



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
INGENIERÍA EN SISTEMAS AMBIENTALES**

Variación de alta frecuencia de la temperatura en
el fondo del Sistema Arrecifal Veracruzano

T E S I S

Presenta:

Ana Laura Aguilar González

Asesor de Tesis: Jorge Zavala Hidalgo

Co-asesor de Tesis: Hugo Alberto Barrera Huertas



México, C.D.M.X., agosto de 2021.



1 ÍNDICE

I. RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivos	8
1.2. Hipótesis.....	8
1.3. Justificación	9
2. MARCO DE REFERENCIA	12
2.1. Arrecifes de coral	12
2.2. Circulación oceánica que afecta la distribución de la temperatura	17
2.2.1. Brisas de mar y de tierra	17
2.2.2. Mareas	18
2.2.3. Termoclina	20
2.2.4. Forzamiento por el viento	20
2.2.5. Surgencia costera.....	21
2.2.6. Transporte de Ekman.....	21
2.2.7. Ondas inerciales.....	24
2.3. Antecedentes	26
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	30
3.1. Sistema Arrecifal Veracruzano	30
4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	37
4.1. Datos de temperatura.....	37
4.2. Procesamiento de datos	43
4.2.1. Filtros Digitales.....	44
4.3. Análisis de series de tiempo.....	48
4.3.1. Análisis de Fourier.....	49
4.3.2. Análisis Multitaper.....	52

4.3.3. Análisis Wavelet.....	52
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1. Variaciones de temperatura en alta frecuencia	55
5.2. Periodos de la variabilidad de la temperatura con análisis de Fourier y Multitaper	59
5.3. Periodos de la variabilidad de la temperatura con análisis Wavelet.....	66
5.4. Discusión	73
6. CONCLUSIONES.....	76
II. GLOSARIO	79
III. REFERENCIAS	81
IV. APÉNDICE.....	85

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por brindarme los recursos y el tiempo para complementar mi educación, así como brindarme en todo momento su apoyo. A Fer, Chaak y Quetzal por estar siempre a mi lado, motivándome a superarme cada día.

A mi escuela por permitirme formar parte de esta institución de excelencia académica.

A los miembros del comité de sinodales por sus importantes contribuciones al desarrollo y mejoramiento de este trabajo.

A mi asesor de tesis el Dr. Jorge Zavala Hidalgo, muy especialmente, por tener siempre la paciencia para el aprendizaje, su orientación y su esfuerzo para facilitarme la conclusión de este trabajo.

A mi co-asesor de tesis el M. en C. Hugo Alberto Barrera Huertas, por el apoyo no sólo como profesor si no también como amigo que me motivó para no rendirme ante nuevos desafíos.

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de los proyectos PAPIIT 120408-3, PAPIIT IN116111 y CONACYT 133299 con los cuales se pudo realizar los muestreos que fueron la base para este trabajo.

I. RESUMEN

El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) se encuentra localizado en la plataforma continental del Golfo de México, frente a las costas del Puerto de Veracruz, de Boca del Río y Antón Lizardo. El SAV tiene un área de 65,516.47 hectáreas, por su extensión es la segunda área más grande de arrecifes de coral del país.

Los arrecifes de coral son ecosistemas que albergan una gran diversidad de vida marina, contribuyen a la conectividad con otros ambientes marinos, crean barreras naturales que protegen las zonas costeras de la erosión provocada por el oleaje, también contribuyen a la pesca y al turismo por lo que su valor ambiental es muy elevado.

La temperatura es uno de los principales factores ambientales que afectan a los arrecifes coralinos llevándolos incluso a su muerte -o blanqueamiento-, si se excede su límite termal por un periodo prolongado de tiempo.

La temperatura que se presenta en el Golfo está determinada en gran parte por la dinámica oceánica de la zona y los flujos de calor a través de la superficie. Los vientos tienen diversos movimientos oceánicos que involucran el forzamiento de la circulación por los vientos en la superficie y el transporte de Ekman, que repercute sobre la estructura térmica en la columna de agua.

El propósito de este trabajo es estudiar la variabilidad de alta frecuencia de la temperatura en el Sistema Arrecifal Veracruzano mediante el análisis de observaciones de temperatura casi continuas, obtenidas mediante un anclaje en el fondo con termistores a diferentes profundidades de la columna de agua y del sensor de temperatura de un perfilador de corriente colocado a 30 m de profundidad.

Se aplicaron filtros paso bajo y paso alto a las series de datos con el fin de obtener la variación de temperatura en distintas frecuencias y determinar las que predominan en la región, haciendo uso de los análisis de Fourier, Multitaper y Wavelet.

Se trabajo con observaciones de 2008 a 2013 obteniéndose como resultados que las oscilaciones de temperatura en el fondo tuvieron máximos en los espectros en periodos entre 24 y 60 horas, con mayor energía alrededor de las 36 horas, por lo cual se concluye que las variaciones de alta frecuencia de la temperatura están asociadas, principalmente, a oscilaciones inerciales, pues la frecuencia inercial en la latitud del SAV es de 36.5 horas.

El análisis de la hidrodinámica en la región revela que la temperatura del mar en el fondo del Sistema Arrecifal Veracruzano será menos afectada por cambios de temperatura asociados al Calentamiento Global o al Cambio Climático. Esto se debe a que durante el verano en que los flujos de calor a través de la superficie son mayores, la surgencia es mayor y ocurren oscilaciones inerciales que provocan que las temperaturas subsuperficiales no se eleven por encima de los umbrales críticos de temperatura que afectan a los arrecifes tropicales de coral.

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura media superficial del mar a nivel global ha aumentado. La tendencia de calentamiento durante 100 años (1906 – 2005) es de entre 0.74°C (IPCC, 2007). Particularmente, este aumento de la temperatura se refleja de manera significativa en latitudes altas, aunque en menor medida también en los trópicos. Es en las zonas tropicales donde los arrecifes de coral se encuentran y generalmente viven cerca de su límite termal (menor a 24°C y mayor a 29°C). Cuando por un periodo prolongado de tiempo se excede la temperatura que pueden soportar, se da lugar a la muerte masiva de coral; lo que se conoce como blanqueamiento del coral, que puede extenderse hasta cientos de kilómetros cuadrados de océano.

Según estudios realizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) los eventos de blanqueamiento del coral se incrementarán tanto en frecuencia como en intensidad durante los siguientes 30 o 50 años. La frecuencia con la cual se podrían presentar estos eventos de blanqueamiento es preocupante y puede llegar a afectar severamente todo el ecosistema marino a nivel global (Hoegh-Guldberg, 1999).

Considerando las condiciones de este fenómeno a nivel global, en este trabajo se analizaron las variaciones de la temperatura que ocurren en la región del Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV). El objetivo de este análisis fue conocer las frecuencias de la variabilidad de la temperatura en el SAV y sus procesos físicos asociados mediante el estudio de la variación de la temperatura. Los resultados de este trabajo ayudarán a comprender la vulnerabilidad al blanqueamiento de los arrecifes de coral a partir del conocimiento de la repercusión de la dinámica oceánica en los ecosistemas marinos como este.

Con esta información, asimismo, se podrá apoyar la toma de decisiones en el manejo, cuidado y protección que requiere el Sistema Arrecifal Veracruzano.

1.1. Objetivos

Objetivo general

Estudiar la variabilidad de alta frecuencia de la temperatura del mar en el Sistema Arrecifal Veracruzano mediante el análisis de observaciones de temperatura.

Objetivos particulares

- ❖ Analizar la temperatura en la capa profunda del mar en el SAV medida a través de sensores de temperatura en perfiladores de corriente y termistores.
- ❖ Determinar las causas de la variación en alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del Sistema Arrecifal Veracruzano.

1.2. Hipótesis

La variación de la temperatura en el fondo del océano en alta frecuencia puede deberse a la influencia de la marea interna o a la brisa marina. Esta última puede estar asociada a fenómenos de transporte de Ekman que contribuyen a la entrada de agua de baja temperatura que impacta la zona coralina del Sistema Arrecifal Veracruzano.

1.3. Justificación

Los arrecifes de coral son ecosistemas que albergan a una gran diversidad de vida marina. Son las comunidades con mayor número de especies, productivas y vulnerables de los mares rivalizando en diversidad biológica tan sólo con las selvas tropicales y los bosques de niebla, dos de los ecosistemas más diversos en el planeta.

México cuenta con tres zonas de arrecifes coralinos: la costa del Pacífico, las costas de los estados de Veracruz y Campeche en el Golfo de México y la costa este de la Península de Yucatán. Se estima que el área que ocupan estos arrecifes de coral en el país asciende a cerca de mil 780 kilómetros cuadrados, esto es, cerca de 0.63% del área total de arrecifes coralinos de agua cálida en el mundo.

La riqueza de especies de corales formadores de arrecifes en México se ha estimado entre 63 y 81 especies, lo cual representa a nivel global entre el 8 y 10 por ciento de las especies conocidas. De esta diversidad de corales en el país, la zona del Mar Caribe es la que contiene el mayor número de especies, entre 45 y 56, seguida por los arrecifes de las costas de Veracruz y Campeche en el Golfo de México, con 45 especies.

Existen factores que amenazan la riqueza de especies en los arrecifes de coral en México, entre ellos se encuentran las actividades antropogénicas que son llevadas a cabo en la zona costera. La sobreexplotación pesquera, las actividades turísticas, la contaminación, así como la construcción de infraestructura son consideradas como las actividades que generan mayores impactos sobre estos ecosistemas. En 1998, el World Resources Institute (WRI), realizó un estudio con el fin de conocer el grado de amenaza de los arrecifes de coral en el mundo, para el cual se basó en cuatro impactos antropogénicos: desarrollo costero, contaminación marina, sobreexplotación y pesca no sustentable y, por último, erosión y contaminación de origen continental. En el caso de México los resultados muestran que los arrecifes de la costa de Veracruz (Sistema Arrecifal Veracruzano y Tuxpan), así como los más cercanos a los principales centros turísticos en Quintana Roo son los más amenazados (SEMARNAT, P., 2005).

La importancia ambiental que tienen los arrecifes de coral se debe a varios aspectos entre los que destacan:

- La biodiversidad. Los arrecifes de coral abarcan la mayor diversidad de especies dentro del ecosistema marino, entre una cuarta y una tercera parte. Gran parte de los animales marinos pasan una parte de su vida ahí, ya sea para su reproducción, su fase larvaria, desove, etc.
- La conectividad. Hace referencia a la propagación de elementos, pueden ser nutrientes, organismos o contaminantes, que migran de un ecosistema a otro, ya sea entre arrecifes de coral o entre estos y otros ambientes marinos, como pueden ser zonas de manglar y praderas de pastos marinos. La importancia que tiene la conectividad entre arrecifes coralinos radica principalmente en la diversidad de especies debido a la dispersión de nutrientes y de organismos en diferentes etapas de vida (Chávez-Hidalgo, 2009).
- El turismo. Los arrecifes coralinos son los principales formadores de playas de arena blanca, debido al carbonato de calcio presente en su estructura. Estas playas son destinos importantes para el turismo.
- La pesca. Los peces que se desarrollan en los arrecifes son una fuente importante para la pesca ya que se encuentra una enorme biodiversidad de ellos.
- La seguridad de zonas costeras. Los arrecifes actúan como una barrera natural para amortiguar la llegada de oleaje a la costa, lo cual la protege de la erosión provocada por las olas (Pinet , 2003); (Sanvicente *et al.*, 2014).

Debido a la importancia ambiental que poseen los arrecifes coralinos, la mayoría de éstos en México se encuentran protegidos bajo alguna categoría de Área Natural Protegida (ANP), lo cual ha sido una de las estrategias de política ambiental más importantes. Existen 13 Áreas Naturales Protegidas que incluyen zonas con arrecifes

de coral, 9 en el Golfo de México y el Mar Caribe y las restantes se localizan en las costas del Pacífico.

Para la protección de los arrecifes de coral en el país, también existen leyes y normas mexicanas entre las cuales están la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas, la Ley de Pesca, la NOM-059-SEMARNAT-2001 (que enlista a las especies de flora y fauna en alguna condición de riesgo), la NOM-022-SEMARNAT-2003 (que establece las especificaciones para la preservación, conservación y restauración de los humedales costeros), entre otras. (SEMARNAT, P., 2005).

El Sistema Arrecifal Veracruzano presenta un alto grado de contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales, agroquímicos y fertilizantes, y de los desechos de ingenios azucareros (Cederstav, 2015).

El SAV es considerado como uno de los arrecifes más importantes del territorio nacional, abarca 65 516 hectáreas y cuenta con una gran cantidad de especies marinas. Es por esto que el análisis del impacto que tiene la variabilidad de la temperatura en alta frecuencia es de suma importancia para su conservación.

Las variaciones en alta frecuencia de la temperatura reflejan los cambios que puede tener el agua en la capa profunda del mar en bajos periodos de tiempo (menores a 48 horas), por lo que en este trabajo se analizaron aquellos procesos oceánicos que repercuten en la temperatura del fondo del mar en periodos menores a 48 horas.

Dentro de este trabajo se estudió la variación en alta frecuencia de la temperatura en el Sistema Arrecifal Veracruzano, a partir de observaciones de temperatura obtenidas durante varios años.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Arrecifes de coral

Los arrecifes coralinos son grandes estructuras calcáreas que se forman en los fondos marinos a partir de colonias de pequeños individuos llamados pólipos coralinos, que son animales que pertenecen, junto a las anémonas marinas y las medusas, al grupo de los *cnidarios*. Estos pólipos cuentan con una estructura sencilla con una boca central rodeada de tentáculos que le ayudan a capturar plancton para su sustento. Dentro del tejido endodérmico coralino habitan algas microscópicas llamadas *zooxantelas*, éstas junto con el coral actúan de manera simbiótica; el coral les otorga protección y las condiciones necesarias para llevar a cabo la fotosíntesis, mientras que las algas brindan alimento y energía suficiente al coral para su producción de carbonato de calcio a partir del dióxido de carbono que éste utiliza para su respiración. Es a partir de esta secreción de carbonato de calcio, o roca caliza, que se forman los arrecifes de coral (Byatt, Fothergill, & Holmes, 2001); (NOAA, 2014).

Cuando las condiciones en el ambiente marino no son las adecuadas, los corales y las *zooxantelas* se ven estresados por lo cual estas últimas abandonan el tejido coralino, como se puede apreciar en la figura 2-1. Si estas condiciones se mantienen por un periodo de tiempo prolongado el coral pierde su principal fuente de alimento, debido a la ausencia del alga, y se torna de color blanco ya que son las *zooxantelas* las responsables de gran parte de la variedad de colores que tiene el coral. Cuando el coral se blanquea se vuelve más vulnerable a daños severos que causan su muerte.

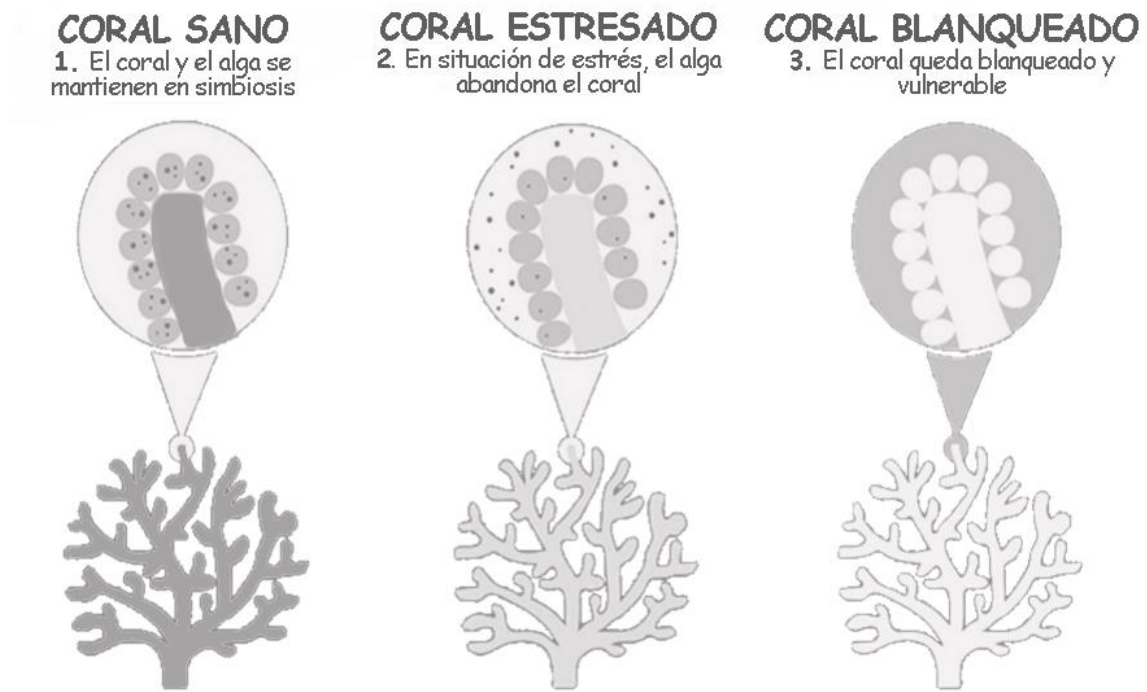


Figura 2-1. Proceso de blanqueamiento del coral. (Tomada de NOAA's Coral Reef Conservation Program, 2002. Modificado).

Está reportada la fragilidad que existe entre los cambios leves de temperatura y el blanqueamiento del coral, por lo cual es de importancia estudiar de mejor manera, las causas de la variabilidad de alta frecuencia de la temperatura en el ecosistema del arrecife coralino que es el tema de estudio en este trabajo.

Temperatura

La temperatura superficial del océano depende, entre otros factores, de la latitud, por la cantidad de radiación solar que recibe, por lo que la temperatura del agua en los trópicos es mayor y va reduciéndose conforme se acerca hacia los polos. De igual modo, las corrientes marinas contribuyen a la distribución de la temperatura en los océanos. Añadido a esto, la temperatura está determinada por las estaciones del año y las horas del día, por lo que varía a lo largo del tiempo de manera natural.

Debido a que la distribución de la temperatura superficial del mar depende de varios procesos, el estudio de la variación de la temperatura a nivel global se vuelve complejo. Es por esto por lo que existen líneas imaginarias a lo largo del globo que conectan puntos de igual temperatura del agua las cuales son conocidas con el nombre de isotermas, estas líneas ayudan a mostrar la temperatura superficial del océano en diferentes zonas geográficas.

Muchos biólogos consideran la temperatura del agua como el principal regulador de la distribución y la actividad biológica de muchos organismos en el océano. Esta creencia puede sustentarse al observar la distribución y la migración de muchas especies, que al trasladarse de un lugar a otro se mueven siguiendo el contorno de las isotermas.

Las especies de coral viven en las zonas cercanas a los trópicos donde las temperaturas son las idóneas para su supervivencia, las cuales se encuentran en un intervalo de entre los 25°C y los 29°C. Cuando la temperatura alcanza un valor, fuera de ese intervalo, de entre 0.5°C y 1.5°C, y se mantiene durante un periodo prolongado de tiempo, que puede llegar a ser de entre varios días hasta semanas, dependiendo de la especie del coral, puede provocar su blanqueamiento (Allende Arandía, 2015); (Pinet , 2003).

La temperatura es el principal factor que repercute en los arrecifes coralinos, no exclusivamente en el SAV, sino también a nivel global. Conociendo cómo afecta la temperatura en los arrecifes de coral, así como su distribución a diferentes latitudes, es posible llegar a conclusiones más precisas sobre la repercusión de las variaciones de temperatura en el ecosistema de estudio.

Salinidad

La salinidad en la superficie de los océanos, también se ve afectada en gran medida por la latitud, debido a los cambios de temperatura que se pueden encontrar a

diferentes latitudes, además de la diferencia que existe entre la evaporación y la precipitación a nivel local. La descarga de ríos también es un factor importante que modifica la salinidad, particularmente en la zona costera. Una mayor evaporación de agua, provoca una mayor concentración de las sales que se encuentran disueltas en el agua, aumentando la salinidad. Por el contrario, la precipitación al añadir agua, diluye las sales, disminuyendo la salinidad. La salinidad del agua en una región está determinada por la diferencia que existe entre la evaporación y la precipitación anual (Pinet , 2003).

La mayor salinidad se encuentra en las regiones entre los 20° y 30° de latitud norte y sur, conocida como subtrópicos, reduciéndose en los polos y en el Ecuador. Los arrecifes coralinos se establecen en la zona tropical, donde la salinidad del agua disminuye mientras se aproxima al Ecuador. De acuerdo con estudios realizados sobre el blanqueamiento del coral, no existe evidencia que indique que la reducción, por debajo de las 30 partes por mil (ppm) en la salinidad, sea una causa de muerte de corales. Sin embargo, al bajar la salinidad a 23 ppm, pueden presentarse eventos de blanqueamiento, cuando se mantiene la exposición entre 4 y 10 días (Hoegh-Guldberg & Smith, 1989); (Allende Arandía, 2015).

Acidificación

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas íntimamente relacionado con los procesos de fotosíntesis y respiración de las plantas, y por tanto también de las algas presentes en el agua marina. Una parte del CO_2 que se encuentra en la atmósfera es captado por las *zooxantelas* presentes en el coral, para realizar la fotosíntesis, formando carbonato de calcio (CaCO_3) lo que promueve la formación de estructuras calcáreas que ayudan al crecimiento de los arrecifes.

Cuando se aumenta la concentración de dióxido de carbono en los océanos, éste se acidifica, ya que el CO_2 al entrar en contacto con los iones H^+ presentes en la molécula

de agua, forma ácido carbónico que resulta extremadamente corrosivo para las estructuras calcáreas de los arrecifes e incluso también, para conchas y otros organismos marinos. La disminución del pH en el agua marina evita además, la deposición del carbonato de calcio, lo que afecta directamente en el crecimiento de los arrecifes coralinos (Pinet, 2003); (Allende Arandía, 2015); (Bádenas & Aurell, 1999).

Aunque además de la temperatura, existen otros factores como lo son la salinidad y la acidificación del agua que pueden contribuir al blanqueamiento del coral. Para este trabajo, se estudian únicamente las variaciones de alta frecuencia de la temperatura en el Sistema Arrecifal Veracruzano.

2.2. Circulación oceánica que afecta la distribución de la temperatura

En aguas poco profundas como las zonas costeras que se encuentran sobre la plataforma continental, la dinámica oceánica cambia con respecto a la circulación que presenta el océano profundo, esto debido a varios procesos físicos que se llevan a cabo en una zona y en otra. Uno de estos efectos físicos es el que produce la fricción del suelo oceánico en aguas poco profundas, esta fricción puede ser ignorada en el océano profundo, pero no en el océano costero. Otro proceso importante que diferencia el océano profundo de la zona costera es el efecto que produce la marea. La marea son ondas oceánicas con una gran longitud de onda y pequeña amplitud cuando se encuentran en aguas profundas, pero cuando la marea se acerca hacia la costa la amplitud de onda se incrementa y la propagación de la cresta de la onda se retrasa. También es frecuente que ocurra un incremento en la corriente de marea, que en muchas zonas costeras representa la principal contribución de las corrientes. Finalmente, otro factor es la influencia de la línea de costa que resulta un obstáculo para el flujo de agua que, en combinación con los patrones de viento puede provocar un flujo descendente hacia el fondo (downwelling) o ascendente hacia la superficie (upwelling) (Tomczak, 1998).

Para este estudio es importante recalcar que, debido a que los arrecifes coralinos se encuentran presentes en océanos costeros o aguas poco profundas, los procesos oceanográficos descritos a continuación son aquellos que determinan la dinámica y por ende la distribución de la temperatura de estas zonas.

2.2.1. Brisas de mar y de tierra

Las brisas marinas son vientos costeros que se presentan por la diferencia de temperatura de la tierra y el mar. Durante el día, la radiación solar provoca que la tierra aumente su temperatura más rápidamente que el agua de mar adyacente, esto produce un intenso calentamiento de la masa de aire que se encuentra cercana a la

superficie de la tierra. La masa de aire caliente sobre la tierra se eleva por diferencia de densidades creando un sistema de baja presión en la zona más cercana a la superficie de la tierra. Mientras tanto, la masa de aire cercana a la superficie del agua se mantiene más fría que la masa de aire sobre la tierra lo que provoca un sistema de alta presión sobre el agua. La diferencia de presiones provoca que el viento viaje del sistema de alta presión al de menor presión, esto es la brisa marina que sopla desde el mar hacia la tierra. Los gradientes de temperatura y de presión se incrementan al acercarse a la frontera entre la tierra y el agua, esto ocasiona que sea en esta zona de la costa donde se presentan los vientos más intensos, que disminuyen mientras se alejan del frente de brisa. De igual modo, como la mayor diferencia de temperatura entre la tierra y el mar normalmente ocurre en la tarde, la brisa marina se presenta con mayor fuerza a esta hora del día.

Por otra parte, en la noche la tierra se enfría con mayor rapidez que el agua por lo que la masa de aire encima se encuentra más fría, en comparación con la masa de aire que se encuentra sobre el agua de mar. Esto provoca un sistema de alta presión sobre la tierra y, por el contrario, un sistema de baja presión sobre el agua; por lo que el viento presente tiene un desplazamiento de la tierra al mar, conocido como brisa de tierra. Generalmente durante la noche, el gradiente de temperatura entre la tierra y el mar es mucho menor en comparación con el gradiente observado durante el día, por lo que la brisa de tierra presenta vientos más débiles que la brisa de mar (Ahrens, 2010).

2.2.2. Mareas

Se le conoce como marea al incremento y decremento del nivel del agua en el mar que ocurre diariamente. Este movimiento de la marea es provocado por la acción de dos fuerzas principales: la fuerza de atracción que ejercen tanto la luna como el sol sobre el agua del océano en el planeta y la fuerza centrífuga que ocasiona la rotación

de la Tierra. La magnitud de la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Como la luna se encuentra mucho más cercana a la Tierra que el sol, su campo gravitacional tiene un mayor efecto en nuestro planeta a pesar de que el sol cuenta con mayor masa que ésta. Es por esta razón que la luna es el principal regulador de la marea.

La fuerza de gravedad lunar crea una elevación de agua en el lado de la Tierra que queda frente a la luna, y a la vez se crea una segunda elevación en el lado opuesto. Esta última debido al efecto que produce la fuerza centrífuga de la rotación del planeta. Tanto la Tierra como la luna se encuentran simultáneamente en rotación alrededor de un mismo centro de masa por lo que el agua de los océanos tiende a alejarse del centro de rotación del sistema Tierra-luna creando esta última elevación. El resultado final son dos elevaciones de masas de agua en la superficie terrestre una opuesta a la otra (Pinet, 2003).

Aunque las fuerzas que impulsan la marea tienen influencia en todas las masas de agua presentes en el planeta, estas no representan una contribución significativa para la circulación oceánica a gran escala.

Por el contrario, cuando el equilibrio de fuerzas se da en mares poco profundos, aun cuando se conserve el estado estacionario, la situación se torna diferente. En la mayoría de los mares costeros el movimiento de la marea, aunque sigue siendo periódico, ya no es de baja amplitud y provoca un mayor movimiento de las masas de agua en la zona. Las corrientes de marea en mares poco profundos provocan una mezcla lo suficientemente fuerte para modificar su estratificación. Esto implica que cualquier estudio sobre la dinámica oceánica en mares poco profundos, debe incluir el efecto del movimiento de las mareas (Tomczak, 1998).

2.2.3. Termoclina

Es la profundidad en que ocurre un cambio abrupto de la temperatura en la columna de agua, es decir, en donde la temperatura tiene mayores cambios en la vertical se le conoce como termoclina (De Buen, 2007); (Pinet, 2003). La temperatura superficial del océano difiere dependiendo de la región en la que se encuentre, ya sea polar, templada o tropical. El agua superficial se encuentra alrededor de los 15 y 30°C, en las zonas templadas y tropicales respectivamente, y a los 2°C en las regiones polares. Conforme aumenta la profundidad, la temperatura disminuye drásticamente en los primeros 1000 metros, de los 15 a 20°C hasta los 5°C. A los 3 000 metros de profundidad, el agua alcanza la temperatura de 2°C y se mantiene constante al seguir aumentando en profundidad.

Existe una termoclina estacional que se encuentra presente en todas las estaciones exceptuando durante el invierno, esto es durante la primavera, el verano y el otoño. Esta termoclina se encuentra por debajo de la capa de Ekman. El incremento de radiación solar durante la primavera produce un calentamiento en la superficie de la capa mezclada, donde el calor proveniente de la atmósfera es distribuido uniformemente por el proceso de mezclado en esa capa. Esto da por resultado una zona de rápida transición de masas de agua cálida a fría, que es la termoclina estacional (Tomczak, 1998).

2.2.4. Forzamiento por el viento

En el límite entre el océano y la atmósfera se llevan a cabo varios procesos de transferencia, como lo son de momento, o cantidad de movimiento, de calor y de masa, la mayoría de estos son inducidos por los vientos que impactan en la superficie oceánica.

Al viento horizontal que afecta directamente la superficie del océano, se le conoce como esfuerzo del viento (wind stress), que tiene unidades de fuerza por unidad de

área (Pascales). En otras palabras, es la transferencia de momento de la atmósfera hacia el océano. Este transporte puede tener gradientes horizontales, como los vientos y las corrientes, y verticales a través de las capas oceánicas (Stewart, 2008); (Jones & Toba, 2001).

2.2.5. Surgencia costera

La surgencia costera se presenta por el forzamiento del viento. Cuando las aguas de la superficie son empujadas por vientos dominantes hacia mar adentro, se crea un ascenso de aguas subsuperficiales hacia la costa, o cuando se presenta una divergencia del esfuerzo del viento sobre la superficie. Este fenómeno conocido como surgencia o alforamiento (upwelling, en inglés), incrementa la estabilidad atmosférica y disminuye la transferencia de momento entre el agua y el aire (Pinet, 2003); (Jones & Toba, 2001).

La surgencia es uno de los procesos más importantes en el océano costero, ya que contribuye a la regeneración de nutrientes en las capas superficiales del mar al mover las masas de agua más profundas, ricas en nutrientes, hacia la superficie. La surgencia en océanos costeros puede ser debida a muchos factores, en la mayoría de los casos es debida al esfuerzo del viento y los efectos que esta pueda ocasionar tanto en corrientes oceánicas, estratificación, como en la distribución de nutrientes, son determinados por la topografía del sitio, la profundidad del agua y la forma de la línea de costa (Tomczak, 1998).

2.2.6. Transporte de Ekman

Describe el transporte de las masas de agua superficiales inducido por el esfuerzo del viento y que está influenciado por la fuerza de Coriolis. El transporte de Ekman tiene una dirección de 90 grados hacia la derecha (izquierda) de la dirección del viento en

el hemisferio norte (sur). Cuando el esfuerzo del viento mueve las masas de agua en la superficie de manera horizontal, se crea también un movimiento vertical en la columna de agua. El agua en la superficie mueve las masas de agua de las capas inferiores debido a la fricción que provoca cada capa una sobre la otra, añadiendo el movimiento que provoca la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis), se va formando un movimiento en forma de espiral a través de la columna de agua obteniendo un transporte de momento neto de 90°. El transporte de Ekman provoca también surgencias costeras que transportan masas de aguas profundas, de menor temperatura, hacia la superficie que se encuentra más cálida (Pinet, 2003).

La velocidad de la corriente es mayor en la superficie y decrece rápidamente con la profundidad. Así mismo, la dirección de la corriente cambia con la profundidad como se observa en la figura 2-2. También se observa que, a cierta profundidad, la dirección de la corriente se opone completamente a la corriente en la superficie, sin embargo, cuando ocurre esta situación, esta corriente es tan pequeña que puede ser despreciada. Esta profundidad es conocida como el fondo de la capa de Ekman.

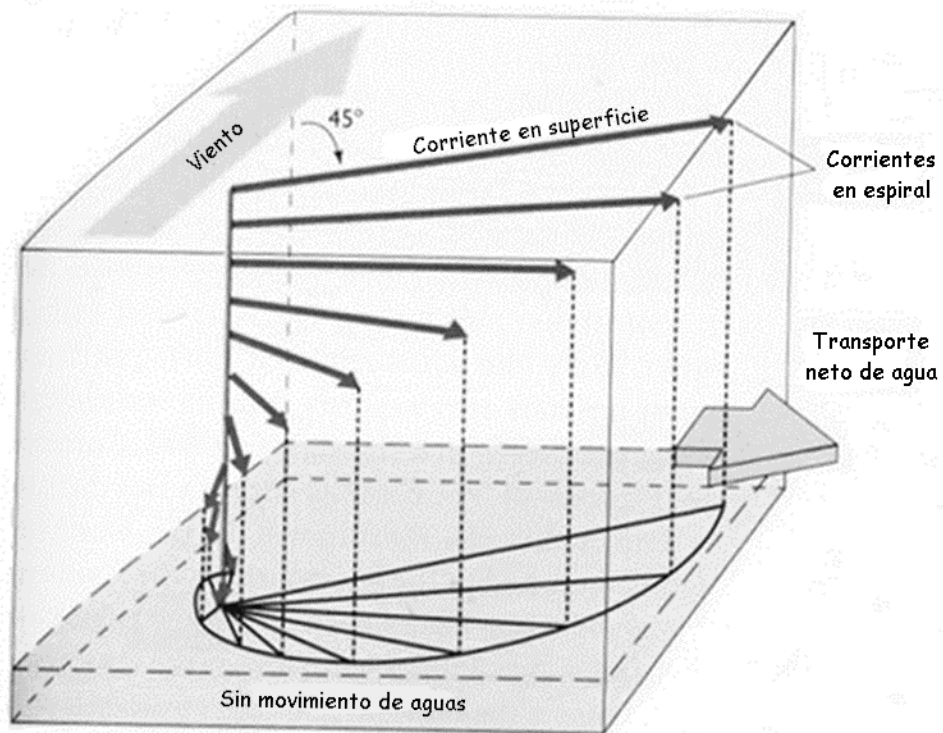


Figura 2-2. Espiral de Ekman representada en el hemisferio norte. (Tomada de *Introduction to Oceanography*, Pinet, 2003. Modificado).

Existen varias suposiciones que son usadas para explicar los detalles de la capa de Ekman, una de ellas está relacionada con el proceso de transferencia de momento entre las capas superficiales del océano hasta las más profundas. En ausencia de turbulencia, la transferencia de momento podría deberse a la fricción que hay entre las moléculas de agua. Este efecto de fricción puede cuantificarse con la medida de la viscosidad molecular cinemática en el fluido, que en el agua se encuentra en el orden de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Esto implica que la capa límite de fricción es normalmente de 0.1 m de grosor. Esto no ocurre con frecuencia en el océano donde la capa límite de fricción se encuentra en el orden de las decenas de metros de grosor. Lo anterior implica que la transferencia de momento en el océano costero es debida a la turbulencia que existe en la zona, generalmente provocada por la acción de remolinos de diferentes tamaños.

Como se describió anteriormente, la espiral de Ekman observada en la figura 2-2, depende de la profundidad en la columna de agua. En aguas poco profundas, el flujo de agua es controlado por el esfuerzo del viento y la fricción que existe con el fondo oceánico. Cuanto la columna de agua es más somera que la profundidad de Ekman, mayor se vuelve el transporte de Ekman, que en estas condiciones se convierte en el transporte total de la columna de agua en dirección al viento (Tomczak, 1998).

2.2.7. Ondas inerciales

Para el estudio de las corrientes marinas de superficie es importante destacar los esfuerzos que provocan el movimiento de las masas de agua. Por ejemplo, el impulso puede ser un fuerte viento que sopla a lo largo de algunas horas, al paso de un frente y posteriormente vuelve la calma. Después de eso el agua se moverá bajo la influencia de la fuerza de Coriolis, este movimiento es conocido como movimiento inercial. Si el agua se encontrara en el espacio, el movimiento sería rectilíneo de acuerdo con la primera ley de Newton, pero dentro del planeta Tierra, donde se ve influenciada por la rotación y la curvatura de la Tierra, el movimiento tiene un comportamiento muy diferente (Stewart, 2008).

Sin considerar la fricción o cuando esta es muy pequeña y la fuerza del gradiente de presión, el movimiento de una masa de agua en la Tierra en rotación está controlado por las fuerzas de gravedad y de Coriolis las cuales no pueden cambiar la magnitud del movimiento horizontal que lleva el agua, pero sí la dirección. La ecuación del movimiento suponiendo un flujo horizontal y sin fricción, se puede simplificar para las componentes horizontales como:

$$\frac{du}{dt} = fv \quad (2.2.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu \quad (2.2.2)$$

Despejando u de la segunda ecuación y sustituyendo en la primera queda:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + f^2v = 0 \quad (2.2.3)$$

Que es la ecuación de un oscilador armónico y que tiene la solución de la forma:

$$u = V \sin ft \quad (2.2.4)$$

$$v = V \cos ft \quad (2.2.5)$$

$$V^2 = u^2 + v^2 \quad (2.2.6)$$

Este oscilador (ecuación 2.2.3) es conocido también como corriente inercial, oscilación inercial u onda inercial (Reyes-Coca, 2001). Se puede observar dentro de las ecuaciones 2.2.4, 2.2.5 y 2.2.6 que éstas son las ecuaciones paramétricas de un círculo de diámetro $D_i = \frac{2V}{f}$ y de periodo $T_i = \frac{2\pi}{f} = T_{sd}/(2 \sin \sin \varphi)$ donde: φ es la latitud y f es el Parámetro de Coriolis que se encuentra definido como:

$$f = 2 \Omega \sin \varphi \quad (2.2.7)$$

T_i es el periodo inercial.

Las corrientes inerciales son las corrientes más comunes en el océano, han sido observadas a diferentes profundidades y en todas las latitudes. Son causadas por cambios bruscos del viento que impacta sobre la superficie del mar, entre más fuerte es el cambio del viento, mayor es la intensidad de la corriente inercial (Stewart, 2008).

2.3. Antecedentes

Se han realizado diversos estudios a nivel internacional y nacional acerca del impacto que ocasiona la variabilidad de la temperatura, y en especial el aumento de ésta, en el blanqueamiento de los arrecifes de coral. En el año de 1914 Vaughan observó que los corales perdían su color al ser privados de luz durante 43 días, pero no fue hasta 1931 que Yonge y Nicholls hicieron referencia por vez primera al término de “blanqueamiento” al observar que ciertas especies de coral perdían su coloración rápidamente al ser expuestas a temperaturas por encima de los 36°C. Se ha continuado con el análisis del blanqueamiento del coral causado por diversos factores ambientales. En la actualidad la pérdida de color de los corales se atribuye principalmente al aumento de temperatura en los mares producto del Cambio Climático y del Calentamiento Global (Hoegh-Guldberg & Smith, 1989).

En México, se han realizado diversos estudios a lo largo de los últimos años, sobre la relación que existe entre la circulación oceánica, patrones de vientos, la distribución de nutrientes, la variación de temperatura, así como otros factores físicos que pueden afectar a los arrecifes de coral. Para el caso específico del Sistema Arrecifal Veracruzano, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se han realizado estudios que relacionan la dinámica oceánica con las variaciones de temperatura que pueden afectar los arrecifes coralinos.

En 2012 se publicó el artículo *Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico*, en el que colaboraron Adriana Mateos Jasso, Jorge Zavala Hidalgo, Rosario Romero Centeno y María Eugenia Allende Arandía. Como parte de las conclusiones más importantes de este artículo, que sirven como punto de partida para los objetivos de este trabajo, están que durante el periodo de tiempo del mes de octubre a marzo la estructura vertical de temperatura en la columna de agua fue casi homogénea, con diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo de menos de 0.5°C, para los años de 2006 a 2010. Así mismo, en

el mismo artículo se encontró una fuerte estratificación de la columna de agua, con diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo que llega a alcanzar más de 8°C, para el periodo de primavera – verano (figura 2-3). Esto último sugiere que el mayor diferencial de temperaturas que puede presentar el SAV se presenta con mayor probabilidad en los meses de abril a septiembre, periodo que abarca primavera y verano.

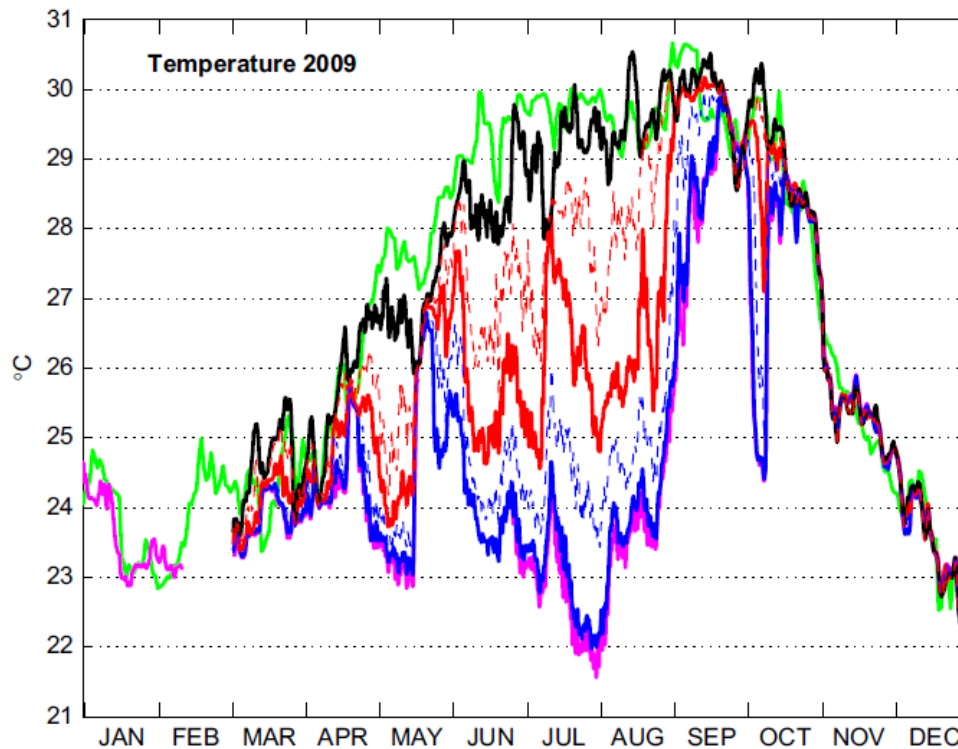


Figura 2-3. Ciclo anual de temperatura en la columna de agua en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Temperatura superficial (verde), temperatura a 5 metros de profundidad (negro), a 11 metros (línea discontinua roja), a 17 metros (rojo), a 22 metros (línea discontinua azul), a 27 metros (azul), a 30 metros (morado). La temperatura superficial se estimó por satélite y las de la columna de agua se obtuvieron mediante observaciones con termistores. (Tomada de Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico, Mateos-Jasso et. al. 2012)

En el año 2014 el CCA en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, realizaron un artículo titulado *Connectivity patterns among coral reefs systems in southern Gulf of Mexico*, en el cual se expone la conectividad de patrones a lo largo de 7 arrecifes de coral en el sur del Golfo de México, divididos en dos grupos, uno sobre la plataforma continental occidental y otro en el Banco de Campeche.

Como parte de las conclusiones se expone que en la plataforma continental occidental la conectividad entre el SAV y otros arrecifes se presentó hacia el norte para los meses de marzo a agosto, y hacia el sur de septiembre a febrero. Por otro lado, en el Banco de Campeche la conectividad (transporte de larvas) fue hacia el noroeste para todo el año. Finalmente se concluye que la conectividad entre ambos grupos de arrecifes coralinos fue débil.

Posteriormente, en el año 2015 María Eugenia Allende-Arandía, como parte de su trabajo de tesis de doctorado titulado *Escenarios de la Dinámica y Termodinámica en el Sistema Arrecifal Veracruzano Norte ante el Cambio Climático*, observó que las corrientes más intensas en la zona del SAV son de septiembre a marzo, con dirección al sureste y que éstas son causadas por los Nortes. Durante este trabajo se realizó una proyección basada en vientos para el periodo de tiempo 2091 – 2100 en la cual se encontró que el Sistema Arrecifal Veracruzano presentará condiciones de verano más largos. Otra observación importante de destacar es que, de acuerdo con la influencia del viento, el riesgo de tener altas temperaturas superficiales que excedan el límite termal del ecosistema es bajo.

En el año 2016 se publicó un artículo denominado *Analysis of Ocean Current Observations in the Northern Veracruz Coral Reef System, Mexico: 2007 – 12*, en el cual participaron el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías de la Universidad Veracruzana y el Center of Ocean-Atmospheric Prediction Studies (COAPS). En este artículo se demuestra que las corrientes oceánicas son principalmente provocadas por el esfuerzo del viento y que la contribución de la marea es más pequeña. Durante el periodo otoño – invierno fuertes episodios de corrientes marinas prevalecieron con dirección hacia el sureste alcanzando velocidades de más de 1 m/s, y éstas fueron ocasionadas por la entrada de un sistema de alta presión al Golfo de México. También, se observa que algunos episodios de fuertes corrientes marinas con dirección sureste observadas durante el periodo de primavera – verano fueron forzadas por sistemas de baja presión (tormentas tropicales). Para los meses de mayo a agosto se observaron

predominantemente corrientes más débiles con dirección hacia el noroeste, con velocidades menores a los 0.4 m/s. Como parte de las aportaciones que este artículo puede hacer al presente trabajo se encuentra que las corrientes son dirigidas por la influencia del viento, en su mayoría, y que la influencia que tiene la marea en la zona es mucho menor.

Finalmente, en 2017 la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) publicó un informe de las condiciones y el monitoreo que se llevó a cabo en el SAV, el cual lleva por título *“Sistema Arrecifal Veracruzano: Condición Actual y Programa Permanente de Monitoreo: II Etapa”*. Dentro del informe se destaca que por la localización geográfica a la que se encuentra el Sistema Arrecifal Veracruzano, el impacto de las actividades humanas ha sido de tal magnitud, que el grado de perturbación en el área se considera muy alto.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Sistema Arrecifal Veracruzano

El Sistema Arrecifal Veracruzano se localiza en la plataforma continental occidental del Golfo de México, en la costa del estado de Veracruz. Situado entre las coordenadas $19^{\circ} 00' 00'' - 19^{\circ} 16' 00''$ N y $95^{\circ} 45' 00'' - 96^{\circ} 12' 00''$ W. El sistema de arrecifes de coral se encuentra localizado frente a las costas del Puerto de Veracruz y las costas del municipio de Antón Lizardo (figura 3-1). Es el sistema Arrecifal más desarrollado de la región, cuenta con 23 zonas arrecifales y 6 islas, de éstos 19 se encuentran cercanos a la superficie y 4 se hallan sumergidos (figura 3-1) (Ortiz-Lozano, y otros, 2013).

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) tiene una extensión de 65,516 hectáreas y está constituido por un conjunto de arrecifes de coral en distintos grados de afectación. De forma natural estos arrecifes están divididos geográficamente en dos zonas: norte y sur. Los arrecifes coralinos de la zona norte se encuentran situados frente al Puerto de Veracruz, ubicados por encima de la isobata de 40 m, estos arrecifes son en general de menor extensión. Los arrecifes de la zona sur están ubicados frente a las costas del municipio de Antón Lizardo, a unos 20 km al suroeste del Puerto de Veracruz, estos arrecifes se encuentran por arriba de la isobata de los 50 m (figura 3-2).

El PNSAV está incluido en el polígono 49, que es una de las 70 áreas de alta biodiversidad contempladas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en la evaluación realizada dentro del Programa de Regiones Prioritarias Marinas en México (Pérez-España & Vargas-Hernández, 2008).

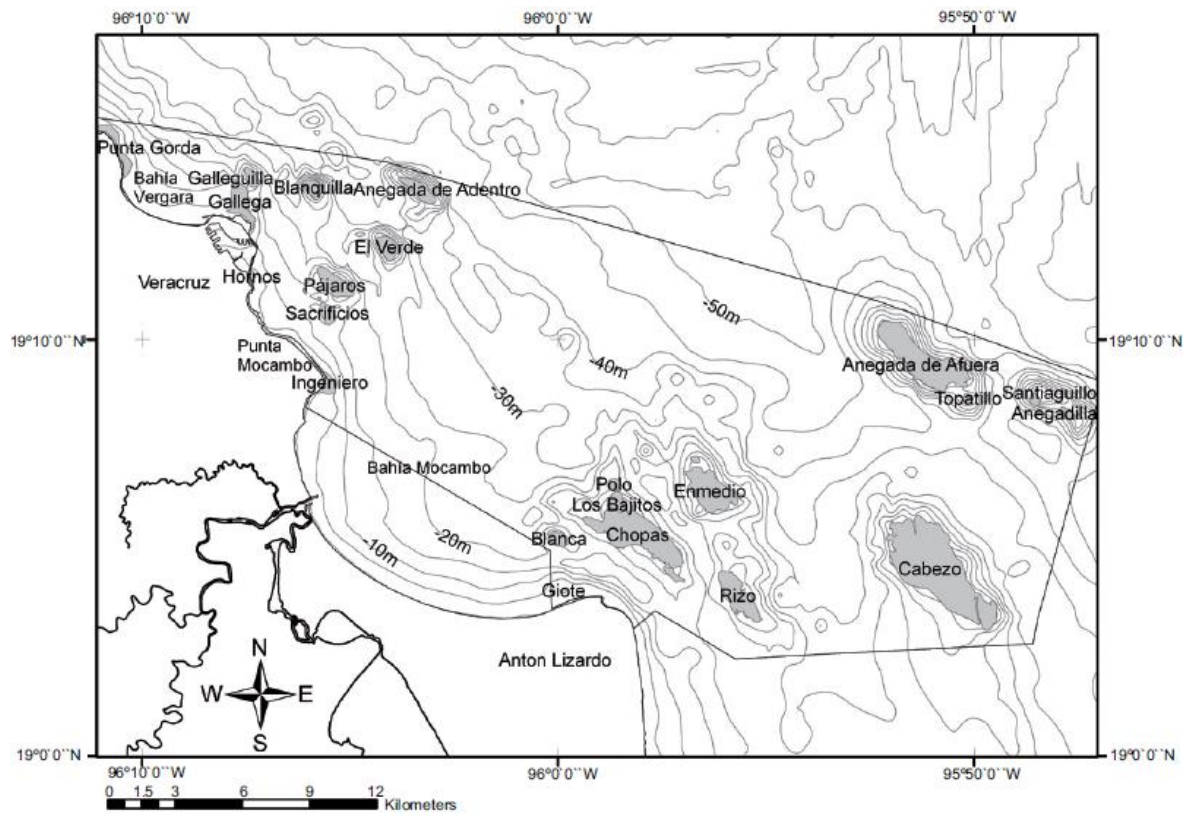


Figura 3-1. Localización de arrecifes coralinos y sus principales características geomorfológicas en el Sistema Arrecifal Veracruzano. (Tomada de Salas y Granados, 2008).

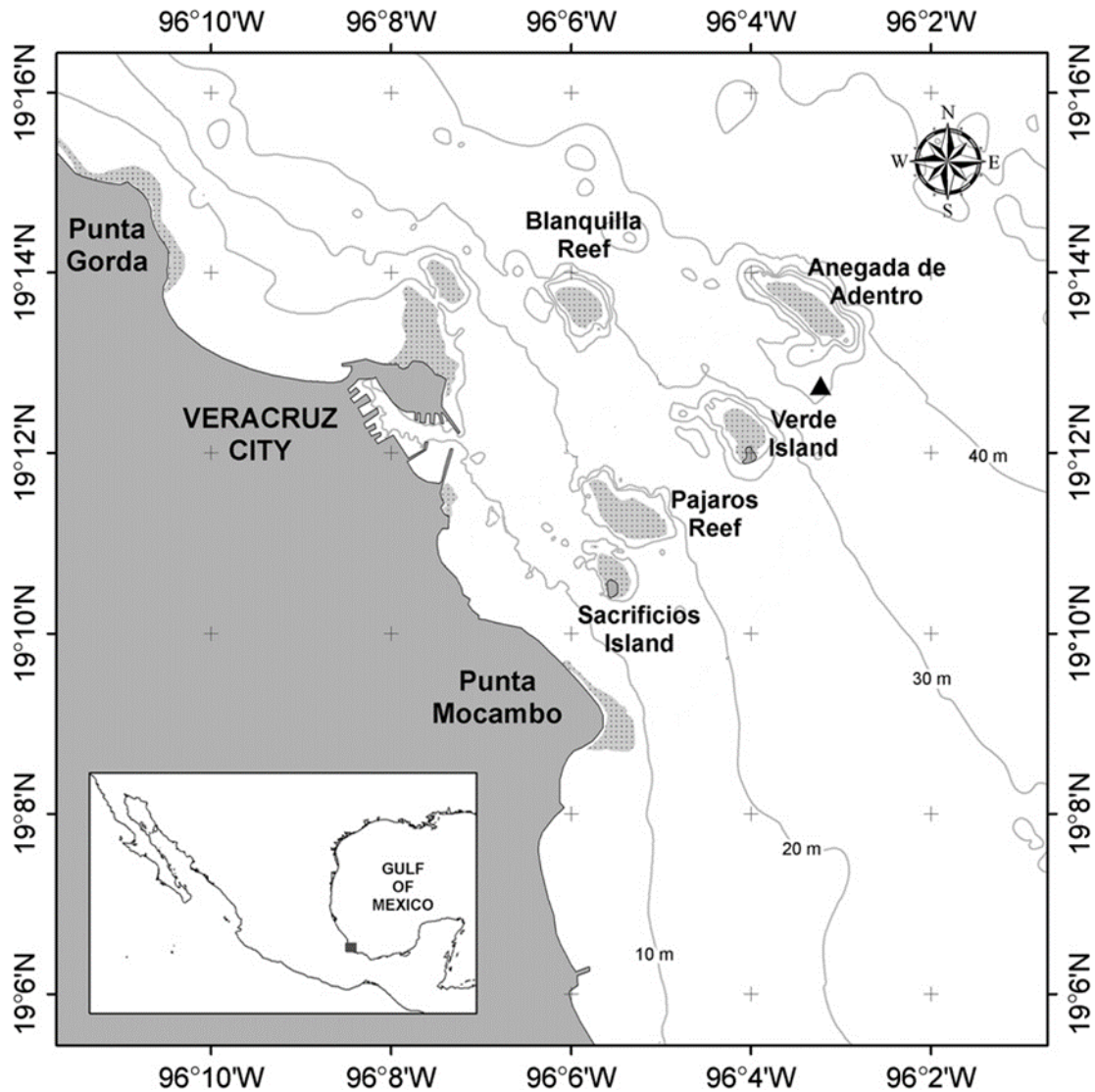


Figura 3-2. Localización geográfica de la Zona Norte del Sistema Arrecifal Veracruzano en el Golfo de México. El punto representado por un triángulo es el sitio de muestreo Isla Verde – Anegada de Adentro (Tomada de Mateo-Jasso et al., 2012. Modificado).

El SAV cuenta con tres categorías para su protección: se encuentra protegido bajo la categoría de Parque Nacional desde el 24 de agosto de 1992, y fue declarado Reserva de la Biósfera por la UNESCO desde 2006. Además de esto, en el 2004 fue registrado como humedal de importancia internacional en la lista Ramsar. Actualmente se lleva a cabo el proyecto para la ampliación del Nuevo Puerto de Veracruz en una zona fuera del Parque Nacional, pero adyacente al polígono del Área Natural Protegida. Esto hizo que la SEMARNAT emitiera la autorización condicionada el proyecto teniendo en

cuenta algunas medidas de prevención, mitigación y compensación que serían supervisadas por la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) a lo largo del proyecto (SEMARNAT, 2017).

Además de que el SAV ha adquirido una gran importancia científica en los últimos 6 años, es también el único sistema arrecifal que se encuentra adyacente a un área metropolitana como lo es el municipio de Veracruz, considerada como la ciudad más grande e importante del estado de Veracruz, por lo que el impacto de las actividades humanas puede llegar a ser notorio.

Para el puerto de Veracruz, el SAV ha sido de gran importancia, como principal fuente de material de construcción para la ciudad de Veracruz, y como barrera natural del puerto. Se estima que el valor de la pesca en el año 2006 fue de US \$ 1,915,047, el valor del turismo de buceo en el año 2008 fue de US \$ 5,444.774, y el de los ingresos del turismo de playa durante el mismo año fue de US \$ 9,519,365 (Ortiz-Lozano, y otros, 2013). Lo anterior nos indica el valor económico que, aunado al valor ambiental, hacen del SAV un ecosistema de suma importancia.

Dentro del PNSAV se encuentra una zona arrecifal conocida con el nombre de Anegada de Adentro, que es el sitio donde se tomaron los datos de temperatura que sirvieron como base para la elaboración de este trabajo (figura 3-2). La zona de sotavento de esta área es la de mayor cobertura coralina, así mismo es en esta zona donde en 2004 se observaron muchas colonias de diversas especies de coral blanqueadas (Pérez-España & Vargas-Hernández, 2008).

3.2. Corrientes del Golfo de México

El Golfo de México es un mar semicerrado ubicado dentro de los litorales de México, Estados Unidos y Cuba. La dinámica oceánica que tiene el golfo está determinada por los forzamientos físicos que actúan sobre el océano, tales como la corriente del Lazo que es parte de la corriente del Golfo, el viento y las mareas. Otro factor asociado a la dinámica del océano es la topografía del suelo marino. La conjunción de estos elementos permite identificar diferentes regiones oceanográficas con movimientos de masas de agua específicos.

Dentro de la batimetría del Golfo de México se tiene que, en las costas del norte de la Península de Yucatán, la costa oeste de la Península de Florida y la del sur de los estados de Texas y Luisiana, se encuentran las mayores extensiones de plataforma continental. Mientras que, en las costas de los estados de Tamaulipas y Veracruz, la plataforma continental se reduce en gran medida, como se observa en la figura 3-3.

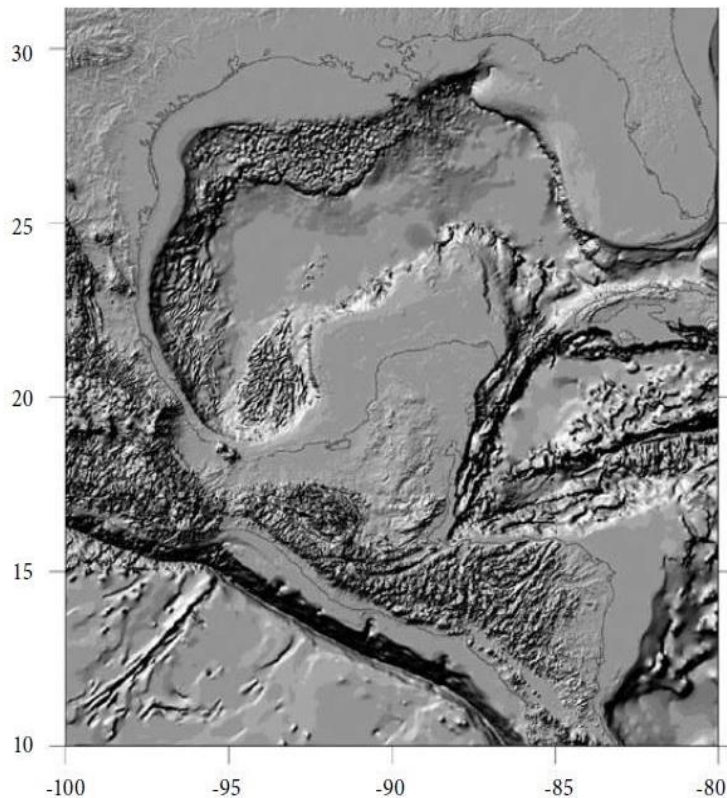


Figura 3-3. Localización del Golfo de México destacando rasgos topográficos. (Tomada de Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2004).

El Golfo de México se comunica con el Mar Caribe a través del Canal de Yucatán, que tiene una profundidad de 1900m y con el océano Atlántico por el Estrecho de Florida, el cual se localiza entre la Península de Florida y Cuba; en esta región la profundidad alcanza los 900 m.

Existen corrientes oceánicas en el Golfo de México inducidas por la transferencia de momento (o cantidad de movimiento) de los vientos alisios que soplan en latitudes tropicales del noreste al suroeste en el hemisferio norte y por los vientos contralisios que soplan en dirección contraria. Estas corrientes, conocidas como la corriente de Yucatán y del Lazo, tienen una importante influencia en la dinámica oceánica del golfo. La corriente del Lazo entra al Golfo de México a través del estrecho de Yucatán y sale por el estrecho de Florida. De esta corriente se desprenden grandes remolinos anticiclónicos, que giran en el sentido de las manecillas del reloj, los cuales contienen una gran parte de la energía de la región oceánica del golfo (figura 3-4). Estos remolinos recorren el Golfo de México hacia el oeste y la energía que llevan se disipa al chocar con el talud continental de los estados de Tamaulipas y Texas.

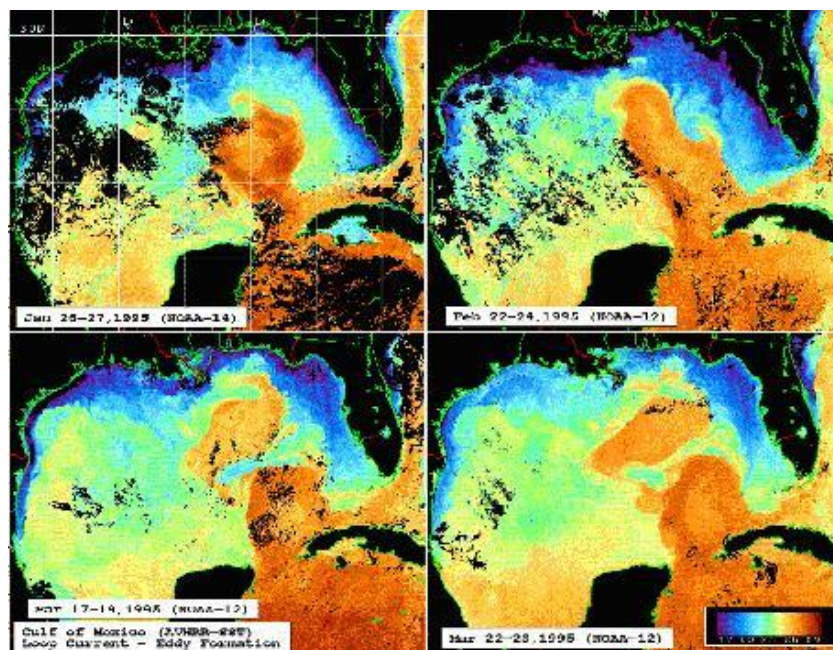


Figura 3-4. Escenas de la temperatura superficial del mar en el Golfo de México, en donde se distingue la formación de un remolino anticiclónico (observado en color naranja) como resultado del desprendimiento de la Corriente del Lazo. (Imagen procesada en la Universidad del Sur de Florida) Tomada de CONABIO 2006

Asociados a la dinámica de la Corriente de Lazo, también se forman remolinos ciclónicos que de igual manera se mueven hacia el oeste del Golfo de México. Los remolinos que se desplazan en grupos crean intensas corrientes que redistribuyen las aguas calientes y frías de las capas superficiales del mar, así como plancton y hasta contaminantes. (Zavala-Hidalgo & Fernández-Eguiarte, 2004).

Las corrientes oceánicas que se generan en el Golfo de México se han estudiado, de acuerdo con patrones de vientos. Se ha reportado que los vientos dominantes en la costa occidental del Golfo de México se presentan estacionalmente: durante el periodo de otoño-invierno, los vientos son del este/noreste, y en primavera-verano son este/sureste. Durante el periodo otoño-invierno, sistemas frontales cruzan el Golfo causando un descenso de la temperatura y un incremento en la presión atmosférica, lo que provoca fuertes vientos del norte. Al chocar las masas de aire húmedo con los frentes fríos, se genera nubosidad acompañada de fuertes lluvias y vientos muy intensos, conocidos como *nortes*, los cuales llegan a tener velocidades de 20 ms^{-1} . Estos vientos se presentan principalmente en el periodo de septiembre a abril y se consideran los principales causantes de corrientes oceánicas intensas en la zona. La temperatura del agua está determinada por la circulación oceánica y el movimiento de las masas de agua que se presenta a lo largo del año (Allende Arandía, y otros, 2015).

4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Datos de temperatura

Para el estudio de la variación en alta frecuencia de la temperatura del mar en el Sistema Arrecifal Veracruzano, se usaron datos recolectados *in situ* de instrumentos oceanográficos que fueron colocados entre los arrecifes de Isla Verde y Anegada de Adentro, a una profundidad de 30 metros, aproximadamente, y a 8 kilómetros de la costa (figura 3-2), (Allende Arandía, y otros, 2015).

Estos instrumentos constan de termistores (HOBO) colocados a distintas profundidades en la columna de agua, y de un perfilador de corriente (ADCP Nortek Aquadopp Profiler) instalado en la superficie del mar. Ambos equipos fueron colocados en el punto de muestreo con coordenadas de 19°12'46.6" latitud norte y 96°03'14.9" longitud oeste.

ADCP Nortek Aquadopp Profiler. Este instrumento de medición oceanográfico opera bajo el efecto Doppler en la toma de mediciones de velocidad (rapidez y dirección) de corrientes marinas -así como de gasto en ríos- y de la columna de agua. Con ayuda de un sensor que emite y recibe pulsos sonoros en distintas direcciones es capaz de calcular las componentes de velocidad de la corriente en tres dimensiones. El efecto Doppler consiste en la alteración de la frecuencia de las ondas sonoras (aunque también puede presentarse en cualquier tipo de ondas) relacionada con el movimiento, ya sea del receptor o del emisor del sonido. Cuando un objeto sonoro se encuentra en movimiento con respecto a un punto fijo, o receptor, la frecuencia de las ondas irá aumentando mientras el objeto se acerque al receptor, siendo el sonido que perciba éste, más agudo, en contraste con el objeto que se aleja (Alvarenga & Máximo, 2002).

La ecuación que describe este principio se expresa a continuación (Rojas, 2008):

$$f_0 = f_s \frac{V+v_0}{V-v_s} \quad (4.1.1)$$

Donde:

$f_0 =$ *Frecuencia observada*

$f_s =$ *Frecuencia de la fuente*

$V =$ *Velocidad del sonido en el agua marina*

$v_0 =$ *Velocidad del observador (nula dado que el instrumento se encuentra fijo)*

$v_s =$ *Velocidad de la fuente (velocidad de la corriente)*

Los pulsos sonoros que se emiten por el perfilador de corriente, a través de la columna de agua, a una determinada frecuencia representadas por la variable f_s dentro de la ecuación (4.1.1), son captadas por el propio instrumento que, al impactar con partículas en suspensión, o inclusive con pequeñas burbujas de aire que arrastra la corriente, reflejan los pulsos en forma de eco, f_0 . Debido a que la velocidad que tiene el sonido dentro del agua de mar es una constante conocida (1500 m/s aproximadamente), dependiendo de la temperatura, presión y salinidad, es posible calcular la velocidad que lleva la corriente marina despejando de la ecuación anterior la variable v_s . De acuerdo con los pulsos enviados en diferentes direcciones, se utiliza una transformación trigonométrica para convertir la velocidad registrada en tres componentes de velocidad que están asociadas a un sistema de coordenadas cartesianas (Rodríguez, Aguilar, Morales, & Acosta, 2012).

El cabezal del sensor del corrientímetro contiene tres transductores acústicos además del sensor de inclinación, el sensor de temperatura y el sensor de presión. Algunas especificaciones del transductor, las variables que maneja, así como los rangos entre los que opera, se encuentran detallados a continuación (tabla 1). Para este estudio se usaron datos del modelo de 0.6 MHz.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de un corrientímetro Nortek Aquadopp Profiler.

TRANSDUCTOR				
Frecuencia	0.4 MHz	0.6 MHz	1.0 MHz	2.0 MHz
Número de haces	3	3	3	3
Ancho del haz	3.7°	3.0°	3.4°	1.7°
SENSORES ESTÁNDAR				
Sensor	Rango	Precisión / Resolución	Tiempo de respuesta	Máxima inclinación
Sensor de temperatura (termistor instalado)	-4°C – 40°C	0.1°C – 0.01°C	10 min	-
Sensor de brújula	-	2° - 0.1°	-	30°
Sensor de inclinación (nivel de líquido)	-	2° - 0.1°	-	-
Sensor de presión (piezorresistiva)	0 m – 100 m	0.25% - 0.005%	-	-

*Para mayor información acerca de las especificaciones técnicas, consultar el manual Nortek AS, Aquadopp Current Profiler.

HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger. Se trata de un dispositivo oceanográfico basado en un sensor de temperatura que aprovecha las características conductoras y semiconductoras de algunos materiales para llevar a cabo sus mediciones. El principio de funcionamiento con el que opera consiste en la variación de la resistencia eléctrica -expresada en ohms- que presenta un material semiconductor con el cambio de temperatura en el ambiente en el que se encuentra éste.

Existen tres tipos de sensores de temperatura; los termistores, los RTD (Resistance Temperature Detector) y los termopares. El HOB0 Water Temperature Pro v2 Data Logger es un termistor, por lo que basa sus mediciones en la variación de la resistencia en función de la temperatura, tal como se describió anteriormente. Hay dos diferentes tipos de termistores; los PTC (Positive Temperature Coefficient) en los que la resistencia aumenta en función del aumento de temperatura, y los NTC (Negative Temperature Coefficient) en los que al aumentar la temperatura, disminuye la resistencia. Estas características dependen del material conductor con el que se esté implementado el sensor (ETools, 2016).

La ecuación que describe el principio de funcionamiento de un termistor, que involucra la variación de la resistencia eléctrica con respecto a los cambios de temperatura, se expresa a continuación mediante la siguiente ecuación (Alvarenga & Máximo, 2002):

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \tag{4.1.2}$$

Donde:

R = Resistencia eléctrica a una temperatura final T

R₀ = Resistencia eléctrica a una temperatura inicial T₀

α = Coeficiente de temperatura

ΔT = Variación de la temperatura (T – T₀)

La ecuación anterior (4.1.2) es la resultante de una operación empírica en la que se muestra la dependencia de la resistencia y la temperatura. El coeficiente de temperatura α depende del tipo de material con el que está hecho el conductor, por lo que su valor se puede conocer fácilmente. Los materiales conductores de los termistores deben tener un coeficiente de variación de la resistencia con la

temperatura α alto para que, al multiplicarse en la ecuación 4.1.2 con la variación de la temperatura permita una estimación de la temperatura con buena precisión.

Los materiales conductores de los termistores deben tener un coeficiente de temperatura alto para que presenten variaciones grandes de resistencia eléctrica ante cambios relativamente bajos de temperatura, como se observa en la ecuación 4.1.2.

En la tabla 2 se describen algunas de las especificaciones técnicas que posee el termistor HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger, en cuanto al sensor de temperatura que tiene.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del termistor HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger.

SENSOR DE TEMPERATURA	
Rango de operación	-40°C a 50°C en agua
Precisión	$\pm 0.21^\circ\text{C}$ de 0° a 50°C
Tiempo de respuesta	5 minutos en agua
Estabilidad	0.1°C por año

*Para mayor información acerca de las especificaciones técnicas, consultar el manual de HOBO® Water Temp Pro v2 (U22-001) (HOBO Data Loggers, 2013).

Vaciado de datos

Para el vaciado de los datos, tomados por el instrumento HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger, a una computadora, se hace uso del software HOBOWare, comúnmente utilizado para correr, leer y graficar este tipo de archivos. Este software también es utilizado para visualizar el estado del registro de los datos, filtrar y exportarlos, así como guardar cambios en las gráficas de un archivo.

El instrumento se conecta a un aparato de lectura que a su vez se encuentra conectado a una computadora lo cual hace más sencillo el manejo de los datos.

Cuando se lleva a cabo la descarga de los datos, éstos tienen un formato de archivo diferente y específico de acuerdo con el tipo de instrumento del que provienen. En el caso de los datos descargados de los termistores, éstos son descargados en formato .HOBO, que posteriormente deberá ser cambiado para su manejo en MATLAB (HOBO Data Loggers, 2013).

En cambio, aquellos datos que han sido tomados por los perfiladores de corriente ADCP Nortek Aquadopp Profiler, se descargan a una computadora mediante el uso del software AquaPro. Este programa cuenta con funciones de recuperación de datos, recopilación de datos en línea, visualización gráfica y conversión de datos al formato ASCII, las cuales son de gran utilidad en la descarga y el manejo de los datos obtenidos mediante los perfiladores de corriente. Para que el Aquadopp Profiler ingrese al modo de adquisición de datos, se debe hacer clic en cualquiera de los comandos de inicio en el software AquaPro. Cuando inicia una secuencia de despliegue, el software convierte sus parámetros de configuración en estructuras binarias e indica que comience la recolección de datos.

Los datos recolectados por el Aquadopp Profiler se encuentran con formato AquaPro Files (.prf) que es necesario convertir al formato ASCII antes de su manipulación en cualquier programa, en este caso MATLAB. Esta conversión de formatos de archivo se puede llevar a cabo utilizando el mismo software AquaPro (Nortek AS, 2008).

4.2. Procesamiento de datos

Una manera común de tratar los datos recolectados de distintos instrumentos es la de convertir los archivos a un formato universal. El formato NetCDF (Network Common Data Format) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección. Es un conjunto de interfaces para el acceso a datos orientados a arreglos y una colección de libre acceso de bibliotecas de acceso a datos para C, Fortran, C++, Java y otros lenguajes (Unidata. Data Services and Tools for Geoscience, 2017).

Los datos en NetCDF son:

- Auto-descriptivos: un archivo NetCDF incluye información acerca de los datos que contiene.
- Portátiles: Las computadoras con diferentes formas de almacenar números enteros, caracteres y números de punto flotante, pueden acceder indistintamente a un archivo NetCDF.
- Acoplables: Los datos se pueden anexar a un archivo NetCDF adecuadamente estructurado sin copiar el conjunto de datos ni redefinir su estructura.
- Intercambiables: Un escritor y varios lectores pueden acceder simultáneamente al mismo archivo NetCDF.
- Conservables: El acceso a todas las formas anteriores de datos NetCDF será soportado por versiones actuales y futuras del software.

Las lecturas de los datos obtenidos del corrientímetro ADCP Aquadopp Profiler y los datos tomados de los termistores HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger, que contenían un formato de archivo diferente de acuerdo con el instrumento utilizado para la recolección de datos, fueron transformados al formato NetCDF mediante un script realizado en MATLAB. Lo anterior con el fin de mejorar la manipulación de sus variables.

4.2.1. Filtros Digitales

Para el procesamiento de datos oceanográficos una metodología muy importante es el uso de herramientas como los llamados *Filtros Digitales*. Las aplicaciones que tienen estos filtros son suavizar señales en series de tiempo, así como remover fluctuaciones en una determinada banda de frecuencia. El filtrado digital facilita el procesamiento de datos pre-acondicionando la frecuencia contenida en el registro. Por ejemplo, los filtros son comúnmente utilizados para eliminar las fluctuaciones del nivel del mar de periodos de unos cuantos segundos (3 – 20) en estudios de investigación de Tsunamis. Los filtros también proporcionan algoritmos para la interpolación de datos, para la integración y diferenciación de señales registradas, y para modelos de predicción lineal (Thomson & Emery, 2001).

Existen diferentes tipos de filtros digitales que son seleccionados dependiendo de la frecuencia contenida en la serie de datos y el tipo de análisis que se va a realizar en la serie filtrada. Para el caso de estudio de este trabajo, se llevaron a cabo dos tipos de filtros para resaltar la temperatura en alta frecuencia. Un filtro paso bajo para suavizar la señal de la serie (eliminando variaciones menores a 3 horas) y un filtro paso alto para resaltar las señales en alta frecuencia, para destacar frecuencias entre 12 y 72 horas, como se verá a continuación.

Filtro paso bajo

Un filtro paso bajo es un filtro que atenúa las señales que se encuentran por encima de una frecuencia de corte (banda de atenuación) y permite el paso de las señales que se encuentran por debajo de esta misma frecuencia (banda de paso). Al realizar este proceso de eliminación de frecuencias, se crea un efecto de suavizado, esto quiere decir que el filtro resalta los cambios de baja frecuencia en los valores de salida para facilitar la observación de ellas.

Existen filtros paso bajo como los filtros de media móvil que se utilizan para eliminar las variaciones de alta frecuencia, calcular los promedios en bandas de tiempo de las

señales, así como diseñar interpoladores y, de este modo, lograr hacer un análisis más detallado de aquellos patrones de interés (MathWorks, 2017).

Los filtros paso bajo son los filtros digitales más comúnmente utilizados en el análisis de datos oceanográficos. Es a través de estos filtros que la baja frecuencia, y la variabilidad a largo plazo de las señales oceanográficas se destacan (Thomson & Emery, 2001).

Para el análisis de los datos de temperatura del agua utilizados en este trabajo, se hizo uso del filtro paso bajo para eliminar las variaciones de alta frecuencia en la señal. Las lecturas de los termistores HOBO fueron tomadas cada 10 minutos durante un lapso de un año, por lo que para cada día (24 horas) se obtuvieron 144 lecturas. Las lecturas tomadas de los perfiladores de corriente Aquadopp Profiler fueron realizadas cada 30 minutos durante varios años (instalando y sustituyendo los equipos y sensores cada dos meses aproximadamente), por lo que cada día se obtuvieron 48 datos. Haciendo uso del software MATLAB, con los datos anteriores se realizó un promedio móvil diario para atenuar la señal obtenida de los instrumentos, así como también se hizo un promedio móvil cada 20 minutos para la eliminación del ruido en la serie de datos de los termistores (figura 4-1). Para la serie de los perfiladores de corriente se realizó la eliminación de ruido con un promedio móvil realizado cada hora.

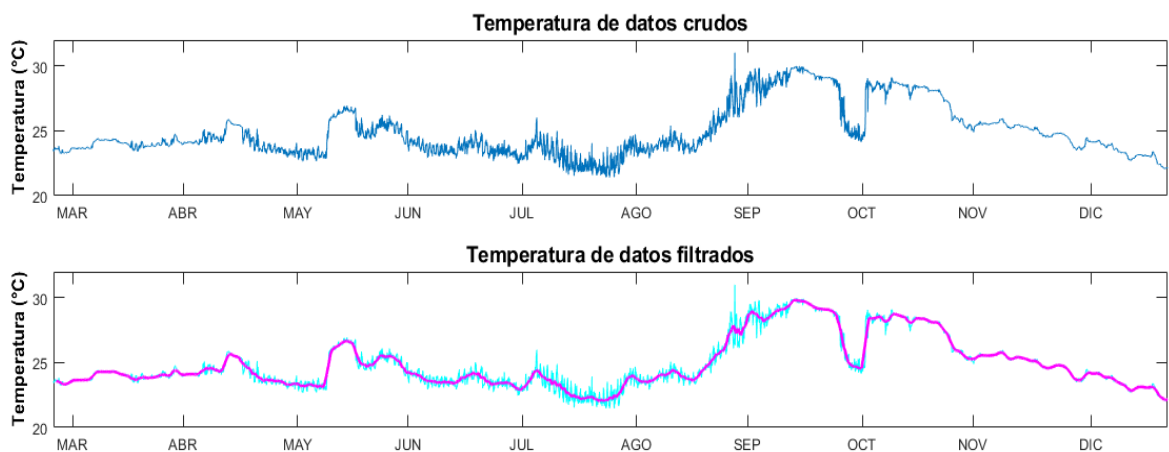


Figura 4-1. Temperatura del agua en la capa profunda del mar (30 metros) para el año 2009 en el sitio Isla Verde-Anegada de Adentro. Aplicación de filtro paso bajo para la suavización de la señal (Elaboración propia).

En la figura 4-1 se muestran los datos de temperatura. En la gráfica se puede observar la aplicación de un filtro paso bajo que elimina las oscilaciones de alta frecuencia que se observan en el gráfico de los datos crudos. La serie filtrada se representa en color magenta y los datos sin filtrar en color azul celeste.

Filtro paso alto

Un filtro paso alto es un tipo de filtro digital también conocido como filtro de recorte de graves, atenúa las señales que se encuentran por debajo de una frecuencia de corte, también llamada banda de atenuación, y permite el paso de las señales situadas por encima de esta. La señal de salida de este filtro es directamente proporcional a la tasa de cambio de la señal de entrada. Los filtros paso alto se utilizan para eliminar tendencias de baja frecuencia en datos de series de tiempo, con lo cual se resaltan únicamente las señales de alta frecuencia (MathWorks, 2018).

Los datos que son pasados por un filtro paso alto se obtienen al realizar la resta de los datos filtrados con un filtro paso bajo de la serie de datos original (sin ninguna modificación) de la que se derivaron los datos del filtro paso bajo (Thomson & Emery, 2001).

A la serie de datos de temperatura analizadas en este trabajo, se le aplicó un filtro paso alto para resaltar las señales de la variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar. Este filtro fue aplicado al realizar la resta de la serie de datos filtrada, o suavizada, con el filtro paso bajo de la serie de datos original, o datos crudos, obteniéndose la serie de datos en alta frecuencia como se muestra en la figura 4-2.

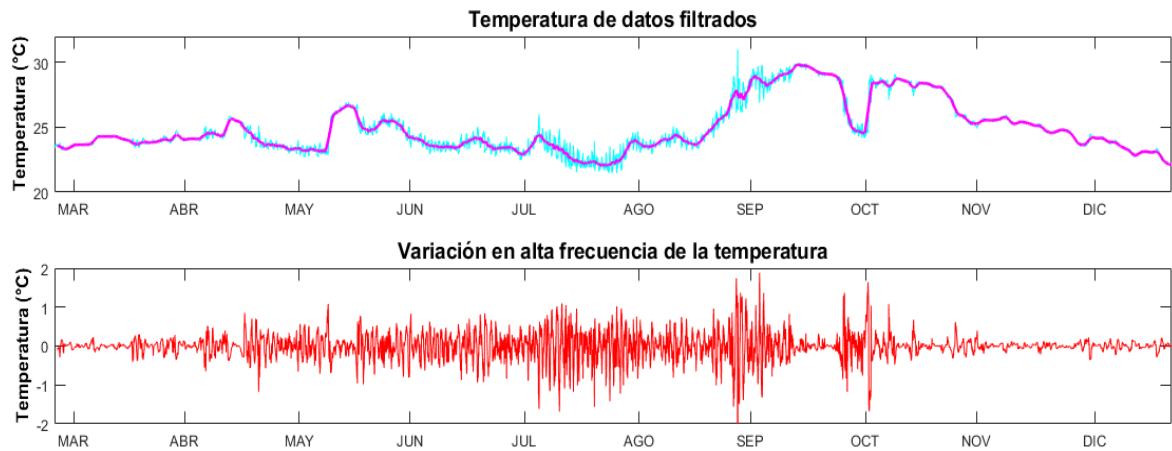


Figura 4-2. Temperatura del agua en la capa profunda del mar (30 metros) para el año 2009 en el sitio Isla Verde-Anegada de Adentro. Aplicación de un filtro paso alto para atenuar las componentes de baja frecuencia y resaltar los de alta frecuencia (Elaboración propia).

Como se muestra en la figura anterior (figura 4-2), la serie de datos de temperatura en alta frecuencia se obtuvo al pasar un filtro paso alto a la serie de datos original. La serie en alta frecuencia se observa de color rojo en la gráfica de la temperatura en alta frecuencia, siendo esta señal la resultante de la resta entre los datos originales y la serie diaria suavizada en color magenta en la gráfica de la temperatura de datos filtrados.

Ambos filtros, el filtro paso bajo y el paso alto se realizaron para las series de datos obtenidas tanto de los termistores HOBO, como los datos obtenidos de los perfiladores de corriente Aquadopp Profiler.

4.3. Análisis de series de tiempo

El análisis de datos secuenciales es conocido como *Análisis de Series de Tiempo*. El análisis de las series de tiempo ha sido ampliamente desarrollado como una forma de manipulación de datos para una gran variedad de aplicaciones, en este caso para el análisis de datos oceanográficos. El análisis de series temporales es una metodología utilizada para examinar series de datos en términos de la frecuencia registrada. Analizando y caracterizando estas series es posible obtener información de los procesos oceanográficos, lo que ayuda a su entendimiento y a la predicción de eventos oceanográficos que pueden presentarse en el futuro. Este análisis también es importante especialmente si la serie que se desea analizar tiene ruido en una señal.

La caracterización de una serie de tiempo generalmente se lleva a cabo haciendo uso de modelos matemáticos que se aproximen a la variación obtenida de los datos registrados. Una vez que se obtiene un modelo matemático que se ajuste a un conjunto de datos observados, este modelo podría entonces ser visto como un algoritmo que puede reproducir la secuencia de datos, aunque sea parcialmente. Con esta aproximación se puede obtener información de las características de la serie de datos registrada.

Existen dos enfoques fundamentales para el análisis de series de tiempo: el análisis en el dominio del tiempo y el análisis en el dominio de la frecuencia. Aunque estos dos enfoques proceden de manera muy diferente y pueden parecer bastante distintos, no son independientes.

Los métodos para el análisis en el dominio del tiempo buscan caracterizar las series de datos en los términos en los que fueron observados y registrados. Una de las herramientas para la caracterización de las series de datos en el enfoque del dominio del tiempo es la función de autocorrelación.

Por otro lado, los métodos para el análisis en el dominio de la frecuencia representan la serie de datos de acuerdo con las contribuciones que ocurren a diferentes escalas

de tiempo o a ciertas frecuencias características de la serie. Cada una de estas escalas de tiempo está representada por funciones de senos y cosenos. Esto es, el análisis en el dominio de las frecuencias implica la transformación de los n valores de datos originales en coeficientes que multiplican un número igual de funciones periódicas como una suma de senos y cosenos.

Una de las metodologías más utilizadas para el análisis de series de tiempo en el dominio de las frecuencias es conocida como el Análisis de Series de Fourier que utiliza funciones periódicas como una suma de senos y cosenos para su determinación. Con los componentes de Fourier es posible definir la densidad espectral (el espectro) de una serie temporal a través de un *Periodograma*. La manera más común de llevar a cabo esto es con el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que se explicará más a detalle a continuación (Thomson & Emery, 2001; Wilks, 2006).

4.3.1. Análisis de Fourier

Las series de tiempo graficadas para cualquier aplicación se pueden observar como una combinación lineal de componentes periódicas que se encuentran superpuestas a una tendencia a largo plazo y a ruido aleatorio de alta frecuencia. El ruido incluye contribuciones aleatorias que son producidas por los sensores de los instrumentos utilizados, así como también incluyen componentes de frecuencia que se encuentran fuera del rango de interés como puede ser turbulencia a pequeña escala. Uno de los objetivos del análisis de series de tiempo en el dominio de la frecuencia es el de separar las oscilaciones periódicas de las fluctuaciones aleatorias y aperiódicas. El análisis de Fourier es uno de los métodos más comúnmente utilizados para identificar componentes periódicas en series de datos oceanográficos.

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) fue un físico y matemático francés que desarrolló una teoría sobre la conducción del calor para la que recurrió al uso de series

trigonométricas con coeficientes específicos determinados por él, mejor conocidas como Series de Fourier. Estas series han tenido una gran aplicación en aquellos fenómenos que impliquen funciones periódicas tales como, vibraciones magnéticas, terremotos, corrientes, etc.

Las series trigonométricas utilizadas por Fourier son de la forma:

$$a_0 + a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x + \dots + a_n \cos nx + b_n \sin nx \quad (4.3.1)$$

Donde:

$$a_i \text{ y } b_i = \text{constantes reales (Coeficientes) siendo } i = 1, 2, \dots, n$$

Estas series son periódicas con periodo $2n\pi$ generalmente, aunque también puede aplicar para cualquier periodo arbitrario.

La premisa básica de Fourier era que cualquier serie de tiempo infinitamente repetida, de longitud finita, $y(x)$, definida en el intervalo $[0, T]$ puede ser reproducida usando una suma lineal de senos y cosenos, de la forma:

$$y(t) = \overline{y(t)} + \sum [A_p \cos(\omega_p t) + B_p \sin(\omega_p t)] \quad (4.3.2)$$

Donde:

$$\overline{y(t)} = \text{Valor promedio de la serie registrada}$$

$$A_p, B_p = \text{Constantes (Coeficientes de Fourier)}$$

$$\omega_p = \text{Frecuencias angulares específicas}$$

Las frecuencias angulares específicas, ω_p , son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (4.3.3)$$

Donde T es la longitud total de la serie de tiempo.

La función 4.3.2. se llama Serie de Fourier y los coeficientes obtenidos a partir de $\overline{y(t)}$, A_p y B_p se conocen como coeficientes de Fourier de $y(t)$, los cuales se obtienen a partir de las fórmulas que desarrolló Euler. Las fórmulas de Euler (4.3.4., 4.3.5., 4.3.6.) dicen que para una función periódica con periodo $T = 2\pi$, los valores de $\overline{y(t)}$, A_p y B_p para $p = 1,2,3,\dots$ se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\overline{y(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) dt \quad (4.3.4)$$

$$A_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) \cos \omega_p t dt \quad (4.3.5)$$

$$B_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) \sin \omega_p t dt \quad (4.3.6)$$

Al utilizar en el análisis suficientes componentes de Fourier, cada valor de la serie puede reconstruirse con mayor precisión. Por esta razón, la contribución relativa que un componente dado hace a la varianza total de la serie temporal, es una medida de la importancia de esa frecuencia particular en la señal observada. Los diversos coeficientes de Fourier con diferentes amplitudes A_p , B_p forman un *Periodograma* que define la contribución que cada componente oscilatorio ω_p hace en la “energía” total en la señal oceánica observada (Jover, 1992; Thomson & Emery, 2001).

Transformada Rápida de Fourier

Uno de los principales problemas del método directo de Fourier en el análisis espectral es la baja velocidad computacional con la que se realiza el análisis. La Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) es una forma de realizar este análisis sin perder la exactitud del método directo.

4.3.2. Análisis Multitaper

Una serie de tiempo puede ser analizada como una función que está compuesta por una potencia asociada a frecuencias de las oscilaciones que la componen. A esta función se le conoce como Función de Densidad Espectral, la cual permite obtener información de las oscilaciones que se encuentran presentes en una serie temporal y que no son evidentes dentro del dominio del tiempo. Usualmente se utiliza la Transformada de Fourier para obtener estas oscilaciones a través del Periodograma, pero esta metodología no resulta muy eficiente debido a que genera frecuencias artificiales que producen pérdidas de potencia espectral (spectral leakage) las cuales distorsionan la función de densidad espectral.

En el análisis Multitaper los datos son multiplicados por un conjunto de ventanas ortogonales conocidas como Tapers, éstas actúan como un grupo de filtros pasabanda lo que producen una estimación de la función de densidad espectral con menor sesgo.

La estimación de la densidad espectral mediante el uso del análisis Multitaper utiliza un conjunto de k estimaciones espectrales, obtenidas con la transformada de Fourier de la serie original multiplicada por las primeras K ventanas ortogonales. Cada estimación espectral se basa en los coeficientes de Fourier para los valores de frecuencia $f = f_1, f_2, \dots, f_n$ y son definidas como:

$$Y_k(f) = \sum_{n=1}^N W_n^{(k)} X_n e^{i2\pi f n} \quad (4.3.7)$$

Donde $W_n^{(k)}$ es el k -ésimo miembro de la secuencia de ventanas ortogonales y $f n$ es la frecuencia Nyquist (Correa-Ramírez & Hormazabal, 2012).

4.3.3. Análisis Wavelet

En el análisis de series de tiempo se representan las señales en función del tiempo o de la frecuencia de una señal. Para el análisis de estas señales se utilizan técnicas

como la del método del análisis espectral, en el que se hace la descomposición de una onda compleja en una suma lineal de componentes de onda más sencillos, que en el caso del análisis de Fourier es una suma de senos y cosenos.

Un gran problema que tiene el análisis de Fourier es que cuando se realiza una transformación de una señal al dominio de la frecuencia, se pierde información del dominio del tiempo. Es por este motivo que se hizo necesario el uso de diferentes metodologías para el análisis de señales.

En 1946 Denis Gabor adaptó la transformada de Fourier con el fin de analizar una pequeña sección de una señal en un momento dado, esta técnica es conocida como “ventaneo” (windowing). Esta adaptación convierte la señal analizada en una función bidimensional de tiempo y frecuencia. Pero el inconveniente de esta técnica es que, una vez que se ha determinado el tamaño de la ventana, éste será el mismo para las ventanas de todas las frecuencias.

El análisis Wavelet (Ondícula) es un método en el que se realiza una división de ventanas con regiones de tamaño variable. Esto permite el uso de intervalos de tiempo largos, donde se requiera información de baja frecuencia, e intervalos más pequeños para información de alta frecuencia. Cabe destacar que el análisis Wavelet no usa regiones tiempo-frecuencia, sino regiones escala-tiempo. Esto hace que el análisis Wavelet sea capaz de revelar aspectos de una señal que otros métodos para el análisis de señales no pueden, como lo son: tendencias, puntos de ruptura y discontinuidades, además de que puede reducir el ruido que lleva implícito una señal.

Transformada Wavelet Continua

La transformada Wavelet se puede definir como la suma en el tiempo de una señal multiplicada por versiones desplazadas y escaladas de una función wavelet básica

conocida como wavelet madre. Puede trasladarse en varias regiones de la señal y puede comprimirse lo que es conocido como escala.

La transformada Wavelet Continua (CWT por sus siglas en inglés) puede ser expresada como:

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Donde:

$x(t) = \text{Señal analizada}$

$\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \text{Wavelet que controla la traslación y escala}$

$a = \text{Constante que controla el ancho de la función}$

$b = \text{Constante que controla la ubicación en el dominio del tiempo}$

En comparación con el análisis de Fourier que posee ondas senoidales que tienen una duración ilimitada, ya que se extienden desde menos hasta más infinito, el análisis Wavelet tiene una forma de onda de duración limitada que tiene un valor medio igual a cero. Además que, mientras las sinusoides de Fourier son suaves y predecibles, los wavelets tienden a ser irregulares y asimétricos. Por esta razón, aquellas señales que posean cambios abruptos pueden ser analizadas de mejor manera por una wavelet u ondícula irregular que por una onda senoidal suavizada (Cano, Salcedo, & Soto, 2016).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Variaciones de temperatura en alta frecuencia

Con el fin de obtener un análisis visual de la variación de la temperatura en la columna de agua del sitio de interés, se realizaron diversas gráficas, con los datos procesados, usando como base una serie de tiempo cuantificable y significativa para el sitio ubicado entre Isla Verde - Anegada de Adentro, en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Se trabajó con datos recolectados durante seis años (2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013), cuatro de ellos tomados de los termistores HOBO (2009 – 2012) y dos recolectados del perfilador de corriente Aquadopp Profiler (2008 y 2013). Todos los datos de temperatura se obtuvieron para el fondo del sitio de muestreo que tiene aproximadamente 30 metros de profundidad.

En la serie de datos se observan espacios en blanco o huecos en los que no se obtuvieron mediciones de temperatura, esto debido a se extravió el instrumento o por el agotamiento de la batería de éste.

Se realizaron los gráficos correspondientes a la temperatura del fondo (30 metros) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para cada año analizado. Estos gráficos se realizaron con los datos que fueron extraídos directamente de cada instrumento oceanográfico utilizado en este trabajo. Los diagramas indican el tiempo en días en el eje de las abscisas y la temperatura en grados Celsius en el eje de las ordenadas. Estas gráficas pueden observarse en el Apéndice de este trabajo.

De la misma manera se realizaron las gráficas de variación de la temperatura en alta frecuencia, obtenidas después de haber aplicado el filtro paso alto para resaltar las frecuencias más altas en la serie de datos. Los diagramas fueron realizados para los 6 años muestreados (2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013), donde el eje de las abscisas muestra el tiempo en días y en el eje de las ordenadas la variación en alta frecuencia de la temperatura en grados Celsius.

Para obtener más información sobre las variaciones en alta frecuencia de la temperatura se dividió cada año analizado en tres secciones de cuatro meses cada una. Esto ayudó a observar con mayor precisión las oscilaciones en alta frecuencia que tiene la temperatura en un periodo de tiempo más corto respecto al año analizado. Todas las gráficas, tanto las que muestran la serie anual de variación en alta frecuencia de la temperatura en el fondo del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro, como las que muestran los periodos mensuales correspondientes a cada año, se pueden observar dentro del Apéndice de este trabajo.

A continuación, se presentan las gráficas de variación en alta frecuencia de la temperatura más representativas de las series de datos analizadas.

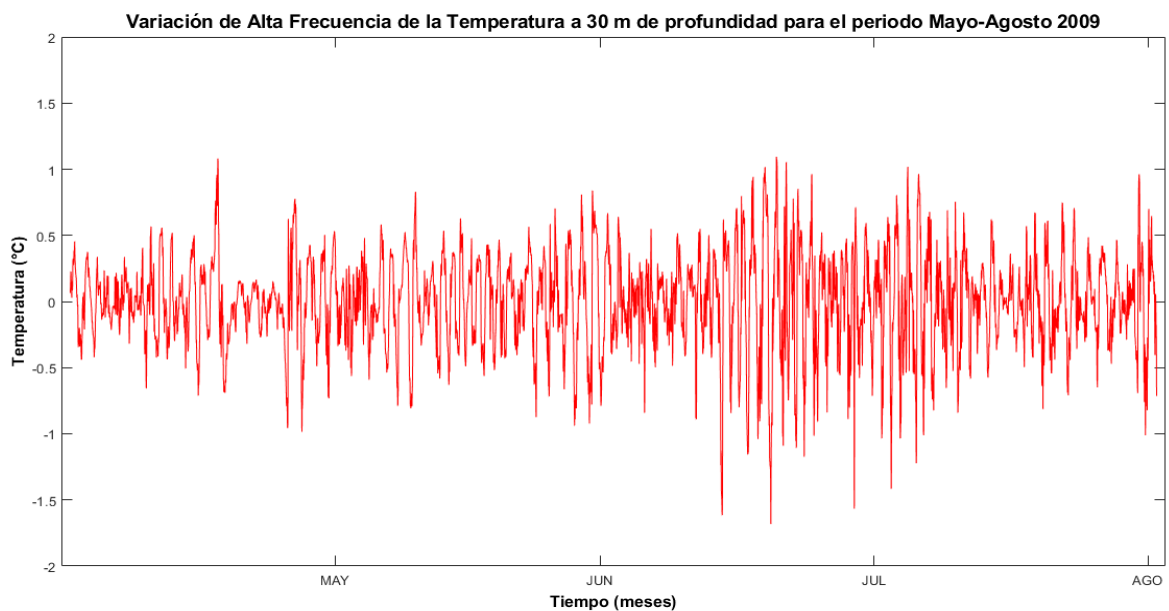


Figura IV-17. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2009. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura es de 1.68°C y el mínimo es de -1.09°C.

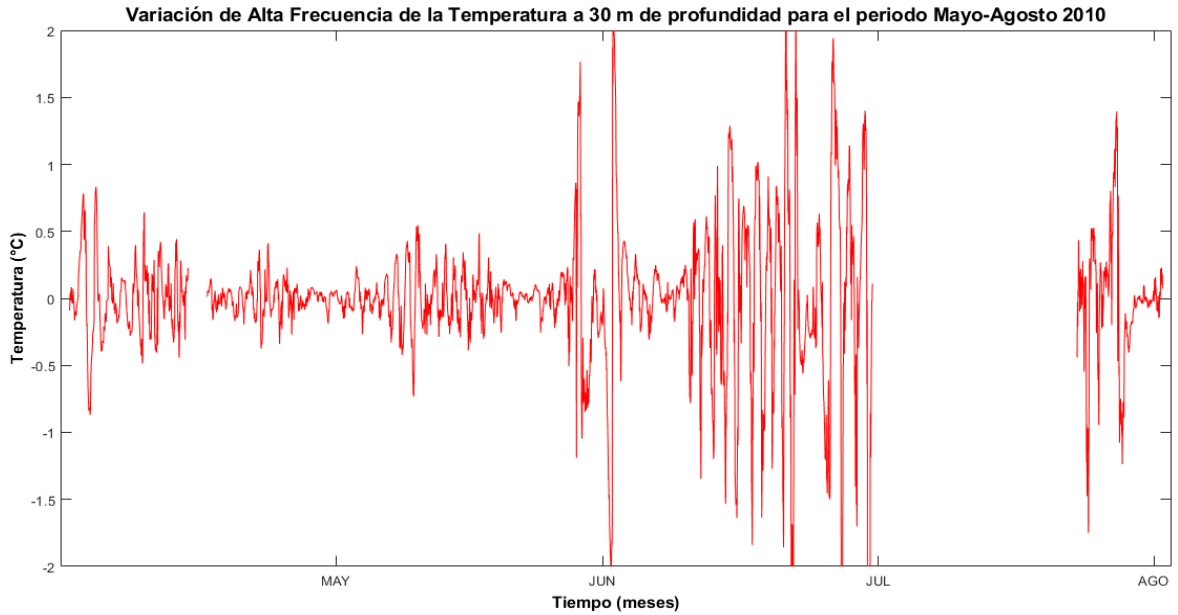


Figura IV-20. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2010. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura es de 3.62°C y el mínimo es de -2.10°C.

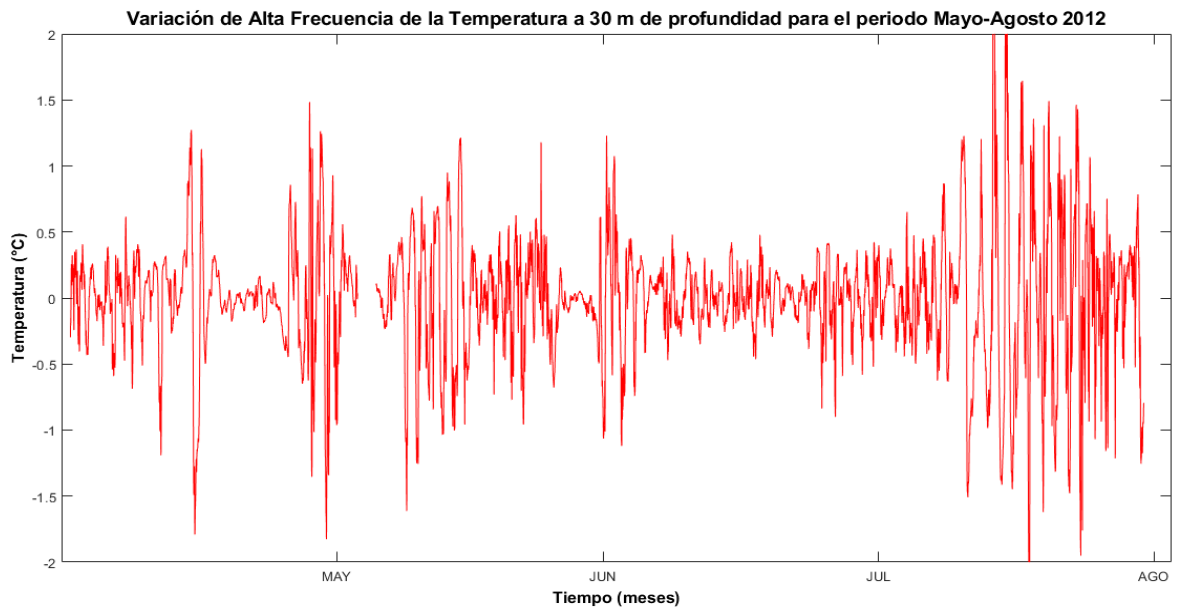


Figura IV-26. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura es de 2.12°C y el mínimo es de -2.49°C.

Las gráficas IV-17, IV-20, IV-26 muestran la variación en alta frecuencia de la temperatura en el fondo del mar, en una profundidad de aproximadamente 30 metros, en el sitio de muestreo para el periodo correspondiente a los meses de verano de los años 2009, 2010 y 2012. En estas gráficas se observa una mayor amplitud a lo largo de la serie analizada, que tiene una variación en alta frecuencia de la temperatura que oscila entre los 2.5 - 1.5 °C.

Particularmente en el gráfico respectivo al periodo de mayo – agosto del año 2009 (figura IV-17), se puede observar una variación de temperatura de amplitud entre 1.0 a 1.5 °C que se mantiene constante a lo largo de la serie. Los meses analizados en esta serie de tiempo, corresponden aproximadamente a los meses correspondientes a la estación de verano (junio - septiembre).

5.2. Periodos de la variabilidad de la temperatura con análisis de Fourier y Multitaper

Una vez realizado el filtrado de la serie de datos obteniendo la señal de la variación en alta frecuencia, se procedió a realizar un análisis de Fourier utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) con el fin de identificar las frecuencias más representativas de la serie y encontrar los periodos en los que se presentan. De este modo, las frecuencias de mayor amplitud pueden asociarse a uno o varios procesos oceanográficos que pueden estar determinando las variaciones de temperatura en el sitio Isla Verde – Anegada de Adentro.

De igual manera se realizó el análisis Multitaper representándolo dentro del mismo espectro de potencia o Periodograma que el análisis de Fourier, esto con el fin de identificar los periodos en que determinadas frecuencias tienen mayor amplitud. Los gráficos obtenidos muestran el periodo en horas en el eje de las abscisas y la cantidad de energía o la amplitud de las frecuencias en el eje de las ordenadas. Todos los gráficos de este análisis, para los años estudiados, pueden encontrarse en el Apéndice de este trabajo.

Conforme a las series de tiempo y las secciones en meses que presentan menos huecos en la serie de datos, se analizan a continuación las gráficas más representativas de los espectros de potencia de Fourier y Multitaper, abarcando para el análisis, las tres secciones del año con el fin de obtener un panorama más amplio de los resultados obtenidos.

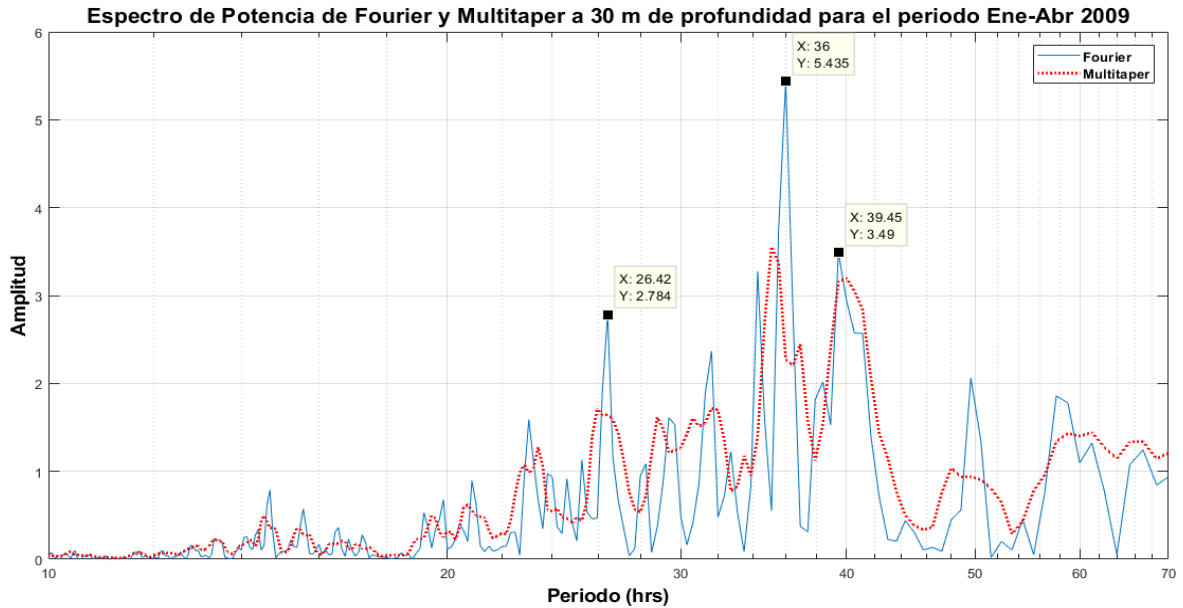


Figura IV-34. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2009.

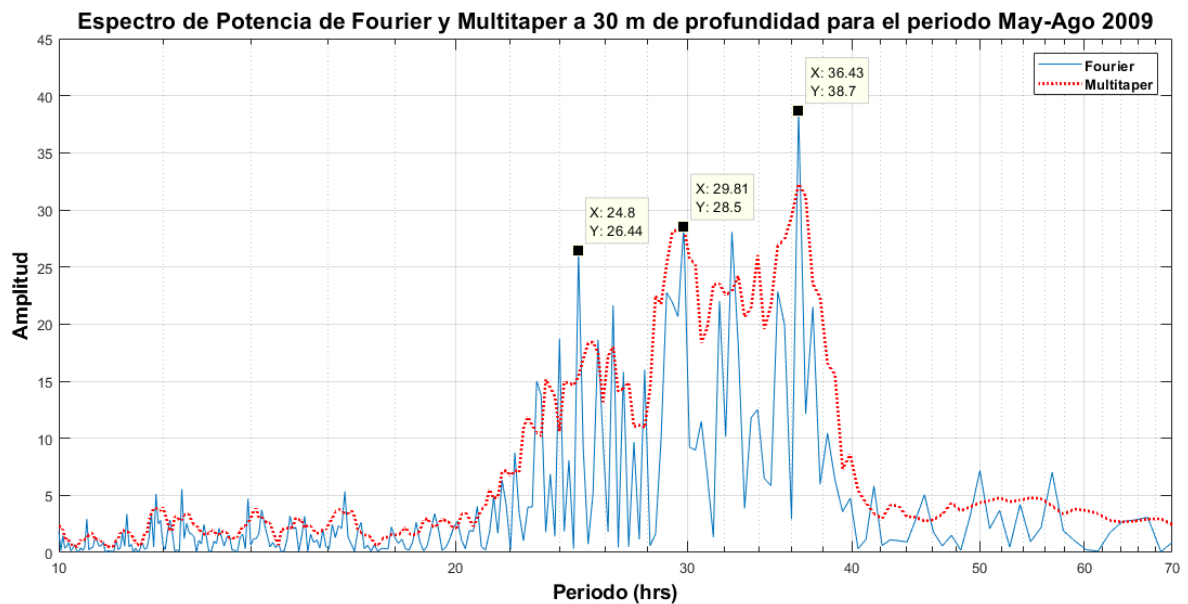


Figura IV-35. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2009.

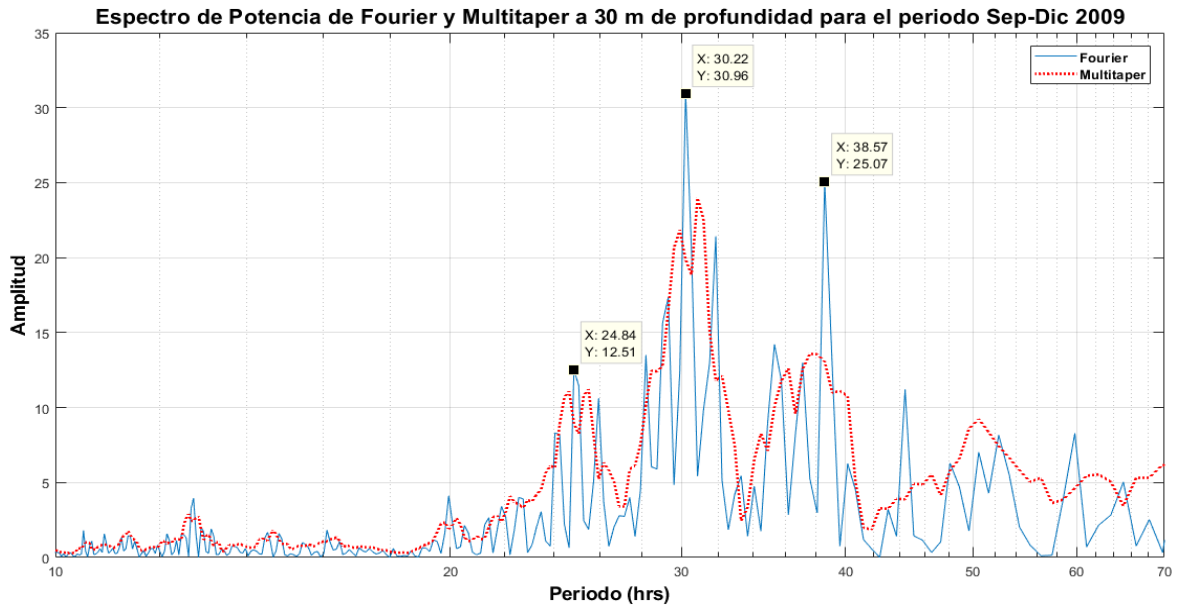


Figura IV-36. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2009.

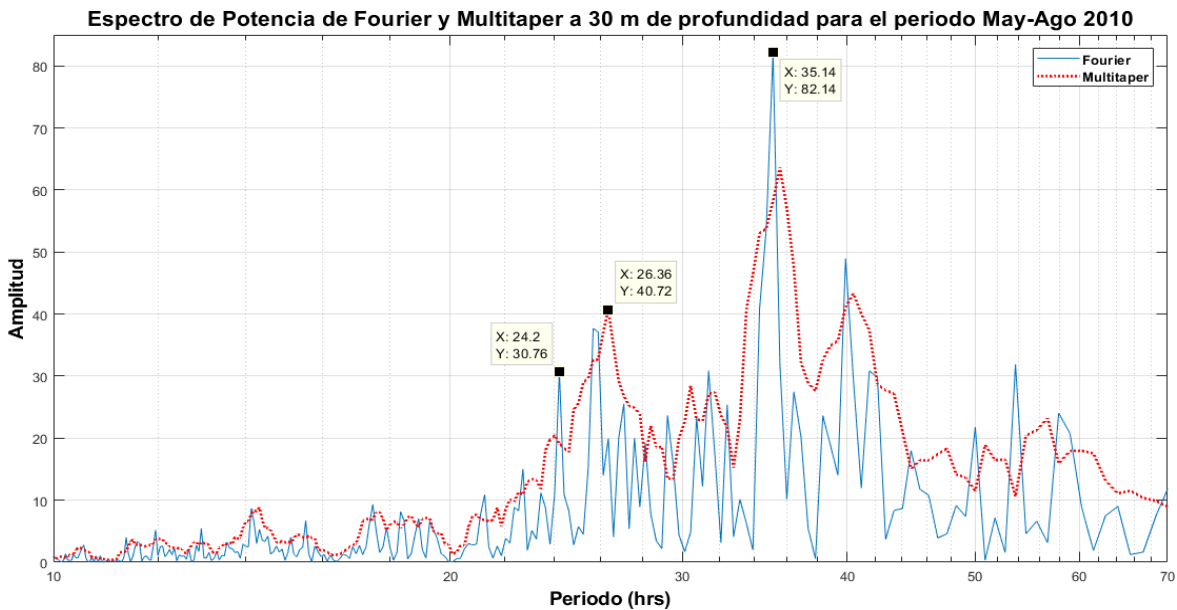


Figura IV-38. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2010.

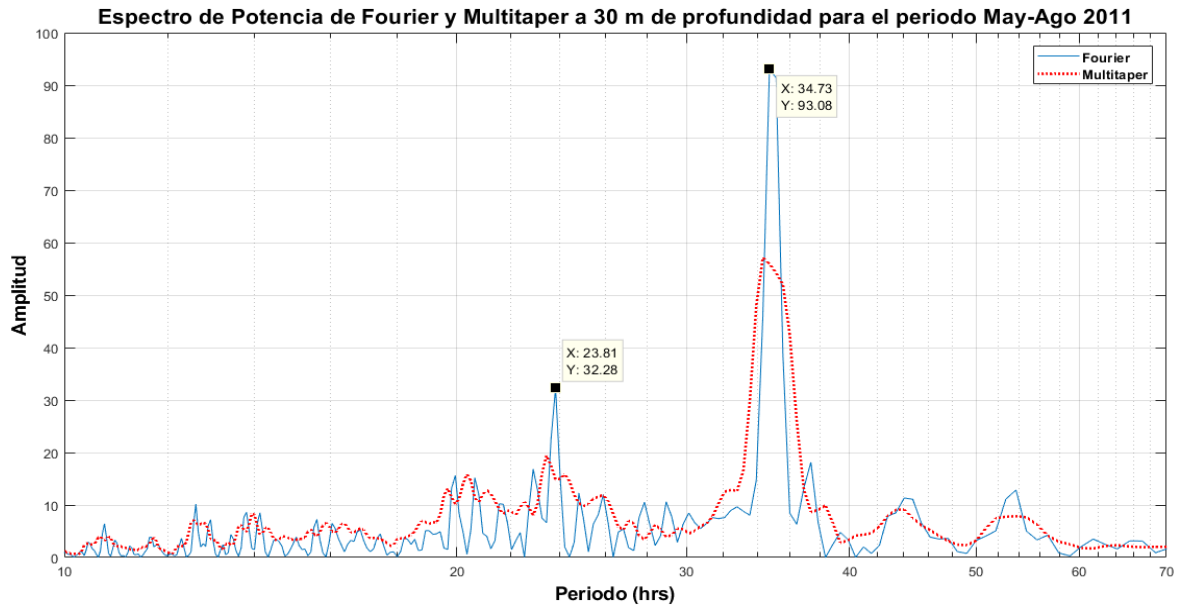


Figura IV-41. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2011.

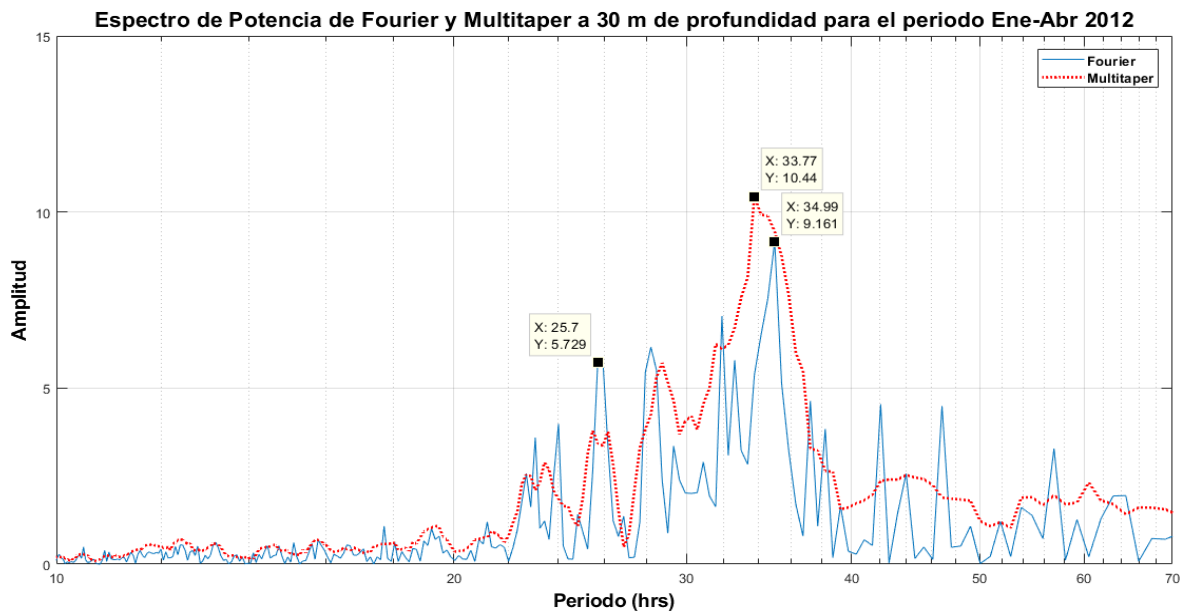


Figura IV-43. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2012.

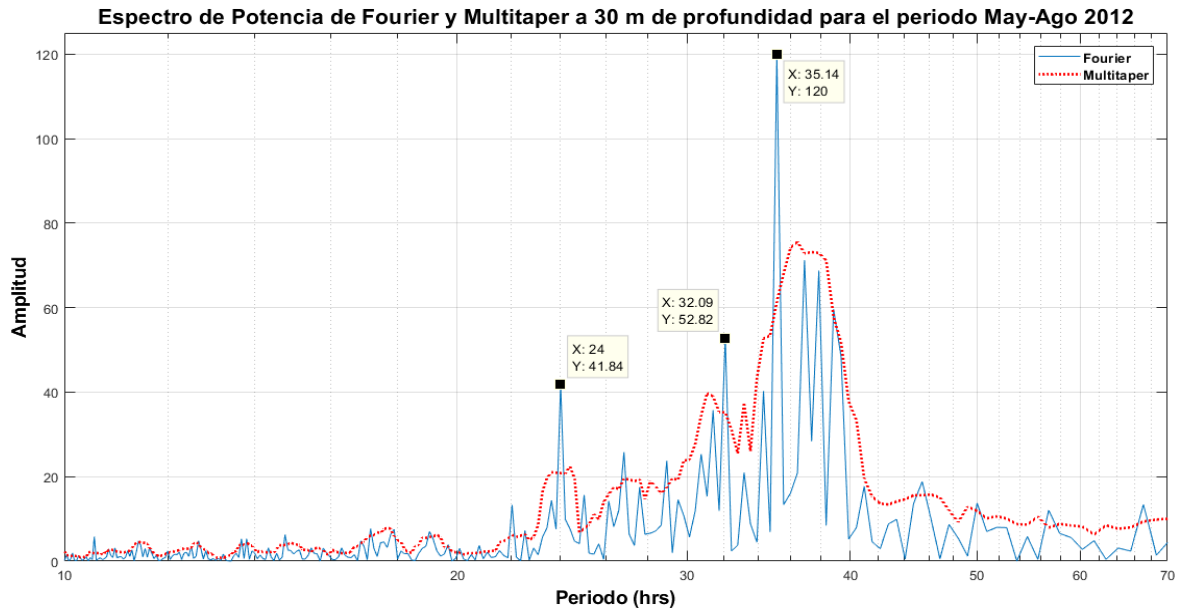


Figura IV-44. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012.

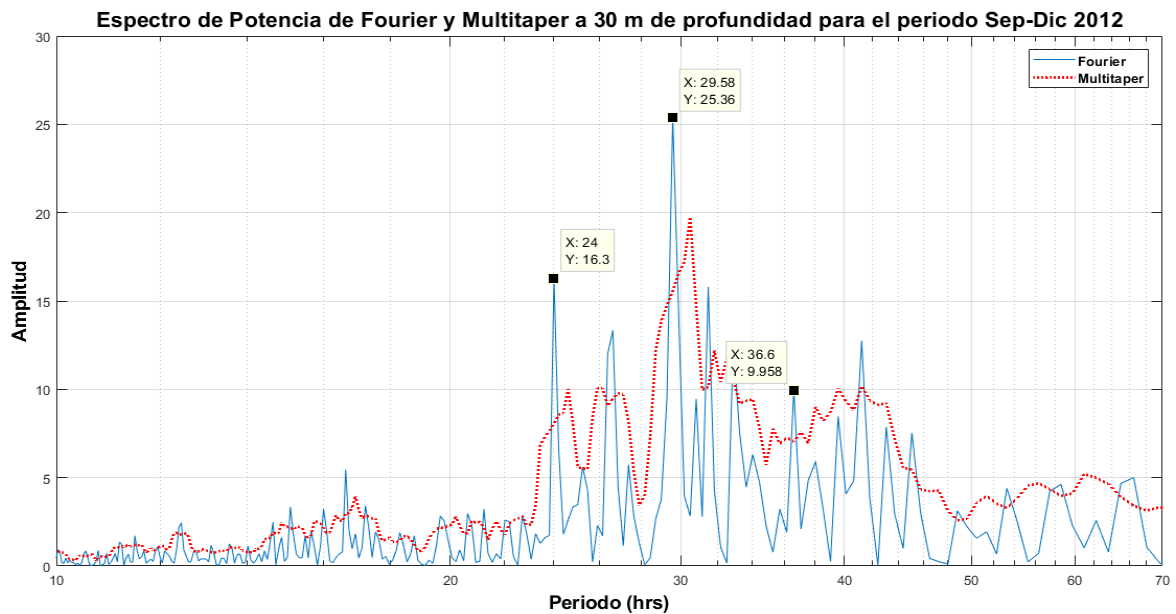


Figura IV-45. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2012.

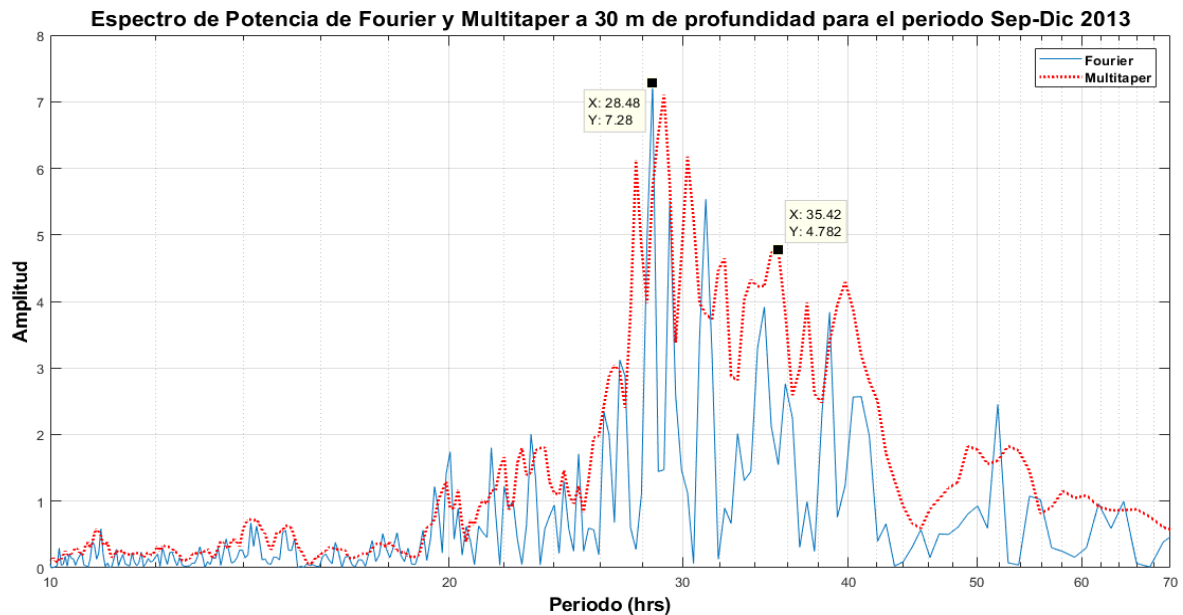


Figura IV-48. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Adenaga de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2013.

Se puede apreciar en los gráficos IV-34 y IV-43 correspondientes al periodo en meses de enero – abril que dentro de las frecuencias con mayor energía se encuentran ubicados dos máximos relativos, uno entre las 35 – 36 horas, y otro alrededor de las 24 – 27 horas para los años 2009 y 2012 respectivamente.

En los gráficos IV-35, IV-38, IV-41, IV-44 se observan las frecuencias con mayor amplitud de la serie de datos analizada para el periodo de meses mayo – agosto de los años 2009, 2010, 2011 y 2012. Al observar las gráficas anteriores puede resaltarse que las frecuencias de mayor energía se observan alrededor de las 20 a 40 horas, encontrándose dos máximos de mayor amplitud, uno cercano a las 36 horas y el otro a las 24 horas. Este fenómeno ocurre en los meses que corresponden a la estación de verano, resaltados en los gráficos correspondientes a los meses de mayo a agosto.

Observando las gráficas IV-36, IV-45 y IV-48 se pueden destacar las frecuencias con máximos cercanos a las 24, 30 y 40 horas como las de mayor energía dentro de la

serie. Estas frecuencias de mayor amplitud se observan en las series de tiempo correspondientes al periodo de los meses de septiembre – diciembre para los años 2009, 2012 y 2013. Dentro de estas gráficas destacan las frecuencias con máximos cercanos a las 30 horas, siendo éstas las que predominan en las series analizadas.

5.3. Periodos de la variabilidad de la temperatura con análisis Wavelet

Con el fin de obtener más información de las frecuencias más representativas de la serie de datos analizada, se procedió a realizar un análisis Wavelet haciendo uso de la Transformada Wavelet Continua (CWT). Este análisis tuvo el propósito de complementar los resultados encontrados con los métodos de Fourier y Multitaper, considerando que las frecuencias de mayor amplitud que fueron reveladas en los análisis anteriores deben coincidir o ser semejantes a los resultados obtenidos con la Transformada Wavelet Continua. La CWT también puede ofrecer información de periodos en que predomina alguna frecuencia en particular.

Los gráficos obtenidos muestran dos ventanas; en la izquierda puede observarse el Espectro de Potencia Wavelet que indica la cantidad de energía de las frecuencias en un espectro de colores donde los valores que va adoptando se observan dentro de la barra respectiva, en el eje de las abscisas se encuentra el tiempo (o fecha relativa al inicio de la serie) señalado en días y en el eje de las ordenadas el periodo en horas, por otro lado, en la ventana derecha se observa el Espectro de Potencia Wavelet Global que muestra en el eje de las abscisas la cantidad de energía y en eje de las ordenadas el periodo en horas, esto como una versión simplificada de las frecuencias de mayor amplitud observadas en el espectro de colores.

A continuación, se presentan las gráficas más representativas para este estudio, del análisis Wavelet, considerando aquellas gráficas en las que la serie de datos se encuentre con el menor número de huecos. Todos los gráficos resultantes de este análisis pueden observarse en el Apéndice de este trabajo.

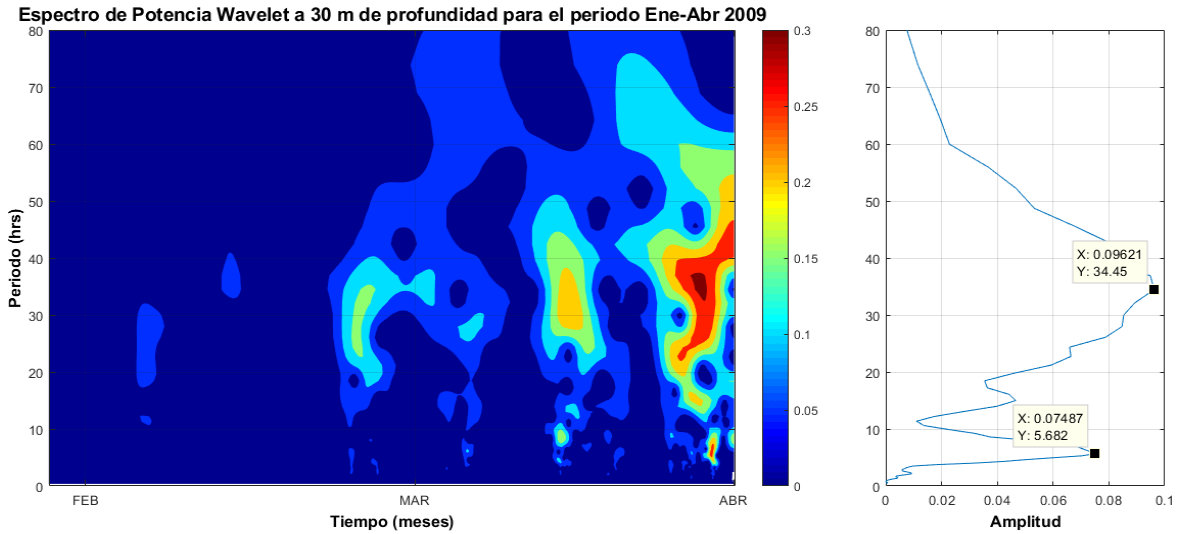


Figura IV-52. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2009. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

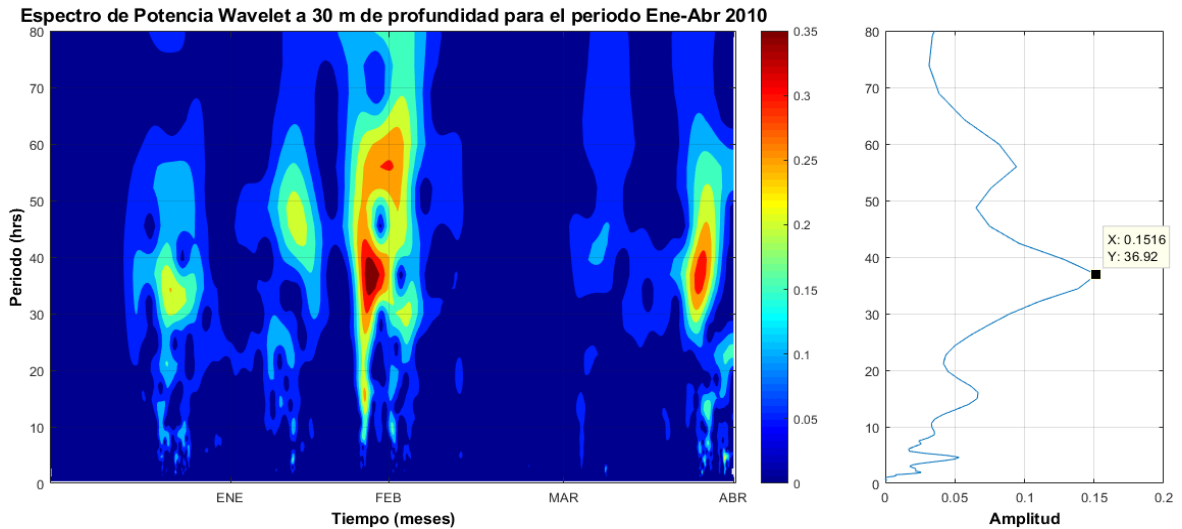


Figura IV-55. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2010. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2011

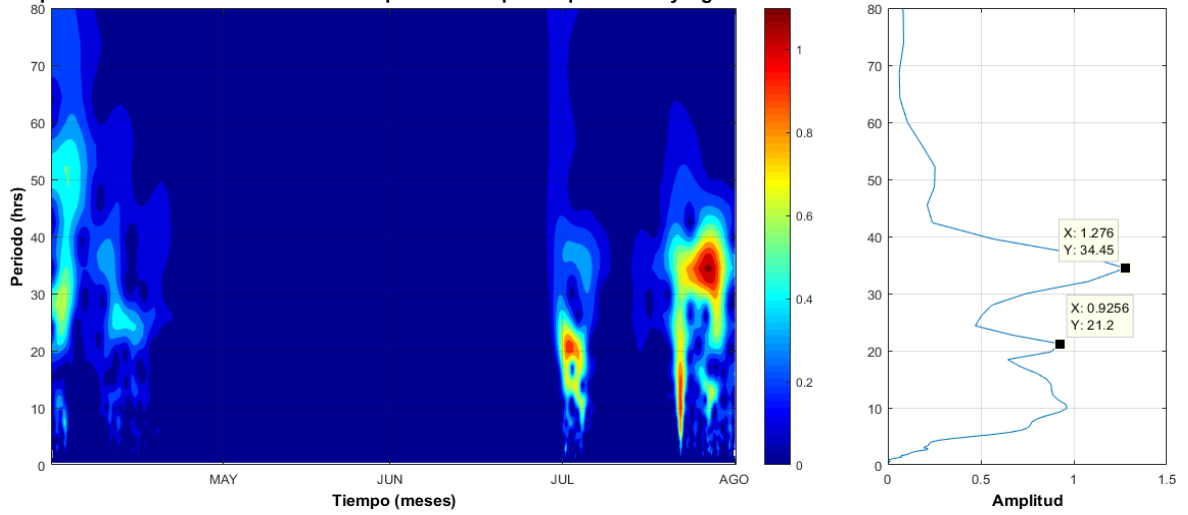


Figura IV-59. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2011. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2011

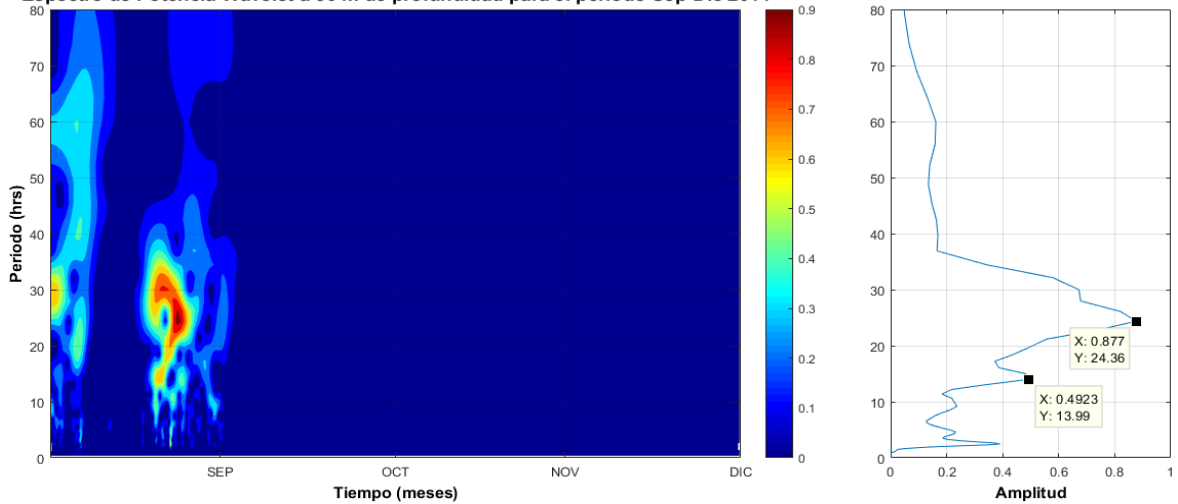


Figura IV-60. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2011. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2012

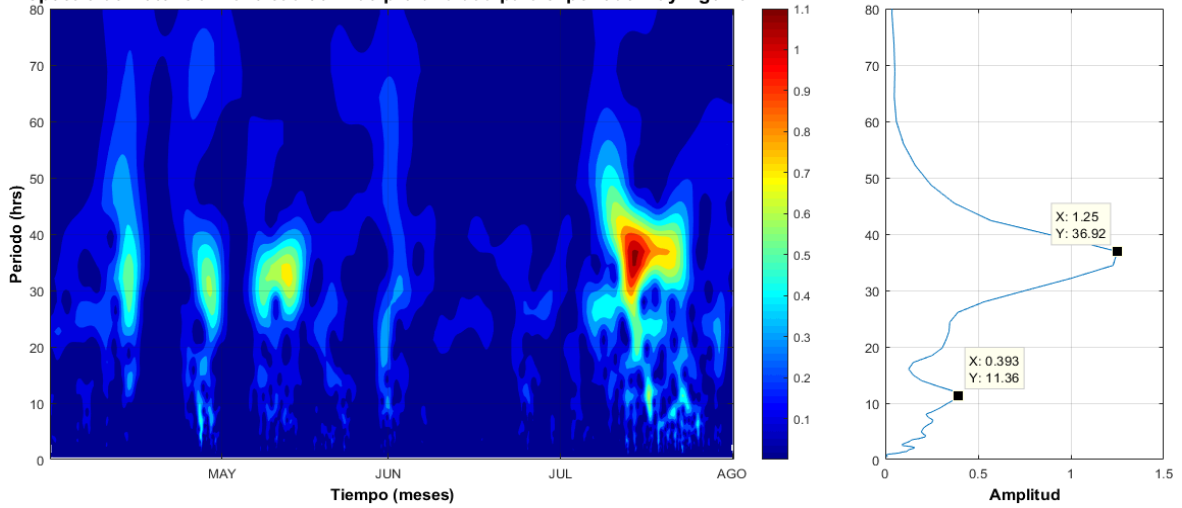


Figura IV-62. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2012

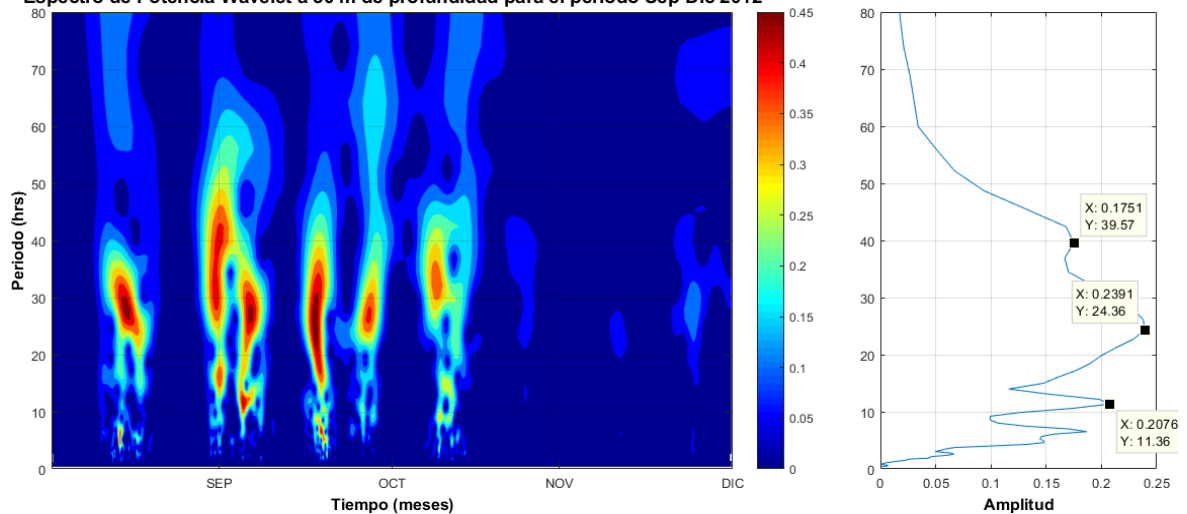


Figura IV-63. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2012. A la derecha se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la izquierda el espectro de potencia global que muestra la cantidad de energía por periodo dentro del espectro.

Analizando las gráficas IV-52 y IV-55 se puede apreciar que, así como en el análisis de Fourier y Multitaper, en el periodo enero – abril para los años 2009 y 2010 respectivamente, las frecuencias más energéticas son aquellas que se encuentran alrededor de las 36 horas. De igual manera se pueden observar frecuencias de relativa mayor energía en los periodos de 6 y 16 horas para los años 2009 y 2010.

Las frecuencias de mayor amplitud para el periodo mayo – agosto pueden observarse en los gráficos IV-59 y IV- 62 de los años 2011 y 2012 respectivamente. Estas frecuencias se muestran dentro de la ventana de las 36 horas, así como muestran los resultados del análisis de Fourier y Multitaper.

Observando los gráficos IV-60 y IV-63 es posible apreciar que las frecuencias de mayor amplitud se encuentran en el periodo de 24 horas, siendo algunas frecuencias secundarias las correspondientes a la ventana de 12 horas, lo anterior para los gráficos de los años 2011 y 2012 respectivamente. Este comportamiento se observa para el periodo de los meses septiembre – diciembre. En el análisis de Fourier y Multitaper se observaron las frecuencias del periodo de 24 y 30 horas, añadiendo con el análisis Wavelet las frecuencias dentro de la ventana de 12 horas.

Complementando la información de los gráficos presentados, en la tabla 3 se puede observar el resumen de los periodos representativos (horas) de los procesos que pueden repercutir las variaciones de alta frecuencia de la temperatura en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Los periodos observados se detallan por análisis espectral realizado en este trabajo, por periodo mensual analizado y por los seis años estudiados (2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013). Los periodos representativos que se encuentran resaltados en color azul representan los periodos cercanos a la ventana de 24 horas, mientras que aquellos que se encuentran resaltados en color rojo representan los periodos cercanos a la ventana de 36 horas.

Tabla 3. Información resumida de los periodos más representativos por cada análisis realizado y por cada año y periodo mensual analizado.

Año	Periodo mensual	Periodos representativos (horas)		
		Fourier	Multitaper	Wavelet
2008	Enero - Abril	38.72	41.20	24.10
		27.92	27.68	15.60
		23.80	24.10	7.42
	Mayo - Agosto	35.57	35.60	34.09
		29.52	30.10	31.81
		26.84	26.84	14.84
	Septiembre - Diciembre	23.45	23.24	36.54
		32.10	32.18	29.68
		37.54	37.72	22.49
2009	Enero - Abril	36.00	35.89	34.45
		39.45	39.55	23.20
		26.42	26.10	5.68
	Mayo - Agosto	36.43	36.43	29.99
		29.81	29.81	24.36
		24.80	24.86	11.20
	Septiembre - Diciembre	30.22	30.45	32.14
		38.57	37.95	24.36
		24.84	24.67	5.30
2010	Enero - Abril	36.30	37.80	36.92
		33.00	33.45	16.70
		24.40	23.97	5.40
	Mayo - Agosto	35.14	35.56	36.92
		25.81	26.36	26.11
		24.20	24.10	17.80
	Septiembre - Diciembre	29.28	30.20	29.99
		33.66	33.89	14.68
		25.90	25.34	5.42
2011	Enero - Abril	42.71	42.71	29.99
		36.76	35.94	24.50
		26.87	27.14	13.05
	Mayo - Agosto	34.73	34.71	34.45
		23.81	23.76	21.20
		20.10	20.40	10.80
	Septiembre - Diciembre	29.28	29.28	30.13
		27.11	27.11	24.36
		23.06	23.06	13.99

Año	Periodo mensual	Periodos representativos (horas)		
		Fourier	Multitaper	Wavelet
2012	Enero - Abril	34.99	33.77	32.14
		28.30	28.67	25.34
		25.70	25.70	12.18
	Mayo - Agosto	35.14	36.15	36.92
		32.09	31.58	23.56
		24.00	24.20	11.36
	Septiembre - Diciembre	29.58	30.21	39.57
		24.00	24.34	24.36
		36.60	35.76	11.36
2013	Enero - Abril	44.68	44.68	44.98
		36.30	36.45	30.30
		24.61	24.78	27.69
	Mayo - Agosto	35.57	35.57	34.09
		29.82	29.54	25.21
		24.20	24.37	18.68
	Septiembre - Diciembre	28.48	28.67	29.68
		34.65	35.42	23.20
		23.30	23.56	5.30

*Periodos resaltados en color azul representan aquellos cercanos a la ventana de 24 horas, mientras que los periodos resaltados en color rojo aquellos cercanos a la venta de 36 horas.

Con esta tabla de información complementaria (tabla 3), es posible observar los periodos representativos en horas, conforme el análisis espectral realizado, que se encuentran cercanos a la ventana de 24 horas (resaltado azul) y los de 36 horas (resaltado rojo) en todos los años y periodos mensuales estudiados.

5.4. Discusión

Como se menciona en la sección de Antecedentes, uno de los trabajos que analiza el comportamiento de la temperatura en la columna del mar en el Sistema Arrecifal Veracruzano es el de Mateos-Jasso et. al. en el 2012. En los resultados obtenidos se resalta la estratificación térmica en la columna de agua durante el periodo de primavera – verano, mientras que durante el periodo invierno – otoño la columna se observa homogénea (figura 2-3). Dicho comportamiento provoca que durante los meses de verano en los que la temperatura de la columna de agua tiende a incrementarse en otros sitios, en el Sistema Arrecifal Veracruzano la temperatura en el fondo es considerablemente menor que la que presenta la superficie e incluso llega ser menos que la observada durante invierno.

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los observados en el artículo de Mateos-Jasso et al., 2012. De igual manera, la temperatura del agua observada en el fondo del SAV no incrementa significativamente como la observada en la superficie durante el periodo de mayo a agosto. Lo anterior puede beneficiar térmicamente a los arrecifes coralinos de la zona, debido al aporte de agua de menor temperatura que evita que éstos excedan su límite termal.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados en el Informe *“Sistema Arrecifal Veracruzano: Condición Actual y Programa Permanente de Monitoreo: II Etapa”* elaborado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en 2017, los arrecifes de coral en la zona tienen un grado de perturbación por actividades humanas muy alto, lo que sugiere que el blanqueamiento coralino presente en el SAV puede deberse en mayor parte por contaminación derivada de actividades antropogénicas.

Como parte de los objetivos de este trabajo, además de analizar la temperatura en la capa profunda del mar como ya se detalló anteriormente, se encuentra el determinar

las causas de la variación en alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del Sistema Arrecifal Veracruzano de lo cual se ahondará a continuación.

Dentro de los resultados observados en las diferentes metodologías para el análisis realizado a las series temporales de datos, la frecuencia de mayor amplitud característica de la mayoría de ellos se encuentra en el periodo de 36 horas, continuando en amplitud por frecuencias en los periodos de 24 y 30 horas. Este comportamiento se puede apreciar principalmente en la estación veraniega correspondiente a los meses de mayo a agosto aproximadamente.

Realizando una revisión de la teoría de los procesos oceanográficos que pudieran afectar la temperatura presente en la región de Isla Verde – Anegada de Adentro, en el Sistema Arrecifal Veracruzano, se encontró que las oscilaciones inerciales en la zona son la principal causa de que se presenten estos picos energéticos de temperatura cercanos a la frecuencia de 36 horas.

De acuerdo con la teoría, el periodo inercial (T_i) de las oscilaciones inerciales en una región determinada, puede calcularse conociendo la latitud (φ) de interés con la siguiente ecuación:

$$T_i = \frac{\pi}{\Omega \sin \varphi}$$

Donde:

$$\Omega = \text{Velocidad angular de la Rotación de la Tierra} = \frac{2\pi}{86400} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$$

Realizando la sustitución de la latitud del punto de muestreo Isla Verde – Anegada de Adentro ($19^\circ 12' 46.6''$ N), en la ecuación se tiene que:

$$T_i = \frac{180^\circ}{\frac{2(180^\circ)}{86400 \text{ seg}} \sin \sin (19.21708)} = 131247.88 \text{ seg}$$

Realizando conversión de unidades se tiene:

$$131247.88 \text{ seg} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 36.4577 \text{ hrs}$$

Este periodo calculado concuerda con el observado en la mayoría de las gráficas realizadas en este estudio (IV-34, IV-35, IV-38, IV-44, IV-55), principalmente aquellas que corresponden al periodo estacional primavera-verano, para los meses de mayo a agosto, en los distintos años analizados.

Dicha concordancia con los picos de mayor amplitud, ubicados en la ventana de 36 horas, en el periodo correspondiente a primavera – verano pueden, conforme el análisis anterior, asociarse a oscilaciones inerciales que repercuten en la temperatura del agua en la capa profunda del Sistema Arrecifal Veracruzano.

6. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis detallado de las variaciones de alta frecuencia de la temperatura en las aguas profundas (30 metros de profundidad) del Sistema Arrecifal Veracruzano. Para este estudio, como se mencionó anteriormente, se analizaron datos de temperatura obtenidos de corrientímetros y termistores con una frecuencia de muestreo de 30 minutos y 10 minutos respectivamente. El periodo en el que se obtuvieron los datos de temperatura fue de 2008 a 2013.

Como hipótesis de este trabajo se tenía que las oscilaciones en alta frecuencia de la temperatura podrían deberse a la brisa diurna o a la marea interna o los flujos de calor a través de la superficie. Esta última parte de la hipótesis fue descartada debido a que en las observaciones de temperatura se muestra que las variaciones en alta frecuencia cerca de la superficie son mucho menores que en aguas profundas.

Para corroborar la hipótesis se realizó un procesamiento de los datos de temperatura removiendo las variaciones de baja frecuencia mediante filtros paso alto, dejando únicamente las señales en alta frecuencia. Una vez filtradas las series de tiempo, se realizaron análisis de Fourier, Multitaper y Wavelet para conocer las frecuencias de mayor amplitud en la serie y en qué periodo se presentan. De esta forma se pudo determinar a qué procesos oceanográficos están asociadas las variaciones en alta frecuencia de temperatura en el fondo del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro, dentro del Sistema Arrecifal Veracruzano.

Los resultados muestran varias frecuencias dominantes de las cuales la de mayor energía se encuentra alrededor de las 36 horas. También se observa gran energía en los periodos de 24 y 40 horas.

El análisis de estas frecuencias dominantes muestra que las oscilaciones inerciales son la causa principal de las variaciones de temperatura dentro de la ventana de 36 horas. Se revisó la teoría de ondas inerciales y las frecuencias correspondientes a la latitud

del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro en el SAV. Estos periodos corresponden con el de las oscilaciones observadas. De igual manera se muestra que las frecuencias observadas dentro de la ventana de 24 horas pueden asociarse al ciclo de las brisas mar-tierra y tierra-mar.

Las zonas arrecifales a nivel mundial se encuentran en constante amenaza debido al Calentamiento Global que afecta su supervivencia. La mayoría de los arrecifes coralinos en el planeta han sido llevados a su muerte o blanqueamiento producto de los cambios de temperatura ocasionados por el Calentamiento Global y el Cambio Climático. Debido a que el Sistema Arrecifal Veracruzano se encuentra ubicado en una región en la que, gracias a la dinámica oceánica regional, ocurren surgencias costeras y oscilaciones inerciales que aportan agua de relativa baja temperatura, este arrecife coralino puede tener un mucho menor impacto por el calentamiento de sus aguas producto del Cambio Climático. Lo anterior resulta un gran beneficio para este ecosistema marino, dado que las afectaciones que puede tener por el Calentamiento Global son mínimas, habría que prestar más atención a las amenazas que pueden afectar las zonas arrecifales en las costas de Veracruz, producto de otros procesos, ya sean naturales o antropogénicos.

Algunos procesos que pueden estar repercutiendo en el blanqueamiento del arrecife coralino son; posibles descargas de agua residual en las costas del Puerto de Veracruz y que, por la dinámica oceánica de la región, pueden afectar la zona arrecifal; una probable acidificación del agua marina dentro del Sistema Arrecifal Veracruzano, producto de contaminación atmosférica en la zona. Dado el alcance que tiene este estudio, no es posible asegurar que alguno de los escenarios anteriores sea el causante del blanqueamiento coralino en el Sistema Arrecifal Veracruzano, por esta razón es conveniente seguir analizando las posibles causas de este fenómeno que repercute en gran medida a este ecosistema marino mediante futuros trabajos de investigación.

Los resultados de este estudio resultan de gran importancia para el Sistema Arrecifal Veracruzano, ya que podrán contribuir al estudio de los impactos ambientales que pueden llegar a causar la muerte del coral en la región. Realizando el análisis de otras variables como: salinidad, acidificación, contaminantes, en futuros trabajos de investigación, se puede enriquecer el estudio del probable blanqueamiento en el Sistema Arrecifal Veracruzano y determinar sus causas. Los resultados de este trabajo, aunados a los resultados de otros posibles trabajos en la zona, pueden contribuir a tener un mejor manejo de los recursos dentro del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.

La posible afectación del arrecife de coral conlleva implicaciones ambientales muy importantes que pueden llegar a la muerte de muchas de las especies que habitan el arrecife. Por este motivo, es indispensable contar con estudios de investigación para conocer mejor los procesos involucrados en el blanqueamiento del coral y con ellos contar con herramientas para la toma de decisiones en materia de conservación ambiental.

II. GLOSARIO

- **Arrecife de coral:** Ecosistema marino de gran diversidad biótica formado por grandes estructuras calcáreas.
- **Blanqueamiento coralino:** Pérdida de color del coral provocado por el aumento de temperatura en el agua.
- **Brisa marina:** Vientos costeros que se presentan por diferencias de temperatura entre la tierra y el mar.
- **Densidad espectral de potencia:** Función matemática que da a conocer la distribución de potencia de una señal o serie de tiempo sobre distintas frecuencias de las que está formada.
- **Erosión hídrica:** Proceso de degradación del suelo o roca que es provocado por un flujo de agua que circula por éste.
- **Espiral de Ekman:** Transporte de las masas de agua superficiales inducido por el esfuerzo del viento y que está influenciado por la fuerza de Coriolis.
- **Filtro paso alto:** Filtro digital que atenúa las señales situadas por debajo de una frecuencia de corte y permite las señales situadas por encima de la frecuencia de corte.
- **Filtro paso bajo:** Filtro digital que permite las señales situadas por debajo de una frecuencia de corte y atenúa las señales situadas por encima de la frecuencia de corte.
- **Frecuencia Nyquist:** Frecuencia máxima de la que se puede extraer información de una serie temporal.
- **Fuerza de Coriolis:** Fuerza debida a la rotación de la Tierra que causa el movimiento de vientos y corrientes a la derecha en el hemisferio norte y en sentido opuesto en el hemisferio sur.
- **Marea:** Incremento o decremento del nivel de agua en el mar que es provocado por la fuerza de atracción de la luna y el sol y por la rotación del planeta.

- **NetCDF:** Formato de archivo destinado al almacenamiento de datos científicos multidimensionales.
- **Onda inercial:** Movimiento oscilatorio de un fluido producto de la rotación de la Tierra.
- **Pasabanda (Banda de paso):** Gama de frecuencias o longitudes de onda que pueden pasar por un filtro sin ser atenuadas.
- **Perfilador de corriente (Corrientímetro):** Instrumento para medir la velocidad de corrientes basado en la transmisión de ondas acústicas y la medición del cambio en la frecuencia.
- **Serie de tiempo:** Datos estadísticos que se recopilan, observan y/o registran en intervalos de tiempo definidos cronológicamente.
- **Surgencia costera:** Acenso de aguas profundas hacia las capas superficiales del mar, producto del forzamiento de vientos.
- **Termistor:** Instrumento basado en un sensor de temperatura.
- **Termoclina:** Profundidad en la que ocurre un cambio abrupto de la temperatura en la columna de agua marina.
- **Variaciones de alta frecuencia de temperatura:** Cambios de temperatura que ocurren en periodos de tiempo relativamente cortos (para el caso de este estudio horas o días).
- **Ventanas ortogonales:** Rangos específicos determinados en una serie temporal.

III. REFERENCIAS

- Ahrens, C. D. (2010). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Cengage Learning.
- Allende Arandía, M. E. (2015). Escenarios de la Dinámica y Termodinámica en el Sistema Arrecifal Veracruzano Norte ante el Cambio Climático.
- Allende Arandía, M. E., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Mateos Jasso, A., Vargas Hernández, J., & Zamudio, L. (2015). Analysis of Ocean Current Observations in the Northern Veracruz Coral Reef System, Mexico: 2007–12. *Journal of Coastal Research*, 32(1), 46–55.
- Alvarenga, B., & Máximo, A. (2002). *Física General con Experimentos Sencillos*. México: Oxford.
- Bádenas, B., & Aurell, M. (1999). Arrecifes de coral y concentración de dióxido de carbono: un ejemplo en la didáctica sobre cambio climático. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7(1), 21-28.
- Bigg, G. R. (2003). *The Oceans and Climate*. Cambridge University Press.
- Byatt, A., Fothergill, A., & Holmes, M. (2001). *Blue Planet. A natural history of the oceans*. Dk Pub.
- Cano, E., Salcedo, R., & Soto, G. (2016). Análisis de principios y aplicaciones de la transformada wavelet.
- Cederstav, A. L. (2015). La Protección de los Arrecifes de Coral en México. Rescatando la Biodiversidad Marina y sus Beneficios para la Humanidad. IV Amenazas de los Arrecifes de Coral. *AIDA*.
- Chávez-Hidalgo, A. (2009). Conectividad de los arrecifes coralinos del Golfo de México y Caribe Mexicano. (*Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas*).
- CONABIO. (2012). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Retrieved from Biodiversidad Mexicana: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/arrecifes.html>
- Correa-Ramírez, M., & Hormazabal, S. (2012). MultiTaper Method-Singular Value Decomposition (MTM-SVD): variabilidad espacio-frecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar en el Pacífico suroriental. *Latin american journal of aquatic research*, 40(4), 1039-1060.
- De Buen, R. C. (2007). Modelación de la dispersión de los contaminantes vertidos en Playa Norte, Veracruz. .

- ETools. (2016, Marzo 30). *Funcionamiento de un sensor de temperatura*. Retrieved from [electrontools.com](http://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/30/funcionamiento-de-un-sensor-de-temperatura/):
<http://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/30/funcionamiento-de-un-sensor-de-temperatura/>
- HOBO Data Loggers. (2013). *HOBO® Water Temp Pro v2 (U22-001) Manual*.
- HOBO Data Loggers. (2013). *HOBOWare® User's Guide*.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate Change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research*, 50(8), 839-866.
- Hoegh-Guldberg, O., & Smith, G. (1989). The effect of sudden changes in temperature, light and salinity on the density and export of zooxanthellae from the reef corals *Stylophora pistillata* and *Seriatopora hystrix*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 129(3), 279-303.
- IPCC. (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis:
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch5.html
- Jones, I. S., & Toba, Y. (2001). *Wind stress over the Ocean*. New York: Cambridge University Press.
- Jover, I. C. (1992). *Ecuaciones Diferenciales*. Pearson Educación.
- Mateos-Jasso, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., & Allende-Arandía, M. E. (2012). Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico. *Continental Shelf Research*, 50, 30-40.
- MathWorks. (2017). *Filtro paso bajo*. Retrieved from *Diseño filtros paso bajo con MATLAB*: <https://es.mathworks.com/discovery/filtro-paso-bajo.html>
- MathWorks. (2018). *Filtro paso alto*. Retrieved from <https://es.mathworks.com/discovery/filtro-paso-alto.html>
- Medir temperatura. (2016, Diciembre 11). *Medirtemperatura.com*. Retrieved from <http://medirtemperatura.com/termistor.php>
- NOAA. (2014, diciembre 16). *Coral Reef Information System*. Retrieved from National Oceanic and Atmospheric Administration:
http://www.coris.noaa.gov/about/what_are/
- Nortek AS. (2008). *Aquadop Current Profiler. User Guide*.
- Ortiz-Lozano, L., Pérez-España, H., Granados-Barba, A., González-Gándara, C., Gutiérrez-Velázquez, A., & Martos, J. (2013). The Reef Corridor of the

- Southwest Gulf of Mexico: Challenges for its management and conservation. *Ocean & Coastal Management*, 86, 22-32.
- Pérez-España, H., & Vargas-Hernández, J. M. (2008). *Caracterización ecológica y monitoreo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano: Primera Etapa*. Universidad Veracruzana. Centro de Ecología y Pesquerías Informe final SNIBCONABIO proyecto No. DM002. México.
- Pinet, P. R. (2003). *Invitation to Oceanography*. London: Jones and Bartlett Publishers.
- Reyes-Coca, S. (2001). *Introducción a la meteorología*. Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California.
- Rodríguez, T., Aguilar, M., Morales, P., & Acosta, T. (2012). Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico. *Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte*, 1-75.
- Rojas, J. (2008). Respuesta de la circulación oceánica ante el forzamiento de eventos de norte en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano.
- Sanvicente-Añorve, L., Zavala-Hidalgo, J., Allende-Arandía, M., & Hermoso-Salazar, M. (2014). Connectivity patterns among coral reef systems in the southern Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 498, 27-41.
- SEMARNAT. (2017). *Sistema Arrecifal Veracruzano y el desarrollo sustentable*. Retrieved from <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/sistema-arrecifal-veracruzano-y-el-desarrollo-sustentable?idiom=es>
- SEMARNAT, P. (2005). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales and Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*. Texas: A & M University.
- Thomson, R., & Emery, W. (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier.
- Tomczak, M. (1998). *Shelf and Coastal Oceanography*. Retrieved from <http://www.mt-oceanography.info/ShelfCoast/index.html>

- Unidata. Data Services and Tools for Geoscience. (2017). *Network Common Data Form (NetCDF)*. Retrieved from <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier.
- WWF. (n.d.). *Fondo Mundial para la Naturaleza*. Retrieved from Arrecife Mesoamericano: http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/arrecife_mesoamericano/
- Zavala-Hidalgo, J., & Fernández-Eguiarte, A. (2004). Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México. *Ordenamiento ecológico marino. Una visión temática de la regionalización*, 21-32.

IV. APÉNDICE

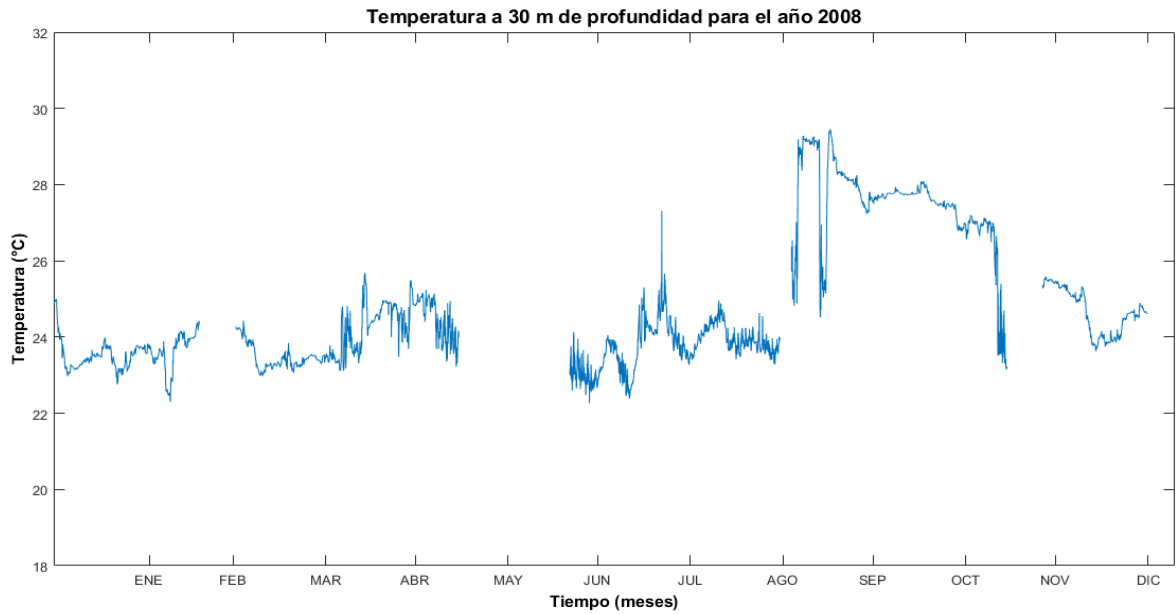


Figura IV-1. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2008. La temperatura máxima anual es de 29.45°C y la mínima es de 22.27°C.

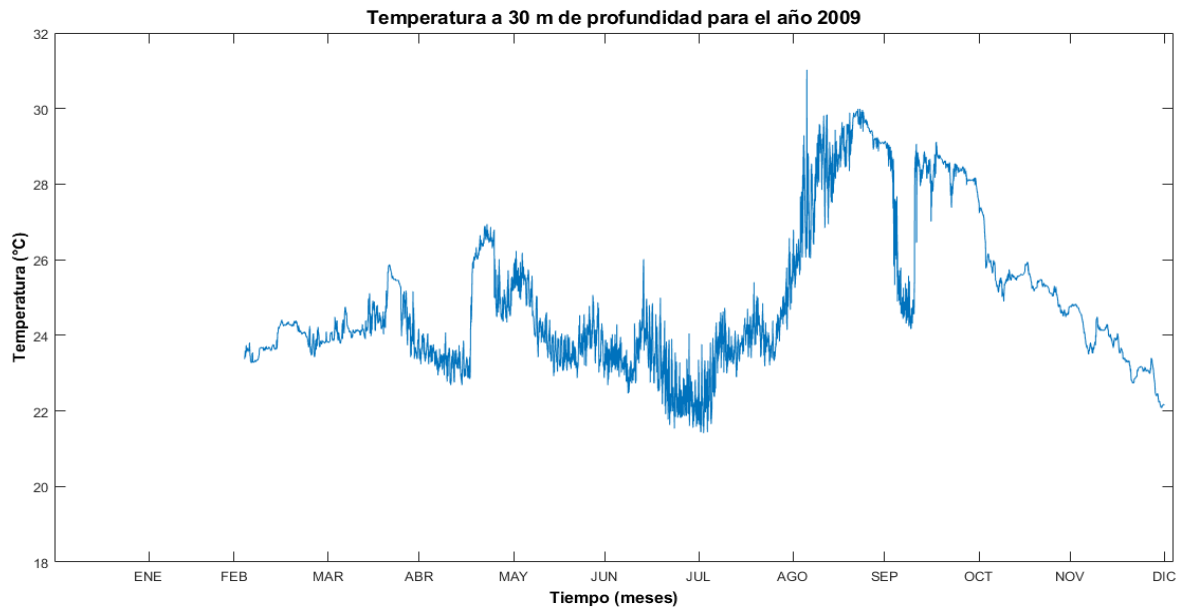


Figura IV-2. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2009. La temperatura máxima anual es de 31.03°C y la mínima de 21.41°C.

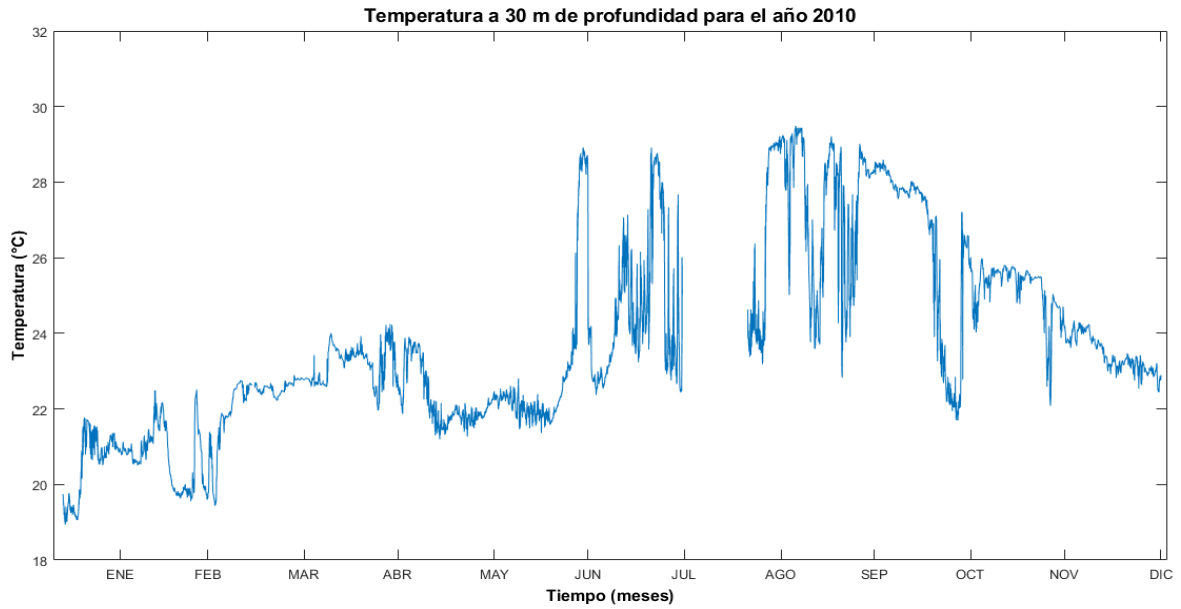


Figura IV-3. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2010. La temperatura máxima anual es de 29.49°C y la mínima de 18.94°C.

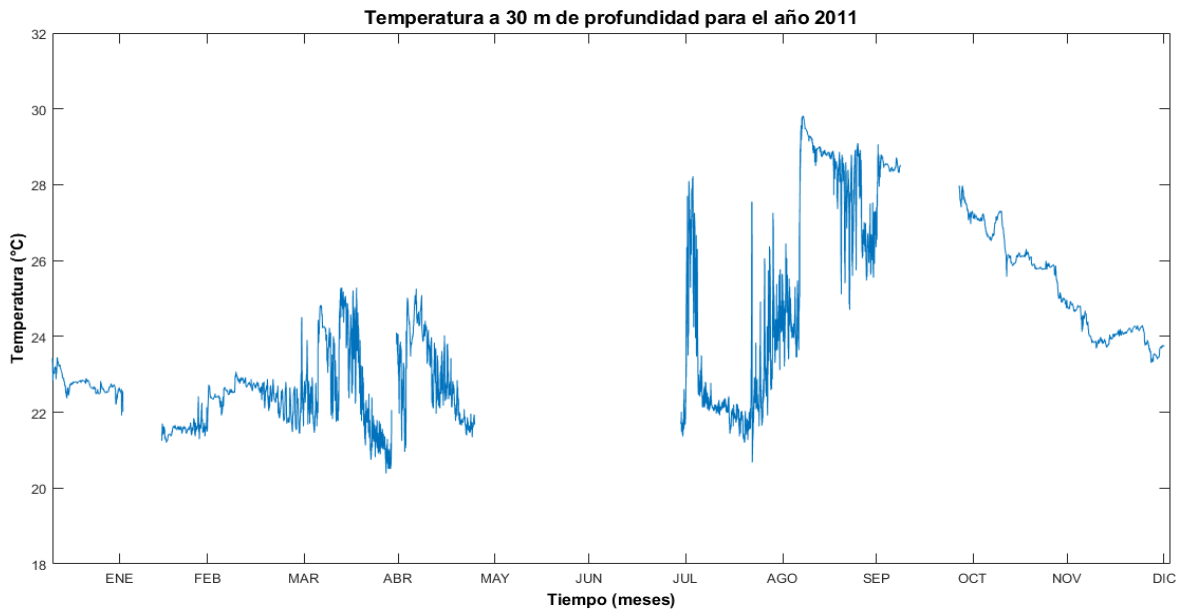


Figura IV-4. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2011. La temperatura máxima anual es de 29.82°C y la mínima de 20.39°C.

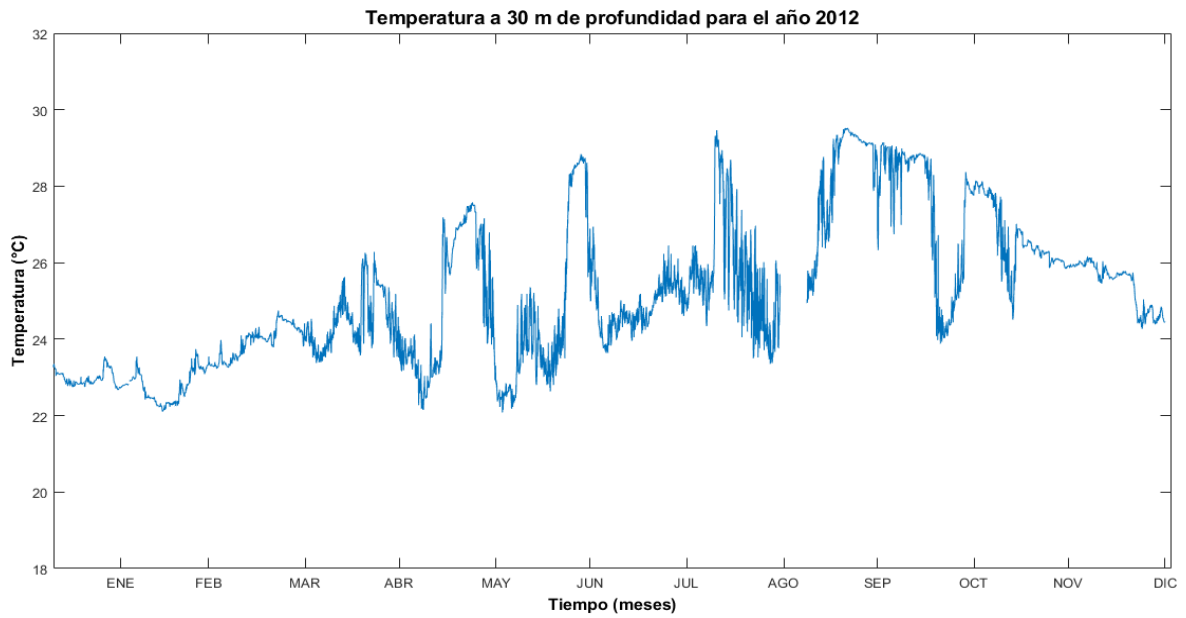


Figura IV-5. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el año 2012. La temperatura máxima anual es de 29.52°C y la mínima de 22.08°C.

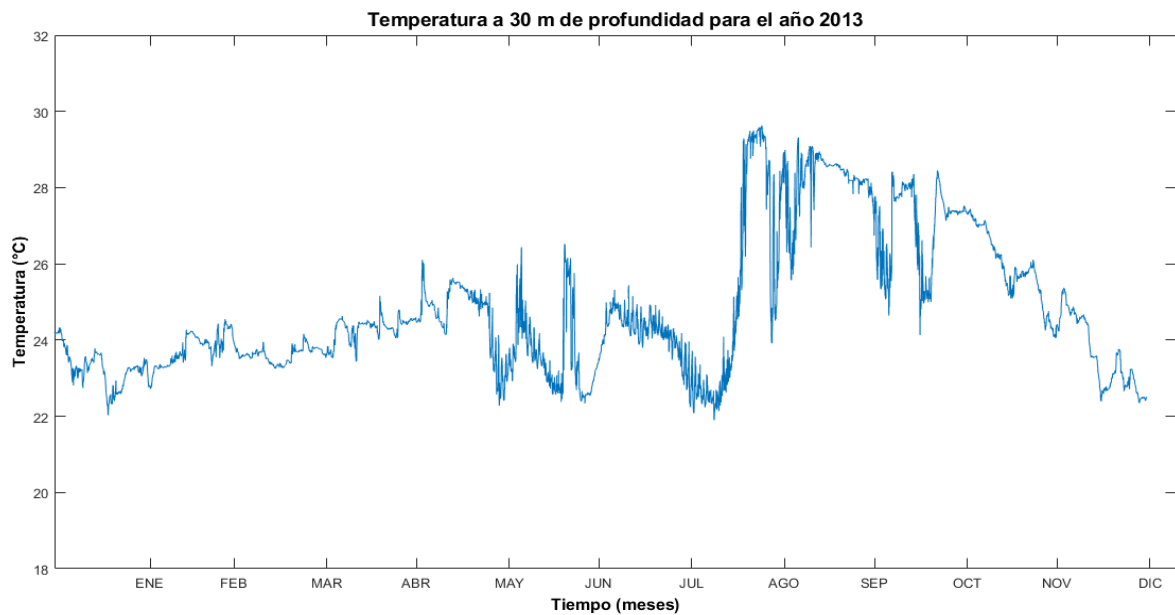


Figura IV-6. Temperatura de la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el año 2013. La temperatura máxima anual es de 29.63°C y la mínima de 21.90°C.

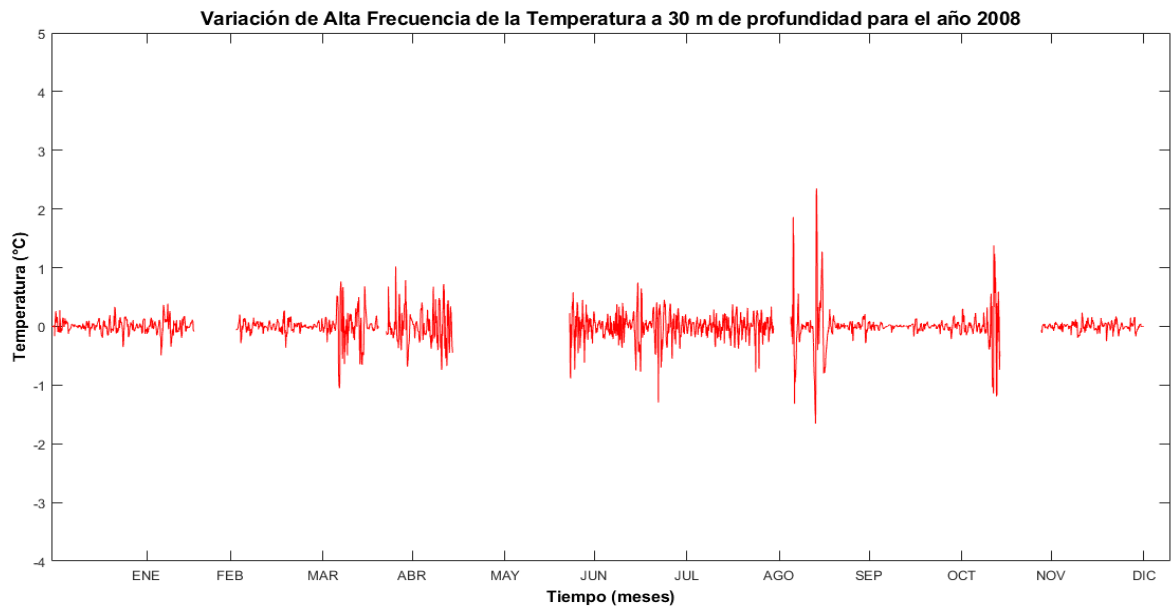


Figura IV-7. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el año 2008. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.06°C hasta -1.79°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

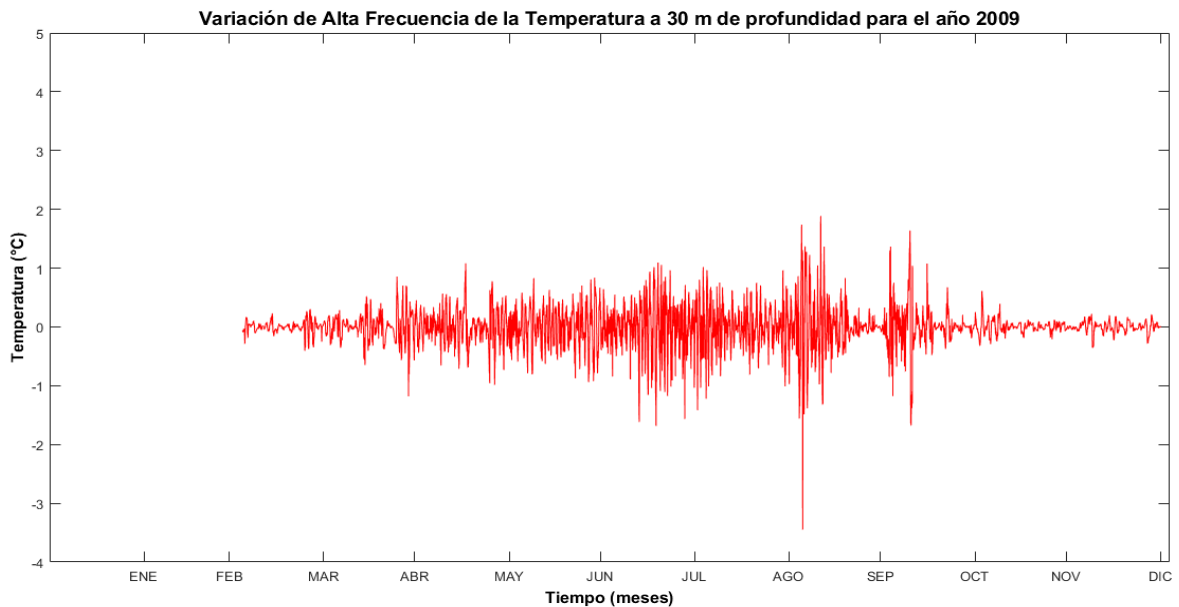


Figura IV-8. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el año 2009. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.45°C hasta -1.88°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

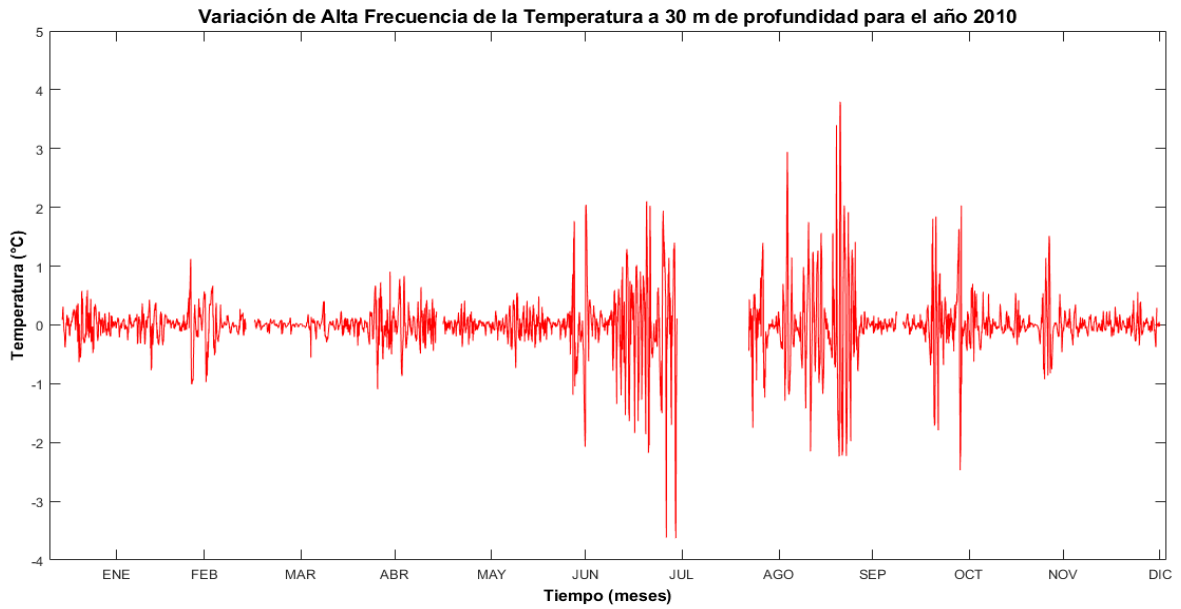


Figura IV-9. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2010. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.63°C hasta -3.79°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

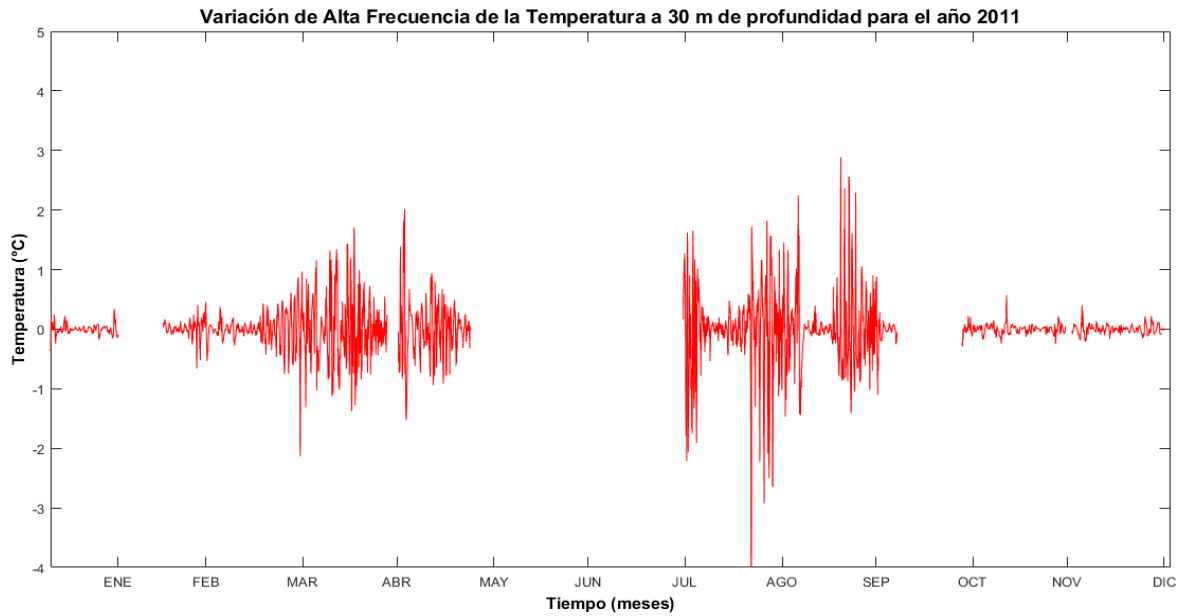


Figura IV-10. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2011. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 5.07°C hasta -2.88°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

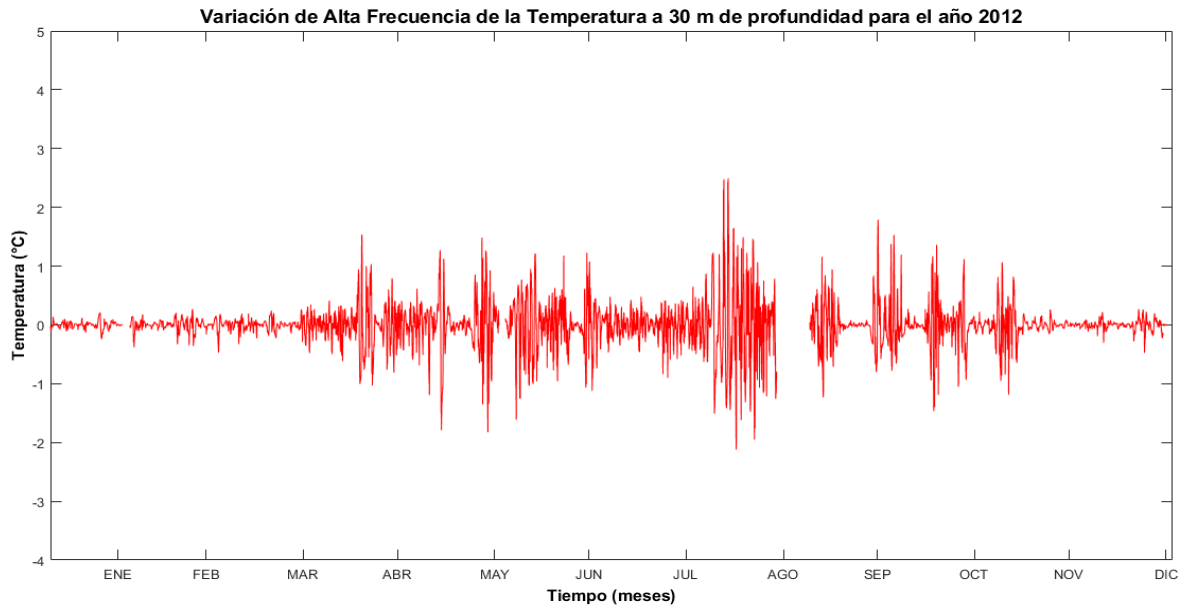


Figura IV-11. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2012. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 2.12°C hasta -2.49°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

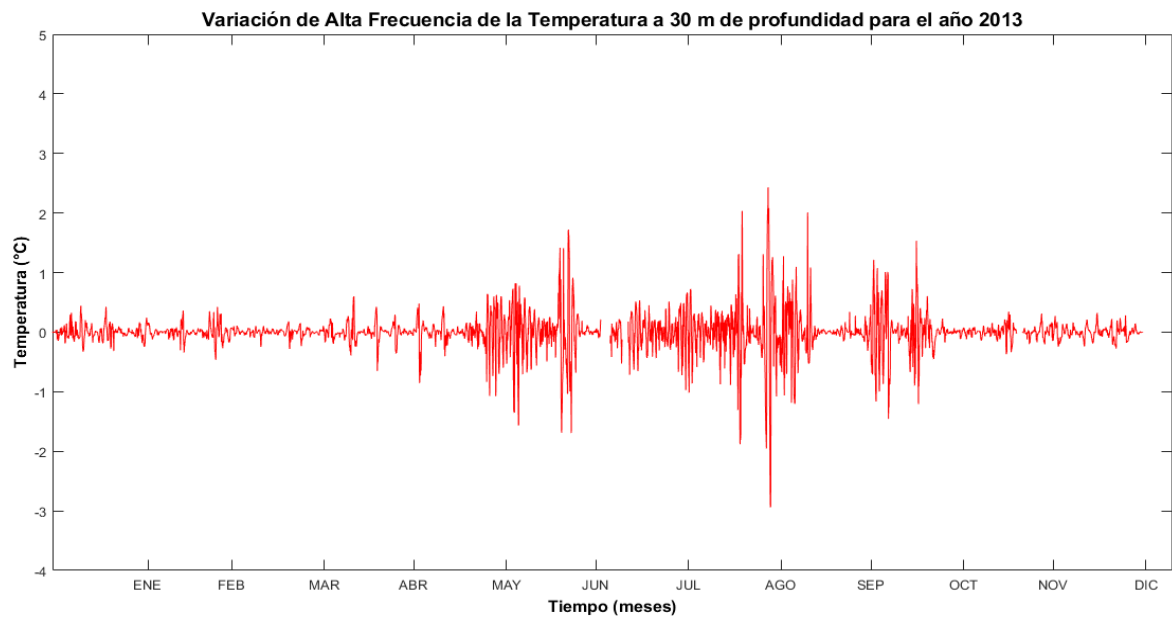


Figura IV-12. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Aneгада de Adentro para el año 2013. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.01°C hasta -2.30°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

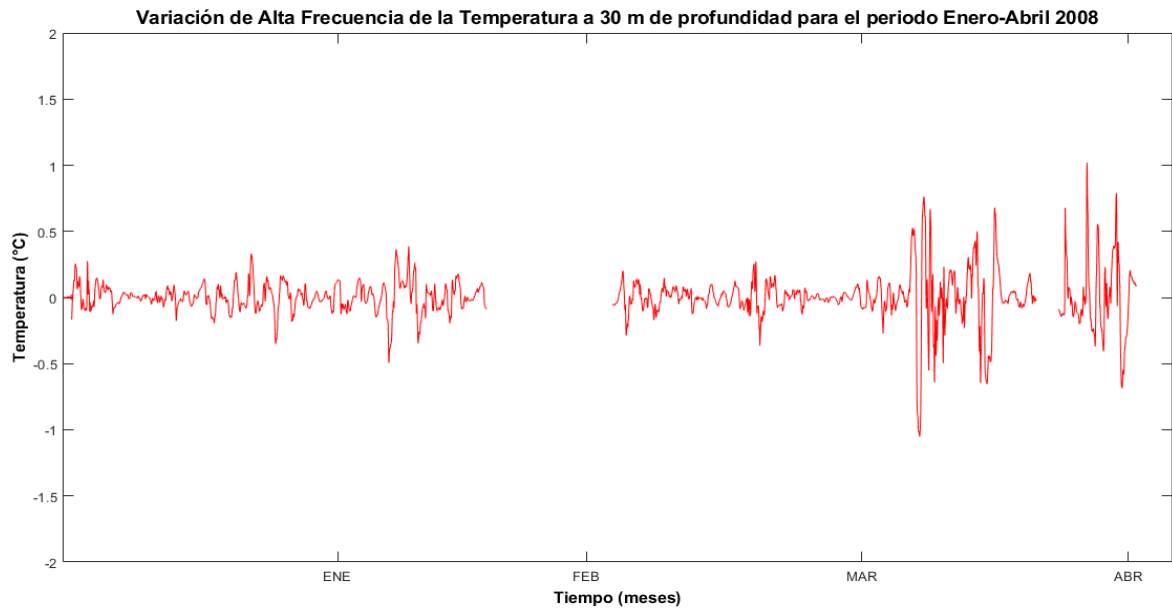


Figura IV-13. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2008. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 0.98°C hasta -1.34°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

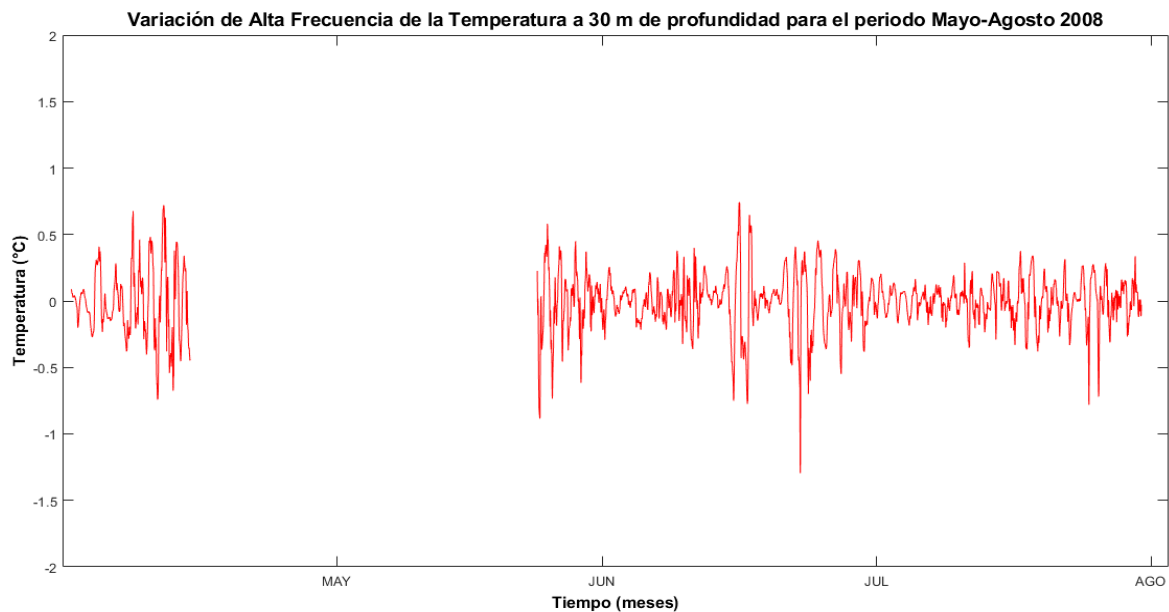


Figura IV-14. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2008. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 0.72°C hasta -1.66°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

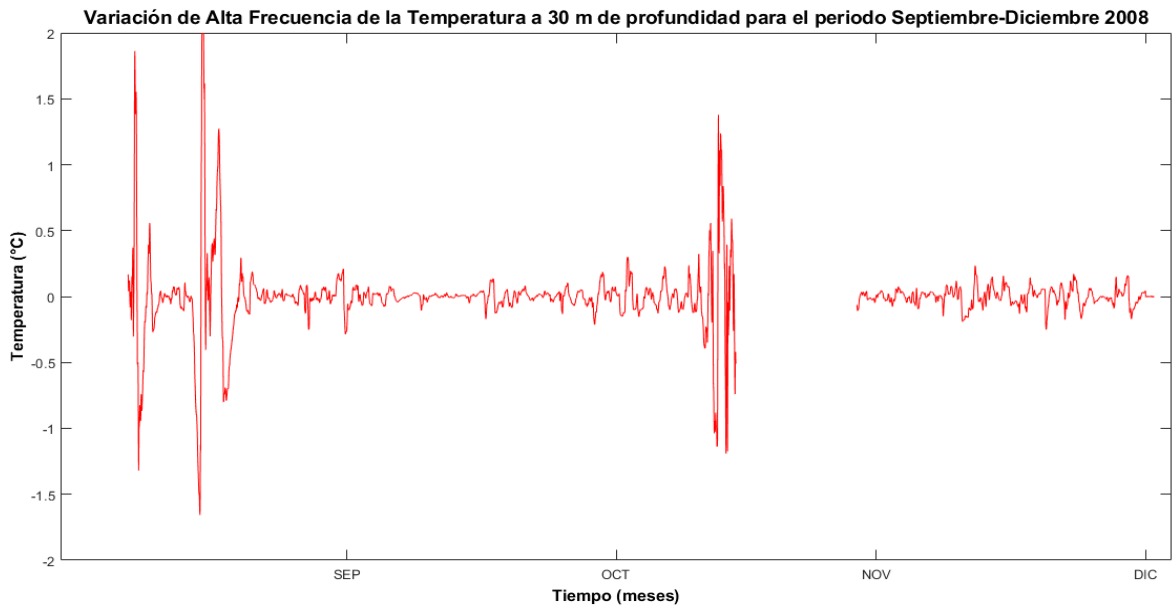


Figura IV-15. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2008. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.06°C hasta -1.79°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

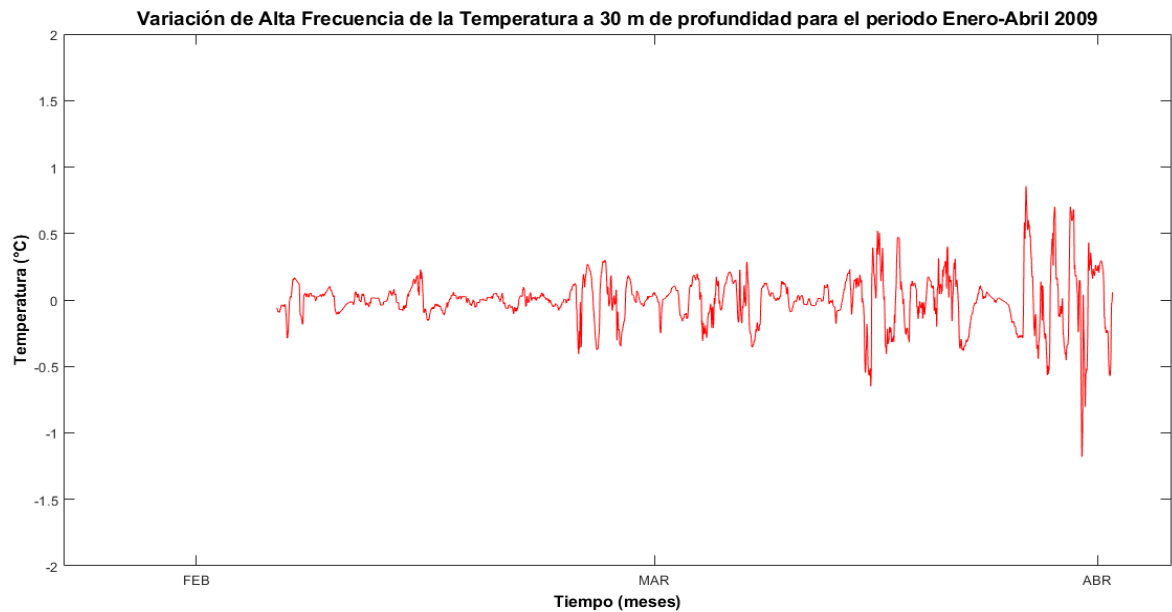


Figura IV-16. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2009. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.18°C hasta -0.86°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

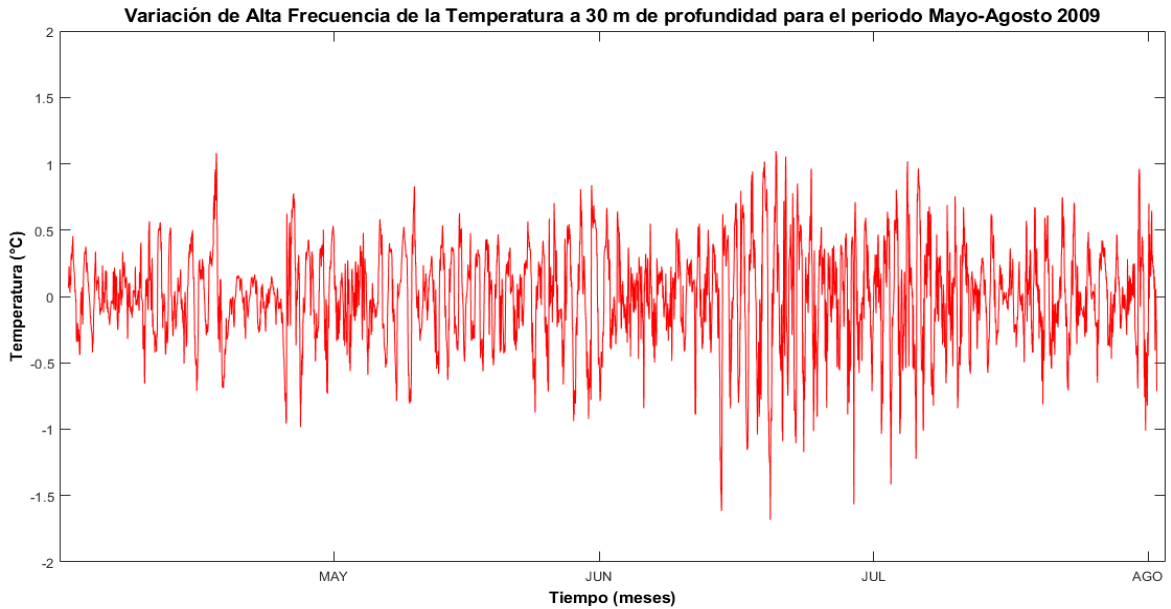


Figura IV-17. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2009. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.68°C hasta -1.09°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

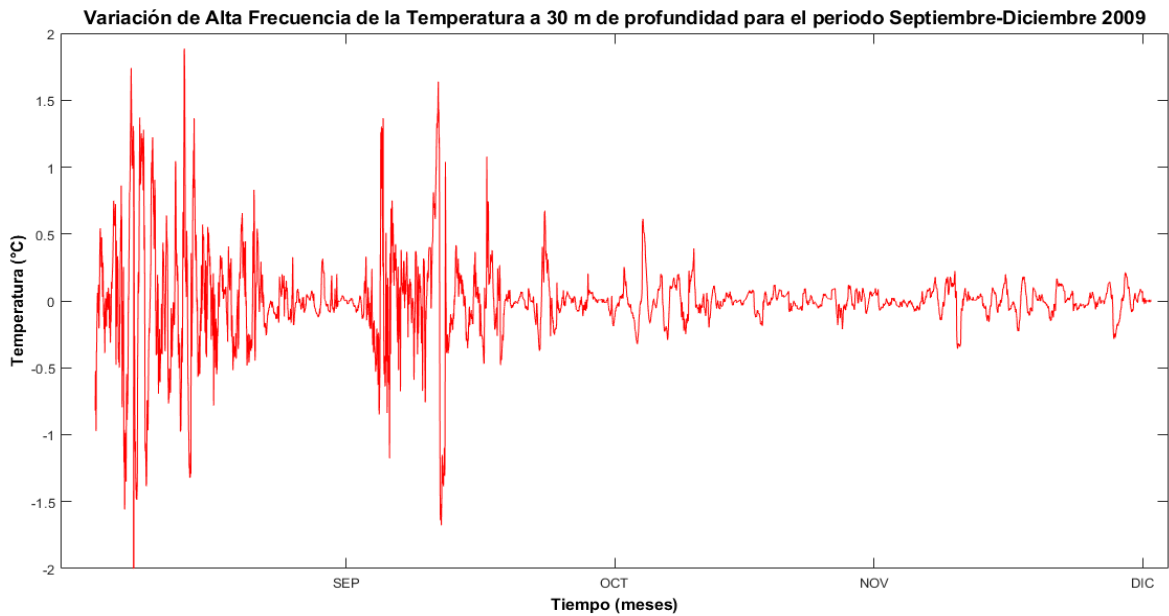


Figura IV-18. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2009. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.45°C hasta -1.89°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

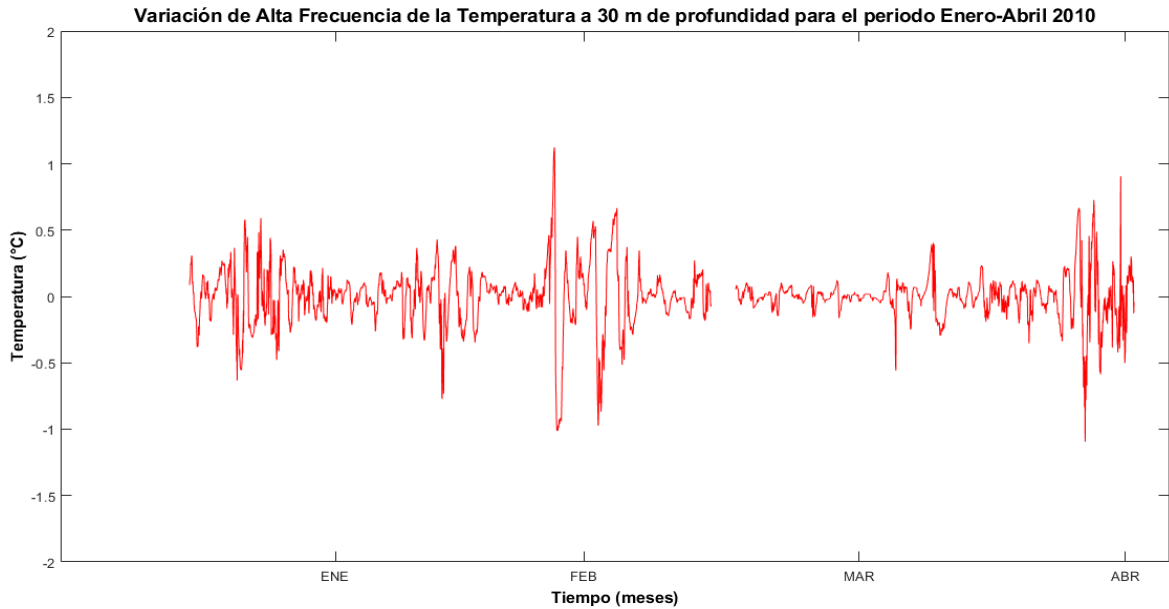


Figura IV-19. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2010. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.09°C hasta -1.12°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

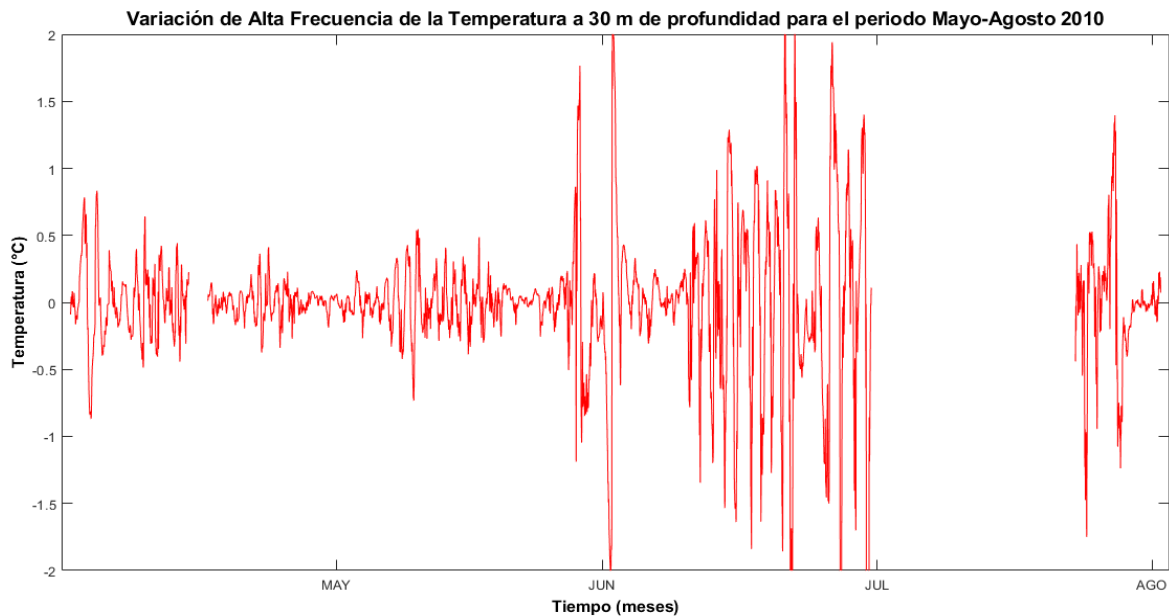


Figura IV-20. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2010. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.62°C hasta -2.10°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

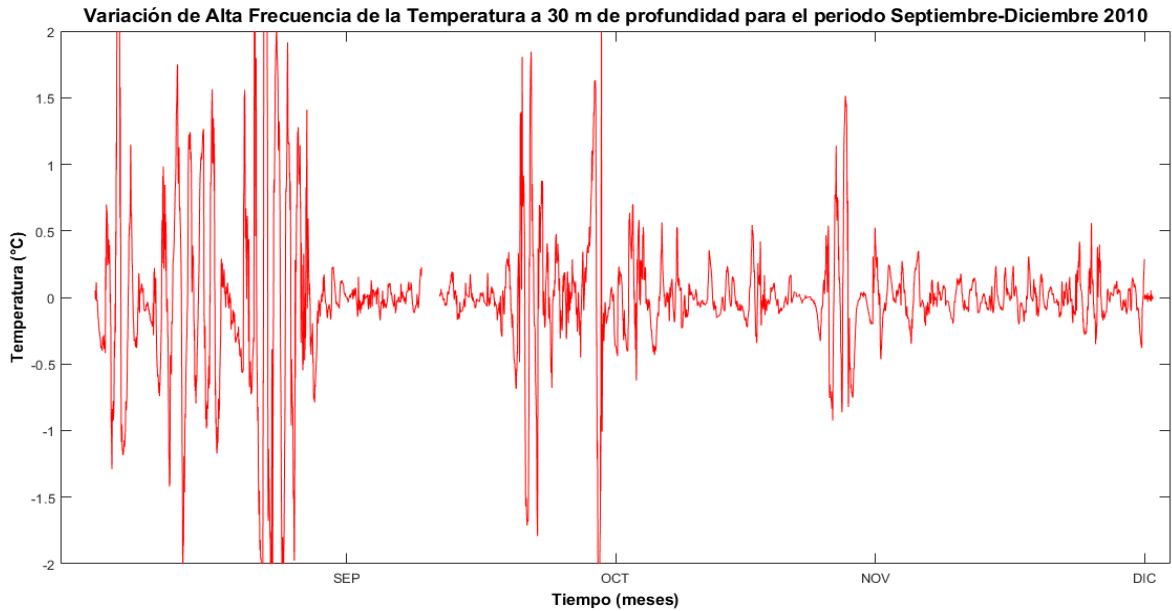


Figura IV-21. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2010. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 2.47°C hasta -3.78°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

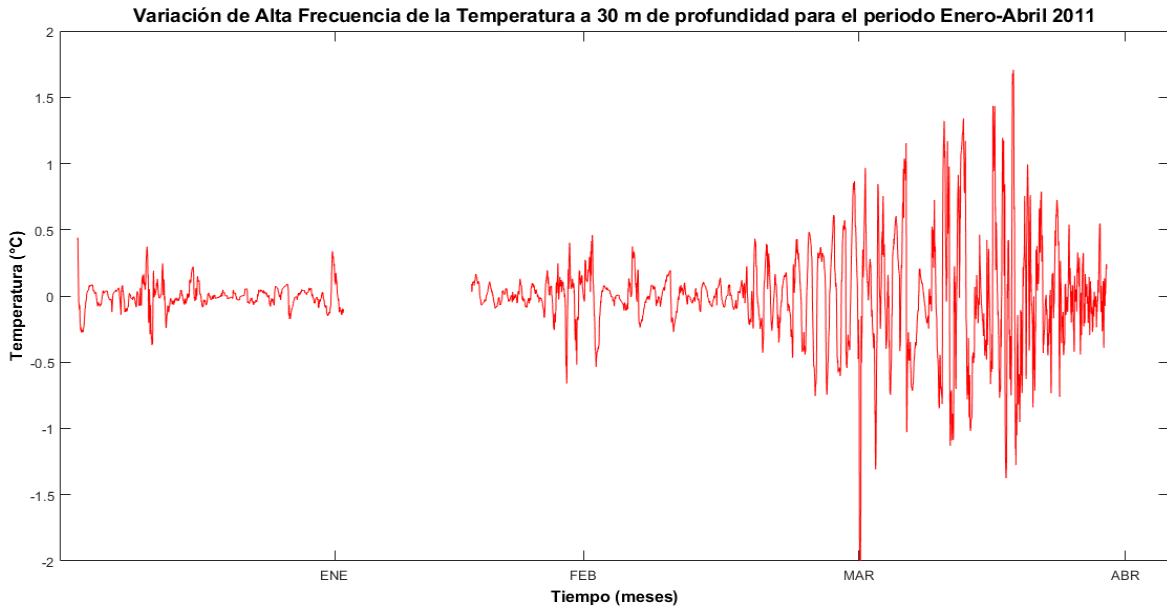


Figura IV-22. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2011. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 2.13°C hasta -1.70°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

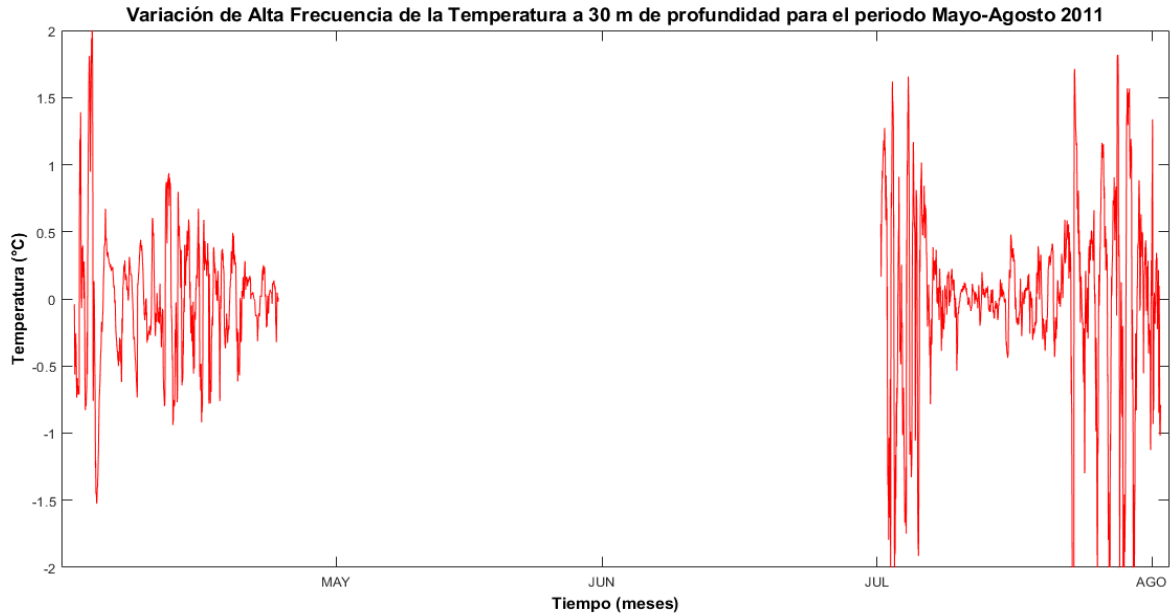


Figura IV-23. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2011. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 5.06°C hasta -2.01°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

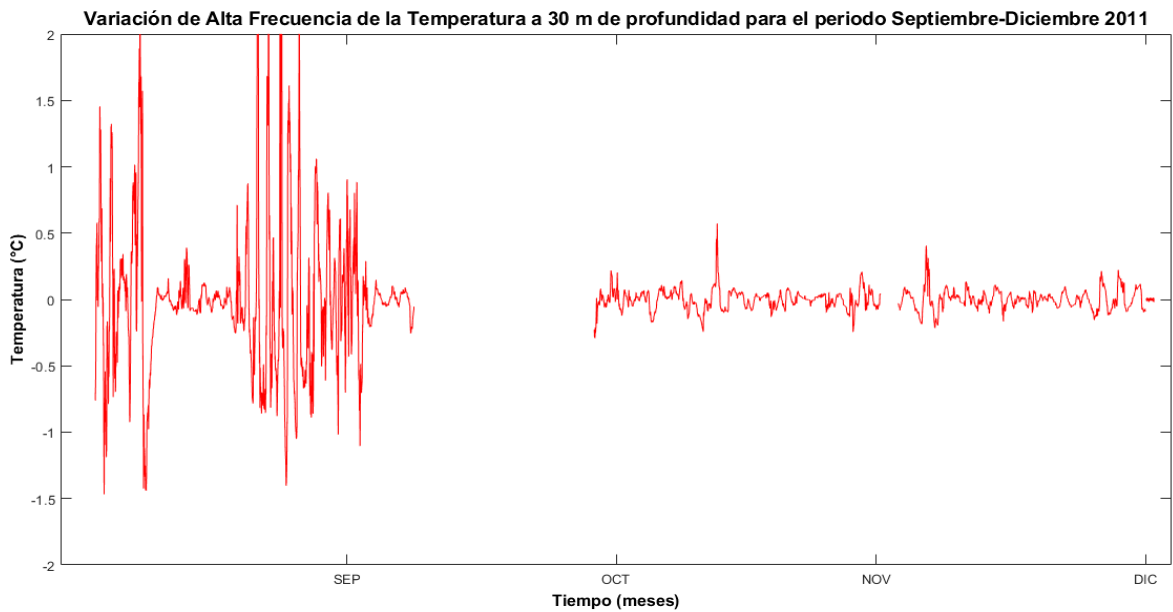


Figura IV-24. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2011. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.46°C hasta -2.88°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

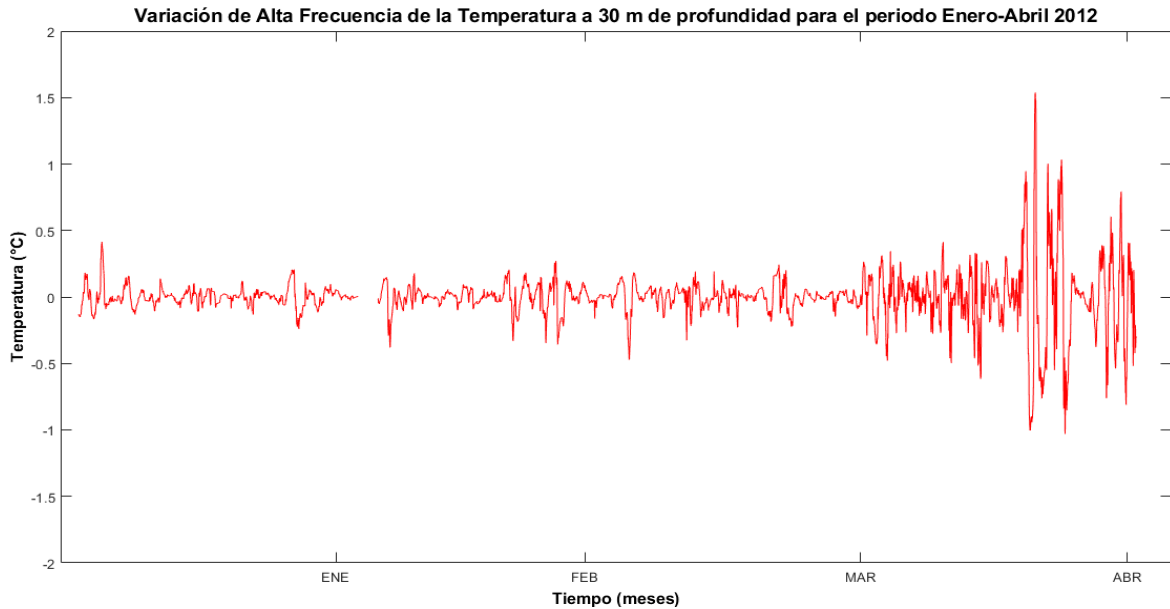


Figura IV-25. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2012. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.03°C hasta -1.53°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

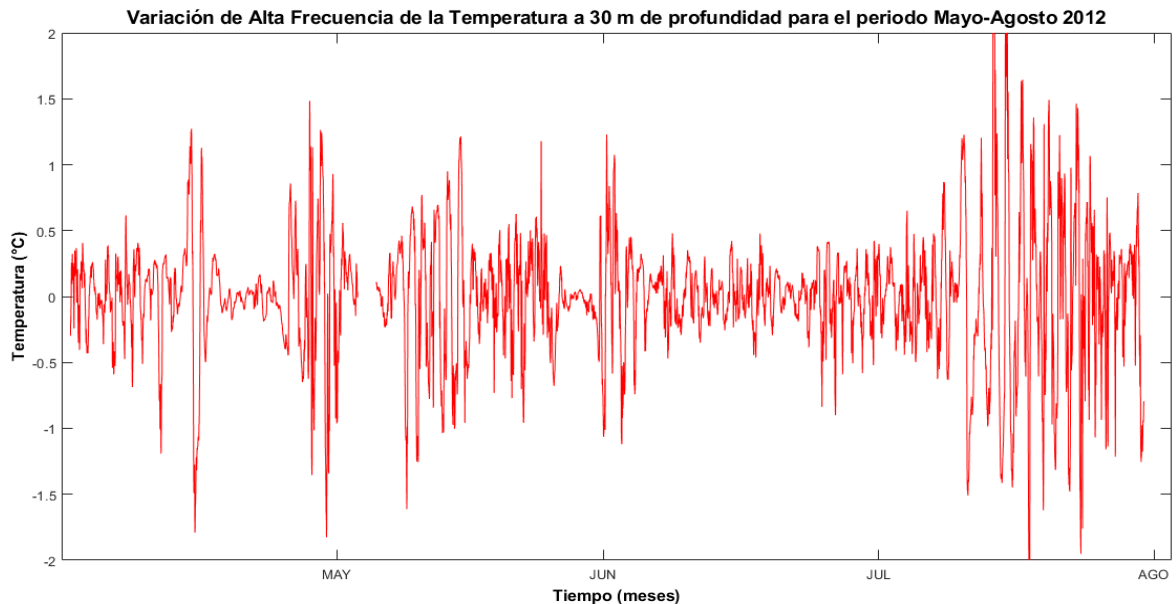


Figura IV-26. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 2.12°C hasta -2.49°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

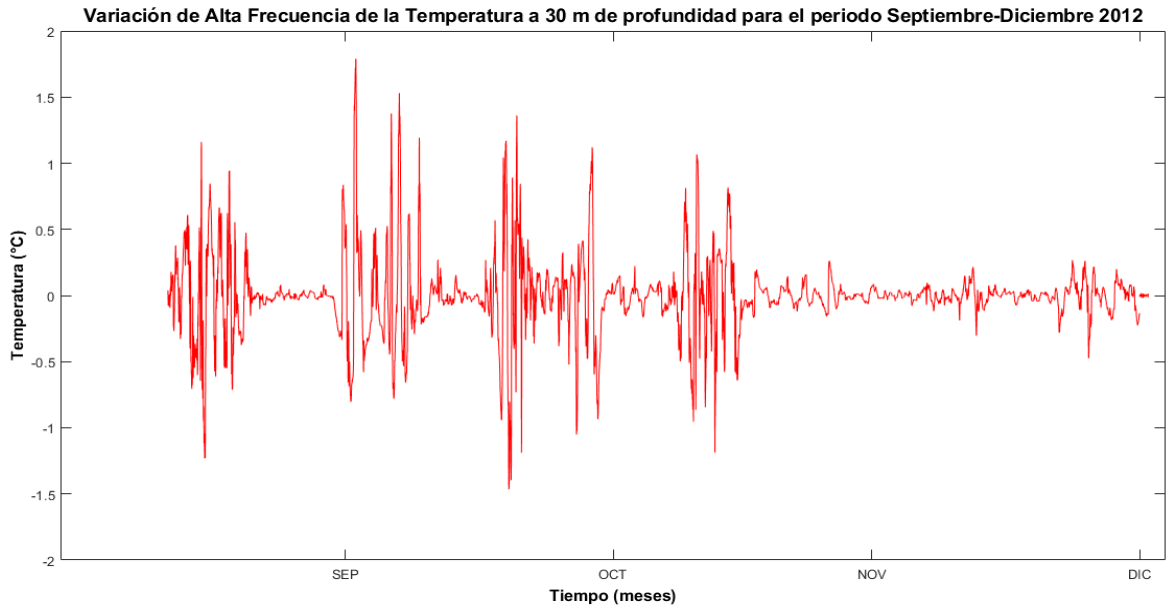


Figura IV-27. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2012. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 1.46°C hasta -1.79°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

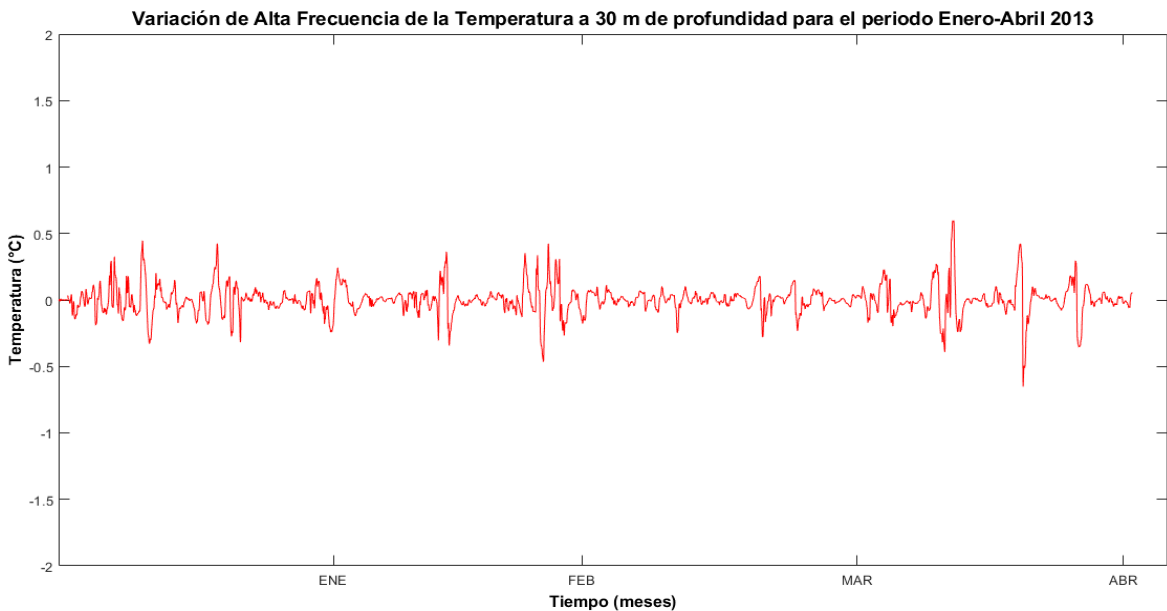


Figura IV-28. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2013. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 0.76°C hasta -0.73°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

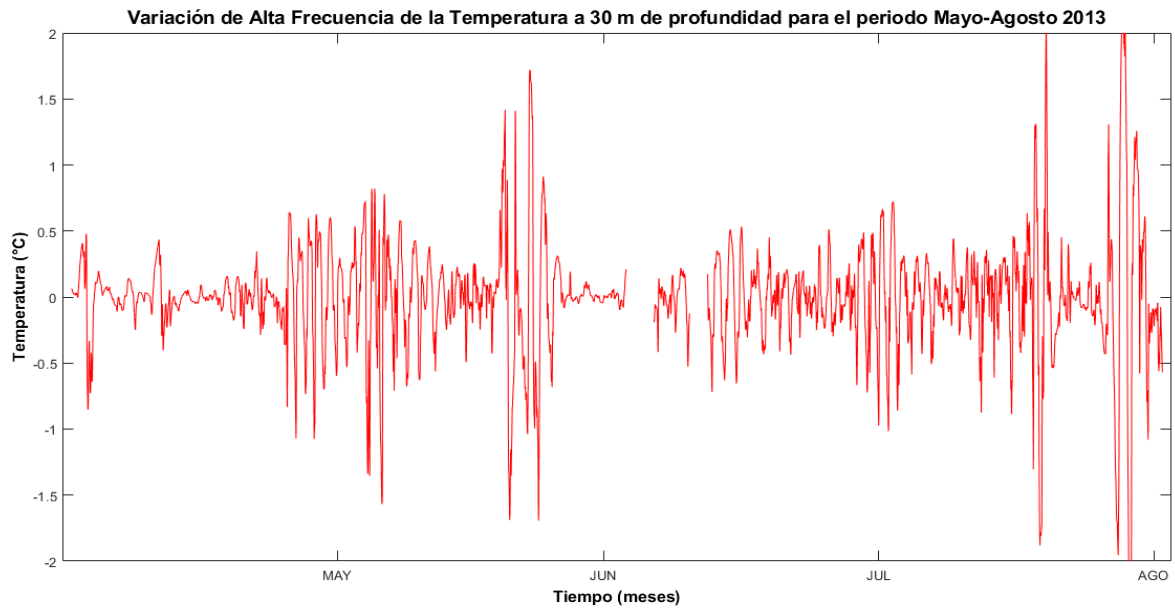


Figura IV-29. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2013. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 3.13°C hasta -2.34°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

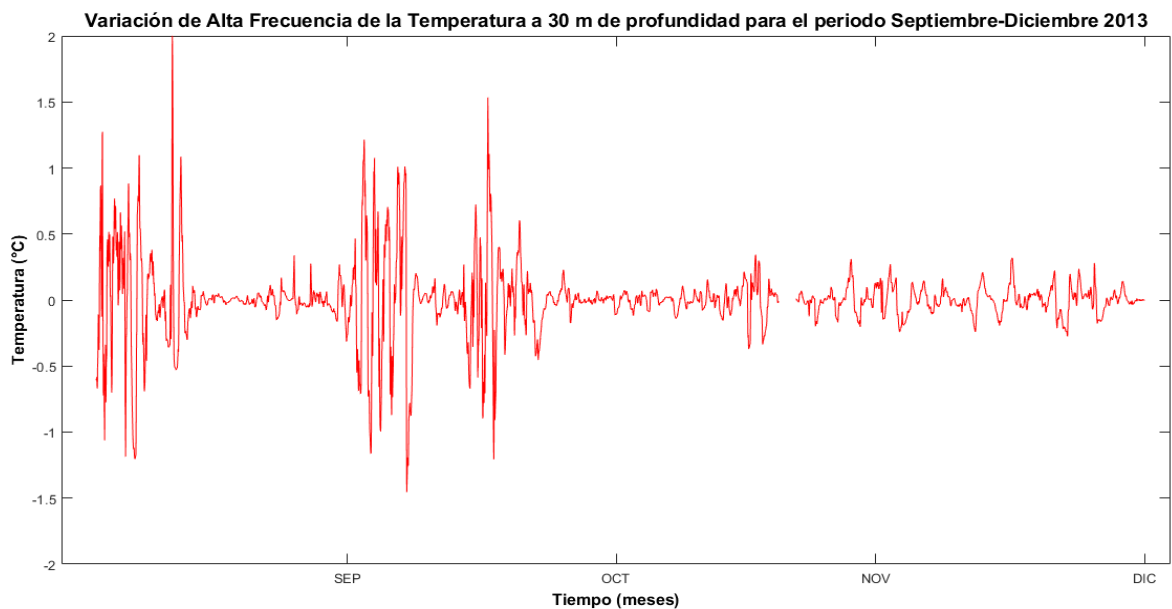


Figura IV-30. Variación de alta frecuencia de la temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2013. El valor máximo de la variación de alta frecuencia de la temperatura va de 2.15°C hasta -1.67°C, aunque no siempre ocurren secuencialmente o en la misma oscilación.

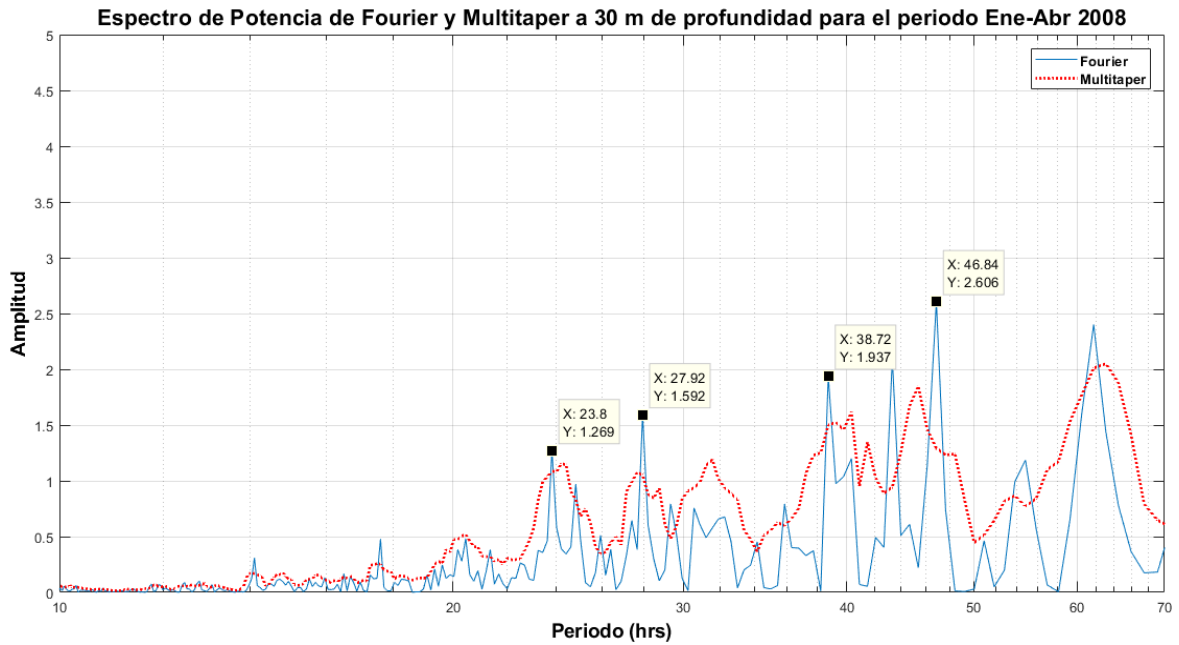


Figura IV-31. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2008.

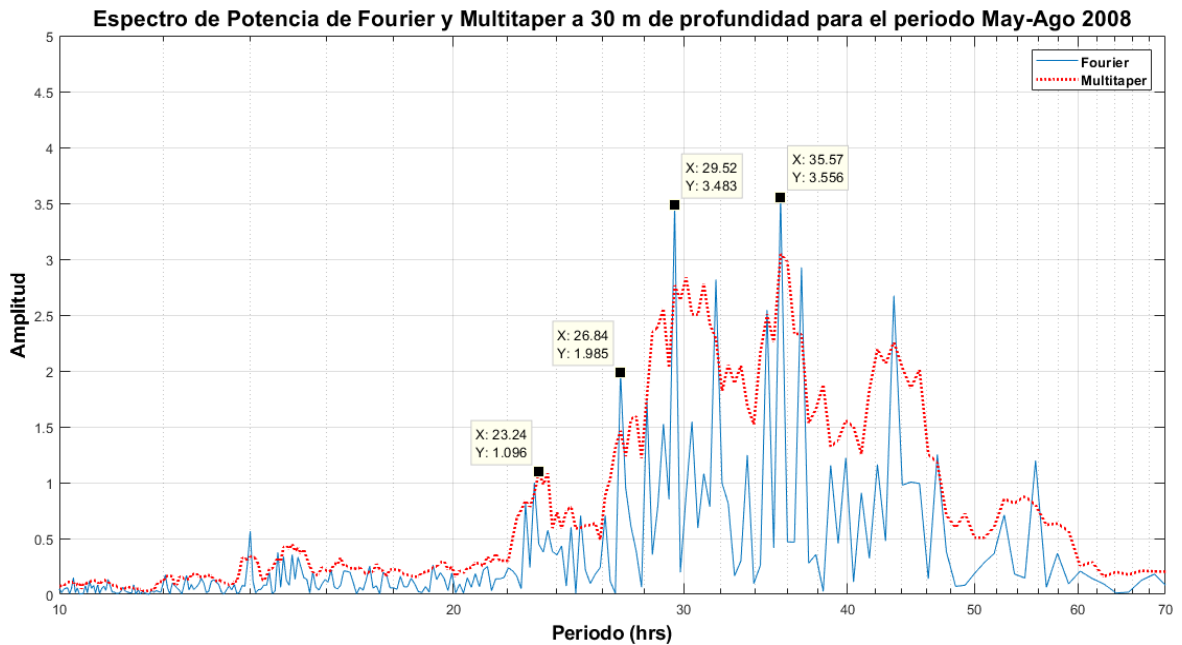


Figura IV-32. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2008.

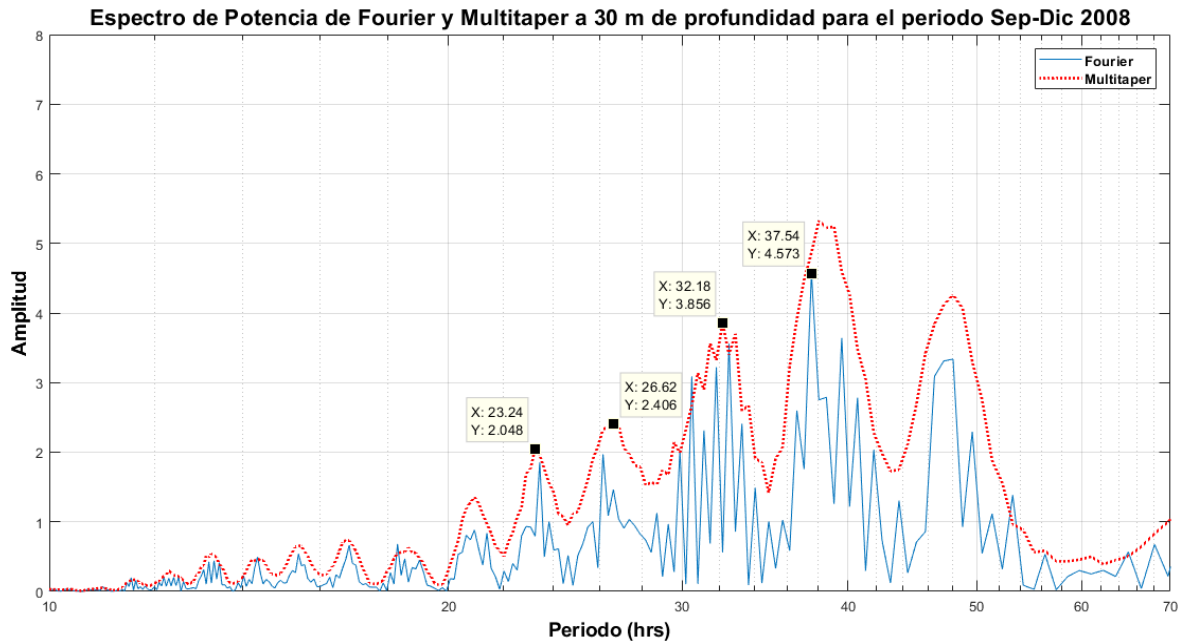


Figura IV-33. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2008.

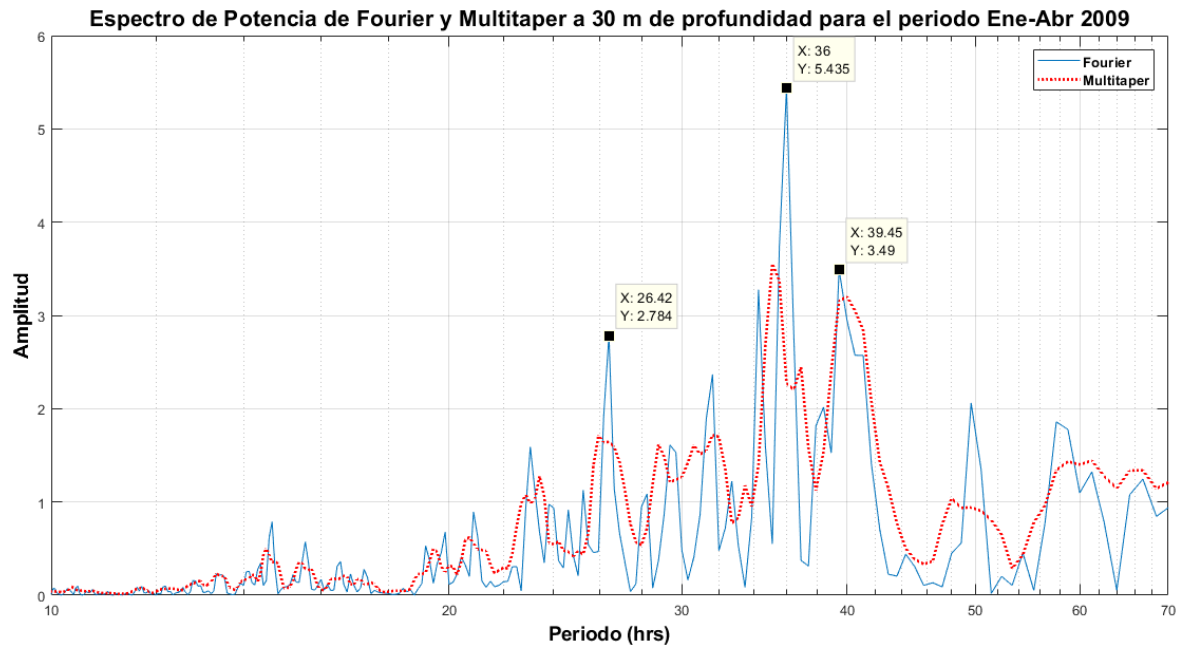


Figura IV-34. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2009.

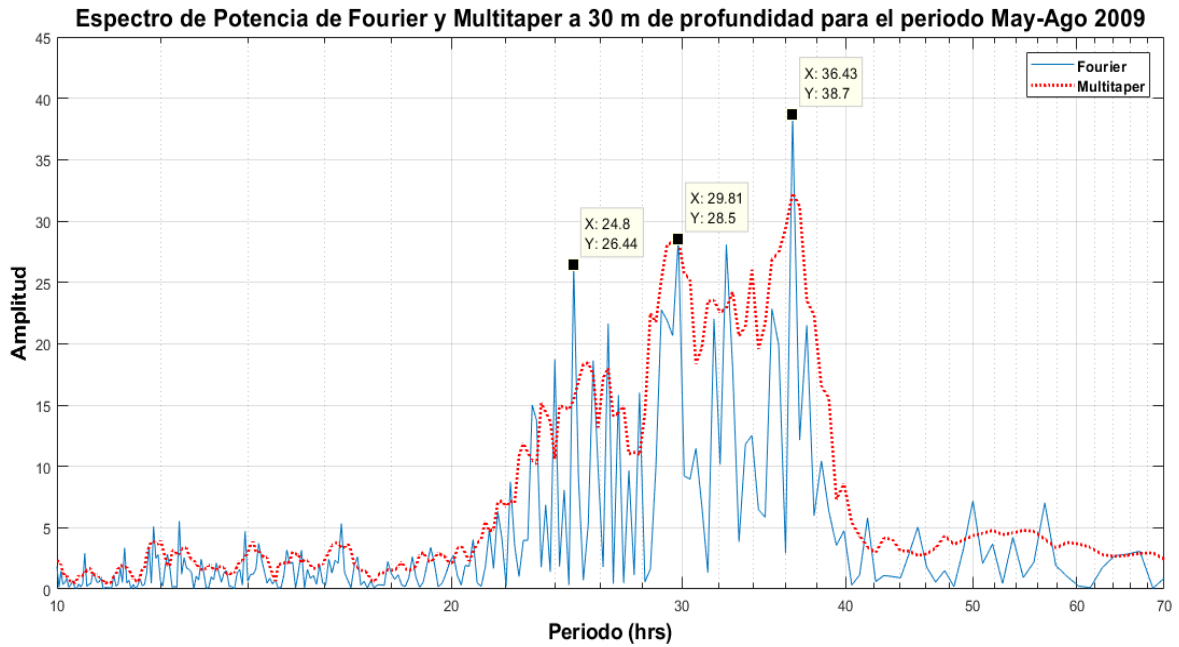


Figura IV-35. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2009.

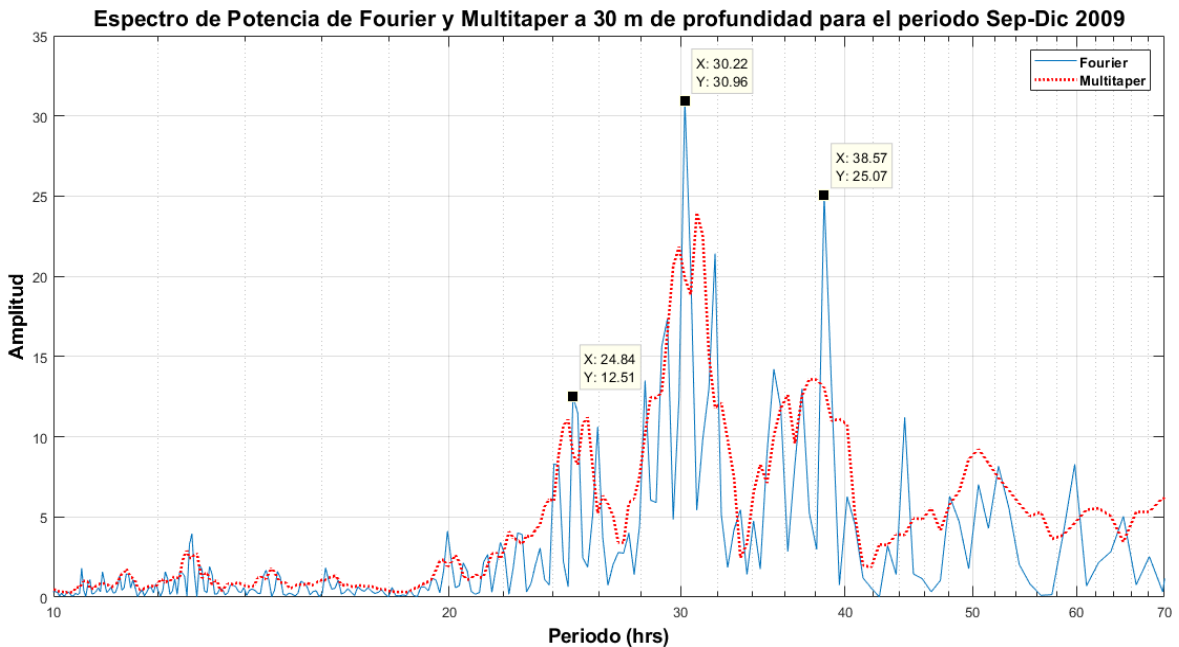


Figura IV-36. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2009.

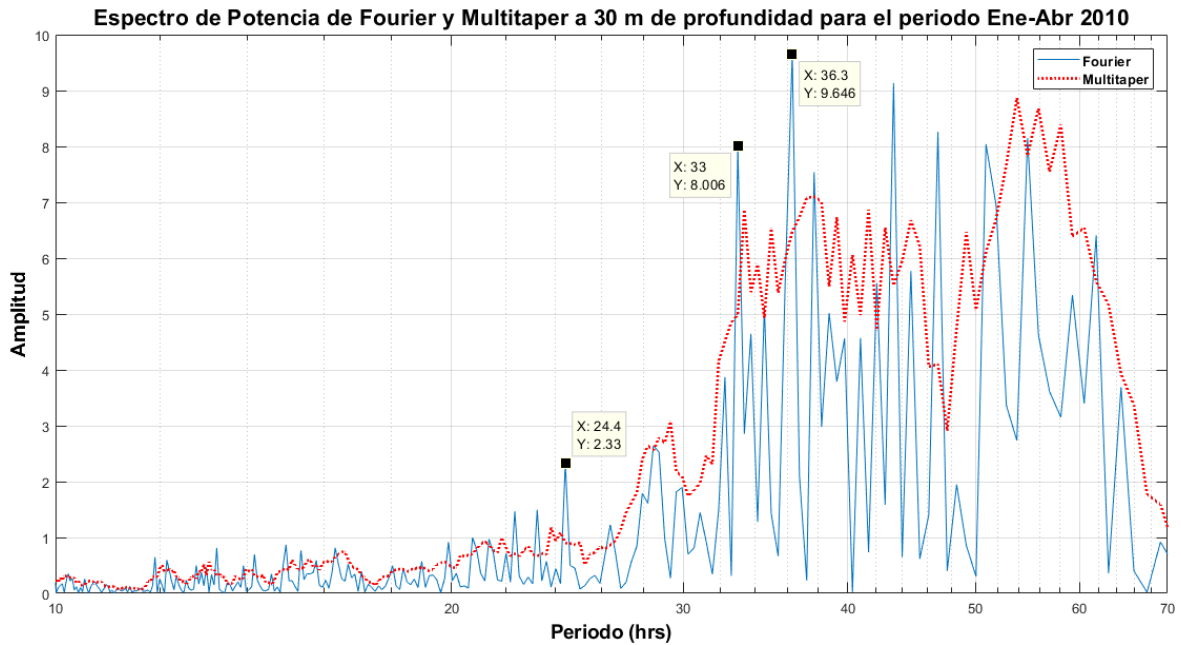


Figura IV-37. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2010.

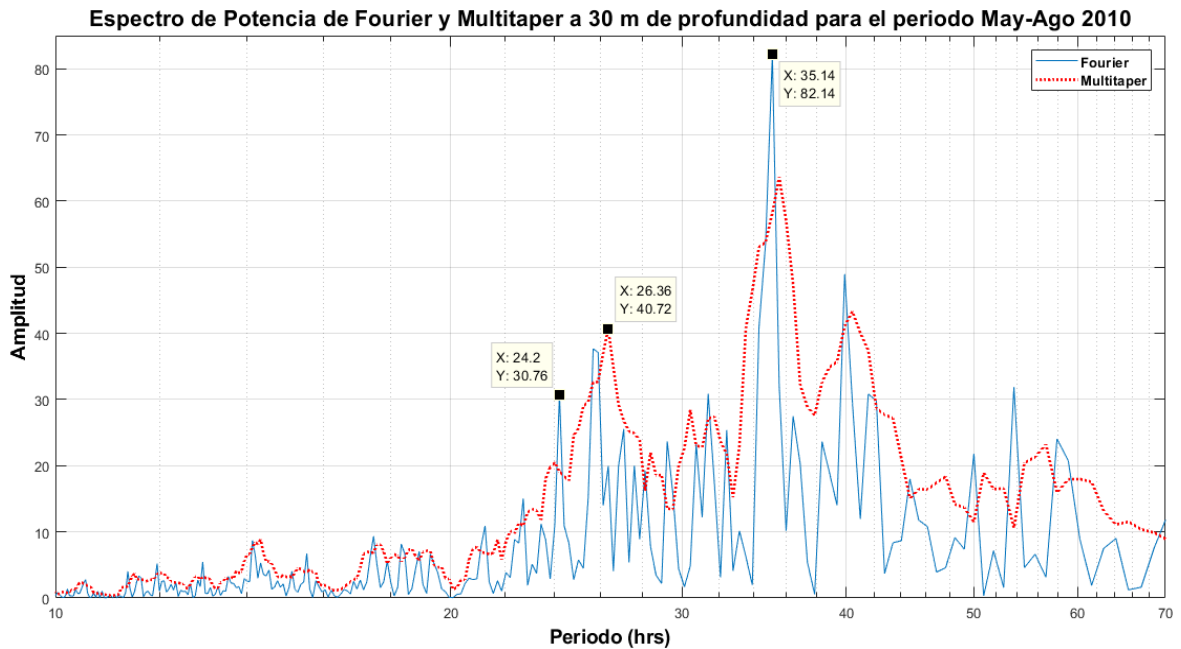


Figura IV-38. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2010.

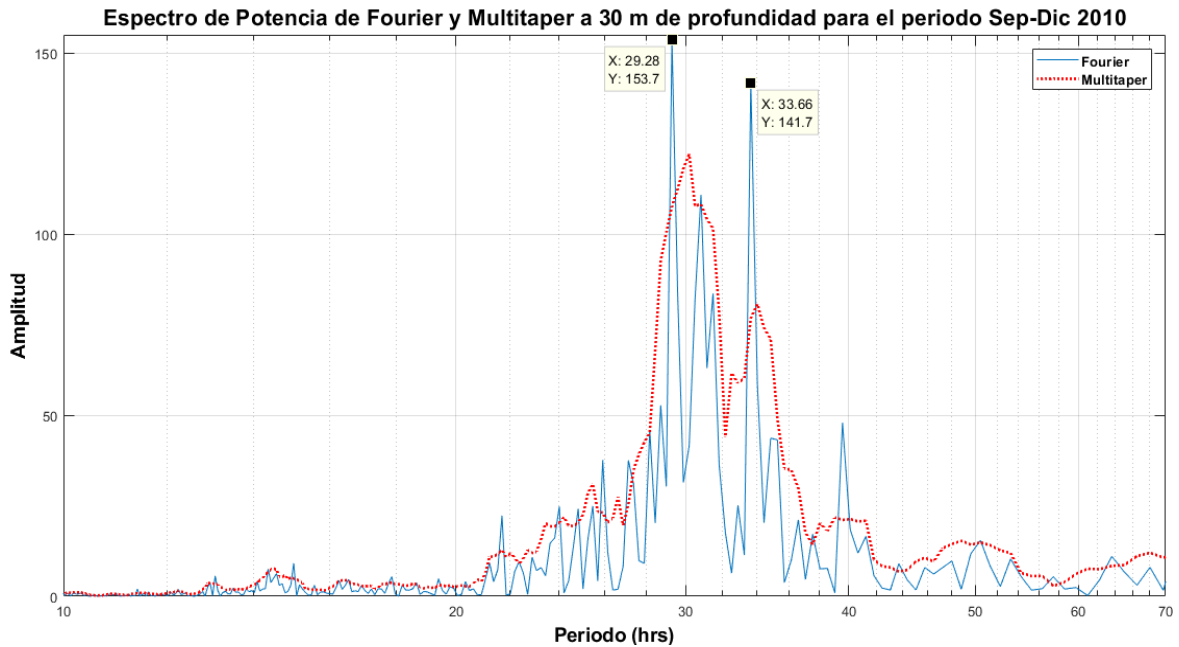


Figura IV-39. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2010.

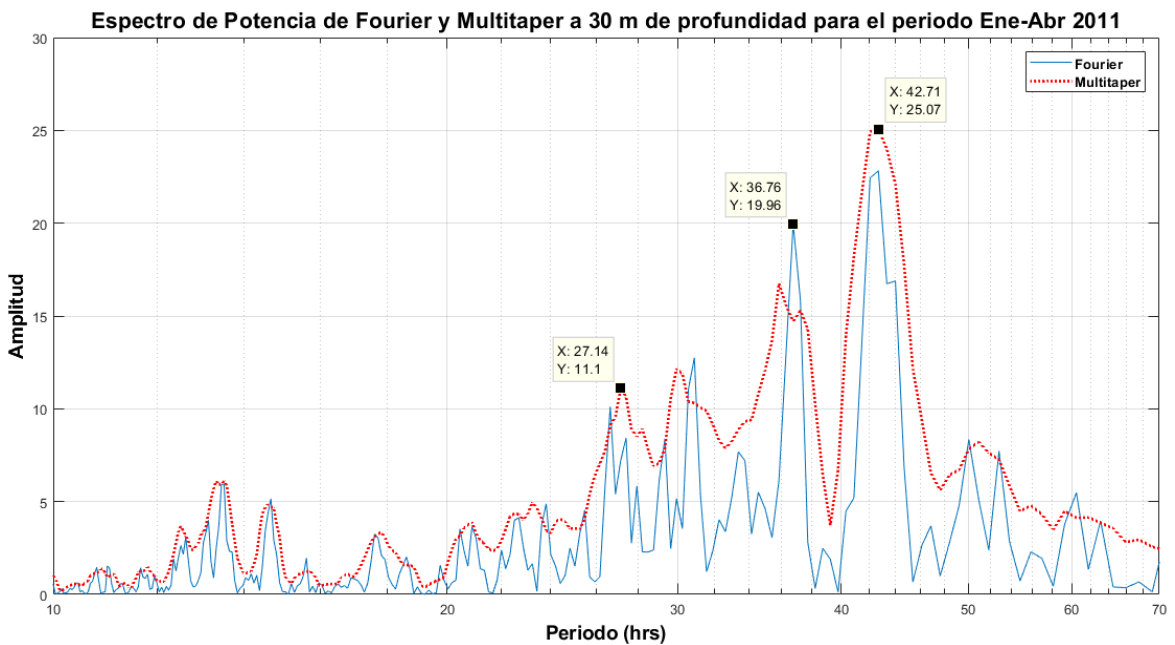


Figura IV-40. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2011.

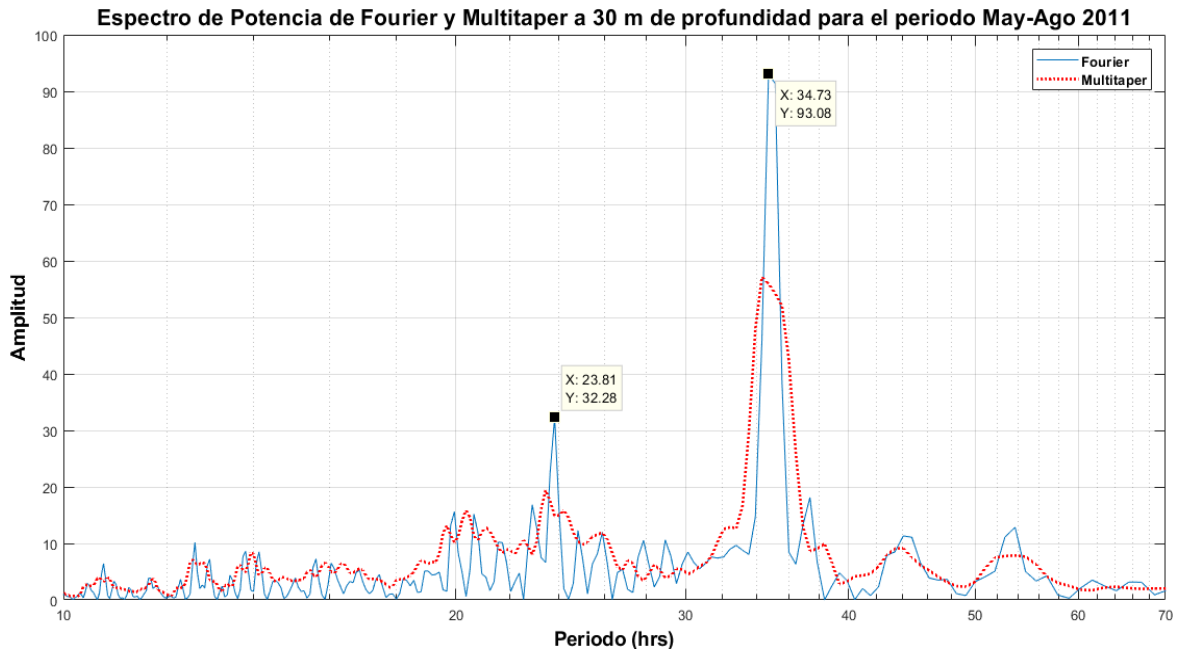


Figura IV-41. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2011.

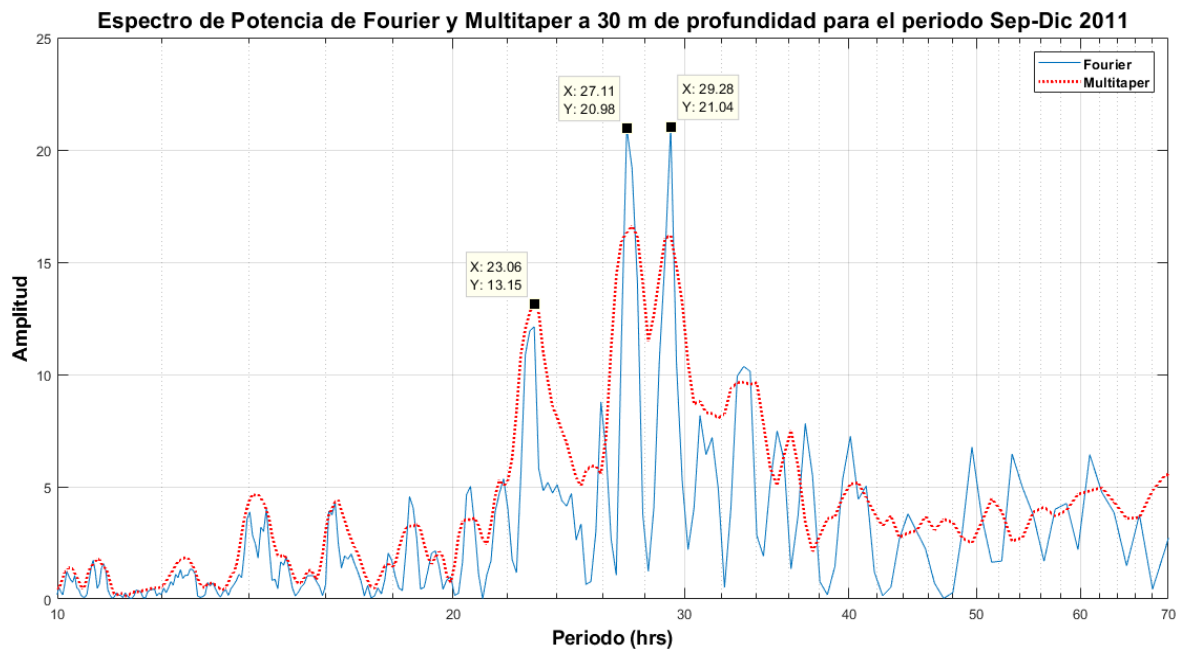


Figura IV-42. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2011.

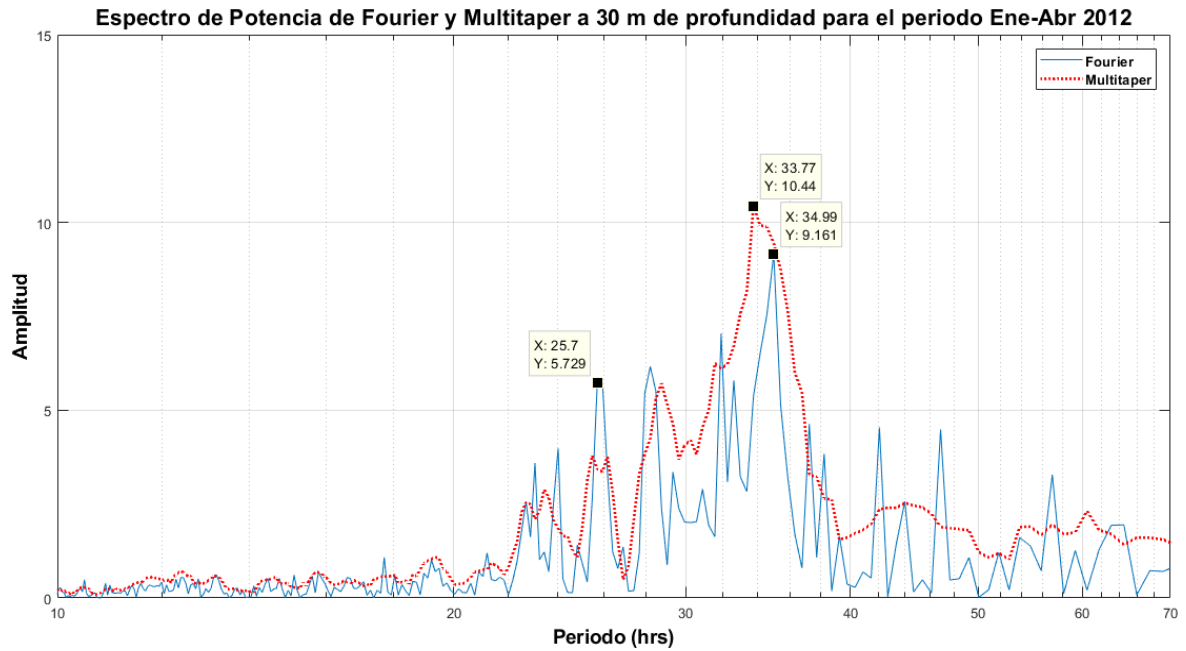


Figura IV-43. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2012.

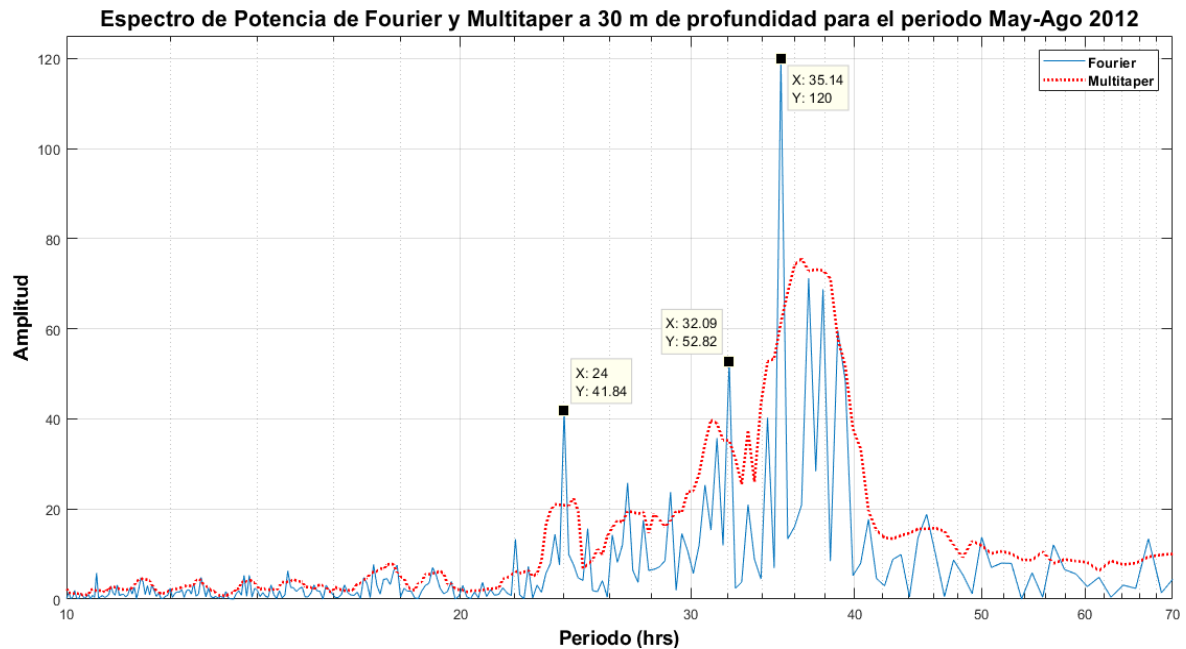


Figura IV-44. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012.

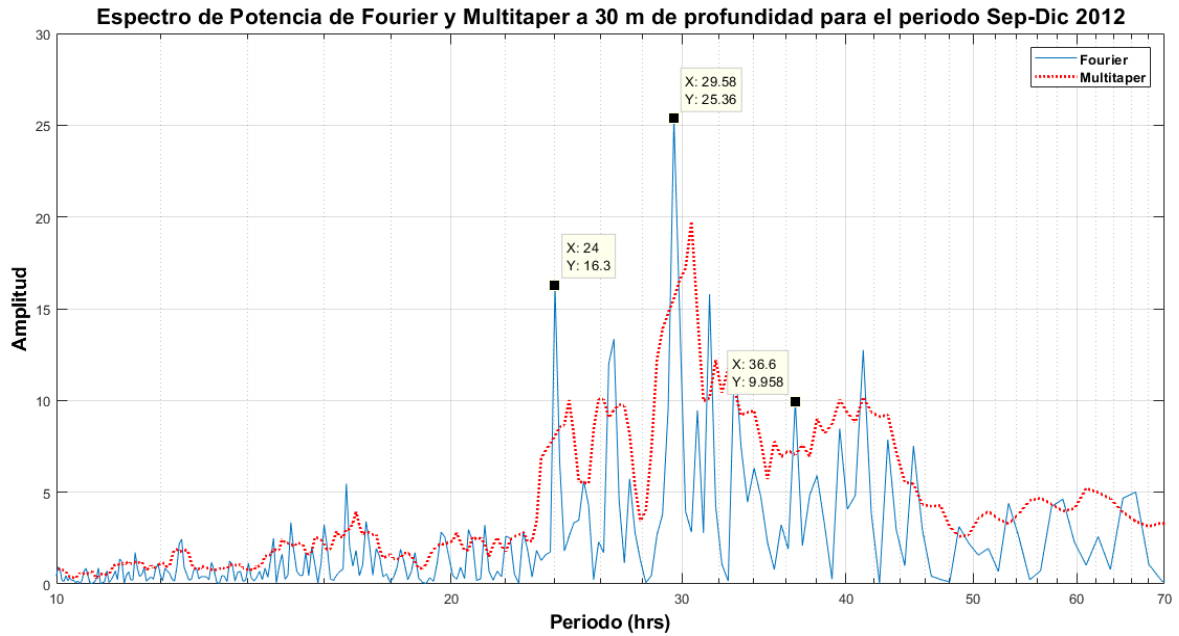


Figura IV-45. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2012.

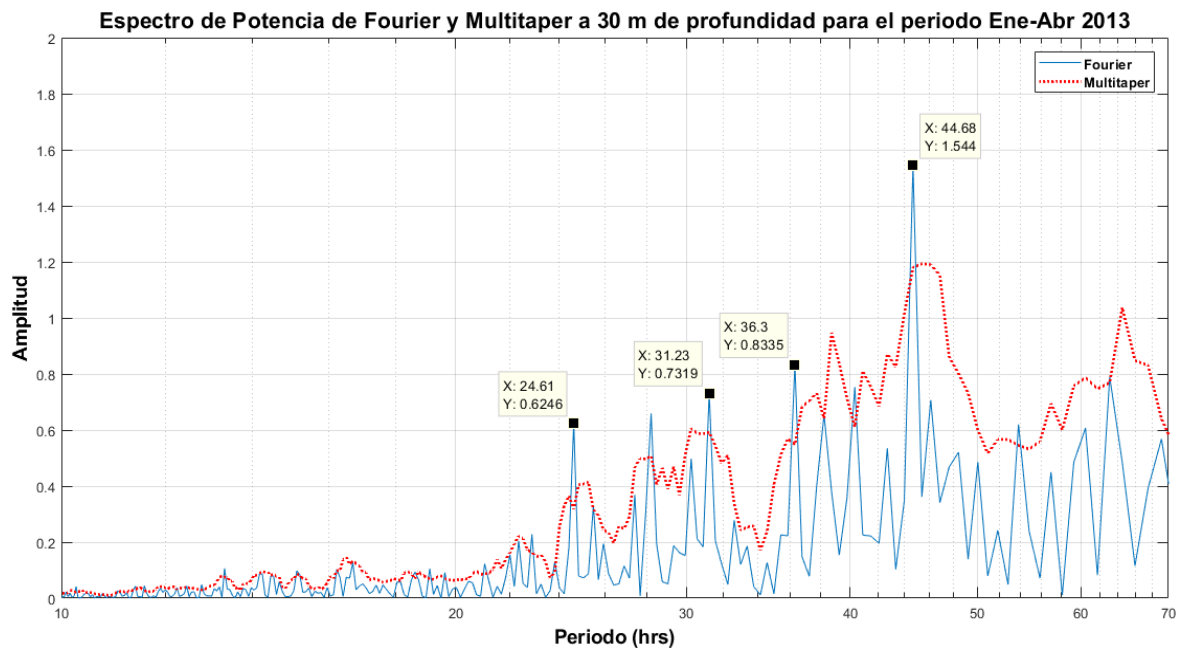


Figura IV-46. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2013.

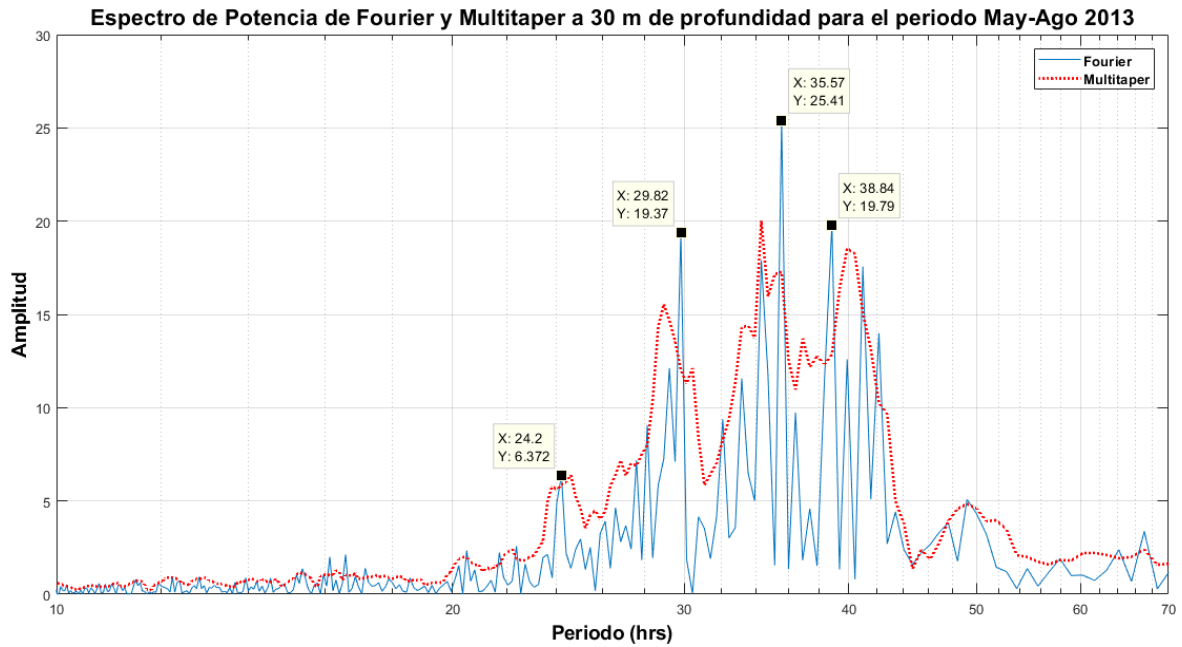


Figura IV-47. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2013.

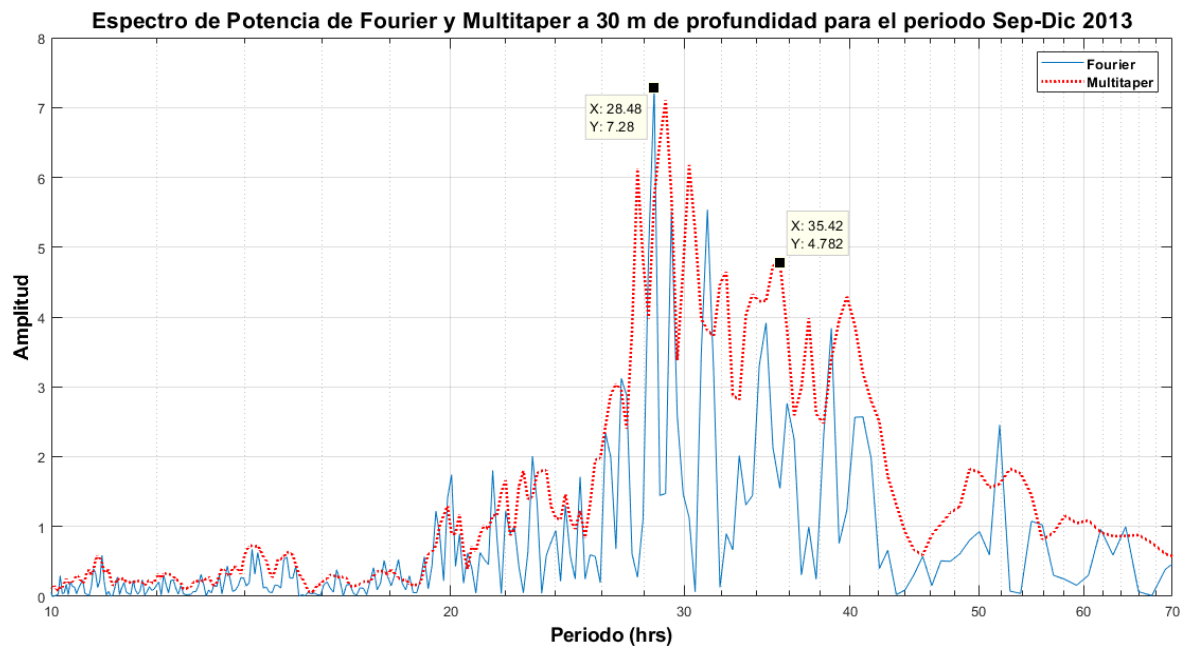


Figura IV-48. Espectro de potencia (Periodograma) de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, línea sólida color azul) y el Análisis Multitaper (PMTM, línea discontinua color rojo) de la serie filtrada paso alto de temperatura en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2013.

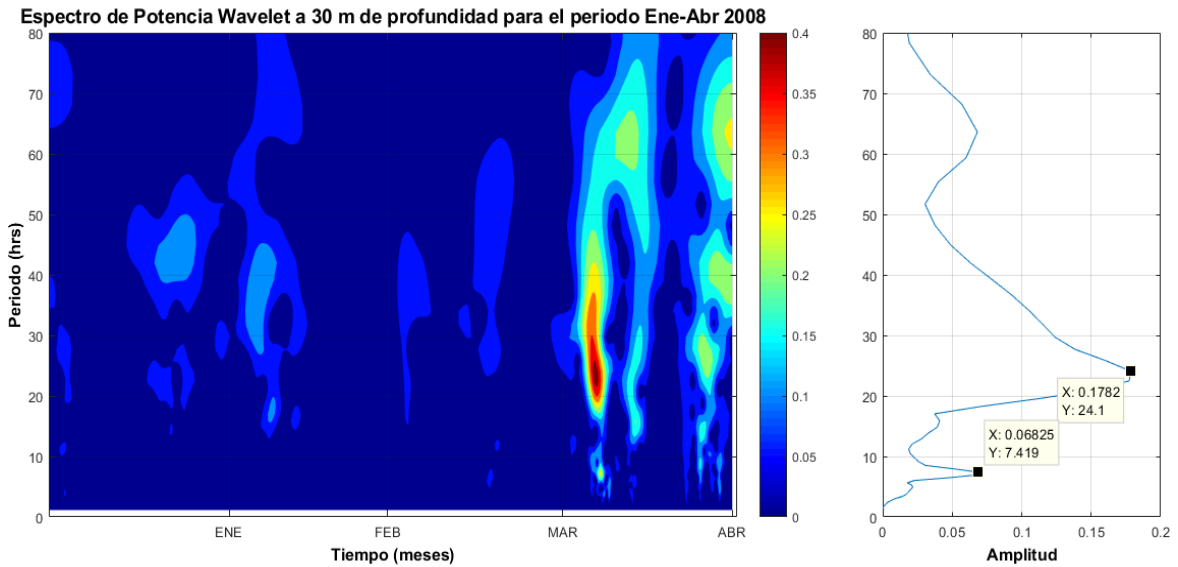


Figura IV-49. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2008. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

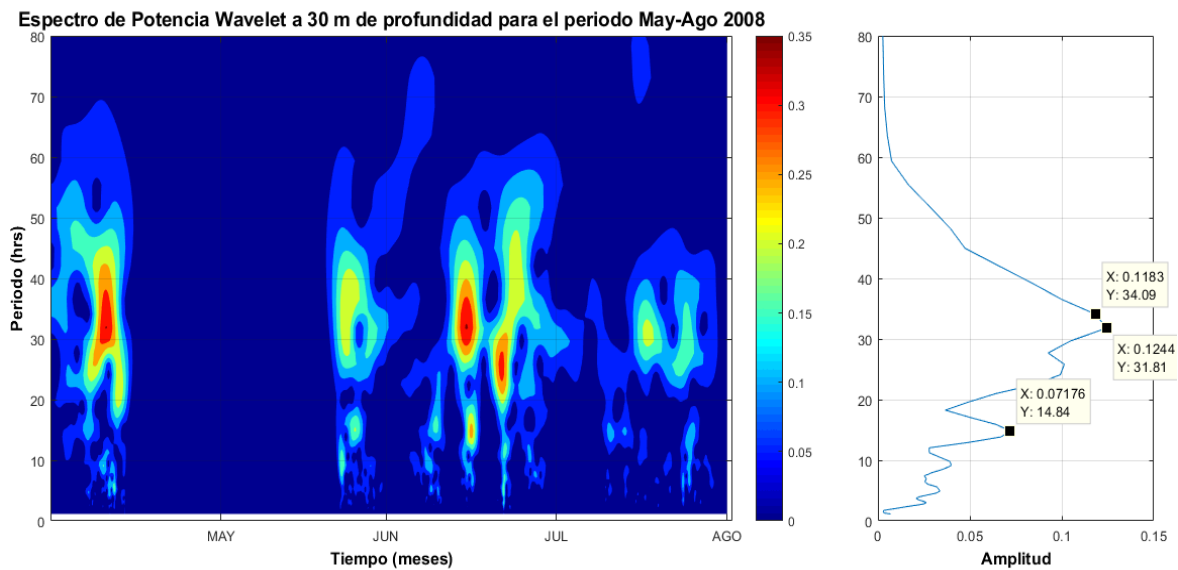


Figura IV-50. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2008. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

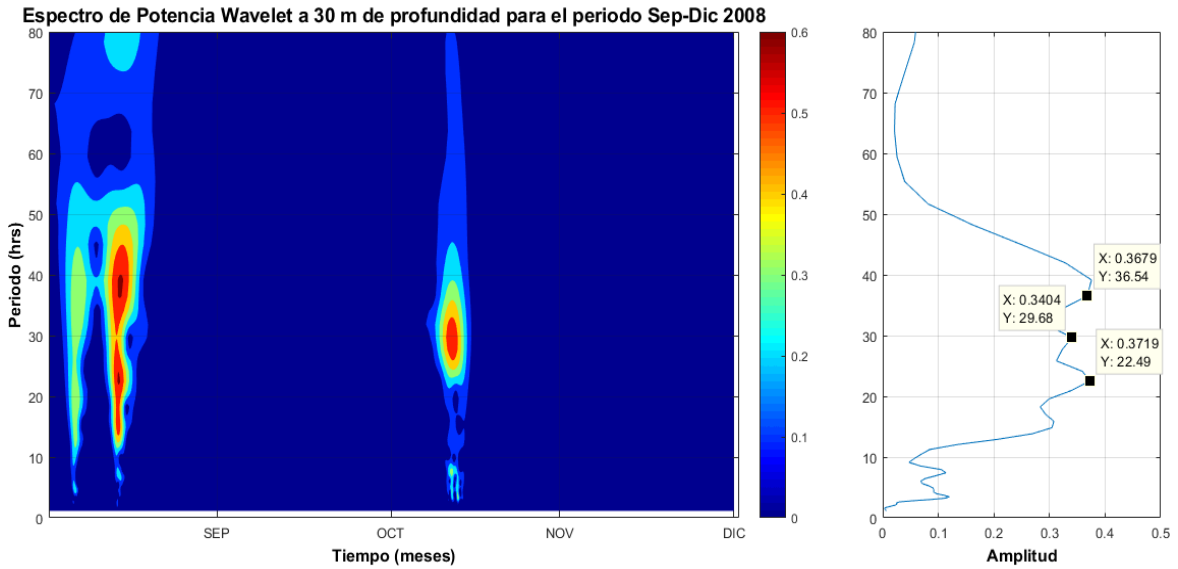


Figura IV-51. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2008. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

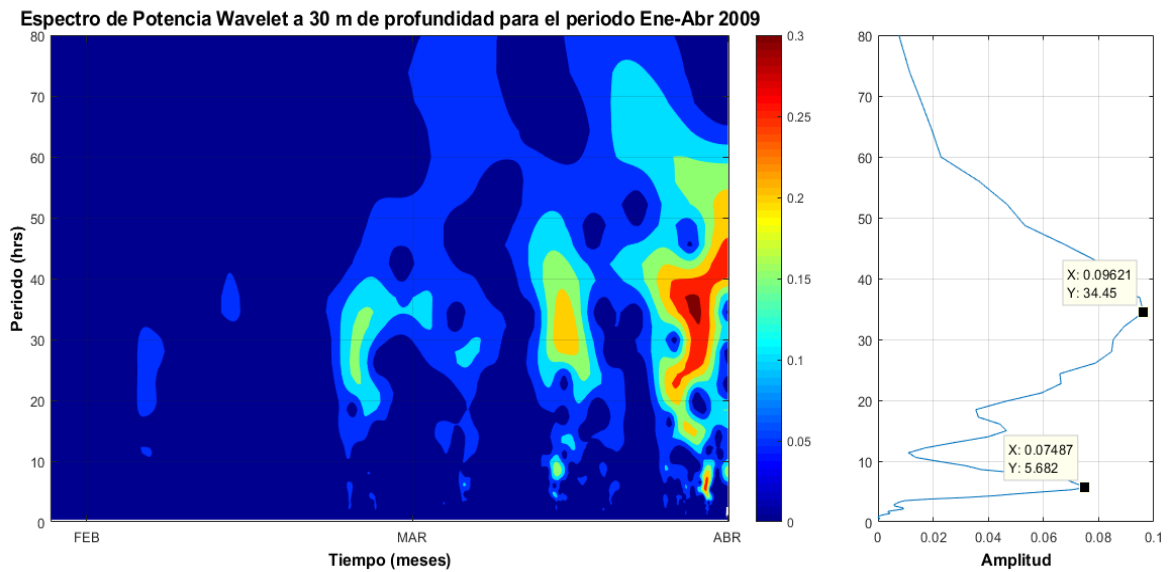


Figura IV-52. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2009. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2009

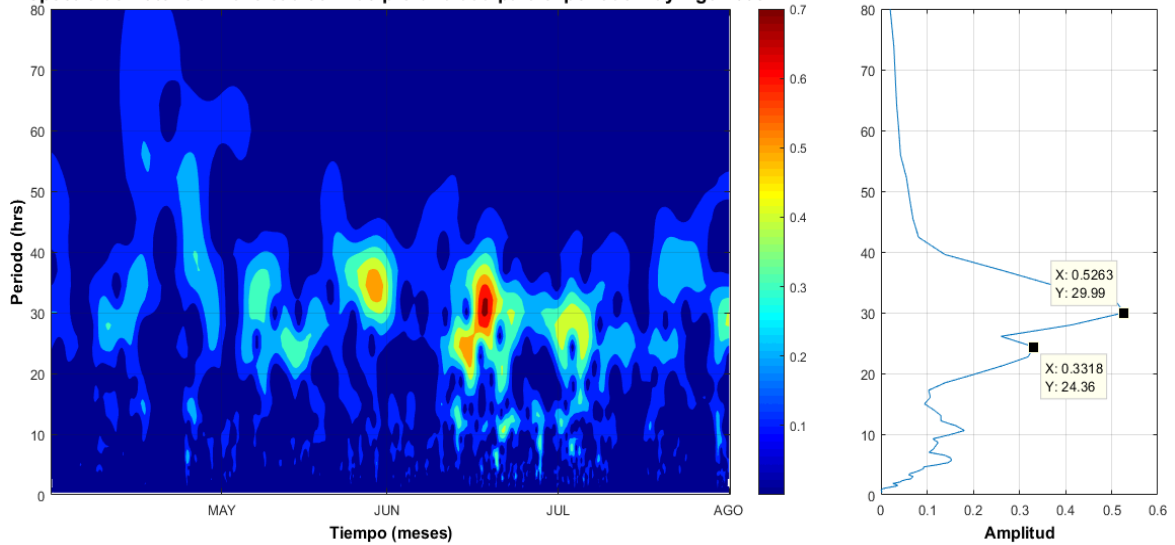


Figura IV-53. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2009. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2009

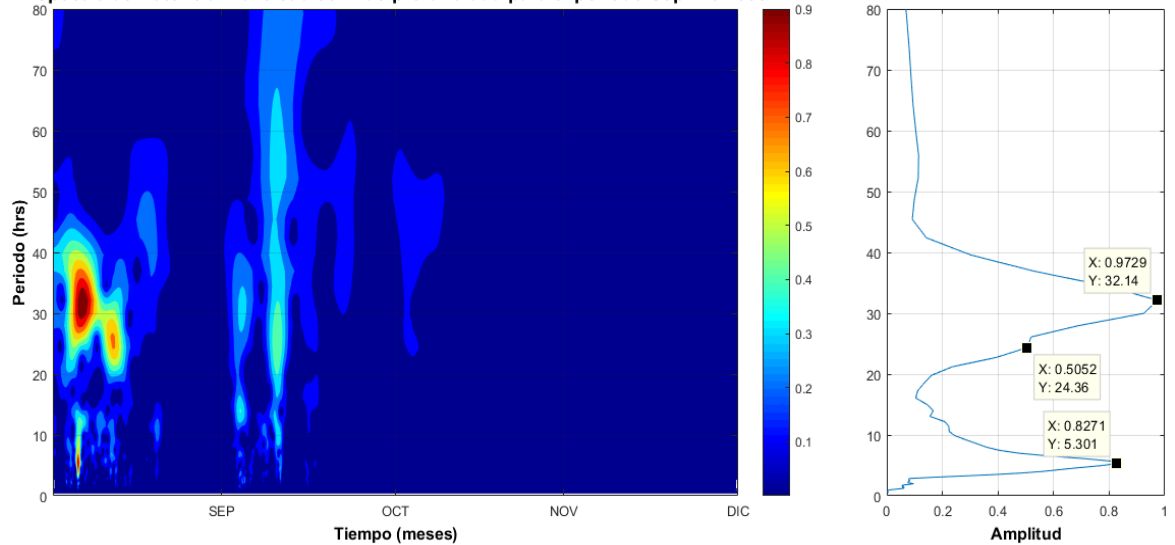


Figura IV-54. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2009. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Ene-Abr 2010

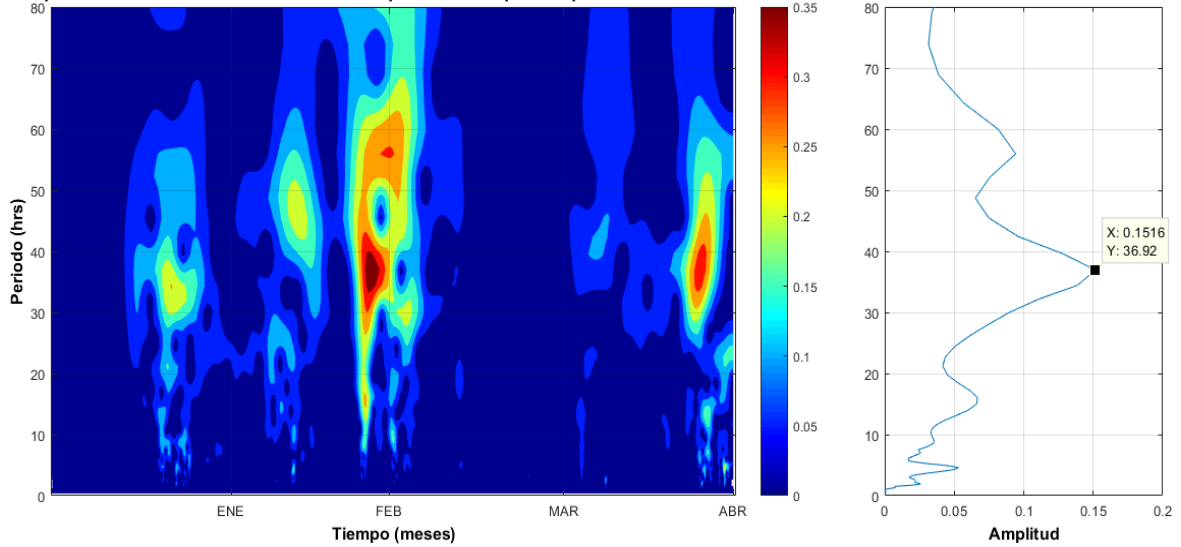


Figura IV-55. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2010. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2010

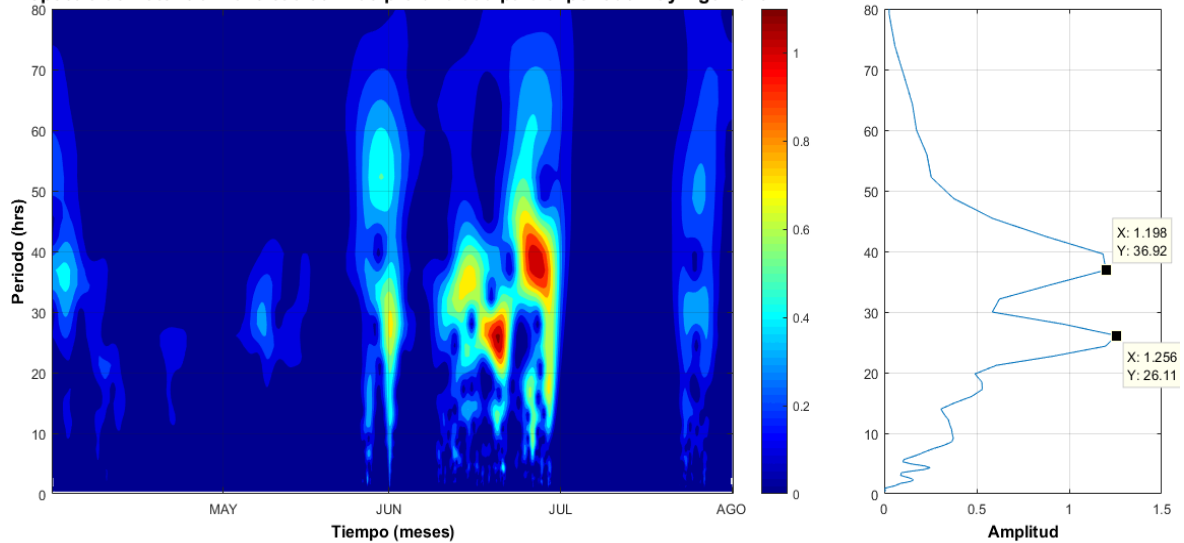


Figura IV-56. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2010. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

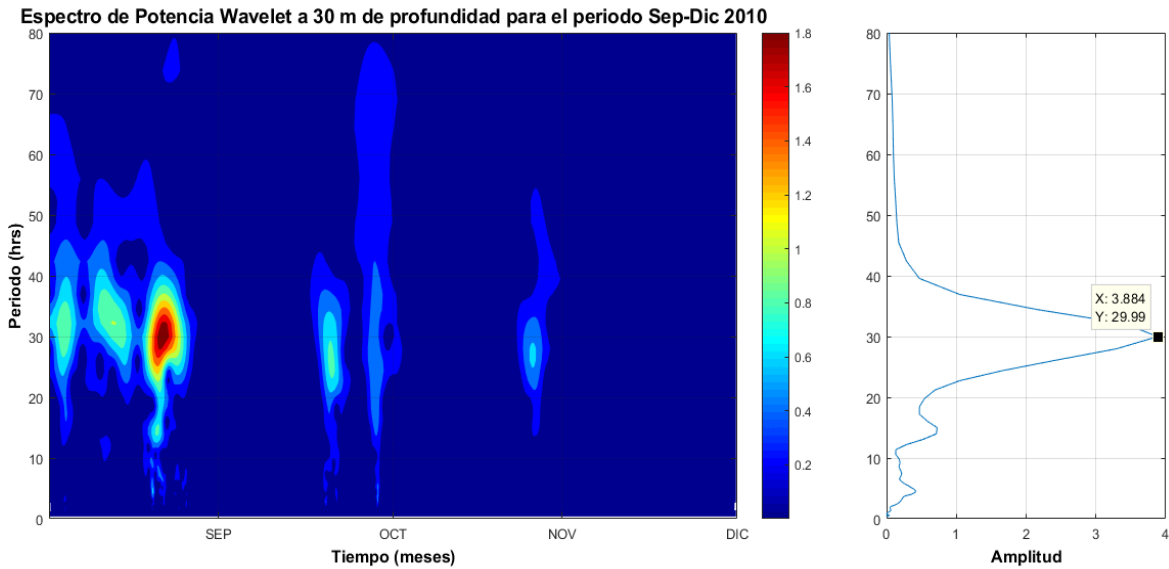


Figura IV-57. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2010. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

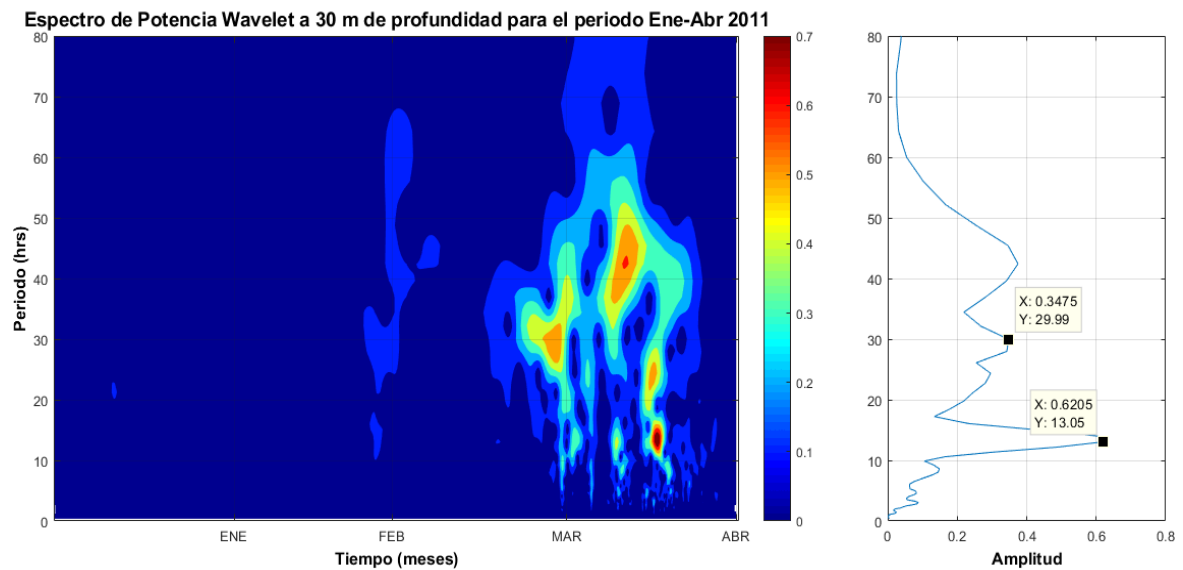


Figura IV-58. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2011. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2011

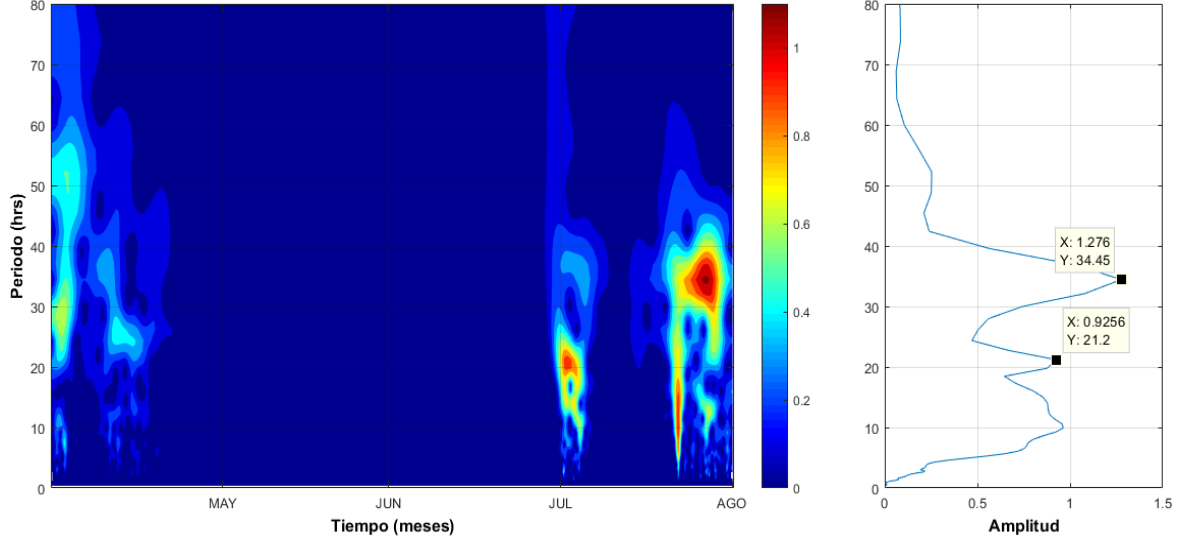


Figura IV-59. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2011. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2011

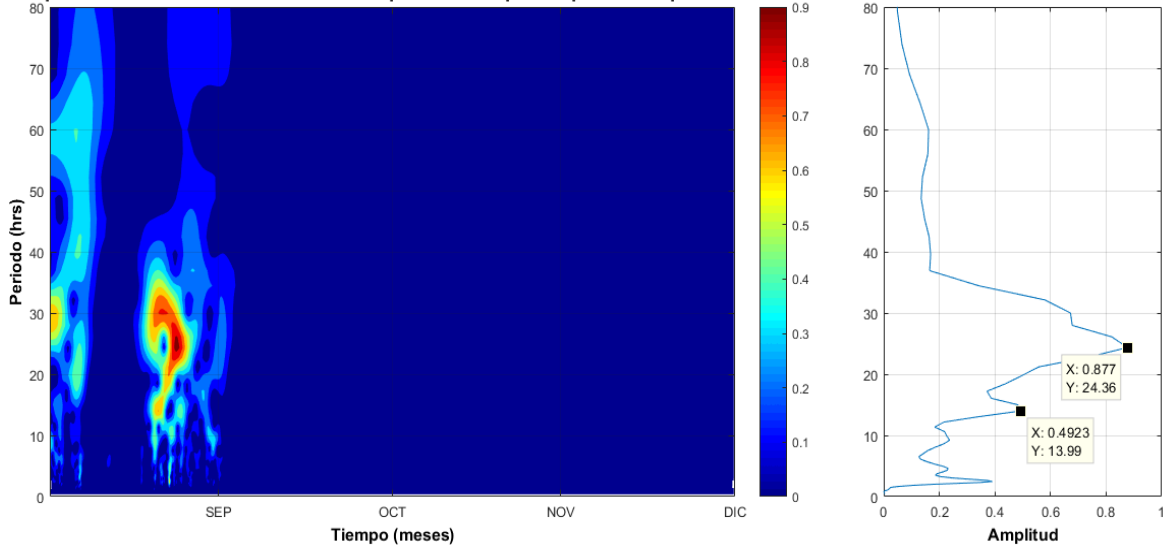


Figura IV-60. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2011. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

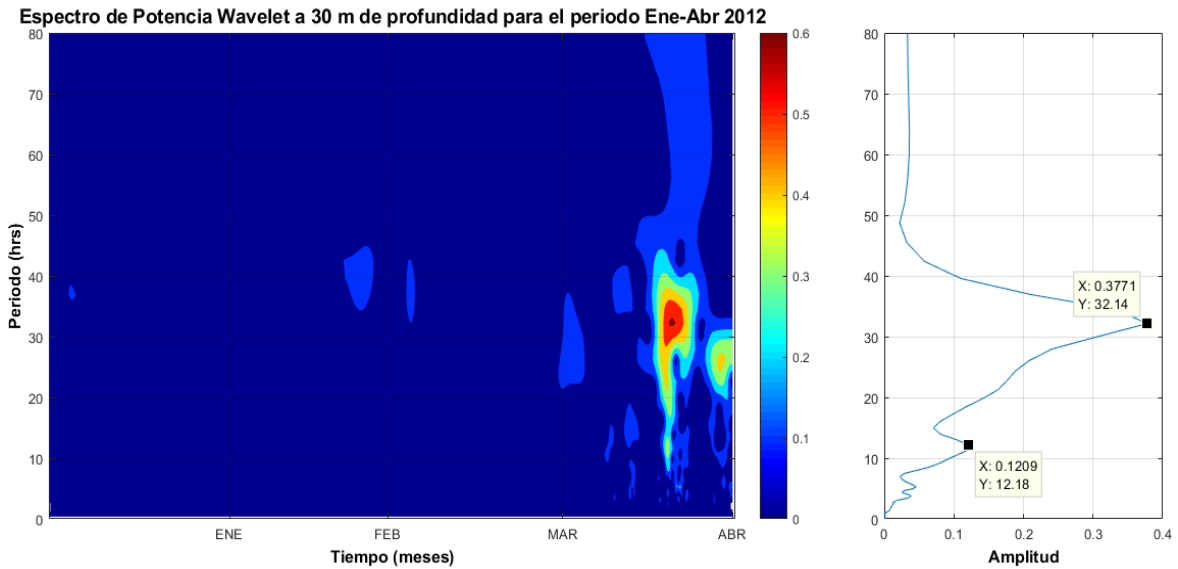


Figura IV-61. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2012. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

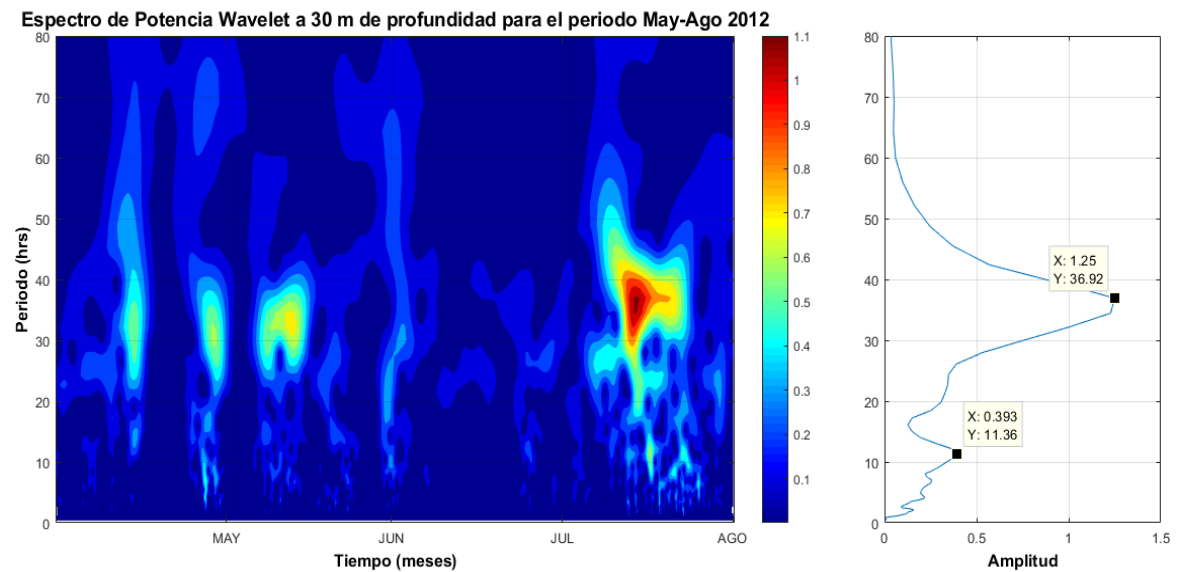


Figura IV-62. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2012. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2012

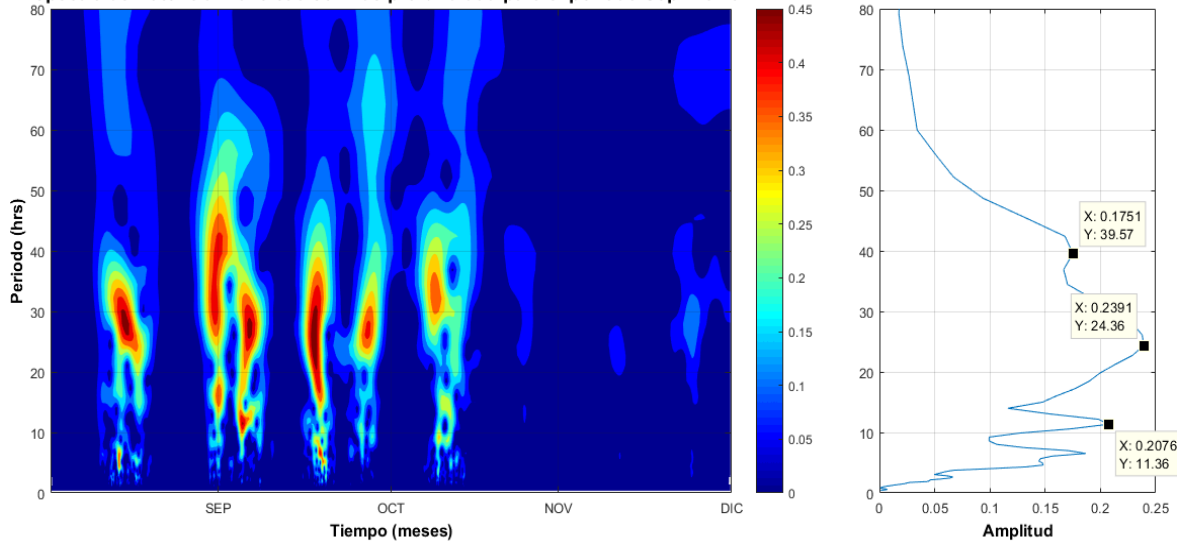


Figura IV-63. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2012. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Ene-Abr 2013

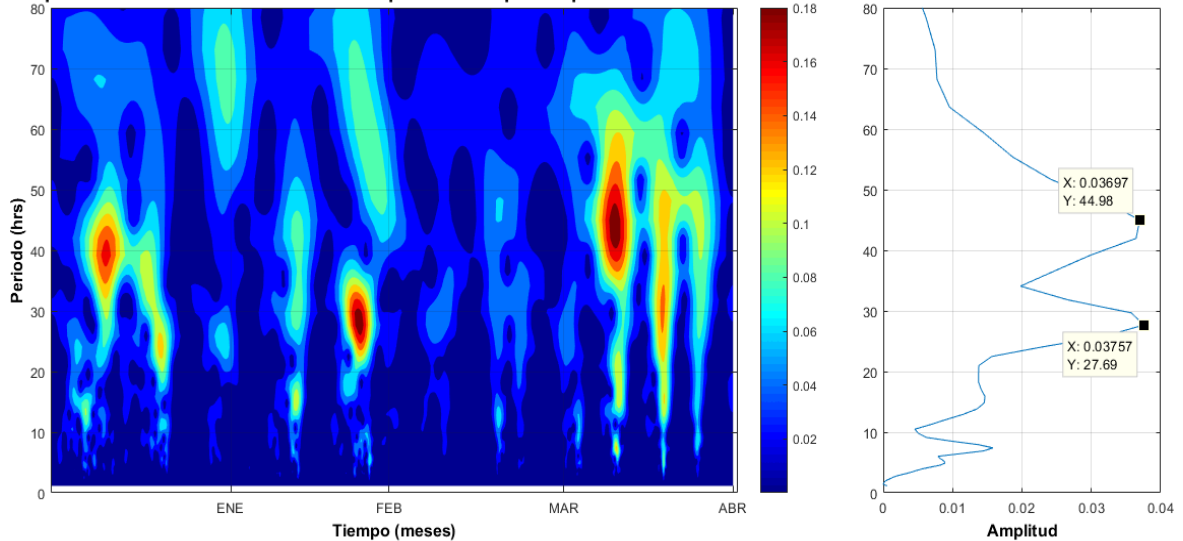


Figura IV-64. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Enero – Abril del año 2013. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo May-Ago 2013

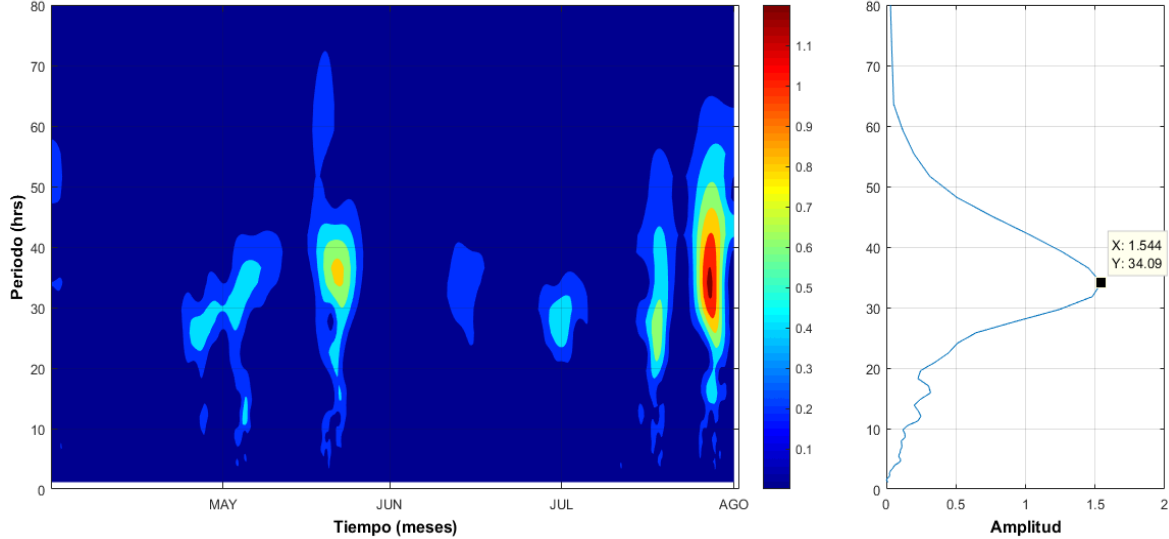


Figura IV-65. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Mayo – Agosto del año 2013. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.

Espectro de Potencia Wavelet a 30 m de profundidad para el periodo Sep-Dic 2013

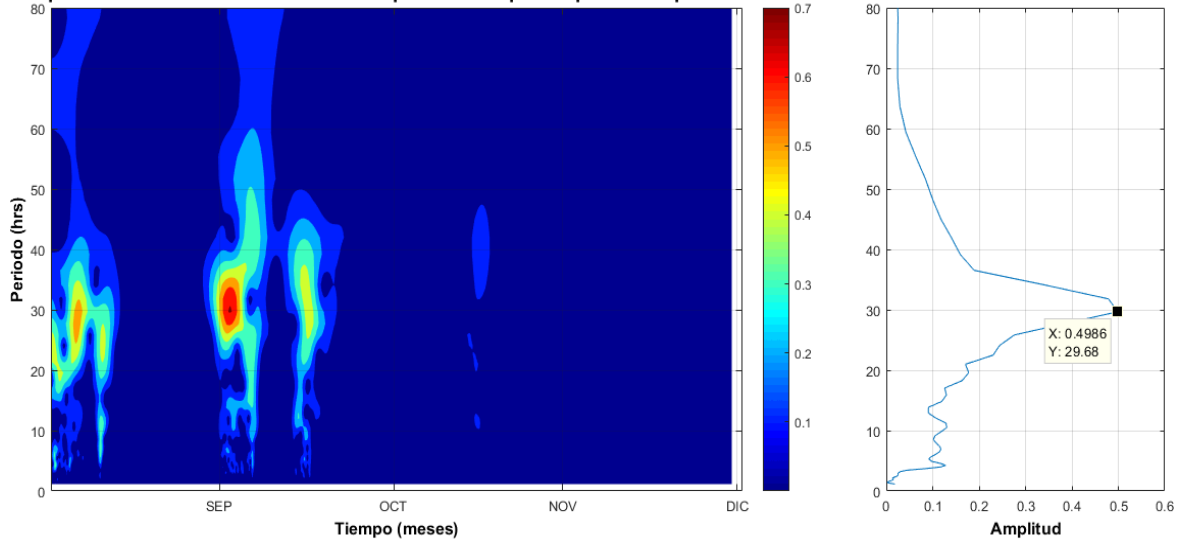


Figura IV-66. Espectro de potencia Wavelet de la serie de tiempo de la temperatura filtrada con filtro paso alto en la capa profunda del mar (30 metros de profundidad) del sitio Isla Verde – Anegada de Adentro para el periodo Septiembre – Diciembre del año 2013. A la izquierda se observa el espectro de potencia Wavelet donde la barra de colores simboliza la energía del espectro. A la derecha el espectro de potencia global que muestra la amplitud de la señal por periodo dentro del espectro.