



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
OCEANOGRAFÍA FÍSICA

INFLUENCIA POTENCIAL DE LAS OLAS Y LA MAREA SOBRE LA EFICIENCIA DEL
REALCO. CASO DE ESTUDIO PUNTA RAZA, CAYO COCO, CUBA.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR

Presenta:
YANDY RODRÍGUEZ CUETO

TUTOR PRINCIPAL:
Dr. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM

COMITÉ TUTOR:
Dr. MARTÍN MERINO IBARRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM
Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
Dr. JORGE ZAVALA HIDALGO
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM
Dr. ISMAEL MARIÑO TAPIA.
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS, UNIDAD MÉRIDA

MÉXICO, D.F. MAYO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma De México

INFLUENCIA POTENCIAL DE LAS OLAS Y LA MAREA SOBRE
LA EFICIENCIA DEL REALCO. CASO DE ESTUDIO PUNTA
RAZA, CAYO COCO, CUBA.

T E S I S

que para obtener el grado académico de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR
(ESPECIALIDAD EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA)

presenta

YANDY RODRÍGUEZ CUETO

Director de Tesis: DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA

Comité Tutorial: DR. MARTÍN MERINO IBARRA
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
DR. JORGE ZAVALA HIDALGO
DR. ISMAEL MARIÑO TAPIA

México, D.F. 2015

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al proyecto: PAPIIT IT201314-3 “*Aplicación de la tecnología de renovación del agua de lagunas costeras (REALCO) desarrollada por la UNAM para la rehabilitación ecológica de Laguna Larga: Construcción, adecuaciones y evaluación de su eficiencia hidrodinámica y biogeoquímica*” otorgado a M. Merino-Ibarra por la DGAPA de la UNAM, como parte del cual se realizó esta tesis y cuyo apoyo incluyó una beca de Maestría/Obtención del grado por 6 meses.

A Fermín Sergio Castillo-Sandoval por su apoyo técnico para la captura y registro de datos, incluyendo la evaluación, instalación y operación de los sensores y registradores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por apoyarme con una beca durante estos 2 años.

A la Fundación Heinrich Böll por su apoyo y por aceptarme como un miembro más de su selecto grupo de becarios.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la República de Cuba y su Delegación Territorial en Ciego de Ávila por permitirme realizar mis estudios de maestría.

A los trabajadores del Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros Roberto González de Zayas, Adrián Fasta, Roy Philips y Evelio Guzmán por la recolección y envío de los datos utilizados en esta investigación.

RESUMEN

Esta tesis está enfocada en el análisis de la influencia de la amplitud y el período de las olas y las mareas sobre el funcionamiento de un Sistema **Renovador de Agua de Lagunas Costeras** (REALCO), el cual se compone de dos partes: un amplificador de oleaje y un canal o conducto de comunicación entre el amplificador y el cuerpo de agua. Específicamente se evaluó el comportamiento de la superficie libre y el caudal dentro del amplificador de olas, con el fin de determinar las dimensiones que debería tener el sistema para optimizar su funcionamiento en función de las características de las olas y variaciones del nivel del mar medidas en el sitio donde se construirá el REALCO. Se evaluaron los períodos de funcionamiento, tanto óptimos como ineficientes para la configuración seleccionada.

Los datos registrados para este trabajo consistieron en: superficie libre del mar, con sensores de presión *HOBO Onset* modelo U20-001-01 (período de muestreo de 2 minutos y entre el 6 de julio de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2013), altura significativa y período de olas con ológrafo WTR – 9 (período de muestreo de 30 minutos y entre el 11 de julio de 2011 y el 16 de junio de 2012) y presión atmosférica y dirección del viento correspondientes a la estación meteorológica de primer orden 78 339 (22°32'N; 78°22'O) con período de muestreo cada tres horas durante un año.

A partir de estos datos originales se calcularon amplitud y fase de las componentes de las mareas, mediante un análisis de mínimos cuadrados, estadígrafos de la altura y período de las olas (media, un medio, un tercio y raíz media cuadrática), así como media y moda de los datos de presión atmosférica y dirección del viento.

El análisis de las observaciones arrojó una altura y período de ola medios de 0.540 metros y 2.976 segundos, respectivamente. La componente principal de la marea fue la Principal lunar semidiurna, con 0.29 metros de amplitud. La dirección media anual del viento, y por ende de las olas, fue de 77° respecto al norte (Este-Nordeste), mientras que la dirección predominante fue de 90° respecto al norte (Este).

A través de las ecuaciones de la aproximación de ondas en aguas poco profundas para canales con paredes convergentes y fondo inclinado hacia la convergencia, se realizan tres tipos de análisis: 1) la influencia de las dimensiones del sistema (ancho de la boca del amplificador, ángulo de apertura de las paredes y longitud de las paredes) sobre el funcionamiento de un amplificador sin rampa, 2) la influencia de las dimensiones del sistema sobre el funcionamiento de un amplificador con rampa y 3) la influencia de las características de las olas y la marea sobre las dimensiones y funcionamiento del amplificador con rampa.

De las combinaciones de dimensiones analizadas se escogió la que presenta 6 metros de ancho de la boca del amplificador, 70° de apertura de las paredes y 3 metros de ancho del francobordo. Las longitudes de las paredes laterales del REALCO así como la longitud de la rampa del sistema quedaron en 2.61 y 2.15 metros, respectivamente. El ángulo de inclinación de la rampa es de 29°. Se demostró teóricamente que, para las dimensiones seleccionadas, el sistema no funciona sin la presencia de una rampa.

Se concluyó, con base en las observaciones de las olas, la marea y la dirección del viento, que el REALCO funcionaría eficientemente durante el 62% de los días del año. El sistema no fue capaz de funcionar únicamente con el efecto de la marea, lo que facilitaría el mantenimiento y limpieza en los momentos en que el mar esté en calma, principalmente durante el verano en las primeras horas de la mañana, y en el invierno entre frentes fríos.

Las recomendaciones principales están dirigidas a: 1) la determinación, mediante la experimentación, de la respuesta del REALCO para aquellas condiciones en las que las ecuaciones no son capaces de explicar el funcionamiento del sistema y 2) la realización de mediciones simultáneas y en tiempo real de las variables involucradas (altura de ola, periodo de ola, profundidad inicial, superficie libre y caudal) una vez construido el REALCO.

ABSTRACT:

This thesis is focus on analyzing wave amplitude, wave period and tides influence over flushing system which is compound of two parts: amplifier and communication channel between amplifier and water body. Specifically was evaluated behavior of free surface and caudal inside wave amplifier to determine dimensions it should be have to optimize its operation depending on wave characteristics and sea level variations. Working periods was evaluated in relation to selected configuration of amplifier.

Registered data to this work consisted on sea free surface with pressure sensor HOBO Onset U20-001-01 model (2 minute period between July 6, 2011 and December 31, 2013), wave height and period with Wave and Tide Recorder – 9 (30 minutes period between July 11, 2011 and June 16, 2012) and atmospheric pressure and wind direction corresponding to first order meteorological station 78 339 (22°32'N; 78°22'O) with period of three hours during one year.

Amplitude and phase of tide components through square minimum analysis, statistics of wave height and period as well as media and mode of pressure and wind direction where calculated from original data.

Observation analysis threw a media of wave height and period of 0.540 meters and 2.976 seconds respectively. Principal component of tide was Principal lunar semi-diurnal with 0.29 meters of amplitude. Mean annual direction of wind was 77 degree while prevailing wind direction was 90 degree.

Three types of analysis was made using waves shallow water equation: 1) influence of system dimensions (mouth width, walls opening angle and walls longitude) over performance of no-ramp amplifier, 2) influence of system dimensions over amplifier with ramp and 3) influence of wave and tide characteristics over performance and dimensions of amplifier with ramp.

Six meters mouth width, 70 degree opening walls and three meters collector width was selected from all combinations of dimensions analyzed. Lateral wall longitude as well as ramp distance remained on 2.61 meters and 2.15 meters respectively. Ramp slope is 29 degree to convergence of walls. Was theoretically proved that system do not work without ramp to selected dimensions.

Conclusions based on wave, tide and wind direction observations were that system will function efficiently 62% of year and system was not able to work with only effect of tide so it times might be used to clean up the amplifier and communication channel, mainly during first hours of summer`s days and between cool fronts in winter.

Main recommendation are driven to determine, through experimental activities, the answer of system to all those conditions where equations do not explain system performance, and make simultaneous and real time measurements of involved variable once system built.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN.	3
OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4.1. ZONA DE ESTUDIO.....	6
4.1.1. <i>Ubicación geográfica</i>	6
4.1.2. <i>Clima</i>	6
4.1.3. <i>Geomorfología</i>	6
4.1.4. <i>Geología</i>	8
4.1.5. <i>Hidrogeología</i>	9
4.2. ESTRATEGIA DE MUESTREO.....	9
4.2.1. <i>Olas</i>	9
4.2.2. <i>Mareas</i>	10
4.2.3. <i>Presión atmosférica y vientos</i>	11
4.3.2. <i>Propagación de las olas hacia la costa</i>	17
4.3.3. <i>Mareas</i>	19
4.3.4. REALCO	20
4.3.4.1. <i>Amplificador de olas</i>	22
4.3.4. <i>Dimensiones del amplificador</i>	25
4.3.5. <i>Corrección de los datos: Superficie libre y caudal</i>	26
RESULTADOS.....	27
5.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS:	27
5.1.1. <i>Presión atmosférica</i>	27
5.1.2. <i>Vientos</i>	27
5.2. OLAS.....	32
5.3. MAREAS.....	36
5.4. REALCO.....	38
5.4.1. <i>Dimensiones y orientación del Amplificador</i>	38
5.4.2. <i>Superficie libre y Caudal</i>	51
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS.....	59
ANEXO 1: MARCO CONCEPTUAL.....	62
ANEXO 2: ESPECIFICACIONES DEL WTR-9.....	65
ANEXO 3: ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE PRESIÓN U20-001-01.....	66

Índice de Figuras:

Figura 1: Ubicación del área de estudio.....	7
Figura 2: Ubicación de los sitios de muestreo.....	12
Figura 3: Ángulos de incidencia correspondientes a las fronteras incluidas en el WAPO.....	18
Figura 4: Esquema de un amplificador de oleaje con fondo inclinado..	21
Figura 5: Esquema de REALCO con amplificador en el agua y tubería sumergida de comunicación con la laguna.	21
Figura 6: Esquema del REALCO con amplificador en la costa y canal de comunicación con la laguna.....	22
Figura 7: Diseño conceptual del canal con paredes convergentes..	22
Figura 8: Serie de datos de la dirección del viento.....	28
Figura 9: Rosa de los datos de dirección del viento.....	28
Figura 10: Distribución de la serie de datos de altura de ola significativa medidos en el ológrafo.....	32
Figura 11: Distribución de la serie de datos de período de ola significativa medidos en el ológrafo.....	32
Figura 12: Resultados de la modelación con el WAPO para diferentes estadígrafos de olas utilizados.....	34
Figura 13: Ubicación del sitio del REALCO respecto a los cayos y bajos adyacentes..	35
Figura 14: Valores de la serie de datos de nivel del mar medidos.....	36
Figura 15: Serie de marea para el período de tiempo de medición de datos de olas. ..	38
Figura 16: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45°.....	40
Figura 17: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°.....	40
Figura 18: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°.....	41
Figura 19: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85°.....	41
Figura 20: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45°.....	42
Figura 21: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45°.....	43
Figura 22: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°.....	44
Figura 23: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°.....	44
Figura 24: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°.....	45
Figura 25: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°.....	45
Figura 26: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85°.....	46
Figura 27: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85°.....	46

Índice de figuras

Figura 28: Relación entre la superficie libre y el caudal en el francobordo y la distancia hasta el francobordo.....	48
Figura 29: Relación entre la superficie libre y el caudal en el francobordo y el ancho del francobordo.....	50
Figura 30: Dimensiones del REALCO en Laguna Larga.....	50
Figura 31: Influencia de la variación de la marea semidiurna sobre la superficie libre dentro del REALCO.....	52
Figura 32: Superficie libre y Caudal dentro del REALCO para un mes de marea con altura y período de ola medios.....	53
Figura 33: Caudal para la serie de datos de olas y marea.....	54
Figura 34: Datos de caudal filtrados y nivel de marea correspondiente.....	55

Índice de Tablas:

Tabla 1: Principales constituyentes de las mareas.	20
Tabla 2: Media y Moda de los valores de presión atmosférica (hPa) cada tres horas.	30
Tabla 3: Media y Moda de la dirección del viento (grados respecto al Norte) cada tres horas.	31
Tabla 4: Estadística descriptiva de los datos de altura de ola significativa (H_s), altura de ola máxima (H_m) y período de ola (T_s), medidos con el ológrafo.	33
Tabla 5: Estadígrafos oceanográficos relacionados con los datos de olas medidos con el ológrafo.	33
Tabla 6: Datos de altura de ola significativa medida con el Ológrafo (H_{sM}) y calculada con el Modelo WAPO (H_{sW}), así como período correspondiente (T_s).	34
Tabla 7: Distribución de los datos de nivel del agua medidos en el mar.	37
Tabla 8: Constituyentes principales de las mareas en el sensor Mar.	37
Tabla 9: Variantes de dimensiones del amplificador para diferentes datos de olas, ancho del amplificador y ángulo de apertura de las paredes.	49
Tabla 10: Variaciones de la superficie libre (η) y el caudal (C) en el REALCO en función de los datos de olas y la marea semidiurna.	51

Listado de variables:

a = Distancia vertical en relación con el nivel de reposo.

A = Amplitud máxima de la ola.

A_i = Amplitud del oleaje incidente en el REALCO.

α_i = Ángulo de incidencia de la ola.

α_r = Ángulo de refracción de la ola.

b = Ancho del canal.

b_0 = Ancho de la boca del amplificador.

b_f = Ancho del francobordo.

c = Velocidad de la ola.

c_i = Velocidad de la ola incidente.

c_p = Velocidad de las partículas dentro del REALCO.

c_r = Velocidad de la ola refractada.

d = Profundidad en la que se encuentra la ola en el momento de calcular la velocidad.

ε = Fase de la onda.

F = Altura del francobordo.

g = Aceleración de la gravedad.

h = Profundidad del canal.

h_0 = Profundidad en la boca del REALCO.

H_i = Altura de ola del i -ésimo valor de una serie de olas.

H_{rms} = Altura raíz media cuadrática de las olas.

H_s = Altura significativa de las olas.

J_0 = Función de Bessel de orden cero.

J_1 = Función de Bessel de primer orden.

k = Número de onda.

l = Longitud real del amplificador.

Listado de variables

L = Longitud de onda.

η = Superficie libre dentro del canal.

N = Número de datos de la serie.

Q_b = Fracción de olas rotas dentro de un conjunto de olas.

t = Tiempo.

T = Período de ola.

V_x = Velocidad de movimiento del agua en el eje "x".

ω = Frecuencia angular.

x = Distancia horizontal en dirección de la propagación de la ola.

X = Longitud virtual del amplificador.

INTRODUCCIÓN.

Las olas son movimientos periódicos de la superficie de los cuerpos de agua cuyas dimensiones varían según las características de los vientos que las generen, el tiempo que estos actúen sobre ellas, la configuración del fondo donde se desplacen y la distancia que recorran hasta entrar en contacto con el fondo, e incluso estando en contacto con este; entre otros.

Si se observan las olas por unos minutos, se notará que estas oscilaciones varían sus características con el tiempo, de manera que la altura de la ola cambia en el tiempo y el espacio y las propiedades estadísticas de las olas cambian de un día a otro. (*Stewart, 2000*)

El oleaje en la superficie del océano es generado principalmente por el viento y son un componente fundamental de las regiones costeras del mundo. El conocimiento de esas olas y la fuerza que ellas generan es esencial para el diseño de proyectos costeros debido a que ellas son el factor más importante que determina la geometría de las playas, los planes y diseños de marinas, las medidas de protección costera, las estructuras hidráulicas y otros trabajos costeros civiles y militares. La estimación de las condiciones de las olas es necesario en la mayoría de los estudios de ingeniería costera. (*Coastal Engineering Manual, 2003*)

El oleaje adquiere su energía del viento que sopla sobre la superficie del mar. En especial, los vientos asociados a tormentas pueden generar trenes de olas muy grandes que viajan por cientos de kilómetros hasta alcanzar la orilla. Esta energía (adquirida a través de grandes extensiones de mar) se disipa en un área relativamente estrecha de la zona costera: la zona de rompiente o *surf*. La mayor parte de la energía del oleaje se disipa cuando rompe. Esta es, por mucho, la más importante aportación de energía en la zona costera. (*Mosso, 2004*)

Durante muchos años el hombre ha tratado de utilizar y transformar esa energía existente en las olas para diversos usos. Ya sea para generar electricidad, para redistribuir sedimentos en un vertimiento de arena o para lograr la conservación de playas y zonas costeras, el uso y transformación del oleaje se ha convertido en un área del conocimiento sumamente importante a través de la caracterización de las condiciones hidrodinámicas de dichas olas.

Además de las olas, y las corrientes generadas por estas, las mareas juegan un papel fundamental en el comportamiento de las características hidrodinámicas de cualquier zona costera, produciendo cambios del nivel medio del mar que llegan a ser significativos en muchos lugares y que modifican la ubicación de la zona de rompiente y la altura de las olas a la que ocurre el proceso de rotura.

Las mareas tienen, además, una gran importancia en el intercambio que se establece entre el mar y las lagunas costeras, pues estas últimas presentan generalmente una boca o canal de comunicación que funciona mayormente por efecto de la marea y cuyo volumen de intercambio está en estrecha relación con la amplitud que alcanza la marea en cada lugar.

La conjunción de estos dos procesos (mareas y olas) provoca la mayor afectación en la zona costera, a la vez que permite conocer el funcionamiento de la misma. El estudio del comportamiento de ambas permite evaluar las formas de intervención en la zona costera y cómo la acción humana puede afectar el funcionamiento de la misma, a la vez que esta intervención puede verse afectada por la fuerza, energía y potencia de las olas, corrientes y mareas.

El estudio cuantitativo de los procesos físicos hidro-morfodinámicos en la zona cercana a la costa ha sido realizado en profundidad solo durante los últimos 30 años (aproximadamente) por investigadores dentro de los campos de la ingeniería y la oceanografía costera. Los fenómenos observados en el área cercana a la costa son extremadamente complejos y no es fácil ningún tipo de tratamiento analítico. (Mosso, 2004)

Por otra parte, la intervención humana en la zona costera genera cambios en la misma, que están íntimamente relacionados con el comportamiento estacional de las olas y las mareas, y cuya eficiencia depende en gran medida de las condiciones hidrodinámicas del área a intervenir. Todas las construcciones que se realizan en la línea de costa o cercana a esta tienen que considerar el funcionamiento de las aguas costeras en dicha región, así como la respuesta de las olas y las mareas ante las construcciones, y de estas últimas ante los cambios en las condiciones hidrodinámicas.

ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN.

Durante la revisión de la bibliografía relacionada con el tema de esta investigación se pudo constatar que, aunque se han realizado muchos trabajos que se relacionan con estudios e investigaciones de dinámica de sedimentos y vertimientos de arena, sobre todo en la región de Varadero, Cuba; existe muy poca información acerca de la hidrodinámica de la zona costera cubana y en especial del área a estudiar en esta tesis.

Solamente se encontraron dos trabajos donde se hace mención a características hidrodinámicas de la zona de estudio, aunque solo se centran en describir algunos detalles de la misma, fundamentalmente relacionados con las mareas.

El primer trabajo encontrado fue “Estructura y dinámica de las playas para su manejo y conservación, de los autores Denia González y Osmín de la Paz (1994); donde se caracteriza, desde el punto de vista descriptivo, el régimen hidrodinámico de Playa Larga llegando a la conclusión que esta posee un régimen ligeramente activo y que está condicionado por la existencia de afloramientos rocosos sumergidos y de un fondo rocoso-arenoso a partir de los tres metros de profundidad y hasta aproximadamente los 15 metros de profundidad. Además los sedimentos son de origen biogénicos y su granulometría media la califica como arena fina.

El segundo trabajo encontrado fue “Proyecto de restauración de la zona de playa del hotel Sol Club Cayo Coco”, de los autores A. Zúñiga, D. González y F. Enríquez (1999); donde se caracteriza el régimen de mareas en el área estudiada, cercana unos tres kilómetros, al Este, de Punta Raza. Estos autores concluyen que la marea es de tipo sinódica, por lo que depende fundamentalmente de las fases de la luna y presenta una amplitud variable a lo largo del mes lunar. Los mayores valores de marea en la región ocurren durante el período de sicigia, originando amplitudes máximas de 0.74 metros, mientras que las menores mareas ocurren durante el período de cuadratura, con amplitudes mínimas de 0.38 metros. La amplitud media de la marea en la zona es de 0.56 metros y la máxima extrema entre el valor máximo y el mínimo observado en el período de estudio fue de 0.87 metros. El vaciante promedio tiene una duración de 6 horas con 6 minutos y el llenante dura 6 horas con 19 minutos.

En relación a los antecedentes del empleo de un canal de oleajes para la rehabilitación de lagunas costeras solo se encontraron dos referencias al uso de estos y su vínculo con el aprovechamiento de las olas en la costa.

El primer trabajo revisado es la tesis de doctorado de Miguel Ángel Alatorre Mendieta (2003), titulada "Sistema de bombeo de agua marina utilizando la energía del oleaje y marea". En esta investigación, el autor desarrolla en mayor detalle un sistema de bombeo de agua de mar propuesto con el propósito de favorecer el recambio de agua en una laguna litoral o en estques de acuicultura por Ruiz et al (1994). Este dispositivo, utiliza la energía natural del oleaje, que se amplifica por medio de un concentrador de oleaje de paredes convergentes incrementando la carga hidráulica en su interior y fue patentado inicialmente en 1995 (Ruiz et al. 1995).

La investigación de Alatorre-Mendieta (2003) se llevó a cabo en dos fases: una experimental y otra teórica. En la fase experimental, tanto a nivel de laboratorio como de campo, "...se realizaron diversos experimentos para estudiar el efecto de la variación de cada uno de los parámetros tanto de oleaje como de la estructura sobre el gasto"..., "se realizaron mediciones en condiciones reales y se identificaron los parámetros más importantes en el funcionamiento y los elementos críticos"... En la fase teórica "se elaboraron diversos modelos matemáticos hasta la obtención de uno satisfactorio. Se trabajaron diferentes modelos: Transformación conforme en el plano complejo, modelo numérico con los conceptos fundamentales de la óptica geométrica, la superposición de efectos independientes de la rampa (para la cual ya existe un modelo analítico) y de las paredes con un modelo experimental"... "...al aplicar la ecuación de continuidad en canales de paredes convergentes con ondas largas (comparadas con el fondo y las dimensiones del amplificador) y con la hipótesis de que el oleaje es armónico, se encontró que la solución explica satisfactoriamente el factor de amplificación del oleaje en el interior de las paredes al compararse con los datos propios y de otros autores. Se complementó la ecuación con coeficientes empíricos para explicar algunos fenómenos no resueltos analíticamente." Este autor concluye que: "El gasto obtenido es del orden de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para oleajes del orden de 1 m de altura. No es uniforme por el efecto de la marea. El acceso hacia la laguna litoral debe encontrarse a una distancia corta de la playa (del orden de 100m). Es conveniente contar con una escollera accesible para la instalación del prototipo. Finalmente, para la conducción del caudal se propone un canal abierto."

Los autores Alatorre-Mendieta, M., Silva-Casarín, R., Ruiz-Rentería, F., & Merino-Ibarra, M. (2004) en su trabajo intitulado "*A flushing system to clean up coastal lagoons*" desarrollan un modelo analítico para asistir en el diseño de un amplificador de olas como parte de un canal de entrada de agua hacia una laguna costera, mediante el aprovechamiento de la energía del oleaje. Este modelo fue desarrollado a partir de experimentos en laboratorios y en la costa. Constituye una aplicación práctica de las formulaciones y modelos llevados a cabo por estos autores.

Posteriormente, integrando la información de todos estos trabajos se integró una nueva solicitud de patente (Alatorre et al. 2011) en la cual se le denominó a este sistema de renovación de agua como Sistema **Renovador de Aguas de Lagunas Costeras** (REALCO).

Debido a la necesidad de profundizar en el conocimiento e investigación de esta área de estudio, así como a la necesidad de caracterizar y evaluar el funcionamiento del REALCO, se propone esta investigación, cuya importancia radica en la evaluación de la influencia de las características de las olas y la marea del sector costero Punta Raza, Cayo Coco, Cuba sobre la efectividad del REALCO y la entrada de agua hacia Laguna Larga, lo que pudiera provocar cambios en las comunidades de organismos que habitan en dicha laguna; además de ser la primera investigación donde se caracteriza la hidrodinámica de un sector costero de Cayo Coco, Cuba, y donde se analiza la influencia del régimen de olas y mareas sobre la efectividad del REALCO.

Por otra parte, la investigación permitirá comprobar, en un caso de estudio real, las mediciones a escala realizadas durante las pruebas del REALCO, a fin de refinar las fórmulas y modelos que dieron lugar a este sistema. Para ello se propone la siguiente hipótesis: “La influencia de las olas y la marea en el sector costero Punta Raza, Cayo Coco, Cuba permitirán un funcionamiento eficiente del Sistema **Renovador de Aguas de Lagunas Costeras** (REALCO).”

OBJETIVOS.

Objetivo general.

Evaluar la influencia de las olas y los cambios de la marea en el sector costero Punta Raza, Cayo Coco, Cuba, sobre la efectividad del Sistema **Renovador de Aguas de Lagunas Costeras** (REALCO).

Objetivos específicos.

1. Caracterizar el comportamiento de las olas y la marea en el sector costero Punta Raza, Cayo Coco, Cuba.
2. Determinar los flujos de agua que entrarán a través del REALCO durante un ciclo anual de variaciones de las olas y la marea.
3. Determinar en qué momentos del año el sistema pudiera quedar sin agua debido a la insuficiencia del oleaje.

MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1. Zona de estudio.

4.1.1. Ubicación geográfica.

La zona de estudio se encuentra situada hacia las mediaciones del borde Norte de Cayo Coco, el cual a su vez pertenece al subarchipiélago Sabana-Camagüey (Figura 1), que se extiende por toda la parte centro-septentrional de la Isla de Cuba, con una dirección sublatitudinal paralela a esta, y a una distancia aproximada de 30 Km de la misma. Dicho cayo se sitúa aproximadamente entre los 22°15' y los 22°33' de latitud Norte y los 78° 16' y 78°39' de longitud Oeste. Con sus aproximadamente 370 Km² de extensión, constituye la cuarta isla más grande del país. Limita al Norte con el Canal Viejo de las Bahamas, al Este con el Canal de Paredón Grande, al Sur con la Bahía de los Perros y al Oeste con el Canalizo de Baliza Nueva. (Colectivo de autores, 2010)

4.1.2 Clima.

El clima de la región presenta una temperatura media anual de 26.0 °C; con mínimas en la temporada invernal (22.8 °C de diciembre a marzo) y máxima en el verano (27.8 °C de junio a septiembre). El promedio anual de precipitación es de 1 129.2 mm, con más del 70 % en el periodo lluvioso (mayo – octubre) y poco más de 200 mm en el periodo poco lluvioso o seco (noviembre – abril). El viento predominante es del E - NE, con pocos días de calma; la incidencia de los llamados “nortes” es frecuente en el invierno debido al paso de frentes fríos (ACC/ICGC, 1990). La temporada de ciclones tropicales (del 1 de junio – 30 de noviembre) ha sido activa durante los últimos 17 años con el paso de tres huracanes: Lili (1996), Georges (1998) y Michelle (2001).

4.1.3. Geomorfología.

En un sentido amplio, Cayo Coco expone un relieve joven propio de zonas costeras originado, en lo esencial, por la interacción de los procesos morfogenéticos. Dentro de estos se considera de modo especial, a los movimientos neotectónicos ascendentes o descendentes, a las variaciones del nivel del mar durante el Cuaternario, a la acción de un conjunto de procesos exógenos (denudativo-acumulativos) de ciclo relativamente periódico que han sido favorecidos por la ubicación del archipiélago Jardines del Rey en la franja tropical septentrional, así como por el existencia predominante en el subsuelo de complejos litológicos carbonatados.

En correspondencia con lo anterior, se pudo determinar que en el terreno de trabajo se manifiesta la presencia de morfoestructuras correspondientes a los tres Complejos Naturales de Primer Orden que se relacionan a continuación:

1. Complejo Natural de Playas, Dunas Arenosas y Costas Acantiladas.
2. Complejo Natural de Lagunas Litorales e Interiores salobres.
3. Complejo Natural de Llanuras Interiores sobre rocas.

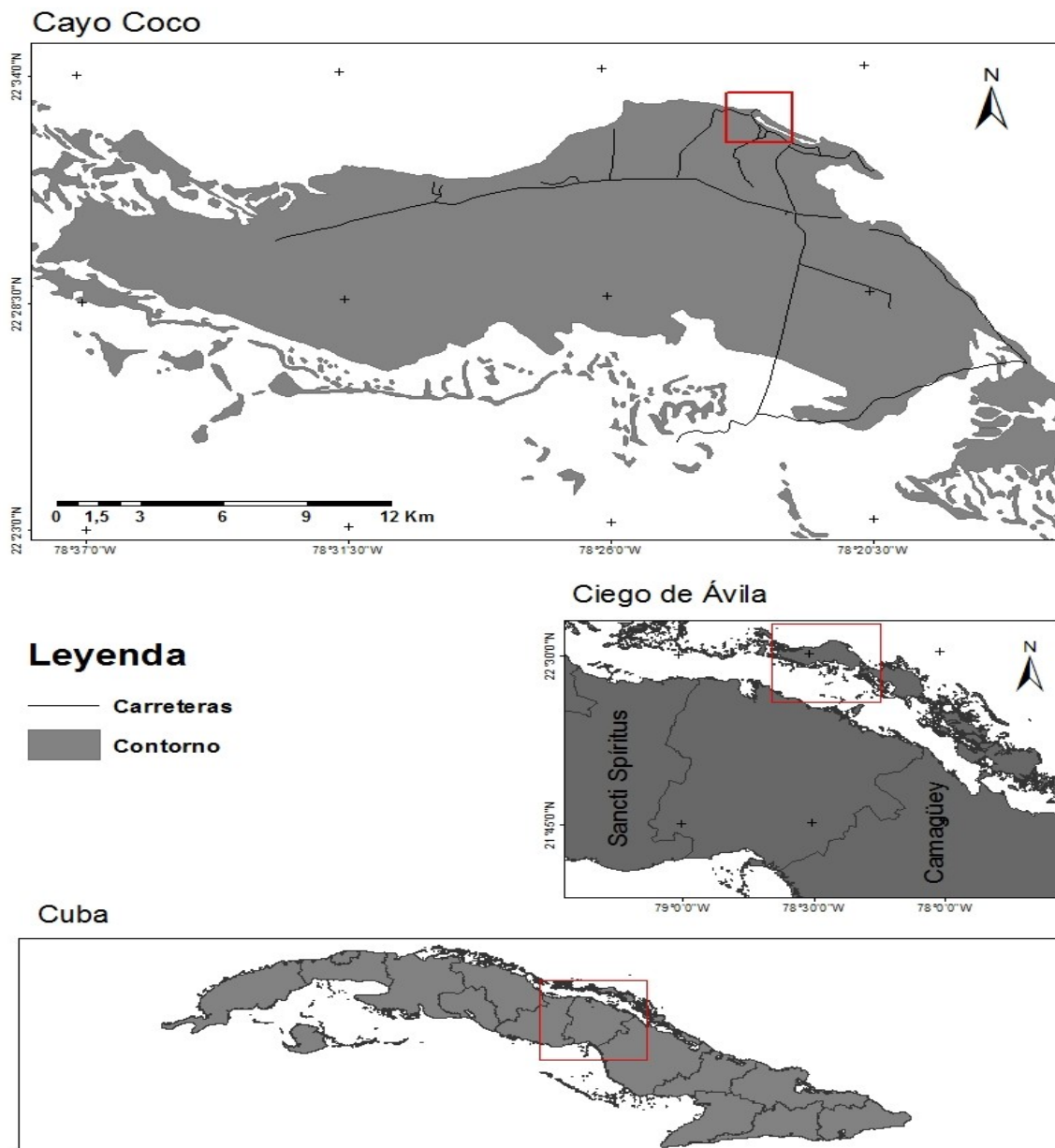


Figura 1: Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaborada por el autor.

Cada componente del Complejo constituye un Subcomplejo o complejo de segundo orden y posee ubicación y características específicas. Precisamente el primer complejo mencionado, está representado por la existencia en sí de Punta Raza, la cual constituye una morfoestructura típica del Subcomplejo Natural de Costas Acantiladas. Dicho subcomplejo, como su nombre lo indica, se relaciona con la existencia de un escarpe en la línea de costa, que se ha originado por la acción del intenso proceso de erosión marina a que ha estado sujeto un sector costero que ha experimentado un ascenso tectónico progresivo. Esta morfoestructura de costa acantilada, se extiende en dirección Sureste-Noroeste, alcanza cotas superiores a los 3 m y se halla cubierta parcialmente por una vegetación de arbustos bajos. La misma está formada por una roca calcarenita de dureza

baja a media, de compactación y coherencia medias. Dicha roca, hacia la franja norte del área de estudio, se encuentra intensamente afectada por procesos cársticos superficiales, los cuales se han visto incrementados por la acción disolutiva del mar.

De acuerdo con lo anterior, hacia ese sector se puede observar la presencia de abundantes lapiés agudos (diente de perro), oquedades de disolución (microcarso costero) y algunos bloques sueltos pequeños. En la zona de contacto del mar con este acantilado, se identifica la existencia de otros elementos morfológicos que caracterizan a este tipo de costa como son: el banco de oleaje, pequeños entrantes y salientes de la línea costera, solapas de erosión y bloques desplomados.

El segundo complejo natural citado, posee una mayor área de extensión y ocupa las franjas costeras bajas que existen hacia la zona interior del cayo, limitando al Noroeste con las morfoestructuras descritas del primer complejo. Esta laguna interior es reconocida como Laguna Larga, la cual ocupa la mayor parte de la porción Sureste del terreno bajo análisis. Se estima que su origen se asocia a la existencia de fenómenos cársticos hundidos en los cuales predomina la ocurrencia de procesos exógenos acumulativos. Esta laguna constituye la morfoestructura más significativa de la poco desarrollada red hidrográfica del sector tratado, lo cual se debe fundamentalmente a la naturaleza soluble de los suelos y rocas que forman el terreno, que favorecen mayormente la infiltración de las aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas sobre su escurrimiento superficial.

El último complejo mencionado se relaciona con el desarrollo de una llanura interior sobre roca, la cual se encuentra cubierta de una vegetación abundante, muy tupida. El relieve es típico de llanuras abrasivas denudativas, donde son cuantiosas y comunes las manifestaciones cársticas. Las cotas de este sector oscilan entre los 1 m y 2.50 m sobre el nivel medio del mar (n.m.m.). Esta llanura se halla rodeando el área de extensión del segundo complejo mencionado. (Colectivo de autores, 2010)

4.1.4. Geología.

La naturaleza geológica de la cobertura superficial del área de estudio está compuesta por rocas y sedimentos correspondientes al Neoautóctono Cubano, los cuales a su vez pertenecen a la Asociación Estructuro Formacional (AEF) de la Neoplataforma, datada del Eoceno Superior Tardío al Reciente. Las secuencias propias de esta AEF se originaron básicamente (a diferencia de los elementos del Substrato Plegado) en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, evolucionando en un régimen de desarrollo platafórmico.

De modo más específico la superficie se halla indistintamente formada por acumulaciones de sedimentos correspondientes a los Depósitos Marinos de Holoceno (Q4 m) o secuencias de rocas carbonatadas pertenecientes a la Formación Jaimanitas (Q3 js). En aquellas porciones del terreno que superficialmente se hallan cubiertas por los Depósitos Marinos de Holoceno (Q4 m), tales materiales poseen relativamente una amplia difusión lateral pero en profundidad, su desarrollo llega a alcanzar solamente los 0.30 m de espesor.

Según el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 1997), tales sedimentos pueden estar formados por depósitos de arenas, guijarros de playa y bancos de tormenta, alcanzando un espesor que oscila entre 1.0 m y 3.0 m. Este conjunto litológico se encuentra yaciendo de modo discordante, a las rocas de la Formación Jaimanitas (Q3 js), las cuales se hallan aflorando hacia otras partes del terreno, principalmente hacia la franja Norte de éste, donde se extiende Punta Raza con su típica forma de costa acantilada. Los horizontes litológicos correspondientes a dicha formación geológica, al igual que los depósitos marinos que la cubren, se constituyeron durante el tercer ciclo sedimentario o estadio de transformación paleogeográfica del Neoautóctono cubano, datado del Plioceno al Reciente, el cual comenzó con un predominio de sedimentos clásticos y concluyó con el dominio de rocas carbonatadas, reflejando un proceso general de transgresión marina que culminó súbitamente con una regresión, ocurriendo progresivamente, la reducción de la profundidad de las aguas y extensión o emersión del territorio en el Holoceno. (Colectivo de autores, 2010)

4.1.5. Hidrogeología.

Desde el punto de vista hidrogeológico la presencia de aguas subterráneas se ha detectado a una profundidad relativamente cerca de la superficie natural del terreno, localizándose con respecto a esta, a una profundidad que osciló entre los 2.00 m y 3.00 m.

La presencia de aguas subterráneas a estos niveles indica que bajo la zona de investigación existe y se extiende un horizonte acuífero que está compuesto mayormente por las rocas de la Formación Jaimanitas (Q3 js). El mismo constituye un acuífero libre y dado su cercanía con el mar, se encuentra directamente influenciado por las oscilaciones del nivel de éste y su composición química, constituyendo además su principal fuente de alimentación.

De acuerdo a las características hidroquímicas de las aguas que ocupan el área de estudio, se establece que las mismas deben considerarse como agresivas al hormigón y al acero, pudiéndole ocasional a los mismos, un efecto corrosivo severo. (Colectivo de autores, 2010)

4.2. Estrategia de muestreo.

4.2.1. Olas.

El muestreo de las olas se realizó mediante el empleo de un ológrafo modelo *Wave and Tide Recorder – 9 (WTR-9)* el cual se colocó en un punto frente a la zona de estudio, a 150 metros de la costa y una profundidad de 3.40 metros (Punto A, figura 2), para determinar las características de las olas que inciden directamente sobre el sector costero a analizar. El intervalo de muestreo de las olas fue de 30 minutos con una frecuencia de 2 Hz, el menor intervalo que ofrecía el equipo para su funcionamiento, y las mediciones se realizaron entre el 11 de julio de 2011 y el 16 de junio de 2012.

El WTR-9 está diseñado para medir la altura de ola significativa, el periodo medio de cruce por cero, la altura máxima de ola y el nivel del agua. El instrumento mide presión

y temperatura y calcula los parámetros de las olas a intervalos regulares de tiempo. Los datos son grabados en una Unidad de Almacenamiento de Datos 2990 (DSU2990, por sus siglas en inglés).

Los parámetros/canales de salida son los siguientes: (Ver Anexo 2, página 66; para especificaciones)

1. Referencia.
2. Temperatura.
3. Presión hidrostática, parte más significativa.
4. Presión hidrostática, parte menos significativa.
5. Altura de ola significativa, H_{m0} .
6. Periodo medio de cruce por cero, T_{m02} .
7. Altura de ola máxima, $E [H_{max}]$.

La Referencia es una lectura fija que sirve para indicar el funcionamiento correcto del equipo y para identificar la serie de tiempo de instrumentos individuales. La temperatura es medida por un termistor colocado dentro de un compartimento que se extiende en el agua.

El sensor de presión está basado en un oscilador de cristal de cuarzo de alta precisión. La presión es medida cada 0.5 segundos y son tomadas 1 024 muestras (512 segundos) y almacenadas en una memoria RAM para posteriores análisis. Las últimas 80 mediciones son promediadas para dar la medición de la presión hidrostática. Esta presión es una palabra de 20 bit dividida en dos canales (cada uno de 10 bit).

Para propagar las olas desde el sitio de medición hasta la boca del REALCO se empleó el Modelo WAPO (*WAve Propagation On the coast*) versión 4, que ha sido desarrollado para propagar los trenes de olas monocromáticas sobre un fondo variable, (R. Silva *et al.*, 2005). Para ello se utilizó la batimetría del área de estudio a escala 1:500 y con una malla de 0.5 x 0.5 metros, la que abarcó un área de 300 x 300 metros.

La dirección de las olas se estimó a partir de la dirección del viento debido a que este es el principal generador de olas de la zona de estudio; fundamentalmente por el hecho que el sitio de muestro está protegido por el grupo de cayos que forman Las Bahamas por lo que no sufre afectación de swell proveniente del Océano Atlántico. En ese sentido, se asume que la dirección predominante de las olas coincide con la dirección predominante del viento.

4.2.2. Mareas.

Los datos para el estudio del comportamiento de las mareas fueron obtenidos mediante el empleo de sensores de presión de la marca *HOB0 Onset* modelo U20-001-01, los cuales fueron colocados en el mar (Punto A, figura 2).

Los sensores registraron la presión de la columna de agua por encima de ellos cada dos minutos (las especificaciones del sensor utilizado se detallan en el Anexo 3, página 67),

lo que permitió determinar las variaciones de dicha columna de agua y con ello las oscilaciones del nivel del agua en el mar. Además, midieron la temperatura del agua al mismo tiempo que la presión.

Las mediciones se realizaron desde el 6 de julio de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2013. La descarga y almacenamiento digital de los datos de marea se realizó con el programa *HOBOWare*, mediante el cual se convirtieron los datos a formato *Excel* para su posterior análisis y procesamiento.

Para determinar las componentes de las mareas se midió la presión atmosférica en el período de medición, la cual se sumó a la profundidad del sitio de ubicación del sensor en el mar y esta se restó a cada valor de nivel del mar medido por el sensor de presión.

Una vez obtenidos estos valores, se empleó el paquete *tidalfit* (Grinsted, 2008), de MATLAB versión 2013a, para determinar las componentes de las mareas y el valor de la misma para la serie de datos de olas. Dicho paquete cuenta de la función *tidalfit* que calcula, mediante la técnica de mínimos cuadrados ordinarios de HAMELS, los parámetros de las constituyentes de las mareas a partir de los datos de superficie libre del agua y luego pronostica la marea para un determinado período de tiempo que el usuario debe seleccionar. De esta forma se calculó la posición del nivel del mar para las fechas de cada dato de ola, a fin de usar ese valor como posición relativa al nivel medio del mar en el momento de calcular la superficie libre y el caudal en el amplificador.

4.2.3. Presión atmosférica y vientos.

Los datos de presión atmosférica y vientos empleados en esta tesis, corresponden a la estación meteorológica de primer orden 78 339, según las normas de la Organización Meteorológica Mundial, perteneciente al Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros (CIEC) en Cayo Coco, con coordenadas geográficas: 22°32'N y 78°22'O; con altura sobre el nivel medio del mar de 3,4 m (Punto B, figura 2). Los datos se toman cada tres horas mediante una estación meteorológica de monitoreo continuo.

El procesamiento de todos los datos así como los cálculos que se realizan durante el desarrollo de la investigación, se llevaron a cabo con el empleo de MATLAB, en su versión R2013a, y con la ayuda del paquete de *Excel* de *Windows*.

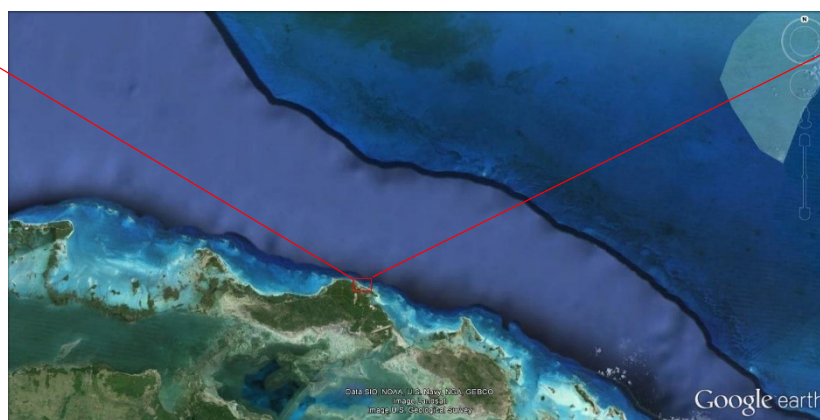


Figura 2: Ubicación de los sitios de muestreo. Fuente: Elaborada por el autor a partir de Google earth.

4.3. Marco teórico-metodológico.

4.3.1. Olas.

Tres aspectos son importantes en el estudio de las olas en las playas: (1) la descripción teórica del movimiento de la ola, (2) los datos climatológicos de las olas en la medida en que ellas ocurren en un segmento dado de la costa, y (3) la descripción de cómo las olas interactúan con la costa para mover el sedimento. La distribución estadística de las características de las olas a lo largo de una línea de costa determinada provee la base para la descripción del clima de ola de un segmento costero. (*Shore Protection Manual*, 1984)

El Dr. *Ingvar Emilsson*, en sus apuntes para el curso de Oceanografía Física del posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM; expone diferentes aspectos relacionados con la teoría y las formulaciones de las olas, definiendo los elementos que componen y caracterizan las olas, así como las fórmulas que explican su comportamiento.

También refleja las relaciones que se establecen entre los diferentes parámetros de las olas, así como la velocidad de onda y de grupo, tanto en aguas profundas como en aguas someras. En otro momento de sus apuntes explica las condiciones iniciales para que las olas comiencen a sentir el fondo así como para que se produzca la rotura del oleaje cuando este se acerca a la orilla.

Este autor plantea que las olas, en su movimiento hacia la costa, pueden sufrir varias roturas, en la medida en que la configuración del fondo así lo permita. En cada una de las roturas se pierde energía y se modifica la altura de las olas, hasta llegar a la orilla, donde su energía es absorbida por la fricción con la arena y el fondo.

Refiere que, en aguas profundas, las olas también se rompen por efecto del viento, pues es posible demostrar teóricamente que la altura de una ola no puede sobrepasar la séptima parte de su longitud. Es decir, cuando la pendiente de la ola es igual a 1/7, la cresta de la ola se vuelve más pronunciada y el mayor aumento de altura resulta en el rompimiento de la misma. Además, plantea que el perfil de una ola sencilla que se propaga en una determinada dirección se puede representar mediante la función:

$$a = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{L}x\right) \quad (4.1)$$

El número de onda (k) y la frecuencia angular (ω) se relacionan con la longitud de onda y el período de las olas, respectivamente, a través de las siguientes fórmulas:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad y \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

por lo que la fórmula general de las olas puede escribirse, además, de la siguiente manera:

$$a = A \sin(kx - \omega t) \quad (4.2)$$

Así mismo, plantea la expresión de la velocidad de las olas en aguas someras, estando definida por su relación con la profundidad a través de la fórmula:

$$c = (gd)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

Explica además que, en la medida en que las olas se mueven hacia aguas poco profundas, a consecuencia de la reducción de la profundidad, la energía de la ola, que permanece constante, se concentra en una cantidad menor de agua, de manera que la velocidad de las partículas aumenta (energía cinética), así como la altura de la ola (energía potencial).

De esta manera, las partículas aumentan su velocidad, a la vez que el perfil de la ola en sí sufre un retraso. Como resultado la velocidad de las partículas en la cresta llega en un determinado momento a sobrepasar la velocidad de propagación de la ola, con el resultado de que la cresta se rompe. El rompimiento ocurre cuando la altura de la ola es igual a 1.3 veces la profundidad bajo el seno de la ola (Emilsson, 2011, versión 4).

Otro efecto de la reducción de la velocidad con la disminución de la profundidad es el retraso de unas olas y el avance más rápido de otras (Refracción). En la medida que eso ocurre, las olas van cambiando su dirección de ataque sobre la costa, en relación con la ley de Snell, que establece:

$$\text{sen}\alpha_i/c_i = \text{sen}\alpha_r/c_r$$

Esta expresión es la que facilita determinar en qué lugares de la costa los trenes de olas se unen y cuáles se separan, permitiendo conocer las zonas donde las olas concentran su energía en la medida que se acercan a la costa.

Mellor, George L., en el capítulo 9 de su libro *“Introduction to physical oceanography”* (1996), explica todo el procedimiento matemático de las ondas superficiales del océano hasta llegar a la descripción de la fórmula de las olas ($a = A \sin(kx - \omega t)$), así como la relación entre las velocidades en los ejes “x” y “z” de las olas con las funciones potenciales y las condiciones de fronteras que se deben cumplir en estos casos. Más adelante este mismo autor relaciona las soluciones de las ondas superficiales para el caso de olas progresivas, llegando hasta la fórmula para la velocidad de grupo de las olas.

También expone las fórmulas de velocidad de fase en olas de aguas profundas y olas de aguas someras; así como la relación entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo. Además, plantea las fórmulas de las velocidades de las olas en los ejes “x” y “z” en función de la frecuencia de las olas, la profundidad y la superficie del agua.

En este mismo apartado de su libro realiza una relación de la nomenclatura asociada a las olas de todo tipo, donde se encuentran términos como: longitud de onda, número de ola, período, frecuencia, velocidad de fase y velocidad de grupo (ver Anexo 1, página 62 para definiciones); además de exponer la relación matemática que se establece entre cada uno de estos parámetros de las olas.

Este autor llega a establecer que la velocidad de grupo es la mitad de la velocidad de fase de las olas en aguas profundas, mientras que en aguas someras la velocidad de

grupo es igual a la velocidad de fase de las olas. Además, plantea la fórmula de la velocidad de movimiento del agua en el eje “x” como una función de la amplitud de la ola y la velocidad de fase a través de la siguiente fórmula:

$$V_x = \left(A * \frac{g}{c} \right) * \text{seno}(kx - \omega t)$$

Mosso Aranda, C. (2004) realiza un análisis de diferentes modelos físico-matemáticos que se han desarrollado para el estudio numérico de la zona cercana a la costa, comparando los modelos y estableciendo una serie de formulaciones de importancia para estos tipos de estudios.

En ese sentido analiza los modelos de disipación de energía del oleaje, los que divide en probabilísticos y paramétricos. Los primeros (probabilísticos) toman la función de densidad de probabilidades de las alturas de las olas en un contorno mar adentro, la proyectan a un número discreto de clases de alturas de olas (o períodos) y asumen que cada clase se comporta como un subgrupo periódico que se propaga independientemente de los otros. Los segundos (paramétricos) describen determinadas formas de distribución de alturas de ola rompiendo, cuyos parámetros dentro de la zona de rompiente son descritos localmente y promediados en el tiempo. Combinando la distribución de altura de ola en rotura y la función de disipación se obtiene la disipación promediada en función de los parámetros locales del oleaje.

Ambos tipos de modelos, después de ser calibrados, predicen satisfactoriamente los parámetros promediados del oleaje como tensor de radiación o el flujo de masa, necesarios para determinar variaciones del nivel del mar producidas por rotura o el flujo de resaca (*undertow*) asociado al transporte de masa.

Este autor describe y compara los modelos de disipación de energía de *Batjes y Janssen* (1978), *Thorton y Guza* (1983) y *Batjes y Stive* (1984), describiendo el planteamiento matemático y las condiciones necesarias para la aplicación de cada uno de ellos, así como los resultados esperados en cuanto a la disipación de energía en cada caso.

Dentro de las fórmulas que expone, relacionada con las olas en rotura, se encuentra la siguiente:

$$Q_b = H_{rms}/H_{max}$$

Donde Q_b representa la fracción de las olas que en un punto dado están o no rotas en términos del cociente entre la H_{rms} presente (que es equivalente a la densidad de energía media) y la altura de la ola máxima H_{max} que puede existir en una determinada profundidad.

También define y explica los fenómenos de *setup*, *setdown* y tensor de radiación, asociados a olas incidentes a la línea de costa, relacionando las fórmulas que vinculan estos fenómenos con los parámetros de las olas y las características batimétricas de la costa en la cual inciden las olas. El autor plantea que cuando se produce la rotura del

oleaje, también se produce una variación (disminución en el punto de la rompiente o *setdown* y un incremento desde la rompiente hasta el estrán de la playa o *setup*) en el nivel medio del agua por encima del nivel medio del agua en reposo. El *setup* proporciona un gradiente de presión que balancea la componente en dirección a la costa del tensor de radiación. Ambos, *setup* y *setdown*, son la diferencia entre el nivel medio del agua y el nivel del agua en reposo. Los desarrollos teóricos de Longuet-Higgins y Stewart (1963 y 1964, citados por Mosso Aranda, 2004) determinaron que el flujo de *momentum* del oleaje, el tensor de radiación, es el responsable tanto del *setup* como del *setdown*. El tensor de radiación S puede ser definido como el exceso de flujo de *momentum* debido a la presencia del oleaje.

De igual forma define el *Runup* como la distancia vertical por encima del nivel medio del agua que el agua recorre sobre la pendiente de alguna estructura debido a la acción del oleaje; y expone la formulación matemática del mismo, relacionando las tres partes de la que se compone el *Runup*: El *Setup*, las fluctuaciones de *Setup*, y las componentes infragravitarias ($T > 20s$) de las oscilaciones del *Runup*.

En relación con la descripción estadística de las olas, o de un conjunto de mediciones de olas, Silva Casarín, R. (2005), en su Serie Docencia 49; describe el tratamiento estadístico necesario para determinar los valores medios, raíz media cuadrática (rms), 1/2 y 1/3 de los datos de un conjunto de olas. En este sentido el autor expone las ecuaciones necesarias para determinar dichos estadígrafos.

Las ecuaciones expuestas se relacionan a continuación:

$$\text{Altura de ola media: } \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (4.4)$$

$$\text{Altura de ola raíz media cuadrática: } H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (4.5)$$

$$\text{Altura de ola un medio: } H_{1/2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} H_i \quad (4.6)$$

$$\text{Altura de ola un tercio: } H_{1/3} = \frac{3}{N} \left[\sum_{i=1}^{N/3} H_i + \frac{1}{3} H_{N/3} \right] \quad (4.7)$$

Para el caso de los períodos de ola serían las mismas ecuaciones pero sustituyendo los valores de alturas (H) por los de período (T) de olas.

En este caso, los valores 1/3 no se refieren a los datos de altura y período significativos sino al dato de altura y período del tercio más grande de los datos de olas significativas medidas en la serie.

En este mismo trabajo, el autor expone más adelante la ecuación de dispersión, que relaciona el período, la longitud de onda de cada ola con la profundidad en la que esta se desplaza. Esta ecuación de dispersión es utilizada para determinar la longitud de onda de la ola a partir del conocimiento de su período a una profundidad determinada. Es la base mediante la cual se determina el número de onda ($2\pi/L$) que se utiliza en las ecuaciones de las olas. La ecuación de la dispersión queda como:

$$\omega^2 = gk \tan(kd) \quad (4.8)$$

4.3.2. Propagación de las olas hacia la costa.

Como se explicó en el apartado de Estrategia de muestreo (Olas), se utilizó el modelo **WAVE Propagation On the coast** (WAPO) para propagar las olas desde el sitio de medición hasta el punto inicial del Amplificador; en la línea de costa. De esta forma, se logra evaluar la influencia del fondo sobre las características (altura y longitud de onda) de las olas.

El modelo resuelve la ecuación de pendiente suave en dos dimensiones y es capaz de reproducir fenómenos de olas como: Refracción, Reflexión, Someramiento y Disipación de energía inducida por fricción de fondo y Rotura.

Las principales consideraciones detrás de la ecuación modificada de pendiente suave son: flujo irrotacional, fluido incompresible y linealidad; lo cual significa que la ecuación de gobierno puede ser la ecuación de Laplace resuelta para potencial de velocidades y sujetas a condiciones de fronteras dinámica y cinemática en la superficie libre del agua. Adicionalmente, se considera que las olas viajan sobre un fondo impermeable el cual provee la última condición de frontera.

La forma más compacta de escribir la ecuación de pendiente suave es en la forma de Helmholtz:

$$\nabla_k^2 \psi + K_c^2 \psi = 0$$

Donde:

$$\psi = (I_1)^{\frac{1}{2}} \phi$$

$$K_c^2 = (k^2 + i\sigma W) + \frac{r(h)}{I_1} - \frac{\nabla^2 \sqrt{I_1}}{\sqrt{I_1}}$$

$$I_1 = \int_{-k}^0 f(z)^2 dz$$

$$f(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$$

Estas ecuaciones son numéricamente resueltas en un esquema de diferencias finitas de segundo orden; lo que significa que el potencial de velocidades en cada celda del dominio es encontrado resolviendo un sistema de ecuaciones lineales complejas.

Las condiciones del modelo para la resolución de la malla establecen que el origen de la rejilla está en la esquina Noroeste, con todo el dominio siendo positivo. La elección del tamaño de la celda o el pixel de la malla en la dirección “x” y “y” no deben exceder la siguiente relación:

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{1.56 * T^2}{10}$$

El ángulo 0° corresponde a la incidencia normal relativa a cada frontera. Los ángulos positivos en la incidencia son contra reloj (Figura 3).

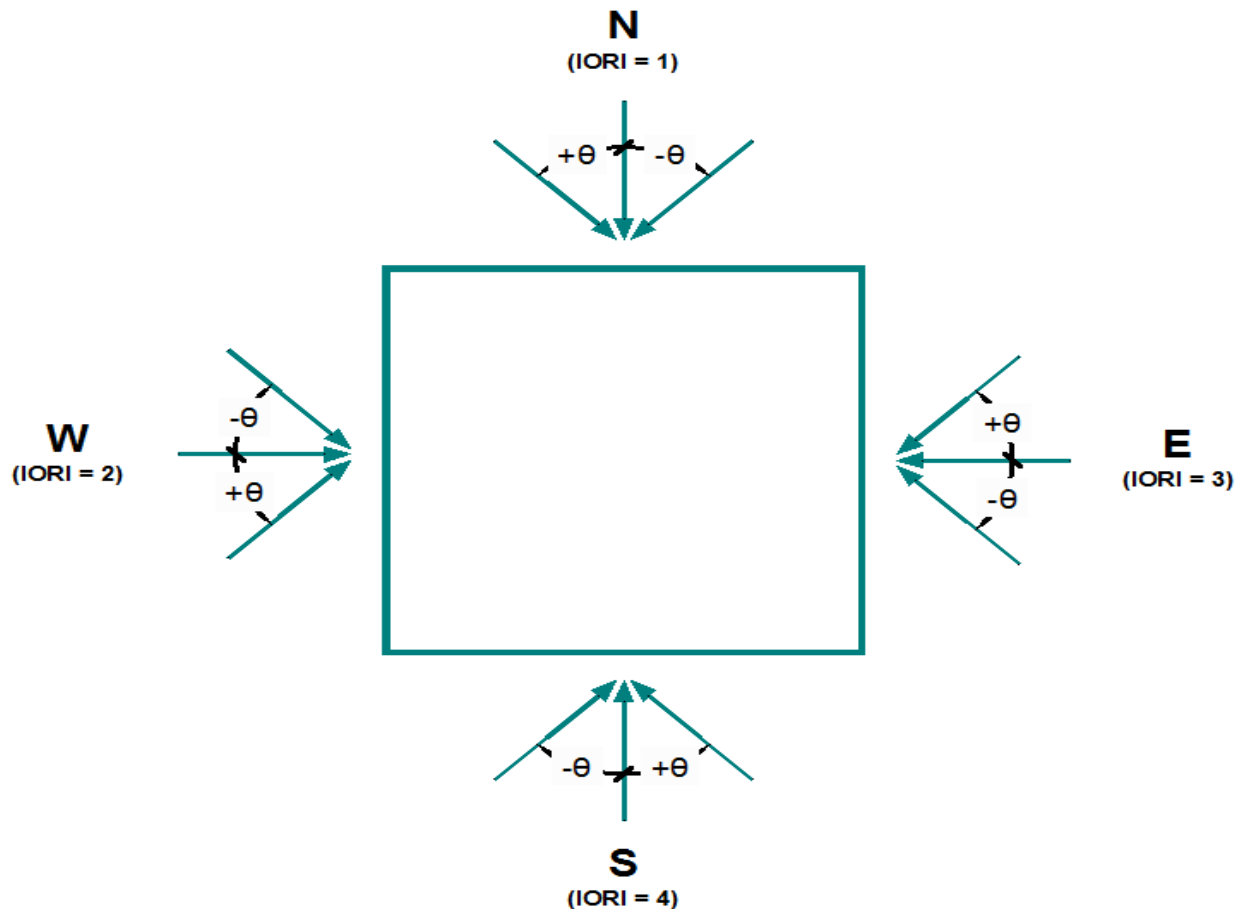


Figura 3: Ángulos de incidencia correspondientes a las fronteras incluidas en el WAPO. Fuente: Silva et al. (2005).

4.3.3. Mareas.

Las fuerzas causadas por la interacción gravitatoria entre el Sol, la Luna y la rotación de la Tierra resultan en cambios periódicos del nivel en grandes cuerpos de agua. El desplazamiento vertical del agua resultante de estas fuerzas es llamado marea o marea astronómica. (*Coastal Engineering Manual*, 2003)

Las mareas son ondas largas, ya sean progresivas o estacionarias. El período dominante es usualmente de 12 horas 25 minutos, el cual es la mitad de un día lunar. Las mareas se generan por el potencial gravitacional de la luna y el sol. Su propagación y amplitud están influenciadas por la fricción, la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis), y la resonancia que está determinada por las formas y profundidades de las cuencas oceánicas y los mares marginales. La expresión más obvia de la marea es el ascenso y descenso del nivel del mar.

Las mareas se pueden representar como la suma de oscilaciones armónicas con los períodos de cada componente principal, más la suma de oscilaciones armónicas de todos las otras combinaciones de períodos (tales como desigualdades). Cada oscilación se conoce como constituyente de marea, y tiene su amplitud, período y fase, los cuales se pueden extraer a partir de observaciones utilizando técnicas de análisis armónico. Se han identificado cientos de dichas oscilaciones, pero en la mayoría de las situaciones y para propósitos de predicciones a lo largo de un año más o menos, es suficiente con incluir solamente M2, S2, K1 y O1. (Ver tabla 1)

El método armónico es el más satisfactorio y usado en el cálculo de las alturas de la marea. Como la marea observada es la suma de un número de componentes u ondas parciales, los cuales corresponden precisamente con el período de los movimientos astronómicos relacionados entre la Tierra, el Sol y la Luna; es posible separar estas componentes mediante el análisis de los armónicos que las conforman. Cada una de las ondas parciales posee una amplitud y una fase la cual es única para cada localidad. La fase significa la fracción del ciclo de la marea que ha sido completado en un tiempo de referencia determinado. Esta depende principalmente del período de elevación de la fuerza de la marea en cuestión y del retraso de la onda parcial para una localidad particular.

Las principales componentes de las mareas así como las características de las mismas se relacionan en la tabla 1, a continuación.

Tabla 1: Principales constituyentes de las mareas.

Símbolo	Nombre	Período
Sa	Solar anual	8 766.55 h (365.24 d)
Ssa	Solar semianual	4 382.89 h (182.70 d)
Mm	Lunar mensual	661.31 h (27.55 d)
Msf	Lunar solar semimensual	354.37 h (14.76 d)
Mf	Lunar semimensual	327.86 h (13.66 d)
Q1	Lunar elíptica mayor diurna	26.87
O1	Lunar diurna	25.82
P1	Solar diurna	24.07
K1	Lunar-solar declinacional diurna	23.93
N2	Lunar elíptica mayor semidiurna	12.66
M2	Lunar principal semidiurna	12.42
T2	Solar elíptica mayor semidiurna	12.02
S2	Solar principal semidiurna	12.00
K2	Lunar solar declinacional semidiurna	11.97

Fuente: Elaborada por el autor a partir del Coastal Engineering Manual (2003).

4.3.4. REALCO.

El Sistema **Renovado de Agua de Lagunas Costeras** (REALCO) se compone de dos partes: un amplificador de oleaje (ver figura 4), cuya función principal es aumentar la altura de las olas por efecto de las paredes y el fondo (en caso de fondo inclinado); para lograr que el oleaje genere un caudal hacia la laguna o hacia el cuerpo de agua que se encuentre detrás de la línea de costa, y un canal de comunicación entre el amplificador y el cuerpo de agua, cuya función es la conducción del agua que penetra por el amplificador.

En el caso del canal de comunicación, este puede tener diferentes variantes de construcción las cuales varían desde tuberías sumergidas o subterráneas o la combinación de ambas (ver figura 5); hasta canales a cielo abierto en caso de que el amplificador este ubicado en la línea de costa; como es el caso de esta investigación, (ver figura 6).

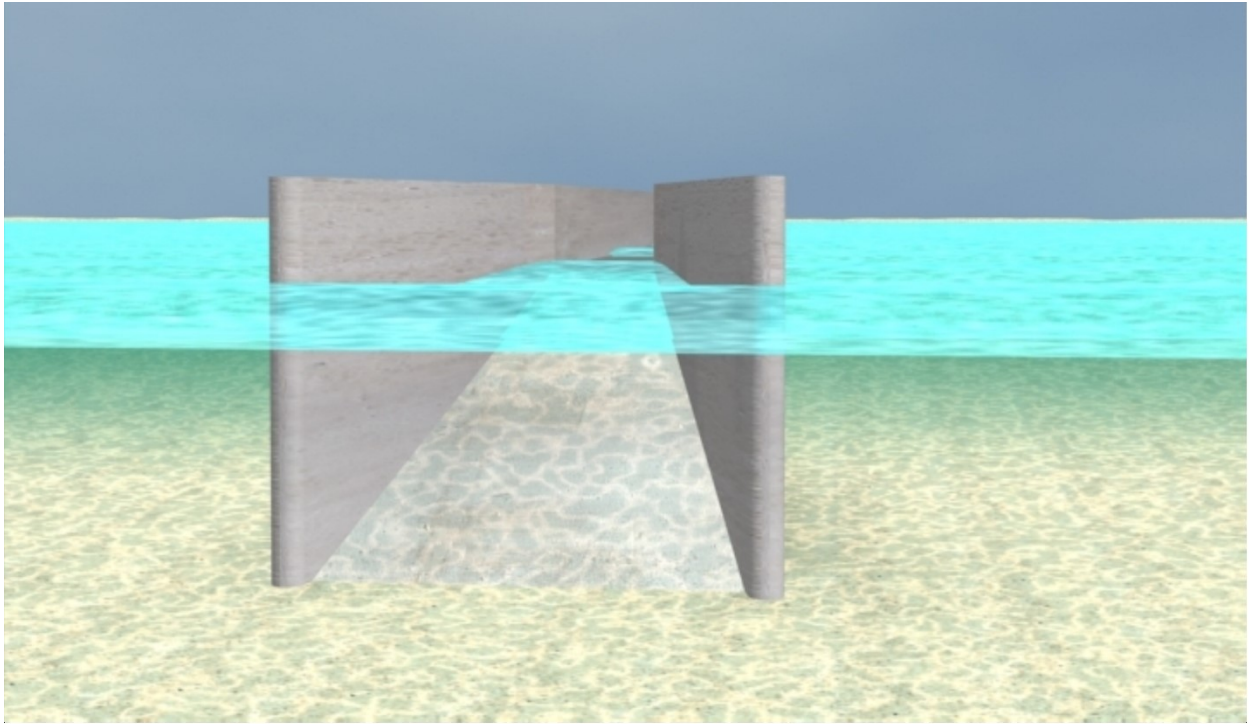


Figura 4: Esquema de un amplificador de oleaje con fondo inclinado. Fuente: Dr. Martín Merino Ibarra.

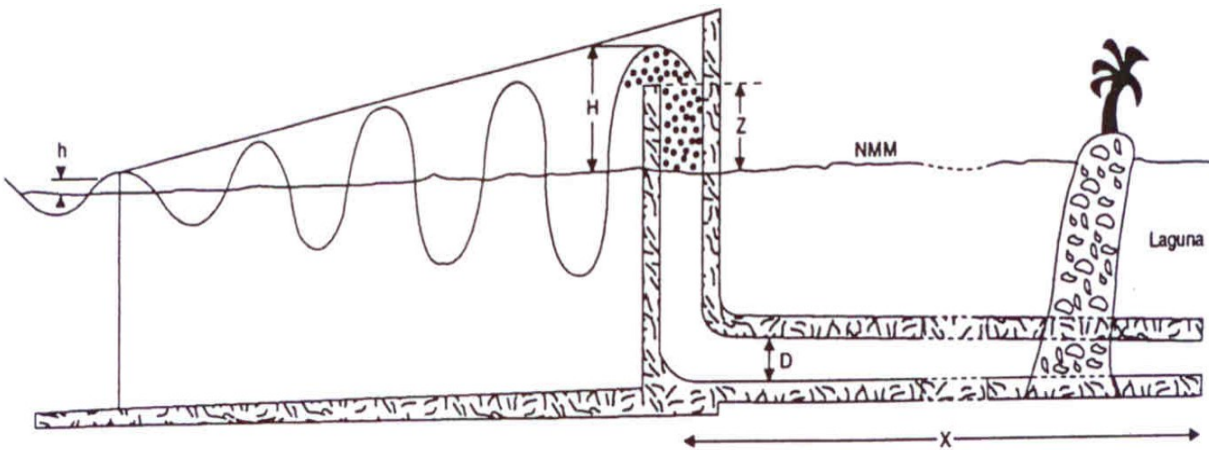


Figura 5: Esquema de REALCO con amplificador en el agua y tubería sumergida de comunicación con la laguna. Fuente: Ruiz et al (1994, 1995).



Figura 6: Esquema del REALCO con amplificador en la costa y canal de comunicación con la laguna. Fuente: Dr. Martín Merino Ibarra.

4.3.4.1. Amplificador de olas.

El amplificador se basa en la aplicación de las ecuaciones de onda para un canal de longitud finita menor a la longitud de onda, lo que corresponde a ondas largas. En este caso, se consideran las ecuaciones para un canal con paredes convergentes y fondo constante y un canal con paredes convergentes y fondo con pendiente hacia la convergencia de las paredes, que simula una pirámide cuadrangular en posición horizontal. (Ver figura 7)

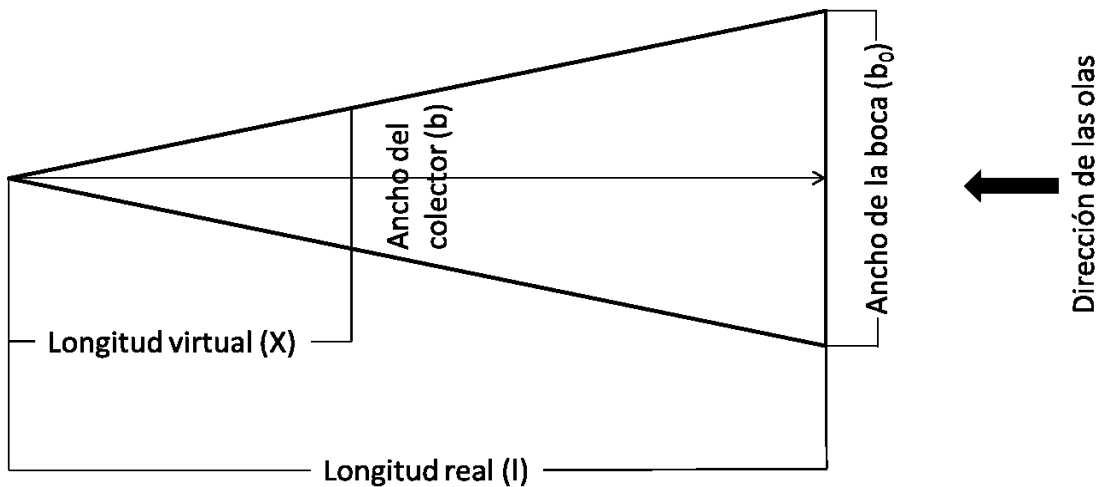


Figura 7: Diseño conceptual del canal con paredes convergentes. Fuente: Elaborada por el autor.

Se parte de la ecuación de continuidad aplicada a la entrada de un canal donde el eje horizontal parte del vértice.

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} = \frac{g}{b} \frac{d}{dx} \left[bh \frac{d\eta}{dx} \right] \quad (4.9)$$

En el primer caso, con fondo contante, se supone que el ancho del sistema varía con respecto a la distancia desde $x = 0$ hasta $x = l$ mientras que la profundidad permanece constante; de manera que:

$$h = h_0 \quad b = b_0 \left(\frac{x}{l} \right)$$

donde h_0 es la profundidad en la boca del sistema y b_0 es el ancho en la boca del sistema.

Por lo que la ecuación de la onda puede escribirse como:

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} = gh_0 \left[\frac{d^2\eta}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\eta}{dx} \right] \quad (4.10)$$

Si se considera la ecuación de un armónico simple de onda larga (marea) y se sustituye en la ecuación anterior, luego de desarrollar las operaciones correspondientes, la ecuación de continuidad quedaría como:

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\eta}{dx} + \varepsilon^2 \eta = 0 \quad (4.11)$$

$$\text{con} \quad \varepsilon^2 = \omega^2 \left(\frac{1}{g h_0} \right) \quad \text{y} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Luego de resolver las condiciones de frontera para $x = 0$ y $x = l$; la ecuación del desplazamiento de la superficie libre dentro del sistema puede ser evaluada a través de la función:

$$\eta = A_i \frac{J_0(\varepsilon X)}{J_0(\varepsilon l)} \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.12)$$

En el segundo caso, donde la profundidad y el ancho del sistema varían con respecto a la distancia desde $x = 0$ hasta $x = l$; de manera que:

$$h = h_0 \left(\frac{x}{l} \right) \quad b = b_0 \left(\frac{x}{l} \right)$$

Igualmente, la ecuación de la onda puede escribirse como:

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} = \frac{gh_0}{l} \left[x^2 \frac{d^2\eta}{dx^2} + 2x \frac{d\eta}{dx} \right] \quad (4.13)$$

Si se considera la ecuación de un armónico simple de onda larga (marea) y se sustituye en la ecuación anterior, luego de desarrollar las operaciones correspondientes, la ecuación de continuidad quedaría como:

$$\frac{d^2\eta}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d\eta}{dx} + \frac{\varepsilon^2}{x} \eta = 0 \quad (4.14)$$

con $\varepsilon^2 = \omega^2 \left(\frac{l}{g h_0} \right)$ y $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Luego de resolver las condiciones de frontera para $x = 0$ y $x = l$; la ecuación del desplazamiento de la superficie libre dentro del sistema puede ser evaluada a través de la función:

$$\eta = A_i \frac{J_1(2\varepsilon(lX)^{1/2})}{J_1(2\varepsilon l/\pi)} \left[\left(\frac{l}{X} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.15)$$

Para calcular el flujo que rebasa el francobordo en cada intervalo de tiempo se utiliza el desplazamiento de la superficie libre dentro del sistema, cuyas fórmulas se expresaron anteriormente, así como la altura del francobordo y el ancho del mismo.

El flujo sería el resultado de la multiplicación de la velocidad de la ola dentro del sistema por el área que resulta de las dimensiones del francobordo (alto y ancho) y el desplazamiento de la superficie libre.

El área se calcula mediante la fórmula:

$$A = b_f(\eta - F)$$

La velocidad de la ola dentro del amplificador se calcula por la ecuación:

$$c_p = \eta \left[\frac{g}{h_0} \right]^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right)$$

En función de las ecuaciones de la superficie libre dentro del sistema, el área y la velocidad de las partículas, descritas anteriormente; el caudal que entra a través del amplificador se puede calcular por la ecuación:

$$C = \frac{2b_f\eta}{T} \left[\frac{g}{h_0} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\eta \left[\frac{\left(t_1 + \frac{T}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) \right)}{2} \right] - \frac{TF}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t_1\right) \right] \quad (4.16)$$

Donde t_1 es el tiempo donde la ola alcanza la altura del francobordo y se calcula con:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \operatorname{acos}\left(\frac{2 * F}{\eta}\right)$$

4.3.4. Dimensiones del amplificador.

A partir de las ecuaciones anteriores, que involucran los datos de las olas, la profundidad inicial en el amplificador y las dimensiones del amplificador; se calcularon diferentes combinaciones de las dimensiones del amplificador para los datos de olas que se utilizaron en el análisis.

Para ello se mantuvo constante los datos de las olas (altura y período) y la profundidad inicial en el amplificador, y se modificaron en cada corrida el ancho en la boca del amplificador y el ángulo de apertura de las paredes; de manera que el cálculo arrojará el ancho del francobordo y la distancia al francobordo óptimas para diferentes combinaciones de ancho de la boca del amplificador y ángulo de las paredes.

En un primer momento se analizaron 64 combinaciones de ancho del amplificador y ángulo de apertura de las paredes, con el fin de determinar la influencia de la longitud de las paredes, y con ello la inclinación de la rampa, sobre el funcionamiento del sistema. Estos cálculos se hicieron para altura y período de ola medios. Los valores de ancho del amplificador utilizados fueron 3; 4; 5 y 6 metros mientras que los valores de ángulo de apertura de las paredes fueron 20°; 45°; 60°; 70° y 85°.

En un segundo momento se analizaron un total de 96 variantes de dimensiones del amplificador, las que incluyeron altura y período de ola pico, media, rms y menores a 0.1 m; ancho del amplificador de 3; 4; 5 y 6 metros y ángulo de apertura de las paredes de 45°; 50°; 55°; 60°; 65° y 70°; pudiéndose obtener diferentes variantes de dimensiones del amplificador para los datos de olas y profundidad inicial que se manejan en este trabajo.

Los valores de los ángulos de apertura de las paredes se seleccionaron en base a los resultados obtenidos por Alatorre (2003).

4.3.5. Corrección de los datos: Superficie libre y caudal.

Para el cálculo de la superficie libre se consideró como condición que el máximo valor de superficie libre se alcanza aplicando la fórmula de continuidad (Ecuación 4.10), por lo que aquellos valores de superficie libre calculados a partir de la ecuación 4.11, que fueran superiores a los calculados por la ecuación de continuidad, serían sustituidos por estos últimos.

En función de eso, el caudal se calculó para los valores de superficie libre correspondientes a cada valor de altura, período de ola y nivel del mar que le correspondería según su fecha y hora de medición del dato de ola (y que se determinó como se explicó en el apartado 4.2.2 de este capítulo).

Para el caso de los valores de caudal, se estableció como valor máximo el correspondiente a la máxima altura de ola medida con el ológrafo, que resultó ser de 1.52 m, con período de 3.62 s y profundidad inicial calculada a partir del dato de marea correspondiente a la fecha de muestreo de ese dato de ola. El máximo valor de caudal que se estableció fue de 19.54 m³/s, por lo que todo aquel dato superior a este es producto del no ajuste de la fórmula a las variables involucradas en la misma (altura y periodo de ola, profundidad inicial y dimensiones del amplificador).

Para todos los cálculos involucrados en esta tesis se emplearon las funciones y potencialidades del MATLAB, en su versión 2013a.

RESULTADOS.

5.1. Condiciones Climáticas:

5.1.1. Presión atmosférica.

Los datos de presión atmosférica indican oscilaciones de los valores medios horarios entre 1 011.40 hPa, en el mes de Octubre a las 16:00 horas, y 1 022.30 hPa, en el mes de Enero a las 10:00 horas. No se observa una variabilidad marcada en los datos de presión aunque si hay una ligera disminución de los valores entre los meses de abril a noviembre, coincidente con la temporada de verano en Cuba. El valor medio anual de presión atmosférica es de 1 016.38 hPa.

Los valores modales medios oscilan entre 1 009.40 hPa, en el mes de octubre a las 4:00 horas, y 1 033.80 hPa, en el mes de enero a las 13:00 horas. Igual que los valores medios, no se observan diferencias marcadas en los datos modales aunque si una disminución de los mismos en la temporada de verano. El valor modal medio de la presión atmosférica es de 1 014.70 hPa. (Ver tabla 2)

5.1.2. Vientos.

Los datos de dirección del viento se muestran en la figura 8. En la misma se puede apreciar que la mayoría de los datos se concentran entre los 0° (viento en calma) y los 135°. En los meses de invierno, entre noviembre y marzo, la dirección del viento cambia con mucha frecuencia provocado por la ocurrencia de frentes fríos que provocan vientos del Sur, antes de su llegada, hasta vientos del Este una vez que pasó el frente frío, aunque los vientos predominantes en esta época del año son de dirección Norte. En los meses de verano, entre abril y octubre, la presencia del anticiclón genera vientos alisios que mayormente son de dirección Este-Nordeste, lo que se evidencia en la figura como una menor variación en los datos de dirección del viento.

Los datos de vientos analizados muestran una estadística horaria, mensual y anual como se muestra en la tabla 3 que a continuación se presentan.

Los valores medios mensuales de dirección del viento tienen un máximo de 105° en el mes de Noviembre y un mínimo de 68° en el mes de septiembre. La dirección media anual del viento es de 77.88°, mientras que la dirección modal del viento es de 90°, lo que provoca un viento anual con una dirección casi constante del Este. Se registran valores de viento en dirección Norte y Norte-Nordeste, debida a la influencia de los frentes fríos en la temporada invernal. Los valores modales de dirección del viento oscilan entre 0° y 90° aunque el que predomina es 70°, por lo que el viento más frecuente se percibe desde esta dirección, correspondiendo con el Este-Nordeste.

Además, el 19% (563) de los datos de viento tienen una dirección menor a 35°, de ellos el 12% (367) coinciden con viento de dirección 0° o en calma total; el 19% (567) de los datos de viento tienen una dirección mayor a 105°, de ellos el 2% (50) coincide con viento de dirección 360° o viento del Norte. Esto conlleva que el 62% de los datos de viento, correspondiente al 62% de los días del año, el viento tenga una dirección entre 35° y 105°.

Del análisis de la tabla 3 se entiende que los meses de junio, agosto, septiembre y octubre son los más propensos para que el sistema no funcione, pues en estos meses la moda de la dirección del viento es 0° , lo que indica viento en calma. El resto de los meses de año tienen una moda que están dentro del rango de incidencia óptimo para el sistema. Además, dentro de las horas del día, las horas de la madrugada y la mañana son las menos idóneas para el funcionamiento del amplificador, pues en ellas es cuando se presentan la mayor cantidad de ángulos de incidencia que dificultan el funcionamiento del REALCO (entre 0° y 35° de incidencia sobre el amplificador).

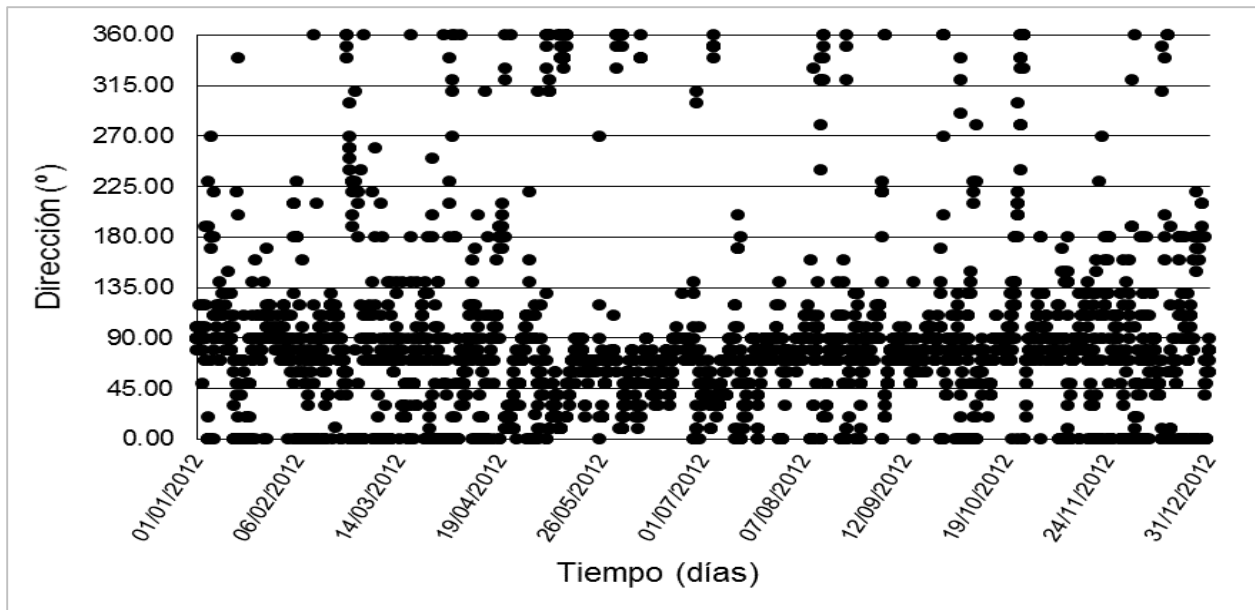


Figura 8: Serie de datos de la dirección del viento. Fuente: Elaborada por el autor.

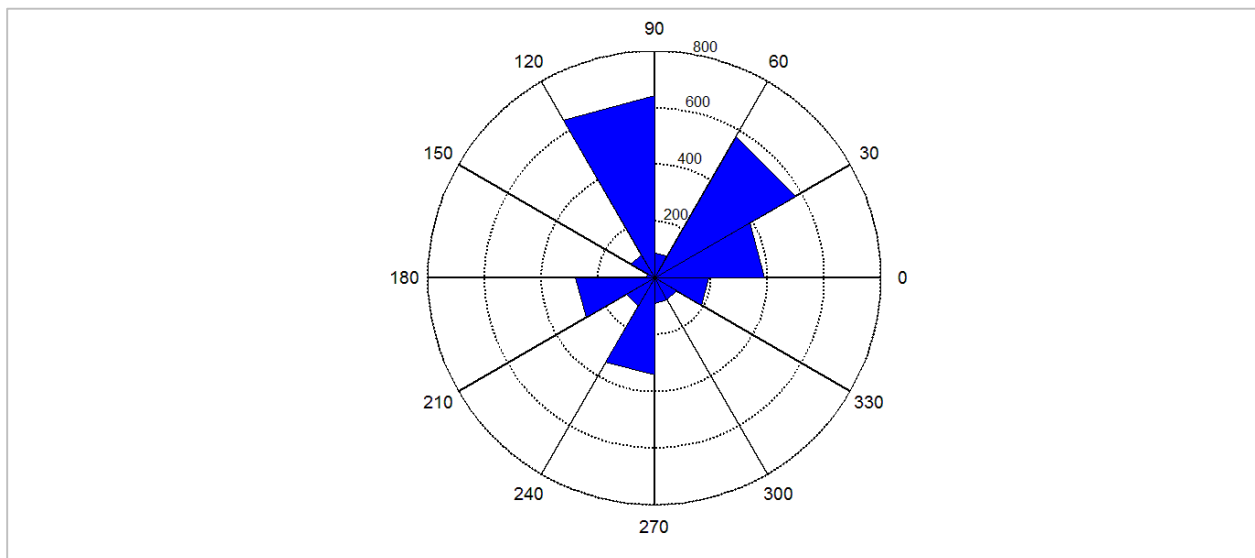


Figura 9: Rosa de los datos de dirección del viento. Fuente: Elaborada por el autor.

En cuanto a la incidencia de fenómenos meteorológicos extremos (huracanes), aun cuando los últimos 17 años han sido activos, con el paso de tres huracanes por el área de estudio; de forma general la zona no es muy afectada por estos eventos meteorológicos. La trayectoria más probable de ocurrencia de dichos fenómenos es en dirección Este-Oeste generalmente, aunque se pueden presentar también en dirección Sur-Norte, o una combinación de esas componentes. En todos los casos, y en cualquiera de las direcciones probables de ocurrencia; el sistema se vería afectado por el fenómeno, dada la naturaleza ciclónica o giratoria de los mismos.

Además, aun cuando no afecten directamente el área, el paso de estos por el Norte o Canal Viejo de las Bahamas provoca trenes de olas con características que pueden llegar a ser importantes para el REALCO. Por ello es de vital importancia la observación y toma de medidas a tiempo para evitar daños, tanto al sistema como a la laguna, si llegase a verse afectado por un fenómeno meteorológico extremo.

Tabla 2: Media y Moda de los valores de presión atmosférica (hPa) cada tres horas.

Meses	Estadígrafo	Horas del día								Mensual
		1:00	4:00	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	
Enero/2012	Media	1 020.51	1 019.41	1 020.43	1 022.30	1 020.50	1 019.43	1 020.22	1 021.14	1 020.49
	Moda	1 020.70	1 018.70	1 021.40	1 021.70	1 022.80	1 020.30	1 018.90	1 022.10	1 020.00
Febrero/2012	Media	1 018.80	1 017.70	1 018.71	1 020.13	1 018.95	1 017.42	1 017.94	1 019.17	1 018.61
	Moda	1 016.70	1 018.70	1 016.50	1 018.40	1 016.70	1 016.60	1 019.70	1 020.00	1 016.70
Marzo/2012	Media	1 018.78	1 017.66	1 018.81	1 020.36	1 019.35	1 017.64	1 018.13	1 019.31	1 018.76
	Moda	1 017.10	1 016.30	1 016.80	1 021.50	1 020.70	1 017.50	1 017.40	1 018.50	1 017.70
Abril/2012	Media	1 015.76	1 014.85	1 016.03	1 017.18	1 016.21	1 014.72	1 015.45	1 016.70	1 015.86
	Moda	1 014.20	1 015.70	1 013.70	1 017.00	1 015.60	1 016.30	1 016.00	1 019.20	1 017.00
Mayo/2012	Media	1 015.08	1 014.26	1 015.30	1 016.24	1 015.45	1 014.32	1 014.97	1 015.96	1 015.21
	Moda	1 015.00	1 014.20	1 016.20	1 015.30	1 015.50	1 014.00	1 013.50	1 015.30	1 015.70
Junio/2012	Media	1 015.36	1 014.56	1 015.58	1 016.37	1 015.65	1 014.72	1 015.33	1 016.17	1 015.48
	Moda	1 014.00	1 013.70	1 014.70	1 016.80	1 015.70	1 016.60	1 014.70	1 015.00	1 015.00
Julio/2011	Media	1 015.68	1 014.86	1 015.61	1 016.40	1 015.98	1 014.81	1 015.41	1 016.45	1 015.65
	Moda	1 016.10	1 014.20	1 014.10	1 016.20	1 016.20	1 014.30	1 015.80	1 016.30	1 015.40
Agosto/2011	Media	1 014.08	1 013.10	1 013.90	1 014.91	1 014.37	1 013.05	1 013.80	1 014.91	1 014.02
	Moda	1 014.70	1 014.40	1 014.00	1 016.60	1 014.70	1 012.70	1 015.30	1 015.70	1 014.10
Septiembre/2011	Media	1 014.52	1 013.51	1 014.50	1 015.63	1 014.46	1 013.02	1 014.02	1 015.22	1 014.36
	Moda	1 015.00	1 015.00	1 014.70	1 015.40	1 014.50	1 013.30	1 014.40	1 015.70	1 013.70
Octubre/2011	Media	1 012.91	1 011.97	1 013.09	1 014.34	1 012.88	1 011.74	1 012.87	1 013.99	1 012.98
	Moda	1 013.00	1 009.40	1 010.90	1 014.20	1 012.30	1 012.70	1 012.00	1 015.80	1 013.60
Noviembre/2011	Media	1 016.35	1 015.58	1 016.49	1 017.97	1 016.30	1 015.37	1 016.20	1 017.10	1 016.50
	Moda	1 014.80	1 013.80	1 016.90	1 015.90	1 017.90	1 014.80	1 014.80	1 019.80	1 014.70
Diciembre/2011	Media	1 018.78	1 017.82	1 018.72	1 020.38	1 018.75	1 017.69	1 018.55	1 019.70	1 018.81
	Moda	1 016.70	1 015.70	1 017.00	1 020.40	1 016.70	1 017.80	1 018.50	1 020.60	1 019.60
Anual	Media	1 016.39	1 015.44	1 016.43	1 017.68	1 016.57	1 015.33	1 016.07	1 017.15	1 016.38
	Moda	1 016.70	1 018.70	1 014.70	N/A*	1 016.70	1 016.60	N/A*	1 015.70	1 014.70

*: No es posible determinar la moda porque no hay un valor que predomine entre los datos. Fuente: Elaborada por el autor.

Tabla 3: Media y Moda de la dirección del viento (grados respecto al Norte) cada tres horas.

Meses	Estadígrafo	Horas del día								Mensual
		1:00	4:00	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00	22:00	
Enero/2012	Media	67.42	70.65	60.97	87.74	72.90	70.97	77.42	75.81	72.98
	Moda	70	70	70	70	80	70	70	70	70
Febrero/2012	Media	85.17	81.38	65.86	114.14	115.17	93.10	84.48	83.10	90.30
	Moda	90	70	0	90	90	90	90	90	90
Marzo/2012	Media	88.06	81.61	81.94	97.10	83.00	87.10	91.29	96.77	88.36
	Moda	70	70	90	90	90	90	70	90	90
Abril/2012	Media	94.33	84.00	80.33	122.00	109.67	106.67	103.33	106.00	100.79
	Moda	0	0	90	90	90	80	90	90	90
Mayo/2012	Media	84.52	72.26	70.00	99.68	90.65	77.42	74.19	73.23	80.24
	Moda	90	0	0	90	70	70	90	90	90
Junio/2012	Media	53.33	52.33	56.67	110.33	102.33	132.00	86.00	63.33	82.04
	Moda	0	0	0	180	70	80	90	0	0
Julio/2011	Media	83.23	71.61	71.94	105.81	77.42	86.13	87.42	72.26	81.98
	Moda	90	0	0	90	90	90	90	90	90
Agosto/2011	Media	72.58	61.29	71.32	110.32	123.55	93.23	99.35	71.29	87.87
	Moda	0	0	0	90	90	90	90	0	0
Septiembre/2011	Media	51.33	38.33	39.67	113.00	93.33	72.33	78.33	60.67	68.38
	Moda	0	0	0	90	70	70	70	0	0
Octubre/2011	Media	66.13	51.94	59.35	112.26	86.77	108.06	89.03	62.97	79.56
	Moda	0	0	0	90	90	90	90	0	0
Noviembre/2011	Media	96.00	95.33	90.33	97.33	131.00	110.67	101.33	115.33	104.67
	Moda	70	70	70	70	70	60	70	70	70
Diciembre/2011	Media	80.97	81.94	74.52	72.90	82.58	59.68	60.65	57.74	71.37
	Moda	50	50	70	70	70	90	70	70	70
Anual	Media	70.18	63.39	62.36	97.48	90.48	86.47	81.02	73.40	77.58
	Moda	0	0	0	90	90	90	90	90	90

Fuente: Elaborada por el autor.

5.2. Olas.

Durante las mediciones se pudieron obtener con un total de 13 438 datos de altura de ola significativa (H_s), altura de ola máxima (H_m) y período de ola significativa (T_s). Los mismos fueron procesados y filtrados para eliminar aquellos datos de olas que rompen antes de llegar a la entrada de la estructura, pues si la ola rompe transforma su perfil y no coincide con el medido en el equipo. Los datos de altura y período olas medidos con el ológrafo se muestran en las figuras 10 y 11.

Una vez filtrados los datos, se procedió a caracterizar el régimen de olas existente en el área de estudio. Las características de la estadística descriptiva de los tres parámetros se exponen en la tabla 4.

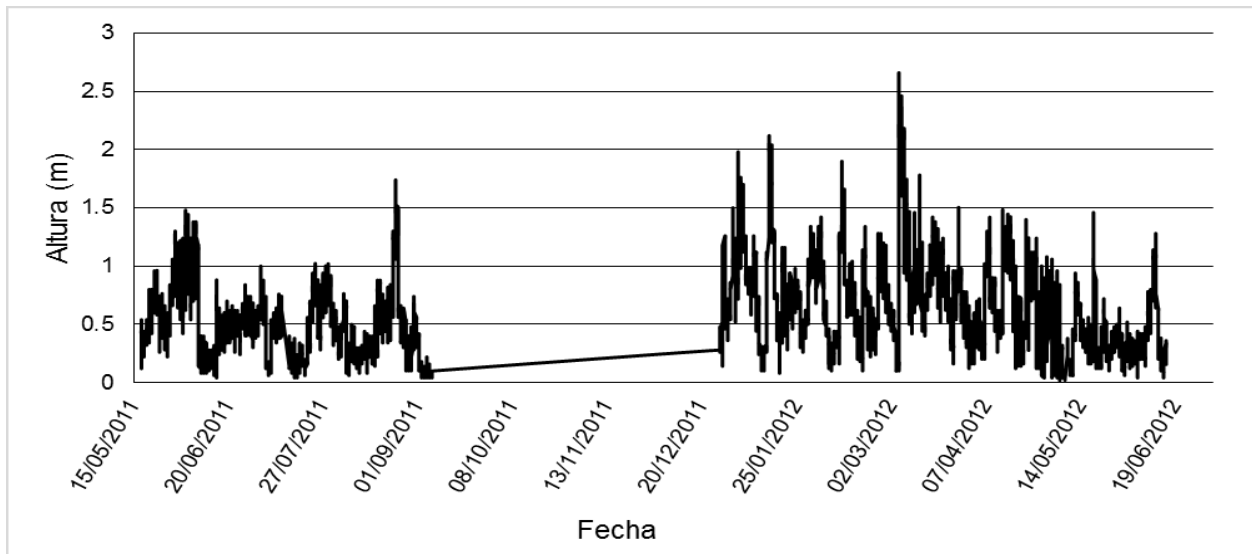


Figura 10: Distribución de la serie de datos de altura de ola significativa medidos en el ológrafo. Fuente: Elaborada por el autor.

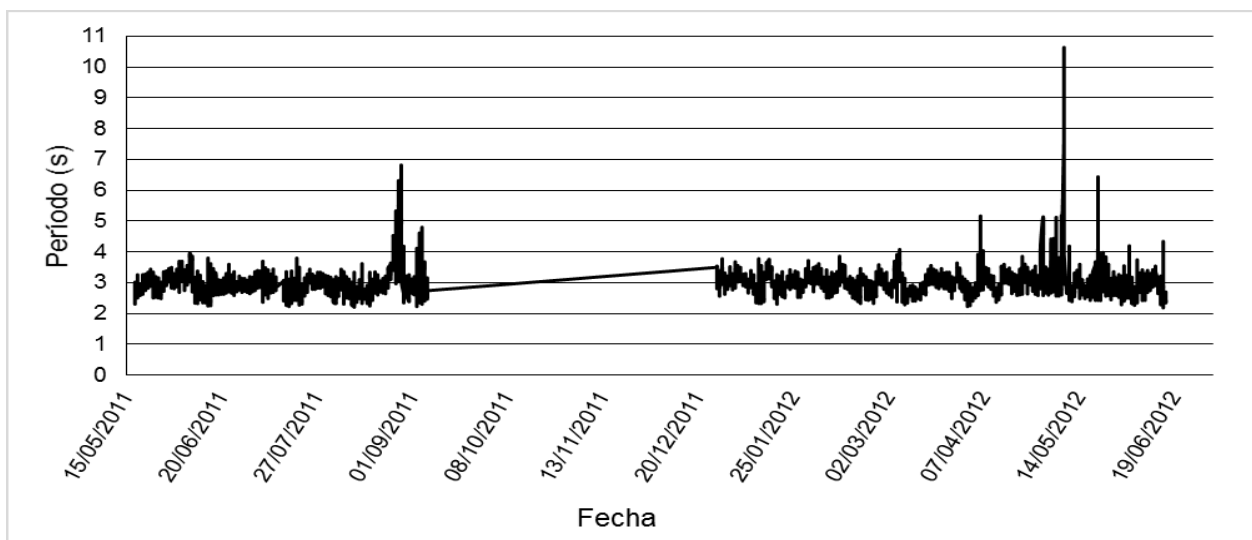


Figura 11: Distribución de la serie de datos de período de ola significativa medidos en el ológrafo. Fuente: Elaborada por el autor.

Tabla 4: Estadística descriptiva de los datos de altura de ola significativa (H_s), altura de ola máxima (H_m) y período de ola (T_s), medidos con el ológrafo.

Estadígrafos	H_s (m)	H_m (m)	T_s (s)
Media	0.540	0.826	2.976
Mediana	0.500	0.775	2.960
Moda	0.540	0.825	3.020
Desviación estándar	0.313	0.475	0.352
Varianza de la muestra	0.098	0.225	0.124
Mínimo	0.020	0.025	2.180
Máximo	1.520	2.275	6.920
Cuenta	12 971	12 971	12 971

Fuente: Elaborada por el autor.

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores promedios de H_s son del orden de los 0.540 metros y su período correspondiente del orden de los 2.976 segundos, aunque los valores extremos tienen un amplio rango. Llama la atención los valores extremos de altura máxima, llegando a 2.275 metros en algunos momentos del año, aunque los valores mayores de altura significativa están en el orden de los 1.52 metros.

Analizando la información de la tabla 5, la mitad de los datos de olas muestreados (estadígrafo 1/2) poseen altura media de 0.797 metros, lo que es positivo para el funcionamiento del sistema, aunque sus períodos relacionados están por el orden de los 3.046 segundos, lo que contrarresta un poco la eficiencia del mismo.

Tabla 5: Estadígrafos oceanográficos relacionados con los datos de olas medidos con el ológrafo.

Estadígrafo	Altura (m)	Período (s)
Pico	0.551	2.929
Media	0.540	2.976
1/2	0,797	3,046
1/3	0,908	3,104
Máxima	1.520	3.620

Fuente: Elaborada por el autor.

Estos datos de olas fueron propagados hacia la línea de costa, al punto donde comienza la boca del REALCO, mediante el empleo del Modelo *WAPO*, el cual arrojó resultados que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 6: Datos de altura de ola significativa medida con el Ológrafo (HsM) y calculada con el Modelo WAPO (HsW), así como período correspondiente (Ts).

No	Tipo	HsM (m)	HsW (m)	T (s)
1	Pico	0.551	0.610	2.929
2	Media	0.540	0.607	2.976
3	1/2	0.797	0.964	3.046
4	1/3	0.908	1.192	3.104

Fuente: Elaborada por el autor.

Todas las modelaciones fueron realizadas con un ángulo de incidencia de 77 grados respecto al Norte, simulando lo más posible el ángulo medio anual de incidencia de los vientos, y por ende de las olas. Los resultados de dichas modelaciones se muestran en la siguiente figura.

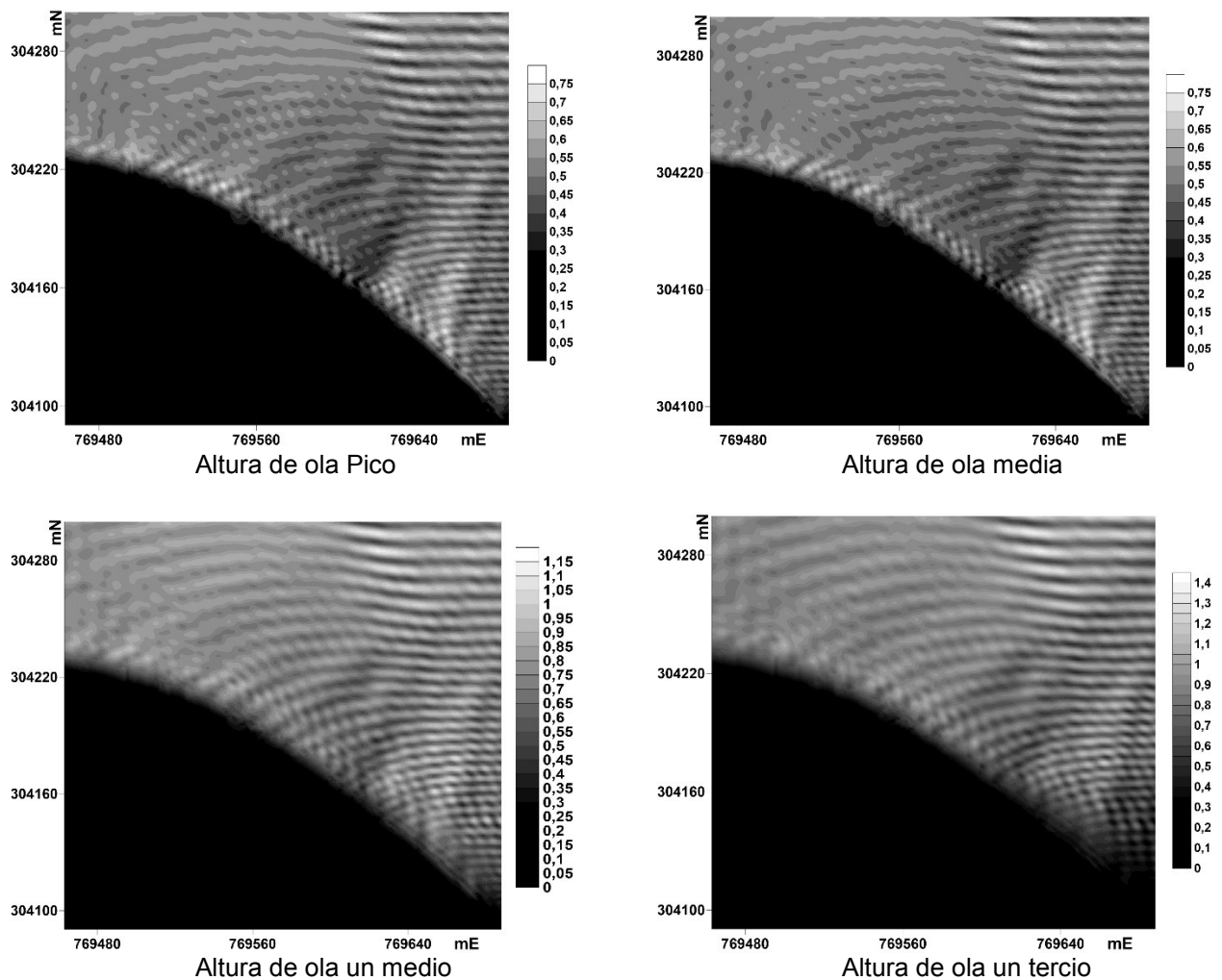


Figura 12: Resultados de la modelación con el WAPO para diferentes estadígrafos de olas utilizados. Fuente: Elaborada por el autor.

En relación con los datos mínimos de las olas, se encontró que 751 (5.8 %) datos de altura de ola significativa son menores o iguales que 0.1 metros; presentándose 714 (5.5 %) en los meses de verano (entre abril y septiembre) y 37 (0.3 %) en los meses de invierno (entre octubre y marzo). Además, hay 2 173 (16.8 %) datos de altura de ola significativa que son menores o iguales que 0.2 metros, dentro de los cuales están incluidos los menores o iguales que 0.1 metros. De estos datos menores o iguales que 0.2 metros, 1 916 (14.8 %) son en los meses de verano (entre mayo y septiembre) mientras que 257 (2.0 %) son en los meses de invierno (entre octubre y marzo).

En el caso de los meses de verano, los datos de olas mínimos se presentan mayormente en las primeras horas de la mañana, mientras que en el caso de los meses de invierno los datos se presentan en los momentos en que el viento sopla del sur, coincidiendo con las horas entre el paso de dos frentes fríos.

El hecho que el área de estudio esté en una zona protegida por el Banco de las Bahamas provoca que el período de las olas sea pequeño, comparado con otros sitios de Cuba donde se registran mayores períodos de ola. El área donde se colocará el REALCO presenta un fetch que no favorece la formación de olas con grandes períodos, ya que los vientos del Este-Nordeste solo actúan sobre un fetch máximo de 45 kilómetros mientras que los vientos del Norte actúan sobre un fetch máximo de 30 kilómetros. El resto de las direcciones de los vientos poseen fetch inferiores a estos. Además, la presencia del banco de las Bahamas provoca que el área de estudio no se vea afectada por el oleaje que se genera en el Atlántico, por lo que no arriban olas con características oceánicas (ver figura 13)



Figura 13: Ubicación del sitio del REALCO respecto a los cayos y bajos adyacentes.

Fuente: Google earth.

5.3. Mareas.

Se cuentan con 423 619 datos de nivel en el mar, cuya distribución por años y meses se muestra en la tabla 7.

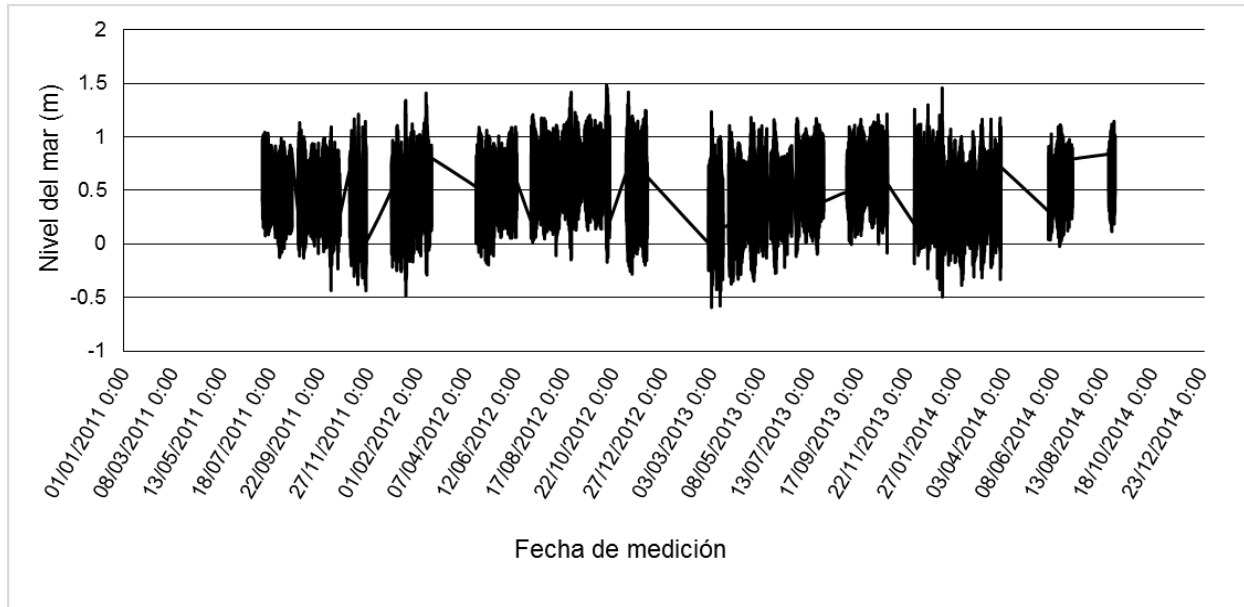


Figura 14: Valores de la serie de datos de nivel del mar medidos. Fuente: Elaborada por el autor.

A simple vista la figura 14 muestra que en varios meses del año se alcanzan mareas vivas de igual amplitud, lo que también ocurre con las mareas muertas. De igual forma, en los meses de agosto a diciembre se observa que la media del nivel del mar tiende a ser mayor que el resto del año, aunque no se puede observar una tendencia o patrón bien definido.

El análisis de las mareas, así como la descomposición de los datos en los constituyentes principales arrojó los siguientes resultados: la principal componente de las mareas es la Principal lunar semidiurna, con una amplitud de 0.29 metros y una fase de 130.63 grados. Esta componente explica el 60 % de las variaciones del nivel del agua en el mar. Le sigue en importancia la componente Larga lunar elíptica y Principal solar diurna, que explican el 15 % de los datos del nivel del agua en el mar, cada una. (Tabla 8)

El total de los datos medidos no permite el cálculo de la componente Solar anual de la marea, por lo que se deberá obtener más datos para poder calcular los parámetros de dicha componente.

A partir de los datos de las mareas se calculó la posición de la marea para los datos de olas medidos. El cálculo muestra que los máximos absolutos de marea se alcanzan en el mes de julio, con 0.623 m sobre el nivel medio del mar; mientras que los mínimos absolutos de marea se alcanzan en el mes de mayo, con -0.573 m bajo el nivel medio

del mar. La mayor amplitud de marea viva se registra entre los meses de agosto y septiembre; mientras que la menor amplitud de marea muerta se registra en varios momentos del año. (Ver figura 15)

Tabla 7: Distribución de los datos de nivel del agua medidos en el mar.

Mes	Años			Total
	2011	2012	2013	
Enero		22 320	0	22 320
Febrero		13 505	1 755	15 260
Marzo		0	17 140	17 140
Abril		8 324	21 586	29 910
Mayo		22 320	11 304	33 624
Junio		9 039	21 600	30 639
Julio	18 720	21 221	22 320	62 261
Agosto	16 578	21 783	16 627	54 988
Septiembre	21 600	21 600	21 600	64 800
Octubre	13 265	11 265	17 847	42 377
Noviembre	16 233	16 915	1 021	34 169
Diciembre	3 249	3 954	8 928	16 131
Total	89 645	172 246	161 728	423 619

Fuente: Elaborada por el autor.

Tabla 8: Constituyentes principales de las mareas en el sensor Mar.

Símbolo	Nombre	Período	Amplitud	Fase	Por ciento
		días	m	grados	
M2	Principal lunar semidiurna	0.52	0.29	130.63	60
O1	Principal lunar diurna	1.07	0.01	34.38	2
P1	Principal solar diurna	1.00	0.01	263.56	2
K1	Luni-Solar diurna	0.99	0.02	269.29	4
N2	Larga lunar elíptica	0.52	0.07	-40.11	15
S2	Principal solar semidiurna	0.50	0.07	-136.36	15
K2	Luni-Solar semidiurna	0.49	0.01	184.50	2
Suma			0.48		
Mf	Lunar quincenal	14.76	0.01	-55.00	
Mm	Lunar mensual	27.55	0.01	319.71	
Ssa	Solar semianual	182.62	0.03	160.43	

Fuente: Elaborada por el autor.

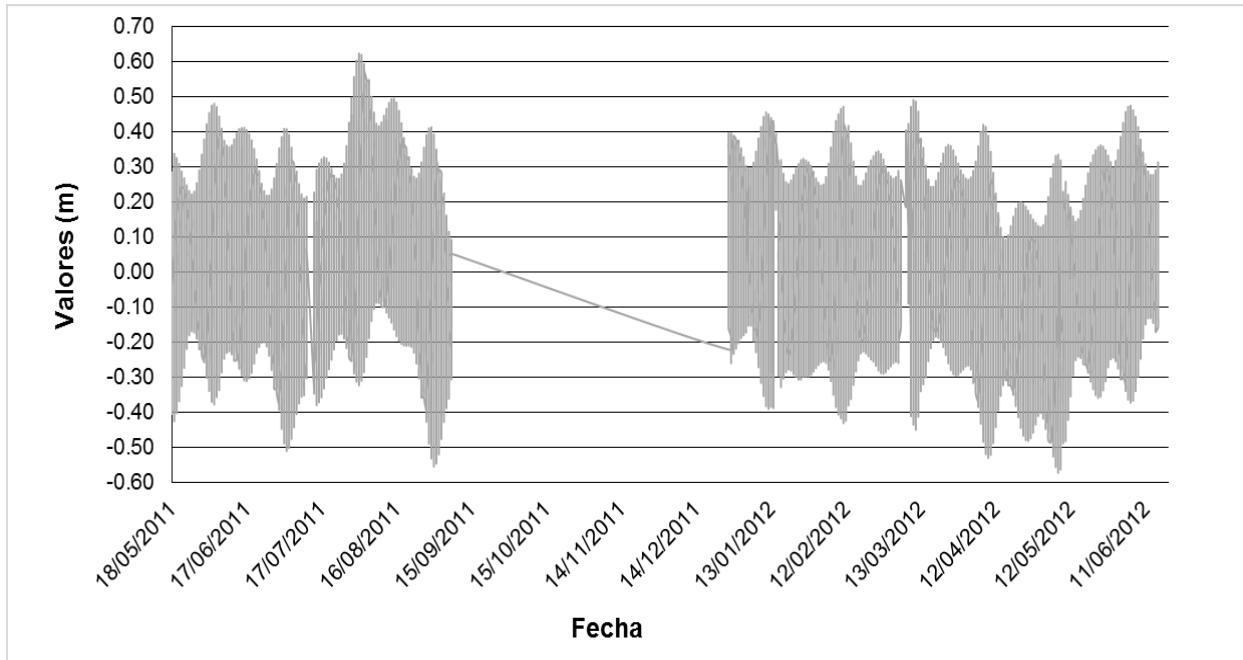


Figura 15: Serie de marea para el período de tiempo de medición de datos de olas.
Fuente: Elaborada por el autor.

5.4. REALCO.

5.4.1. Dimensiones y orientación del Amplificador.

A partir de los datos de olas y las fórmulas del amplificador con rampa (Capítulo 4, Sección 4.4.3) se determinaron las dimensiones que debe presentar el amplificador para lograr la máxima eficiencia con las características de batimetría y oleaje presentes en el área de estudio.

Las siguientes gráficas y tablas muestran los resultados de los análisis de varias combinaciones de ancho del amplificador, ángulo de apertura de las paredes y altura y período de ola incidente.

Los valores de los ángulos de apertura de las paredes se determinaron en función de los análisis realizados en Alatorre (2003), donde se demuestra que, para un ángulo de 45° , se alcanza un máximo de ganancia en el amplificador. El extremo de 70° se escogió en función de las características del viento en la zona de estudio, a fin de lograr que la incidencia de las olas estuviera entre 0° y 35° , respecto al eje central del amplificador; incidencia para la cual Alatorre (2003) demuestra que el sistema es más eficiente.

Aunque los cálculos se realizaron para ángulos entre 5° y 85° , con un incremento de 5° ; solo se muestran los resultados y el análisis de aquellas combinaciones que incluían los valores extremos encontrados por Alatorre (2003).

Para valores de ángulo de apertura de las paredes menores a 45° , las dimensiones del sistema, entendidas como longitud de las paredes y ángulo de inclinación de la rampa; no son propicias para el sitio donde se emplazará el mismo; pues, para estos valores de

ángulo, el sistema se hace muy grande para la distancia efectiva de emplazamiento desde la línea de costa, teniendo en cuenta que la zona es de interés turístico y el área de emplazamiento está restringida por una zona de vegetación y de uso turístico. Por otra parte, los resultados de ángulo de inclinación de la rampa para valores de ángulo de apertura menores a 45° caen dentro del rango de ineficiente, según Alatorre (2003). Por estas razones no se incluyen gráficas de esos resultados.

En un primer análisis se determinó la superficie libre y el caudal en función de los parámetros estructurales como ancho del amplificador, ángulo de apertura de las paredes y longitud de las paredes; para el caso de un amplificador sin rampa. Las siguientes cuatro gráficas muestran los resultados de los cálculos de superficie libre para diferentes anchos y ángulos de apertura de las paredes.

Como se puede observar en la siguiente gráfica (figura 16), el sistema sin rampa no es eficiente para los anchos y ángulos relacionados, pues para 3; 4 y 5 metros de ancho no es capaz de amplificar la ola, mientras que para 6 metros el sistema entra en resonancia debido a las variables involucradas en la fórmula. Esto provoca que el sistema sea ineficiente para las dimensiones y ángulos relacionados en la figura.

La figura 17 muestra un sistema eficiente para un ancho de 3 metros en la boca del amplificador pero ineficiente para el resto de los anchos analizados, lo que se evidencia en que solo la curva de 3 metros muestra una tendencia ascendente, mientras que las demás curvas toman valores inferiores al inicial, por lo que no amplifican la ola para estas combinaciones de ancho con el ángulo de 60° .

Con el ángulo entre las paredes de 70° (ver figura 18), el sistema es incapaz de amplificar la ola para anchos de 5 y 6 metros, mientras que funciona correctamente para anchos de 3 metros y se observa alguna resonancia cuando el ancho de la boca del amplificador es de 4 metros. La pendiente de la curva de 3 metros muestra que la eficiencia del amplificador, en este caso, es buena, lo que se expresa por lo suave de la inclinación de la curva a lo largo de las paredes del mismo.

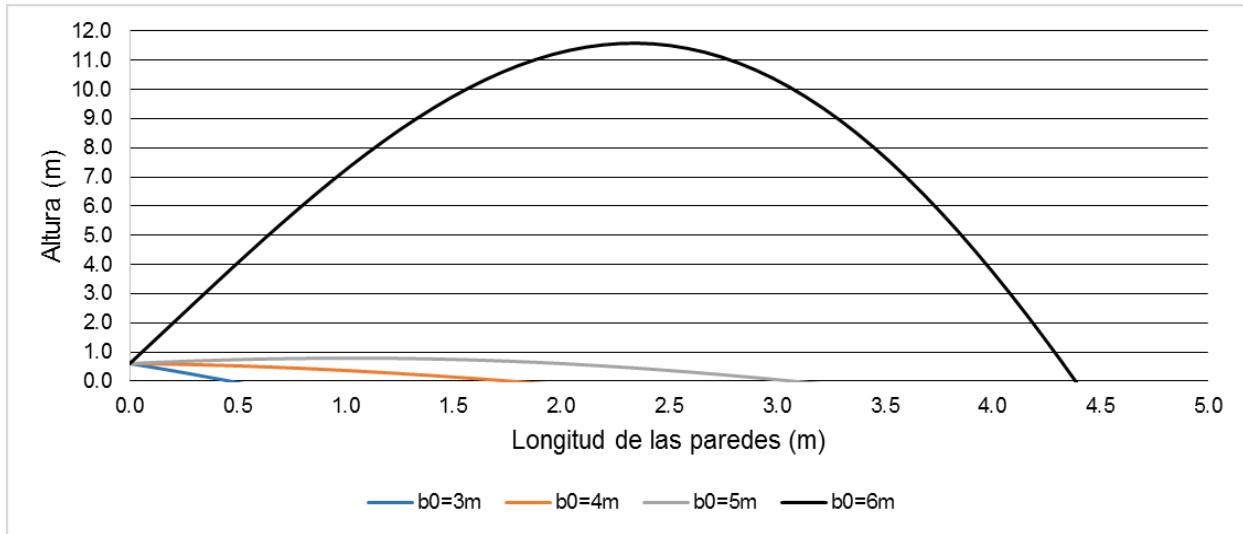


Figura 16: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45°. Fuente: Elaborada por el autor.

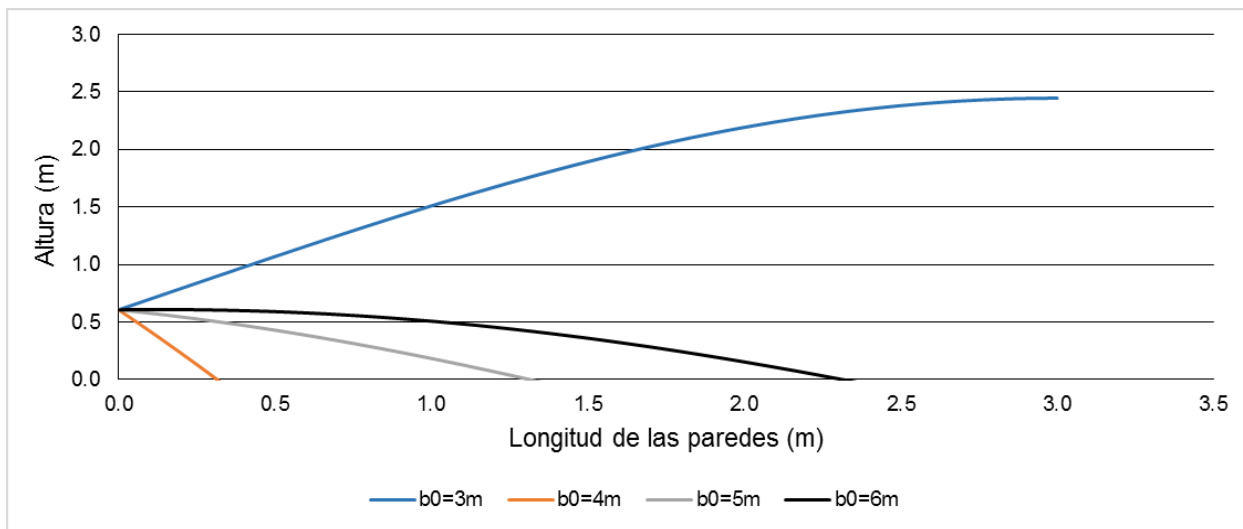


Figura 17: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°. Fuente: Elaborada por el autor.

Con un ángulo de apertura de 85° el sistema logra amplificar de manera eficiente la ola para anchos de la boca del amplificador entre 3 y 5 metros, lo que se observa en las curvas correspondientes de la figura 19. Para este ángulo, la ola es capaz de acumular la suficiente energía que le permita amplificarse sin romper, por lo que es posible la construcción de amplificadores con estas dimensiones para estas características de olas. Al igual que el resto de las gráficas, la curva de 6 metros de ancho no muestra un funcionamiento eficiente del amplificador.

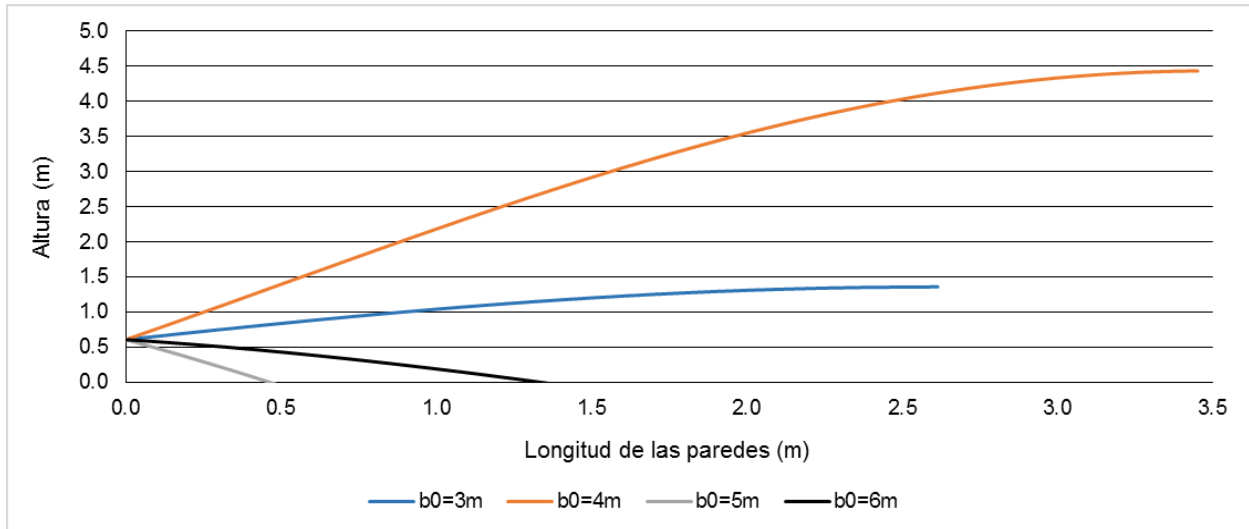


Figura 18: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°. Fuente: Elaborada por el autor.

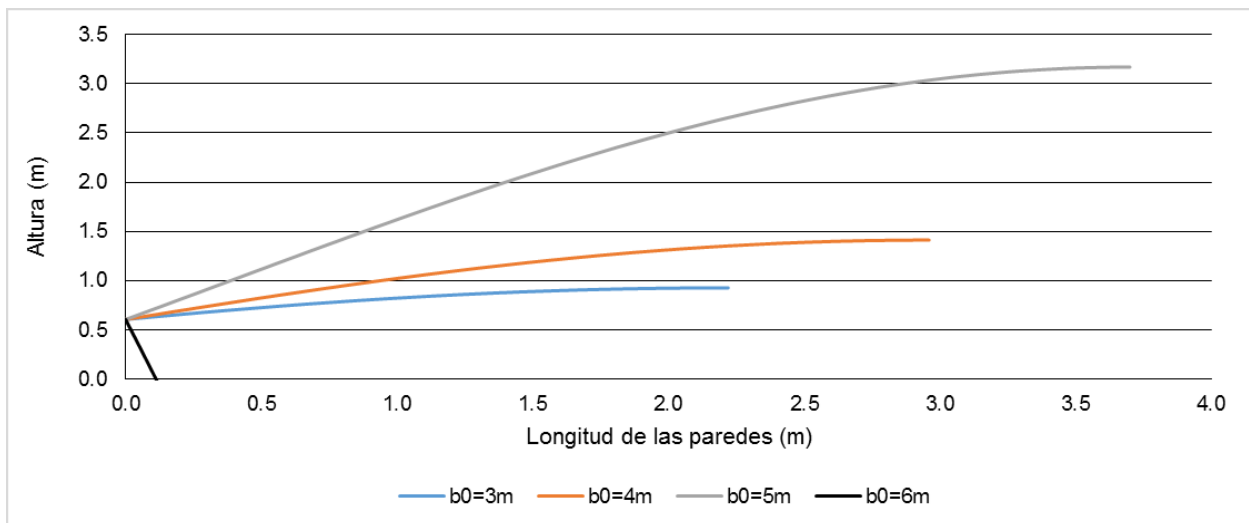


Figura 19: Superficie libre dentro del amplificador sin rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85°. Fuente: Elaborada por el autor.

Estos resultados muestran que, para algunas combinaciones de ancho del amplificador con ángulo de apertura de las paredes, el sistema es capaz de funcionar, aún sin rampa; por lo que las posibilidades de construcción del REALCO aumentan considerablemente.

Aun así, las características del área de estudio, donde se construirá el REALCO; no lleva a evaluar la variante de amplificador con rampa, pues el desnivel entre el mar y la laguna costera obliga a tener un tope que impida el retorno del agua hacia el mar, a la vez que ayude a amplificar mejor el oleaje.

Por esta razón, en un segundo análisis, se calcularon los valores de superficie libre y caudal para las mismas combinaciones de ancho de la boca y ángulo de apertura de las

paredes del amplificador, a fin de conocer la influencia de la rampa sobre la amplificación y la eficiencia del sistema. Las siguientes 8 gráficas muestran algunos de los resultados obtenidos para altura y período de ola medios.

Las figuras 20 y 21 muestran los resultados para un ángulo de apertura de 45° , donde se puede observar que para el caso de ancho del amplificador de 3 y 5 metros, la ola se amplifica solamente entre 0.0 y 1.7 metros y entre 0.0 y 1.0 metro de longitud de las paredes, respectivamente. Para el caso de un ancho del amplificador de 4 y 6 metros, el sistema es incapaz de amplificar la ola.

Este comportamiento de la superficie libre se refleja en el comportamiento del caudal (Figura 21), con valores inferiores a $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ para todas las variantes, entre 1 y 3 metros de longitud de las paredes; y llegando a ser negativos en algunos casos, lo que prueba la ineficiencia del sistema para estas combinaciones.

En el caso de 4 metros de ancho, el comportamiento de la curva del caudal muestra su ineficiencia para las dimensiones en las que la superficie libre es positiva, evidenciado por la campana tan pronunciada en la gráfica. Para el caso de 6 metros de ancho, la campana es menos pronunciada por lo que su factibilidad puede ser mayor para longitudes de las paredes entre 5 y 7 metros.

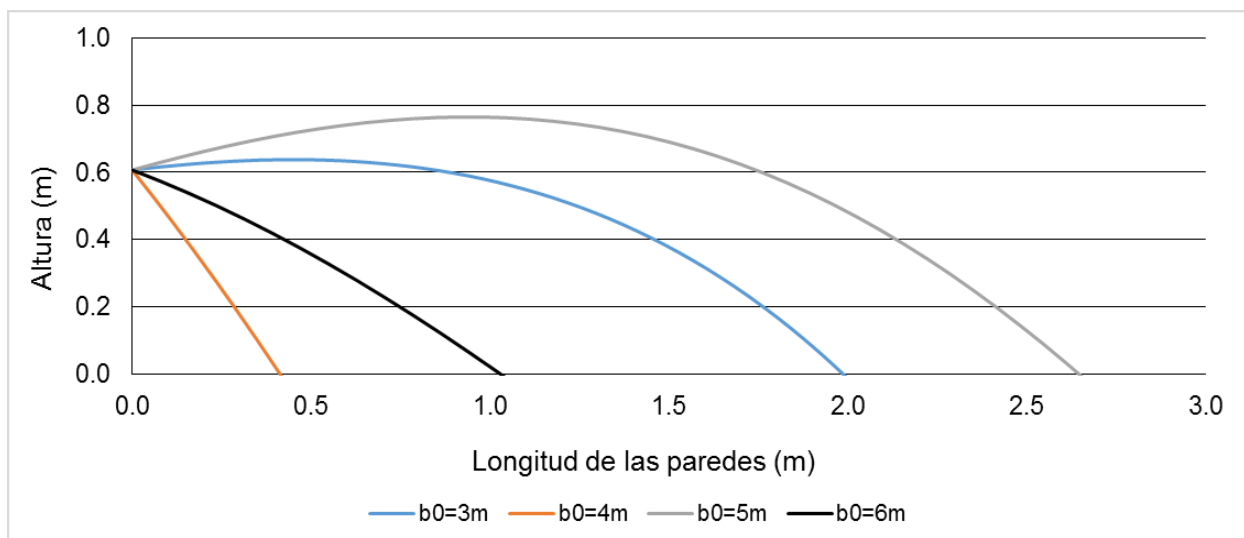


Figura 20: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45° . Fuente: Elaborada por el autor.

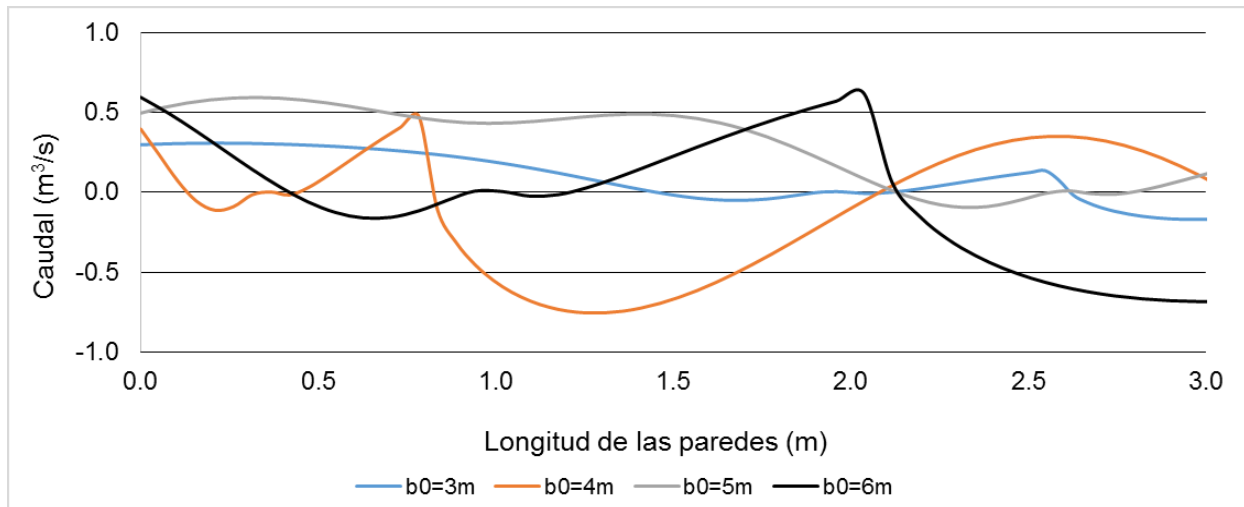


Figura 21: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 45° . Fuente: Elaborada por el autor.

Las figuras 22 y 23 muestran los resultados de los análisis para un ángulo de apertura de las paredes de 60° y el principal resultado es que para estas dimensiones, el sistema solo funciona para 5 metros de ancho del amplificador, lo que se evidencia en la figura 22 al ser la línea correspondiente a 5 metros la única que es superior a su valor inicial entre 0.5 y 3.0 metros de longitud de las paredes. Para el resto de las variantes, el sistema es ineficiente con este ángulo de apertura de las paredes.

Esto se refleja en el comportamiento de las gráficas de los caudales, pues excepto el correspondiente a 5 metros de ancho; el resto tiene un comportamiento errático entre los 0.5 y 3.5 metros de longitud de las paredes, llegando en ocasiones a ser negativo, lo que muestra la ineficiencia del sistema para estas combinaciones. En el caso de la curva de 5 metros de ancho, su comportamiento para estas dimensiones de las paredes es bastante aceptable, pues la campana que describe es ancha y baja, por lo que su funcionamiento es más estable para las dimensiones analizadas.

El comportamiento de la curva correspondiente a 3 metros es debido a la resonancia dentro del sistema y a las características de las fórmulas involucradas pues, aun cuando no amplifica la ola, su caudal es superior a cero pero con un comportamiento muy variable.

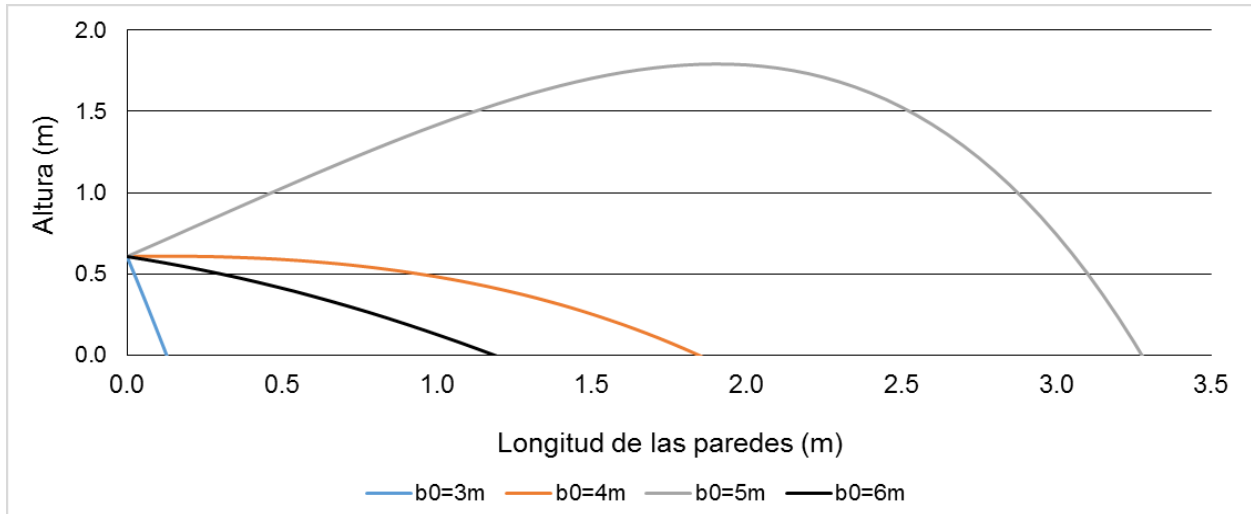


Figura 22: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°. Fuente: Elaborada por el autor.

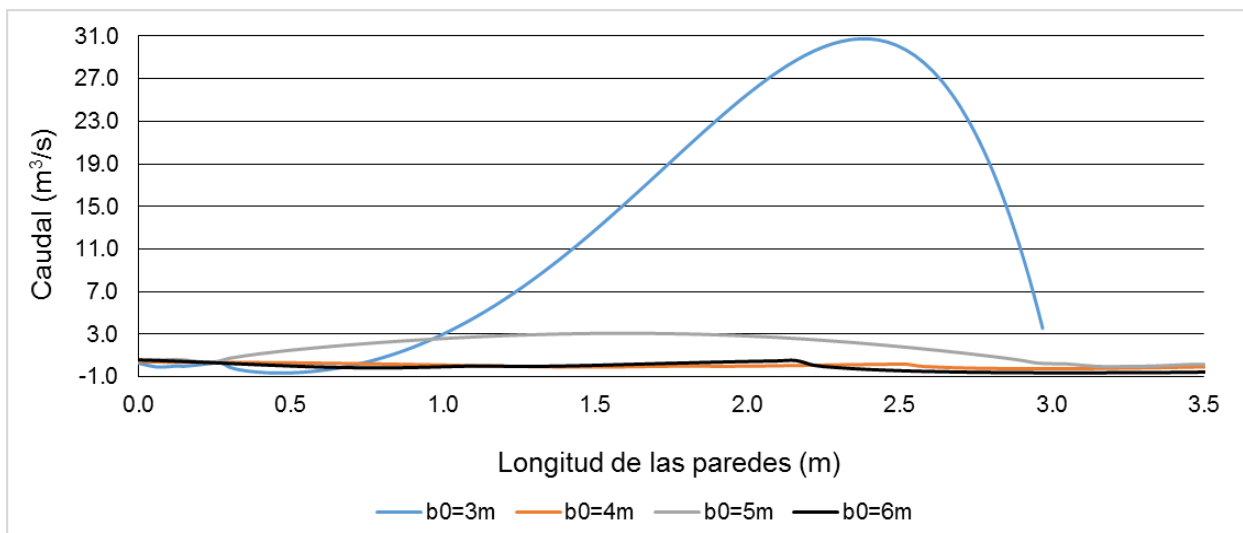


Figura 23: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 60°. Fuente: Elaborada por el autor.

Las siguientes dos figuras (24 y 25) muestran la evolución de la superficie libre y el caudal para un ángulo de apertura de las paredes de 70°. En este caso se evidencia que el sistema responde muy bien para 3 y 6 metros de ancho del amplificador y no así para 4 y 5 metros.

En relación a la superficie libre, se observa que para 3 y 6 metros de ancho se alcanza el máximo de amplificación a una longitud de las paredes entre 2 y 2.5 metros, para luego disminuir en el caso de 6 metros de ancho. Para esta combinación, la máxima longitud de las paredes para 3 metros de ancho es 2.6 metros. Para el caso de 4 y 5 metros de ancho, el sistema es ineficiente pues no amplifica la ola. Para estas combinaciones, el sistema funciona bien para longitud de las paredes entre 0.5 y 3.0 metros, con anchos de 3 y 6 metros en la boca del amplificador.

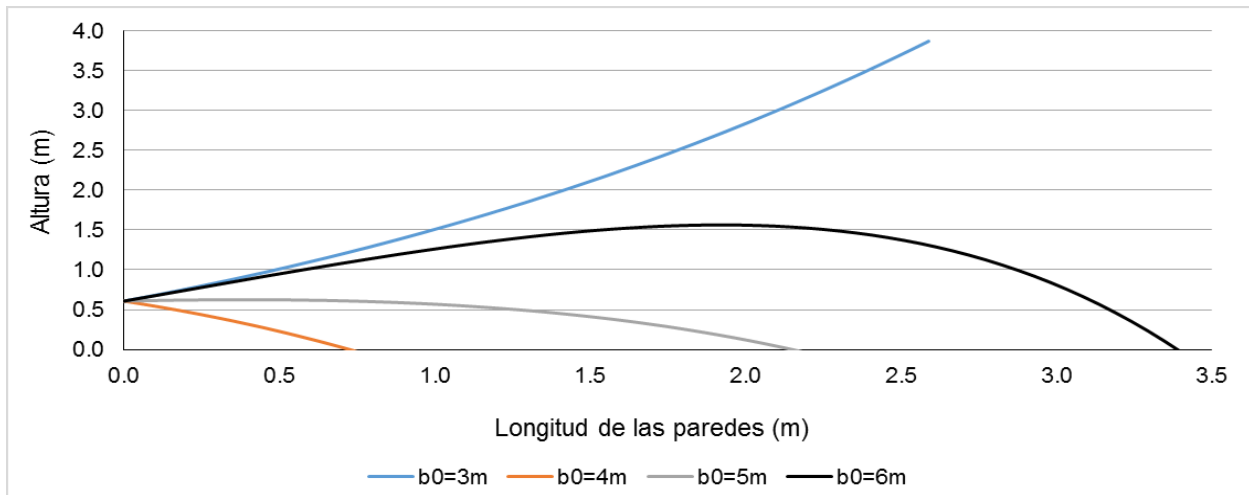


Figura 24: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°. Fuente: Elaborada por el autor.

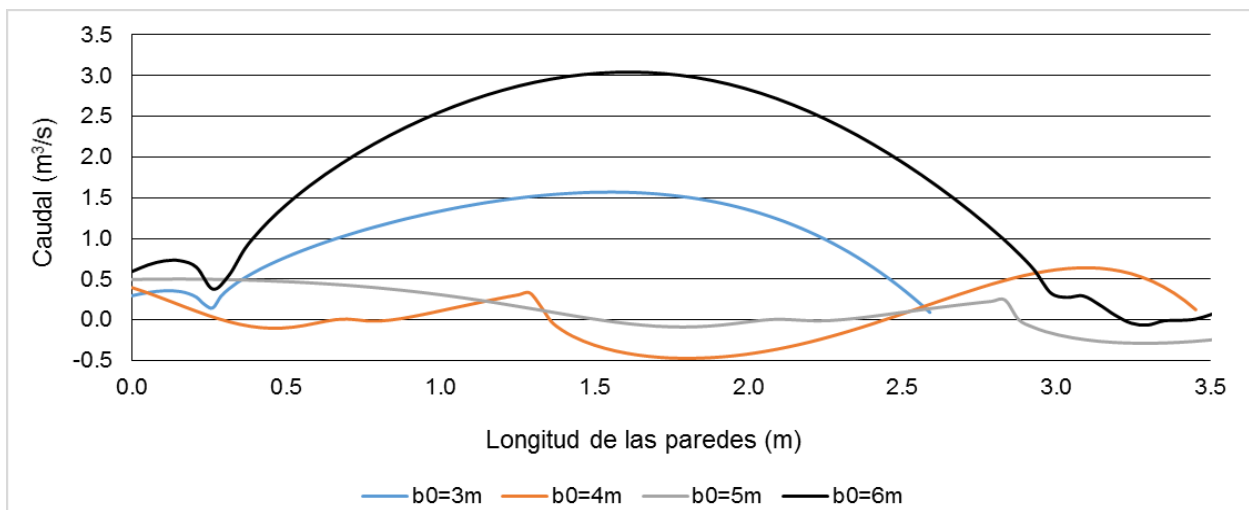


Figura 25: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 70°. Fuente: Elaborada por el autor.

Esto se refleja en las gráficas de caudal, pues solamente las curvas de 3 y 6 metros de ancho tienen un comportamiento aceptable, siendo superiores a cero entre los 0.5 y 3.0 metros de longitud de las paredes. Para anchos de 4 y 5 metros, el comportamiento de las curvas es muy errático, lo que prueba la ineficiencia del sistema para estos dos valores de ancho con este valor de ángulo.

En las figuras 26 y 27 se puede observar el comportamiento de la superficie libre y el caudal para un ángulo de apertura de 85°. En este caso, el sistema solo amplifica la ola para los anchos de 3 y 4 metros, para una longitud de las paredes entre 0.5 y 3.0 metros. Para los casos de 5 y 6 metros de ancho del amplificador, el sistema es ineficiente. Este comportamiento se refleja en un comportamiento errático de las curvas de caudal para

los valores de 5 y 6 metros de ancho, mientras que para 4 metros de ancho el sistema funciona aceptablemente en cuanto al caudal que genera entre 0.5 y 2.5 metros de longitud de las paredes. Para 3 metros de ancho del amplificador, el sistema muestra una curva de caudal positiva entre 0.5 y 2.5 metros de longitud de las paredes aunque con valores máximos muy pequeños, de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el caso de 5 y 6 metros de ancho, el caudal es errático e incluso inferior a cero en ocasiones, lo que muestra la ineficiencia del mismo para estas combinaciones de ancho del amplificador, ángulo de las paredes y longitudes de las paredes.

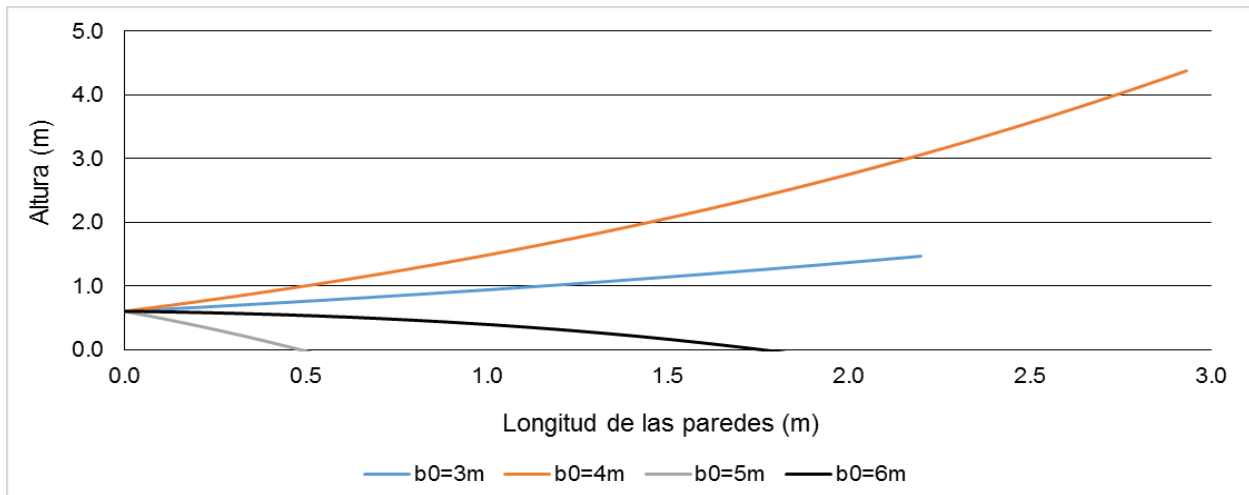


Figura 26: Superficie libre dentro del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85° . Fuente: Elaborada por el autor.

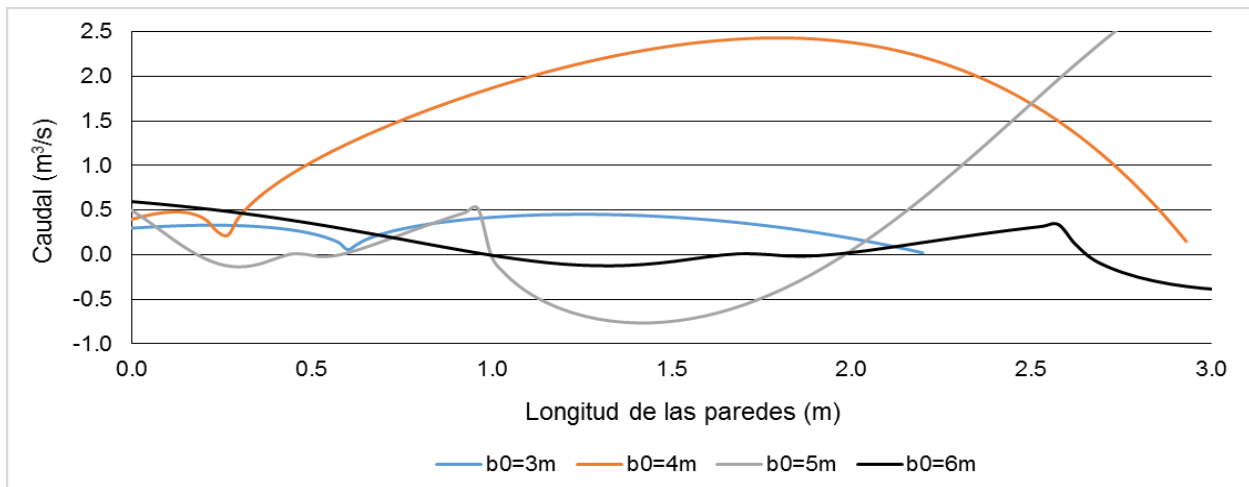


Figura 27: Caudal a través del amplificador con rampa, para un ángulo de apertura de las paredes de 85° . Fuente: Elaborada por el autor.

De forma general, estas gráficas muestran la gran variabilidad de combinaciones posibles entre ancho del amplificador, ángulo de apertura de las paredes y longitud de las paredes, con la presencia de rampa; de forma que es posible diseñar una gran

variedad de amplificadores en dependencia de las condiciones del sitio en el cual se quiera emplazar y de las posibilidades constructivas, ya sea económicas o de materiales con que se cuente.

En un tercer análisis se determinaron las dimensiones del sistema y los valores de superficie libre y caudal correspondientes, para los datos de altura y período de ola pico, media, un medio e inferiores a 0.1 metros; para el caso del amplificador con rampa.

La tabla 9 muestra los resultados de los análisis de las 96 combinaciones de altura y período de ola, anchos del amplificador y ángulos de apertura de las paredes. Los valores de las dimensiones para las combinaciones se escogieron en función de las características de la zona donde se construirá el sistema y de los estudios previos; así como las que mejores resultados de superficie libre y caudal mostraron, a fin de seleccionar las dimensiones con las que se correrían las fórmulas para el cálculo de la superficie libre y el caudal.

De todas las combinaciones analizadas, se escogió la que corresponde a un ancho del amplificador de 6 metros, con ángulo de apertura de las paredes de 70° . Esta selección de las dimensiones se basó en que el caudal que entra a través del amplificador para estas dimensiones fue mayor, en promedio, al resto de las combinaciones. Además, el ángulo de inclinación de la rampa para estas combinaciones, que es el mismo en todos los casos; coincide con el máximo para el modelo de Owen (28°) (según Alatorre, 2003) y está muy cerca de la media del rango de funcionamiento óptimo según Alatorre (2003), quien determina que el funcionamiento óptimo del sistema se logra para valores entre 20° y 55° de inclinación de la rampa.

Otro de los argumentos por los cuáles se escoge estas dimensiones es porque, en todos los casos, la superficie libre dentro del amplificador es menor a 2 metros; lo que garantiza que todo el tiempo la ola esté por debajo del límite superior de las paredes del amplificador, evitándose de esta manera el derrame de agua hacia los laterales y la pérdida de eficiencia por concepto de rebase de las paredes laterales.

En cuanto a la orientación del amplificador, se escogió una orientación de 70° respecto al Norte, coincidiendo de forma casi exacta con la dirección media del viento (77°). Esta orientación nos permite aprovechar las olas el 62% de los días del año, pues durante este tiempo, los valores de dirección del viento son entre los 35° y los 105° , lo que coincide con los grados de orientación de las paredes del amplificador.

Con un ángulo de apertura de las paredes de 70° y una orientación de 70° , se garantiza una cobertura entre 35° y 105° para las paredes del amplificador, lo que genera una incidencia de las olas entre 0° y 35° hacia ambos lados del mismo. Estos valores de incidencia del oleaje garantizan una eficiencia entre un 75% y un 100%, según los resultados obtenidos por Alatorre (2003), quien plantea que el funcionamiento del REALCO es del 75% para un ángulo de incidencia de 35° respecto a la normal (35° y 105° de incidencia del oleaje) y de 100% para un ángulo de incidencia de 0° .

Para las olas menores a 0.1 m, se observa que en todos los casos el caudal es mínimo o se hace cero, lo que en este caso muestra que no entra agua a través del mismo para esos datos de ola.

Las diferencias en las dimensiones, mostradas en la tabla siguiente, evidencian la viabilidad de construir el REALCO en diferentes ambientes costeros, sobre todo en aquellos donde los lugares factibles de anclar sean reducidos y los datos de olas sean similares a los obtenidos en el área de estudio de esta investigación. Incluso se hace factible el emplazamiento de algún tipo de estructura para la colocación del amplificador, pues con las dimensiones de 3 metros de ancho con 70° de apertura de las paredes es factible la realización de un amplificador que garantice el funcionamiento del sistema para datos de olas similares a los de este trabajo.

Las gráficas de las figuras 28 y 29 muestran que la distancia al francobordo para garantizar la máxima amplificación, con las dimensiones antes seleccionadas; es entre 1.6 y 2.0 metros; y el ancho del francobordo para la máxima amplificación es entre 4.0 y 5.0 metros.

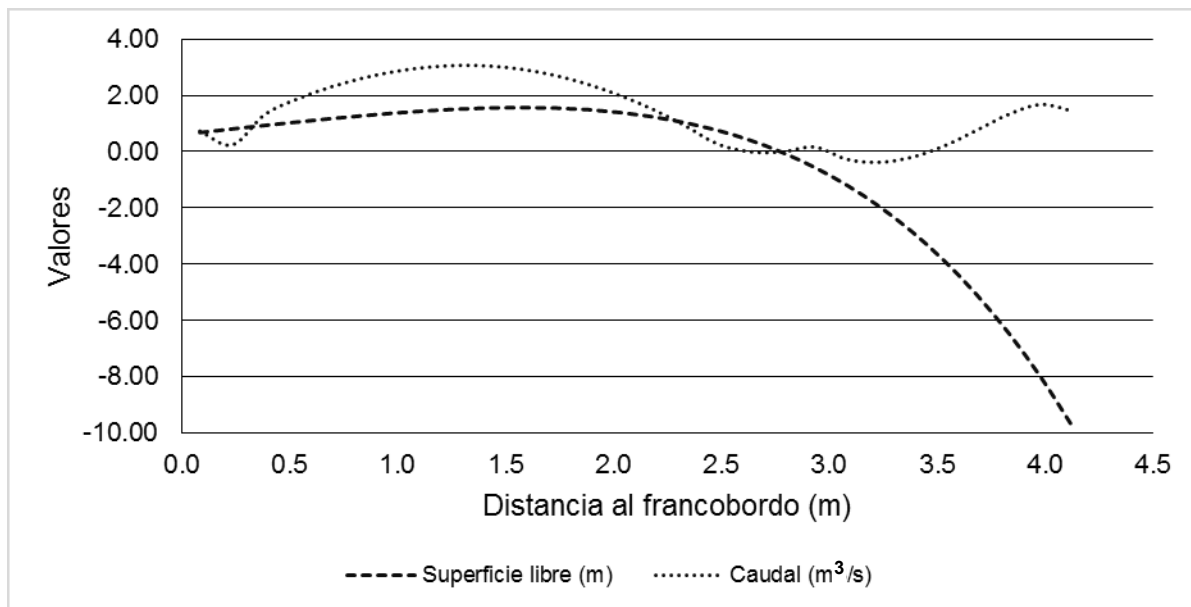


Figura 28: Relación entre la superficie libre y el caudal en el francobordo y la distancia hasta el francobordo. Fuente: Elaborada por el autor.

Tabla 9: Variantes de dimensiones del amplificador para diferentes datos de olas, ancho del amplificador y ángulo de apertura de las paredes.

Tipo	Altura (m)	Período (s)	Ancho del Amplificador (m)	Ángulo de apertura de las paredes (°)	Ancho Francobordo (m)	Distancia del Amplificador (m)	Ángulo de la rampa (°)	Superficie libre (m)	Caudal (m ³ /s)
Pico	0.61	2.929	6	45	1.0	6.00	11	2.0	1.0
Media	0.607	2.976	6	45	1.0	6.00	11	1.5	0.7
RMS	0.762	2.996	6	45	1.0	6.00	11	2.5	1.5
≤ 0.1	0.12	3.107	6	45	1.0	6.00	11	0.8	0.1
Pico	0.61	2.929	3	70	1.5	1.00	50	2.0	1.7
Media	0.607	2.976	3	70	1.5	1.10	49	1.8	1.5
RMS	0.762	2.996	3	70	1.5	1.10	47	2.3	2.0
≤ 0.1	0.12	3.107	3	70	1.5	0.00	-	0.4	0
Pico	0.610	2.929	4	50	3.0	1.20	45	1.8	2.
Media	0.607	2.976	4	50	3.0	1.20	45	1.2	1.4
RMS	0.762	2.996	4	50	3.0	1.20	45	1.6	2.6
≤ 0.1	0.120	3.107	4	50	3.0	0.00	-	0.2	0
Pico	0.610	2.929	6	70	3.0	2.15	29	2.0	2.5
Media	0.607	2.976	6	70	3.0	2.20	29	1.3	1.6
RMS	0.762	2.996	6	70	3.0	2.20	29	1.5	2.0
≤ 0.1	0.120	3.107	6	70	3.0	0.00	-	0.2	0

Fuente: Elaborada por el autor.

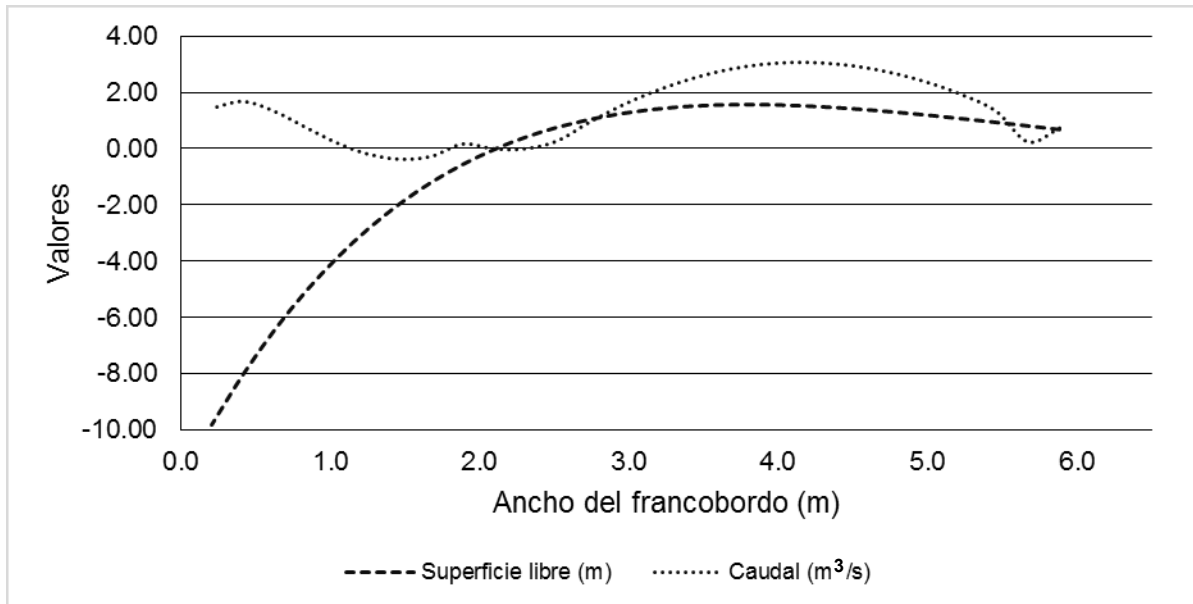


Figura 29: Relación entre la superficie libre y el caudal en el francobordo y el ancho del francobordo. Fuente: Elaborada por el autor.

En este sentido, las medidas finales del REALCO quedaron como se muestra en la gráfica siguiente.

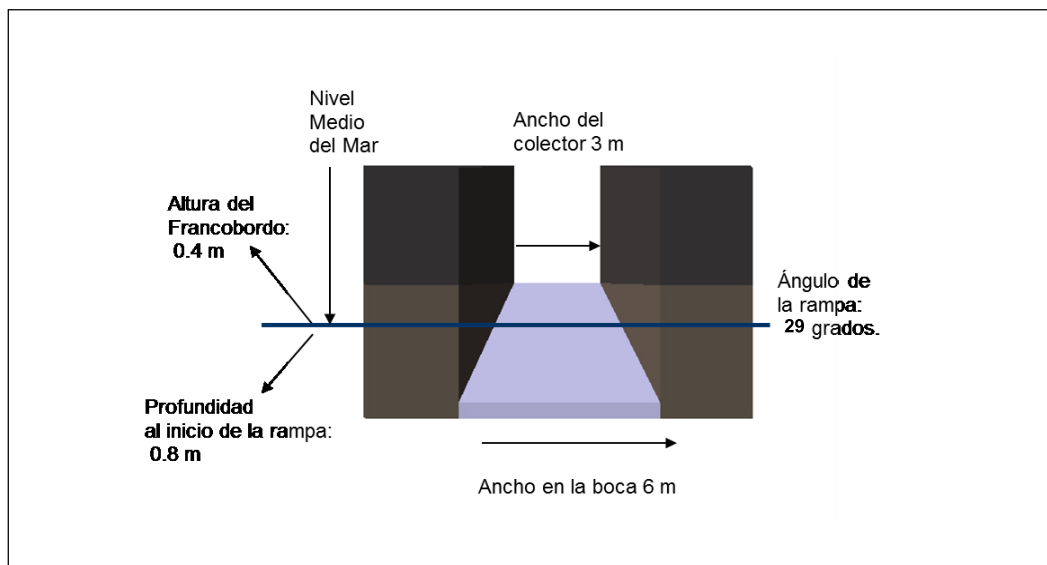


Figura 30: Dimensiones del REALCO en Laguna Larga. Fuente: Elaborada por el autor.

Las longitudes de las paredes laterales del REALCO, así como la longitud de la rampa del sistema, quedaron en 2.61 metros y 2.15 metros, respectivamente. El ángulo interior de las paredes es de 70°.

5.4.2. Superficie libre y Caudal.

Los cálculos realizados para los diferentes datos de olas y de nivel del agua en función de la marea indican que los valores de la superficie libre dentro del REALCO varían entre 0.922 m (para altura de ola media y marea alta) y 2.597 m (para altura de ola un tercio y marea baja). Eso se traduce en un factor de amplificación entre 0.388 y 1.489 con respecto a las olas medidas en el ológrafo, a 3.40 metros de profundidad y 150 metros de la boca del REALCO. La altura media de la superficie libre dentro del REALCO es de 1.537 m.

Los valores de caudal que entrará a través del REALCO muestran una variación entre 1.774 m³/s (para altura de ola media y marea media) y 9.259 m³/s (para altura de ola media y marea baja). Los valores inexistentes que se muestran en la tabla significan que las ecuaciones no son capaces de explicar el funcionamiento del sistema para las condiciones de ola (altura y período), profundidad inicial y dimensiones del amplificador (longitud, ángulo de las paredes y ancho y alto del francobordo) y no que el caudal en el mismo es cero.

Los valores de superficie libre y caudal obtenidos para las altura de ola un medio demuestran la eficiencia del sistema para el período de tiempo correspondiente a la mitad del año, teniendo en cuenta que los datos de olas corresponden prácticamente a un año de medición. Eso mismo ocurre con los resultados para un tercio de las olas medidas.

Tabla 10: Variaciones de la superficie libre (η) y el caudal (C) en el REALCO en función de los datos de olas y la marea semidiurna.

No	Tipo	HsW* (m)	T (s)	η	η	η	C	C	C
				(m)	(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
				(h ₀ =0.51)	(h ₀ =0.8)	(h ₀ =1.09)	(h ₀ =0.51)	(h ₀ =0.8)	(h ₀ =1.09)
1	Pico	0.610	2.929	1.448	1.084	0.939	8.057	3.089	-
2	Media	0.607	2.976	1.405	1.061	0.922	9.259	1.774	-
3	un medio	0.964	3.046	2.157	1.645	1.439	6.208	8.262	7.021
4	un tercio	1.192	3.104	2.597	1.998	1.755	6.717	8.670	8.217

*: Datos de altura de ola calculada con el WAPO.

Fuente: Elaborada por el autor.

En cuanto a la sola influencia de la marea sobre el sistema, según muestra la figura 31, la marea por sí sola no influye en el funcionamiento del sistema, lo que se expresa en que la superficie libre dentro del REALCO sigue la misma tendencia que la marea. La superficie libre dentro del REALCO solo aumenta 0.05 metros respecto a la amplitud de la marea para 24 horas de carrera de marea, lo que es insuficiente para que el agua penetre a través del sistema hacia la laguna, debido a que el francobordo se encuentra a 0.40 metros sobre el nivel medio del mar y la superficie libre dentro del REALCO, provocado por la carrera de marea, solo se eleva hasta 0.33 metros.

Esto garantiza que nunca salga agua de la laguna al mar a través del REALCO y, además, que en caso de mar en calma no penetre agua a través del sistema, por lo que se puede dar mantenimiento al REALCO y el canal en esos momentos.

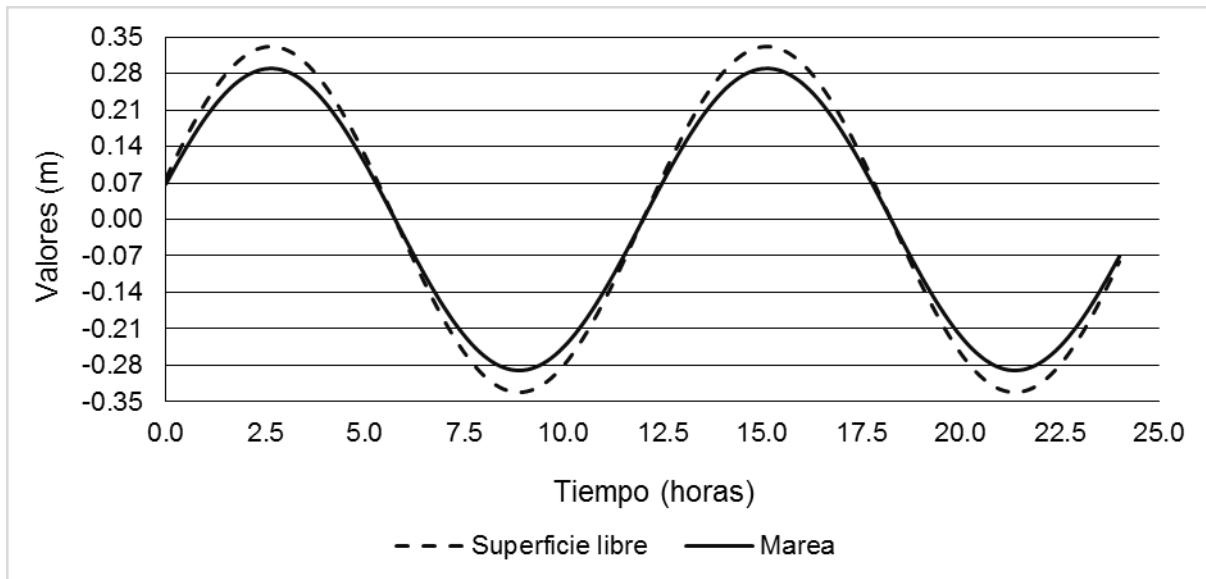


Figura 31: Influencia de la variación de la marea semidiurna sobre la superficie libre dentro del REALCO. Fuente: Elaborada por el autor.

En relación a la influencia conjunta de la marea y las olas, para el caso de la altura de ola significativa y período de ola medios; se puede observar que los valores extremos, tanto de superficie libre como de caudal, se presentan desfasados con los valores extremos de la marea, o sea, el máximo de superficie libre y caudal ocurren cuando la marea es baja.

Los mayores valores de superficie libre se presentan durante la marea viva. Así mismo, las mayores variaciones de superficie libre se presentan durante la marea viva mientras que las menores variaciones se presentan durante la marea muerta. La superficie libre tiene una variación entre 0.92 y 1.97 metros.

En cuanto al caudal, las mayores fluctuaciones en los valores se presentan durante el cambio de marea viva a marea muerta y de marea muerta a marea viva, mientras que las menores fluctuaciones se presentan durante la marea muerta. Los menores valores de caudal se presentan durante la marea baja de la marea viva, coincidiendo con los menores valores de marea. El caudal muestra una variación entre 0.02 y 9.40 m³/s.

Los valores iguales o menores a cero, que representan el 30 % de los datos de caudal calculados para un mes de marea; no significan que no entre agua por el sistema sino que no es posible explicar el funcionamiento del mismo para las condiciones de ola (altura y período), profundidad inicial (nivel del agua en la entrada del amplificador) y dimensiones del amplificador (longitud, ángulo de las paredes y ancho y alto del francobordo) usados en esta investigación. (Figura 32)

Con relación a la orientación del amplificador y su influencia sobre el funcionamiento del mismo, se puede afirmar que el 62% de los días del año el viento, y por ende las olas, tiene una dirección entre los 35° y los 105°; coincidiendo con los ángulos de orientación de las paredes del amplificador, por lo que el REALCO funcionaría para el 62% de los días del año. Existe un 9% de los días del año que las olas tienen dirección entre los 0° y los 35° por lo que, dependiendo de los fenómenos de refracción del oleaje pudiera funcionar el sistema en ese tiempo.

La ocurrencia de esos días en que la dirección de las olas no favorece el funcionamiento del sistema están repartidos durante todo el año, por lo que no se puede establecer un período de tiempo exacto en que la dirección de las olas provocarán un funcionamiento ineficiente del sistema. Solo se puede saber que esos días se concentran mayormente en los meses de invierno, entre noviembre y abril.

Estos valores muestran que el sistema es capaz de funcionar, sobre todo en marea muerta donde los valores de superficie libre y caudal son siempre superiores a cero. Aunque durante la marea viva los valores de caudal fluctúan bastante, el hecho de que en ese momento se presenten los mayores valores de caudal hace que el funcionamiento del sistema durante ese momento del mes sea bueno, funcionando para un 70 % del tiempo.

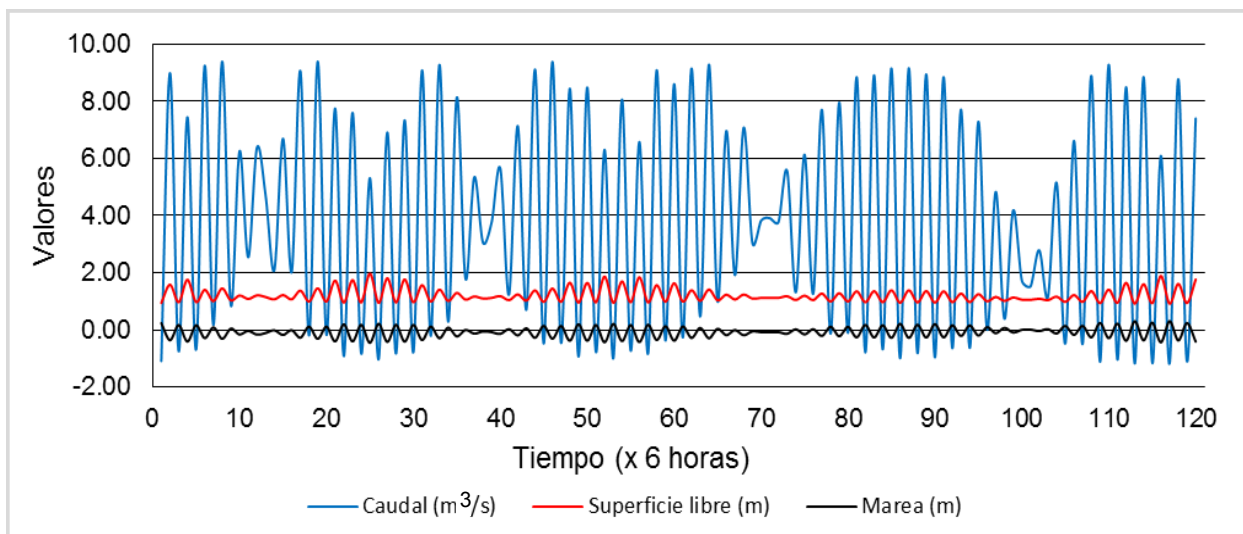


Figura 32: Superficie libre y Caudal dentro del REALCO para un mes de marea con altura y período de ola medios. Fuente: Elaborada por el autor.

La figura 33 muestra los valores de caudal para la serie de datos de olas medidos y la marea correspondiente a la fecha de cada dato de ola, así como el valor de caudal correspondiente a la altura de ola significativa máxima (línea discontinua gris), la cual se tomó como valor máximo posible para el análisis de los datos.

Según los resultados obtenidos, el 1 % (198) de los datos de caudal son superiores al valor máximo establecido, mientras que el 17 % (2 268) de los datos son iguales o inferiores a cero; por lo que las ecuaciones utilizadas para el sistema son incapaces de explicar el funcionamiento del mismo para el 18 % de los datos de olas medidos, con su correspondiente nivel del mar.

Existe un período de tiempo, entre el 7 de septiembre de 2011 y el 27 de diciembre de 2011 en el que no fue posible tomar datos de olas por lo que el caudal se hace cero. El caudal promedio para el período de tiempo analizado es de 3.68 m³/s.

Una vez filtrado los datos de caudal, de manera que solo se representen aquellos valores entre 0 m³/s y 19.54 m³/s, establecidos como los extremos del funcionamiento del sistema; se puede observar que entre los meses de mayo y septiembre, los mayores valores de caudal generalmente coinciden con las mareas vivas mientras que entre los meses de diciembre y abril los mayores valores de caudal se pueden presentar indistintamente en marea viva o marea muerta.

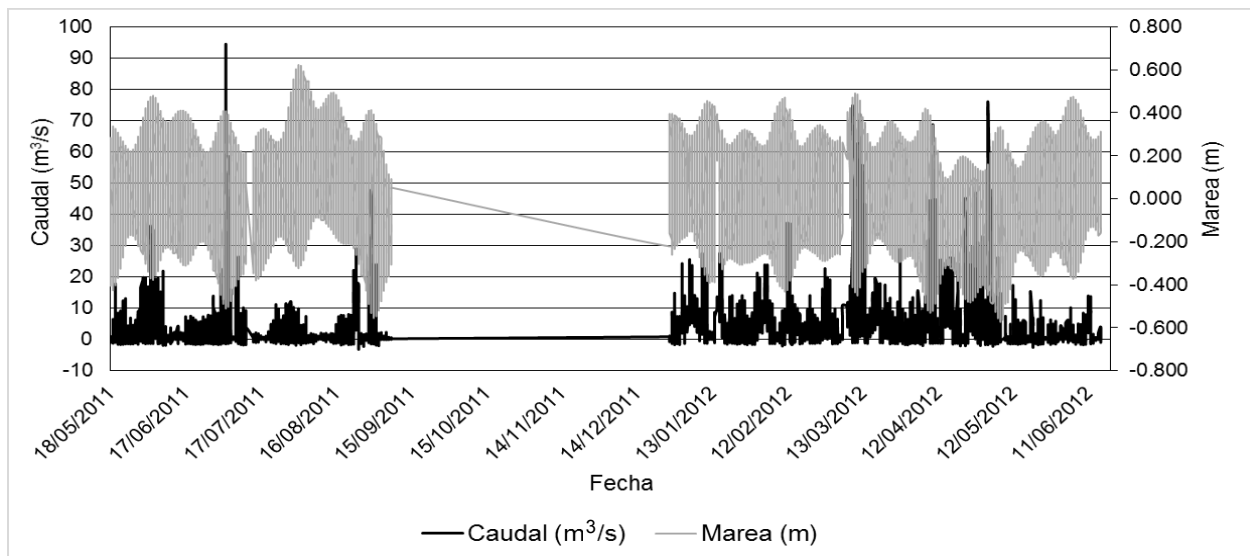


Figura 33: Caudal para la serie de datos de olas y marea. Fuente: Elaborada por el autor.

Esto está influenciado, evidentemente, por las características de las olas en estos dos períodos de tiempo. Los valores de altura de las olas son menores, en promedio, durante los meses de mayo a septiembre, por lo que la posición de la marea juega un papel más importante en el caudal que entra a través del sistema; mientras que los valores de olas son mayores, en promedio, entre los meses de diciembre a abril, por lo que la posición de la marea no juega un papel tan importante en la entrada de agua a través del REALCO. Esto se refleja en la coincidencia o no de los máximos de caudal con las mareas vivas y muertas en ambos períodos del año. (Ver figura 34)

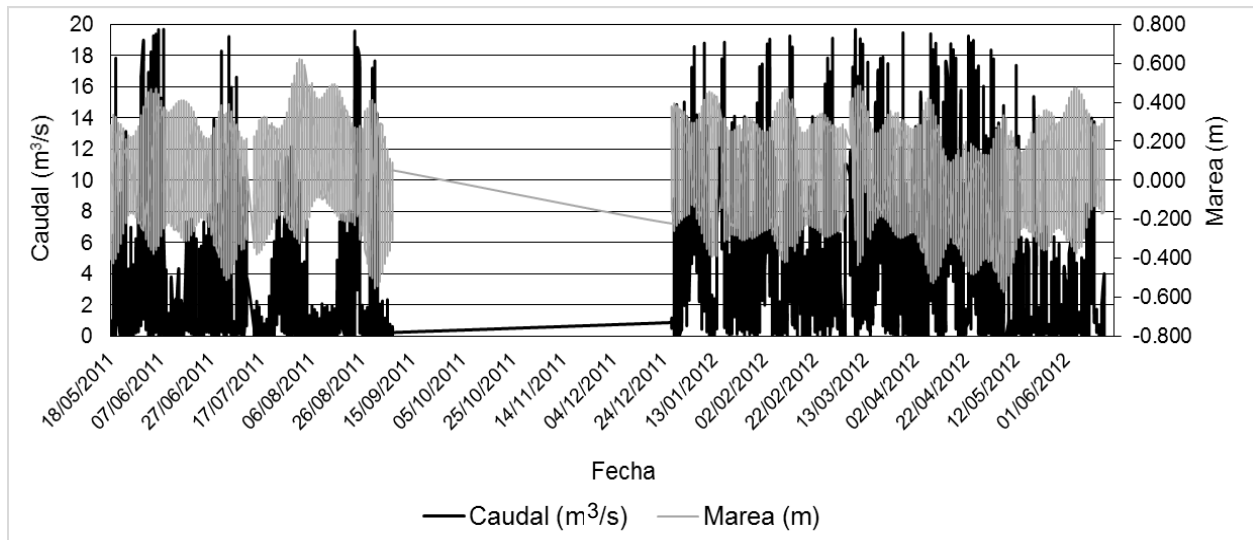


Figura 34: Datos de caudal filtrados y nivel de marea correspondiente. Fuente: Elaborada por el autor.

Los meses en que los datos de dirección del viento, y por ende de las olas; tienden a provocar una ineficiencia del amplificador (agosto, septiembre y octubre), coincide con los meses en los que no hay datos de olas debido a la inoperancia del ológrafo; por lo que no es posible analizar el comportamiento del sistema en ese período de tiempo.

Igualmente, durante el período de tiempo en que se muestrearon olas no se presentó la afectación de ningún fenómeno meteorológico extremo; por lo que no es posible contar con datos de olas relacionados con estos eventos para poder evaluar el funcionamiento del sistema bajo la afectación de los mismos. De todas formas, dentro de las medidas propuestas en caso de ser afectados por huracanes está la fabricación de una compuerta en un punto de canal de comunicación del sistema con la laguna, de manera que se pueda evitar la entrada de agua durante el paso de estos fenómenos.

Así también, los encargados de la construcción del amplificador deberán garantizar la fortaleza del mismo, tanto en estructura como en anclaje, de manera que sea capaz de soportar la investida de este tipo de tormentas.

De forma general el sistema, con las medidas propuestas, funciona de manera aceptable si tenemos en cuenta que solamente para olas pico y media con marea alta se desconoce la respuesta del sistema y que durante un mes, el 70 % del tiempo se garantiza funcionamiento del mismo para altura y período de ola medios. En todo momento, la superficie libre que se alcanza, para todos los estadígrafos de olas analizados (Tabla 8 expuesta anteriormente), es superior a la altura del francobordo, lo que debe garantizar un buen funcionamiento del REALCO.

Las ecuaciones utilizadas permiten determinar el caudal para el 82 % de los datos de olas medidos por lo que se puede afirmar que el mismo funcionará el 82 % de los días del año.

Los momentos de funcionamiento óptimo del sistema deben alcanzarse durante los meses de verano (entre abril y octubre) entre las 10:00 y las 17:00 horas, cuando las olas inciden generalmente de una dirección igual a 70° aproximadamente, bajo la influencia de los vientos Alisios; teniendo en cuenta que el ángulo de incidencia de las olas será de 0° respecto al eje central del amplificador.

Igualmente, durante los meses de invierno (entre noviembre y marzo) es posible que se alcance el máximo caudal aun cuando la incidencia del oleaje no sea directamente desde 0° respecto al eje central del amplificador; debido a que en ese período de tiempo se registran las mayores alturas de olas provocadas por los frentes fríos, los cuales inciden generalmente del Norte (70° respecto al eje central del amplificador) pero en su desplazamiento provocan que la incidencia vaya cambiando así como la dirección de las olas hasta alcanzar direcciones entre los 40° y 60° respecto al norte; lo que generaría que las mayores olas del año incidan con un ángulo entre 30° y 10° respecto al eje central del amplificador.

En ese sentido, se pueden tener dos máximos de caudal al año: uno generado por la influencia del ángulo de incidencia de las olas, y que se presentaría durante los meses de verano; y otro generado por la combinación de altura de olas con ángulo de incidencia del oleaje, y que se presentaría durante el invierno. Igualmente, se presentarían dos mínimos de caudal: uno durante el verano, provocado por la insuficiencia del oleaje; y otro durante el invierno, provocado por la incidencia de los vientos del Sur, entre el paso de un frente frío y otro, que provocan mar en calma en el área de estudio.

Solo en algunas ocasiones el sistema no funciona, lo que deberá ser aprovechado para el mantenimiento del mismo: limpieza de las paredes y el fondo y extracción de sedimentos o basura que pueda introducirse por el mismo. Estos momentos coinciden con aquellos en los que las direcciones de las olas están fuera del rango de alcance del amplificador, así como con aquellos en los que los datos de olas no son suficientes para que se provoque el rebase de la estructura. Esos momentos se identificaron durante los meses de mayo a octubre, en las primeras horas de la mañana; y entre los meses de noviembre a marzo, entre el paso de un frente frío y su consecutivo.

CONCLUSIONES.

1. Los valores de altura de ola significativa, medidos en Punta Raza, Cayo Coco, Cuba entre el 11 de julio de 2011 y el 16 de junio de 2012 con período de muestreo de 30 minutos, tuvieron una media de 0.540 metros con un período asociado de 2.976 segundos.
2. Dentro del mismo conjunto de datos, el 16.8 % de los datos de altura de ola fueron menores a 0.20 metros, distribuidos en todo el año, fundamentalmente en los meses entre mayo y septiembre.
3. La componente fundamental de la marea, obtenida a partir de los datos de superficie libre del mar entre el 6 de julio de 2011 y el 31 de diciembre de 2013 con periodo de muestreo de 2 minutos fue la Principal lunar semidiurna, con una amplitud de 0.29 metros.
4. Las características de las olas, así como la marea y la dirección del viento, en Punta Raza, Cayo Coco, Cuba garantizan el funcionamiento eficiente del REALCO durante el 62% del año, para los datos medidos entre julio de 2011 y diciembre de 2013.
5. En la configuración seleccionada, y bajo las condiciones naturales estudiadas, el sistema no fue capaz de funcionar únicamente con el efecto de la marea, por lo que habría momentos en que no bombearía, reduciendo su eficiencia general, pero facilitando su mantenimiento y limpieza en esos momentos.
6. No fue posible encontrar una solución óptima para el cálculo de las dimensiones del amplificador a partir de las características de las olas, la marea y la profundidad inicial.

RECOMENDACIONES.

1. Determinar, mediante la experimentación, la respuesta del REALCO para aquellas condiciones en las que las ecuaciones no fueron capaces de explicar el funcionamiento del sistema.
2. Llevar a cabo mediciones, simultáneas y en tiempo real, de las variables involucradas (altura de ola, periodo de ola, profundidad inicial, superficie libre y caudal) una vez construido el REALCO, para establecer relaciones entre las mismas que permitan perfeccionar las ecuaciones empleadas y los resultados de este y otros trabajos anteriores.
3. Realizar muestreo de sedimentos en suspensión en los alrededores del lugar donde se construirá el REALCO para determinar volúmenes de sedimentos que puedan penetrar a través del sistema hacia la laguna.
4. Ubicar lugares en Cuba con características similares donde pueda ser construido otro REALCO, a fin de poder aplicar esta investigación en dichos casos.

REFERENCIAS.

Alatorre-Mendieta, M. A. (2003). Sistema de bombeo de agua marina utilizando la energía del oleaje y marea. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Octubre de 2003. 201 pp.

Alatorre-Mendieta, M., Silva-Casarín, R., Ruiz-Rentería, F., & Merino-Ibarra, M. (2004). A flushing system to clean up coastal lagoons. *Coastal Structures*, 2003, 902–910.

Alatorre-Mendieta M. A., Merino-Ibarra M., Ruiz-Rentería F. G., Silva-Casarín R., 2011, "Renovador Ecológico del Agua de Lagunas Costeras". Patente en trámite, solicitud de Título de Patente de Invención número MX/a/2011/005860, aceptada el 3 de junio de 2011 por el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Beach and Shore Resource Center (1996). *Coastal construction control line and reestablishment study for Bay County. Institute of Science and Public affairs, Florida state University, Tallahassee, Florida.* pp. 29.

Cialone, M.A., Brown, M.E., Smith, J.M. and Hathaway, K.K. (2008). Southeast Oahu coastal hydrodynamic modeling with ADCIRC and STWAVE. ERDC/CHL TR-08-9. Coastal and Hydraulics laboratory, US Army Engineer Research and Development Center. pp. 61.

Coastal Engineering Manual. US Corp of Engineering. US Army. 2003.

Colectivo de autores (2006). Ecosistemas costeros: biodiversidad y gestión de recursos naturales. Compilación por el XV aniversario del Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros.

Colectivo de autores (2010). Estudio ingeniero geológico de Punta Raza en Playa Larga. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). Unidad de Investigaciones para la Construcción Camagüey. pp. 14.

Diez, M., Sierra, J. P., Redondo, J. M., Mosso, C. y Bezerra, M. O. (1999): Estudio hidrodinámico de la zona costera mediante el análisis digital de imágenes. *Ingeniería del agua*. Vol 6 Num 3 (septiembre de 1999). pp. 283-292.

Emilsson, I. (2011): Elementos de oceanografía física. Versión 4. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. pp. 140.

Expósito-Díaz, G., J. Hernández – Albornas y W. Gálvez – González. (2001). Sondeo batimétrico de Laguna Larga (Cayo Coco). Inédito. Centro de Estudios Ambientales de Villa Clara. 11 pp.

Figueiredo da Silva, J., Duck, R.W. and Catarino, J.B. (2003). *Seagrass and sediment response to changing physical forcing in a coastal lagoon*. *Geophysical Research Abstract*. Vol. 5, 00861, 2003. *European Geophysical Society*.

González, D. y De La Paz, O. (1994). Estructura y dinámica de las playas para su manejo y conservación. pp. 26.

González-De Zayas, R. M. Merino-Ibarra, M. F. Soto-Jiménez, F. S. Castillo-Sandoval. (2013). *Biogeochemical responses to nutrient inputs in a Cuban coastal lagoon: runoff, anthropogenic, and groundwater sources*. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*. Print ISSN: 0167-6369. Online ISSN: 1573:2959. Springer Netherlands.

Grinsted, A. (2008). Tidal fitting toolbox. MathWorks. Octubre 2008. EE.UU. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19099-tidal-fitting-toolbox>.

Izquierdo-Álvarez, M. (2004). Estudio de la dinámica litoral en Playa Varadero, Cuba. Tesis de Maestría. Departamento de Ciencias Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos. Universidad de Cantabria. España. pp. 309.

Mellor, G.L. (1996). *Introduction to physical oceanography*. Springer-Verlag New York Inc. ISBN 1-56396-210-1. pp. 260.

Mosso-Aranda, C. (2004). Estudio numérico – experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa. Universidad Politécnica de Cataluña, España. ISBN: 8468905852. B-6823-2005. Departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental.

Pérez-Santos, I., Fernández-Vila, L. y Gutiérrez-Delgado, A. (2003). Régimen hidrodinámico y modelaje numérico de las corrientes de marea en la laguna Tiburón, Cayo Coco, Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 24 (3): 169-176. 2003.

Ruiz, F., M. Merino, M.A. Alatorre, S. Czitrom & V. Franco. (1994). Un dispositivo de bombeo de agua mediante oleaje. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol IX, Num. 2: 45-51.

Ruiz F., M. A. Alatorre y M. Merino. (1995). "Dispositivo Rectificador y Amplificador de Oleaje". Título de Patente de Invención Número 179369. Expedido a favor de la Universidad Nacional Autónoma de México por el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial, el 30 de Agosto de 1995".

Silva-Casarín, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie Docencia 49. Septiembre de 2005. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 970-32-2813-5. 186 pp.

Silva-Casarín, R. (1995). Transformación del oleaje debido a obras de defensa del litoral. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. España. 300 pp.

Referencias

Silva-Casarín R., Borthwick G. L. & Eatock-Taylor, R. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal Engineering* 52: 391–407.

Stewart, R. (2000). Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography. Texas A & M University. pp. 305.

Zúñiga, A., González-Alfonso, D. y Enríquez, F. A. (1999). Proyecto de restauración de la zona de playa del hotel Sol Club Cayo Coco. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cayo Coco, Cuba. pp. 19.

ANEXO 1: Marco conceptual.

Aguas profundas: Agua tan profunda que las olas superficiales son muy poco afectadas por el fondo del océano. Generalmente se considera aquellas aguas donde la profundidad es mayor que la mitad de la longitud de onda de las olas superficiales (CEM, 2003).

Aguas someras: (1) Comúnmente es el agua con una profundidad tal que las olas superficiales son notablemente afectadas por la topografía del fondo. Por costumbre se considera aquellas aguas donde la profundidad es menor que la mitad de la longitud de onda de las olas que se mueven por ella. (2) En hidrodinámica se considera aquella agua en la que la profundidad es menor que $1/25$ de la longitud de onda de las olas progresivas de gravedad (CEM, 2003).

Altura de ola: distancia entre el fondo de un valle y el tope de la cresta más cercana. (Stewart, 2000).

Altura de ola media: Media aritmética de los datos de altura de ola registrados.

Altura de ola significativa: (1) la altura de ola promedio del tercio superior de olas medidas en un intervalo de tiempo determinado (Stewart, 2000). (2) La altura promedio del tercio de olas más altas de un grupo de olas dado (CEM, 2003). Su unidad de medida es el metro (m).

Altura de ola un medio ($H_{1/2}$): es el promedio del 50 % de las olas más altas.

Altura de ola un tercio ($H_{1/3}$): está definida como la media aritmética del 33 % de las alturas de ola más altas.

Altura de ola un décimo ($H_{1/10}$): es el promedio del 10 % de las olas más altas.

Difracción: Fenómeno mediante el cual la energía de la ola es transmitida lateralmente a lo largo de la cresta de la ola (CEM, 2003).

Línea de costa: línea que une el mar y la tierra emergida. Se toma como línea del mar al nivel medio del mar.

Longitud de onda: distancia horizontal entre dos crestas o dos valles (Stewart, 2000). Su unidad de medida es el metro (m).

Marea: (1) Olas generadas por los cambios de gravedad debido a las variaciones en el movimiento relativo del sol y la luna respecto a la tierra, con longitudes de onda de cientos de kilómetros (Stewart, 2000). (2) Ascenso y descenso periódico del agua como resultado de la atracción gravitatoria del sol y la luna sobre la tierra en rotación (CEM, 2003)

Marea Astronómica: son observadas como una elevación y disminución periódica de la superficie de cuerpos de agua mayores en la Tierra. Se producen en respuesta a la atracción gravitacional del sol, la luna y, en mucha menor medida, otros cuerpos celestes, sobre las masas de agua de la Tierra. La luna induce los mayores efectos sobre estas mareas, debido a su mayor cercanía a la Tierra. (CEM, 2003)

Dicha marea se puede dividir en:

1. Marea Viva: Es la producida por la atracción conjunta de la Luna y el Sol. Sucede cuando quedan en línea (o “sicigia”) el Sol, la Luna y la Tierra, por lo que también se conoce como marea de “sicigia”.
2. Marea Muerta: Es la que ocurre cuando la atracción de la Luna es contrarrestada por la del Sol. Sucede cuando están los tres astros en “cuadratura”, o sea, formando un ángulo recto. También se conoce como marea de “cuadratura”.

Marea de Tormenta: Aumento o disminución del nivel de agua respecto al nivel esperado, debido a la acción del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua.

Marea Hidráulica: Efecto que se produce en la onda de marea al propagarse en un estrecho o en un golfo que se estrecha en su extremo.

Marea Diurna: Una pleamar y una bajamar por ciclo, en 24 h y 50 min

Marea Semidiurna: Dos pleamares y dos bajamares durante dos sucesivos ciclos con período de 12 h y 25 min cada uno y amplitudes de ambas son sensiblemente semejantes.

Marea Mixta: Dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos, con período de 12 h y 25 min cada uno; las amplitudes de ambos ciclos presentan diferencias notables.

Ola reflejada: aquella parte de la ola incidente que es regresada hacia el mar cuando la ola golpea contra una playa con mucha pendiente, una barrera u otra superficie reflectante (CEM, 2003).

Período de ola: tiempo en que dos crestas o dos valles pasan por el mismo punto (Stewart, 2000). Su unidad de medida es el segundo (s).

Período de ola medio: Media aritmética de los datos de períodos de ola registrados.

Período de ola un medio ($T_{1/2}$): es el promedio de los periodos asociados al 50 % de las olas más altas de un registro.

Período de ola un tercio ($T_{1/3}$): es el promedio de los períodos asociados al 33 % de las olas más altas de un registro.

Período de ola un décimo ($T_{1/10}$): es el promedio de los períodos asociados al 10 % de las olas más altas de un registro.

REALCO: canal con paredes convergentes y fondo con pendiente hacia la convergencia de las paredes, que simula una pirámide cuadrangular en posición horizontal.

Rebase: Caudal de agua que logra cruzar una barrera sólida en la orilla del mar (Alatorre, 2003).

Reflexión del oleaje: proceso mediante el cual la energía de la ola es retornada hacia el mar (CEM, 2003).

Refracción del oleaje: proceso mediante el cual las olas cambian de dirección como resultado de la interacción con los contornos batimétricos en aguas someras. La parte de la ola que avanza en aguas más bajas se mueve más lentamente que la parte que todavía se mueve en aguas más profundas, causando que las crestas de las olas adopten la configuración de los contornos batimétricos del fondo (CEM, 2003).

Runup: distancia vertical por encima del nivel medio del mar que el agua recorre sobre la pendiente de alguna estructura debido a la acción del oleaje (Mosso Aranda, 2004).

Setup de ola: sobreelevación de la superficie del agua, sobre la elevación normal de surgencia, debido al transporte en masa de agua hacia la costa por la acción del oleaje (CEM, 2003).

Velocidad de fase: Velocidad a la que se desplaza la ola, generalmente medida en un punto de esta, ya sea su cresta o su valle (Stewart, 2000). Su unidad de medida es el metro por segundo (m/s).

Velocidad de grupo: Velocidad a la que un grupo de olas viaja en el océano, generalmente asociada a olas que tienen períodos y longitudes de onda semejantes.

ANEXO 2: Especificaciones del WTR-9.

Profundidad máxima de emplazamiento: 60 m

Profundidad de emplazamiento recomendada: menores a 15 m

Temperatura de operación: -2.5 a 35°C.

Temperatura de almacenamiento: -30 a 40°C

Frecuencia de muestreo de olas: 1 Hz/2 Hz (default 2 Hz)

Número de muestras: 256, 512 o, por defecto, 1024

Parámetros de salida:

- Canal 1 Referencia.
- Canal 2 Temperatura:
Tipo de sensor: Termistor *Fenwall* GB32JM19.
Precisión: $\pm 0.1^\circ\text{C}$
Resolución: 0.04°C
Rango: -2.5 to $+35^\circ\text{C}$
Tiempo de respuesta: 30 s.
- Canales 3 y 4 Presión hidrostática:
Definida como: Promedio de los 80 últimos registros de presión medidos en series de tiempo de 512 segundos a 2 Hz.
Tipo de sensor: Sensor de presión de cuarzo basado en un oscilador de presión controlada; frecuencia entre 30 – 45 kHz.
Puerto de entrada (Nivel de referencia): 8 mm por encima del tope del casco.
Rango: 0-690kPa¹⁾ (aproximadamente 0 - 60m de profundidad)
Precisión: $\pm 210\text{Pa}$
Resolución: 7Pa (aproximadamente 0.07 cm)
- Canal 5 Altura de ola significativa, Hm0:
Basada en: series de tiempo de 512 segundos muestreadas a 2Hz.
Resolución: 2.0 cm
Rango: 0-20 m
- Canal 6 Periodo medio de cruce por cero, Tm02:
Basada en: series de tiempo de 512 segundos muestreadas a 2Hz.
Resolución: 0.02s
Rango: 0 - 20s
- Canal 7 Altura de ola máxima, E [Hmax]:
Basada en: series de tiempo de 512 segundos muestreadas a 2Hz.
Resolución: 2.5cm
Rango: 0 - 25m
Intervalos de grabado: Elegible, 0.5, 1, 2, 3, 6, 12 ó 24 horas, o inicio remoto.²⁾
Estabilidad: ± 2 segundo por día dentro de 0 a 20°C.

1) Sobrepresión es 1.5 x rango

2) En inicio remoto, el instrumento mide continuamente y cuando el pulso de inicio remoto es recibido, el último dato calculado es transmitido.

ANEXO 3: Especificaciones del sensor de presión U20-001-01.

Mediciones de presión:

Rango de Operación: 0 a 270 kPa (0 a 30 psi); aproximadamente 0 a 9 metros (0 a 30 pies) de profundidad del agua al nivel del mar, o 0 a 12 metros (0 a 40 pies) de agua a 3,000 metros (10,000 pies) de altitud.

Rango de Calibración de Fábrica: 69 a 270 kPa (10 a 30 psi), 0° a 40 °C (32° a 104°F).

Presión de rotura: 310 kPa (45 psi) o 18 metros (60 pies) de profundidad.

Precisión del nivel del agua: Error típico: $\pm 0.05\%$ FS, 0.5 cm (0.015 pies) de agua.
Error máximo: $\pm 0.1\%$ FS, 1.0 cm (0.03 pies) de agua.

Precisión de presión sin refinar: $\pm 0.3\%$ FS, 0.62 kPa (0.09 psi) de error máximo.

Resolución: <0.02 kPa (0.003 psi), 0.21 cm (0.007 ft) de agua.

Tiempo de respuesta de la presión: <1 segundo; la precisión de las mediciones también depende del tiempo de respuesta de la temperatura.

Mediciones de Temperatura:

Rango de operación: -20° a 50°C (-4° a 122°F)

Precisión: $\pm 0.44^\circ\text{C}$ from 0° to 50°C ($\pm 0.79^\circ\text{F}$ from 32° to 122°F).

Resolución de precisión: 0.10°C at 25°C (0.18°F at 77°F).

Tiempo de respuesta (90%): 5 minutos en agua (típico).

Estabilidad: 0.1°C (0.18°F) por año.