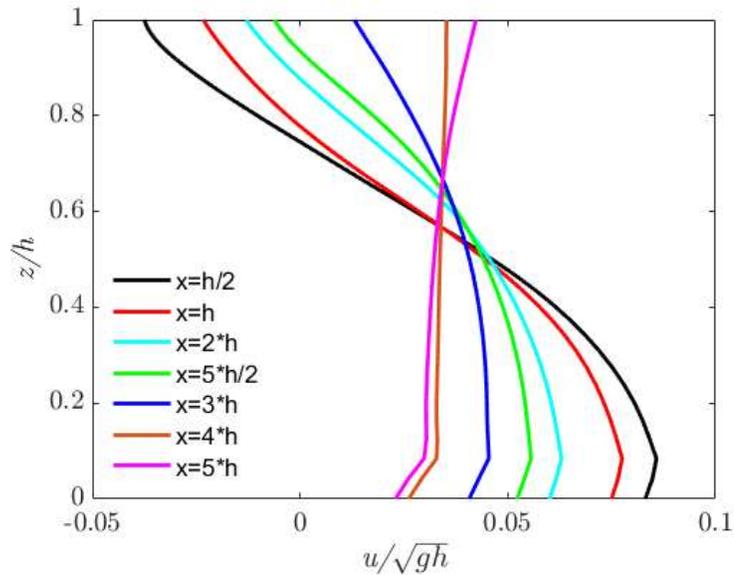
Figura 6.2.1.- Recirculaciones causadas por la cortina de burbujas con la interacción de olas y corriente.

6.3.- Perfiles verticales.

Para determinar la influencia de las olas y corrientes sobre las magnitudes de las velocidades se determinan los perfiles verticales en la Figura 6.3.1 y 6.3.2 para antes y después de la cortina de burbujas, respectivamente. Se puede observar que las magnitudes para las velocidades aumentan conforme aumenta la velocidad de aire para ambos casos. El tiempo de simulación fue de 1 minuto, de los cuales se

tomaron los tiempos después de 10 segundos (después de que se desarrollaran 5 olas) para tener un perfil de olas definido el cual ya se encontrara interactuando con la cortina sin tener tantas variaciones en el perfil de la cortina. De este modo también el dominio es más largo para que así la cortina se desarrollara antes de que comenzara a interactuar con la corriente y el oleaje.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

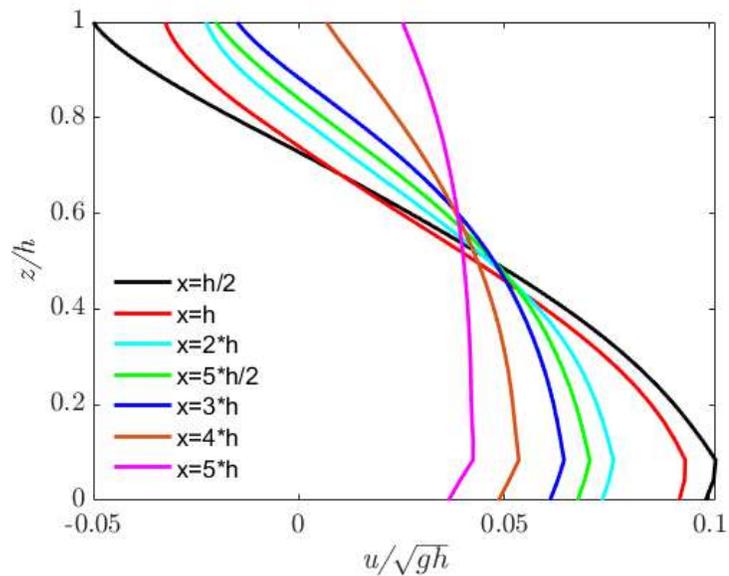
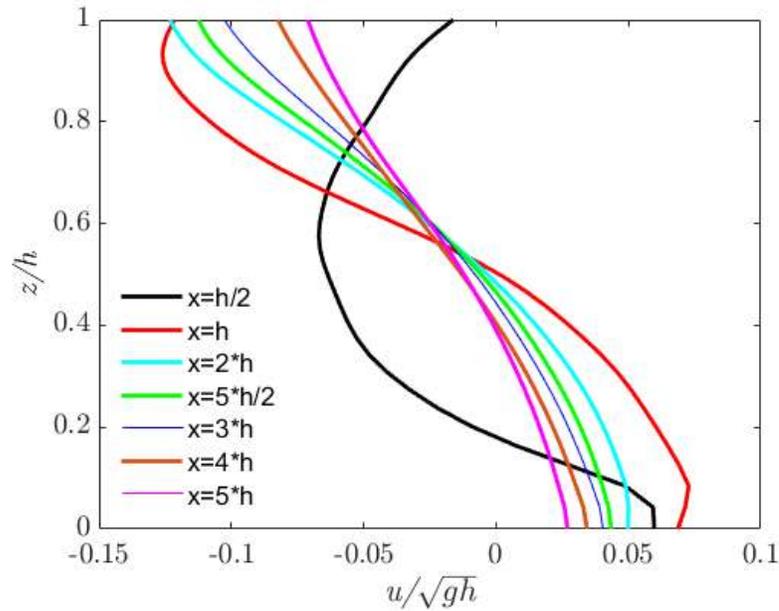


Figura 6.3.1.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} antes de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

a) 1m/s



b) 2.79m/s

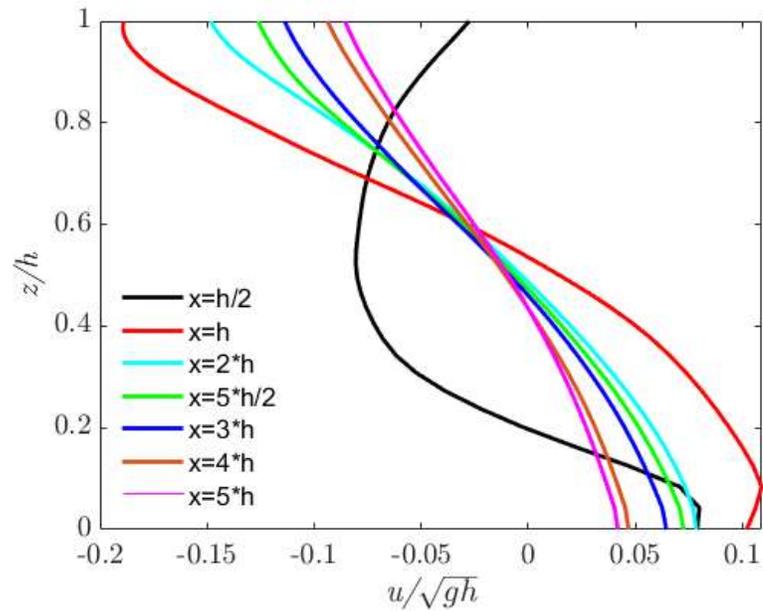


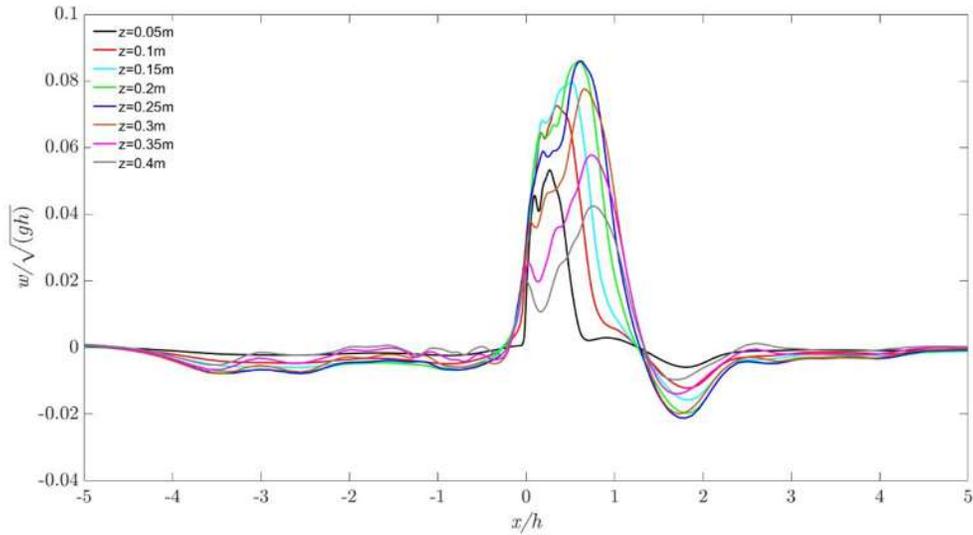
Figura 6.3.2.- Perfiles verticales de u/\sqrt{gh} después de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

Concerniente a los perfiles verticales después de la cortina, se observa que la cortina afecta de forma considerable al caso donde $x=h/2$ la cual cambia de sentido, efecto observado en el caso de corriente. Esto podría inducir que la corriente tiene un efecto más significativo que el oleaje.

6.4.- Perfiles horizontales.

Los perfiles horizontales para las velocidades w se puede observar en la Figura 6.4.1 para un rango de $z = 0.05\text{m}$ y $z = 0.4\text{m}$ para el caso de velocidad de aire más bajo 1m/s y más alto 2.79m/s .

a) 1m/s



b) 2.79m/s

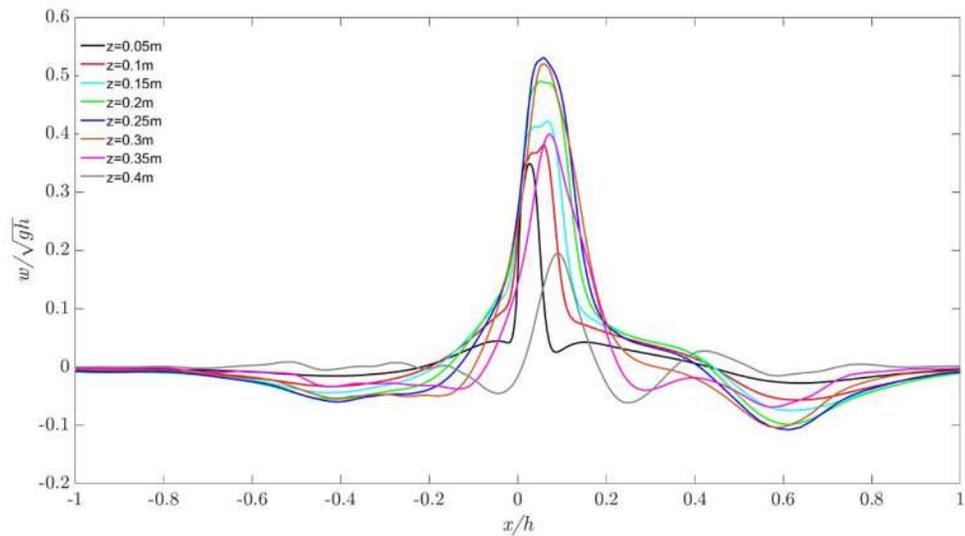


Figura 6.4.1.- Perfiles verticales de w/\sqrt{gh} de la cortina de burbujas para a) $V_{\text{aire}} = 1\text{m/s}$ y b) $V_{\text{aire}} = 2.79\text{m/s}$.

Se observa un comportamiento similar al de caso con corriente donde los máximos de w/\sqrt{gh} se encuentran a un $x/h > 0$. Los valores máximos de w/\sqrt{gh} se tiene para el rango de valores de $0.2\text{m} < z < 0.3\text{m}$ mientras que los valores mínimos se encuentran para los valores de $z < 0.05\text{m}$ y $z > 0.35\text{m}$. La corriente produce la mayor perturbación con base a la similitud de los resultados de este caso con el caso anterior donde sólo se introdujo corriente.

DISCUSIÓN

Analizando los cuatro casos estudiados (columna de agua en reposo, cortina con oleaje, cortina con corriente y cortina con corriente y oleaje), se observó que la velocidad de entrada de aire (V_{aire}) incrementa los tamaños de las recirculaciones para los cuatro casos. Si se analizan los campos de velocidades, las magnitudes de estas tienden a cero para valores después de la posición de $x = 6\text{m}$. Analizando las componentes de las velocidades u y w para los cuatro casos, donde se realizaron comparaciones con 6 velocidades diferentes (ver Tabla 2.7.1) se observó que al incrementar estas velocidades de entrada de aire no afecta de forma considerable la magnitud de éstas. Esto se podría atribuir a que siempre se utilizó el mismo tamaño de orificio de salida de aire (3mm), por lo cual si queremos observar un mayor cambio en las magnitudes de los campos de velocidad sería necesario variar el tamaño de orificio de salida de aire. En el caso de la columna de agua en reposo se analizaron los campos de velocidad de un solo lado de la columna de burbujas, esto debido a que son simétricas las afectaciones que causa. Para los otros 3 casos restantes, se analizaron ambos campos antes y después de la cortina, donde se observó que la presencia de oleaje y/o corriente disminuye las magnitudes de las velocidades tanto de la componente u como de la w , además de que la afectación por la corriente es más grande que la causada por el oleaje. Ahora bien, si analizamos cada componente por separado se vio que para los perfiles verticales de la componente u , para el caso de columna de agua en reposo, las velocidades sufren un cambio de sentido un poco por encima de la mitad de valor de la altura total. Esto ocurre también en caso de cortina con oleaje, mientras que para los demás casos si bien sigue existiendo este cambio de sentido, este ocurre más arriba de este punto, aproximadamente a $z/h = 0.65$. Este varía dependiendo de la posición (en la dirección x) donde sea medida la velocidad. Mientras más nos alejamos del punto de inyección, más cercano a la superficie ocurre este cambio de sentido.

CONCLUSIÓN.

En este trabajo se simula el efecto que tienen una cortina de burbujas en un canal 2D analizando 4 casos: 1) columna de agua en reposo, 2) oleaje, 3) corriente y 4) oleaje y corriente. Se obtienen el tamaño de recirculaciones producidas, los perfiles verticales y horizontales de la componente x y z de la velocidad del líquido

De los resultados obtenidos para los cuatro casos analizados con diferentes velocidades de inyección de aire (V_{aire}), se pudo observar a grandes rasgos el papel que juega tanto la corriente como el oleaje sobre los campos de velocidad ocasionados por la corriente de burbujas. Teniendo como conclusiones específicas los siguientes puntos:

- A partir del valor $X/h=14$ las paredes laterales no tienen efecto sobre el tamaño de la recirculación (L).
- Se realiza el estudio de convergencia de malla el cual se alcanza a partir de $y^+ = 22$.
- La pluma de la cortina de aire presenta una forma triangular invertida centrada en el punto de inyección. Para el caso del oleaje la pluma oscila alrededor del punto de inyección y para los casos de corriente y de corriente con oleaje la pluma se inclina en la dirección de la corriente.
- Las recirculaciones causadas por los cuatro casos son diferentes si bien para el caso de cortina con columna de agua en reposo estas recirculaciones son simétricas. Para los casos de cortina con oleaje, con corriente y con oleaje y corriente tienen una relación en común, la cual consiste en que el tamaño de las recirculaciones es siempre mayor después del punto de inyección, debido al arrastre causado por las fuerzas de oleaje y/o corriente. El factor de aumento entre la longitud después y antes de la cortina es de 1.5 para el caso de cortina con oleaje y 4 para los casos de cortina con corriente y cortina con corriente y oleaje. Estas asimetrías son relevantes en aplicaciones de ingeniería costera.
- Los perfiles verticales de la componente adimensional u/\sqrt{gh} son determinados para diferentes distancias a partir del punto de inyección. Las magnitudes absolutas de las velocidades u en la parte superior del canal son siempre mayores comparando con la parte inferior de la celda, esto es similar para los ocho flujos volumétricos de aire estudiados (especificados por la velocidad de entrada V_{aire} , en un rango de 1m/s a 4.58m/s). Este efecto disminuye a medida que se aleje del punto de inyección. El cambio de dirección de velocidades positivas a negativas se realiza por encima de la mitad de altura total de la columna de agua.
- Los perfiles verticales de las velocidades de la componente x obtenidos en este trabajo, en el caso de columna de agua en reposo, son comparados con el trabajo experimental de Fanelop (1991) para velocidades de aire 0.97m/s, 0.37m/s y 0.174m/s y con el trabajo experimental reportado por Covarrubias et al., (2022) a una $V_{\text{aire}} = 1.1033\text{m/s}$ obtenido una buena semejanza entre los datos obtenidos en este trabajo y ambos trabajos experimentales.
- Los perfiles horizontales de la componente w tiene su mayor magnitud en los valores $z = 0.2$ m (mitad de la altura total de columna de agua) y los valores más bajos para $z = 0.05\text{m}$ y $z = 0.4\text{m}$ (que son los valores más próximos al fondo y a la superficie), para los cuatro casos estudiados. Para el caso de

columna de agua en reposo se tiene los máximos centrados en el punto de inyección con un solo máximo. En el caso del oleaje, el máximo de la curva (velocidad) es desfasado a la derecha en el sentido de la dirección del oleaje. Para el caso de corriente, al igual que el de corriente con oleaje, la curva presenta varias crestas indicando mayor perturbación en el fluido y un desfase mayor hacia la dirección de la corriente. Para estos dos últimos casos la similitud entre los mismos indica que es la corriente quien predomina sobre el oleaje. Esto debido a que la corriente afecta todo el entorno de columna de agua y el oleaje que se genera desde la superficie libre y va decayendo por las fuerzas inerciales y viscosas del agua.

- Para los perfiles verticales de la componente u (dirección x), se observó que cuando se tiene la columna de agua en reposo las mayores magnitudes de las velocidades se encuentran cerca de la superficie además de que estas tienen un cambio de sentido un poco por encima de la mitad de la altura total de agua ($z/h = 0.55$). Mientras que para el caso con oleaje donde se analizaron los perfiles antes y después de la cortina, se observó algo similar al caso anterior donde las mayores magnitudes de las velocidades se encuentran cerca de la superficie además de que el efecto de las olas hace que las magnitudes en todo el dominio sean menores antes que después de la cortina, y teniendo magnitudes de velocidades ligeramente mayores después de cortina. Analizando los casos de corriente, y corriente con oleaje, se observó que la influencia de la corriente es mucho mayor que la ocasionada por el oleaje sobre estos perfiles, donde también se analizaron estos perfiles antes y después de la cortina. En estos 2 últimos casos se vio que las magnitudes de las velocidades antes de la cortina son más pequeños que después de la cortina, donde se ve que para el caso antes de la cortina, la corriente contrarresta las velocidades por encima de $z/h = 0.6$ y aumenta las magnitudes de las velocidades que están debajo de esta posición, y comparando con los perfiles después de la cortina sucede lo contrario (donde la corriente que logra pasar la cortina aumenta las magnitudes de las velocidades que están sobre $x/h = 0.6$ y disminuye las que se encuentra debajo de este valor).
- Las mayores magnitudes de velocidades tanto horizontales (u) como verticales (w) generadas por la cortina, se encuentran en el caso de cortina y columna de agua en reposo.
- Además de que haciendo la comparación con los datos experimentales se pudo obtener una gran concordancia en cuanto a los resultados. De igual manera, al utilizar diferentes flujos, se pudo observar que éstos no influyen de gran manera en la magnitud de los campos de velocidad, por lo cual tal vez se debería hacer un estudio exhaustivo sobre el efecto del tamaño de orificio o de burbuja, en un futuro.

PRODUCTOS GENERADOS.

Congresos:

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, Gildardo Solorio Diaz, 2022, SIMULACIÓN NUMÉRICA EN 2D DE UNA CORTINA DE BURBUJAS EN OPENFOAM, 17 Congreso Estatal de Ciencia Tecnología e Innovación ICTI, Morelia, Michoacán.

E. R. Cornelio Martinez, A. Aguilar Corona, B. Figueroa Espinoza, 2022, DETERMINACIÓN DE LOS CAMPOS DE VELOCIDAD OCASIONADOS POR UNA CORTINA DE BURBUJAS, XXVIII Congreso de la División de Dinámica de Fluidos DDF, Ciudad Universitaria UNAM, Ciudad de México.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, 2023, ESTUDIO DEL USO DE UNA COLUMNA DE AIRE PARA REDUCIR LA EROSIÓN DE ARENA EN LA ZONA ROMPIENTE DE OLAS, 18 Congreso Estatal de Ciencia Tecnología e Innovación ICTI, Morelia, Michoacán.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, 2023, SIMULACIÓN DE AGUA EN LAS PLAYAS, V Congreso de Investigadoras del SIN y de Iberoamérica, en la Ciudad y Puerto de Tampico, Tamaulipas, México.

Ernesto R. Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, 2023, Numerical Simulation of a 2D Bubble Curtain Exploring Coastal Engineering Application, 76th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Washington D. C.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, Brayan Rodrigo Covarrubias Contreras, 2023, DETERMINACIÓN DE LOS CAMPOS DE VELOCIDAD OCASIONADOS POR UNA CORTINA DE BURBUJAS, XXIX Congreso de la División de Dinámica de Fluidos DDF, UNAM Campus Morelia, Morelia, Michoacán.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Alicia Aguilar Corona, Bernardo Figueroa Espinoza, Gildardo Solorio Diaz, 2023, MANUAL DE OPENFOAM, UMSNH, Morelia, Michoacán.

Verano Nicolaíta

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Edilberto Meza Fernández, Alicia Aguilar Corona, SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN ROMPEOLAS EN ZONA COSTERA, 11ª edición del verano de investigación nicolaíta UMSNH 2023.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Denisse Alejandra Guerrero Ojeda, Alicia Aguilar Corona, SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL IMPACTO DE UNA GRAN MASA DE

AGUA SOBRE UNA SUPERFICIE VERTICAL Y LOS EFECTOS DE ESTA SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA, REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN TSUNAMI, 11ª edición del verano de investigación nicolaíta UMSNH 2023.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Enedel Cruz Peralta, Alicia Aguilar Corona, ESTUDIO NUMÉRICO DE LA HIDRODINÁMICA DE UNA GOTA EN CAÍDA LIBRE AL IMPACTAR SOBRE UNA SUPERFICIE, 11ª edición del verano de investigación nicolaíta UMSNH 2023.

Cursos:

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Curso de OpenFOAM, para alumnos de la carrera de ingeniería mecánica de la 5º año de la UMSNH.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Curso de nivelación de matemáticas II, para alumnos de 3º año de la carrera de ingeniería mecatrónica de la UMSNH.

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, Curso de nivelación de matemáticas, para alumnos de la preparatoria No. 3 José María Morelos y Pavón UMSNH.

ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN

Ernesto Ramon Cornelio Martinez, marzo 2023 - mayo 2023, Instituto de Ingeniería de la UNAM Campus SISAL, Mérida Yucatán (beca CONAHCYT, beca de transporte ICTI, Apoyo para viáticos UMSNH).

REFERENCIAS.

- Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2015). Fluid mechanics. Academic press.
- Van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867-887.
- Zhang, K., Douglas, B. C., & Leatherman, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic change*, 64, 41-58.
- Fujita, I. (2016, October). Bubble curtain for blocking spilled oil on water surface. In 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean) (pp. 354-359). IEEE.
- Menzil, A. (2018). Micro bubble curtains: impact on Sediment Dispersal.
- Bulson, P. S. (1969). The theory and design of bubble breakwaters. In *Coastal Engineering 1968* (pp. 995-1015).
- Rodríguez, V. T., García, A. M., Crevenna, A. B., Hernández, J. C., Díaz, G. E., & García, E. M. (2010). Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, 325-344.
- Fanneløp, T. K., Hirschberg, S., & Küffer, J. (1991). Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 229, 629-657.
- Milgram, J. H. (1983). Mean flow in round bubble plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, 133, 345-376.
- García, C. M., & García, M. H. (2006). Characterization of flow turbulence in large-scale bubble-plume experiments. *Experiments in Fluids*, 41(1), 91-101.
- <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/ciencia/la-mitad-de-las-playas-del-planeta-corren-el-peligro-de-desaparecer>.
- Kokot, R. R., Codignotto, J. O., & Elissondo, M. (2004). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(3), 477-487.
- Cazenave, A., & Llovel, W. (2010). Contemporary sea level rise. *Annual review of marine science*, 2, 145-173.
- Bulson, P.S., 1961. Currents produced by an air curtain in deep water. *Dock and Harbour Authority* 42, 15–22.
- Bulson, P. S. (1963). Large scale bubble breakwater experiments. *Dock and Harbour Authority*.

Bulson, P. S. (1968). The theory and design of bubble breakwaters. In *Coastal Engineering 1968* (pp. 995-1015).

Taylor, G. I. (1955). The action of a surface current used as a breakwater. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 231(1187), 466-478.

Thijssen, J., Talimi, V., Thodi, P., Liu, L., Fuglem, M., Abdi, M., ... & Levoy, S. D. (2019). De-icing using Linear Aeration Systems: Laboratory Test Program and Model Development. In *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*.

Francois, M. M., Cummins, S. J., Dendy, E. D., Kothe, D. B., Sicilian, J. M., & Williams, M. W. (2006). A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework. *Journal of Computational Physics*, 213(1), 141-173.

Deshpande, S. S., Anumolu, L., & Trujillo, M. F. (2012). Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. *Computational science & discovery*, 5(1), 014016.

Prosperetti, A., & Tryggvason, G. (Eds.). (2009). *Computational methods for multiphase flow*. Cambridge university press.

Deshpande, S. S., Trujillo, M. F., Wu, X., & Chahine, G. (2012). Computational and experimental characterization of a liquid jet plunging into a quiescent pool at shallow inclination. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 34, 1-14.

Duraisamy, K., Iaccarino, G., & Xiao, H. (2019). Turbulence modeling in the age of data. *Annual review of fluid mechanics*, 51, 357-377.

Sodja, J. (2007). *Turbulence models in CFD*. University of Ljubljana, 1-18.

Reynolds, W. C. (1976). Computation of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8(1), 183-208.

Karthik, T. S. D., & Durst, F. (2011). Turbulence models and their applications. *10th Indo German Winter Academy*, 1-52.

Greenshields, C. J. (2015). *OpenFOAM user guide*. OpenFOAM Foundation Ltd, version, 3(1), 47.