



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA SERIES DE TIEMPO DEL NIVEL DEL MAR EN
LA ESTACIÓN HIDROBIOLÓGICA DE TURPIALITO, GOLFO DE CARIACO,
ESTADO SUCRE, VENEZUELA
(Modalidad: Trabajo de Grado)

ELENA CAROLINA HERNÁNDEZ ANDRADE

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN FÍSICA

CUMANÁ, 2012

ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA SERIES DE TIEMPO DEL NIVEL DEL MAR EN
LA ESTACIÓN HIDROBIOLÓGICA DE TURPIALITO, GOLFO DE CARIACO,
ESTADO SUCRE, VENEZUELA

APROBADO POR:

Prof. Glenys Hernández.
Asesor

Prof. Luis Daniel Beauperthuy.
Jurado Principal

Prof. Julián Castañeda.
Jurado Principal

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por darme la vida y brindarme la fortaleza necesaria para vencer los obstáculos en momentos de debilidad.

A mi madre Yolanda Andrade, quien con su espíritu luchador, emprendedor y amoroso me motivó a combatir y ganar en esta batalla, a combatir por este sueño que hoy se hace realidad. Eres todo lo que un hija puede esperar de una madre. Gracias por el gran apoyo y amistad incondicional. ¡Te Amo Madre!

Mis hermanas Rosilennys y Katherine, por más que su apoyo, comprensión y paciencia, siempre creyeron en mí.

Con cariño a mis padres Oswaldo Hernández y Francisco López; de quienes aprendí que las metas se logran con constancia, dedicación y perseverancia. A ustedes como reconocimiento de su ejemplo y sacrificio.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora MSc. Glenys Hernández, quien con sus consejos, orientaciones, dedicación, paciencia y apoyo fue pieza fundamental para la realización de este trabajo. Convirtiéndose más que en mi asesora de tesis en una buena amiga.

A mis maestros en el transcurso de mis estudios, muy en especial al Dr. Ángel Betancourt, por su apoyo, gran calidad a la hora de enseñar y disposición a ocupar un espacio en el Laboratorio de Física Teórica Computacional. Al profesor Luis A. Lameda, Ney Luiggi, Ramón López, María Valera, Simón Santos, por ser tan buenos maestros, reciban aparte de mi inmensa gratitud y profunda admiración.

Al profesor Dr. Antonio Quintero del Departamento de Oceanografía del Instituto Oceanográfico de Venezuela (IOV) por su amplia colaboración.

Al personal docente, administrativo y obrero del Departamento de Física, especialmente a la Sra. Nelly Restrepo, quien fue muy servicial en todo momento.

A mis amigos y compañeros, Kilver Campos, José Zabala, María G. Linares, Tomás García, José Lista, Ronald Romero, Antonio Luigi, Jesús López, María G. Figueras, Diego Subero, Eduardo Castillo, Rufino Valladares, Robinson Carreño, Pabel Machado, Ernesto Esparragoza, Pablo Guzmán; en especial a Luis Miguel Bastardo, quien en todo momento me impulsó a seguir y a no dejar de creer.

Al T.S.U. Antonio Benítez, que con su gran dedicación fue parte fundamental en la realización de este trabajo, pero sobre todo quisiera agradecer su gran cariño, amor y apoyo a lo largo de todo este camino. ¡A ti mil gracias!

“Con paciencia y perseverancia también se puede”

ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE TABLAS	VII
LISTAS DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO I	0
MARCO TEÓRICO	0
FUERZAS GENERADORAS DE MAREAS	0
Sistema Tierra-Luna (T-L).....	0
Sistema Sol-Tierra (S-T).....	6
COMPONENTES ARMÓNICOS DE LAS MAREAS	7
TIPOS DE MAREA.....	9
Mareas Semidiurnas.....	10
Mareas Diurnas	11
Mareas Mixtas.....	11
DINÁMICA DE MAREAS	12
MAREAS EN GOLFOS.....	14
Efecto de Coriolis en el Golfo	17
Efectos de Fricción en el Golfo	18
ANÁLISIS ARMÓNICO DE LAS MAREAS	19
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LAS MAREAS.....	22
AGENTES PERTURBADORES DE LAS MAREAS.....	23
CAPITULO II	26
METODOLOGÍA	26
ÁREA DE ESTUDIO	26
Morfología Submarina.....	27
Aspectos Hidrográficos.....	27
Aspectos Climatológicos	27
Régimen de escurrimiento de los ríos.....	28
Circulación y renovación de aguas	29
RECOLECCIÓN DE DATOS.....	29
Mareógrafo Valeport Modelo 740.....	30

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.....	31
CAPITULO III.....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
CLASIFICACIÓN DE LA MAREA.....	32
IDENTIFICACIÓN DE CONSTITUYENTES DE MAREA.....	33
PREDICCIÓN DE LA MAREA.....	36
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	46
GLOSARIO.....	50
ANEXO.....	5
HOJA DE METADATOS.....	7

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características de las principales componentes de las ondas de mareas (Pond y Pickard, 1983).	25
Tabla 2. Tipos de Mareas.	29
Tabla 3. Constituyentes de mareas en la bahía de Turpialito.	52
Tabla 4. Fases de la Luna durante los meses de marzo, abril y mayo de 2011.	56

LISTAS DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Distribución espacial de los tipos de mareas en el Mar Caribe (Kjerfve, 1981).	13
Figura 2. Red mareográfica de Venezuela (Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, 2003).	15
Figura 3. Dirección de fuerzas F_a , F_c y F_m	18
Figura 4. Componentes de la fuerza de marea (f_m) en un punto P de la superficie de la Tierra.	19
Figura 5. Ubicación del apogeo y perigeo en la órbita de la Luna alrededor de la Tierra.	22
Figura 6. Ubicación del apogeo y perigeo en la órbita de la Tierra alrededor del Sol.	23
Figura 7. Mareas Vivas y Muertas.	26
Figura 8. Tipos de mareas: (a) Marea Diurna, (b) Marea Semidiurna, (c) Marea Mixta.	27
Figura 9. Mareas cooscilantes en un golfo estrecho.	32
Figura 10. Efecto de Coriolis en un golfo estrecho.	34
Figura 11. Diagrama del funcionamiento del un mareógrafo de presión.	40
Figura 12. Localización del área de estudio, Bahía de Turpialito, Golfo de Cariaco.	43
Figura 13. Mareógrafo Valeport modelo 740.	47
Figura 14. Variación del nivel de marea en la bahía de Turpialito.	50
Figura 15. Identificación de componentes significativos en la serie de tiempos de marea en la bahía de Turpialito.	53
Figura 16. Fase de los armónicos encontrados en la serie de tiempos de marea en la bahía de Turpialito.	54
Figura 17. Comparación de serie de tiempo de observaciones y predicciones en la bahía de Turpialito.	55
Figura 18. Residual de la serie de tiempo entre la marea observada y la predicha en la bahía de Turpialito.	57
Figura 19. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 21 al 23 de marzo de 2011.	58
Figura 20. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 19 al 22 de abril de 2011.	58
Figura 21. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 04 al 07 de marzo de 2011.	59
Figura 22. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 18 al 20 de marzo de 2011.	59

Figura 23. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 30 de marzo al 02 de abril de 2011.	60
Figura 24. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 26 al 29 de abril de 2011.	60
Figura 25. Celeridad del viento en la bahía de Turpialito. Periodo a partir del 07 de marzo al 08 de abril de 2011.	61

RESUMEN

En este trabajo se determinan el régimen de mareas, las constituyentes mareales armónicas y no-armónicas en la bahía de Turpialito, Golfo de Cariaco, Venezuela. Se realizaron mediciones horarias del nivel del mar con un mareógrafo Valeport model 740 entre el 01 de marzo y 04 de mayo de 2011. Los resultados muestran la presencia de un régimen de mareas mixto con predominio diurno, amplitud máxima de 34,62 cm. Se determinó un bajo coeficiente de amplitud como medida de la distorsión de la componente mareal semidiurna, lo cual revela la influencia del efecto de las aguas someras en la bahía. Las mayores amplitudes fueron registradas cuando se observó una combinación entre la fase de Luna llena y la prolongación de los vientos en la zona, mientras las menores amplitudes fueron registradas durante la fase Cuarto Creciente; demostrando con esto que el comportamiento de la marea es cooscilante. Más del 80% de la energía de la onda de marea es aportada principalmente por 4 (K_1 , O_1 , M_2 y N_2) de los 35 componentes armónicos obtenidos en el análisis.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la superficie de la Tierra está cubierta por agua, y ésta cubre las depresiones de la corteza terrestre formando los mares y océanos, ocupando siete de diez partes de la superficie del planeta. Estas grandes masas de aguas están sometidas a movimientos ondulatorios continuos de diversas naturalezas, siendo los principales: las olas, las mareas y las corrientes marinas.

El rítmico subir y bajar del nivel del mar indica el paso de una verdadera onda que denominan *mareas*, las cuales son definida como las variaciones periódicas que se producen como resultado de las fuerzas actuantes sobre la Tierra. Estas son las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol y la fuerza centrípeta debida a la rotación que experimenta nuestro planeta; que según estos cuerpos celestes al cambiar sus posiciones relativas provocan la deformación de la circunferencia teórica de los océanos, dando lugar a la pleamar o marea alta y a la bajamar o marea baja.

El primer estudio científico correcto y completo sobre el comportamiento de las mareas lo desarrolló Isaac Newton en 1687, en su obra *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*. En esta obra Newton, con su ley de Gravitación Universal, calculó la altura de la marea según la fecha del mes, la época del año y la latitud. Sin embargo, en muchos de sus estudios considera que las mareas representan un equilibrio y no tomó en cuenta que las mareas representan un fenómeno dinámico; hecho que le dio paso al sabio Simón Laplace quién en su obra *Mecánica Celeste* (publicada en 5 volúmenes, entre 1799-1825) complementó las teorías de Newton (Von Arx, 1962).

Posteriormente muchos investigadores han colaborado con trabajos para el conocimiento de las mareas entre ellos los de Rémi Chazallon, que en 1839 publicó el primer Anuario de mareas de las costas de Francia utilizando los primeros mareógrafos que probablemente se inventaron en 1850; pero es a Lord Kelvin a quien se le atribuye

la invención del mareógrafo, y el primero en proponer el análisis de armónicos de las mareas alrededor del año 1867 (Emery y Thomson, 2004).

Adicional, factores no astronómicos, tales como la configuración de la costa, la profundidad local del agua, la topografía del fondo oceánico y de otras influencias hidrográficas y meteorológicas atribuidas a presiones atmosféricas, desempeñan un importante papel en el surgimiento de las mareas.

Debido a todos estos factores que influyen en el origen de las mareas, se desglosan diversos tipos de estas, como lo son las vivas y muertas, asociadas solamente a los factores astronómicos, despreciándose los continentes, el giro de la Tierra, entre otros. Llamándose a la apreciación de todos estos aspectos como teoría de equilibrio. Las mareas diurnas, semidiurnas y mixtas, son atribuidas a la dinámica que experimenta nuestro planeta (como la existencia de los factores atmosféricos).

Otro factor importante que influye en el aumento del nivel medio del mar es el cambio climático. En respuesta al aumento de “gases invernadero” en la atmósfera, la temperatura media global del aire está ascendiendo. Como resultado, el volumen de las capas heladas de la Tierra decrece, mientras el contenido de calor de los océanos se incrementa. Así, el nivel medio del mar global aumenta por la expansión termal de los océanos y por el deshielo de las capas polares y glaciares. En la actualidad, la tasa de ese aumento se ha acelerado (Acuña, 2011).

El estudio de las mareas tiene gran relevancia científica debido a su importancia fundamental como mecanismo de mezcla horizontal y vertical sobre la plataforma continental en cuerpos de agua costero como golfos, bahías y estuarios. Aunque en estos tipos de cuerpos de agua semicerrados las mareas tienen un doble origen (Pelegrí y Ávila, 1986).

Desde finales de los años 60 se han realizados estudios de las principales características de las mareas en la costa de Venezuela. A continuación se mencionan los más relevantes: entre los investigadores pioneros podemos citar a Gade (1961a) quien realizó

medidas del nivel del mar en el Golfo de Cariaco con la ayuda de una regla, que sólo le arrojó valores del nivel para periodos más largos dentro del rango de los 50 cm de amplitud y las variaciones diarias era inferior a los 25 cm, lo que dedujo que las mareas para la región son pequeñas.

Redfield (1961) describe el sistema de mareas en el Lago de Maracaibo y deduce que debido a sus dimensiones las componentes diurnas prevalecen, es decir, los cambios del régimen de mareas es mixta diurna, semidiurna en la región central y diurna en el extremo sur.

Para la Fosa de Cariaco, Febres y Herrera (1975) realizaron estudios sobre algunas de las características oceanográficas, quienes por medio de la estimación de las celeridades medias de las corrientes de marea, llegaron a afirmar que para la región las mareas son diurnas mixtas con componentes semidiurnos relativamente importantes.

Uno de los primeros en hacer el estudio de mareas en el Mar Caribe (MC) es Kjerfve (1981), quién estima que para la zona costera de nuestro país, las mareas son de poca amplitud y muestran una transición gradual, variándose desde mixta diurna (MD), diurna (D) y mixta semidiurna (MS), como se muestra en la figura 1.

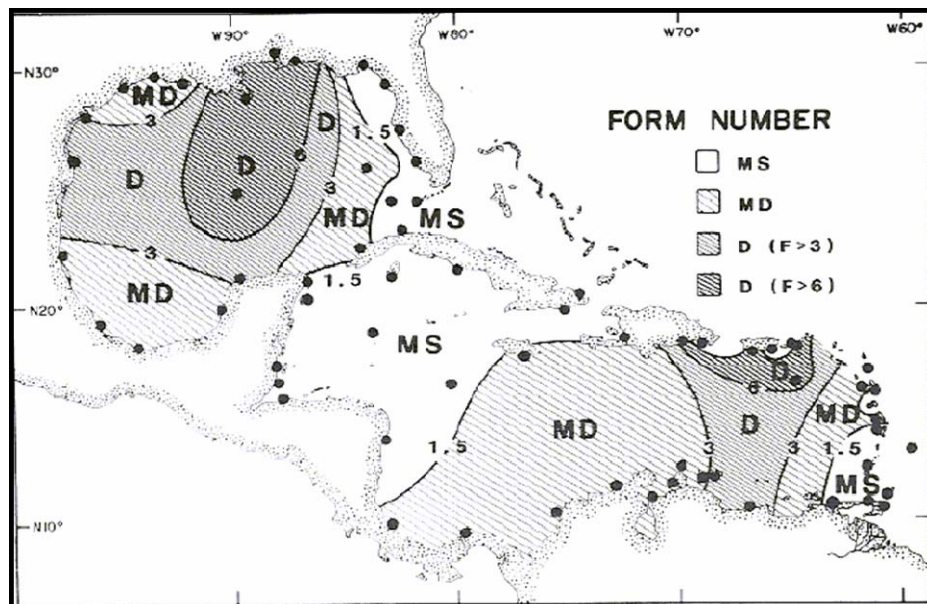


Figura 1. Distribución espacial de los tipos de mareas en el Mar Caribe (Kjerfve, 1981).

Otro trabajo relevante del estudio de mareas en aguas venezolanas y ampliación hacia la región del Delta del Orinoco, fue realizado por Herrera, *et al.*, (1981), quienes encontraron que el carácter la marea es semidiurno en la zona. Estudios hechos por Martín, *et al.*, (2007) a través de Petróleos de Venezuela S.A. en la misma región, confirman que las mareas son del tipo semidiurno.

Peligrí y Ávila (1986), realizan estudios de mareas en los golfos de Venezuela y Paria, dedujeron que las mareas en el Golfo de Venezuela son claramente del tipo diurno, mientras que para el Golfo de Paria es del tipo mixto semidiurno. Este tipo de mareas prevalece en el Golfo de Paria, según Incostas (1996), pues reportan que el movimiento de las masas de agua en la costa norte del golfo depende del ciclo de mareas, y estas son del tipo mixto con predominio hacia la semidiurna.

Para un periodo de observación de la variación del nivel del mar desde julio 2000 a enero 2002 en el sistema costero del Parque Nacional Morrocoy, Solana, *et al.*, (2004) indica que la marea es mixta predominantemente diurna y de pequeña amplitud (menor a 1,0 m).

Antonius (1980), reporta que el rango de marea es bajo variando solamente entre 10 y 20 cm, para la localidad de Puerto Sucre, Cumaná. Sin embargo Aparicio (2003) reporta para la misma localidad, con datos para un periodo de 25 años (1953 a 1977), que la variabilidad del nivel medio del mar, revela una señal claramente estacional, presentándose los valores máximos durante el lapso agosto-noviembre y los valores mínimos durante el periodo febrero-marzo; alcanzándose una amplitud de 18,28 cm.

Castañeda, *et al.*, (2011) estudian la dinámica marina en las adyacencias de Guaca, Estado Sucre y reportan que la marea para esta zona es de tipo mixta, con predominio de los constituyentes diurnos.

En su estudio por medio de altimetría satelital, Acuña (2011) muestra que la tasa de aumento del nivel del mar, promedio para el Caribe Oriental, se estima en $(3,13 \pm 0,29)$ mm/año, variando en la costa de Venezuela entre los 2 y 5 mm/año.

Debido a que las aguas costeras de Venezuela están situadas en su mayor parte dentro del Mar Caribe suroriental y en menor grado en el Océano Atlántico Adyacente; a todo lo largo del sector caribeño venezolano, las mareas reflejan las condiciones que existen en el Mar Caribe, con variaciones locales inducidas principalmente por la topografía. En general, los componentes diurnos predominan hacia el oeste, mientras que los componentes semidiurnos aumentan hacia el este y eventualmente llegan a ser los más importantes (Herrera, *et al.*, 1981).

Aunque el nivel medio del mar (NMM) en nuestro país ha sido determinado a partir de los registros tomados en las estaciones mareográficas localizadas en diferentes sitios de la costa; las cuales están constituidas por siete estaciones (Figura 2): Amuay, Puerto Cabello, Carúpano, Cumaná, Punta de Piedras, Puerto de Hierro y La Guaira (González y Molero, 2005), existen una escasez de registros de la variabilidad del nivel del mar en varias zonas y en la mayoría de las localidades se realizan extrapolaciones para poder caracterizar la marea de esos puntos. Las mediciones del nivel de mar en los distintos golfos de nuestro país no han escapado al interés de la comunidad científica, a la industria petrolera y al gobierno nacional, entre ellos el Golfo de Venezuela, Golfo Triste y el Golfo de Paria. Pero el Golfo de Cariaco (GC) ha escapado a esa atención, y por ellos el estudio de la marea en él, ha sido escasa o nula.



Figura 2. Red mareográfica de Venezuela (Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, 2003).

La poca información disponible sobre mareas en el GC proviene de la falta de una estación mareográfica en el interior del golfo, pues no se dispone de observaciones directas del comportamiento de marea en la región. Por tanto, poco se sabe acerca de las corrientes de marea, de las interacciones no lineales que probablemente ocurran en la zona como consecuencia de la interacción con el fondo y la compleja línea de costa, ni de la disipación energética en el área; conocimientos que son importantes para el ecosistema, la actividad económica de la región y de gran interés a la comunidad

El objetivo principal de este trabajo es realizar medidas del nivel del mar, para así estudiar las variaciones, en fase y amplitud, de las componentes de mareas usando el método de la descomposición en armónicos para conocer su comportamiento; donde se considera que el nivel de mar como un oscilador que es sometido a una fuerza externa inducida por la atracción gravitacional de la Luna y el Sol, y las componentes aleatorias que en su mayoría son producidas por los eventos atmosféricos como lo son: las

corrientes de viento, la precipitación y la temperatura; pues al adicionar estas consideraciones pueden hacer que las mareas no tengan una mejor representación.

Además se desarrolló un programa que permite realizar el análisis de la señal, brindando la posibilidad de calcular las principales constituyentes de mareas, hacer la predicción de series y comparar el comportamiento de la marea con los aspectos meteorológicos en la Bahía de Turpialito, para así hacer una aproximación en el Golfo de Cariaco, Estado Sucre, Venezuela.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo I se explica el fundamento teórico necesario para apoyar la realización de este trabajo. En el Capítulo II se describen los procedimientos metodológicos seguidos para la adquisición de los datos de nivel del mar. En el Capítulo III se presentan y analizan los resultados obtenidos. Finalmente en el Capítulo IV se exponen las conclusiones más relevantes logradas en este estudio y su importancia en la oceanografía regional.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

FUERZAS GENERADORAS DE MAREAS

El fenómeno de las mareas es gobernado por la teoría de Gravitación Universal, que fue explicada por Sir Isaac Newton en 1687; donde establece que “*toda partícula material del universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza directamente proporcional al producto de las masas de ambas partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa*”, expresada como (Díaz, 2009):

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

donde:

F_g : Fuerza de atracción gravitatoria sobre cada partícula (N).

m_1 y m_2 : Masas de las partículas (kg).

r : Distancia que las separa (m).

G : Constante de Gravitación Universal ($6,67 \times 10^{-11} \left(\frac{N \cdot m^2}{kg^2} \right)$).

Esta fuerza actúa en la línea que une a ambas partículas y está dirigida hacia la partícula que ejerce la atracción; si los cuerpos son esféricos la atracción global es la misma que si toda la masa de los dos cuerpos estuviera concentrada en sus respectivos centros. Newton logró establecer que las mareas son producto de la atracción gravitacional que ejerce nuestro satélite natural (Luna) y el Sol sobre la Tierra; aunque este análisis es simplista, debido a que ilustra cómo se producen las mareas para un planeta cubierto con toda su superficie de agua y con simetría perfectamente esférica, siendo conocido este análisis con el nombre de mareas en equilibrio.

Sistema Tierra-Luna (T-L)

Vamos a considerar a la Tierra y a la Luna como un sistema independiente, existiendo entre ellas una fuerza de atracción gravitacional que las mantiene unidas. A causa de esta

fuerza principal ambos cuerpos orbitan uno alrededor del otro, siguiendo aproximadamente una trayectoria circular, permitiéndoles girar en torno a su centro de gravedad y experimenta con este movimiento una frecuencia angular común (ω), para diferentes puntos ubicados sobre la superficie terrestre.

La fuerza de atracción en este sistema proporciona también una fuerza centrífuga (f_c) responsable del movimiento circular y además una fuerza de atracción lunar (f_a). La diferencia entre ambas fuerzas (f_c y f_a), dan origen a las fuerzas generadoras de mareas, denotada como f_m ; es decir, ($f_m = f_c - f_a$). Esta fuerza de atracción entre ambos cuerpos celestes, varía según el punto donde se encuentre, más o menos cerca de la Luna y lleva la dirección de la línea que une cada punto con el centro de esta, ver figura 3.

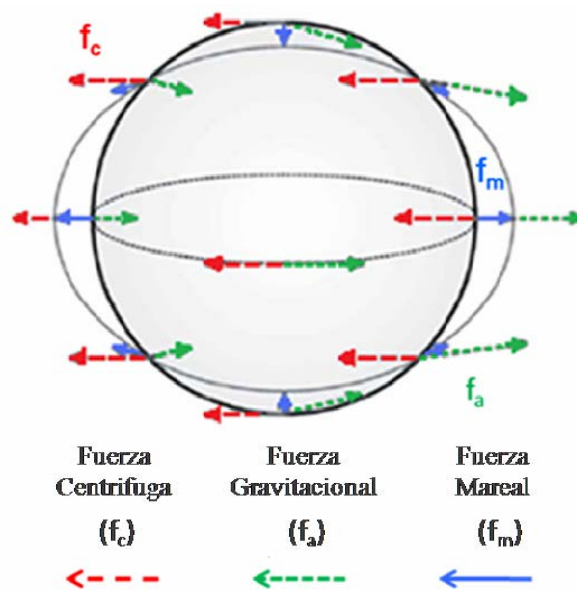


Figura 3. Dirección de fuerzas F_a , F_c y F_m .

Durante el movimiento del sistema (T-L), la Tierra es irrotacional y todas sus partículas describen órbitas del mismo tamaño, de manera que la fuerza centrífuga es igual en magnitud y dirección en cualquier punto de éste. Al mismo tiempo, las partículas terrestres experimentan fuerzas de atracción cuya magnitud y dirección dependen de sus posiciones relativas al satélite (declinación δ). Como consecuencia de su distinta

naturaleza, las fuerzas de atracción gravitacional y la centrífuga no están balanceadas en todos los puntos de nuestro planeta.

En la figura 4, se observa que para este sistema, en un punto (P) sobre la superficie de la Tierra, la fuerza generadora de marea sobre una partícula de masa unitaria, se descompone en una componente según su eje normal a la superficie de la Tierra (f_{vL}) y otra componente tangente a la misma (f_{hL}), expresada modulada como según Schureman (1988):

$$f_{vL}(P) = G \frac{M_L a}{d_L^3} [3 \cos^3 \theta_L - 1] + \frac{3}{2} G \frac{M_L a^3}{d_L^5} [3 \cos^3 \theta_L - 3 \cos \theta_L] \quad (2)$$

$$f_{hL}(P) = \frac{3}{2} G \frac{M_L a}{d_L^3} [\sin 2\theta_L] + \frac{3}{2} G \frac{M_L a^3}{d_L^5} [3 \cos^2 \theta_L - 1] \sin \theta_L \quad (3)$$

donde:

- M_L : Masa de la Luna ($7,349 \times 10^{22}$ Kg).
- d_L : Distancia entre los centro de la Luna y la Tierra.
- a : Radio de la Tierra.
- θ_L : Distancia cenital de la Luna.
- d_P Distancia entre el punto P y el centro de la Luna.

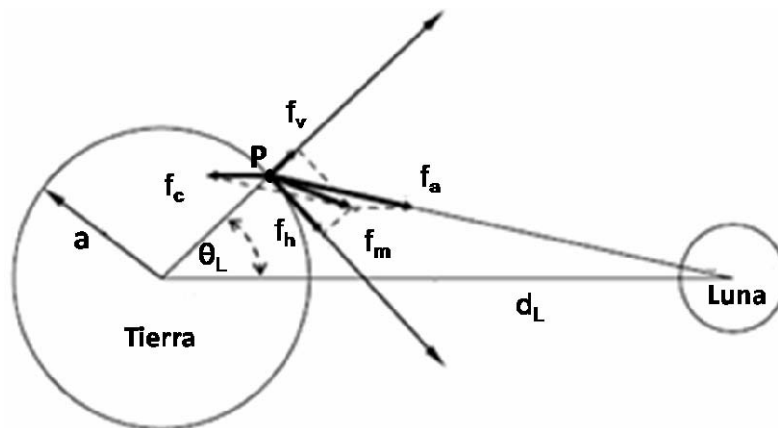


Figura 4. Componentes de la fuerza de marea (f_m) en un punto P de la superficie de la Tierra.

Debido a la consideración de que Tierra tiene forma esférica, puede descomponer la fuerza residual o generadora de marea en el punto P; como, una componente radial (f_r) (Díaz, 2009):

$$f_r(P) = G \frac{M_L}{d_P^2} (d_L \cos \theta_L - a) - G \frac{M_L}{d_P^2} \cos \theta_L \quad (4)$$

y una componente tangencial (f_t):

$$f_t(P) = G \frac{M_L}{d_P^2} (d_L \sin \theta_L - a) - G \frac{M_L}{d_P^2} \sin \theta_L \quad (5)$$

Para un desarrollo más sencillo de las fuerzas generadoras de marea, se utiliza el concepto de potencial gravitacional de un cuerpo. El potencial sobre un punto P sobre la superficie de la Tierra, debido a la Luna es:

$$\phi_L = -\frac{GM_L}{d_P} \quad (6)$$

Por convención en geodesia, la ecuación (6) se considera positiva. La ventaja de esta convención es que un incremento en el potencial gravitatorio sobre la superficie de la Tierra produce un incremento del nivel del mar, según Garland 1965 (Pugh, 1987).

Las fuerzas generadoras en P se pueden expresar como el gradiente de una función escalar o potencial ϕ_L , que satisface la ecuación de Laplace. La solución de esta ecuación para el potencial de marea en coordenadas esféricas queda expresada en función de polinomios de Legendre (Pugh, 1987):

$$\phi_L = -G \frac{M_L a^2}{d_L^2} \left[P_0(\cos \theta) + \frac{a}{d_L} P_2(\cos \theta) + \frac{a^2}{d_L^2} P_4(\cos \theta) + \dots \right] \quad (7)$$

donde:

ϕ_L : Potencial productor de marea.

$P_n(\cos \theta)$: Armónicos o coeficientes de Legendre.

Si desarrollamos la ecuación (7):

$$\text{Para } n=2: \quad P_2(\cos\theta) = \frac{1}{2}(3 \cdot \cos^2\theta - 1)$$

$$\text{Para } n=3: \quad P_3(\cos\theta) = \frac{1}{2}(5 \cdot \cos^3\theta - 3 \cdot \cos\theta)$$

$$\text{Para } n=4: \quad P_4(\cos\theta) = \frac{1}{8}[35 \cdot \cos^4\theta - (30 \cdot \cos^2\theta) + 3], \text{ etc ...}$$

El primer término de la ecuación (7) es el más influyente en el potencial generador de mareas, los demás términos pueden ser despreciados y esto se debe a que la razón a/d_L es pequeña. De esta forma, el potencial generador de marea efectivo se expresa como:

$$\phi_L = -\frac{1}{2}G \cdot M \frac{a^3}{(d_L^2)(3 \cdot \cos^2\theta - 1)} \quad (8)$$

Ahora, sabiendo que la fuerza es el opuesto al gradiente de la función de potencial gravitatorio, evaluando el gradiente y usando coordenadas esféricas, las componente radial y tangencial, se pueden expresar:

$$f_r = -\frac{\partial\phi_L}{\partial a} = 3g \frac{M_L}{M_T} \frac{a^3}{(d_L^2)(\cos^2\theta - \frac{1}{3})} \quad (9)$$

$$f_\tau = -\frac{1}{a} \frac{\partial\phi_L}{\partial\theta} = -\frac{3}{2} \cdot g \cdot \frac{M}{M_T} \frac{a^3}{(d_L^2)(\sin 2\theta)} \quad (10)$$

donde:

g : Aceleración de gravedad terrestre ($9,8 \text{ m/s}^2$).

M_T : Masa de la Tierra ($5,98 \times 10^{24} \text{ Kg}$).

Las ecuaciones (9) y (10) describen el movimiento de las fuerzas generadoras de marea ejercidas por la Luna sobre la superficie de la Tierra. Las componentes verticales de las fuerzas producen pequeños cambios en el peso de un cuerpo, y la componente horizontal

de la fuerza también denominada “fuerzas tractivas” produce aceleraciones necesarias para desplazar las masas de agua.

Otro factor que influye en este sistema (T-L), es la órbita que describe la Luna alrededor de nuestro planeta, esta no es circular sino elíptica y presenta una cierta excentricidad con respecto a la Tierra. Esto hace que la distancia al satélite vaya variando y repercute en las fuerzas generadoras de marea, produciéndose una mayor marea cuando está más cerca de la Tierra (Perigeo). Por el contrario las mareas serán menos intensas cuando la Luna está más alejada de la Tierra (Apogeo). La periodicidad de esta variación es de 27,5 días (periodo de tiempo entre dos perigeos) correspondiente a una vuelta. Estos fenomenos se pueden apreciar en la figura 5.



Figura 5. Ubicación del apogeo y perigeo en la órbita de la Luna alrededor de la Tierra.

Hasta ahora se ha supuesto para la ubicación del apogeo y perigeo, que la órbita lunar está contenida en el plano ecuatorial de la Tierra, así como el eje perpendicular de nuestro planeta con el plano de traslación de la misma. Pero en realidad el plano de rotación lunar alrededor de la Tierra tiene una inclinación de 5° con respecto al plano de traslación de nuestro planeta alrededor del Sol, de manera que describe un lento movimiento rotatorio alrededor de la Tierra en 18,6 años (Grobas, 2003). Alcanzando la Luna una máxima declinación de $28,5^\circ$. Es decir, en 1 mes la Luna recorre un ángulo de 57° . Este efecto de inclinación, causa cambios en las mareas, pasando así de una marea muy alta, a una marea baja y hasta una marea más baja, generándose un periodo de la marea lunar de 24 h 50 min y de 24 h para el día solar.

Sistema Sol-Tierra (S-T)

El Sol como astro rey de nuestro sistema solar, también ejerce una atracción gravitacional sobre las partículas de la Tierra, y a pesar de ser casi 27 millones de veces más masivo que la Luna, nuestro satélite natural está 387 veces más cercana que el Sol, y debido a esto la contribución del Sol es tan sólo el 46% de la Luna.

El eje de rotación de la Tierra se encuentra inclinado $23,5^\circ$ con respecto al plano perpendicular de traslación de nuestro planeta alrededor del Sol. Esto provoca una declinación máxima del Sol con respecto al Ecuador de la Tierra de $23,5^\circ$ durante los solsticios de verano e invierno en el hemisferio norte, de manera que en 1 año el Sol recorre un ángulo de 47° , con lo que el periodo de este movimiento es de medio (1/2) año.

La Tierra gira alrededor del Sol con una órbita elíptica y excéntrica, experimentando lejanía y cercanía al astro rey; cuando se encuentra más cerca de éste (Perigeo) las fuerzas generadoras de marea producen mareas más intensas. De igual modo, existe una máxima distancia de la Tierra al Sol (Apogeo) en la que las mareas son menores (Figura 6).

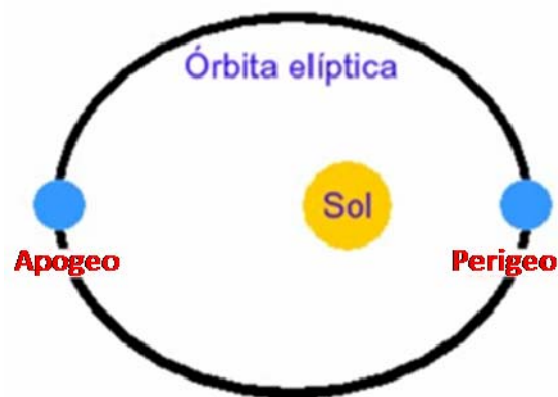


Figura 6. Ubicación del apogeo y perigeo en la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

Las expresiones de la fuerzas de marea presentadas hasta el momento para la Luna son aplicables a las mareas producidas por el Sol, simplemente se realizan unos ajustes a los

valores de la masa del Sol y a la distancia Sol-Tierra. Así por ejemplo, los valores máximos y mínimos de mareas debidas al Sol, se obtienen a partir de las ecuaciones (2) y (3), teniendo en cuenta que se desprecian los términos en donde la distancia media Sol-Tierra está elevada a la cuarta potencia. Quedando según su eje normal a la superficie de la Tierra (f_{vs}) y otro tangente a la misma (f_{hs}) (Schureman, 1988):

$$f_{vs}(P) = G \frac{M_S a}{d_S^3} [3 \cos^2 \theta_S - 1] r \quad (11)$$

$$f_{hs}(P) = \frac{3}{2} G \frac{M_S a}{d_S^3} [\sin 2\theta_S] r \quad (12)$$

donde:

- M_S : Masa del Sol ($1,9891 \times 10^{30}$ kg).
- d_S : Distancia entre los centro del Sol y la Tierra.
- a : Radio de la Tierra.
- θ_S : Distancia cenital del Sol.

COMPONENTES ARMÓNICOS DE LAS MAREAS

El estudio de funciones armónicas se hace utilizando medidas precisas del movimiento de los astros Luna y Sol sobre la Tierra; además se calcula la marea de equilibrio, que se define como la forma que adoptaría la superficie del agua si, en cada instante, las fuerzas de marea estuvieran en equilibrio con las fuerzas de gradientes de presión de la columna de agua. De este tratamiento Doodson en 1921 obtuvo 390 constituyentes (Godin, 1972). Esta marea teórica se puede escribir como:

$$h(t) = \sum_{i=0}^i b_i \cos(\omega_i t + (v_0 + u_i)) \quad (13)$$

Para la ecuación (13) se tiene:

$h(t)$ Componente armónica

- l : Número de frecuencias.
- ω_i : Frecuencia de la componente astronómica i .
- b_i : Amplitud asociada a la frecuencia ω_i .
- $(v_0 + u)_i$: Fase del argumento de la componente astronómica i en el tiempo t .

En la Tabla 1 se muestran los constituyentes astronómicos de las 11 ondas principales de marea deducidos de las fuerzas generadoras de mareas más importantes agrupadas por especies.

Tabla 1. Características de las principales componentes de las ondas de mareas (Pond y Pickard, 1983).

Especies y nombres	Símbolo	Periodo (horas solares)	Tamaño relativo
Componentes Semidiurnas:			
Lunar principal	M_2	12,42	100
Solar Principal	S_2	12,00	47
Gran elíptica lunar	N_2	12,66	19
Declinación luni-solar	K_2	11,97	13
Componentes Diurnas:			
Declinacion luni-solar	K_1	23,93	58
Lunar principal	O_1	25,82	42
Solar principal	P_1	24,07	19
Gran elíptica lunar	Q_1	26,87	8
Componente de Largo Período:			
Quincenal lunar	M_f	327,9	17
Mensual lunar	M_m	661,3	9
Semianual solar	S_{sa}	4383,0	8

La fórmula completa para el cálculo de la altura del nivel del mar tiene 93 componentes, pero en la práctica no es necesario calcularlas todas; es decir, con hayar de 8 a 11

componentes principales: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 y M_4 , es suficiente para representar el comportamiento de la variación de las masas de agua.

TIPOS DE MAREA

La respuesta del océano se manifiesta de diferentes formas frente a las fuerzas generadoras de mareas, distinguiéndose diferencias entre los niveles del mar (altas y bajas consecutivas) de magnitudes pequeñas, y son más influenciadas por las fases de la Luna que por la declinación de ésta. Las mayores mareas ocurren cuando la Luna y el Sol están en el mismo plano con respecto a la Tierra; es decir, cuando se está en presencia de Luna llena o nueva, a este tipo de mareas se le conocen como Vivas. Mientras que las menores mareas, llamadas también mareas Muertas, se producen en cuando la Luna está en cuartos (menguante y creciente), es decir la Luna y el Sol se encuentran en ángulo recto para producir estos cambios en las masas de aguas de nuestro planeta. Estos fenómenos se pueden observar claramente en la figura 7.

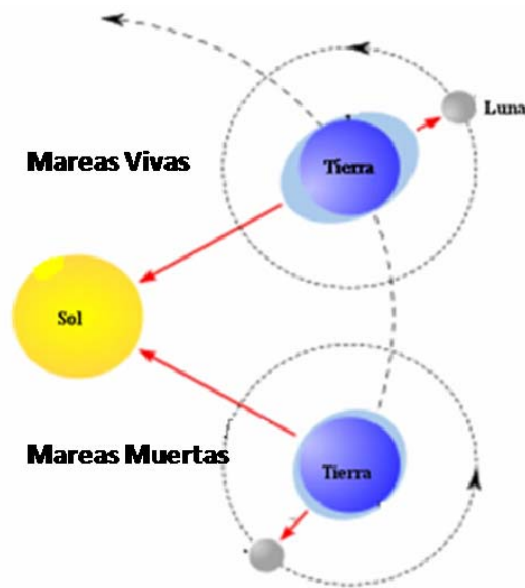
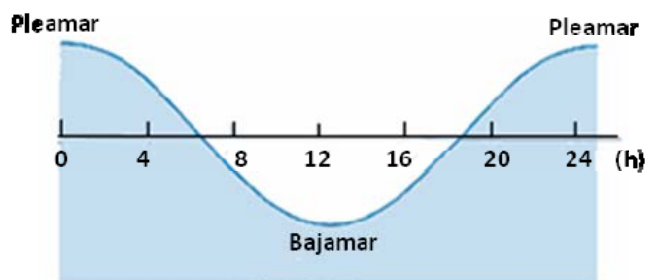


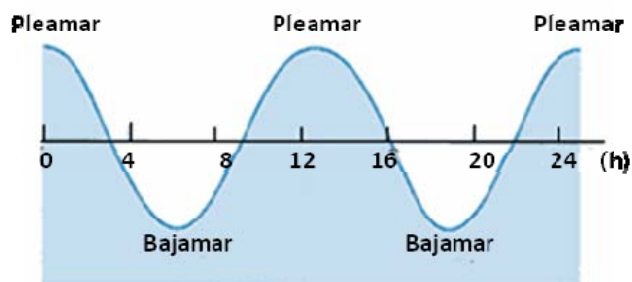
Figura 7. Mareas Vivas y Muertas.

Pero debido a la presencia de las barreras continentales en la Tierra se distinguen principalmente tres tipos de mareas, donde la frecuencia natural de la masa de agua es

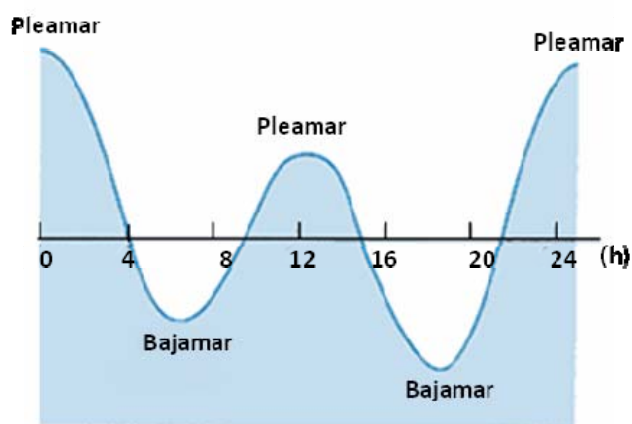
un factor decisivo en la respuesta que este tenga sobre las fuerzas generadoras de mareas. Como consecuencia las mareas son consideradas como diurnas, semidiurnas y mixtas (Figura 8).



(a) Marea Diurna



(b) Marea Semidiurna



(c) Marea Mixta

Figura 8. Tipos de mareas: (a) Marea Diurna, (b) Marea Semidiurna, (c) Marea Mixta.

Mareas Semidiurnas

Este tipo de mareas es generada principalmente por las componentes M_2 , S_2 y N_2 ; caracterizándose por tener dos pleamares o marea alta y dos bajamares o marea baja, aproximadamente iguales en un día lunar o día de marea (24 h y 50 min). La mayor parte de la costa Océano Atlántico presenta este tipo de elevaciones.

Mareas Diurnas

Generada principalmente por las constituyentes K_1 , O_1 , y P_1 ; presentan un pleamar y un bajamar cada día lunar. Estos cambios del nivel del mar ocurren en áreas cercanas al Ecuador, es decir entre los trópicos. Sin embargo, existen unas notables excepciones dependiendo de la batimetría local, como por ejemplo, en algunas zonas del Golfo de México.

Mareas Mixtas

En este caso la altura de marea presenta características comunes de los tipos diurnos y semidiurnos simultáneamente dando lugar a apreciables diferencias entre los niveles correspondientes a dos pleamares consecutivos o dos bajamares. Este tipo de mareas son comunes a lo largo del Pacífico de los Estados Unidos, Venezuela y en el Golfo de México.

Durante parte del mes lunar (intervalo de tiempo transcurrido entre dos Lunas nuevas consecutivas y su duración es algo mayor de 29 días), alrededor del momento que la Luna cruza el Ecuador (declinación pequeña), la marea es principalmente semidiurna. Cuando la declinación lunar está cercana a su valor máximo, las componentes diurnas pueden ser lo suficientemente importantes como para producir una pleamar y una bajamar diarias. Dando origen a las mareas del tipo mezclado o mixto.

En lugares donde las mareas pueden ser consideradas como semidiurnas, las componentes diurnas pueden ser notables cuando la declinación lunar es grande. Entonces se habla de una importante desigualdad diurna. Contrariamente, cuando la declinación lunar es cero, las mareas que son usualmente diurnas pueden tender a ser semidiurnas.

A causa de estas combinaciones, un criterio muy útil para caracterizar el régimen de las mareas de un lugar es calcular la razón de amplitudes de las principales constituyentes astronómicas de la marea, llamado Número de Forma o Factor de Courtier, de la forma siguiente:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (14)$$

En términos de F, las mareas pueden ser clasificadas aproximadamente como (Tabla 2):

Tabla 2. Tipos de Mareas.

Tipo	F
Semidiurno	0,00-0,25
Mixto, predominante semidiurno	0,25-1,50
Mixto, predominante diurno	1,50-3,00
Diurno	> 3,00

DINÁMICA DE MAREAS

Las mareas que realmente se observan no son las descritas hasta ahora por la teoría de marea de equilibrio de Newton, ni en lo que se refiere a rangos de marea ni en periodos de presentación de máximos. Ésto es debido a que se ha supuesto un planeta totalmente cubierto de agua sin continentes ni profundidades limitadas, tampoco se ha tenido en cuenta el efecto de la rotación de la Tierra sobre los océanos, entre otras cosas.

Pero en realidad nuestro planeta no está compuesto totalmente por agua y se deben considerar todos los aspectos omitidos en principio:

- Considerar el hecho de que los continentes suponen una barrera a tal movimiento y obstruyen las crestas de marea complicando mucho los patrones de marea. También la forma de las cuencas oceánicas tiene gran influencia ya que una cresta de onda de marea puede estimular una oscilación resonante.

- El rango de marea (la diferencia entre los puntos extremos del nivel del mar) varía con la configuración de la cuenca. En cuerpos de agua pequeños o cerrados el rango de marea es muy moderado. En el caso de las grandes cuencas oceánicas, el rango de marea varía de la costa al centro del océano. Los rangos más grandes ocurren en los contornos de las cuencas de los grandes océanos (como en el caso de una onda estacionaria, cuyo antinodo se encuentra en el contorno de la cuenca).

En las mareas, el nodo se llama punto anfodrómico y se sitúa en el centro de la cuenca; en estos puntos anfodrómicos no existe variación del nivel del mar; alrededor de ellos la cresta de las ondas barren las costas, girando alrededor del punto anfodrómico. Los rangos de marea se incrementan con la distancia a partir de dicho punto.

También debemos tomar en cuenta que como las dimensiones (distancias de recorrido y volúmenes de agua que se ven implicados en las mareas) son tan grandes, estas se ven afectadas por la fuerza de Coriolis. Las crestas de marea se suelen mover en contra de las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y a favor de las manecillas del reloj en el hemisferio Sur.

El estudio del comportamiento de un fluido sujeto a fuerzas rítmicas y sin estar afectado por la profundidad y configuración del océano, las fuerzas de fricción y de Coriolis, tiene como resultado una marea teórica muy próxima a la medida. Se trata de un estudio complejo en el que se han de tener en cuenta un gran número de factores variables en el tiempo y en el espacio. Estos primeros estudios los realizaron Laplace en 1775 y luego Hough en 1897, obteniendo como resultado las siguientes ecuaciones (Martínez, 1995):

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)h \quad (17)$$

donde u, v son las componentes de la velocidad en las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente, h la profundidad, $f = 2\Omega \sin\theta = \text{constante}$ (Ω , rotación de la Tierra), es el parámetro de Coriolis o frecuencia inercial y el plano donde ocurre el movimiento se le denomina *plano f* .

MAREAS EN GOLFOS

Durante mucho tiempo se ha conocido que las grandes mareas registradas en muchos golfos difícilmente podrían haber resultado de forzamiento astronómico por sí solo (mareas independientes), pero debe basarse en gran medida a la oscilación de la masa de agua allí contenida debido a los cambios en el nivel del océano abierto, produciendo una marea cooscilante; la amplitud de este tipo de marea está condicionada por las dimensiones del golfo como por las amplitudes de mareas fuera de él .

Las dimensiones horizontales de un golfo actúan en forma similar en la amplificación de las mareas tanto cooscilantes como independientes. Los factores críticos para determinar el tipo de marea que prevalecen son la amplitud de la marea fuera del golfo y su profundidad. Un incremento en la amplitud de la marea independiente aumenta aproximadamente en forma proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad (Defant, 1961).

De esta manera la onda de marea penetra simultáneamente en todos los puntos de la boca del golfo. Esto se presenta adecuadamente mediante la condición de borde que establece que el nivel del agua en la boca debe seguir el movimiento vertical de la marea fuera de éste

Vamos a tener en cuenta el caso idealizado de un golfo rectangular de profundidad constante h , de longitud l , comunicado con un océano profundo y abierto en sus extremos. Se supone que el golfo es suficientemente pequeño y se desprecia el efecto de Coriolis. También se descuidan efectos de fricción en primera instancia. Los ejes pueden tomarse como se muestra en la figura 9, el eje x se toma a lo largo de la línea central del golfo, con $x = 0$ en el extremo cerrado y $x = l$ al final. A continuación, las ecuaciones de movimiento y continuo son (Bowden, 1983):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (18)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (19)$$

donde η es la elevación de la superficie y u es la velocidad paralela a la línea del golfo.

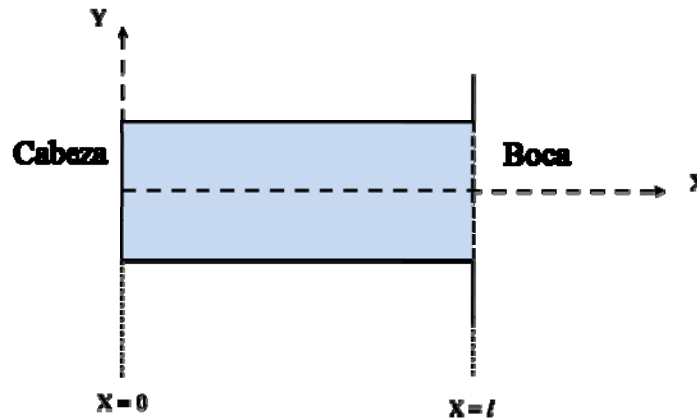


Figura 9. Mareas cooscilantes en un golfo estrecho.

En el extremo cerrado no puede haber ninguna velocidad normal a la costa, hasta que en $\eta = 0$, $u = 0$ para todos los valores de t . Si se supone una solución en forma de una onda estacionaria, tal que:

$$u = U \cos(kx) \sin(\sigma t) \quad (20)$$

donde $k=2\pi/\lambda$, $\sigma=2\pi/T$, λ es la longitud de onda y T es el periodo. A partir de (18) se encuentra:

$$\eta = A \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad (21)$$

donde $A = \sigma U / gk$ y de la ecuación (19) se deduce:

$$\sigma^2 = ghk^2 \quad (22)$$

$$\lambda^2 = g h T^2 \quad (23)$$

Ahora si se supone que en la entrada $x = l$, para una oscilación de marea con una amplitud A_l dada, se prescribe:

$$\eta = A \cos(kl) \cos(\sigma t) = A_l \cos(\sigma t) \quad (24)$$

Por lo tanto la amplitud A en la cabeza del golfo se expresa en términos de A_l por:

$$A = \frac{A_l}{\cos kl}$$

Si $\cos(kl) = 0$, entonces se produce la resonancia y por un valor finito de la amplitud y

llega a ser infinitamente grande. Esto ocurre en: $kl = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots, \frac{(2n-1)\pi}{2}$

La primera resonancia para $kl = \pi/2$ corresponde a $(l = \pi/4)$. Así el golfo actúa como caja de resonancia de onda de una cuarta parte. De (23), podemos deducir:

$$l = \frac{1}{4} T \sqrt{gh} \quad (25)$$

Cuando un golfo no es rectangular, se podrá efectuar un corte transversal, para mejorar las estimaciones de respuesta a una oscilación impuesta en la boca, permitiendo una profundidad a lo largo de su longitud y anchura variable. Los métodos para la solución numérica de las ecuaciones de movimiento presentadas en este caso, para determinar la distribución de elevación y corriente a lo largo del golfo fueron descritos por Proudman en 1953 (Bowden, 1983). En particular, podrá determinarse el período resonante de las ecuaciones de movimiento para un golfo no rectangular.

Efecto de Coriolis en el Golfo

Hasta ahora nuestro golfo ha sido considerado suficientemente estrecho como para considerar los efectos de Coriolis. Si el golfo es más amplio el efecto de Coriolis provocará una oscilación transversal a ser superpuestas en el movimiento longitudinal (Bowden, 1983), esto es visto en la figura 10; cuando la corriente en la entrada del golfo fluye hacia la superficie, ésta se inclina hacia arriba y a la derecha en el hemisferio Norte. La pendiente transversal desaparecerá en el agua, cuando la corriente es cero, pero será en sentido contrario cuando la corriente fluye hacia el exterior. Por tanto, la oscilación transversal de la superficie del mar es un cuarto de un período de fase con la oscilación longitudinal. Si la longitud del golfo es mayor que una cuarta parte de una longitud de onda, produciría una línea nodal en $x = \lambda/4$, cuando se descuida el efecto Coriolis, permitiendo que para este efecto significa que sólo el punto central de esta línea permanece sin cambios en el nivel. Por tanto la línea nodal se reduce a un punto nodal (punto C en la figura 10).

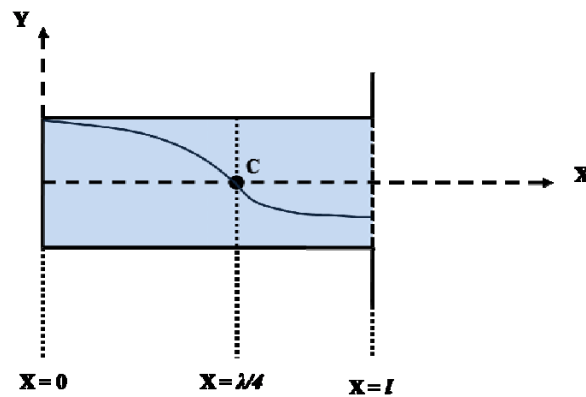


Figura 10. Efecto de Coriolis en un golfo estrecho.

Las ecuaciones apropiadas de movimiento incluyendo el efecto de Coriolis son (15), (16) y (17); en estas ecuaciones no es admisible asumir $v = 0$, pero es posible obtener una indicación del carácter de una región anfídromica, teniendo en cuenta la oscilación permanente producida para un canal (abierto en ambos extremos), por la superposición de dos ondas que viajan en direcciones opuestas.

Efectos de Fricción en el Golfo

Las ondas de mareas en golfos, bahías y estuarios se deforman y amortiguan progresivamente a medida que se propagan en aguas poco profundas, y como consecuencia de estas deformaciones, surgen componentes no lineales, las cuales pueden estudiarse partiendo de las ecuaciones unidimensionales de aguas poco profundas (Godin, 1988):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} = K \frac{u|u|}{h + \eta} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} [(h + \eta)u] \quad (27)$$

De las ecuaciones (26) y (27) se tiene que η es la elevación de la superficie, la velocidad horizontal instantánea (u), h la profundidad, g aceleración de la gravedad, x distancia, tiempo t y K es el coeficiente de fricción.

El término empírico $K u|u|/(h+\eta)$ constituye una extensión de movimiento oscilatorio a un fluido acelerado de la Ley de Chézy para la fricción debida al fondo, por tanto el valor de la corriente estacionaria (u_0) es:

$$u_0 = C \sqrt{\frac{gH_0}{C}} H_0 \quad (28)$$

donde $H_0(x) = h + \eta(x)$ y C la constante de Chézy cuyo valor depende de la naturaleza del fondo y se determina empíricamente.

Según Godin (1988) una aproximación del término de la fricción para bahía, golfos y estuarios se puede expresar como:

$$K \frac{u|u|}{h + \eta} \approx K \frac{u|u|}{h} \quad (29)$$

manteniendo sólo los dos primeros términos en el desarrollo de $(h+\eta)^{-1}$ en términos de η/h . El término de fricción contiene dos aspectos no lineales, la parte cuadrática $u|u|$, la cual produce una atenuación máxima y una velocidad de propagación mínima cuando el flujo entrante o saliente es máximo, y el producto $u\eta$ en el segundo término, el efecto de éste es que la disipación del momento por unidad de volumen del fluido es menor mientras mayor sea la profundidad total. Es importante en zonas donde el rango de η no es despreciable frente a h y produce la aparición de armónicos dobles idénticos a los términos de aguas poco profundas (Martínez, 1995).

En general, según Marinone y Lavin (1997), al propagarse la onda (o marea) hacia adentro encuentra resistencia por efecto de fricción en el fondo y pierde energía al llegar al extremo cerrado y reflejarse, regresa con una amplitud menor y por tanto si se encuentra un punto anfídromico en la región éste se desplazará hacia el lado por donde regrese la onda.

ANÁLISIS ARMÓNICO DE LAS MAREAS

Un análisis de mareas tiene como objetivo reproducir parámetros característicos, estables en el tiempo, que describen el régimen mareal del lugar de observación; estos parámetros son llamados frecuentemente *constantes mareales*, sobre la asunción implícita que las respuestas de las masas de agua hacia las fuerzas generadoras de mareas no cambian en el tiempo. La asunción anterior es válida para un tiempo prolongado de observaciones. En la práctica, mediciones realizadas por períodos determinados de tiempo, a menudo, un año, un mes o unos cuantos días, al ser analizados entregan valores aproximados a las constantes reales.

Básicamente, el análisis de marea consiste en la identificación de las amplitudes de todas las componentes armónicas importantes y sus retardos de fase con respecto a las fases de

los componentes correspondientes en la marea de equilibrio en los tiempos deseados. Ambos, análisis y predicción, requieren un conocimiento de las fases de las componentes armónicas en la marea de equilibrio en los tiempos deseados, lo cual puede ser extraído de tablas o calculado por fórmulas que involucran los parámetros astronómicos

La forma más común de obtener los parámetros (amplitud y fase) de las componentes de marea de una serie de alturas del nivel del mar, es mediante la técnica de Análisis Armónico (AA). La eficacia de esta técnica depende en gran medida de la longitud de la serie, y de la magnitud del ruido en la señal; éste es uno de los métodos más utilizados para el análisis y predicción de la marea en un punto.

El Análisis Armónico (AA) es una técnica basada en un ajuste de mínimos cuadrados para determinar los coeficientes de funciones senoidales a frecuencias determinadas. Las frecuencias de los forzamientos astronómicos son muy específicas y se puede aplicar dicha técnica para encontrar las amplitudes y fases de cada componente de marea. El método consiste básicamente en suponer que la serie temporal de corrientes se puede descomponer en una suma de funciones senoidales (Godin, 1972) y se puede expresar como:

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t - \alpha_k) + \mu(t) \quad (30)$$

donde

$\eta(t)$: Elevación del nivel del mar.

η_0 : Valor del nivel medio del mar.

ω_k : Frecuencia presente en el potencial de las fuerzas generadoras de marea.

A_k, α_k : Amplitudes y fases de las componentes armónicas del nivel del mar, respectivamente.

N : Número de componentes armónicas.

$\mu(t)$: Contribución de otros factores diferentes de la marea.

Los resultados de las amplitudes y fases de las componentes armónicas (A_k y α_k) se determinan sobre la base del tratamiento de las observaciones sobre la oscilación del nivel del mar en el punto de observación considerado. Pues para el punto en que se esté trabajando estos valores son constantes; entonces se transforman en *constantes armónicas* y se representan por:

$$H_k = \frac{A_k}{f_k(t_0)} \quad (31)$$

$$G_k = (V_0 + u)_k + d_k + \alpha_k \quad (32)$$

El argumento astronómico $((V_0 + u)_k)$ es el argumento de la componentes de la fuerza de marea para un tiempo inicial de registro ($t=0$). f_k y d_k son modulaciones de la amplitud y fase o factores de corrección nodal que varían lentamente a lo largo del periodo nodal (18,6 años) y se calculan para $t=0$. La *fase de Greenwich* (G_k), es la diferencia entre el valor del argumento astronómico para el meridiano de Greenwich en el tiempo inicial del registro y la fase α_k de la componente k .

Como mencionamos anteriormente, en la práctica solo es necesario determinar las componentes principales, ya que la mayoría de los registros de marea tienen una duración de unos pocos años o meses, y en consecuencia las componentes que se pueden resolver contienen contribuciones de otros armónicos vecinos y de esta manera se pueden obtener buenas predicciones, las cuales se realizan mediante la siguiente ecuación:

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{k=1}^N H_k \cos(\omega_k t - G_k) \quad (33)$$

Al efectuar un análisis armónico se tiene en cuenta la deformación de la marea en aguas poco profundas, golfos, estuarios, lagos, entre otros; y se realiza solamente adicionando

algunas componentes no lineales y que normalmente son originadas por las componentes astronómicas más importantes como M_2 y S_2 .

INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LAS MAREAS

Existen diversas formas de registrar los cambios en el nivel de mar, desde la sencilla escala o regla de marea usada por los egipcios hace miles de años, hasta instrumentos sofisticados, tales como altímetros satelitales.

Entre estos instrumentos se encuentran los mareógrafos, los cuales han sido históricamente los más comunes para medir el nivel del mar. La forma de medición difiere dependiendo del tipo de mareógrafo utilizado. Todos miden el nivel del mar instantáneo en un lugar concreto de la línea de costa, de forma continua. De esta manera, no se obtiene la información de los cambios del mar en toda su extensión, sino que se limitan a los valores de ciertos puntos de la línea de costa. Los hay de distintos tipos: de presión, flotador, acústicos, electromagnéticos, entre otros.

Entre los más utilizados está el mareógrafo de presión (Figura 11); formado por un sensor de presión que mide la variación en la presión debida al cambio de altura de la columna de agua. Es necesario ajustar la escala de medida al rango de amplitudes y períodos de la marea. Así el instrumento deberá medir en períodos de tiempo suficientemente grandes para filtrar el oleaje e inferiores al período de la marea. Estos aparatos se anclan en el fondo del mar y dependen de la autonomía de sus propias baterías. Pueden almacenar los datos en memoria interna o bien enviarlos por cable a una estación en tierra. El conocimiento de la densidad del agua permite transformar las lecturas de presión a desplazamientos verticales del nivel del mar, por eso estos instrumentos registran también la temperatura del agua y la presión de la columna de agua. La precisión de este aparato es buena y su funcionamiento es totalmente automático aunque su mayor complejidad lo hace sensible a sufrir averías y es habitual disponer de registros con falta de mediciones.

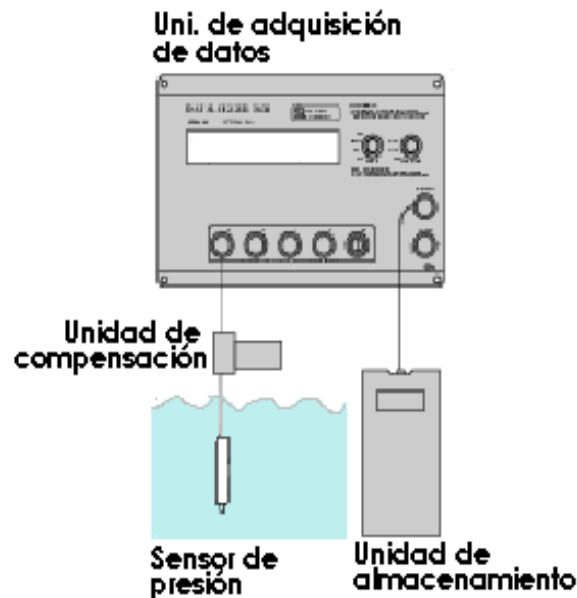


Figura 11. Diagrama del funcionamiento de un mareógrafo de presión.

AGENTES PERTURBADORES DE LAS MAREAS

La discusión del forzamiento de mareas sólo se asume para comportamiento con condiciones climáticas normales. Sin embargo el nivel del mar también se ve afectado por fuerzas periódicas de origen meteorológicos, que contribuyen a la deformación teórica de los océanos de nuestro planeta; causando variaciones en altura y tiempo en las distintas fases de la onda de marea, especialmente los vientos fuertes y prolongados. Las altas o bajas presiones barométricas, que son muy difíciles de pronosticar, actúan en menor grado; a esto también se le agregan los fenómenos de evaporación y precipitación.

El efecto del viento sobre el nivel del mar es muy variable y depende en gran medida de la topografía del área. El principal efecto es la elevación del nivel de mar en dirección hacia la cual está soplando. Por ejemplo, vientos fuertes que soplen directamente hacia la costa, elevará el nivel del mar en ese lugar y causará elevaciones mayores que las predichas, mientras, que los vientos que soplen desde la costa causarán el efecto inverso.

Un fenómeno oceanográfico causado por el viento, es la surgencia, el cual consiste en el afloramiento de las aguas superficiales que fertilizan las capas superiores, al producirse el ascenso de aguas profundas que tienen concentraciones elevadas de sales nutritivas en disolución, influyendo notablemente en la fertilidad de las aguas de los océanos (Aparicio y Contreras, 2003).

Existe una inversa relación entre el nivel del mar y la presión atmosférica. Una baja presión barométrica producirá un incremento en el nivel del mar y viceversa. Un incremento en la presión atmosférica de un milibar puede producir una depresión de un centímetro. Esta respuesta del nivel del mar es llamado efecto de barómetro invertido. Para variaciones locales, se puede estimar de la siguiente manera (Tel, 2005):

$$\Delta\eta = -\frac{\Delta P_A}{\rho \cdot g} \quad (34)$$

donde:

$\Delta\eta$: Variación del nivel del mar.

ΔP_A : Variación de la presión atmosférica con respecto a la media del lugar.

ρ : Densidad del agua de mar.

g : Aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

La respuesta barométrica exacta rara vez es posible determinarla en la práctica. Una razón para ello es la respuesta dinámica de las aguas superficiales y la influencia de las orillas continentales en el comportamiento de estas respuestas. Así, las variaciones de presión de baja frecuencia, como las debidas al paso de sistemas atmosféricos, pueden provocar, por resonancia, ondas internas de baja frecuencia que se desplacen a lo largo de la plataforma continental en un único sentido y que están caracterizadas por una longitud de onda de kilómetros, periodos de días y amplitudes de unos pocos centímetros (Robinson, 1964).

Las precipitaciones y la evaporación también contribuyen el aumento y descenso del nivel del mar; las razones consideradas en este caso son aquellas que ocurren en la superficie del mar, no aquellas que ocurren por drenaje en capas subterráneas. El escurrimiento es toda el agua que fluye hacia el mar del sistema en cuestión y de esta manera es el resultado neto de la precipitación, evaporación y absorción del agua en la superficie de la tierra. En un sistema de agua, la precipitación es un término positivo, la evaporación un término negativo y el escurrimiento usualmente un término positivo. En muchas regiones áridas, el escurrimiento podría ser un término negativo, en virtud de la absorción en estas tierras áridas. Si la proporción de entrada al sistema de la suma de las tres condiciones excede la proporción de salida a la boca, los niveles del mar deben elevarse y recíprocamente, si la proporción de salidas excede la proporción de entradas, los niveles del mar deben descender.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Cariaco (GC) es un cuerpo de agua semicerrado ubicado en la costa nororiental de Venezuela, específicamente, al este de la Cuenca de Cariaco, desde los $10^{\circ}25'$ y $10^{\circ}35'$ N y los $63^{\circ}40'8''$ y $64^{\circ}13'$ O. Tiene una longitud aproximada de 62,0 km en la dirección este-oeste y un máximo de 15,0 km de ancho en la dirección norte-sur, con un área aproximada de $642,0 \text{ km}^2$ y un volumen estimado de $31,5 \text{ km}^3$ (Okuda, 1981).

En la configuración geográfica de las costas del GC y áreas continentales, se destacan colinas, montañas, ensenadas, y otros; entre ellas la Bahía de Turpialito, la cual se encuentra ubicada en la costa sur del golfo ($10^{\circ}27'30''$ N; $64^{\circ}02'40''$ O) (Figura 12). Dentro de la mencionada bahía se localiza la estación Hidrobiológica de Turpialito, dependiente del Instituto Oceanográfico de Venezuela de la Universidad de Oriente (IOV).

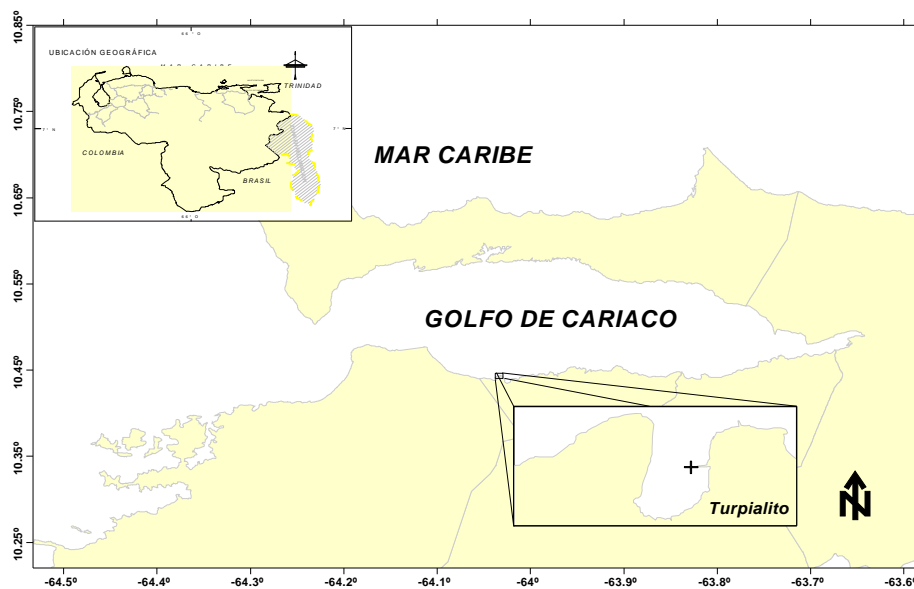


Figura 12. Localización del área de estudio, Bahía de Turpialito, Golfo de Cariaco.

Morfología Submarina

Uno de los rasgos geomorfológicos más destacados del fondo del GC, es el hecho de que su topografía submarina se encuentra controlada estructuralmente a lo largo de sus costas norte y sur, donde se localizan las trazas de las fallas de Cariaco y el sistema de fallas de El Pilar, respectivamente, en la zona existen depresiones cuencas (algunas de apreciable profundidad), escarpados, cañones submarinos entre otros rasgos. Así de acuerdo a la morfología del fondo. Según Caraballo (1982a) divide la plataforma de Cumaná en 3 (tres) zonas: zona occidental, zona central, zona oriental.

Aspectos Hidrográficos

En el GC, Según Soto(2011), específicamente en la bahía de Turpialito, la temperatura durante el periodo de surgencia varía entre un mínimo de 24,0 °C y un máximo de 27,0 °C, con un valor promedio de 25, 3 °C; mientras que para un periodo de transición la temperatura oscila entre 27,4 y 29,0 °C, con una media de 28,0 °C. La salinidad muestra un valor máximo de 35,70 y un mínimo de 34,70.

Aspectos Climatológicos

Las condiciones meteorológicas, tienen influencia significativa en las características hidrográficas; especialmente el viento afecta los procesos físicos en el golfo, tales como: la evaporación, la surgencia y la corriente superficial.

Las condiciones climáticas en dicho cuerpo de agua son de característica húmeda tropical con vientos predominantes en dirección este-oeste a partir de noviembre a mayo y un bajo régimen lluvioso con un máximo entre agosto y octubre (Gade, 1961a).

Para la región, de acuerdo a la información de la estación del aeropuerto de la ciudad de Cumaná (período 1990–1998), el clima corresponde al tipo semidesértico con influencia marítima. Las precipitaciones son algo superiores a los 250 mm, mientras que en la Península de Araya estas son aún inferiores (Bonilla, *et al.*, 1998). Las temperaturas del viento oscilan entre 26 y 27 °C, y son consideradas bajas para esta zona, debido al efecto suavizador de los vientos Alisios del noreste (NE) cuyas velocidades están

comprendidas entre de 2 a 5 m s⁻¹. La evaporación es bastante alta durante todo el año, superior a los 2000 mm al año y la oscilación de la presión atmosférica es limitada (5-10 mb) (Quintero, *et al.*, 2006)

Según Quintero y Lodeiros, (1996), la velocidad del viento tiene dos períodos; el primero, de enero a junio, los vientos predominan del este con velocidades de 4,7m s⁻¹ y en el segundo, de agosto a noviembre, los vientos prevalecientes tienen un componente sur (sureste). Los meses de julio y diciembre se consideran de transición, cuando la frecuencia de los vientos del este y sureste es similar. La velocidad promedio del viento es mayor en la costa norte (Bonilla *et al.*, 1998).

La surgencia influye notablemente en la fertilidad de las aguas del GC. Este proceso ocurre principalmente durante los primeros meses de cada año, desde el mes de diciembre hasta abril o mayo, cuando los vientos alisios soplan desde el noreste.

Las series de tiempo que muestran los valores mensuales de los índices de surgencia costera inducida por el viento y sus anomalías para la localidad de Cumaná, reflejan la gran regularidad con que se presenta la alterabilidad estacional de la intensidad de los vientos alisios predominantes durante todo el año (máximos durante el bimestre marzo-abril y mínimos durante el bimestre septiembre-octubre) (Aparicio y Contreras, 2003).

Régimen de escurrimiento de los ríos

Según Caraballo (1982b) desembocan un total de 79 cursos de agua al GC, entre ríos, quebradas y riachuelos, de estos 34 corresponden a la costa sur y 45 a la costa norte. En la costa sur entre los de mayor influencia sedimentaria se encuentran de oeste a este: la quebrada El Potrero y los ríos: Tunantal, Guaracayal, Marigüitar, Tarabacoa, Cachamaure y Cariaco, los cuales han contribuido a la construcción de los amplios deltas que se distribuyen a lo largo del litoral sur. En el sector norte específicamente en la región centro-oriental muchos de los cursos de agua tienen un recorrido de apenas 1 ó 2 Km. y no se presentan zonas de planos aluviales y deltas, ya que en la zona no existe

un rasgo de plataforma que sirva de depositario a los sedimentos aportados por el continente.

Circulación y renovación de aguas

Gade (1961-a y b) consideró la existencia de la circulación ciclónica, de acuerdo a isolíneas inclinadas hacia arriba, presentándose temperaturas bajas en su centro. Este tipo de circulación se aprecia en la parte central del Golfo. Además expresa que los vientos del Este son casi siempre más fuertes a lo largo de la costa norte que en otra parte del Golfo, encontrándose corrientes fuertes dirigidas en dirección Oeste y se reducen hacia el Sur, en consecuencia, se observan las corrientes débiles hacia el Este. El agua que entra al Golfo desde afuera, toma su ruta más al Sur y se extiende a lo largo de la costa.

El período total de renovación de las aguas del GC es de 20 días. En los períodos, cuando el intercambio se limita a niveles más altos, de la etapa de renovación es más corta; para las capas superiores de 20 m, este período es aproximadamente de 8 días (Gade, 1961-a y b)

Por ser un cuerpo de agua semicerrado presenta características peculiares, con dos capas de circulación. Durante la época de los vientos alisios, se produce una circulación que trae aguas subsuperficiales de la Fosa de Cariaco, que entran por la capa inferior fertilizando el golfo, mientras las aguas superficiales en giro ciclónico salen por la capa superior. Esta situación se revierte cuando los vientos disminuyen su rapidez y en consecuencia las aguas biológicamente disminuye la productividad (Varela, *et al.*, 2003).

RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos usados para la realización de este proyecto provienen de mediciones del nivel del mar durante una campaña de campo en un periodo comprendido entre el 01 de marzo al 04 de mayo de 2011, donde se contó con todo el instrumental y personal técnico necesario.

Las observaciones se realizaron con un mareógrafo de registro digital, marca Valeport, modelo 740 (Portable Water Level Recorder), perteneciente al Instituto Oceanográfico de Venezuela, de la Universidad de Oriente (IOV), programado para registrar la altura de la marea cada 5 minutos, para una profundidad de 1 m; debido a esto se lograron analizar 18 717 registros de hora y altura de la marea.

Mareógrafo Valeport Modelo 740

Según Valeport (2001) este tipo de mareógrafo (Figura 13), utiliza un sensor de presión hidrostática propulsado por 4 baterías tipo "D", que junto con una memoria de 128 kbyte permite la operación de 2 años en un ciclo de 20 minutos con 15 segundos de ráfagas para apagarse; este pequeño grabador está diseñado para compensar las variaciones de presión atmosférica, permitiendo la medición de la altura real de la columna de agua que se encuentra sobre el sensor, filtrada de las variaciones producidas por las oscilaciones barométricas.

La longitud de ráfaga, retrasar el tiempo de ciclo, fecha/hora de inicio y la información del sitio se establece mediante el paquete de software de PC suministrado. Este programa también permite establecer la calibración, comprobar el voltaje de la batería, el tiempo y fecha que se fijará y los datos registrados se extraen en un formato compatible de hoja de cálculo para Windows.

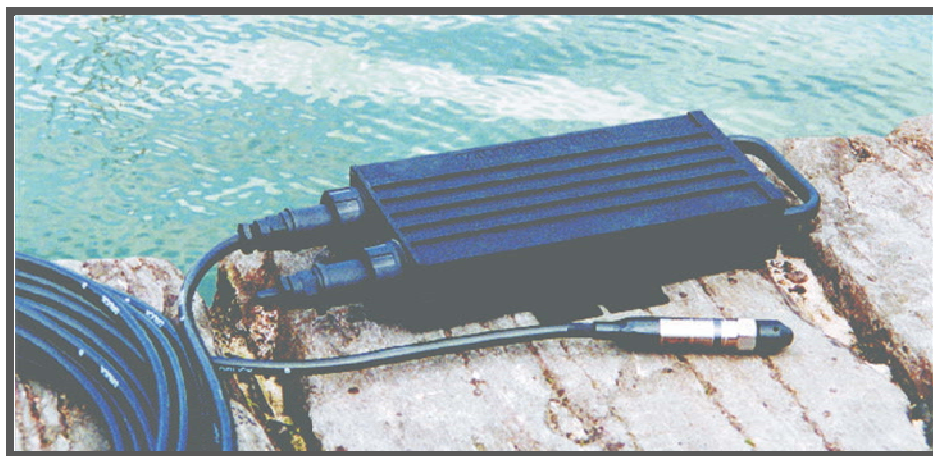


Figura 13. Mareógrafo Valeport modelo 740.

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

A partir de las mediciones realizadas, se confeccionó la serie de valores horarios de altura de marea y se realizó un análisis armónico de los datos por medio del programa T_Tide versión 1.3 Beta (Pawlowicz, *et al.*, 2002), que corresponde a una versión en Matlab del software de análisis de armónicos escrito en Fortran por Foreman (1977 y 1978), obteniéndose así un conjunto de constituyentes armónicos de la marea. Con el T_Tide se pueden analizar señales con períodos de minutos hasta un año de duración. Además éste software usa técnicas de correcciones nodales para estimar constituyentes no-resueltos y calcula intervalos de confianza de los componentes analizados.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

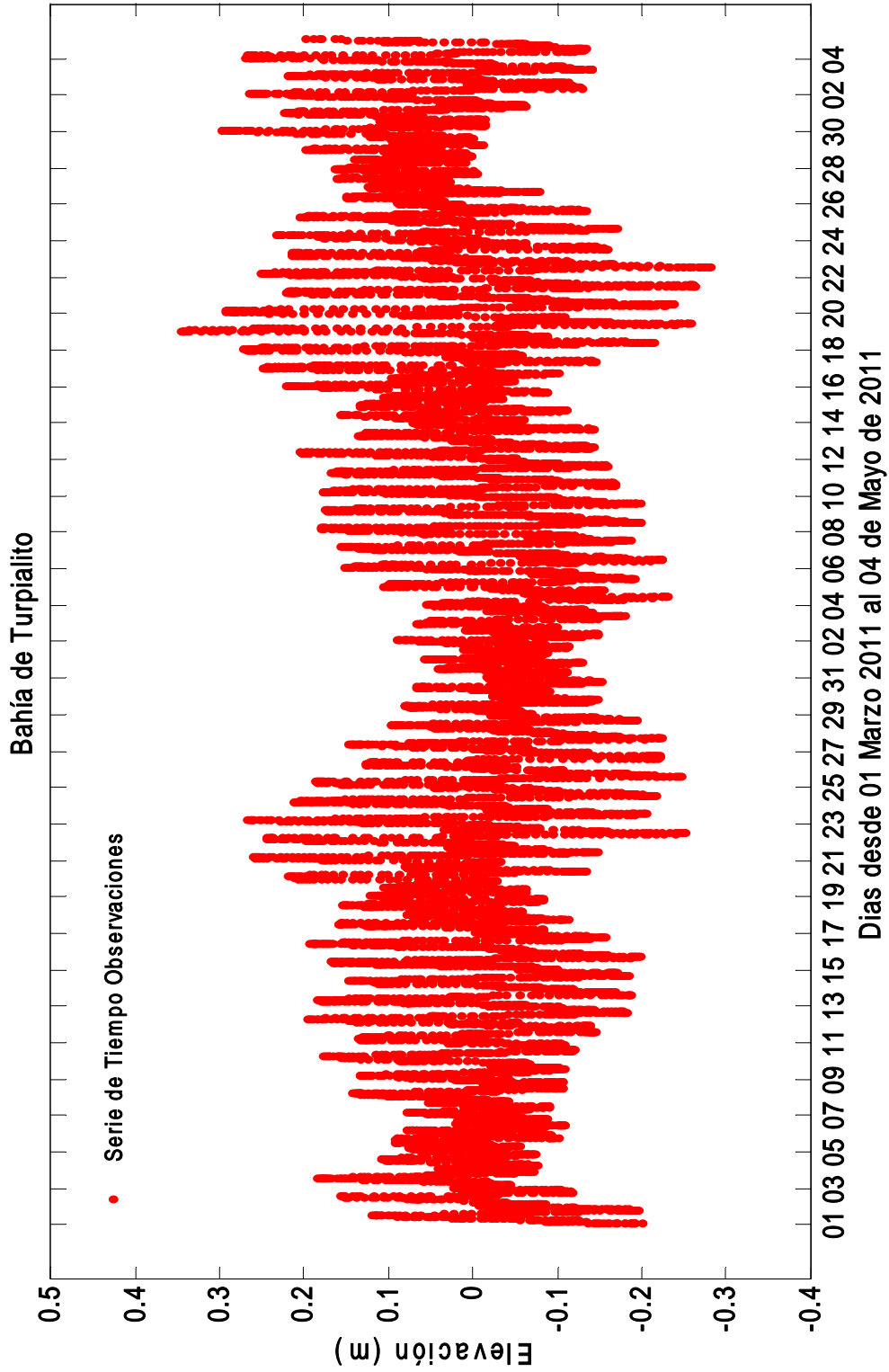
Para esta investigación el cálculo de las amplitudes y las fases de Greenwich de las componentes de la marea se realizó mediante el método de análisis armónico de ajuste por mínimos cuadrados (Godin, 1972). Se empleó el paquete de programas en Matlab T_Tide (Pawlowicz, *et al.*, 2002). Este puede desarrollar el clásico análisis armónico para períodos de hasta un año o con una extensión menor de tiempo y calcula el intervalo de confianza para los componentes analizados.

El análisis armónico involucra un sin número de consideraciones; los cuales pueden ser especificados en la corrida de la rutina T_Tide; sin embargo, para este trabajo se empleó el caso más sencillo en el cual la única variable de entrada es la altura del nivel del mar en datos horarios. Con la información obtenida de la función T_Tide se realizaron gráficos para el pronóstico de marea y la marea residual, que es la diferencia entre los datos observados y el pronóstico de la marea; así también se generaron gráficos para las amplitudes de los componentes armónicos encontrados y su respectivo ángulo de fase.

CLASIFICACIÓN DE LA MAREA

Las mediciones de marea mostraron un rango de 35 cm. La variación de éstas se presenta en la figura 14 para el período comprendido entre el 1 de marzo y 4 de mayo de 2011.

Durante el día ocurren dos elevaciones máximas, una más pronunciada que otra; los niveles mínimos tienen el mismo comportamiento. Según esta observación la marea en la bahía de Turpialito es de tipo mixta.



IDE
NTI
FIC
ACI
ÓN
DE
CO
NST
ITU
YE
NT
ES
DE
MA
RE
A
Para
dete
rmin
ar
que
fuer
zas
astro
nóm
icas
o

combinaciones de las mismas, gobiernan las oscilaciones que conforman la onda del

nivel del mar, se usó el análisis armónico. En este estudio no se va a profundizar en el análisis armónico de marea, simplemente se usó esta herramienta para identificar las frecuencias que corresponden a dichas oscilaciones. Para el desarrollo de este análisis se trabajó con datos horarios de la estación mareográfica.

En el análisis armónico, con un nivel de significancia de 78,6%, se identificaron 35 constituyentes, de las cuales 20 resultaron ser significativas, 6 de tipo diurno (Q_1 , O_1 , NO_1 , K_1 , J_1 y OO_1), 5 semidiurno (EPS_2 , MU_2 , N_2 , M_2 y S_2), 1 tercediurna lunar (M_3), 4 cuartidiurnas (MN_4 , M_4 , MS_4 y S_4), 1 quintidiurna solar ($2SK_5$), 2 sextidiurnas (M_6 y $2MS_6$) y por último 1 octidiurna lunar (M_8). Las componentes a partir de tercediurnas a octuriurnas son consideradas para sitios bajos o poco profundos, como es el caso de la zona estudiada. El estudio completo de las 35 constituyentes se puede detallar en el anexo A.

En la Tabla 3 se muestra las componentes significativas, obtenidas del análisis armónico para la estación. Para que un componente armónico sea considerado significativo debe tener un valor de Señal/Ruido (SNR) mayor a 1; el SNR es la relación al cuadrado entre la amplitud (expresada en metros) y el error de amplitud (Ampli_err).

Con los constituyentes obtenidos, se puede además constatar el comportamiento de la marea; debido a que en oceanografía es usual caracterizar el régimen de marea de una localidad en función de un parámetro adimensional conocido como número de forma o Factor de Courtier. Sustituyendo el valor de las amplitudes de K_1 , O_1 , M_2 y S_2 (Tabla 3) en la ecuación (14). Para nuestro caso, las observaciones en el sitio determinan que $F=2,34$, por lo que la marea para esta zona es de tipo mixta, con predominio de los constituyentes diurnos, de acuerdo a lo consultado en la Tabla 2. Esto quiere decir, que en la zona se presenta la ocurrencia de dos pleamares y dos bajamares cada día.

Tabla 3. Constituyentes de mareas en la bahía de Turpialito.

Constituyente	Amplitud (m)	Ampli_err (m)	Fase (°G)	SNR
Q_1	0,0118	0,005	163,91	6

O ₁	0,0724	0,005	171,93	1,7x10 ²
NO ₁	0,0069	0,004	137,17	3,2
K ₁	0,0845	0,006	156,60	2x10 ²
J ₁	0,0106	0,005	146,04	3,9
OO ₁	0,0062	0,005	184,53	1,7
EPS ₂	0,0026	0,002	333,11	1,1
MU ₂	0,0074	0,003	3,72	7,5
N ₂	0,0232	0,002	10,28	91
M ₂	0,0583	0,002	30,51	5,8x10 ²
S ₂	0,0088	0,002	2,14	13
M ₃	0,0020	0,001	208,20	4,7
MN ₄	0,0063	0,002	292,64	6,4
M ₄	0,0088	0,002	24,96	15
MS ₄	0,0051	0,002	88,91	4,5
S ₄	0,0050	0,002	271,69	4,1
2SK ₅	0,0025	0,001	304,38	5,4
M ₆	0,0105	0,004	191,59	6,6
2MS ₆	0,0100	0,004	251,63	5,2
M ₈	0,0015	0,001	149,28	1,1

En las figuras 15 y 16 se pueden observar los constituyentes armónicos significantes (azul) e insignificantes (rojo); mostrando la frecuencia de oscilación significativa con mayor amplitud de 0,04 cph (periodo de 23h 93min), correspondiente a K₁ que es la componente declinación luni-solar diurna, con una amplitud de 0,08 m y un ángulo de fase de 156,60 grados. Luego se tienen las frecuencias para los armónicos lunar principal diurna (O₁), lunar principal semidiurna (M₂) y gran elíptica lunar semidiurna (N₂), con valores de 0,04; 0,08 y 0,07 cph (periodos de 24h 50min, 12h 25min y 12h 40min respectivamente); con amplitudes de 0,07; 0,06 y 0,02 m y los ángulos de fase para estos armónicos fueron de 171,93; 30,51 y 10,28 grados respectivamente.

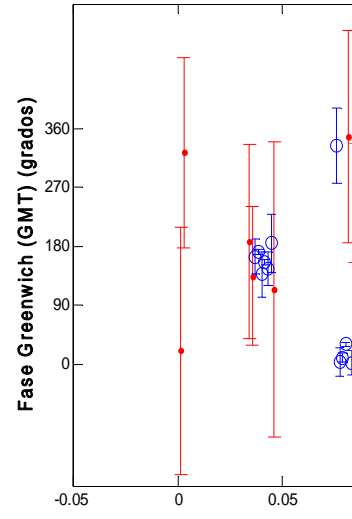
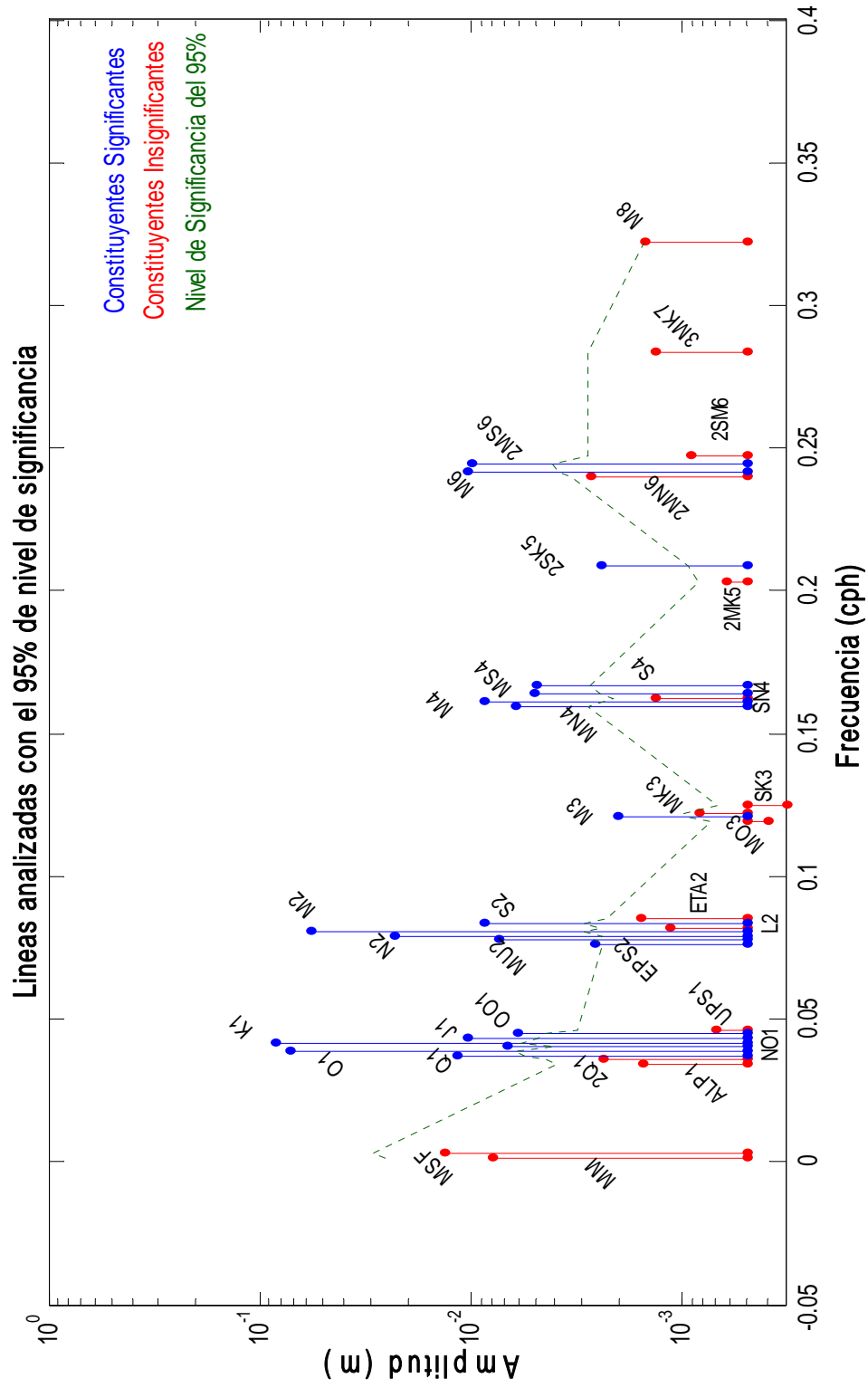


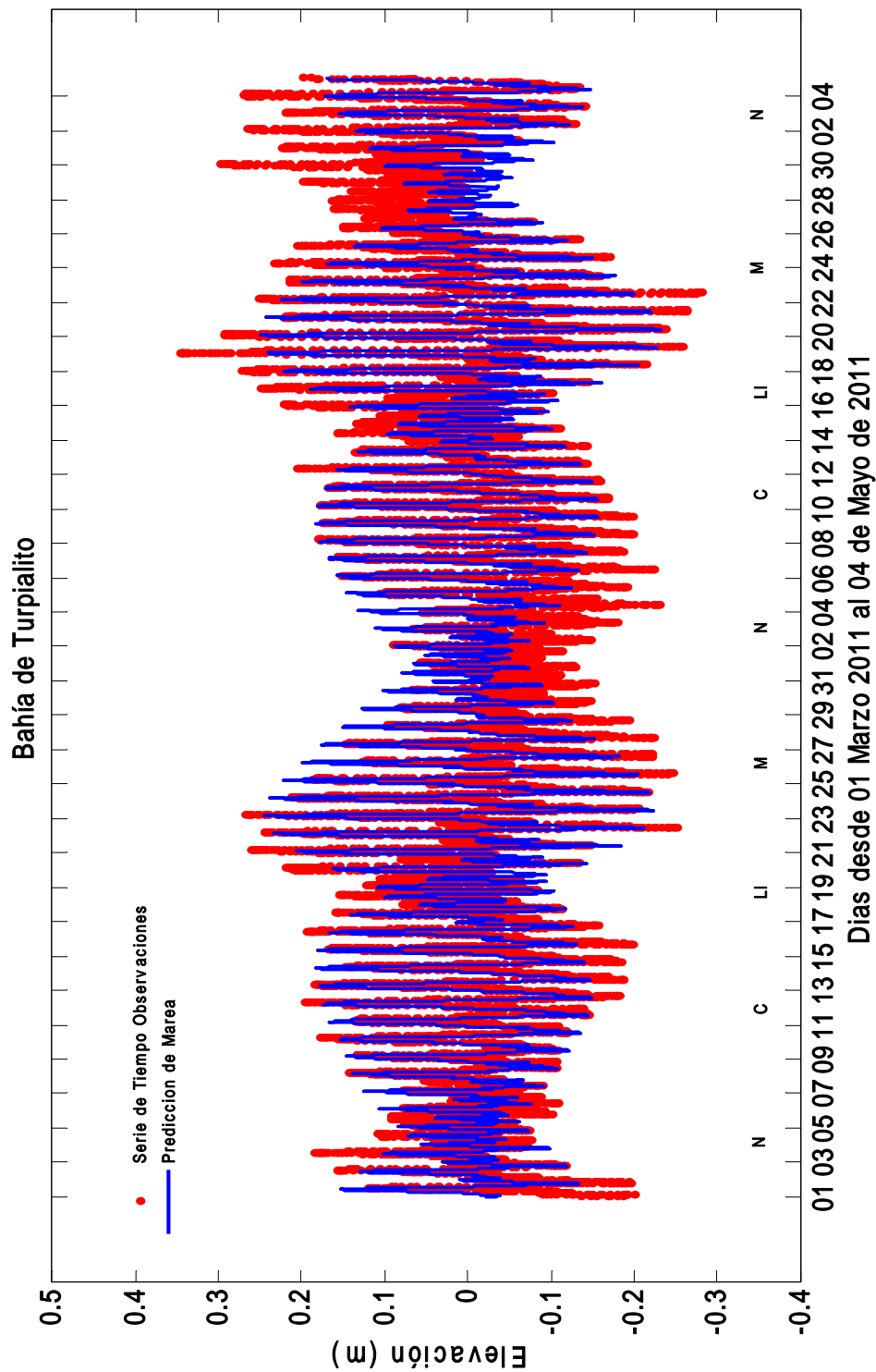
Figura 16. Fase de los armónicos encontrados en la serie de tiempos de marea en la bahía de Turpialito.

PREDICCIÓN DE LA MARE A

Por medio

de la estimación de la amplitud y fase de los constituyentes armónico de la marea, se pueden usar para hacer predicciones de la marea a largos períodos. Pero esta predicción se hace solamente tomando en cuenta los aspectos astronómicos, identificados con una frecuencia específica; es decir no se toman en cuenta los factores meteorológicos, el comportamiento para una zona de poca profundidad, debida a la fricción del fondo y los términos no lineales en la ecuación de movimiento para el estudio de mareas.

En la figura 17, se puede ver la representación gráfica del análisis armónico calculado para la estación, la serie de datos originales (rojo) y el pronóstico de marea (azul). Observándose el desfase entre estos, debido a que no se toman en cuenta todos los constituyentes analizados.



muestran en la tabla 4.

A partir de información suministrada por el Centro de Investigaciones de Astronomía “Francisco J. Duarte” (2011), las fases lunares entre los meses de marzo, abril y mayo de 2011, se

Tabla 4. Fases de la Luna durante los meses de marzo, abril y mayo de 2011.

Fase	Fecha	Hora
Luna nueva (N)	04-03-2011	16:16
Cuarto creciente (C)	12-03-2011	19:15
Luna llena (L)	19-03-2011	13:40
Cuarto menguante (M)	26-03-2011	07:37
Luna Nueva (N)	03-04-2011	10:02
Cuarto creciente (C)	11-04-2011	07:35
Luna llena (L)	17-04-2011	22:14
Cuarto menguante (M)	24-04-2011	22:17
Luna nueva (N)	03-05-2011	02:21

Si se relacionan las fases lunares (Tabla 4) con la comparación ente la serie de tiempo de observaciones y predicciones de la bahía de Turpialito (Figura 17), se destaca que la variabilidad del nivel del mar se hace máxima en presencia de los períodos de Luna Llena (L) y mínimos en presencia de Luna de Cuarto Creciente (C).

Sin embargo el estudio de la teoría de mareas, demuestra que existen varios factores atmosféricos que también intervienen en el surgimiento de las mareas en especial en las zonas costeras. Como resultado de la intervención de ese tipo de factores, se ve que la marea residual presenta una variación, indicando que existe un desfase entre la serie original y la predicha (Figura 18).

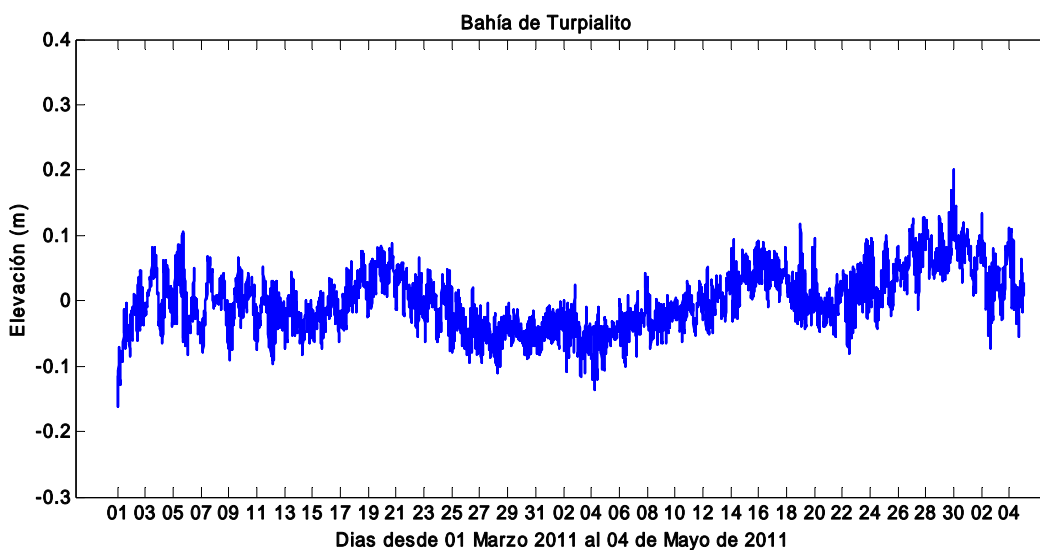


Figura 18. Residual de la serie de tiempo entre la marea observada y la predicha en la bahía de Turpialito.

El error entre los datos medidos y las predicciones, se determinó mediante el cálculo de los residuales, además de la cuantificación del error de la raíz media cuadrática (RMS). La expresión del error de la raíz media cuadrática se muestra en la ecuación (Dias y Lopes, 2006):

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\eta_o - \eta_{pi}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

Se compararon las mediciones con las predicciones realizadas utilizando los constituyentes separados desde la serie de datos de mareas medidos. El RMS entre los datos medidos y las predicciones, fue menor a 2 cm (1,47 cm).

En las figuras 19 y 20, se muestran las mayores elevaciones en la serie de observación, para los días del 21 al 23 de marzo y 19 al 22 de abril de 2011. Los puntos (rojos) representan las observaciones y la línea continua (azul) es la curva predicha por los constituyentes obtenidos del análisis. Además en las figuras mencionadas se aprecia claramente el carácter mixto de las mareas (dos pleamares consecutivos o dos bajamares).

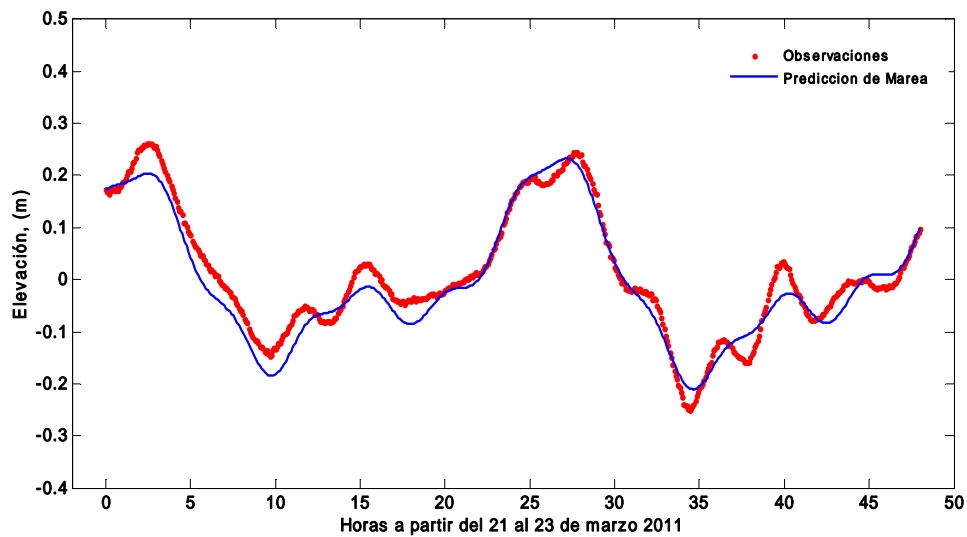


Figura 19. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 21 al 23 de marzo de 2011.

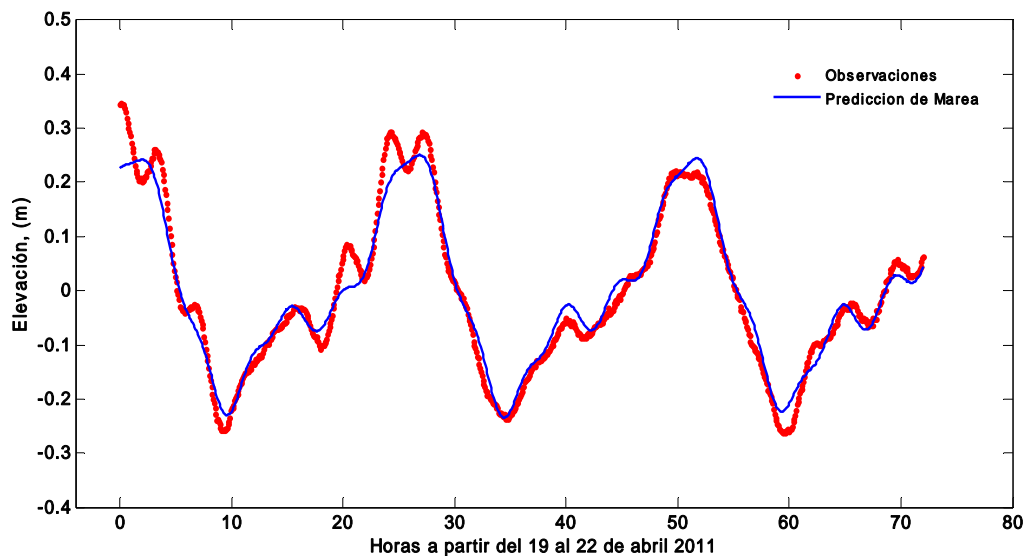


Figura 20. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 19 al 22 de abril de 2011.

En las figuras 21-24, se muestran las elevaciones para los días del 04 al 07 de marzo, 18 al 20 de marzo, 30 de marzo al 02 de abril y 26 al 29 de abril de 2011 respectivamente, observándose en ellos las menores elevaciones en la serie de tiempo estudiada. Los puntos (rojos) representan las observaciones y la línea continua (azul) es la curva predicha por los constituyentes obtenidos del análisis.

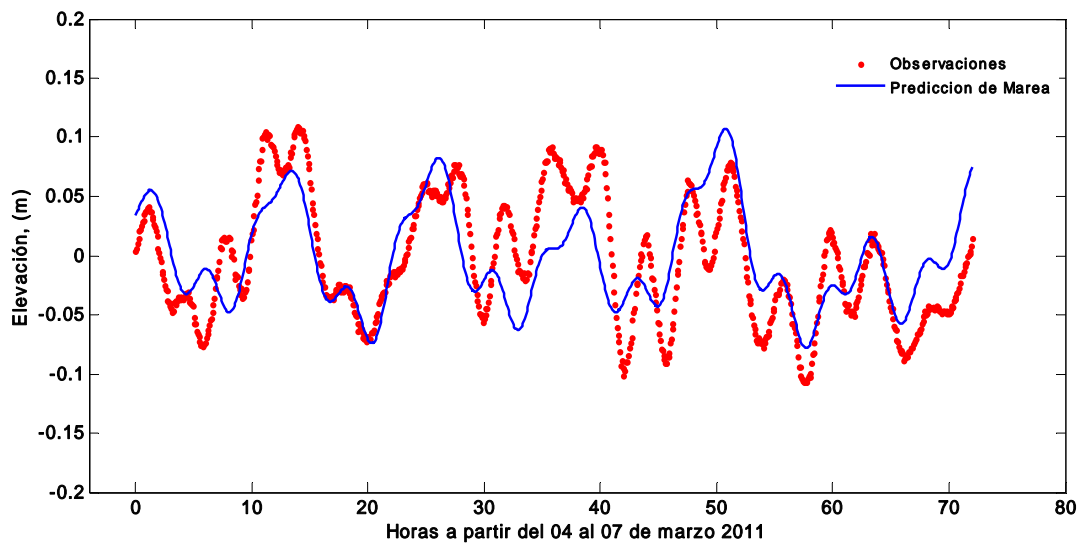


Figura 21. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 04 al 07 de marzo de 2011.

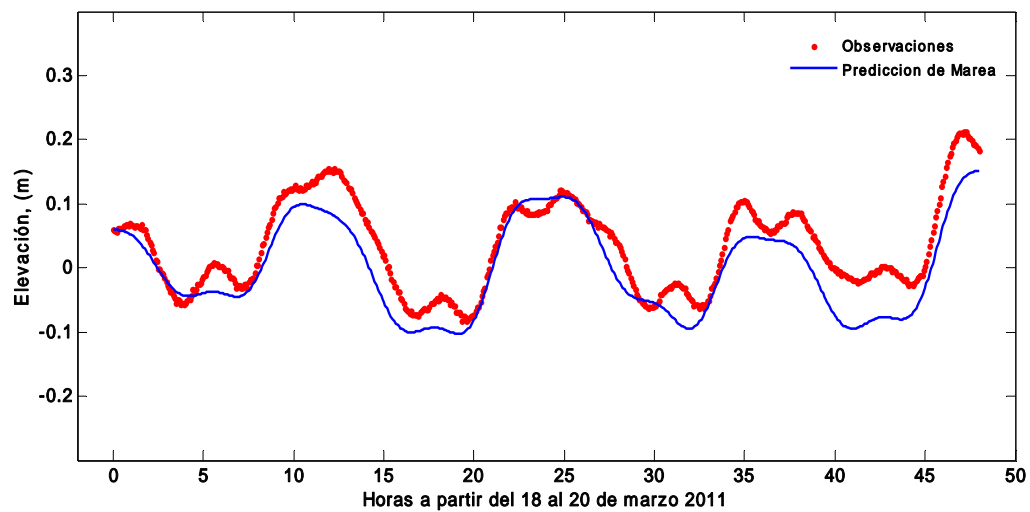


Figura 22. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 18 al 20 de marzo de 2011.

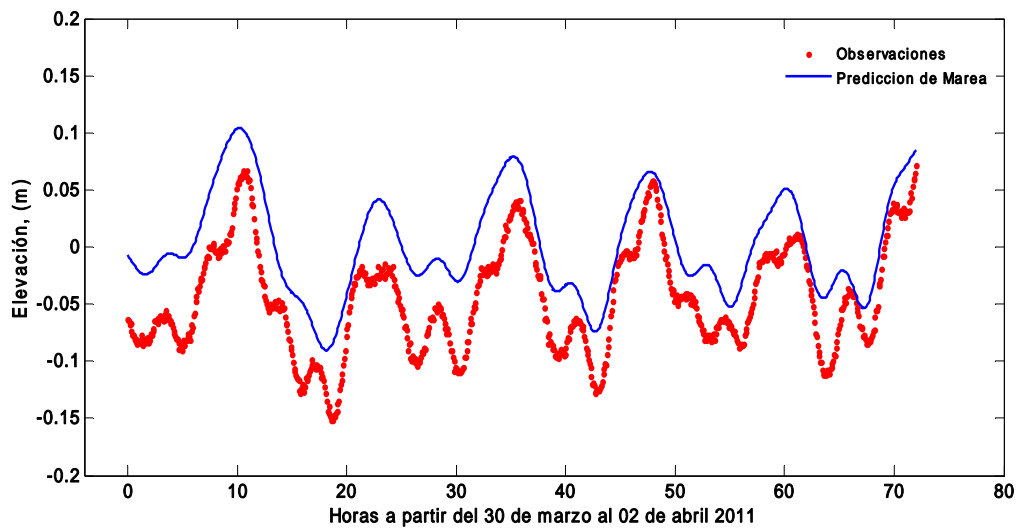


Figura 23. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 30 de marzo al 02 de abril de 2011.

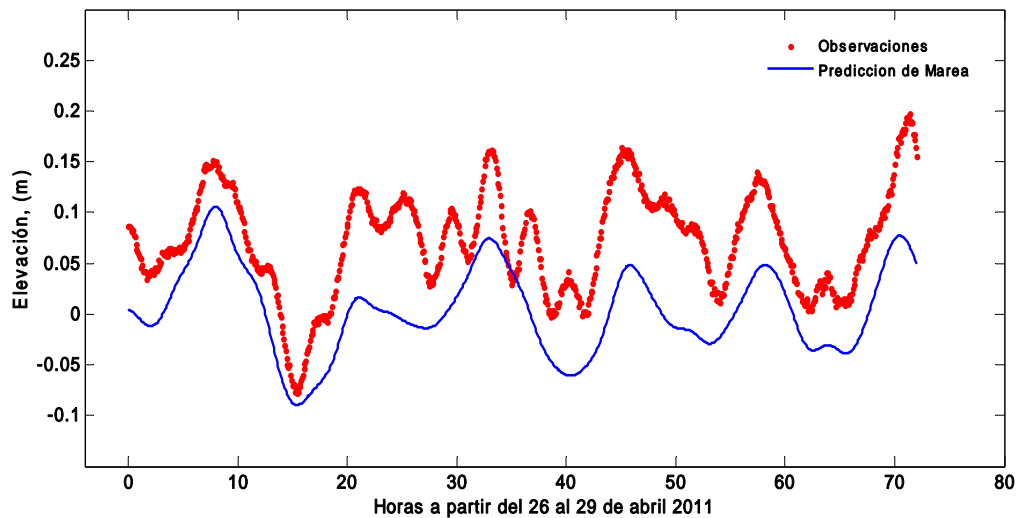


Figura 24. Predicción de la altura de marea, para las horas a partir del 26 al 29 de abril de 2011.

Con el objeto de analizar el tiempo de respuesta de la variación del nivel del mar a la acción del viento, se recaudó información meteorológica a partir de una estación portátil, en la región de estudio; para un periodo del 07 de marzo al 08 de abril de 2011. En la figura 25, muestra las celeridades del viento, donde las mayores variaciones son de corta duración; pero influyen notablemente en la elevación mareal.

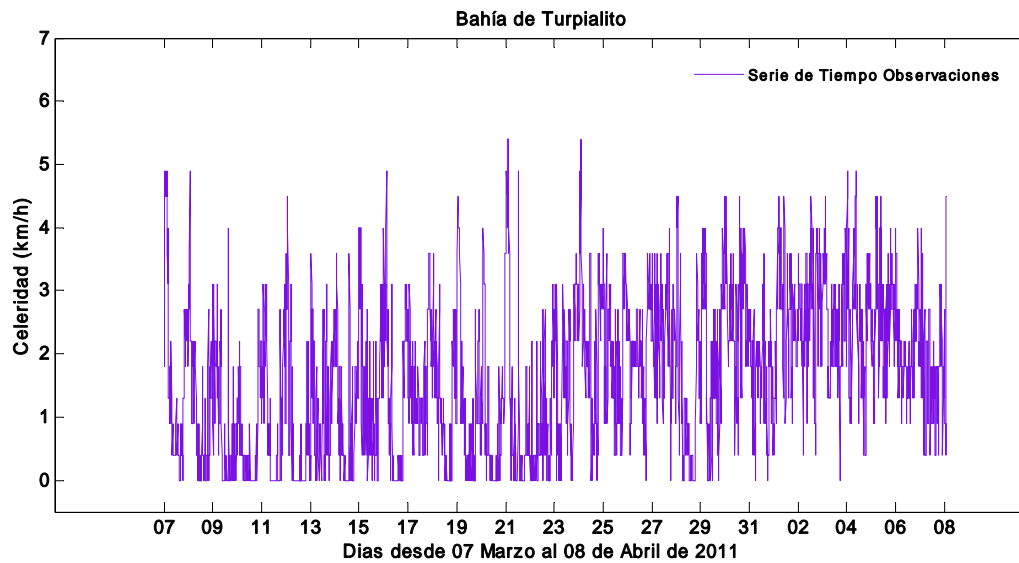


Figura 25. Celeridad del viento en la bahía de Turpialito. Periodo a partir del 07 de marzo al 08 de abril de 2011.

Debido al comportamiento que refleja la variabilidad del nivel del mar, en este tipo de cuerpo de agua, demuestra que los eventos atmosféricos son más influyentes que los astronómicos; lo que conlleva a determinar que la marea tiene un comportamiento cooscilante.

En comparación con la fluctuación mareal, realizada por Soto (2011) en la bahía de Turpialito durante cuatro días, reporta que durante el período de surgencia presenta períodos aproximados a 6 horas, obteniendo amplitudes mareales de 16 cm como mínimo y un máximo de 42 cm. Para el período de transición el rango mareal más alto fue de 26 cm y el mínimo de 21 cm; lo que se muestra que el período de transición es muy diferente al de surgencia. Observamos que este tipo de comportamiento da lugar a una marea de tipo mixto, el cual concuerda con nuestro estudio.

CONCLUSIONES

Para el Golfo de Cariaco los estudios de mareas son escasos o nulos, este estudio es el primero en la zona, siendo pionero y arrojando las siguientes conclusiones:

La marea en el área de la bahía de Turpialito tiene un rango mareal de 35 cm y una clasificación mixta principalmente diurna, con un coeficiente de Courtier de 2,34.

Se identificaron 35 constituyentes, de las cuales 20 resultaron ser significativas, 6 de tipo diurno (Q_1 , O_1 , NO_1 , K_1 , J_1 y OO_1), 5 semidiurno (EPS_2 , MU_2 , N_2 , M_2 y S_2), 1 tercidurna lunar (M_3), 4 cuartidiurnas (MN_4 , M_4 , MS_4 y S_4), 1 quintidiurna solar ($2SK_5$), 2 sextidiurnas (M_6 y $2MS_6$) y por último 1 octidiurna lunar (M_8).

Las amplitudes y fase de cada uno de los constituyentes considerados típicamente de origen astronómico, fueron estimados para la predicción de la marea en la bahía de Turpialito.

La marea residual presenta una variación, indicando que existe un desfase entre la serie original y la predicha, obteniéndose una cuantificación del error de la raíz media cuadrática (RMS) de 1,47 cm.

La variabilidad del nivel del mar se incrementó en presencia de los periodos de Luna Llena (Ll) y mínimos en presencia de Luna de Cuarto Creciente (C).

El lugar de estudio es poco profundo, por tanto las constituyentes de aguas someras se hacen significantes y además el factor atmosférico contribuye notablemente en la presentación de máximos del nivel del mar.

Debido al comportamiento del nivel del mar en la bahía de Turpialito se puede esclarecer que torna a un tipo de mareas cooscilantes.

RECOMENDACIONES

A pesar de su importancia ecológica, turística y para la economía regional, es poco lo que se sabe de la oceanografía física en el Golfo de Cariaco, la parte química y biológica en este importante cuerpo de agua para la región ha sido estudiada con mayor énfasis. Hay que resaltar que la parte Nororiental del país es afectada por el fenómeno de surgencia estacional, siendo este proceso el motor principal para la renovación de las aguas. Siendo el estudio de corrientes y marea vital para fortalecer los estudios multidisciplinarios realizados y de esta manera beneficiar a la comunidad en especial a la comunidad de pescadores en las costas surenses con la información.

Se recomienda hacer un estudio más profundo de la variabilidad de nivel del mar y corriente; con la instalación de estaciones mareográficas y correntímetros en el Golfo de Cariaco y a lo largo de la franja costera del país, a fin dar un comportamiento con mayor precisión de la marea y la dirección de las corrientes; de esta manera poder contar con una base de datos que permita realizar futuras investigaciones en los diferentes aspectos que involucra la oceanografía regional.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, G. 2011. Observando el aumento secular del nivel del mar en regiones marino-costeras de Venezuela mediante altimetría satelital multimisión. *Investigaciones en Geodesia Superior*. 1(1):1-20.
- Antonius, A. 1980. Occurrence and distribution of stony corals in the Gulf of Cariaco, Venezuela. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*. 65 (3), 321–338.
- Aparicio, R. 2003. Revisión de las características oceanográficas de la plataforma nororiental de Venezuela. La Sardina (*Sardinella Nutria*). Su medio ambiente y explotación en el Oriente de Venezuela. *Scientific editors*. 1 (1):171-206.
- Aparicio, R y Contreras, R. 2003. Índices de surgencias costera inducida por el viento para la región nororiental de Venezuela. La Sardina (*Sardinella Nutria*). Su medio ambiente y explotación en el Oriente de Venezuela. *Scientific editors*. 1 (1):207-232.
- Bowden, K. 1983. *Physical oceanography of coastal waters*. Ellis Horwood series in marine science, Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña.
- Bonilla, J.; Quintero, A.; Álvarez, M.; De Grado, A.; Gil, H.; Guevara, M.; Martínez, G. y Saint, S. 1998. Condición ambiental de la Ensenada Grande del Obispo, Estado Sucre, Venezuela. *Scientia*. 13 (1): 35-59.
- Caraballo, L. 1982a. Golfo de Cariaco. Parte I: Morfología y batimetría submarina. Estructura y tectonismo reciente. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente* 21 (1-2):13-35.
- Caraballo, L. 1982b. Golfo de Cariaco. Parte II: Los sedimentos superficiales y su distribución por el fondo. Fuente de sedimentos. Análisis mineralógico. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente* 21 (1-2): 37-65.
- Castañeda, J.; Hernández, G y Benítez, A. 2011. *Dinámica costera en las adyacencias de Guaca, estado Sucre*. Trabajo presentado, modalidad poster, IV Foro Iberoamericano de los Recursos Marinos y la Acuicultura (FIRMA) 2011, Viana de Costelo, Portugal.
- Centro de Investigaciones de Astronomía “Francisco J. Duarte”. 2011. Calendario Astronomico. <http://www.cida.gob.ve/cida_home/index.php?option=com_content&view=article&id=358>. (15/11/2011).
- Defant, A. 1961. *Physical Oceanography*. Volumen 2. Pergamon, New York.
- Dias, J. y J. Lopes. 2006. Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal). *Environmental Modelling & Software*. 21(1):1-15.
- Díaz, M. 2009. Caracterización del régimen de mareas en la bahía de Puertos de Cisnes. Trabajo de pregrado. Escuela de Ingeniería Naval, Universidad Austral de Chile, Valdivia.

- Emery, J. y Thomson, R. 2004. *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, Amsterdam.
- Febres, G. y Herrera, L. 1975. Interpretación Dinámica de algunas de las características oceanográficas de la fosas de Cariaco, Mar Caribe. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente* 14(1): 3-29.
- Foreman, M. 1977. *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney.
- Foreman, M. 1978. *Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney.
- Gade, H. 1961a. Informe sobre las condiciones hidrográficas en el Golfo de Cariaco, para el período que empieza en mayo y termina en noviembre de 1960. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente*. 1 (1): 21-47.
- Gade, H. 1961b. Further hydrographic observations in the Gulf of Cariaco, Venezuela. The circulation and water exchange. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente*. 1 (1): 359-395.
- Godin, G. 1972. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto, 264pp.
- Godin, G. 1988. *Tides*. Publicado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California.
- González C. e Y. Molero. 2005. Evaluación de Mediciones GPS para el Estudio del Nivel Medio del Mar y su Vinculación con la red Mareográfica Nacional. Tesis de pregrado. Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia, Maracaibo.
- Grobas, M. 2003. Variación del nivel del mar en el Mediterraneo Occidental a partir de los datos suministrados por los mareógrafos. Trabajo de pregrado. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad de Cataluña, Barcelona.
- Herrera, L.; Febres, G. y Ávila, R. 1981. Las mareas en aguas venezolanas y su amplificación en la región del Delta del Orinoco. *Acta Científica Venezolana*. 32: 299-306.
- Incostas. 1996. *Mediciones hidrodinámicas de corrientes, mareas y vientos en el Golfo de Paria*. Informe Técnico preparado para Lagoven.
- Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. 2003. Red Mareográfica de Venezuela. <http://www.glossealevel.org/publications/documents/reportrafaelmelean_2003.pdf>. (22/10/2010).
- Kjerfve, B. 1981. Tides of the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 86:4245-4247.

Marinone S. y Lavin M. 1997. *Mareas y Corrientes residuales en el Golfo de California*. Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana. p 113-139.

Martín, A.; Malavé, L.; Sánchez, D.; Aparicio, R.; Arocha, F.; Bone, D.; Bolaños, J.; Bolaños-Jiménez, J.; Castañeda, J.; Cárdenas, J.; Carbonini, A.; Díaz, Y.; Guada, H.; Klein, E.; Lazo, R.; Lemus, A.; Lentino, M.; Lira, C.; Lodeiros, C.; López, R.; Marín, B.; Martínez, G.; Márquez, A.; Márquez, B.; Molinet, R.; Morales, F.; Posada, J.; Prieto, A.; Riera, A.; Rodríguez, C.; Ramírez, A.; Senior, W.; Solana P.; Severeyn, H.; Spiniello, P.; Valera, E.; Yanes, C. y Zoppi, E. 2007. *Línea Base Ambiental Plataforma Deltana*. A. Martín y D. Bone (ed.). Petróleos de Venezuela, S. A. - Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. 176 p.

Martínez, A. 1995. Estudio sobre la propagación de ondas de marea en canales: aplicación al análisis de niveles y corrientes en la plataforma de Gran Canaria. Trabajo de doctorado. Departamento de Física, Universidad de Las Palmas, Gran Canaria.

Okuda, T., 1981, *Water exchange and the balance of phosphate in the Gulf of Cariaco, Venezuela*, p. 274-281 in: Richards, F.A., ed., Coastal upwelling, American Geophysical Union, Coastal and Estuarine Sciences, v. 1, 529 p.

Pawlowich, R., B. Beardsley and S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences* 28, 929-937.

Peligrí J. y Avila, R. 1986. Las mareas como sistemas cooscilantes en los Golfos de Venezuela y Paria. *Rev. Tec. INTEVEP*. 6 (1): 3-15.

Pond, S. y Pickard, G. 1983. *Introductory dynamical oceanography*. Segunda edición. Pergamon Press. Gran Bretaña.

Pugh, D. 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley and Sons, Londres.

Quintero, A.; Caraballo, L.; Bonilla, J.; Terejova, G y Rivadula, R. 2006. Sedimentos marino costeros del golfo de Cariaco, Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela*. 45 (2): 127-139.

Quintero, A. y Lodeiros, C. 1996. Variaciones térmicas del agua en Turpialito, golfo de Cariaco, Venezuela. *Bol. Inst. Oceanogr. Venezuela*. 35 (1): 25-40.

Redfield A. 1961. The tidal sistem of Lake Maracaibo, Venezuela. *Limnology and Oceanography*. 6: 1-12.

Robinson, A. 1964. Continental Shelf waves and the response of sea level to weather sistems. *J. Geoph. Res.* 69: 367-368.

Shureman, P. 1988. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. U. S. Govt. Printing Office, Whashington.

Solana, P.; Castellanos, B. y Nalesso, M. 2004. Measurement of hydrodynamic and environmental variables in Morrocoy, Venezuela. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 27(2):100-113.

Soto, G. 2011. Dinámica temporal en los nutrientes, relación con la hidrografía y el fitoplacton en la ensenada de Turpialito, estado Sucre, Venezuela. Trabajo de Postgrado. Departamento de Ciencias Marinas. Universidad de Oriente, Cumaná.

Tel, E. 2005. Variabilidad y tendencias del nivel del mar en las costas de la península Ibérica y zonas limítrofes: su relación con parámetros meteorológicos. Trabajo de doctorado. Departamento de Física General y de la Atmósfera. Instituto Español de Oceanografía, Madrid.

Valeport 2001. Limited model 740. Portable wáter level recorder operating manual.

Varela, R.; Carvajal, F. y Müller-Karger F. 2003. *El fitoplancton en la plataforma nororiental de Venezuela. La Sardina (Sardinella Nutria). Su medio ambiente y explotación en el Oriente de Venezuela*. Sientific editors. 549 pp.

Von Arx, W. 1962. *An introduction to physical oceanography*. Addison-Wesley, London.

GLOSARIO

Amplitud: Es la mitad del recorrido (variación de nivel) de las aguas ocasionado por los componentes armónicos de la marea. También se puede aplicar, por analogía, a la celeridad máxima de un componente de la corriente de marea.

Análisis armónico de las mareas: Representa una de las técnicas más utilizadas para descomponer una serie de tiempo de datos de algún fenómeno geofísico, como lo es una onda de marea, en sus constituyentes armónicas fundamentales, lo que proporciona datos útiles para futuros pronósticos del nivel del mar.

Apogeo: Punto de la órbita elíptica de la Luna cuando está más lejos de la Tierra. En este momento, la gama de marea tiende a reducirse.

Bajamar: La altura mínima alcanzada por las aguas durante la marea vaciante, en una oscilación. La altura puede deberse únicamente a las fuerzas periódicas de la marea o al efecto agregado de las condiciones meteorológicas.

Batimetría: Medida y cálculo de la profundidad de los cuerpos de agua. Topografía submarina.

Componentes o Constituyentes Diurnos: Son aquellos que tienen un período simple durante un día de marea, es decir, que durante dicho lapso sólo presentan una pleamar y una bajamar. Usualmente, estos componentes se distinguen con el símbolo 1.

Componentes o Constituyentes Semidiurnos: Son aquellos que presentan dos máximos y dos mínimos en su altura durante un día de marea. Usualmente, se les identifica con el símbolo 2.

Constantes armónicas: Son las amplitudes y las épocas de los componentes armónicos de las mareas (o de las corrientes de marea) en un lugar determinado.

Corriente de marea: Son corrientes que desplazan las aguas de mar sobre un gran espesor. La velocidad es débil en el océano, pero ya cerca de las orillas, varían mucho en dirección e intensidad, según la configuración de las orillas; por eso puede llegar a ser considerable en las entradas de golfos profundos y relativamente angostos. Pero cualquiera que sea la complejidad de estas corrientes, su característica es su renovación sin cambio con las mismas mareas. En consecuencia, pueden ser previstas muy exactamente, después de ser objeto de observaciones precisas.

Criterio de Rayleigh: Criterio utilizado en el análisis de marea, que requiere que se incluya en el análisis armónico de una serie de momento sólo los componentes que están separados por al menos un período completo de sus electores vecinos sobre la longitud de los datos disponibles.

Cuadratura: Posición de la Luna cuando su longitud celeste difiere 90° de la longitud del Sol. Las fases correspondientes se denominan creciente y menguante. Las amplitudes de mareas durante la cuadratura son las mínimas del mes.

Día lunar: Tiempo que tarda la Tierra en su movimiento de rotación con respecto a la Luna; o sea, el intervalo de tiempo transcurrido entre los dos pasos sucesivos de la Luna por el meridiano del lugar. El día lunar medio es aproximadamente de 24,84 horas de duración o 1,035 veces el día solar medio.

Escala de marea: Regla graduada en metros, decímetros y centímetros o también en pies y décimos de pies. Se coloca verticalmente próxima al mareógrafo y en ella se lee directamente la altura del nivel del mar. Durante el período de observación de la marea, las lecturas de la escala de marea y la posición de la pluma inscriptora, deben ser coincidentes en hora y altura.

Fase: Aspecto repetitivo de un fenómeno periódico, tal como Luna Nueva, pleamar, etc. También es un instante particular de una función periódica expresado en medida angular y calculado desde su máximo valor. El periodo completo de la función se toma como 360° . El máximo (mínimo) de un componente armónico tiene valores de fase de 0° (180°).

Fuerza de Coriolis: Un cuerpo en movimiento en la superficie de la Tierra experimenta una tendencia a girar a la izquierda en el hemisferio Sur y hacia la derecha en el hemisferio Norte, debido a la rotación de la tierra. Esta tendencia (que es un artificial en el marco de referencia de la rotación, en lugar de una fuerza real) es conocida como la fuerza (o aceleración) de Coriolis; es notable con grandes movimientos de escala, como las corrientes marinas y los vientos. La fuerza de Coriolis se ve afectada en la dirección con que la marea se propaga alrededor de un amfidromo y también se puede afectar la propagación de la marea, a medida que se mueve en un canal amplio (más notablemente por la superficie del agua a la izquierda o derecha de la dirección de propagación de inclinación).

Efecto de Coriolis: Fuerza de Coriolis, en mecánica, fuerza ficticia que parece actuar sobre un cuerpo cuando se observa éste desde un sistema de referencia en rotación. Un objeto que se mueve sobre la Tierra a velocidad constante con una componente de dirección Norte-Sur se ve desviado en relación con la Tierra que gira. En el hemisferio norte se desvía en el sentido de las agujas del reloj, y en el hemisferio sur en el sentido opuesto.

Marea: Ascenso y descenso periódicos de todas las aguas oceánicas, incluyendo las del mar abierto, los golfos y las bahías, resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el agua y la propia Tierra.

Mareas Atmosféricas: Variaciones en el nivel del mar causada por las variaciones normales de la presión atmosférica, especialmente en los trópicos; este tipo de mareas también se conocen como radiacionales.

Marea Cooscilante: En los cuerpos de agua semicerrados (Golfos, bahías, estuarios), este tipo de mareas se generan por los factores atmosféricos que actúan sobre las masas de aguas contenidas en él.

Nivel medio del mar (N.M.M.): Nivel promedio de los movimientos del nivel del mar. Su expresión física sería la del plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea. Aunque parece muy simple, no es fácil obtener un valor preciso del N.M.M. puesto que el nivel real del agua está variando constantemente. Existen variaciones de corto período causadas por condiciones atmosféricas y de mar (marejadas anormales, mar de fondo); de período medio (variaciones estacionales de la presión y del viento atmosférico) y de largo período, que pueden tomar décadas y aun siglos. La excelencia del N.M.M. dependerá, entonces, de la longitud del período de observación tomado para determinarlo.

Números de Doodson: Un número de seis dígitos, con cada dígito que describe una característica diferente de marea con arreglo a un sistema desarrollado por Doodson en 1921.

Perigeo: En la órbita elíptica de la Luna alrededor de la Tierra, su punto de máximo de aproximación se denomina perigeo. Con el tiempo, la orientación de la órbita en el plano orbital gira gradualmente. La Luna está en perigeo cada 27.5546 días.

Pleamar: La altura máxima alcanzada por las aguas durante la marea llenante, en una oscilación. La altura puede deberse únicamente a las fuerzas periódicas de la marea o al afecto agregado de las condiciones meteorológicas.

Predicción de la marea: Método que combina los componentes armónicos en una curva simple. En general, esta tarea se realiza en un computador digital electrónico.

ANEXO

A. Constituyentes significantes e insignificantes en el estudio de mareas en la bahía de Turpialito.


```

date: 24-Aug-2011
nobs = 18718,   ngood = 18717,   record length (days) = 64.99
start time: 01-Mar-2011
rayleigh criterion = 1.0
Greenwich phase computed with nodal corrections applied to amplitude \n
and phase relative to center time
x0= -3.34e-005, x trend= 0
var(x)= 0.010357   var(xp)= 0.0081425   var(xres)= 0.0022003
percent var predicted/var original= 78.6 %
      tidal amplitude and phase with 95% CI estimates
tide   freq      amp      amp_err   pha   pha_err   snr
MM     0.0015122   0.0079   0.028    21.10  192.63   0.081
MSF    0.0028219   0.0135   0.027   323.24  159.57   0.26
ALP1   0.0343966   0.0016   0.004   187.11  160.60   0.16
2Q1    0.0357064   0.0024   0.004   134.95  107.46   0.35
*Q1    0.0372185   0.0118   0.005   163.91   26.82    4.7
*O1    0.0387307   0.0724   0.005   171.93    4.01  1.9e+002
*ND1   0.0402686   0.0069   0.004   137.17   34.24    3.3
*K1    0.0417807   0.0845   0.006   156.60    3.66  2.2e+002
*J1    0.0432929   0.0106   0.005   146.04   27.08    5.2
*OO1   0.0448308   0.0062   0.004   184.53   45.44    2.4
UPS1   0.0463430   0.0007   0.003   114.39  198.64   0.046
*EPS2  0.0761773   0.0026   0.002   333.11   57.40    1.4
*MU2   0.0776895   0.0074   0.003    3.72   19.29    8.4
*N2    0.0789992   0.0232   0.002   10.28    6.18    89
*M2    0.0805114   0.0583   0.003   30.51    2.81  5e+002
L2     0.0820236   0.0012   0.003   347.75  139.21   0.19
*S2    0.0833333   0.0088   0.003    2.14   16.98    9.4
ETA2   0.0850736   0.0016   0.002   247.42   84.83   0.49
MO3    0.1192421   0.0004   0.001    55.39  120.68   0.27
*M3    0.1207671   0.0020   0.001   208.20   25.83    4.4
MK3    0.1222921   0.0009   0.001   332.00   62.60   0.88
SK3    0.1251141   0.0003   0.001    60.24  137.69   0.19
*MN4   0.1595106   0.0063   0.002   292.64   23.92    6.8
*M4    0.1610228   0.0088   0.003   24.96   17.28    11
SN4    0.1623326   0.0014   0.002   184.84  110.92   0.31
*MS4   0.1638447   0.0051   0.003   88.91   29.14    3
*S4    0.1666667   0.0050   0.003   271.69   31.74    3.4
2MK5   0.2028035   0.0006   0.001   103.89   93.15   0.45
*2SK5  0.2084474   0.0025   0.001   304.38   25.00    6.2
2MN6   0.2400221   0.0027   0.004   116.00   88.27   0.56
*M6    0.2415342   0.0105   0.004   191.59   19.09    6.4
*2MS6  0.2443561   0.0100   0.004   251.63   25.77    5.7
2SM6   0.2471781   0.0009   0.003   287.92  177.26   0.088
3MK7   0.2833149   0.0013   0.003    3.89   152.28   0.19
*M8    0.3220456   0.0015   0.001   149.28   56.41    1.1

```

HOJA DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

Título	ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA SERIES DE TIEMPO DEL NIVEL DEL MAR EN LA ESTACIÓN HIDROBIOLÓGICA DE TURPIALITO, GOLFO DE CARIACO, ESTADO SUCRE, VENEZUELA
Subtítulo	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Hernández Andrade, Elena Carolina	CVLAC	17.673.347
	e-mail	hernandezlna@gmail.com
	e-mail	
	CVLAC	
	e-mail	
	e-mail	
	CVLAC	
	e-mail	
	e-mail	
	CVLAC	
	e-mail	
	e-mail	

Palabras o frases claves:

Constituyentes mareales
Mareógrafo
marea cooscilante
componentes armónicos

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
Ciencias	Física

Resumen (abstract):

En este trabajo se determinan el régimen de mareas, las constituyentes mareales armónicas y no-armónicas en la bahía de Turpialito, Golfo de Cariaco, Venezuela. Se realizaron mediciones horarias del nivel del mar con un mareógrafo Valeport model 740 entre el 01 de marzo y 04 de mayo de 2011. Los resultados muestran la presencia de un régimen de mareas mixto con predominio diurno, amplitud máxima de 34,62 cm. Se determinó un bajo coeficiente de amplitud como medida de la distorsión de la componente mareal semidiurna, lo cual revela la influencia del efecto de las aguas someras en la bahía. Las mayores amplitudes fueron registradas cuando se observó una combinación entre la fase de Luna llena y la prolongación de los vientos en la zona, mientras las menores amplitudes fueron registradas durante la fase Cuarto Creciente; demostrando con esto que el comportamiento de la marea es cooscilante. Más del 80% de la energía de la onda de marea es aportada principalmente por 4 (K_1 , O_1 , M_2 y N_2) de los 35 componentes armónicos obtenidos en el análisis.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
Hernández Hernández, Glenys José.	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input checked="" type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	10.945.710
	e-mail	glenysjose@gmail.com
	e-mail	
Beauperthuy Urich, Luis Daniel	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	2.925.877
	e-mail	luisboper@yahoo.com
	e-mail	
Castañeda, Julián José	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	5.694.047
	e-mail	jjcasta@gmail.com
	e-mail	

Fecha de discusión y aprobación:

Año Mes Día

2012	03	22
------	----	----

Lenguaje: SPA

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis_ElenaH.doc	Application/word

Alcance:

Espacial : _____ **(Opcional)**

Temporal: _____ **(Opcional)**

Título o Grado asociado con el trabajo: Licenciado en Física

Nivel Asociado con el Trabajo: Licenciado

Área de Estudio: Oceanografía Física

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado: Universidad de Oriente

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Letido el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.



Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

JUAN A. BOLAÑOS CUNVELO
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

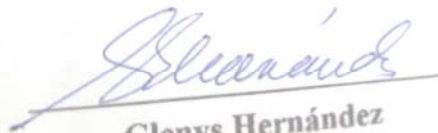
JABC/YGC/maruja

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso- 6/6

Artículo 41 del REGLAMENTO DE TRABAJO DE PREGRADO (vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009) : “los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”.



Elena C. Hernández A..
AUTOR



Glenys Hernández
TUTOR