



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA

MODOS DE OSCILACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:
LEÓN MARTÍNEZ DEL RÍO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN
(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología , UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ
(Instituto de Geografía, UNAM)
DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA CASTRO
(Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)
DR. IOURI SKIBA
(Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)
DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ
(Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología , UNAM)

MÉXICO, D. F. JULIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Breve descripción del Golfo de México | 2 |
| 1.2. Descripción por modos | 4 |
| 1.3. Características de los modos buscados | 5 |
| 1.4. Los datos | 6 |
| 2. Metodología de la descomposición en modos normales de oscilación | 7 |
| 2.1. Selección de modos | 7 |
| 2.2. El residuo | 10 |
| 2.3. Implementación numérica para el análisis de las oscilaciones de amplitud en el tiempo | 13 |
| 3. Resultados | 16 |
| 3.1. Componentes modales estáticos | 16 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Bandas de periodos | 23 |
| 3.2.1. Componentes horizontales de la Velocidad | 24 |
| Banda de período de 330-460 días | 24 |
| Banda de período de 225-330 días | 26 |
| Banda de período de 150-225 días | 28 |
| Banda de período de 110-150 días | 29 |
| Banda de período de 85-110 días | 31 |
| Banda de período de 40-85 días | 32 |
| Banda de período de 2-40 días | 34 |
| 3.2.2. Componente vertical de la Velocidad | 36 |
| 3.2.3. Componentes de la Temperatura | 38 |
| 3.2.4. Componentes de la Salinidad | 40 |
| | |
| 4. Discusiones y Conclusiones | 44 |
| | |
| A. Resultados en la componente este-oeste | I |
| A.1. Banda temporal de 330-460 días | II |
| A.2. Banda temporal de 225-330 días | IV |
| A.3. Banda temporal de 150-225 días | VI |
| A.4. Banda temporal de 110-150 días | VIII |

| | |
|---|-------------|
| A.5. Banda temporal de 85-110 días | X |
| A.6. Banda temporal de 40-85 días | XII |
| A.7. Banda temporal de 2-40 días | XIV |
| B. Resultados en la componente norte-sur | XVI |
| B.1. Banda temporal de 330-460 días | XVII |
| B.2. Banda temporal de 225-330 días | XIX |
| B.3. Banda temporal de 150-225 días | XXI |
| B.4. Banda temporal de 110-150 días | XXIII |
| B.5. Banda temporal de 85-110 días | XXV |
| B.6. Banda temporal de 40-85 días | XXVII |
| B.7. Banda temporal de 2-40 días | XXIX |
| C. Resultados en la componente vertical | XXXI |
| C.1. Banda temporal de 330-460 días | XXXII |
| C.2. Banda temporal de 225-330 días | XXXIV |
| C.3. Banda temporal de 150-225 días | XXXVI |
| C.4. Banda temporal de 110-150 días | XXXVIII |
| C.5. Banda temporal de 85-110 días | XL |
| C.6. Banda temporal de 40-85 días | XLII |

| | |
|---|-------------|
| C.7. Banda temporal de 2-40 días | XLIV |
| D. Resultados en la componente de la temperatura | XLVI |
| D.1. Banda temporal de 330-460 días | XLVII |
| D.2. Banda temporal de 225-330 días | XLIX |
| D.3. Banda temporal de 150-225 días | LI |
| D.4. Banda temporal de 110-150 días | LIII |
| D.5. Banda temporal de 85-110 días | LV |
| D.6. Banda temporal de 40-85 días | LVII |
| D.7. Banda temporal de 2-40 días | LIX |
| E. Resultados en la componente de salinidad | LXI |
| E.1. Banda temporal de 330-460 días | LXII |
| E.2. Banda temporal de 225-330 días | LXIV |
| E.3. Banda temporal de 150-225 días | LXVI |
| E.4. Banda temporal de 110-150 días | LXVIII |
| E.5. Banda temporal de 85-110 días | LXX |
| E.6. Banda temporal de 40-85 días | LXXII |
| E.7. Banda temporal de 2-40 días | LXXIV |

Bibliografía

Capítulo 1

Introducción

La dinámica de los flujos geofísicos se modela haciendo aproximaciones a la ecuaciones de la conservación del momento (ecuaciones de Navier-Stokes), conservación de la masa y conservación de la energía. La razón de las aproximaciones es simplificar las ecuaciones en una zona de estudio para un mejor entendimiento. Para ello, se consideran las escalas típicas de las variables determinando cuales son los términos que principalmente contribuyen; y de ahí, reducir los términos de las ecuaciones. Por lo anterior se necesitan saber a priori las escalas típicas o suponer estas escalas.

En este trabajo se da una descripción de la dinámica del Golfo de México considerando a éste como un solo objeto. Es decir, en vez de realizar un estudio sobre las variaciones espacio-temporales de las variables hidrodinámicas del golfo, se plantea analizar las variables hidrodinámicas en funciones de estado. Con el fin que cada función de estado, o modo, nos brinde información de escalas típicas del golfo como un todo. Las variables que se estudiaron por modos son las componentes de la velocidad u , v y w , la temperatura T y la salinidad S .

1.1. Breve descripción del Golfo de México

El Golfo de México es una cuenca semicerrada con fronteras abiertas por el Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida, donde alrededor del 7% del perímetro del golfo es una frontera abierta. En su topología se tiene una profundidad máxima de 4064 m, en la batimetría reportada por el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Analizando la batimetría del HYCOM, vemos que el 39.97% del golfo tiene una profundidad menor al 10% de la máxima profundidad (Fig.1.1), además solo el 10.8% del área del golfo tiene saltos en la batimetría superiores a los 100 m/km (Fig.1.2).

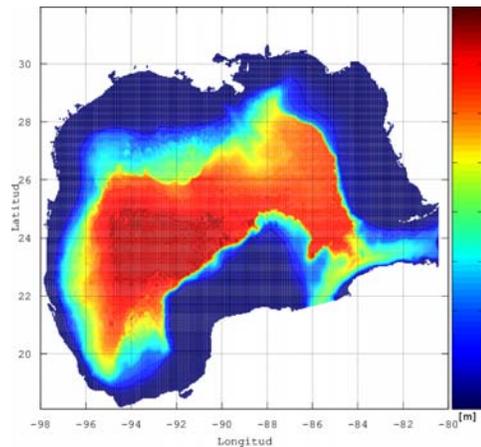


Figura 1.1: Batimetría empleada en el modelo HYCOM para el Golfo de México.

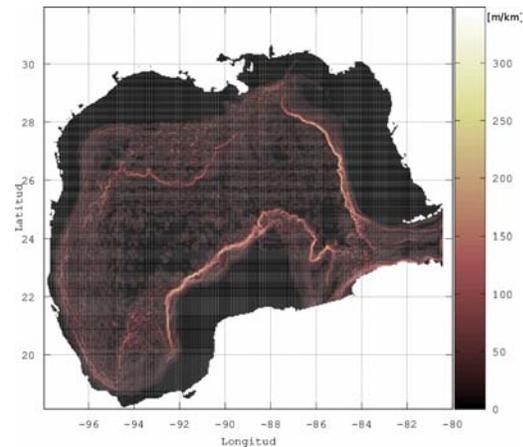


Figura 1.2: Gradiente de profundidad.

Por lo tanto, el Golfo de México se puede dividir en regiones las cuales son: las plataformas continentales, la cuenca del Golfo de México y la Bahía de Campeche; las plataformas continentales se subdividen por zonas, siendo éstas el Banco de Campeche que comprende la plataforma continental de la península de Yucatán, la plataforma oeste del Golfo de México frente a los estados de Veracruz y Tamaulipas, el norte (noroeste) del Golfo de México asociada a los estados de Texas y Luisiana, el noreste del Golfo de México asociado al norte del golfo restante desde la Bahía de Apalache incluyendo el Cañón de De Soto; y la plataforma sur de Florida asociada a la plataforma oeste de la Península de Florida, desde la Bahía de Apalache hasta el Estrecho

de Florida.

Aunque sea el golfo cuasi cerrado, como si fuera una cubeta, esta división es práctica por el área que abarca el golfo y las diferencias en el comportamiento en sus fronteras, el cual es el reflejo de las fuerzas externas al golfo. La fuente más energética es la Corriente de Lazo que entra por el Canal de Yucatán y sale por el Estrecho de Florida.

La variación de la intensidad de la Corriente de Lazo produce variaciones sobre la estructura hidrográfica del golfo, caracterizando éstas por las migraciones de sur a norte de la envolvente que la define y el desprendimientos de grandes giros anticiclónicos que luego emigran al oeste del golfo como ondas de Rossby. Estas dos características condicionan la estructura hidrográfica del golfo reportada por Sturges (1983) [17] y (2000) [18] como variaciones semiperiódicas bien definidas con frecuencias típicas.

Lugo [13] muestra que el comportamiento de la migración de la corriente y el desprendimiento de los giros se asemejan a un oscilador no-lineal forzado y amortiguado de memoria corta ante el rompimiento de la corriente en la formación del giro, este autor obtiene que las oscilaciones de la corriente presentan variaciones de su amplitud con período de 3 a 5 años, que coincide con las oscilaciones atmosféricas del Pacífico sur o la del Atlántico Norte. Al considerar a esta corriente energética como un oscilador es posible pensar que pueda existir resonancia o un acoplamiento con una oscilación típica con el golfo; por lo tanto, las frecuencias de penetración y el desprendimiento de vórtices originadas por las variaciones de la Corriente de Lazo tienen que verse reflejadas en los espectros de frecuencias en las zonas cercanas a éstas, como muestran los diferentes resultados de las simulaciones de la circulación del golfo [3] y Oey [14].

Monreal Gómez y Salas de León [22] muestran que usando un modelo sencillo de capa y media, el efecto de la variación del transporte en las fronteras abiertas –por donde pasa la Corriente de Lazo– se refleja hasta el patrón de circulación estacional en la Bahía de Campeche, en forma independiente del forzamiento atmosférico como hace referencia Vázquez de la Cerda [20] para la misma bahía.

La segunda fuente que genera variaciones en mismos patrones de circulación

en partes del Golfo de México, es el forzamiento atmosférico que afecta principalmente en la parte interna de las plataformas continentales, donde el patrón de corrientes cerca de los márgenes continentales depende a corto plazo de la climatología local y, a mediano y largo plazo por el patrón de vientos estacionales, como fue reportado en el 2014 por Zavala Hidalgo [10] y en recopilaciones de trabajos anteriores de Sturges [19] y Schmitz [16].

Dado que los forzamientos atmosféricos y las fluctuaciones de la Corriente de Lazo tienen variaciones periódicas, conocer los modos de oscilación a lo largo del área del golfo, permitirá delimitar las zonas de influencia de los forzamientos y diferenciar sus respuestas típicas oscilatorias como una cuenca irregular.

1.2. Descripción por modos

El concepto de modo es una abstracción del álgebra lineal de la descomposición de vectores de un espacio vectorial. Este concepto es utilizado para caracterizar conjuntos de datos dependientes de varias variables en diferentes subconjuntos que dependen de las proporciones entre las variables.

Supongamos que las variables físicas que nos interesan $\vec{\Xi}$ son dependientes de un conjunto de variables $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; tal que, es posible encontrar una relación entre ellas.

$$\vec{\Xi} = \vec{\Xi}(\vec{x})$$

Pero no siempre es posible obtener toda la información necesaria sobre las variables $\vec{\Xi}$ y $\{x_i\}$ u observar explícitamente cómo es la dependencia. Por lo tanto se buscan las expresiones más simples que nos describan a $\vec{\Xi}$.

Con la idea de buscar la expresión más representativa de $\vec{\Xi}$ podemos pensar que el valor que observamos de $\vec{\Xi}$ es la superposición o suma de comportamientos más simples $\vec{\Xi}_j$. Cómo la relación:

$$\vec{\Xi} = \vec{\Xi}_1 + \vec{\Xi}_2 + \cdots + \vec{\Xi}_M$$

donde cada $\vec{\Xi}_m$ es igual a una amplitud α_m por un comportamiento $\vec{\xi}_m$ a una escala arbitraria. Es decir,

$$\vec{\Xi}_m = \alpha_m \vec{\xi}_m$$

entonces, $\vec{\xi}_m$ es el *modo- m* de todas las $\vec{\Xi}$ posibles, si el conjunto de las funciones $\{\vec{\xi}_m\}$ es linealmente independiente en el dominio que nos interesa.

El pedir independencia lineal de las funciones $\{\vec{\xi}_m\}$ significa diferenciar la información contenida en $\vec{\Xi}$ a lo largo de una o más variables. Es decir, describir $\vec{\Xi}$ en comportamientos típicos sin que haya redundancia de información y, a partir de estos comportamientos hacer una interrelación entre las diferentes observaciones.

1.3. Características de los modos buscados

Al considerar que los forzamientos en el golfo fluctúan –oscilan– podemos asumir que la respuesta del golfo es a su vez oscilatoria. Por lo tanto, cada modo de la descripción de la dinámica del Golfo de México tiene que brindar información temporal y espacial de las oscilaciones. Estas formas principales serán una descripción por modos de oscilación del Golfo de México.

Esta descripción por modos deben de ser congruente con zonas donde se hayan encontrado oscilaciones de las variables estudiadas, como la frecuencia de separación de vórtices de la Corriente de Lazo [18] y, poder discutir similitudes y diferencias con trabajos teóricos, como en la existencia de ondas internas en el Cañón de Campeche [15]. Además, cada modo de la descomposición debe ser interpretable independientemente de los otros modos, aunque estén dinámicamente acoplados. Por ende, los resultados de este trabajo pueden ser utilizados para hacer una primera aproximación para distinguir diferencias

espaciales sobre tipos y escalas de las oscilaciones del Golfo de México. Lo cual podría servir para hacer asociaciones sobre procesos biológicos, tomar consideraciones para zonas de muestreo de datos y consideraciones sobre la dispersión y/o mezclas de substancias en el golfo, entre otras aplicaciones.

1.4. Los datos

Por los propósitos de esta tesis es necesario poseer una base de datos que cubra todo el Golfo de México y que temporalmente pueda representar oscilaciones. Hay que recalcar que no existe una base de datos medidos del Golfo de México que cubra toda su extensión, en sus profundidades y a lo largo del tiempo. Aunque existen varios proyectos que tienen el fin de generar una bases de datos en el Golfo de México, como: sistemas de boyas, campañas de cruceros oceanográficos, detección remota satelital y modelos de asimilación de datos. Siendo los modelos de asimilación de datos los que dan la mejor distribución de datos a costa de la precisión.

Para este trabajo se utilizó la base de datos de los resultados del modelo HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model), del experimento numérico *HYCOM + NCODA Gulf of Mexico 1/25° Analysis (GOM10.04/expt_20.1)*. El principal motivo para usar estos datos es por la asimilación de las bases de datos de las boyas ARGOS, de los perfiladores XBT (eXpendable BathyThermograph) y de la altimetría satelital recabada por NAVOCEANO Altimeter Data Fusion Center. Además de que es una base que abarca desde enero del 2003 hasta julio del 2010 con una resolución temporal diaria; aunque el modelo se haya ejecutado con pasos de una hora. Los resultados utilizados son del 2004 hasta el 2008 con un total de 1827 días.

Capítulo 2

Metodología de la descomposición en modos normales de oscilación

En este capítulo veremos la selección de las funciones modales espaciales; la relación entre las amplitudes modales y el residuo y, la implementación numérica para realizar la clasificación temporal de períodos de oscilación de los modos estudiados.

2.1. Selección de modos

Los perfiles verticales de la velocidad, temperatura y salinidad en los resultados publicados del HYCOM tienen distintas cantidades de puntos físicamente significativos dependiendo de la profundidad y en el golfo hay una relación 3:2 profundo-somero. Como un mismo modo debe representar la misma dinámica tanto en zonas profundas como someras, es necesario que la descomposición por modos sea equi-representativa independientemente de la profundidad.

Empezamos haciendo una descomposición por armónicos de la profundidad

con la función coseno para dejar libre las condiciones de la superficie y del fondo, dado como:

$$\Xi(t, x, y, z) = \sum \Xi_m(t, x, y) \cos\left(\frac{m\pi}{z_0(x, y)} z\right) \quad (2.1)$$

Donde Ξ es la variable hidrodinámica, t el tiempo, x la longitud, y la latitud, z la profundidad, $z_0(x, y)$ la profundidad promedio en un punto y m ($= 0, 1, 2, \dots$) el orden del modo vertical.

Esta representación es la misma que se usaría en un modelo de n -capas de gravedad reducida estudiándolo como un sistema de masa-resorte en las interfaces de las capas; considerando así, una estructura estratificada.

Implementación numérica

El calculo de los coeficientes ($\Xi_m(t, x, y)$) se efectúa por el método de mínimos cuadrados [2] usando las normas y proyecciones entre funciones.

Considerando que el producto punto entre dos funciones esta dado por:

$$\langle f(\chi), g(\chi) \rangle = \int f(\chi)g(\chi) d\chi \quad \text{ó} \quad \langle f(\chi), g(\chi) \rangle = \sum_{k=1}^K (f(\chi_k) \cdot g(\chi_k)) \quad (2.2)$$

La primera ecuación en (2.2) se usa si el dominio es continuo, mientras que la segunda es aplicable a dominios discretos. Siendo que se tienen datos que se desea representar por armónicos de la profundidad usamos la segunda ecuación en (2.2) y con la ecuación (2.1) obtenemos que la proyección estará dada por:

$$\langle f(z), \Xi(t, x, y, z) \rangle = \sum_{k=1}^K \langle f(z_k) \cdot \Xi(t, x, y, z_k) \rangle \quad (2.3)$$

y

$$\begin{aligned} \langle f(z), \Xi(t, x, y, z) \rangle &= \sum_{k=1}^K \left(f(z_k) \cdot \sum_{m=1}^M \Xi_m(t, x, y) \cos \left(\frac{N_m \pi}{z_0(x, y)} z_k \right) \right) \\ \langle f(z), \Xi(t, x, y, z) \rangle &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \Xi_m(t, x, y) \left(f(z_k) \cdot \cos \left(\frac{N_m \pi}{z_0(x, y)} z_k \right) \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Donde k es el número de datos que tenemos con la profundidad y M la cantidad de modos normales con los cuales aproximamos el perfil. Proponiendo a $f(z) = \cos \left(\frac{N_m \pi}{z_0(x, y)} z \right)$ y la cantidad de modos igual al número de datos en la profundidad y usando las ecuaciones (2.3) y (2.4) se llega a la expresión:

$$A \vec{\alpha}^* = \vec{b} \quad (2.5)$$

con

$$A = \begin{pmatrix} (\phi_0, \phi_0) & (\phi_0, \phi_1) & \cdots & (\phi_0, \phi_{K-1}) \\ (\phi_1, \phi_0) & (\phi_1, \phi_1) & \cdots & (\phi_1, \phi_{K-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\phi_{K-1}, \phi_0) & (\phi_{K-1}, \phi_1) & \cdots & (\phi_{K-1}, \phi_{K-1}) \end{pmatrix},$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} (\phi_0, \Xi(t, x, y, z)) \\ (\phi_1, \Xi(t, x, y, z)) \\ \vdots \\ (\phi_{K-1}, \Xi(t, x, y, z)) \end{pmatrix}, \quad \vec{\alpha} = \begin{pmatrix} \Xi_0(t, x, y) \\ \Xi_1(t, x, y) \\ \vdots \\ \Xi_{K-1}(t, x, y) \end{pmatrix}$$

y $\phi_n = \cos \left(\frac{n\pi}{z_0(x, y)} z \right); n = 0, 1, 2, \dots, K - 1$.

Obteniendo las amplitudes de los modos normales verticales como:

$$\vec{\alpha}(t, x, y) = A^{-1}\vec{b} \quad (2.6)$$

Los coeficientes de los modos normales verticales se calcularon para cada día desde el 1 de enero de 2004 hasta el 31 de diciembre de 2008, para cada longitud y latitud reportada; con un total aproximado en orden de 10^9 perfiles.

En este trabajo se consideró que los k -niveles de profundidad reportados en los datos del HYCOM no están igualmente espaciados en la vertical, por lo que el producto punto de las funciones en su representación discreta no tienen el mismo peso a lo largo de toda la profundidad. Por ende, se realiza una interpolación entre cada valor reportado en la vertical hasta al nivel de la batimetría usando una interpolación cúbica tipo spline [8].

2.2. El residuo

En cualquier método numérico de descomposición de datos es necesario comparar los perfiles reconstruidos con los originales, midiendo el error o residuo. Por congruencia numérica se han dejado hasta el mismo número de armónicos que la cantidad de datos sobre el perfil vertical. Por conveniencia le llamaremos nodo a cada punto sobre el Golfo de México que tenga perfiles verticales.

Haciendo hincapié en que esta representación por modos normales es similar a representar los perfiles estudiados como n -capas diferenciadas en un sistema estratificado, significa que el residuo de los perfiles representa la no-estratificación de la componente y el error numérico de truncamiento, dado por:

$$e_{error}(t, x, y, z) = \Xi(t, x, y, z) - \sum \Xi_m(t, x, y) \cos\left(\frac{m\pi}{z_0(x, y)}z\right) \quad (2.7)$$

A continuación se muestra un ejemplo de la reconstrucción de los perfiles verticales de las componentes de la velocidad, la salinidad y la temperatura en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 para la posición 24.93°N y 94.68°W el 1 de enero del 2004. Se grafica en color verde el perfil vertical de los datos del HYCOM, en

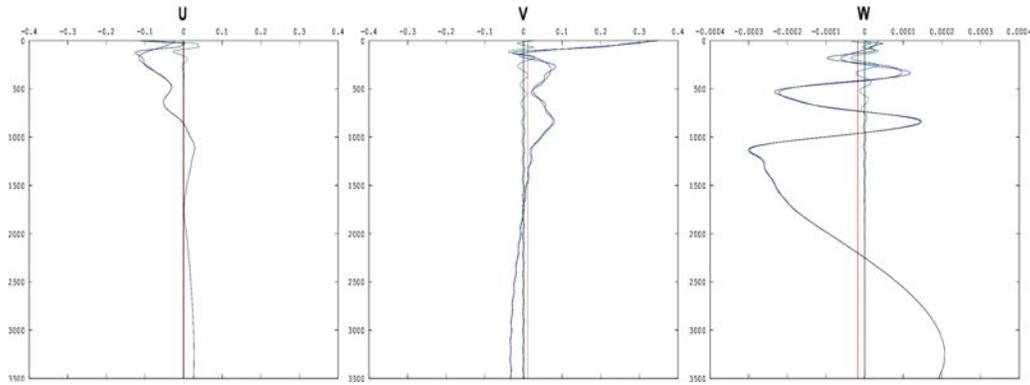


Figura 2.1: Ejemplo del perfil vertical de las componentes de la velocidad.

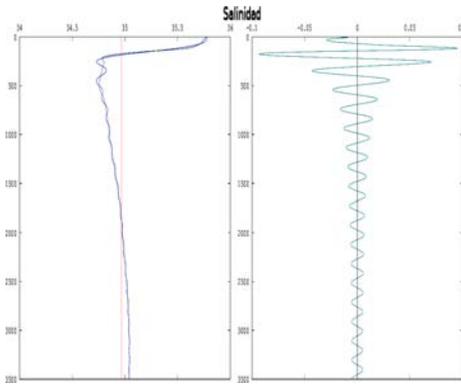


Figura 2.2: Ejemplo del perfil vertical de la salinidad.

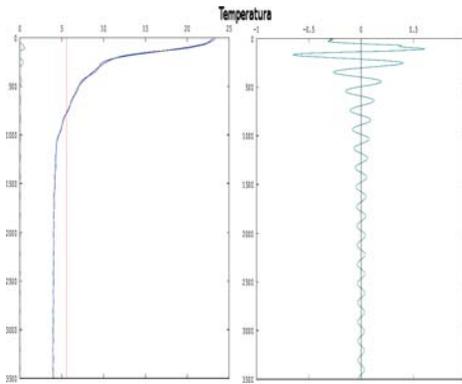


Figura 2.3: Ejemplo del perfil vertical de la temperatura.

azul los datos reconstruidos por la representación modal, en rojo el valor del armónico cero y en cian el residuo para cada componente. Al armónico cero, modo-0, también lo podemos llamar modo barotrópico al ser en si el promedio sobre la vertical. Definimos a los armónicos mayores a cero, $m = \{1, 2, \dots\}$, como modos baroclínicos.

Es posible apreciar que las discrepancias entre los perfiles originales y reconstruidos son mayores en la superficie y decaen con la profundidad, lo cual se observó en los demás perfiles que no se muestran.

Se asignó un valor numérico al error por nodo de la malla horizontal como la suma cuadrática del residuo en cada punto de la vertical, dado por:

$$Error(t, x, y) = \sum_k e_{error}^2(t, x, y, z_k) \quad (2.8)$$

Reducción del número de modos normales verticales para el estudio de la oscilación temporal

Al comparar los logaritmos de los errores contra los valores absolutos de las amplitudes, se encontró que las magnitudes de los modos superiores al quinto (modo-5) son comparables al error:

$$\log(Error(t, x, y)) \gtrsim \log(\Xi_s(t, x, y)) \quad (2.9)$$

con $s = 6, 7, \dots$ para todas las variables estudiadas, en los perfiles estudiados, es decir, también a lo largo del tiempo. Teniendo esto en cuenta, se redujo la información de los modos normales para cada nodo.

Lo anterior puede observarse en la figura 2.4 donde se comparan las amplitudes del error contra la amplitud del modo-6 a lo largo del tiempo para el nodo del ejemplo anterior y, en la figura 2.5 las amplitudes de los modos $m \geq 6$ del mismo ejemplo.

Al hacer esta reducción del número de modos podemos hacer un análisis simplificado del golfo congruente con los datos.

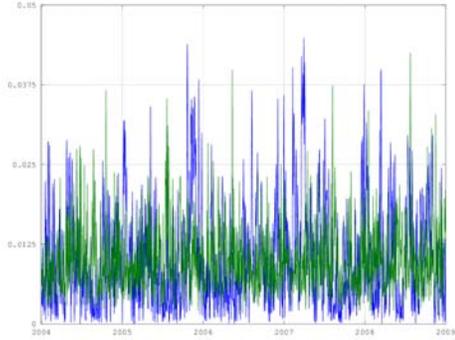


Figura 2.4: Ejemplo del valor absoluto del coeficiente de modo sexto en el tiempo y en verde el error.

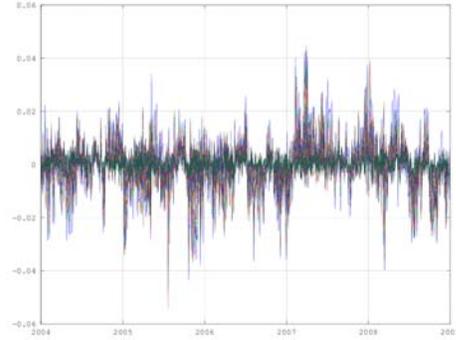


Figura 2.5: Ejemplo de la gráfica de los modos superiores al quinto.

2.3. Implementación numérica para el análisis de las oscilaciones de amplitud en el tiempo

Para la clasificación temporal de los períodos de oscilación se realizó un análisis de Fourier de los modos verticales ($\Xi_m(t, x, y)$), que estaría dada por:

$$\{\xi_m(\omega_i, x, y)\} = \text{fft}(\Xi_m(t, x, y)) \quad (2.10)$$

donde $\xi_m(\omega_i, x, y)$ son los modos de oscilación de los modos verticales. De esta forma pasamos de una serie de 1827 días a 913 frecuencias. Por la cantidad de frecuencias a analizar se realizó un agrupamiento por anchos de bandas de períodos.

Al considerar que la batimetría del golfo no es homogénea y esta puede modular las amplitudes $\xi_k(\omega_i, x, y)$, se asignó una amplitud a la banda como el valor máximo de la amplitud.

Selección de anchos de bandas de períodos de oscilación

En la selección de los anchos bandas, se buscaron los intervalos de frecuencias donde la amplitud en sus extremos fueran menores al 10 % de la amplitud máxima. Para estandarizar los anchos de banda se compararon los intervalos obtenidos por los perfiles verticales repartidos en la Bahía de Campeche; en frente del río Mississippi; en el Canal de Yucatán y su plataforma y, en el centro del golfo.

Para evitar la subestimación de las amplitudes máximas por el efecto de filtraciones de amplitud a otras frecuencias [6], las bandas temporales y las amplitudes máximas fueron calculadas usando la siguiente implementación:

Como el intervalo entre frecuencia y frecuencia es inversamente proporcional al período total de estudio,

$$\Delta\omega \propto \frac{1}{T}$$

tenemos que si estudiamos nuestra serie de tiempo con una reducción de δt , es decir con $T' = T - \delta t$, entonces obtenemos un nuevo dominio de frecuencias.

Por lo tanto, obtendremos una serie de Fourier con discretización en la frecuencia ligeramente distinta para la misma serie de tiempo, con lo que es posible encontrar el dominio óptimo de frecuencias donde se encuentren mejor representada las amplitudes de oscilación. Realizando este procedimiento se encontraron los mínimos en la amplitud de oscilación para diferentes discretizaciones. Por el teorema de Nyquist, se tiene que al usar como rango de tiempo 1827 días, el período máximo asociable al sistema es de 913 días y debido a la tasa de muestreo, el período mínimo es de 2 días. Siendo que los fenómenos gobernantes en el golfo son de períodos largos y los reportes de eventos están en escalas de días, se presentan los resultados por bandas de períodos en vez de bandas de frecuencias para una interpretación más directa.

Las bandas generadas son las siguientes:

- Banda de períodos de 330 a 460 días

- Banda de períodos de 225 a 330 días
- Banda de períodos de 150 a 225 días
- Banda de períodos de 110 a 150 días
- Banda de períodos de 85 a 110 días
- Banda de períodos de 40 a 85 días
- Banda de períodos de 2 a 40 días

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados más importantes de la descomposición modal. Las componentes estáticas de los modos y los mapas de las amplitudes máximas por bandas.

3.1. Componentes modales estáticos

Las componentes estáticas dan el comportamiento genérico de la circulación en el Golfo de México, que son el promedio en el tiempo de las amplitudes modales; por lo tanto, deben de describir las características genéricas del golfo.

Componentes horizontales de la velocidad

En la figura 3.1 se muestra el campo vectorial de las componentes horizontales de la velocidad del modo $m = 0$. Recordando que por la descripción por armónicos del coseno si integramos las velocidades en la vertical el único valor no nulo sería este modo.

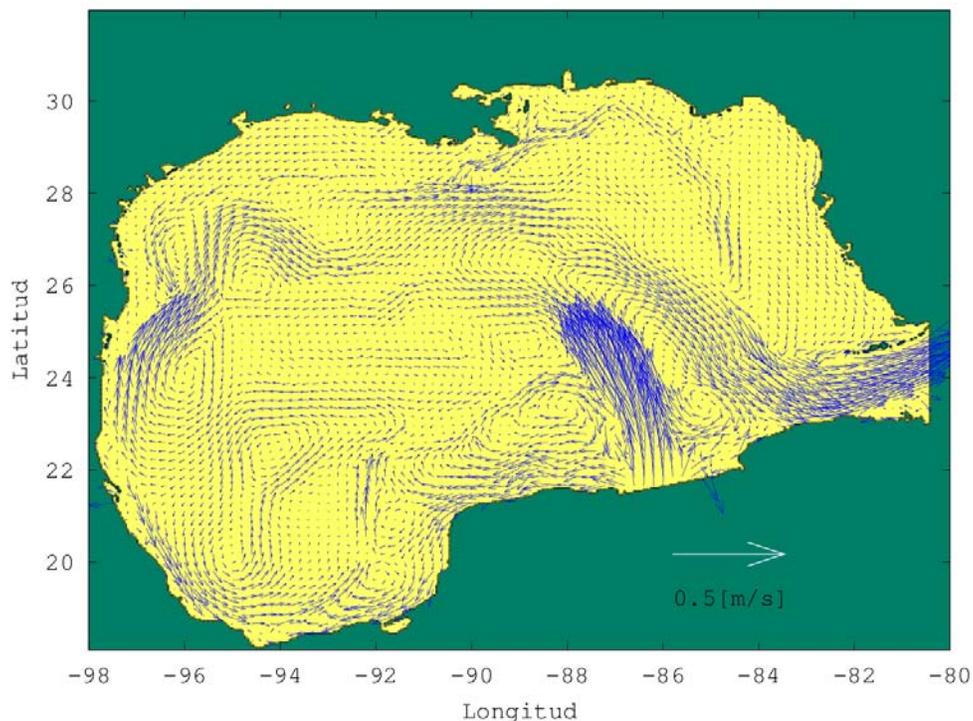


Figura 3.1: Campo vectorial del promedio temporal de las componentes horizontales del modo $m = 0$.

Tenemos que hacer notar que las velocidades son mayores por la corriente entrante del Canal de Yucatán y la corriente del golfo que sale por el Estrecho de Florida. Además de encontrar otras velocidades de amplitudes considerables que son paralelas a la batimetría del golfo que sería lo correspondiente a corrientes de una circulación barotrópica.

En la figura 3.2 está el campo vectorial de las componentes horizontales de la velocidad del modo $m = 1$. Por haber considerado una descripción por series del coseno sobre la vertical tenemos que el campo mencionado es positivo en la superficie, nulo a la mitad de la profundidad y negativo en el fondo.

Podemos observar que la Corriente de Lazo es reforzada en la superficie y que el campo tiende a ser paralelo a los taludes de la plataforma continental.

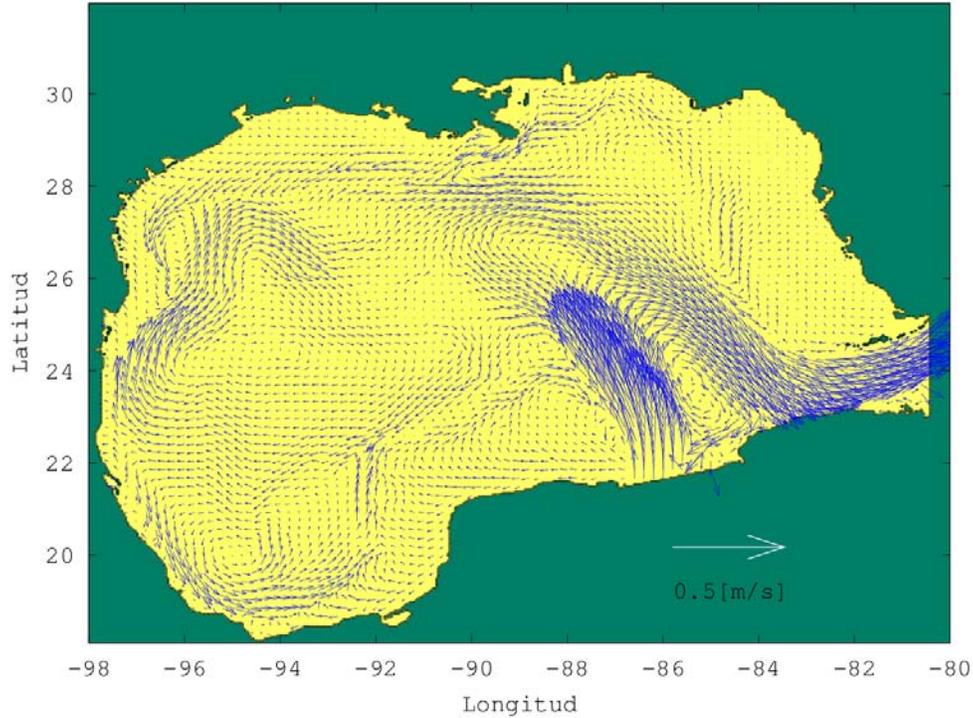


Figura 3.2: Campo vectorial del promedio temporal de las componentes horizontales del modo $m = 1$.

Promediando la contribución de los modos $m = 0$ y $m = 1$ obtenemos que contribuyen con el 66 % del campo de la velocidad en el golfo (Fig.3.3). Si pensamos en la moda de la distribución observamos una moda al 80 % de las contribuciones. Esta condición en las distribuciones de los modos $m = 0$ y $m = 1$ es similar a considerar que el Golfo de México esta compuesto por dos capas, considerando solo las velocidades de la capa superior igual a la superficie y la capa inferior igual a la velocidad del fondo. Por lo tanto, los trabajos de simulaciones de la circulación de gravedad reducidas de dos capas o capa y media tendrán una gran similitud a la corriente promedio superficial real del golfo; como la simulación de Monreal Gómez y Salas de León (1990) [22].

En las figuras 3.4a y 3.4b podemos observar que las magnitudes de las velocidades de los campos decaen en forma abrupta. Entonces si se considerara

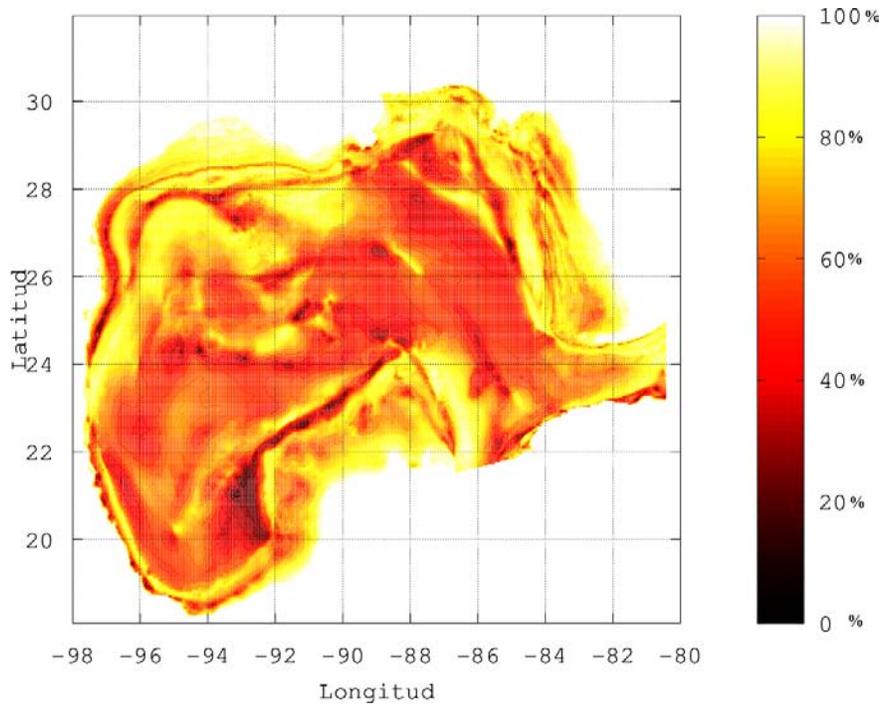


Figura 3.3: Porcentaje de la contribución de los modos $m = 0$ y $m = 1$ del promedio temporal de las componentes horizontales de la velocidad.

la aproximación de que el modo-1 no contribuye en profundidades medias y que solos los modos $m = 0$ y $m = 1$ definen la circulación del golfo, el modo-0 representaría la circulación de la cuenca del golfo en profundidades medias. El campo de velocidades en esta zona es parecido a las circulación obtenida por Lee y Mellor (2003) [12] y Weatherly, Wienders y Romanou (2005) [1]

Componente vertical de la velocidad

En la figura 3.5a se muestra la distribución de la amplitudes del modo $m = 0$ del promedio temporal de la componente vertical de la velocidad. Donde se puede observar que las velocidades verticales son en general nulas en toda el área del golfo, esto es congruente con la realidad siendo que el modo $m = 0$ representa el movimiento promedio de toda la columna de agua en la vertical.

Componentes de la temperatura y la salinidad

El modo-0 de la temperatura (Fig. 3.6a) representa en casi su totalidad la temperatura sobre la plataforma continental. Esto implica que la temperatura del agua sobre la plataforma es homogénea en la vertical en promedio en el tiempo.

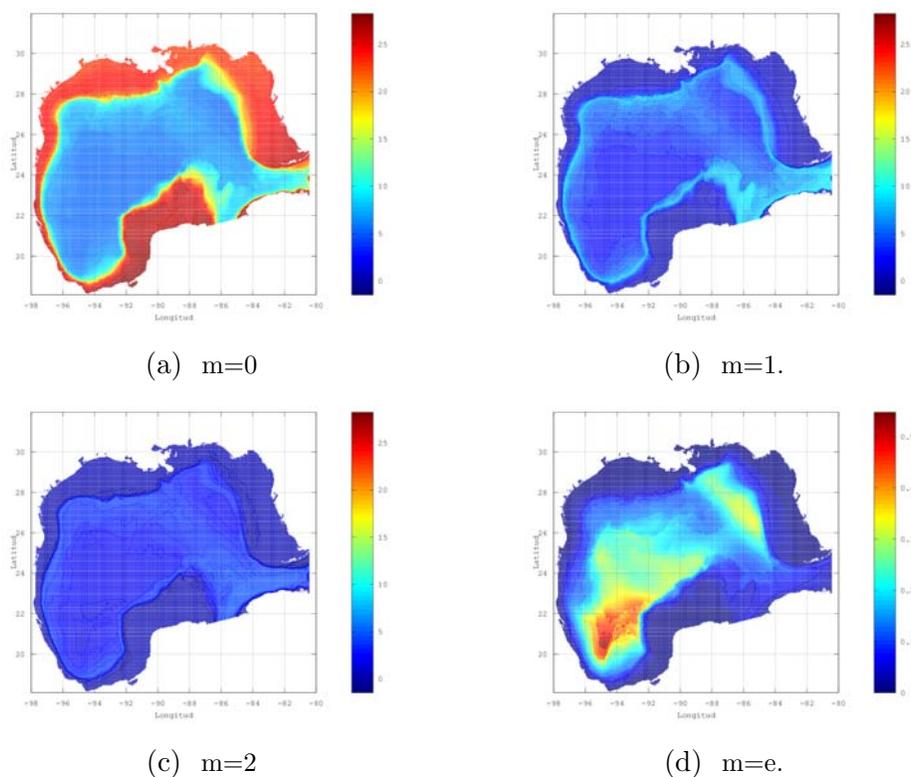


Figura 3.6: Distribuciones de las amplitudes del promedio temporal de la temperatura de los modos (a) $m=0$, (b) $m=1$, (c) $m=2$ y (d) Error.

Observando las distribuciones de los modos $m=1$ y $m=2$ (Figs. 3.6b y 3.6c) se observa que las magnitudes no son suficientes para representar en forma precisa la temperatura superficial, teniendo que los patrones de la temperatura promedio de los modos siguen las isobatas independientemente del patrón de circulación.

Observando el error promedio de la temperatura, podemos ver que las mayores amplitudes se concentran al noreste de la cuenca del golfo y en la Bahía de Campeche.

Para el caso de la salinidad en el golfo siendo que sus variaciones son pequeñas, podemos observar que el modo $m = 0$ como se muestra en la figura 3.7a, es casi constante en el golfo, salvo en los aportes principales de agua dulce de las costas de Estados Unidos.

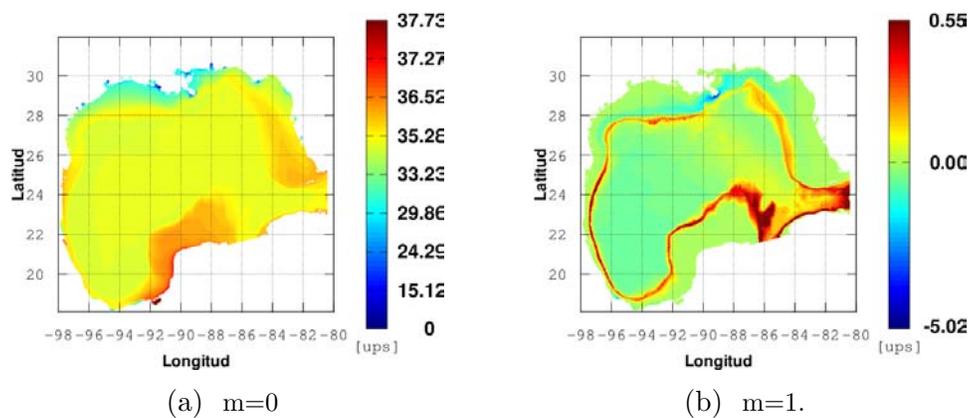


Figura 3.7: Distribuciones de las amplitudes del promedio temporal de la salinidad de los modos (a) $m=0$, (b) $m=1$ en escala logarítmica en el color.

En las costas mexicanas solo se observa influencia de la descarga de agua dulce de los ríos Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalba. Lo que indica una parcialidad de los datos, ya que en las costas de Estados Unidos se tiene una mayor información sobre las descargas de los ríos.

Respecto a las amplitudes de los modos $m > 0$ de la salinidad promedio, decrece su amplitud en forma abrupta, teniendo mayores amplitudes en los taludes de la plataforma continental y en la desembocadura del Río Misisipi (Fig. 3.7b).

3.2. Bandas de periodos

En esta sección se muestran las distribuciones de las amplitudes de oscilación de los modos verticales en mapas de diferentes colores en el Golfo de México.

Uno de los resultados más relevantes en esta investigación, es que las oscilaciones de los primeros tres modos $m=0,1$ y 2 son comparables. Por lo cual se normalizan a uno para hacer comparaciones en el patrones de amplitudes entre los mapas que se muestran en este capítulo.

Para comparar las amplitudes de los modos $m=0,1$ y 2 en la misma banda temporal se combinan sus resultados en mapas de colores sobre el área del golfo. Los mapas de colores son una composición rojo, verde y azul (RGB) donde el verde corresponde al modo-0, el azul al modo-1 y el rojo al modo-2 (Fig. 3.8). Donde la saturación del color es correspondiente a uno si la amplitud es igual a la máxima amplitud en la banda estudiada y cero si es menor o igual al orden de magnitud de la máxima amplitud.

En esta representación las zonas de color blanco-gris corresponden a amplitudes donde los tres modos tienen la misma magnitud; negro donde las amplitudes son menor o igual a un orden de magnitud de la amplitud máxima; en cian donde las magnitudes de la amplitud de oscilación de los modos $m=0$ y $m=1$ son similares; en magenta corresponde a amplitudes similares entre los modos $m=1$ y $m=2$; y en amarillo a amplitudes similares entre los modos $m=0$ y $m=2$. En los resultados se encuentran varias tonalidades de los colores antes mencionados y que se interpreta como una variación de la proporción de los modos involucrados.

Para una mejor interpretación de los resultados es conveniente tener a la mano la batimetría del Golfo de México, figura 3.9.

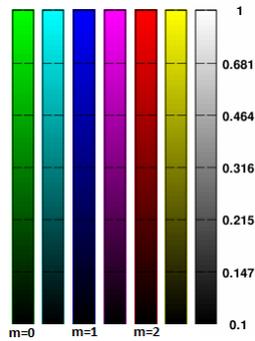


Figura 3.8: Escala logarítmica para la composición RGB de las amplitudes de oscilación de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$.

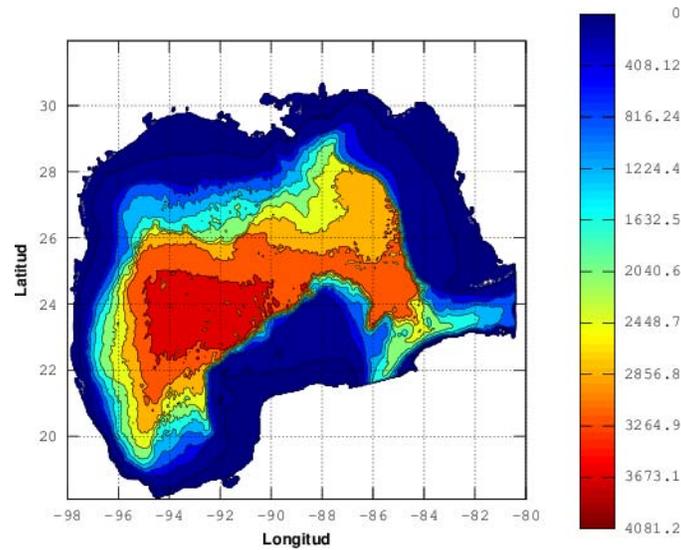


Figura 3.9: Batimetría del Golfo de México.

3.2.1. Componentes horizontales de la Velocidad

Banda de período de 330-460 días

Esta banda de período correspondería a las oscilaciones anuales en los modos del golfo y esta es la banda más ancha obtenida en esta investigación.

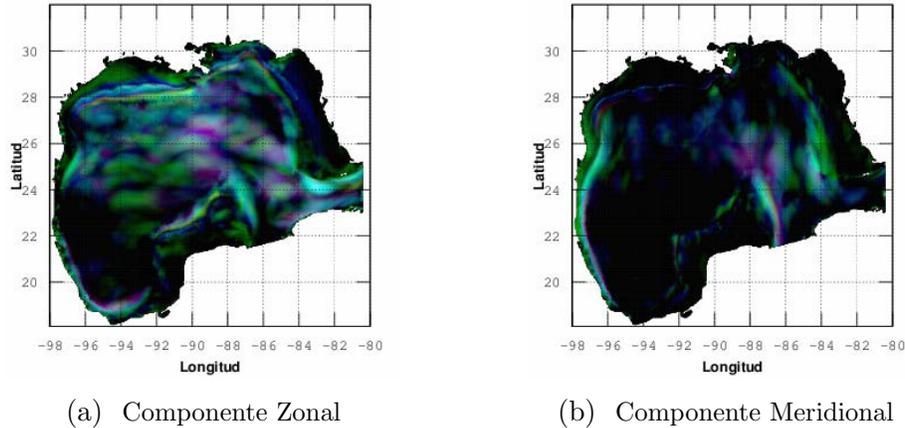


Figura 3.10: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máxima de 0.1218 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máxima de 0.1834 m/s .

Las figuras 3.10a y 3.10b muestran las oscilaciones zonales y meridionales con amplitudes máximas que son de 0.1218 m/s y 0.1834 m/s respectivamente. Cabe resaltar una estructura alternada principalmente de colores verde-morado dentro de la cuenca del golfo para ambas componentes de la velocidad. Lo que significa oscilaciones entre una respuesta que mueve toda la columna de agua por el modo-0 y de cizalle por los modos $m=1$ y $m=2$.

Es importante notar que las amplitudes en esta banda se concentran alrededor de los bordes de las plataformas, teniendo los máximos en los bordes cercanos al Canal de Yucatán y Estrecho de Florida.

Sobre las plataformas noroeste y oeste del golfo se observa que las oscilaciones son paralelas a las isobatas, con oscilaciones principalmente compuestas del modo-0. Se puede observar que además de que las oscilaciones se concentran en la cuenca del golfo éstas no entran a la Bahía de Campeche. De esta distribución de la amplitud de las oscilaciones se puede interpretar que las fluctuaciones anuales de la velocidad en la cuenca están limitadas por su geometría (Fig. 3.11).

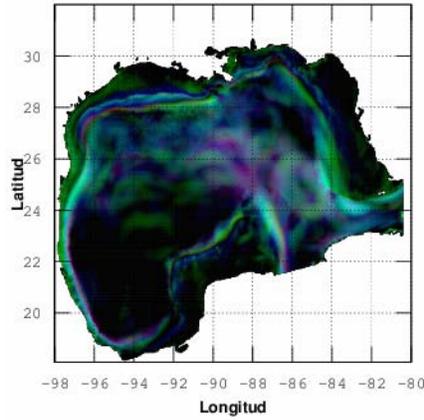


Figura 3.11: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de la oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.1926 m/s .

Banda de período de 225-330 días

Esta banda de períodos está centrada alrededor de los 9 meses, uno de los períodos típicos de desprendimiento de los vórtices de la Corriente de Lazo [18].

Las oscilaciones meridionales (Fig. 3.12b) se concentran al este de la cuenca del golfo, cabe resaltar que las oscilaciones de la cuenca no penetran en la Bahía de Campeche salvo por las oscilaciones que recorren a lo largo del talud oeste del golfo. Se observa que las oscilaciones dentro de la cuenca son principalmente combinaciones del modo-1 con el modo-0 o modo-2 en forma alternada, teniendo amplitudes similares el modo-0 y el modo-1 en los bordes este y oeste del golfo y solo amplitudes del modo-0 sobre la plataforma cercana.

Para las oscilaciones zonales (Fig. 3.12a) se observa que las amplitudes se concentran en la cuenca del golfo y en los bordes con las plataformas continentales. Donde vemos, otra vez, que las oscilaciones no se concentran en la Bahía de Campeche.

Al observar las amplitudes de las oscilaciones horizontales (Fig. 3.13) pode-

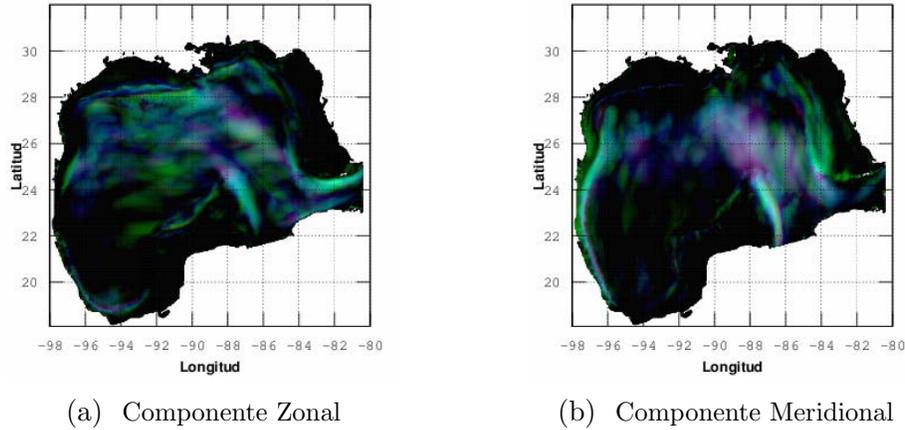


Figura 3.12: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máxima de 0.1672 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máxima de 0.1652 m/s .

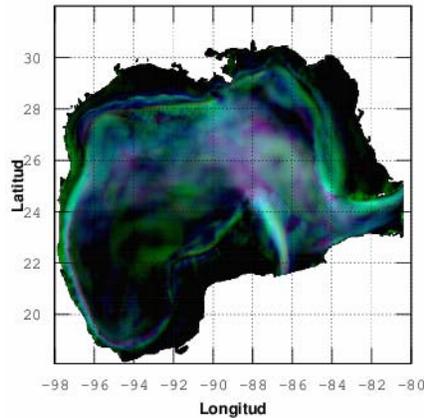


Figura 3.13: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de la oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.1886 m/s .

mos ver que se concentran principalmente en los bordes de las plataformas y en la cuenca del golfo con mayores amplitudes al este de la cuenca, en la zona de influencia de la migración de la Corriente de Lazo y desprendimientos de giros. Además, se observa que los modos $m=1$ y $m=2$ contribuyen en la cuenca principalmente donde hay mayores gradientes de la profundidad, donde la componente de la velocidad es paralela al gradiente.

Banda de período de 150-225 días

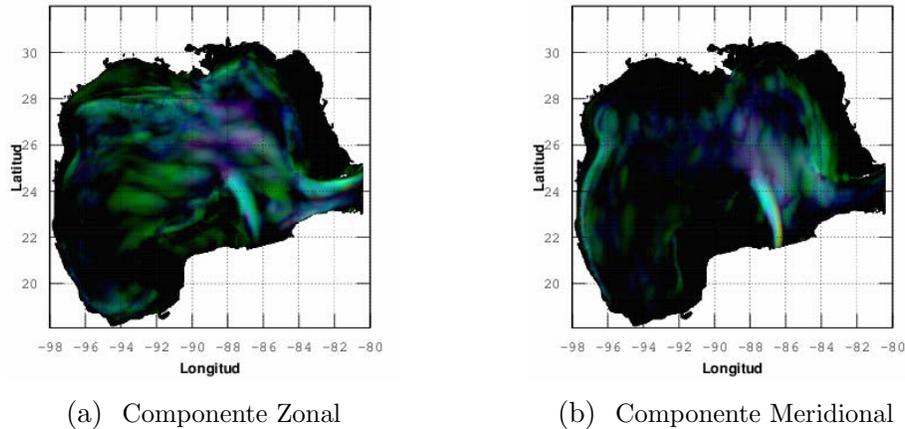


Figura 3.14: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máximas de 0.1591 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máximas de 0.1907 m/s .

Esta banda de períodos va de 5 a 7 meses aproximadamente, lo que se asocia a oscilaciones semestrales en el golfo.

En la figura 3.14a podemos observar que las oscilaciones zonales son principalmente de la componente $m=0$ al oeste de la cuenca. En cambio al este se observa una mayor contribución de los modos $m=1$ y $m=2$, observando un color magenta, lo que significa una oscilación baroclínica del perfil de velocidades para ambas componentes de la velocidad en la zona de influencia de la Corriente de Lazo donde el gradiente de la batimetría no es abrupto.

En la figura 3.15 podemos observar que el modo-1 está presente dentro de la cuenca donde el gradiente de la batimetría no es grande, así como dentro de la Bahía de Campeche siendo esta distribución diferente respecto a las bandas anteriores. También se observan amplitudes del modo-0 en los taludes y bordes de la plataforma siendo las oscilaciones paralelas a éstas.

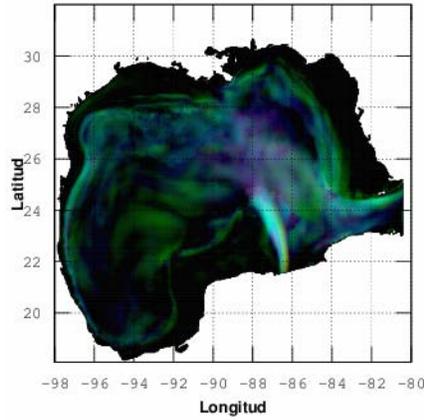


Figura 3.15: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de la oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.2224 m/s .

Banda de período de 110-150 días

En esta banda de períodos las oscilaciones están centradas alrededor de los 4.3 meses. Este período se podría asociar a un comportamiento armónico de la oscilación cuasi anual con amplitud máxima de 0.1926 m/s o de las oscilaciones de la banda de 7 a 11 meses con amplitud máxima de 0.1886 m/s . Si comparamos las amplitudes de las bandas mencionadas con la amplitud máxima de esta banda, que es de 0.1843 m/s , podemos ver que las amplitudes son muy similares, por lo que podemos suponer que no es un armónico de las otras bandas ya que en ese caso tendría que ser una fracción de las anteriores.

En las figuras 3.16a y 3.16b las mayores amplitudes de oscilación se concentran en los bordes de las plataformas con la cuenca del golfo, principalmente colindantes con la Corriente de Lazo, como se ha observado en las bandas anteriores siendo otra vez las oscilaciones paralelas al talud de la cuenca.

Se observa en la figura 3.16a que sobre la plataforma norte del golfo las amplitudes de las oscilaciones del modo-0 son comparables con las amplitudes en la cuenca del golfo.

Respecto a la batimetría se observa el mismo comportamiento que las ban-

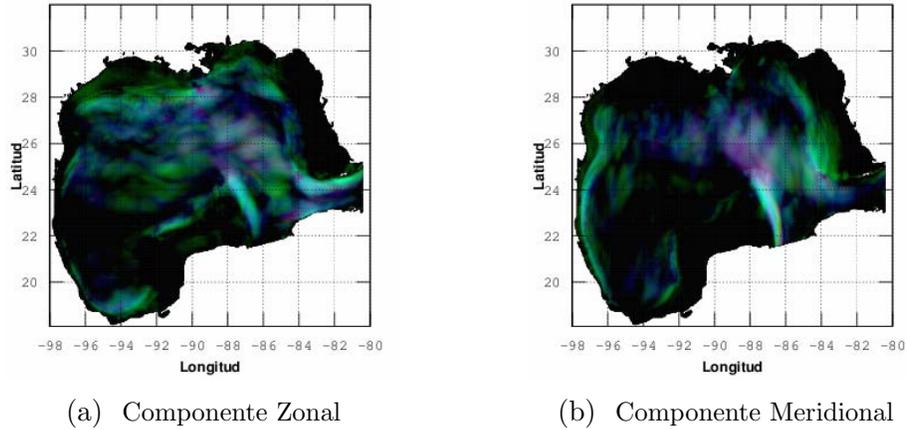


Figura 3.16: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud 0.1398 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud 0.1552 m/s .

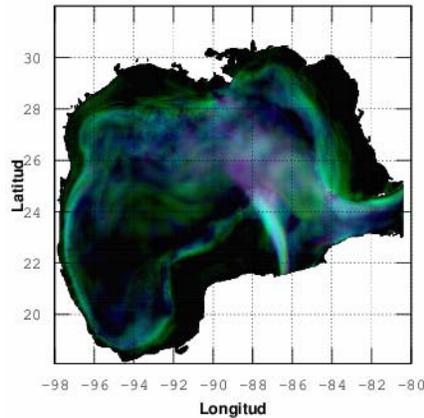


Figura 3.17: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.1843 m/s .

das anteriores respecto a la composición de los modos $m=1$ y $m=2$ sobre el gradiente de la batimetría dentro de la cuenca.

También se observan diferencias en los patrones en la Bahía de Campeche, donde hay un aumento relativo de las amplitudes de las oscilaciones. Una explicación viable es que al ser las oscilaciones de mayor frecuencia éstas

pueden ser admitidas en la bahía, pensando que estas oscilaciones en la circulación se propagan como ondas viajeras.

Al comparar los patrones de las amplitudes de las oscilaciones de la banda 225-330 días (Figs.3.13 y 3.17) podemos observar que son muy parecidas en los patrones de amplitud de las oscilaciones a lo largo de la cuenca y que las mayores amplitudes se concentran en la zona de influencia de la Corriente de Lazo. Por lo cual se puede inferir que la banda de 225-330 y ésta están acopladas de alguna manera, considerando la similitud en los patrones en la cuenca. Además en la figura 3.17 se observa que en los taludes y bordes con las plataformas el color cian se intensifica. Esto se puede asociar a que el forzamiento del fondo controla rápidamente las amplitudes de las oscilaciones al adentrarnos en las plataformas.

Banda de período de 85-110 días

Podemos ver en las figuras 3.18a y 3.18b que las oscilaciones se concentran principalmente en los bordes de las plataformas con la cuenca y la Bahía de Campeche, compuesto principalmente con el modo $m=0$. Donde las mayores amplitudes son colindantes con la Corriente de Lazo. Al comparar con la batimetría tenemos que las oscilaciones sobre los taludes son nuevamente paralelas a las isobatas.

En la zona contenida entre $24^\circ - 25^\circ N$ y $90^\circ - 94^\circ W$ se observa que las amplitudes del modo-0 forman una doble banda; zona donde el golfo es más plano y profundo. Además, se observa que el modo-0 tiene amplitudes considerables al este de la cuenca, justo donde la batimetría también es plana y profunda. La observación anterior da a suponer que las oscilaciones en la cuenca del golfo están segmentadas en una zona este y otra oeste, siendo la zona este de la cuenca donde se encuentra la influencia directa de la Corriente del Lazo.

Esta banda se puede redondear a oscilaciones trimestrales, el cual no es un período asociado a algún forzamiento atmosférico. Por lo tanto, esta respuesta puede ser un armónico de las otras bandas o una respuesta típica del golfo.

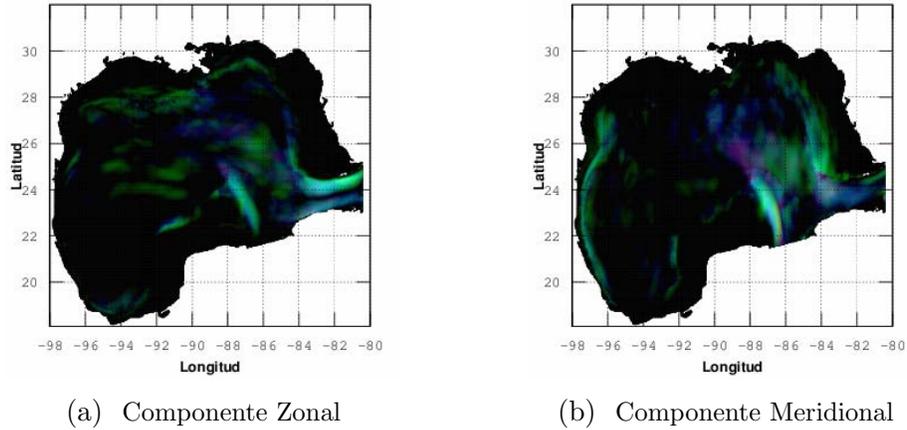


Figura 3.18: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máxima de 0.1927 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máxima de 0.1684 m/s .

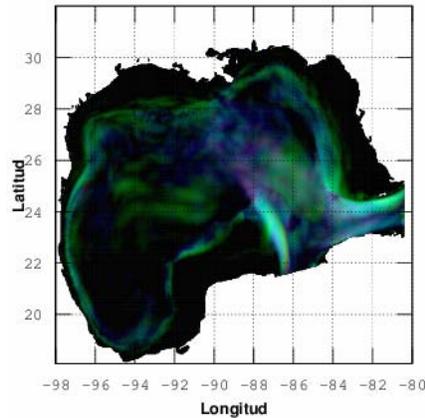


Figura 3.19: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.1954 m/s .

Banda de período de 40-85 días

A esta banda la podemos asociar a oscilaciones bimestrales. En las figuras 3.20a y 3.20b podemos observar que las mayores amplitudes se concentran alrededor de los bordes de la plataforma, figura 3.21. Observando las oscila-

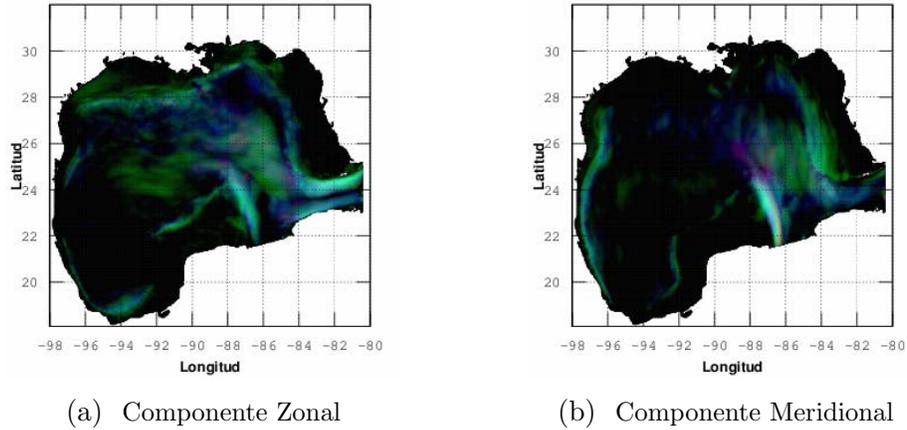


Figura 3.20: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máxima de 0.1463 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máxima de 0.1693 m/s .

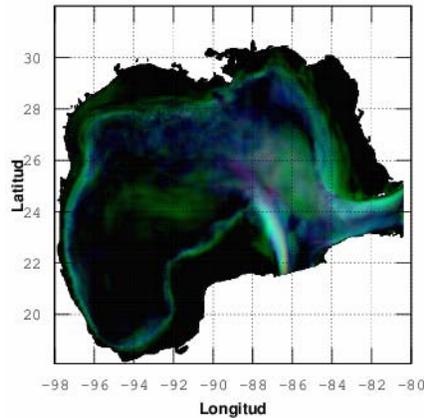


Figura 3.21: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de la oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.1938 m/s .

ciones en sus componentes zonales y meridionales, otra vez podemos inferir que las oscilaciones de la velocidad son paralelas a las isobatas. Al ser continuo este patrón sobre el borde de la plataforma se puede suponer que es una respuesta instantánea a lo largo del talud o es una onda viajera.

También podemos observar amplitudes del modo-1 de la componente zonal

en el talud oeste de la plataforma de Florida. Donde el talud es casi un pared vertical. Al esperar continuidad en el flujo se encuentran amplitudes similares del modo-0 en las oscilaciones meridionales sobre la plataforma de Florida.

Dentro de la cuenca del golfo se observa un patrón similar al de la banda anterior, amplitudes del modo-0 en las zonas profundas con gradiente cuasi nulo. Teniendo la división con un color magenta de oscilaciones meridionales de los modos $m=1$ y $m=2$. Además de la predominancia del modo-1 en la parte norte de la cuenca donde el gradiente de la batimetría es moderado.

Banda de período de 2-40 días

Esta banda contiene la información de los períodos cortos. El criterio de la selección de norma para las bandas implica que en esta banda no se pueden distinguir forzamientos atmosféricos locales de forzamientos de mareas o de una respuesta propia.

La amplitud máxima de oscilación es de 0.0826 m/s , menor o igual a la mitad de las máximas amplitudes en las otras bandas. Comparando solo con

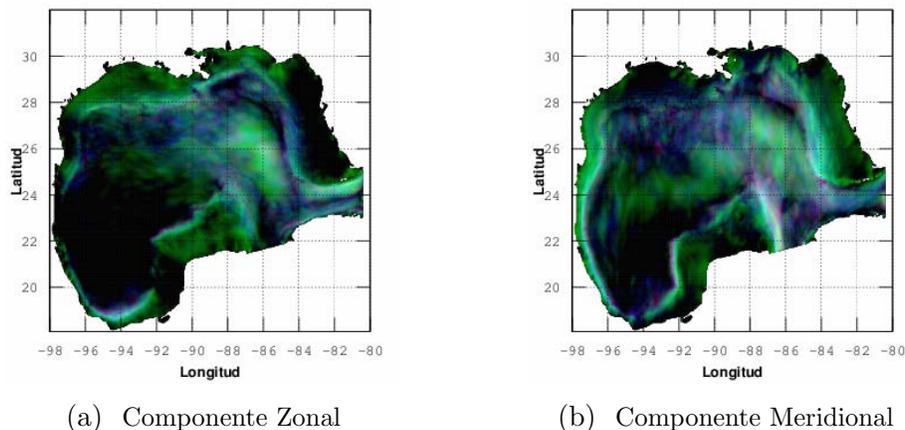


Figura 3.22: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud. (a) Componente zonal de la velocidad con amplitud máxima de 0.0800 m/s . (b) Componente meridional de la velocidad con amplitud máxima de 0.0649 m/s .

las magnitudes máximas se puede afirmar que las oscilaciones de los patrones de circulación en el golfo son afectados principalmente por períodos largos.

Sobre las plataformas continentales se observa que el color verde predomina (Figs. 3.22a - 3.23), es decir el modo-0. Además que las oscilaciones son paralelas a las isobatas sobre la plataforma, con amplitudes comparables desde la costa hasta el talud teniendo amplitudes comparables en la plataforma respecto a las oscilaciones en la cuenca del golfo. En los taludes los modos $m=0$ y $m=1$ tienen amplitudes similares dando el color cian claro pasando a un color magenta al entrar a la cuenca, correspondiente a los modos $m=1$ y $m=2$.

Dentro de la cuenca del golfo, fijando la atención en el modo-0 se observa que las oscilaciones meridionales forman una banda horizontal al oeste del golfo de color verde. De esta banda se puede ver que las oscilaciones meridionales se comportan como ondas viajeras encerradas entre dos fronteras fijas. Salvo la zona entre las plataformas de Yucatán y Florida, donde hay oscilaciones zonales y no meridionales del modo-0 en el este de la cuenca, tenemos amplitudes similares en ambas componentes de la velocidad sin presentar un patrón específico como si fuera solo un volumen cerrado con ondas viajeras.

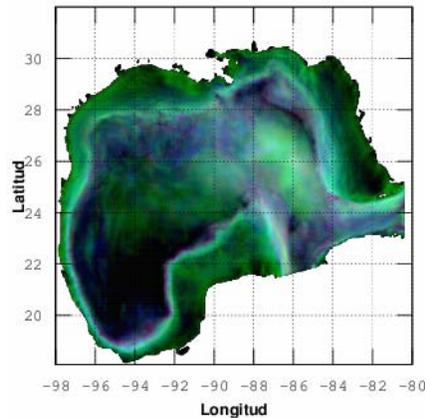


Figura 3.23: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ en escala logarítmica de la amplitud de la oscilación horizontal, con amplitud máxima de 0.0826 m/s .

3.2.2. Componente vertical de la Velocidad

En esta sección se presentan las oscilaciones de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la velocidad vertical. En las figuras 3.24 y 3.25 se observan distribuciones de las amplitudes en todas las bandas estudiadas.

En todos los mapas de las distribuciones de las amplitudes se observan

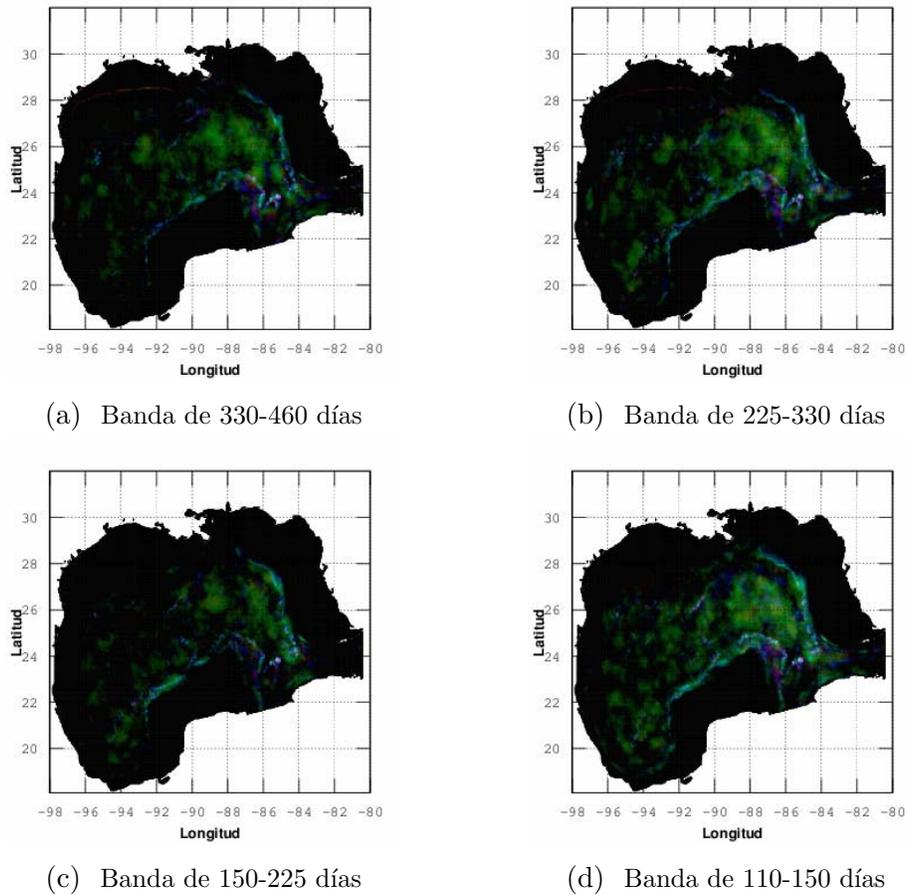


Figura 3.24: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la componente vertical de la velocidad. (a) Banda de 330-460 días con amplitud de $6.26 \cdot 10^{-4} m/s$; (b) Banda de 225-330 días con amplitud de $5.76 \cdot 10^{-4} m/s$; (c) Banda de 150-225 días con amplitud de $7.08 \cdot 10^{-4} m/s$ y (d) Banda de 150-225 días con amplitud máxima de $5.29 \cdot 10^{-4} m/s$.

características similares, siendo una de éstas la influencia del modo-0 dentro de la cuenca del golfo, principalmente al este por la zona de influencia de la Corriente de Lazo. Se observa un incremento de la amplitud al disminuir los periodos en distintas bandas.

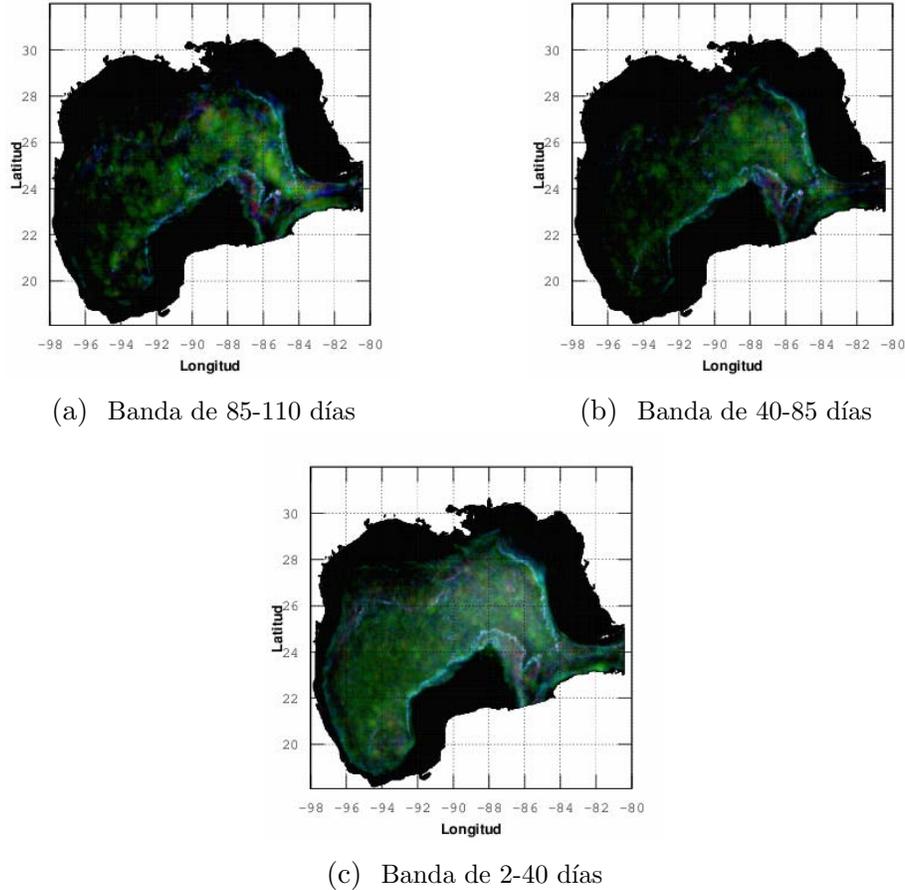


Figura 3.25: Mapas de amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la componente vertical de la velocidad. (a) Banda de 85-110 días con amplitud máxima de $7.77 \cdot 10^{-4} m/s$; (b) Banda de 40-85 días con amplitud máxima de $5.91 \cdot 10^{-4} m/s$ y (c) Banda de 2-40 días con amplitud máxima de $3.79 \cdot 10^{-4} m/s$.

La banda de 2-40 días muestra una distribución de amplitudes congruente con el efecto de mareas que mueve toda la columna de agua, provocando que las zonas más profundas muestren una mayor variación del flujo.

En los taludes más escarpados de la plataforma continental se observa un color cían, esto se puede explicar con saltos hidráulicos que se producirían entre masas de agua de diferentes densidades entre la plataforma y la cuenca.

En la plataforma noroeste del golfo, en frente de Texas-Luisiana, se observa una línea naranja-amarilla, más fuerte en las bandas de mayores periodos. Lo más importante de este resultado es que se encuentra dentro de la plataforma, justo donde hay una contracorriente respecto a la circulación global del golfo –donde esta sería una circulación en sentido de las manecillas siguiendo las isobatas–. Viendo todos los modos del apéndice C se observa que esta característica corresponde al modo-2.

3.2.3. Componentes de la Temperatura

En las figuras 3.26 y 3.27 se observa el color verde sobre todas las plataformas continentales. Esto indica que las oscilaciones de la temperatura en las diferentes bandas sobre las plataformas son homogéneas sobre la vertical principalmente. Este resultado se debe a que las masas en las columnas de agua en la plataforma son menores que en la cuenca del golfo; por lo tanto, con la misma fuente de calor es más fácil cambiar la temperatura de toda la columna de agua en la plataforma que en la cuenca.

Para oscilaciones térmicas con periodos menores a los 7 meses en los bordes de las plataformas y en el interior se observan colores cían y violeta, que indican contribuciones de los modos $m=1$ y $m=2$. Esto, con la particularidad de que los cambios de amplitud de los modos $m=1$ y $m=2$ son paralelos a las isobatas en general, indica que el transporte de agua de la plataforma a la cuenca y de la cuenca a la plataforma es menor que la disipación de la temperatura, lo que es congruente al campo de velocidades horizontales promedio (Fig. 3.1) y los resultados anteriores de las oscilaciones de las velocidades donde éstas son en su mayoría paralelas a las isobatas en los bordes de las plataformas; dando así, que las masas de agua sobre las plataformas con el resto del golfo tienden a comportarse en forma separa como una frontera fija.

Las amplitudes de las oscilaciones con periodos menores a 7 meses de los modos $m=1$ y $m=2$ dentro de la cuenca del golfo, se vuelven comparables con

los cambios sobre las plataformas, representados éstos en color morado (Fig. 3.26c); las amplitudes se concentran en la zona de influencia de la Corriente de Lazo, que se ve más claro en la figura D.5 del apéndice D.

Este resultado se puede asociar a la separación de vórtices y la migración sur-norte de la Corriente de Lazo (Sturges [18]); sin embargo, es incongruente con las bandas de periodos mayores a 7 meses pues en éstas las señales de

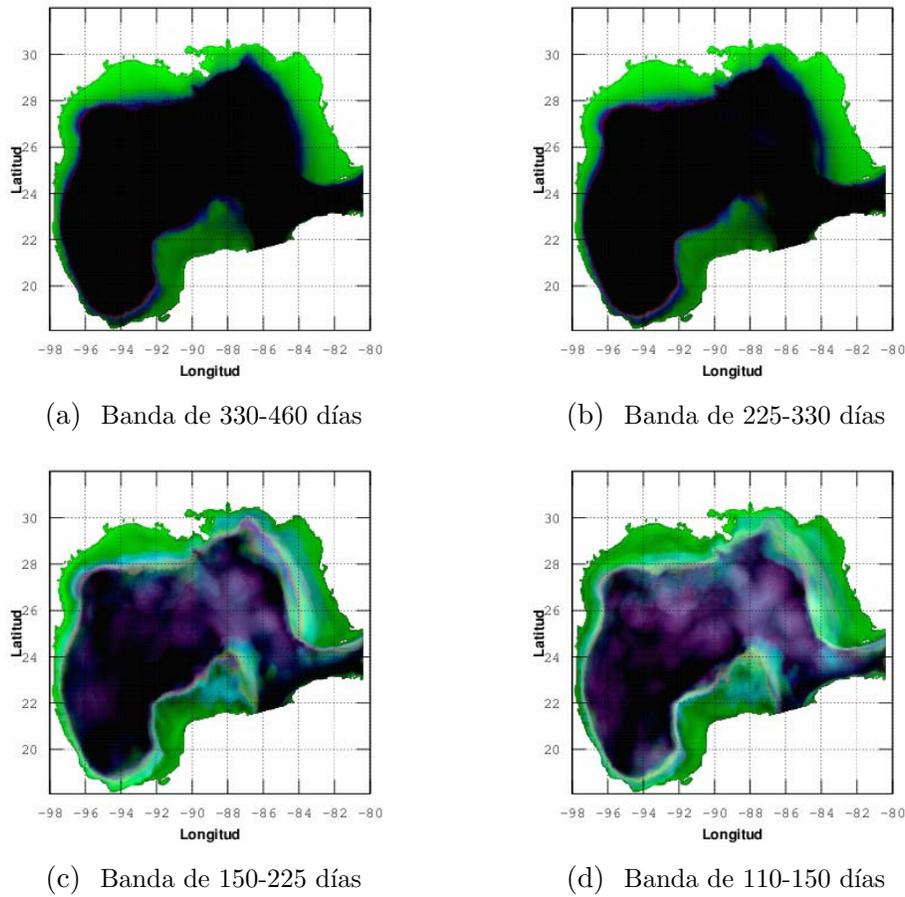
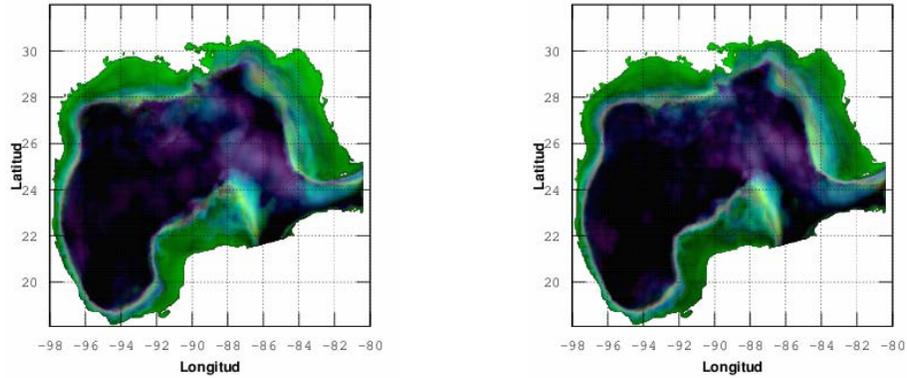
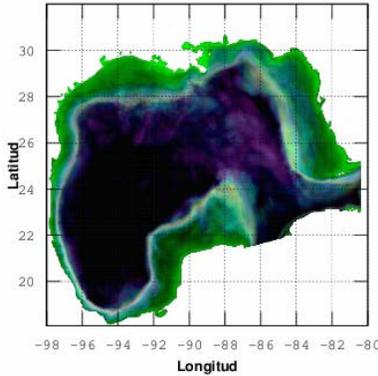


Figura 3.26: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la temperatura. (a) Banda de 330-460 días con amplitud máxima de $9.50^{\circ}C$; (b) Banda de 225-330 días con amplitud máxima de $6.45^{\circ}C$; (c) Banda de 150-225 días con amplitud máxima de $1.40^{\circ}C$ y (d) Banda de 150-225 días con amplitud máxima de $0.96^{\circ}C$.



(a) Banda de 85-110 días

(b) Banda de 40-85 días



(c) Banda de 2-40 días

Figura 3.27: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la temperatura. (a) Banda de 85-110 días con amplitud máxima de $1.07^{\circ}C$; (b) Banda de 40-85 días con amplitud máxima de $1.02^{\circ}C$ y (c) Banda de 2-40 días con amplitud máxima de $0.63^{\circ}C$.

estos dos fenómenos son mayores.

3.2.4. Componentes de la Salinidad

Los cambios periódicos de la salinidad son muy distintos en zonas costeras estuarinas respecto a mar abierto. Dada esta diferencia, en esta sección se

presentan los resultados en escala logarítmica a dos ordenes de magnitud, es decir, que el color negro representa oscilaciones menores o iguales a dos ordenes de magnitud respecto a la amplitud de oscilación máxima en la banda estudiada. La figura 3.28 muestra una guía para la interpretación de los resultados.

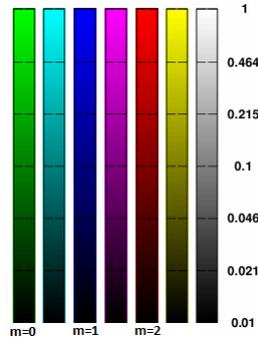


Figura 3.28: Escala logarítmica para la composición RGB de de las amplitudes de oscilación de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$.

En las figuras 3.29 y 3.30 se observa que las mayores amplitudes de variación de la salinidad se deben a los aportes de agua dulce continental, los cuales están gobernados temporalmente por estas descargas. Este resultado puede observarse mejor viendo separado el modo-0 en cada una de las bandas, que se encuentran en el apéndice E. De los resultados se observa que sobre las plataformas continentales el modo-0 es predominante, para todas las bandas.

En las bandas de 330-460 y 225-330 días se puede observar que las oscilaciones sobre el norte del Banco de Yucatán son casi nulas con respecto a las demás plataformas que rodean a la cuenca. Esto indica que las variaciones en esta escala temporal no logran ser mayores a las corrientes que renuevan las masas de agua sobre el banco. Bajo este argumento se puede justificar la disminución en las oscilaciones sobre la plataforma en la banda de 2-40 días dejando solo señales de mayor amplitud en los ríos

Se observan mayores amplitudes de los modos $m=1$ y $m=2$ en los bordes de las plataformas y en las regiones donde se presenta un cizallamiento en el campo de las velocidades promedio (Fig.3.1).

En el apéndice E se observa, en los modos mayores a $m=0$, la influencia

del río Misisipi en todas la bandas estudiadas aunque al ser relativamente un evento puntual tenemos que los modos $m=0$, 1 y 2 son suficientes para representar en forma global el comportamiento en el golfo.

Se pueden apreciar en las bandas de períodos de 110-150 días y 85-110 días (Figs. 3.29d y 3.30a) oscilaciones de la salinidad con los modos $m=1$ y $m=2$ en la cuenca del golfo frente al río Misisipi hasta el Estrecho de Florida. El

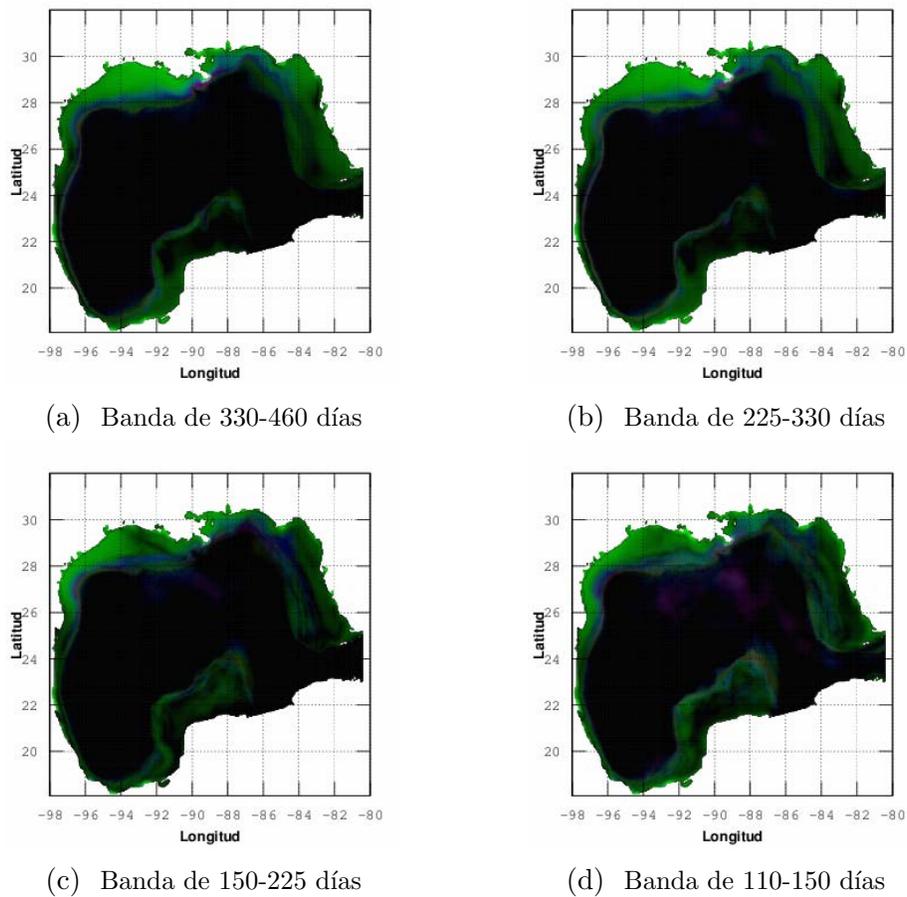
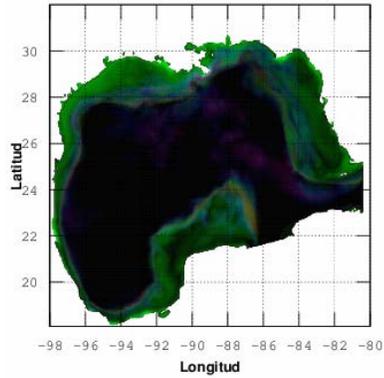
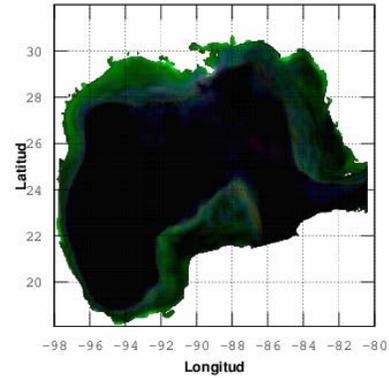


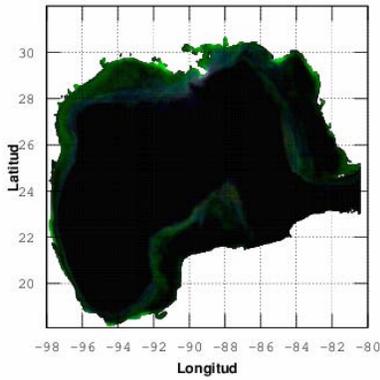
Figura 3.29: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la salinidad. (a) Banda de 330-460 días con amplitud máxima de $8.406ups$; (b) Banda de 225-330 días con amplitud máxima de $5.953ups$; (c) Banda de 150-225 días con amplitud máxima de $4.900ups$ y (d) Banda de 150-225 días con amplitud máxima de $2.611ups$.



(a) Banda de 85-110 días



(b) Banda de 40-85 días



(c) Banda de 2-40 días

Figura 3.30: Amplitudes de los modos $m=0$, $m=1$ y $m=2$ de la salinidad. (a) Banda de 85-110 días con amplitud máxima de $1.790ups$; (b) Banda de 40-85 días con amplitud máxima de $2.270ups$ y (c) Banda de 2-40 días con amplitud máxima de $2.165ups$.

origen de este patrón es poco claro por lo que se podría suponer un error numérico o una dinámica compleja.

Capítulo 4

Discusiones y Conclusiones

En este capítulo, se resumen los resultados, alcances, límites y sugerencias para mejorar este estudio. Para esto, se presentan por regiones del golfo en el siguiente orden: características globales; plataformas continentales; cuenca del Golfo de México; Bahía de Campeche y por último acoplamientos entre las diferentes regiones del golfo.

Este trabajo es el primero en abarcar todo el golfo y sus variaciones temporales. Hay que recalcar que no existen trabajos previos que estudien la hidrografía de todo el Golfo de México por modos de perfiles verticales o su estructura periódica sin dividirlo por zonas; como en las diversas investigaciones sobre las regiones donde se ubican los procesos más energéticos. Existen varios trabajos que usan datos para estudiar la dinámica de un flujo por modos, regularmente en zonas pequeñas como en ríos, lagos o bahías; habiendo pocos trabajos sobre áreas grandes como el de Gent [5].

Globalmente, se observó que para la descomposición propuesta son suficientes los primeros tres modos para representar los perfiles de las variables estudiadas para todo tiempo. Esto se debe a que las amplitudes de los modos mayores a $m=2$ son menores en ordenes de magnitud.

Por lo anterior se puede hacer un modelo de la hidrodinámica del golfo utilizando los primeros tres modos, esto implicaría hacer un modelo bidi-

mensional usando tres funciones bidimensionales. Esto significa que en el golfo los resultados del HYCOM (modelo tipo *z-layer*) son similares a resultados obtenidos por modelos integrados en la vertical con tres o menos capas. Lo anterior se justifica porque toda serie de cosenos armónicos es similar a m-masas acopladas por resortes lo que indica que los primeros tres modos representan tres masas o tres capas.

Estas tres capas usualmente pueden ser identificadas como la capa de mezcla, la capa entre la termoclina estacional y la termoclina permanente y la capa por debajo de la termoclina permanente. Lo importante de este resultado es que no es necesario fragmentar *a priori* en capas para hacer un modelo que represente a todo el golfo, sino que se puede estudiar el golfo en dos dimensiones proponiendo a cada variable como:

$$\begin{aligned}\vec{u}(x, y, z, t) &= \vec{u}_0(x, y, t) + \vec{u}_1(x, y, t)\cos\left(\pi\frac{z}{H}\right) + \vec{u}_2(x, y, t)\cos\left(2\pi\frac{z}{H}\right) \\ T(x, y, z, t) &= T_0(x, y, t) + T_1(x, y, t)\cos\left(\pi\frac{z}{H}\right) + T_2(x, y, t)\cos\left(2\pi\frac{z}{H}\right) \\ S(x, y, z, t) &= S_0(x, y, t) + S_1(x, y, t)\cos\left(\pi\frac{z}{H}\right) + S_2(x, y, t)\cos\left(2\pi\frac{z}{H}\right)\end{aligned}$$

Dando así una propuesta y justificación a hacer modelos económicos respecto a una malla tridimensional. Queda como interrogante si este modelo puede representar eventos que modifiquen abruptamente las corrientes locales [9] para hacer herramientas de diagnóstico y predicción temprana.

Este modelo puede ser simplificable descartando el modo-2. Considerando que sus amplitudes son en promedio menores a las de los modos $m=0$ y $m=1$ en todo el golfo.

Sobre las plataformas continentales el modo-0 es dominante sobre todas las oscilaciones de los perfiles estudiados excepto en la velocidad vertical. En las componentes horizontales de la velocidad tenemos que las mayores variaciones del modo-0 sobre las plataformas suceden con periodos menores a los 40 días.

Al oeste sobre la plataforma de Florida se observa siempre un compor-

tamiento principalmente del modo-0. Este efecto sobre la plataforma se puede explicar dado que parte de la Corriente de Lazo tiene que pasar sobre la plataforma para seguir su curso por el Estrecho de Florida. Siendo la Corriente de Lazo una corriente intensa, el cambio de la profundidad de la cuenca a la plataforma de Florida obliga a que las fluctuaciones de la Corriente de Lazo se vean magnificadas sobre la plataforma respecto con las zonas más profundas.

Al este de la plataforma de Yucatán en el talud, aproximadamente entre los 400 y 1200 *m* de profundidad, se observaron consistentemente fluctuaciones de las componentes horizontales de la velocidad sin importar los periodos de las fluctuaciones. Siendo allí donde se encuentran las amplitudes máximas de las oscilaciones. Una explicación a estas magnitudes se debe a la reducción de la columna del agua –como al oeste de la plataforma de Florida– debido a que el gradiente de la profundidad es pronunciado y continuo se observan mayores amplitudes de los modos $m=1$ y $m=2$ en color cian claro como se muestra en las figuras de 3.10a a la 3.23. Al ser esta zona tan activa, junto con el oeste de la plataforma de Florida, podemos asociar las variaciones a efectos de las fluctuaciones de la Corriente de Lazo.

Una propuesta interesante sería estudiar el transecto del punto $83^{\circ}W$, $26^{\circ}N$ al punto $88^{\circ}W$, $23^{\circ}N$ con datos medidos dado que éstos servirían para estudiar qué y cómo son las fluctuaciones de la Corriente de Lazo que entran y salen de la cuenca del golfo pensando que las plataformas son fronteras semipermeable.

En el sur de la plataforma de Texas-Luisiana se observan contribuciones de los modos $m=1$ y $m=2$ de la velocidad horizontales, las cuales formaron franjas paralelas a las isobatas en las bandas de 225-330 días y 330-460 días. La formación de franjas esta confinada desde el talud de la plataforma hasta la franja que forma las oscilaciones del modo $m=2$ de las velocidades verticales en dichas frecuencias, figuras C.1c y C.1c. La circulación al norte de esa franja ha sido estudiada por Zhang-Hetland [23], donde observan que el patrón de circulación es gobernado fundamentalmente por el clima local, por lo que se observan amplitudes considerables sobre la plataforma en la banda de periodos anuales.

Por lo anterior se propone la hipótesis de que las franjas sobre la plataforma

de Texas-Luisiana figuras C.1c y C.3c, son el límite entre la zona de influencia entre los giros desprendidos de la Corriente de Lazo y las zonas donde predominan los forzamientos atmosféricos locales. La demostración de esta hipótesis requiere de un estudio con datos de un mayor tiempo y no solo de los cinco años estudiados.

En las plataformas de Veracruz, Tamaulipas y Texas se observa el mismo patrón de franjas que en Texas-Luisiana para los mismos periodos de oscilación pero no existe una franja de oscilación vertical del modo-2 que subdivida la circulación sobre las plataformas.

Consistentemente en los bordes de las plataformas se observan oscilaciones del modo-0 en la componente horizontal, variando su intensidad dependiendo del periodo de oscilación. Esto se explica al ser el golfo una cuenca y el transporte en las plataformas es menor al de la cuenca, entonces los taludes se pueden considerar como las paredes semipermeables de la cuenca, por lo cual la circulación y la oscilación de sus perfiles tienden a ser paralelos. Para la banda de periodos de 2-40 días hay una mayor contribución dando un color cian. Este resultado puede ser interpretado de dos maneras: a) los perfiles de la velocidad varían más en su forma en esta zona o b) para la continuidad de los perfiles dentro y fuera de la plataforma se genera una distribución de las amplitudes en los modos, como lo haría la transformación de la función Heviside o un pulso rectangular [8].

Respecto a la temperatura dentro de las plataformas tenemos que las variaciones son principalmente de modo-0 con un gradiente negativo respecto de la costa hacia el talud. Teniendo la mayor variación en el periodo anual siendo el cambio más intenso a mayor latitud.

Para las oscilaciones de la temperatura con periodos de 225 a 460 días, se tiene que en las plataformas de Florida, noreste del Banco de Yucatán y en frente de Tabasco las variaciones no ocupan toda el área de la plataforma. Este efecto se puede explicar considerando que la circulación y las oscilaciones de la circulación en estas zonas son paralelas al contorno de las oscilaciones de la temperatura teniendo que la dispersión térmica de las oscilaciones térmicas sobre la plataforma no compiten contra la advección en este rango de periodos.

Para períodos menores a 225 días el modo-0 sigue abarcando todas las plataformas teniendo ahora contribuciones de los modos $m=1$ y $m=2$. Estas contribuciones forman patrones paralelos a las isobatas a partir del talud y disminuyendo hacia la costa.

En los bordes de las plataformas se aprecia un color blanquecino que se puede explicar como una distribución de las amplitudes en los modos que mantiene la continuidad de la plataforma con la cuenca y de la plataforma con la Bahía de Campeche.

Se puede observar que las oscilaciones del perfil de la salinidad sobre la plataforma son principalmente barotrópicas (modo-0) sin importar el período de oscilación. Teniendo que las diferencias de amplitudes sobre la plataforma son mínimo de dos ordenes de magnitud.

Se observa que las variaciones de los modos de la salinidad con períodos menores a los 40 días se concentran en los aportes de agua dulce; así como, en los demás períodos pero sin extenderse sobre toda la plataforma.

Otro punto interesante en las distribuciones de las amplitudes de los modos de la salinidad sobre las plataformas es su concentración en los bordes de éstas. Además de unas franjas moradas y azules opacas dentro de las plataformas cerca de los bordes, lo cual indicaría que en esas zonas la dispersión y advección de la salinidad no se comportan como las columnas de aguas vecinas. Esto dependiendo de la banda de períodos.

En la cuenca del golfo las oscilaciones de la velocidad horizontal se concentran fundamentalmente en la zona de influencia de la Corriente de Lazo que penetra en la cuenca. Las oscilaciones son fundamentalmente del modo-0 en las zonas profundas y en las zonas con gradiente moderado de la profundidad se tienen contribuciones de los modos superiores. Además se observan consistentemente en los diferentes rangos de períodos una separación de la distribución de amplitudes del modo-0 dividiendo la cuenca en una zona este y oeste, estando la división por el meridiano 88° W donde el campo de velocidades promedio de los modos $m=0$ y $m=1$ son intensas y van en dirección noroeste, véase en las figuras 3.1 y 3.2. Considerando esto se puede inferir que la corriente promedio es lo suficientemente intensa para dividir las oscilaciones de las velocidades zonales en la cuenca. En esta división se ven

mayores amplitudes de los modos $m=1$ y $m=2$.

En la Bahía de Campeche se observa que las amplitudes de oscilación de las variables estudiadas son menores respecto a las oscilaciones de la cuenca pero esto no significa que no haya oscilaciones. Se podría conjeturar que las principales variaciones de la dinámica en la bahía suceden a diferente escala respecto a la cuenca del golfo aunque sea su vecino inmediato y tenga una frontera muy grande.

Consideraciones

Considerando todo lo anterior, los resultados obtenidos dependen directamente de la calidad y cantidad de los datos. Si bien, es imposible tener mediciones *in situ* para toda la extensión del golfo y un monitoreo constante, podemos tomar como primera aproximación los resultados de este trabajo para ponderar las fluctuaciones de amplitud, período y estructura vertical para realizar campañas de muestreos con el fin de adquirir datos en las zonas de mayor fluctuación.

Otro factor importante es la escala temporal, siendo que la banda de alta frecuencia (períodos de 2-40 días) es una resolución burda para hacer predicciones a corto plazo; por lo tanto, si se aumenta la densidad de datos temporales, además de aplicar un filtro pasa altos para sólo analizar las oscilaciones de períodos menores a 40 días, se podría repetir el mismo algoritmo para encontrar características locales en las oscilaciones del golfo en una escala más fina.

Un ejemplo de oscilaciones de escala más fina son los seiches de ondas internas que se podrían ver con este mismo procedimiento dado que las oscilaciones de éstos mueven toda la columna de agua.

Si se consideraran seiches de ondas internas en una capa profunda en transectos dentro de la cuenca del golfo donde se encontraron las mayores amplitudes de oscilación, figura 4.1a, pensando que ahí hay una barrera, tendríamos períodos de oscilación en un rango de horas. Esto considerando ondas gravitacionales internas teniendo que la velocidad de estas ondas está dada por

la expresión:

$$c = \sqrt{g' \bar{H}_0} \quad (4.1)$$

con g' la gravedad reducida y \bar{H}_0 la profundidad promedio respecto al nivel donde se define g' .

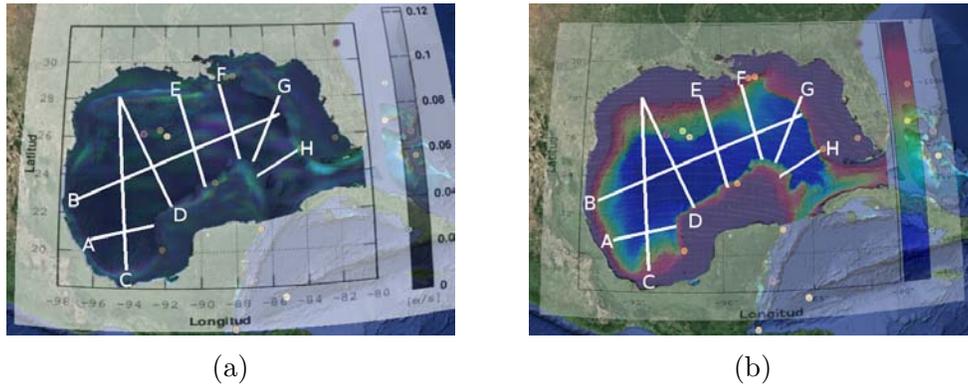


Figura 4.1: Transectos dentro de la cuenca del Golfo de México donde se encontraron las mayores amplitudes. Cuyas distancias son aproximadamente: A=370 km, B=1,237 km, C=985 km, D=695 km, E=545 km, F=445 km, G=414 km e I=278 km.

Por otro lado, realizando este mismo trabajo con una serie de datos mayores a 20 años se podrían observar acoplamiento de las oscilaciones multi-decadal del Atlántico en el Golfo de México. Además, con una base de datos más grande se puede realizar este trabajo como un análisis de Fourier de ventana móvil para observar si existe variación en las frecuencias de oscilación y/o amplitudes de la circulación para ver si hay una variación climática y cómo es ésta.

Conclusiones

Los modos principales del golfo son oscilaciones barotrópicas sobre la plataforma continental y en el centro de la cuenca del golfo para las velocidades.

Las oscilaciones de máxima amplitud suceden en los bordes de la plataforma colindantes con la Corriente de Lazo.

En el Golfo de México, los periodos de las oscilaciones de 40 a 460 días pueden ser agrupados en 6 bandas tal que estén bien diferenciados los conjuntos de máxima amplitud de oscilación.

Las oscilaciones de la temperatura suceden principalmente sobre la plataforma a lo largo de toda la vertical. Con mayores amplitudes en norte que en el sur en el periodo anual, lo cual esta ligado al gradiente de luz que recibe.

Las oscilaciones de las salinidad en las diferentes regiones del golfo suceden en escalas de magnitud muy diferente. Por lo que sería conveniente realizar solo estudios regionales.

Los resultados de este trabajo pueden ser utilizados para cualquier trabajo que requiera información sobre las oscilaciones típicas de los perfiles de velocidad, de temperatura o de salinidad a lo largo de la columna de agua.

Por la simplicidad del método empleado, éste puede ser exportado para el análisis de otras zonas donde se desee saber cuales son las simetrías en el sistema respecto a la batimetría y su circulación, siempre que se posea una base de datos y el poder de computo para trabajarla.

Apéndice A

Resultados en la componente este-oeste

A.1. Banda temporal de 330-460 días

En las figuras A.1 y A.2 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.122m/s$.

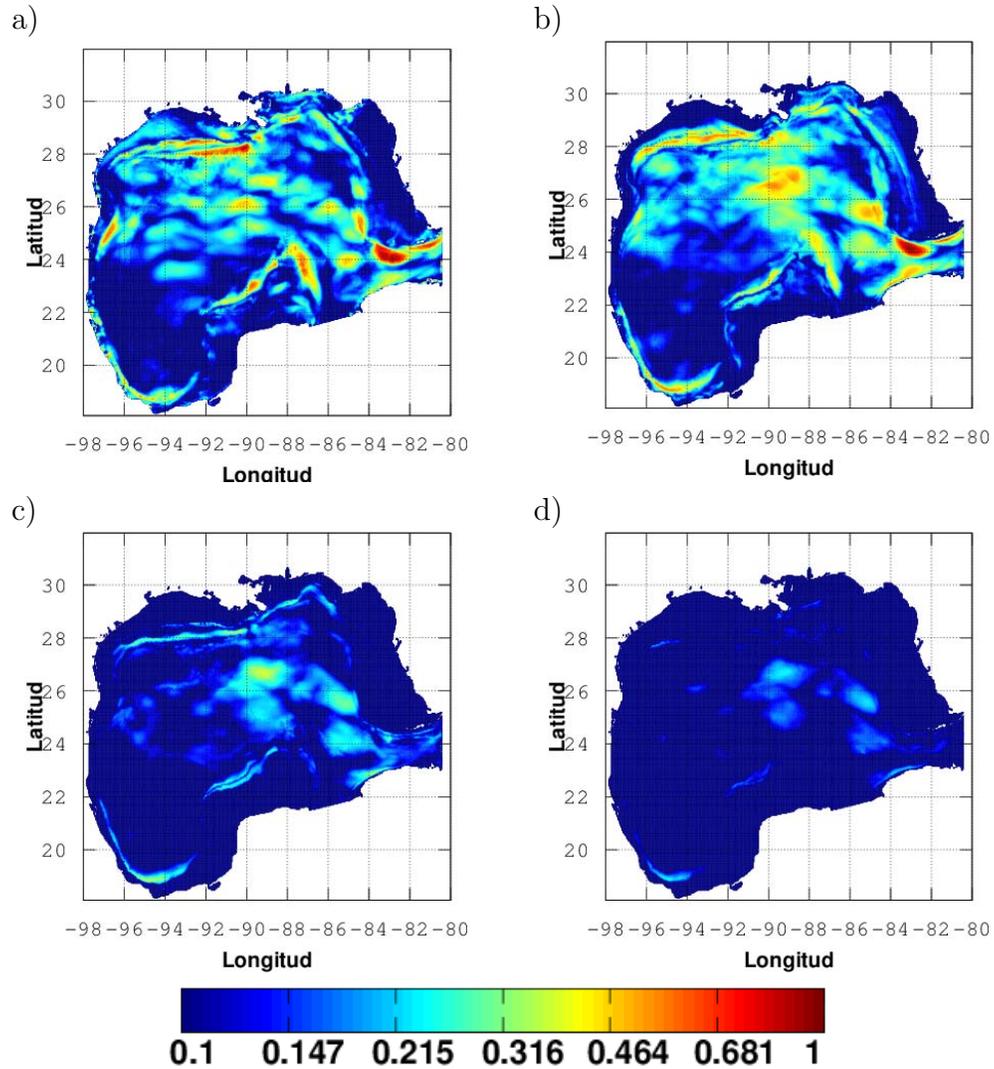


Figura A.1: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

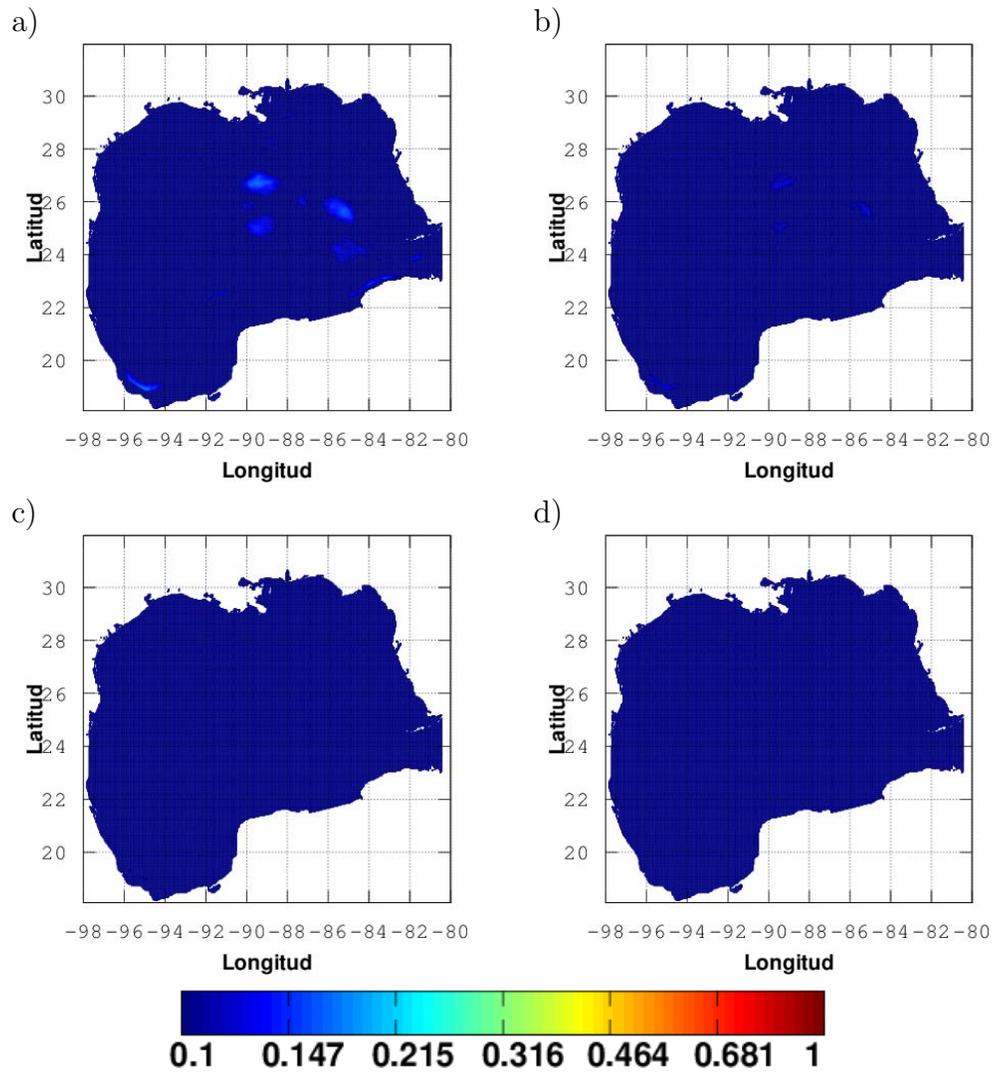


Figura A.2: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

A.2. Banda temporal de 225-330 días

En las figuras A.3 y A.4 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.167m/s .

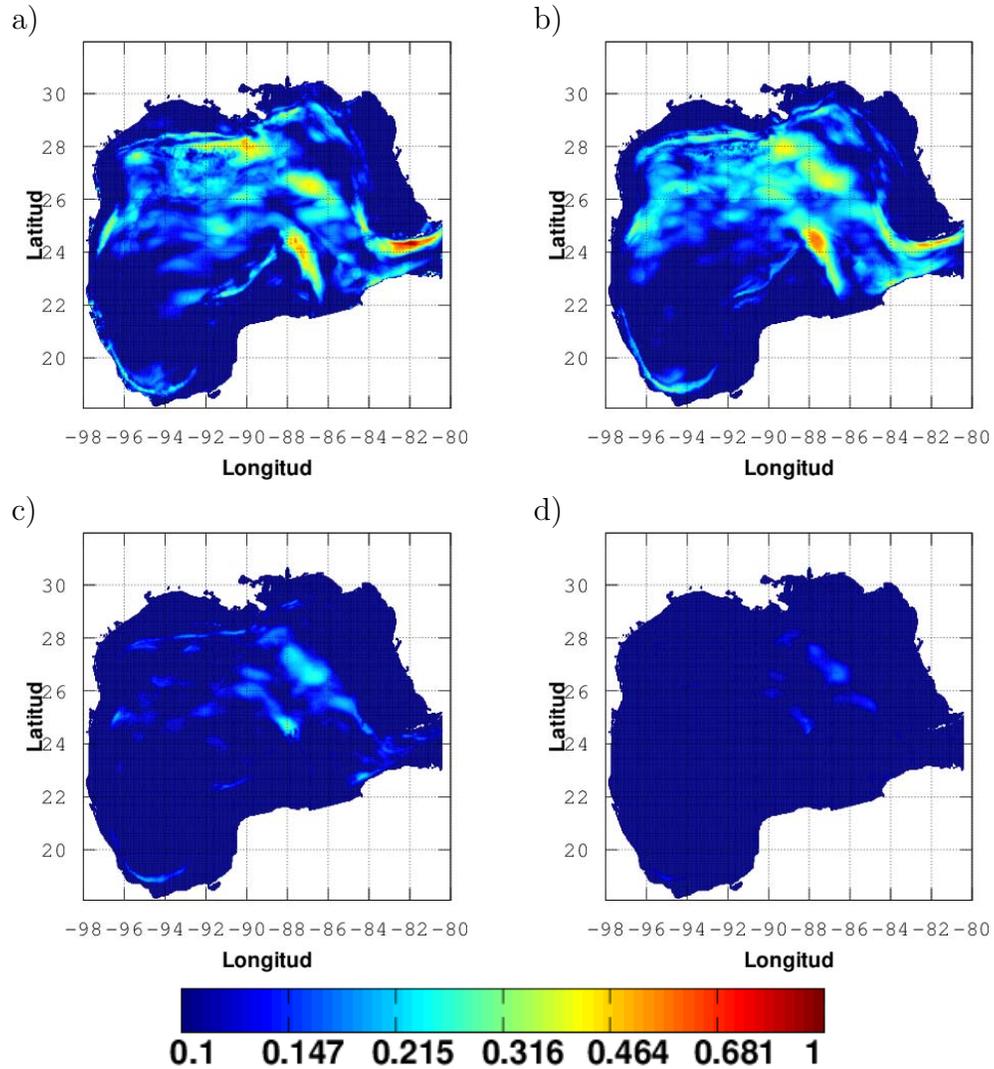


Figura A.3: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

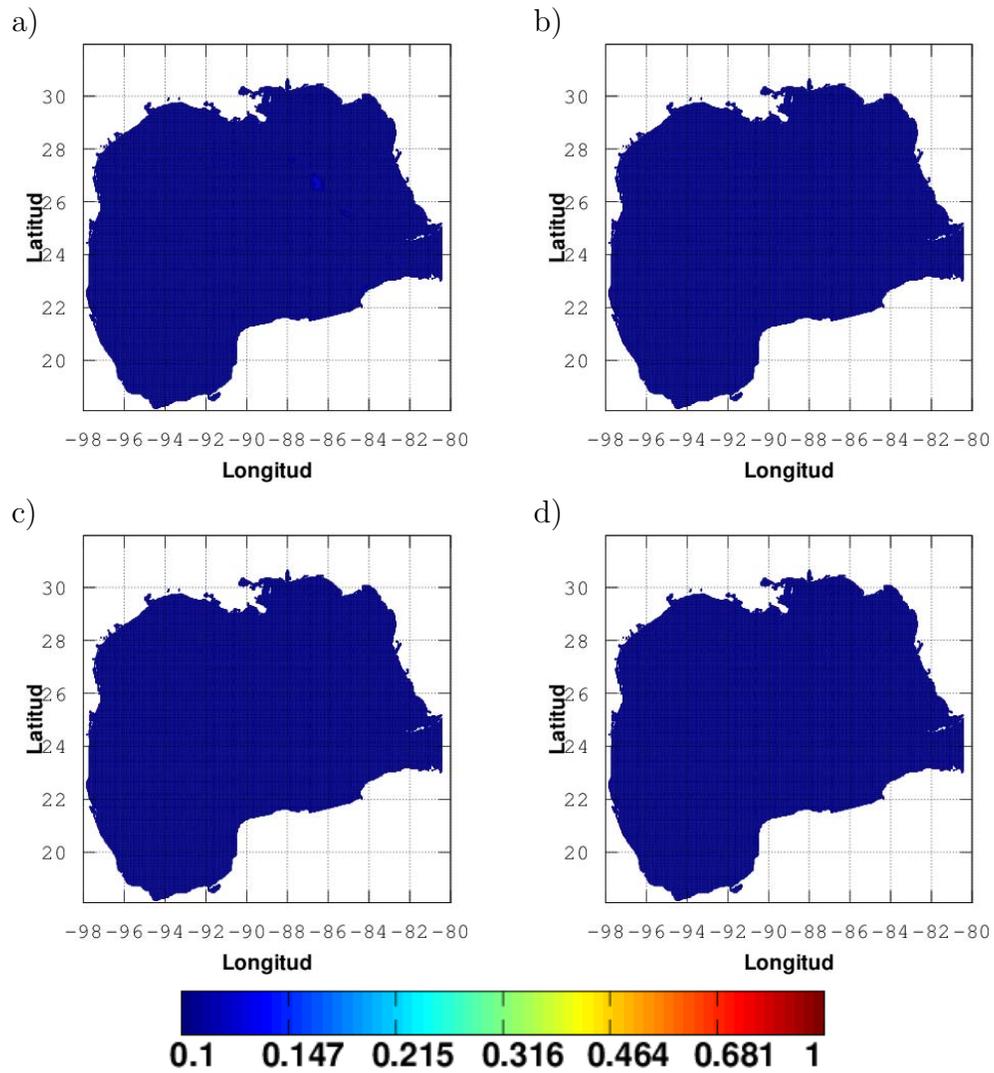


Figura A.4: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

A.3. Banda temporal de 150-225 días

En las figuras A.5 y A.6 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.159m/s .

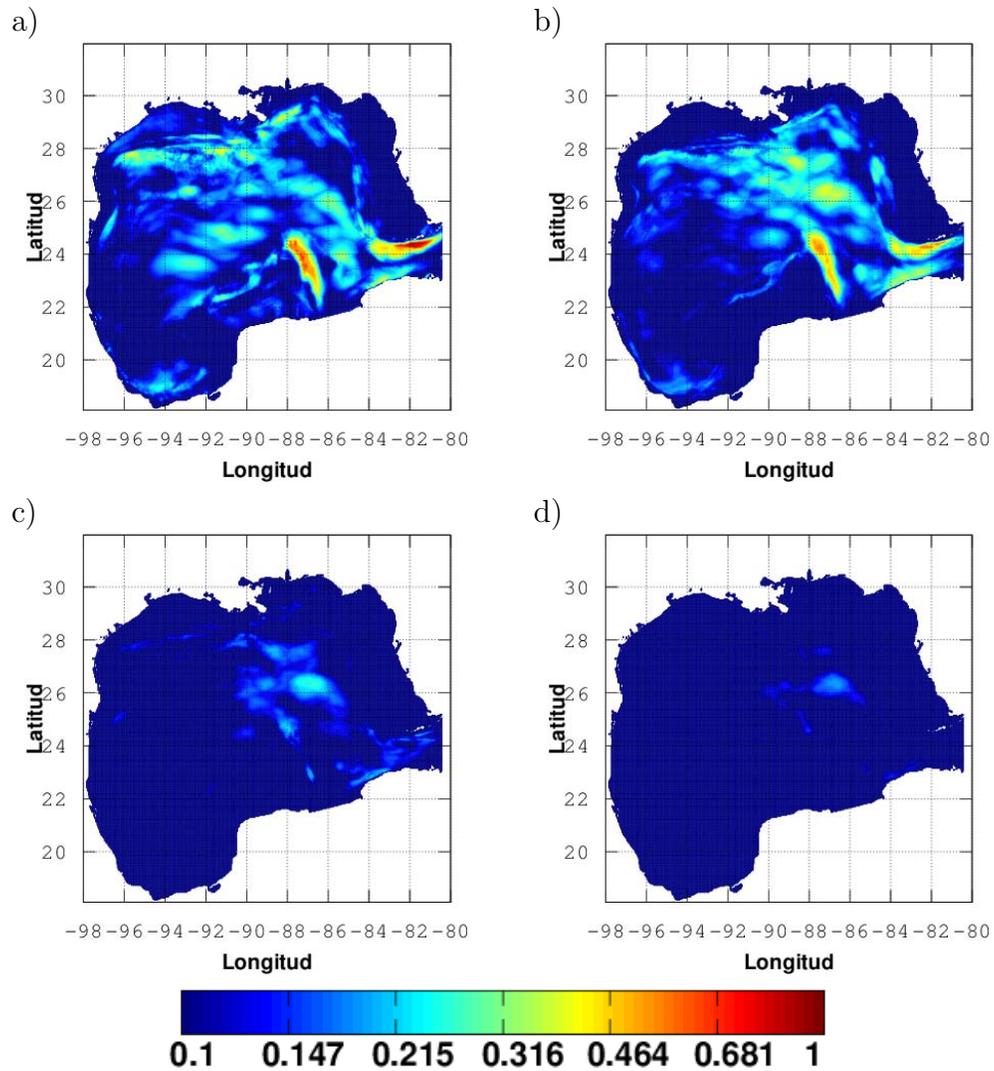


Figura A.5: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

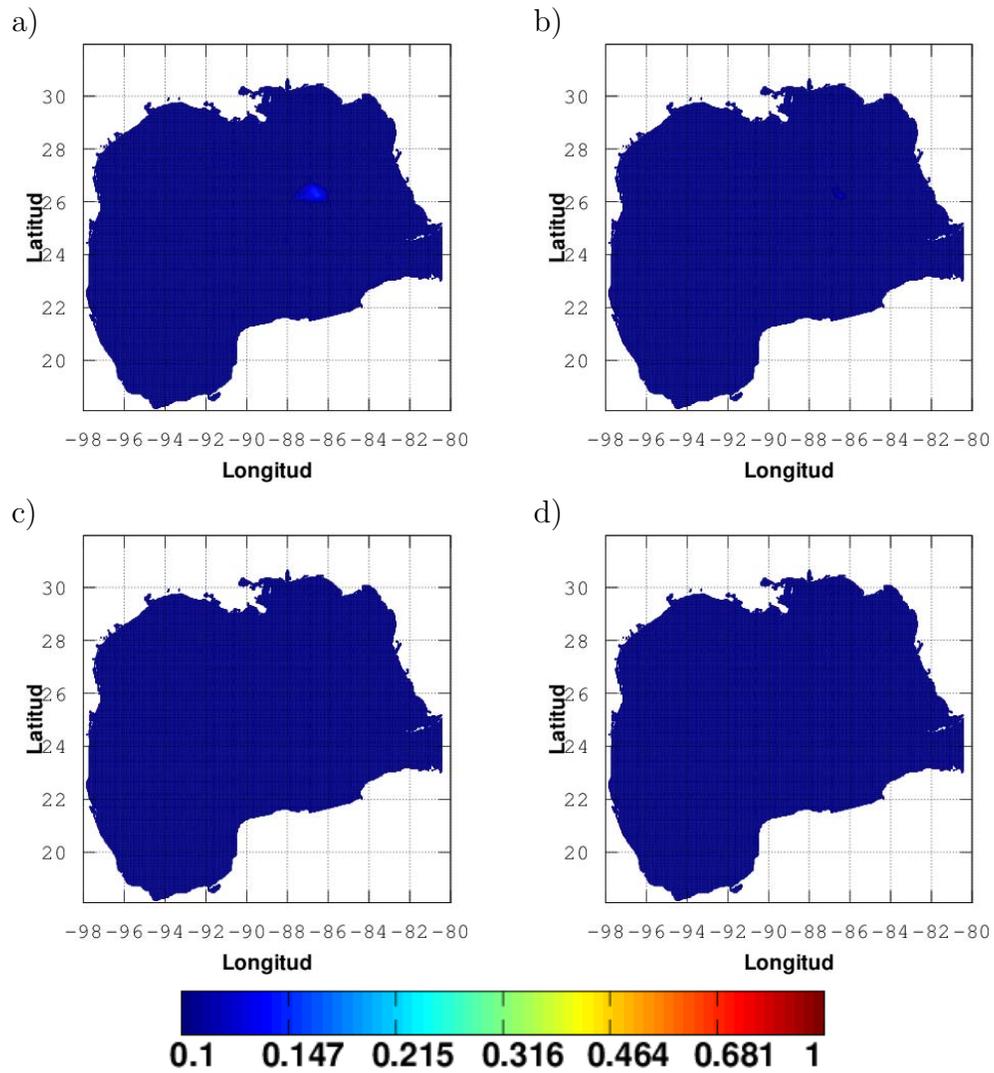


Figura A.6: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

A.4. Banda temporal de 110-150 días

En las figuras A.7 y A.8 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.140m/s$.

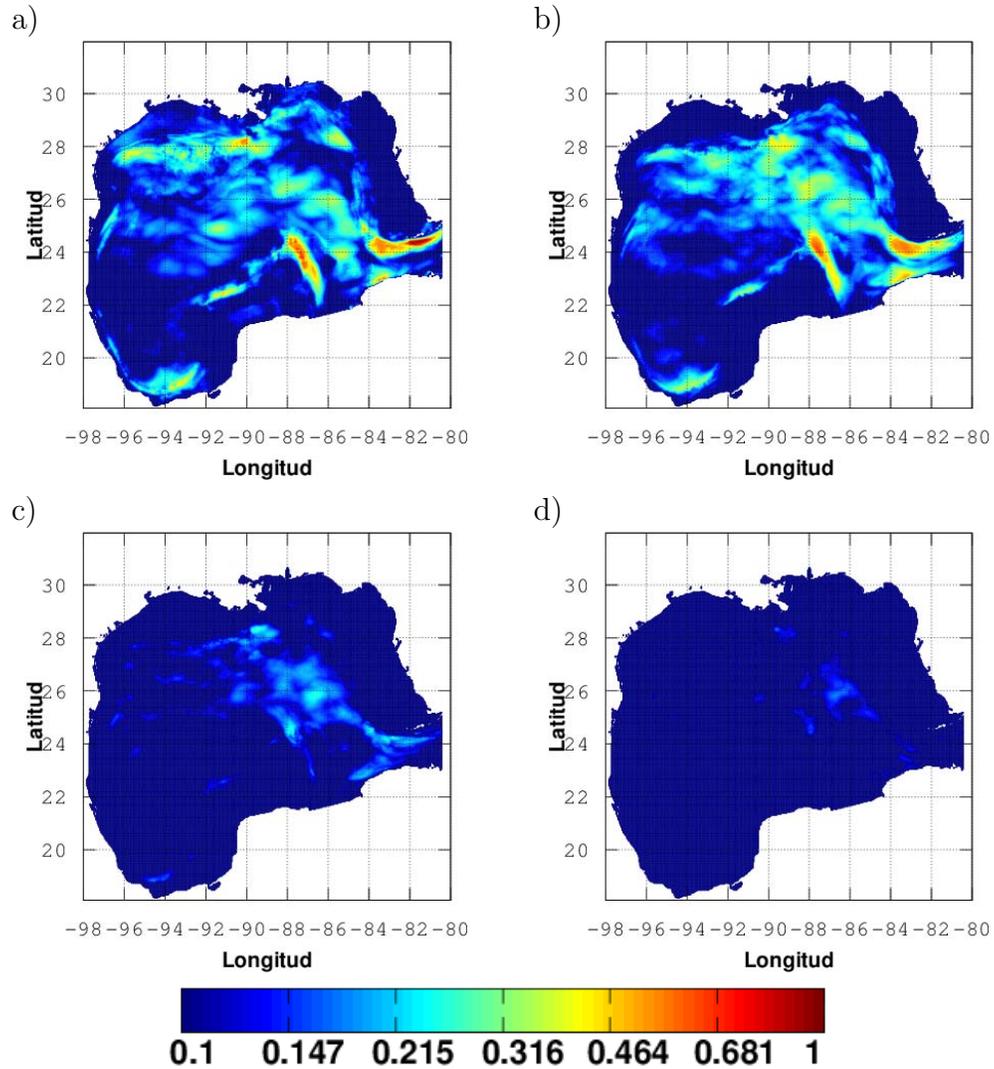


Figura A.7: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

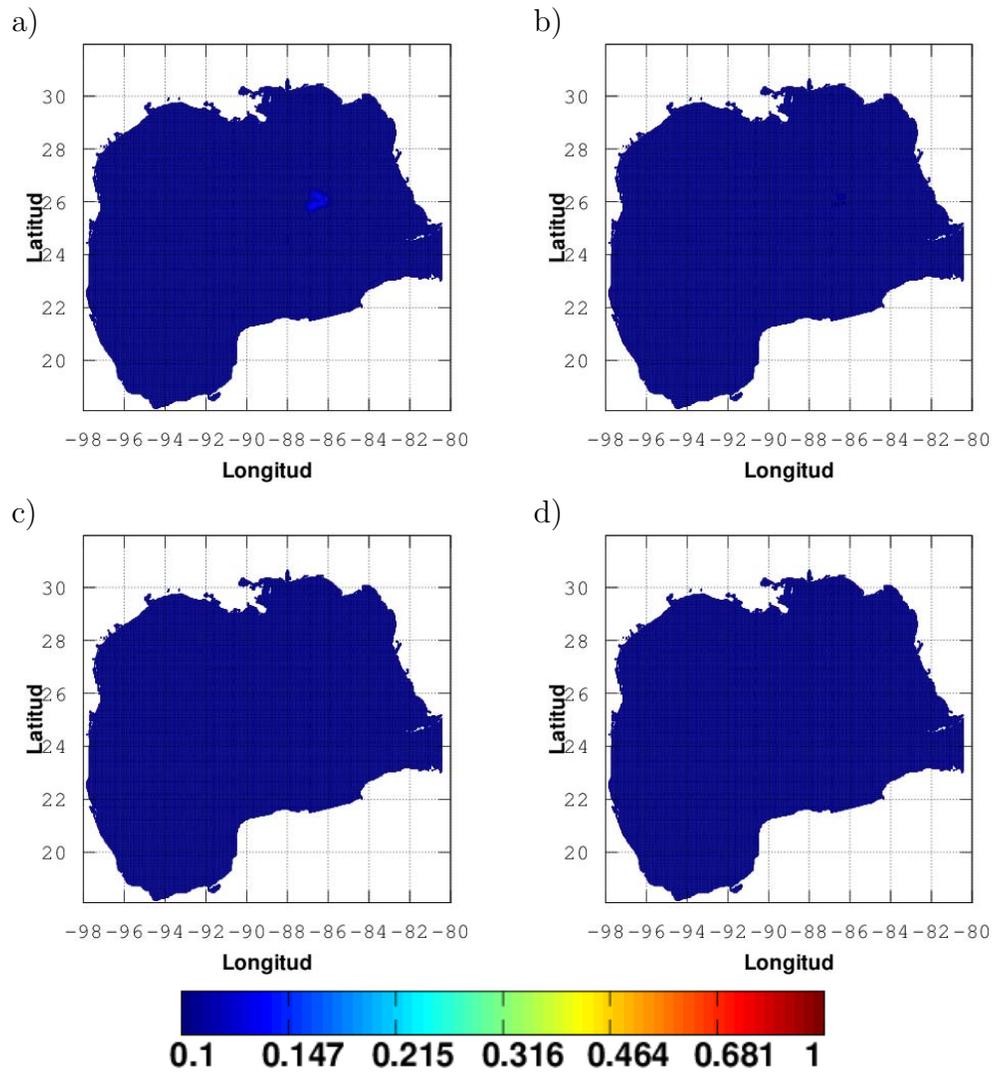


Figura A.8: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

A.5. Banda temporal de 85-110 días

En las figuras A.9 y A.10 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.193m/s$.

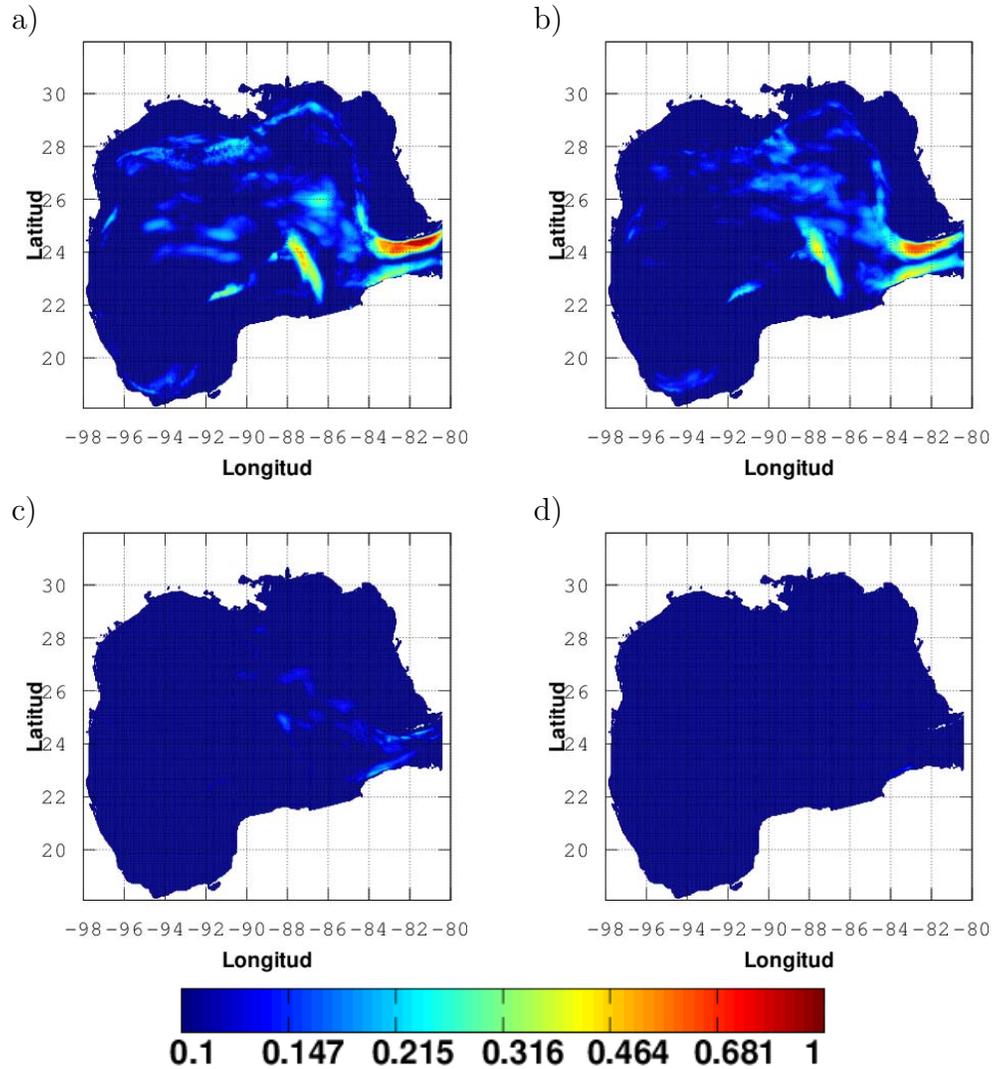


Figura A.9: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

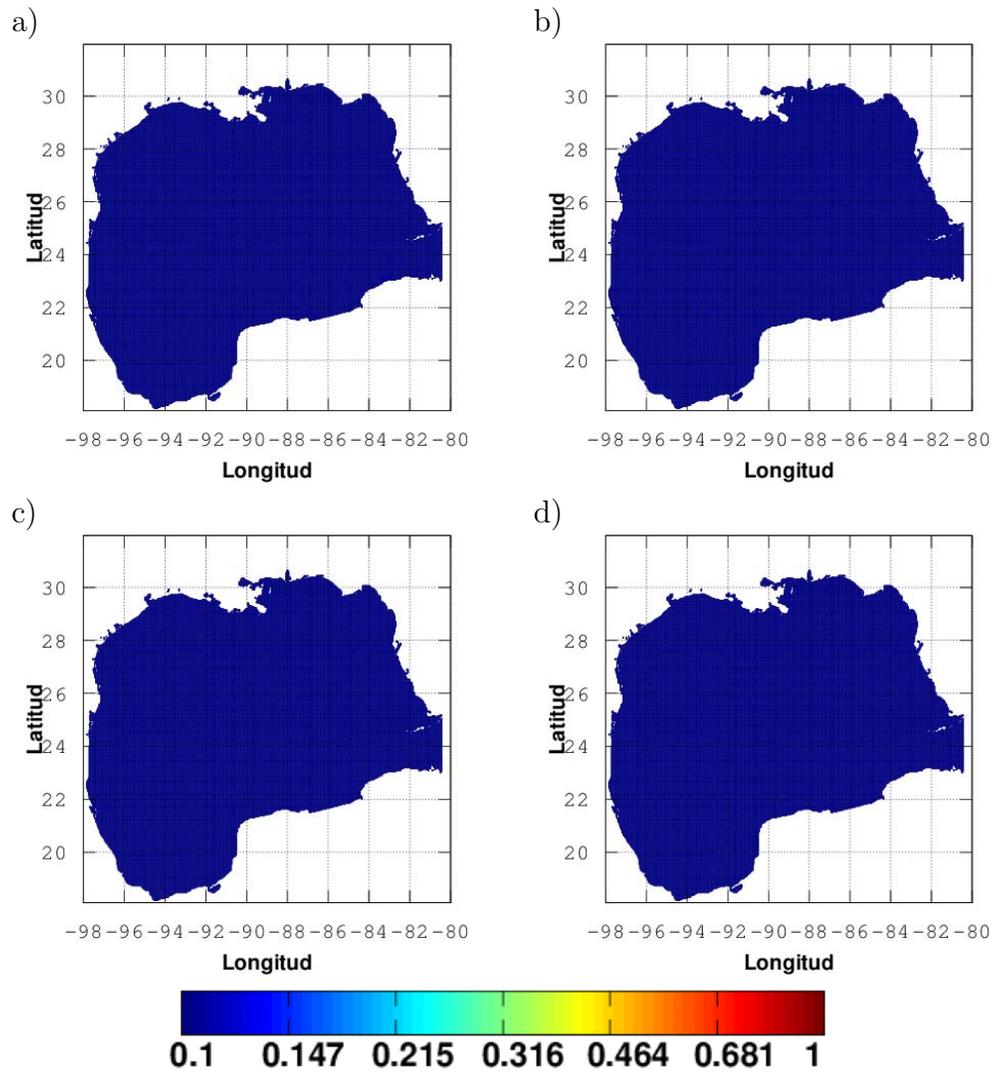


Figura A.10: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

A.6. Banda temporal de 40-85 días

En las figuras A.11 y A.12 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.146m/s$.

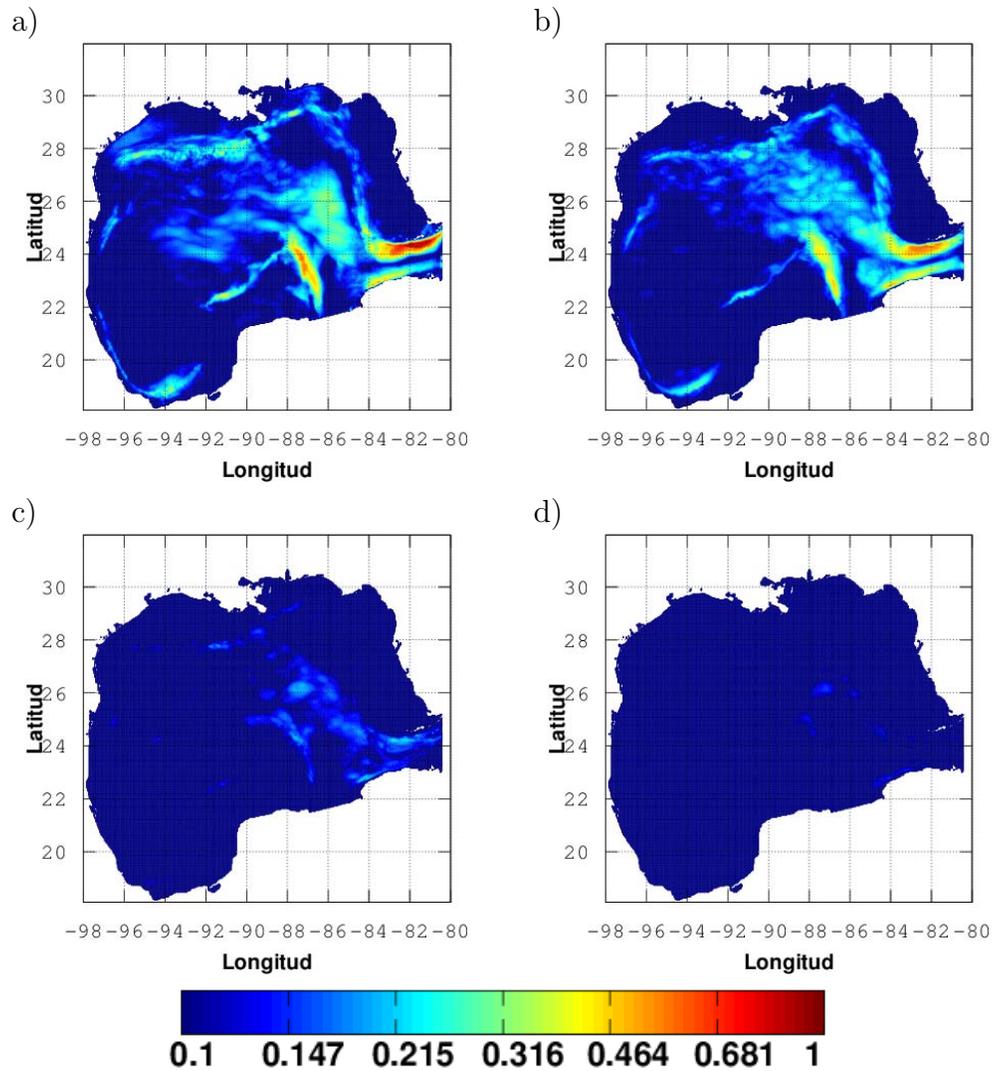


Figura A.11: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

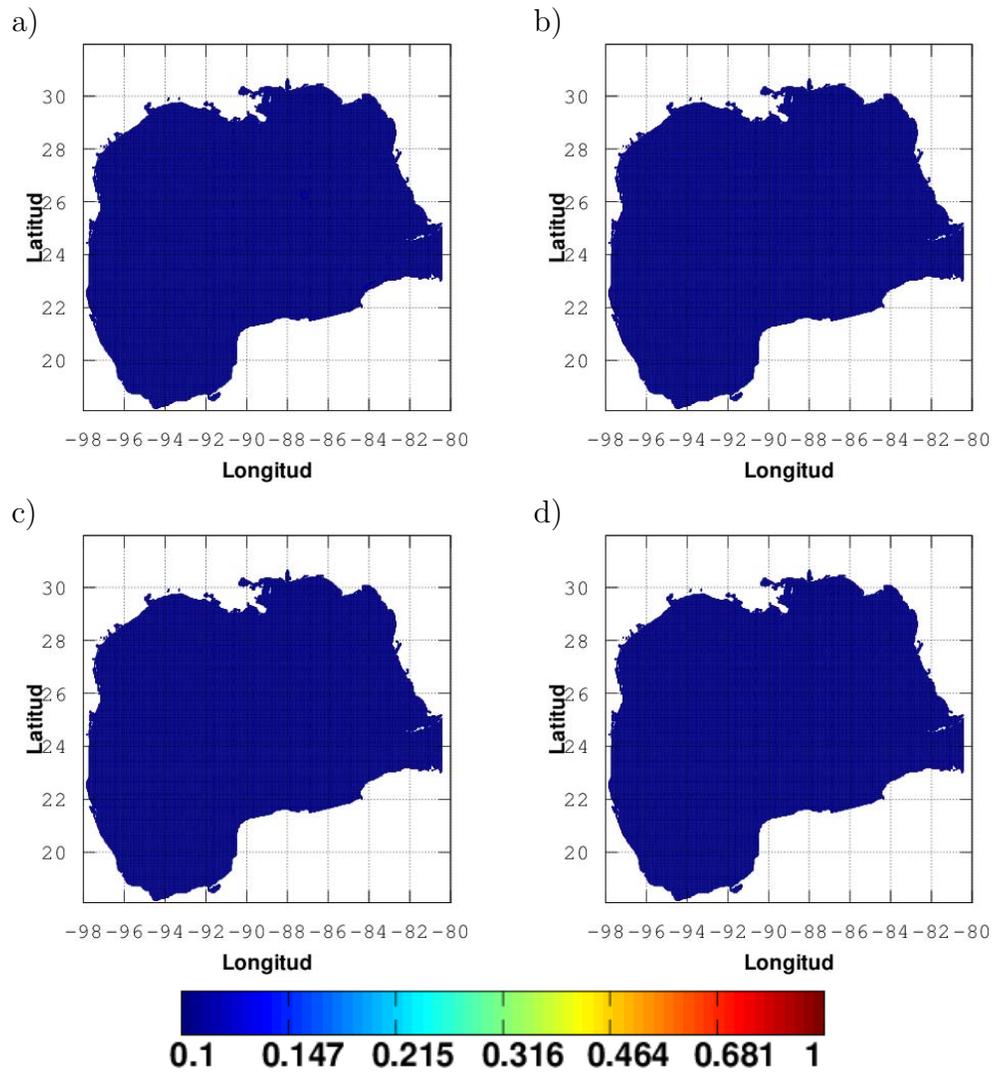


Figura A.12: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

A.7. Banda temporal de 2-40 días

En las figuras A.13 y A.14 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.080m/s .

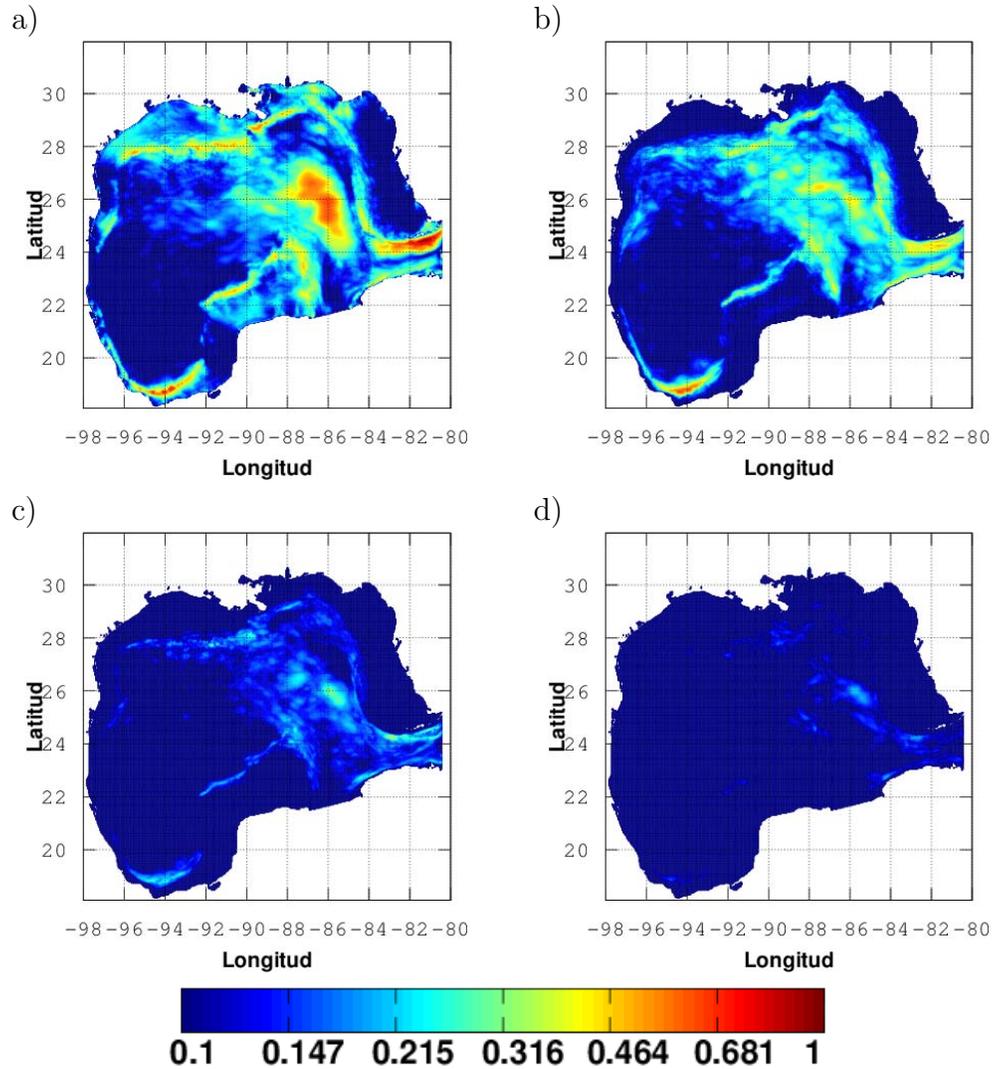


Figura A.13: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

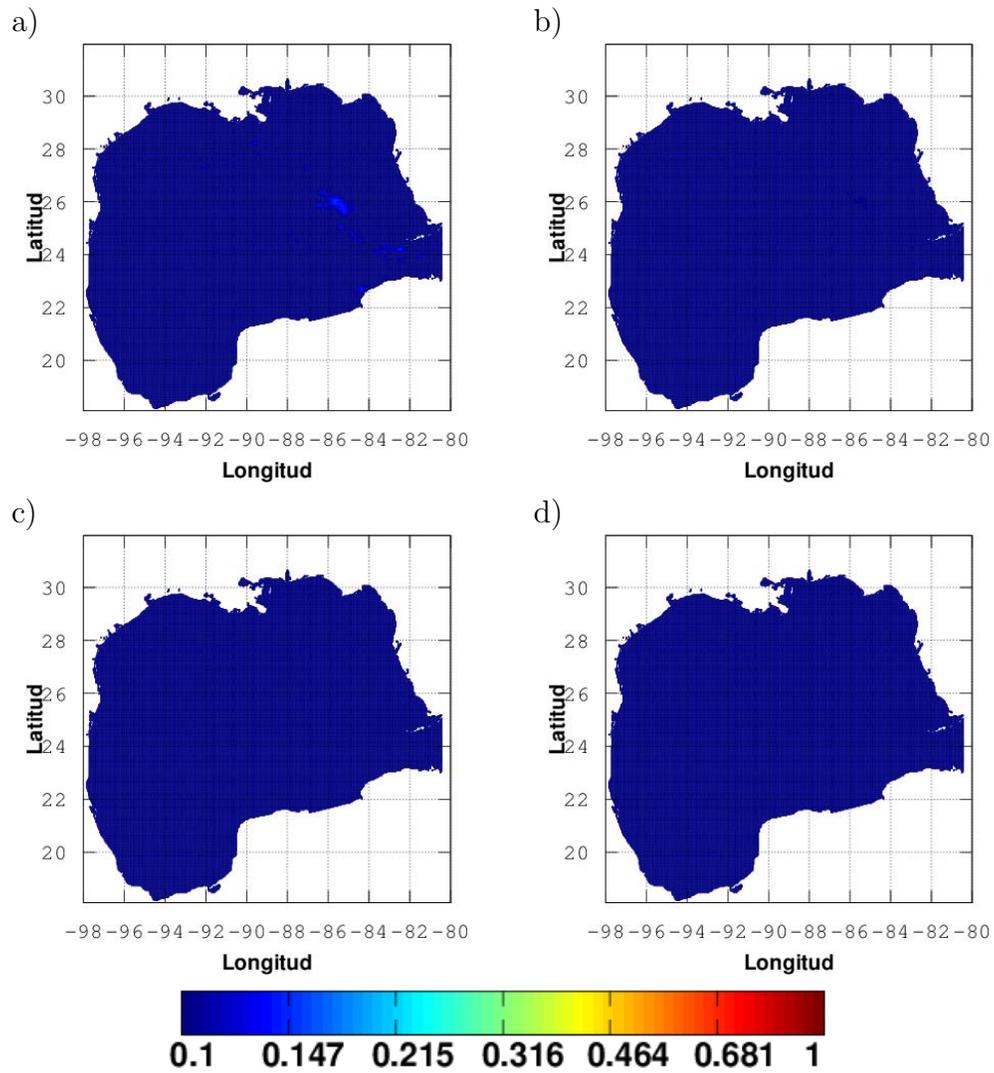


Figura A.14: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

Apéndice B

Resultados en la componente norte-sur

B.1. Banda temporal de 330-460 días

En las figuras B.1 y B.2 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.183m/s$.

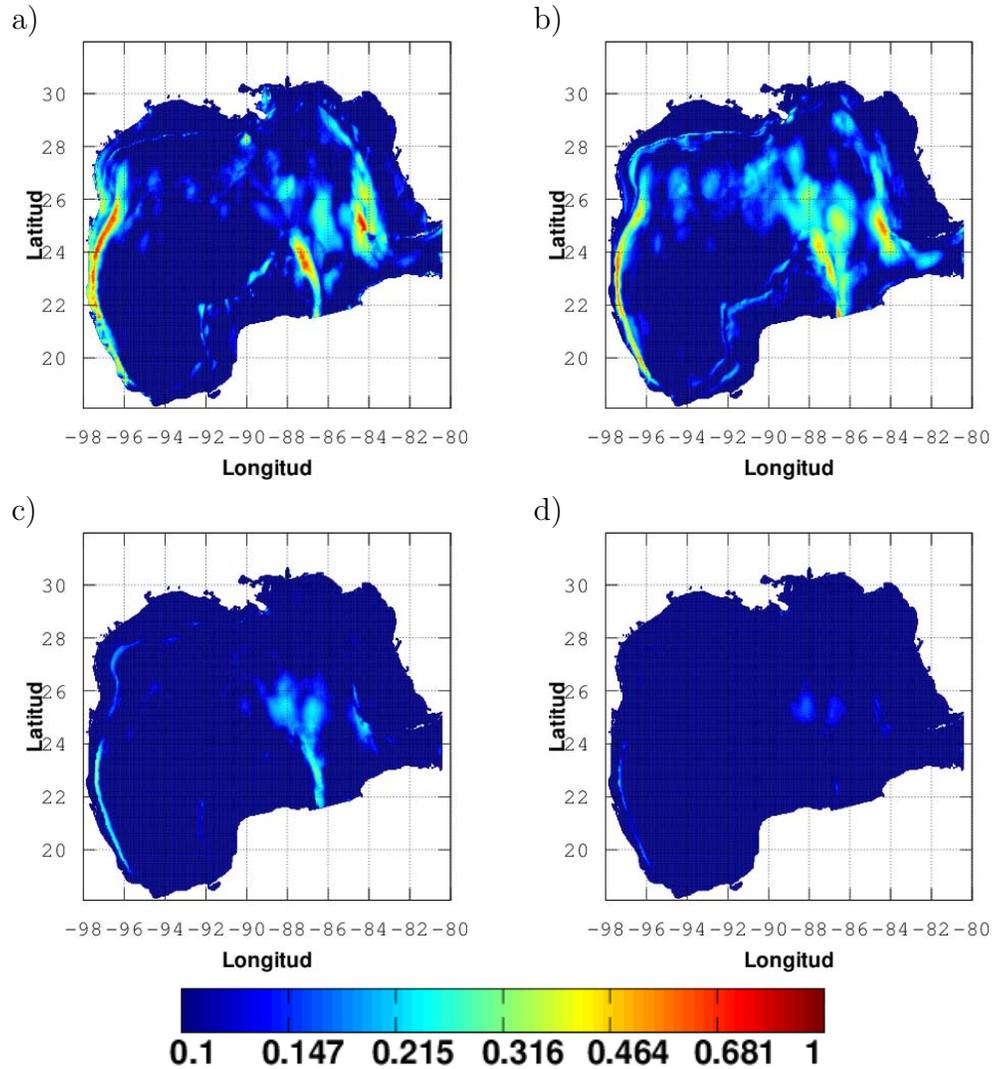


Figura B.1: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

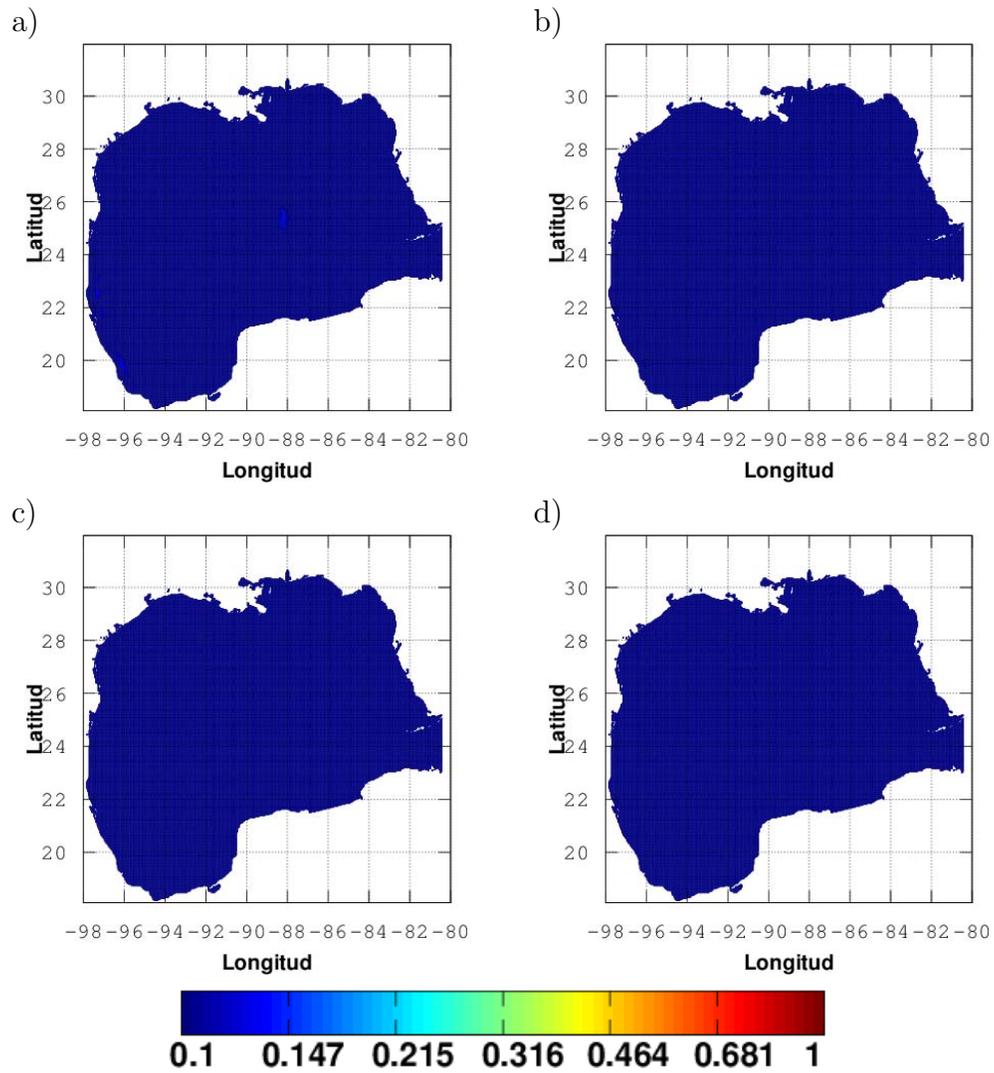


Figura B.2: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

B.2. Banda temporal de 225-330 días

En las figuras B.3 y B.4 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.165m/s .

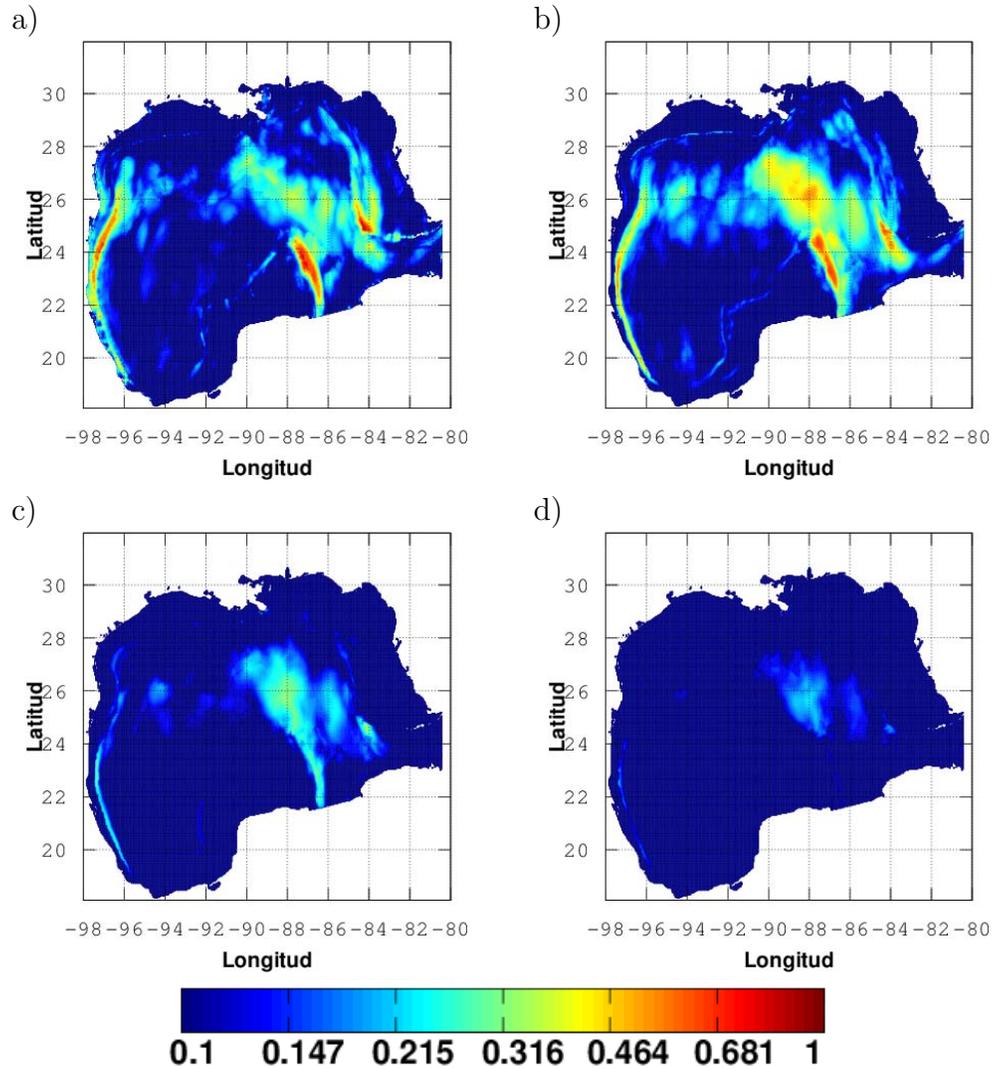


Figura B.3: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

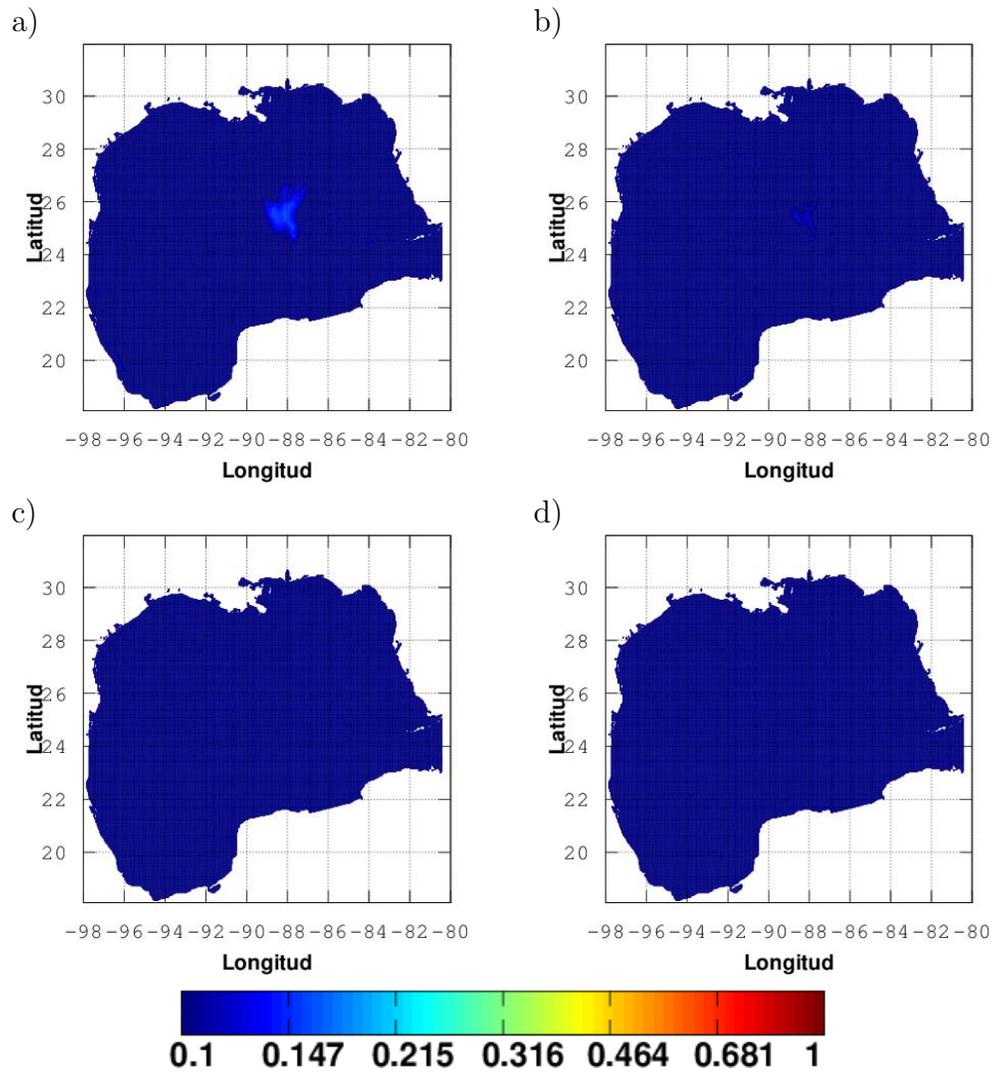


Figura B.4: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

B.3. Banda temporal de 150-225 días

En las figuras B.5 y B.6 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.191m/s$.

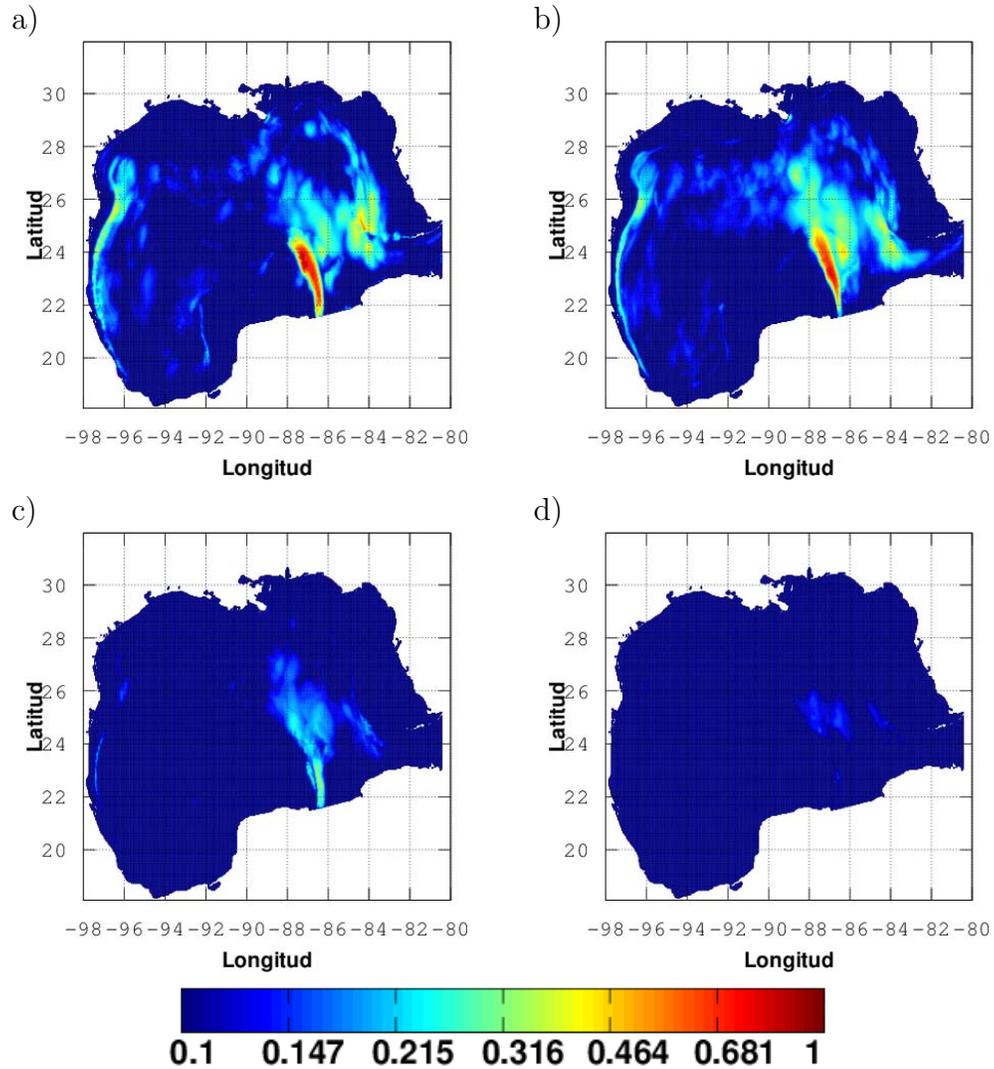


Figura B.5: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

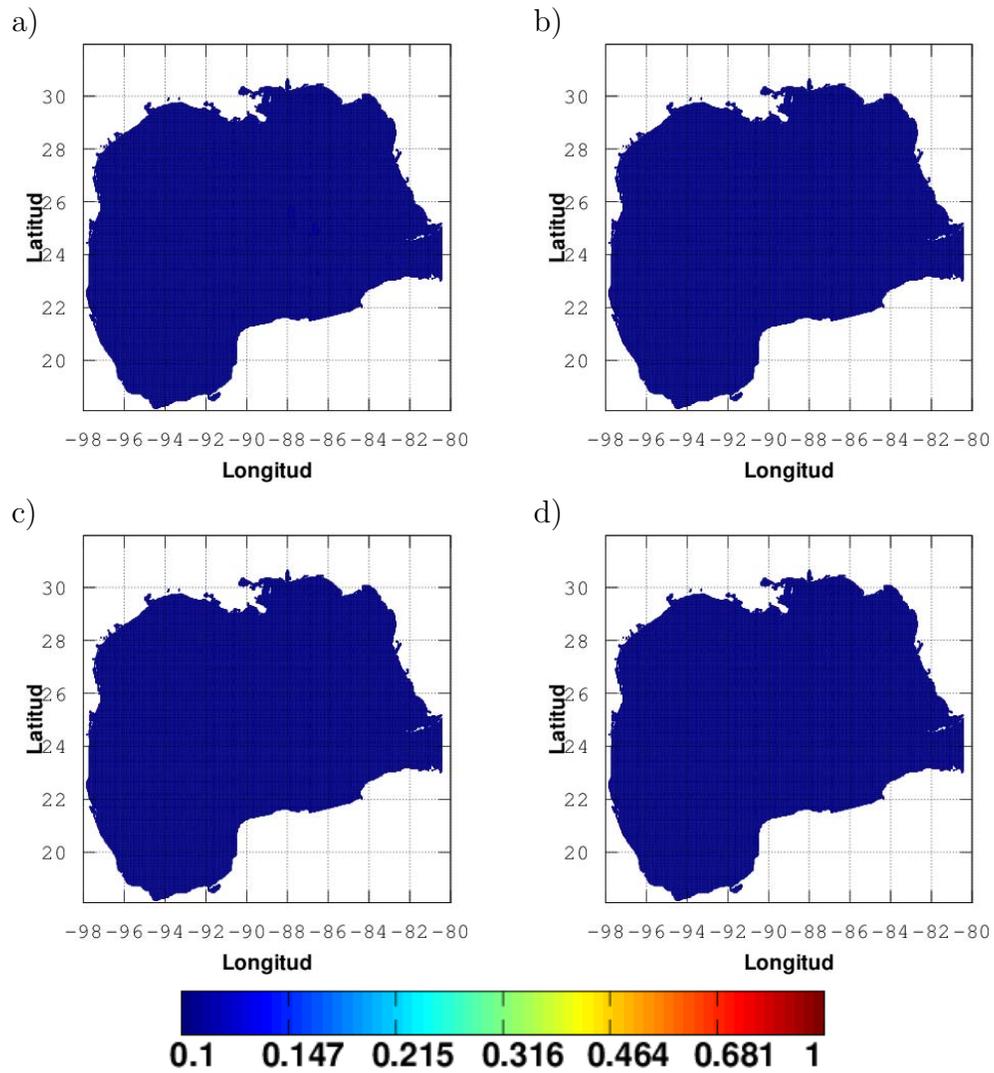


Figura B.6: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

B.4. Banda temporal de 110-150 días

En las figuras B.7 y B.8 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.155m/s$.

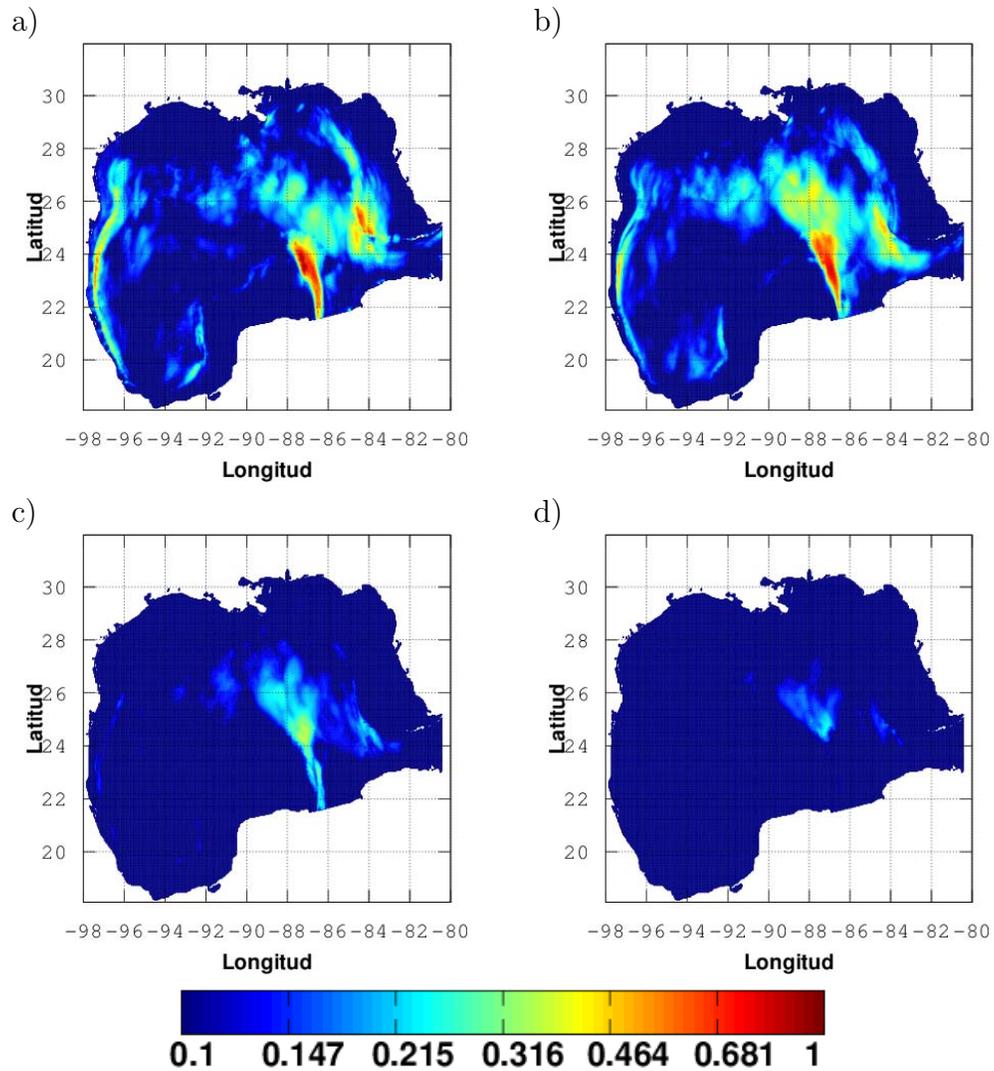


Figura B.7: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

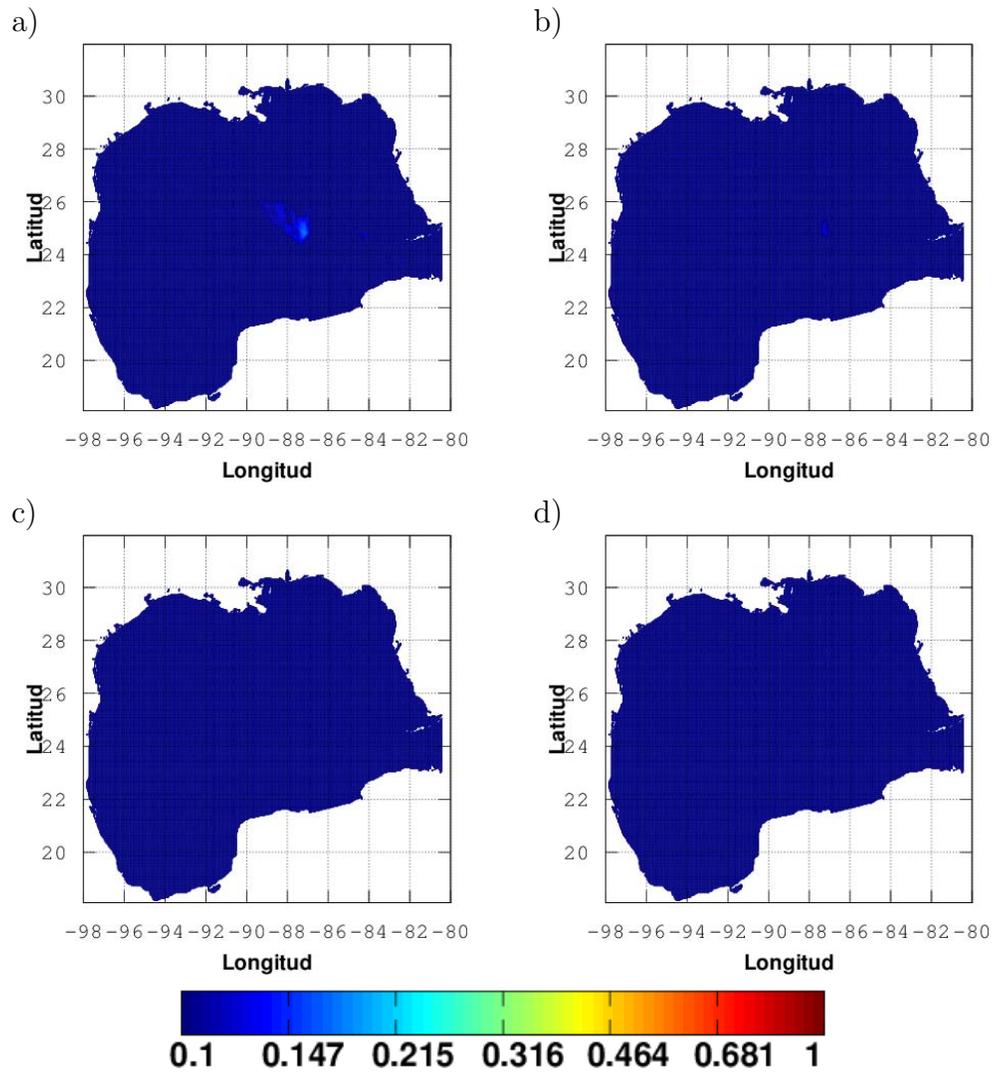


Figura B.8: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

B.5. Banda temporal de 85-110 días

En las figuras B.9 y B.10 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.168m/s$.

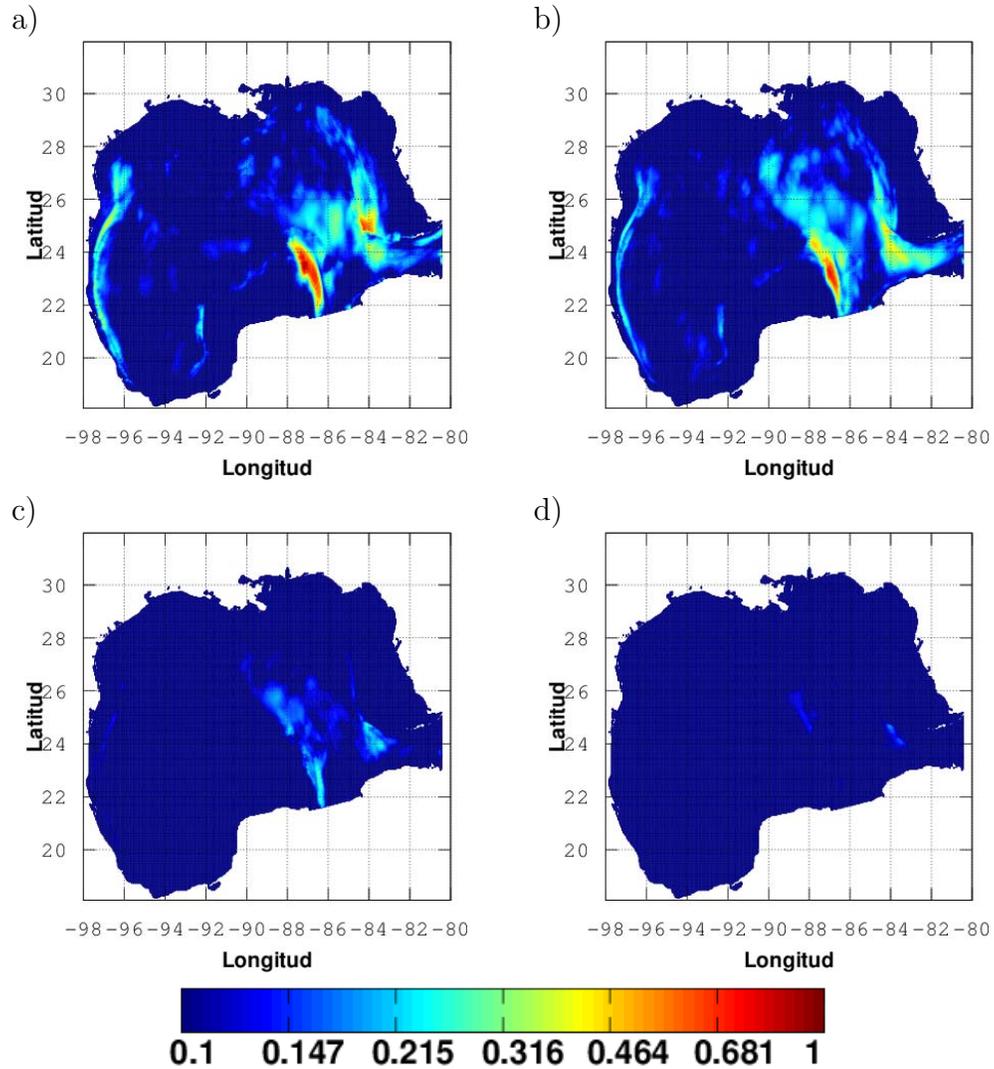


Figura B.9: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

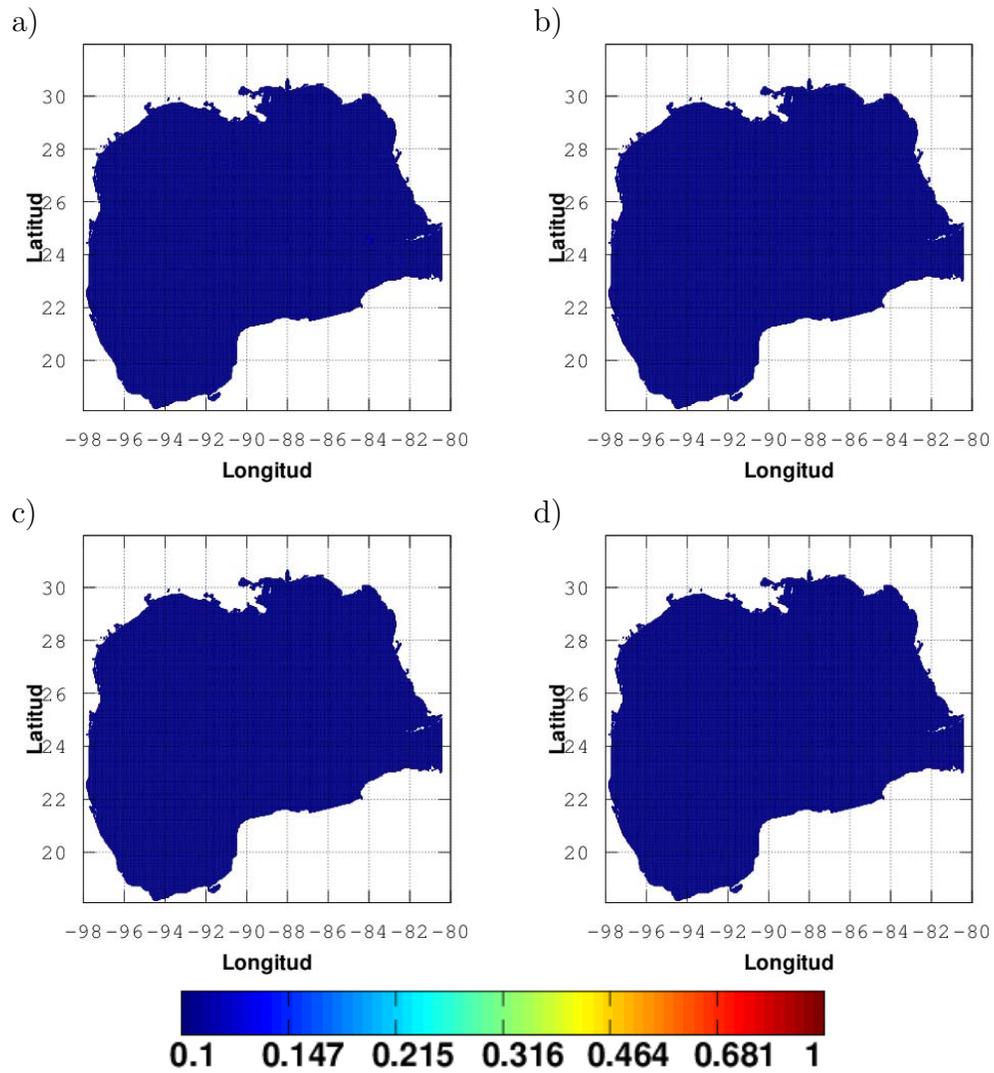


Figura B.10: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

B.6. Banda temporal de 40-85 días

En las figuras B.11 y B.12 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.169m/s .

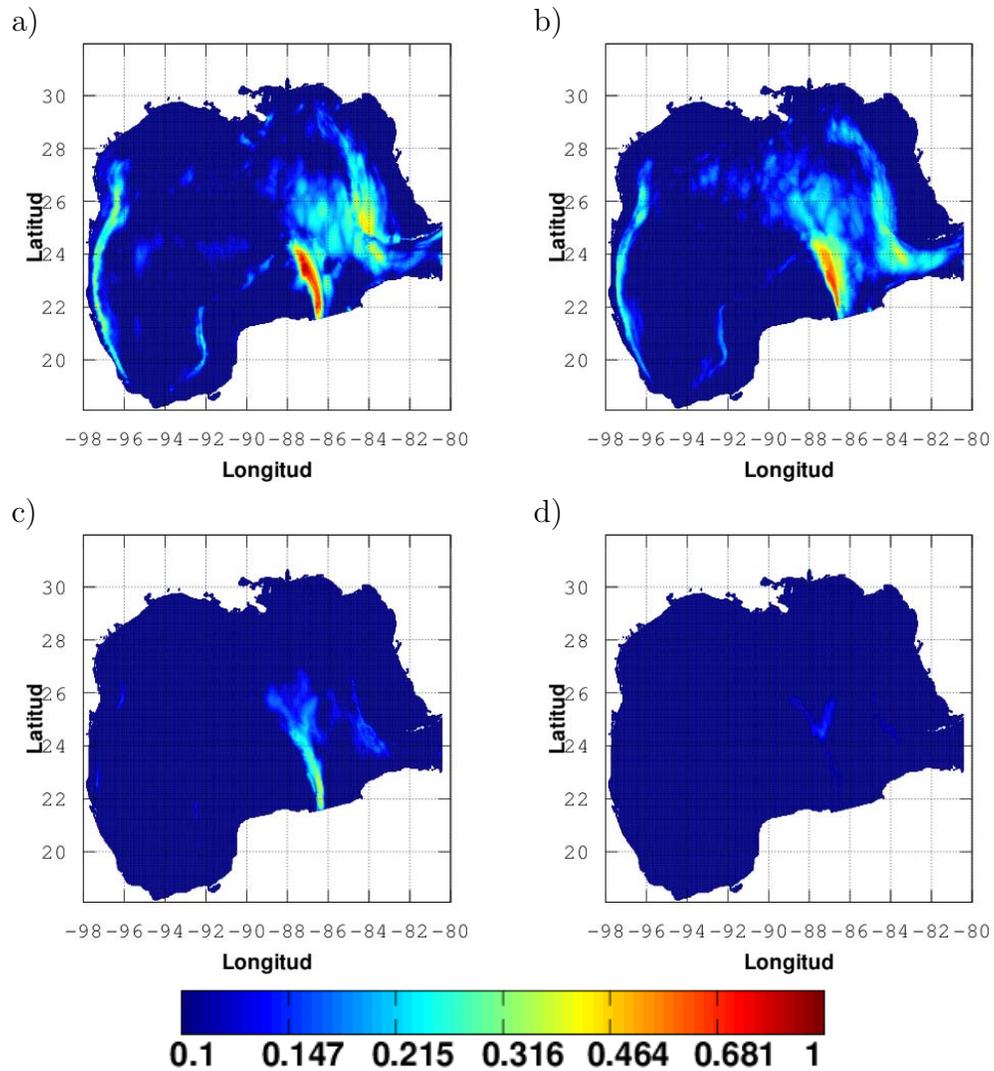


Figura B.11: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

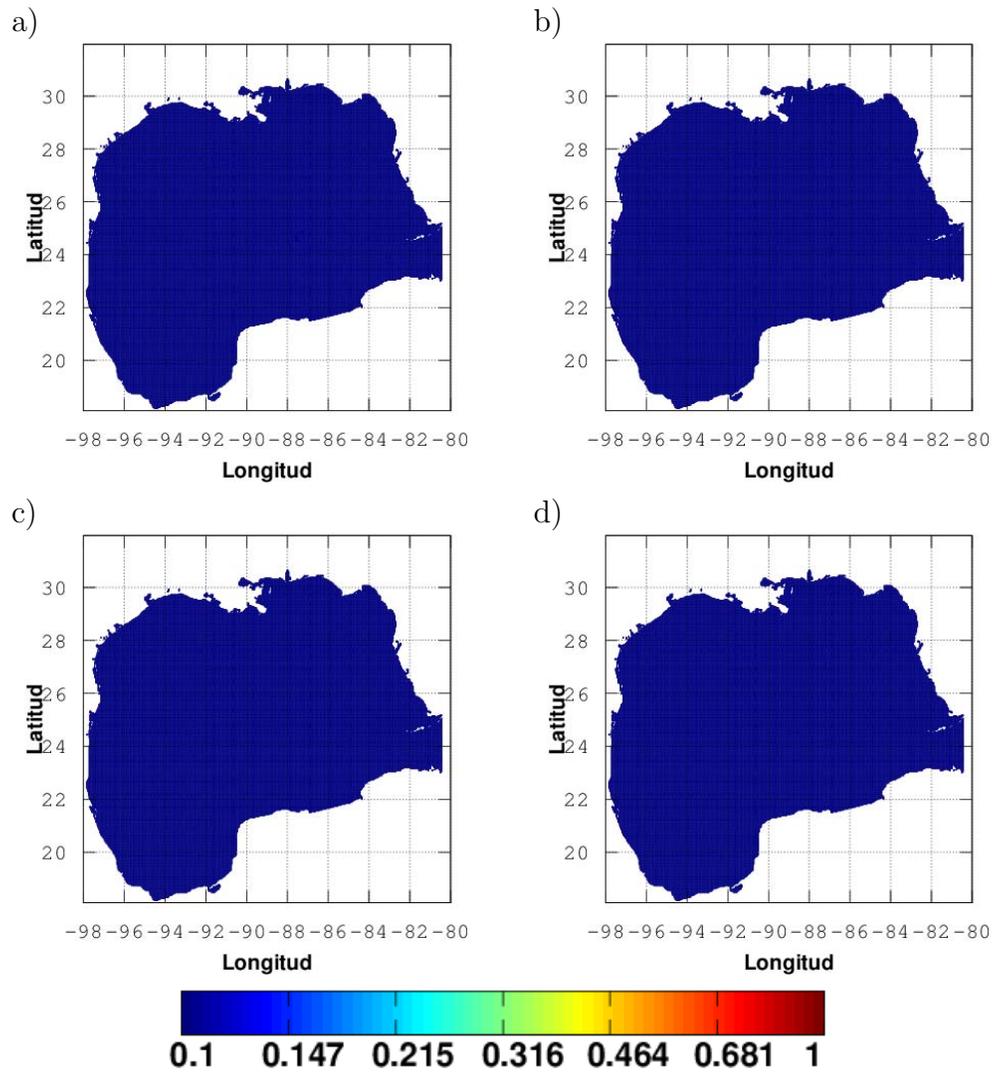


Figura B.12: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

B.7. Banda temporal de 2-40 días

En las figuras B.13 y B.14 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de 0.065m/s .

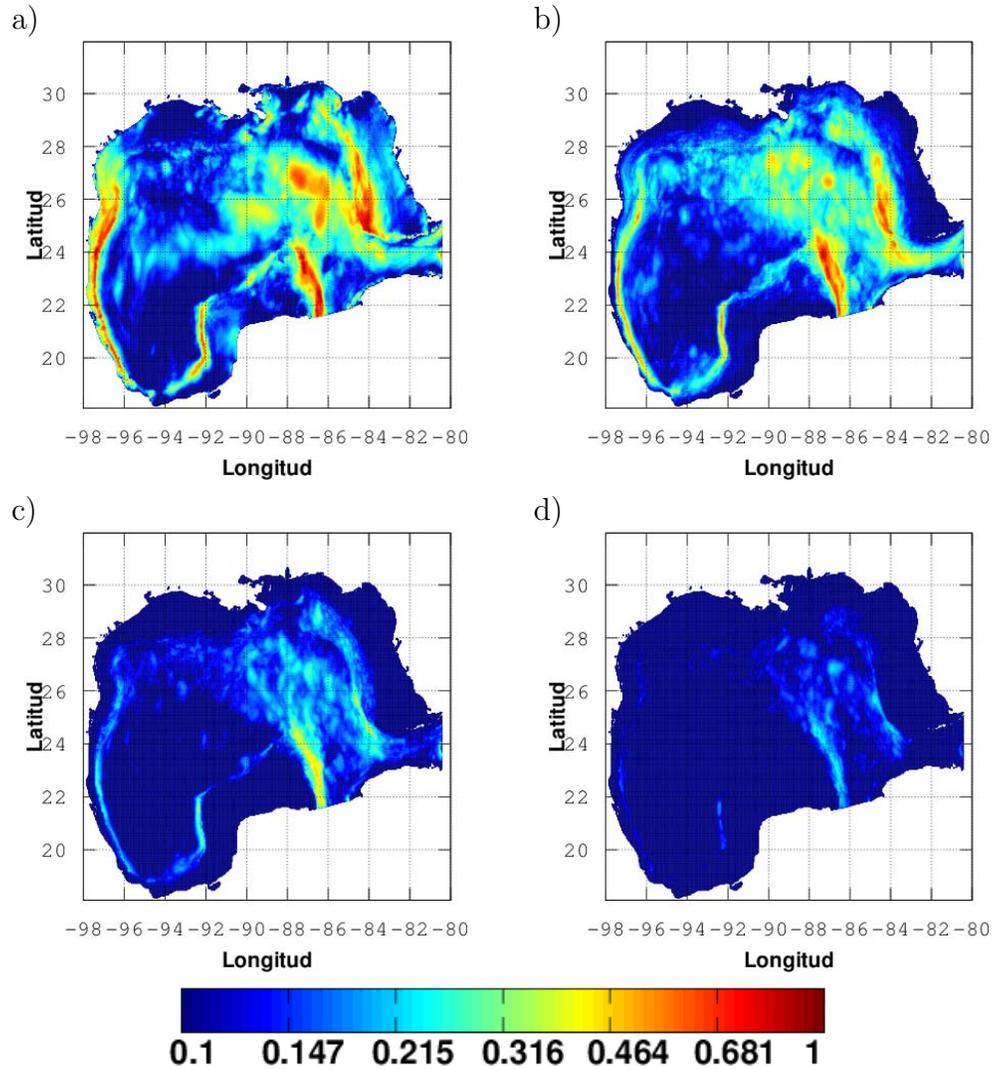


Figura B.13: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

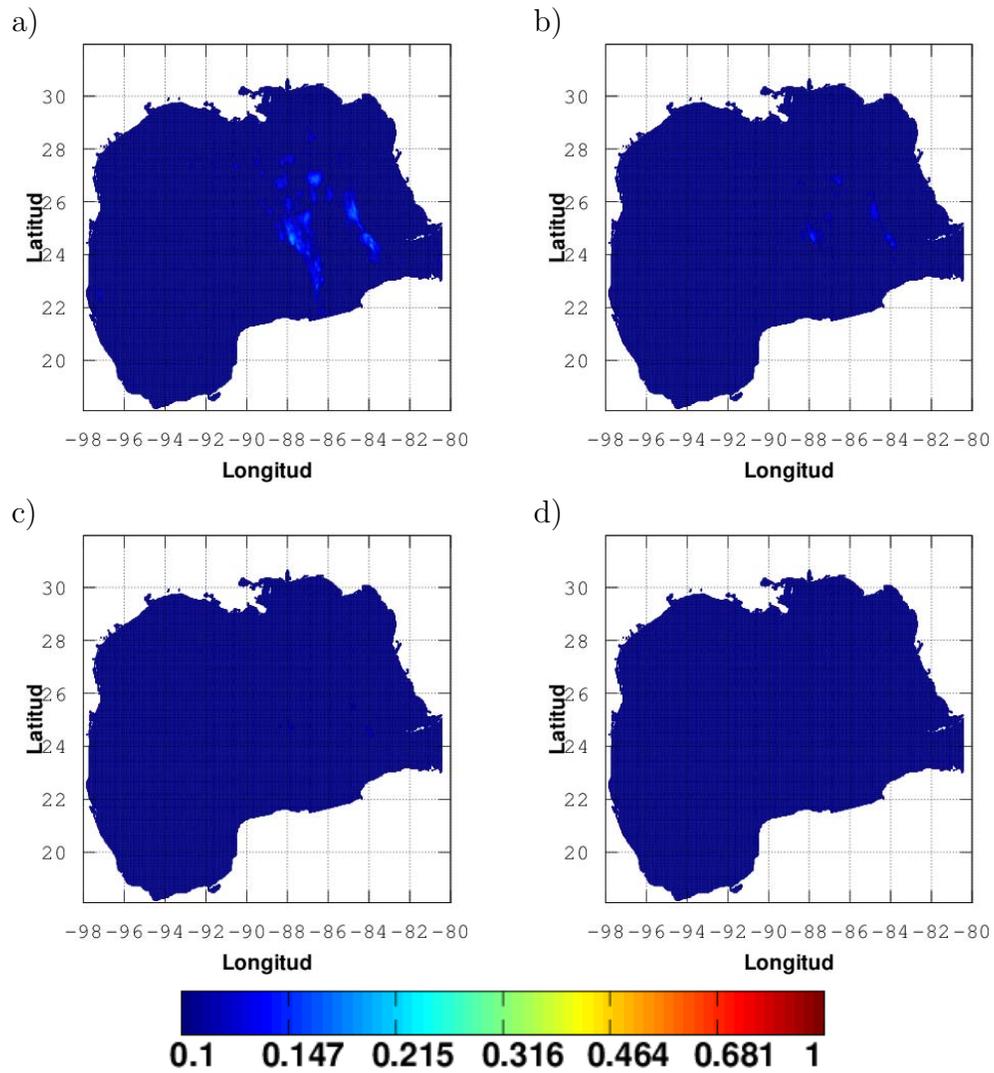


Figura B.14: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

Apéndice C

Resultados en la componente vertical

C.1. Banda temporal de 330-460 días

En las figuras C.1 y C.2 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $6.62 \cdot 10^{-4} m/s$.

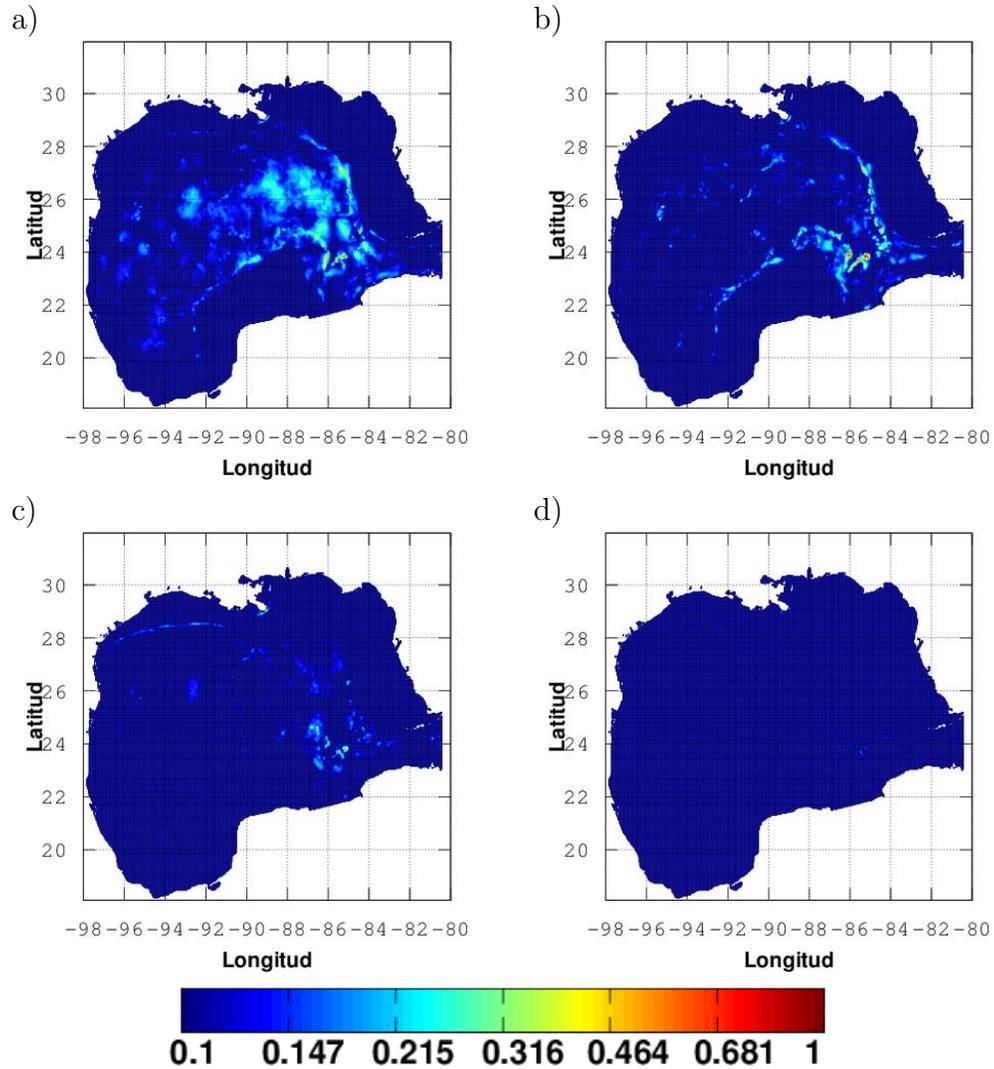


Figura C.1: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

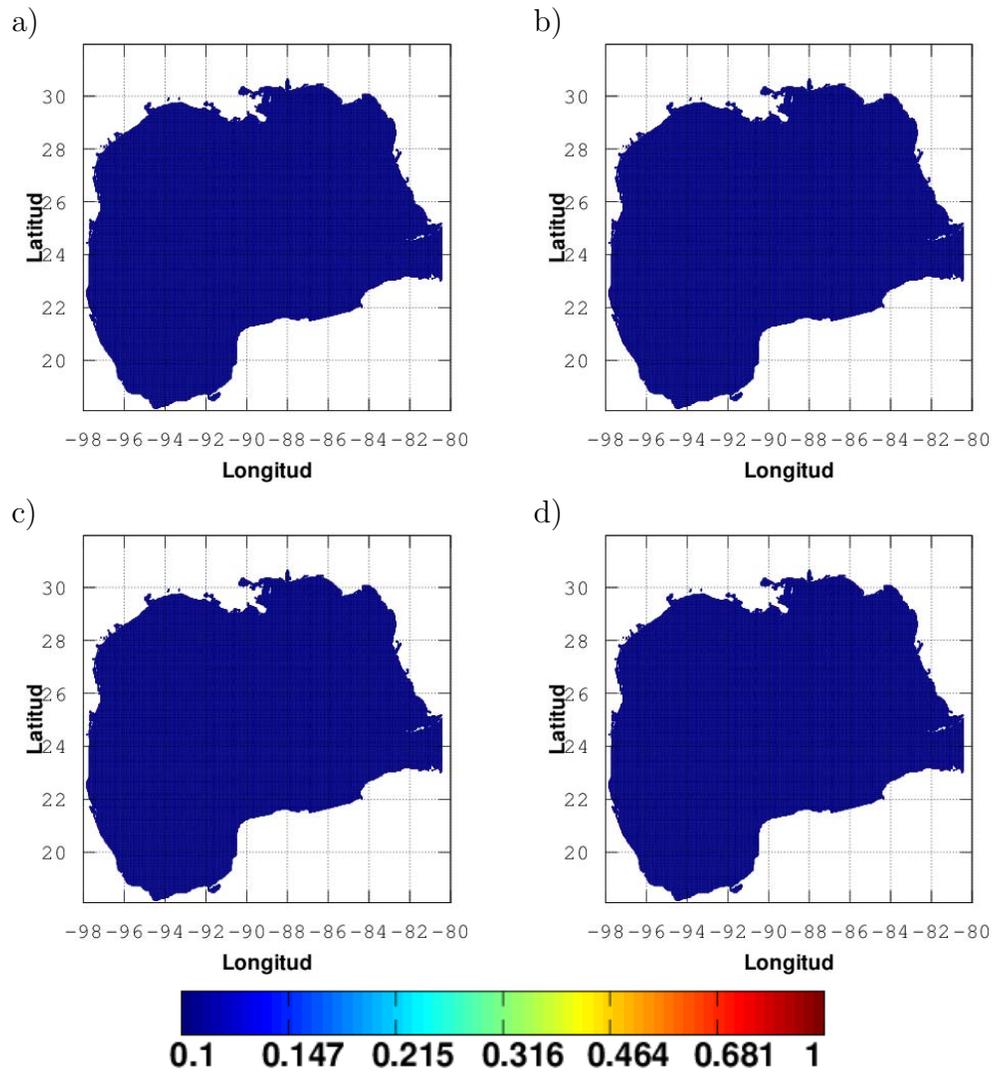


Figura C.2: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

C.2. Banda temporal de 225-330 días

En las figuras C.3 y C.4 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $5.76 \cdot 10^{-4} m/s$.

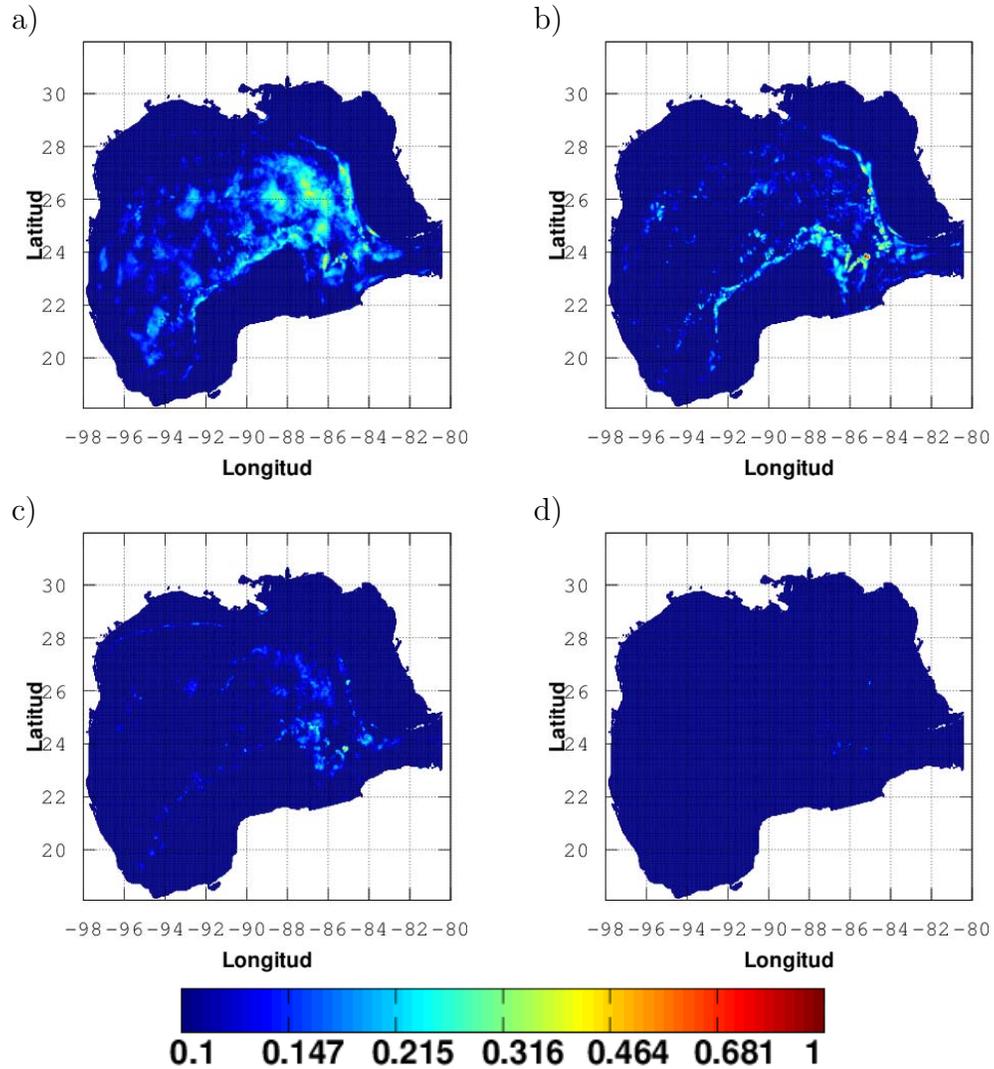


Figura C.3: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

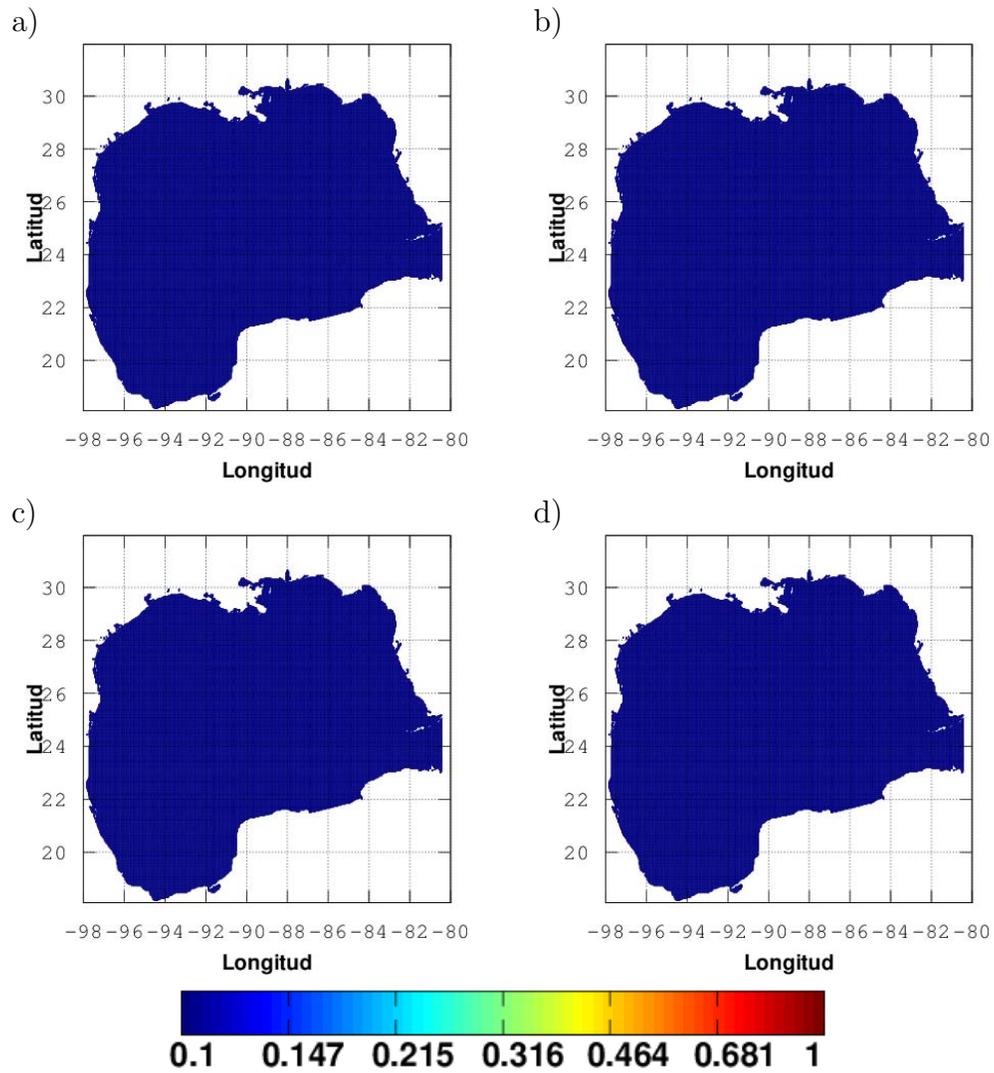


Figura C.4: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

C.3. Banda temporal de 150-225 días

En las figuras C.5 y C.6 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $7.08 \cdot 10^{-4} m/s$.

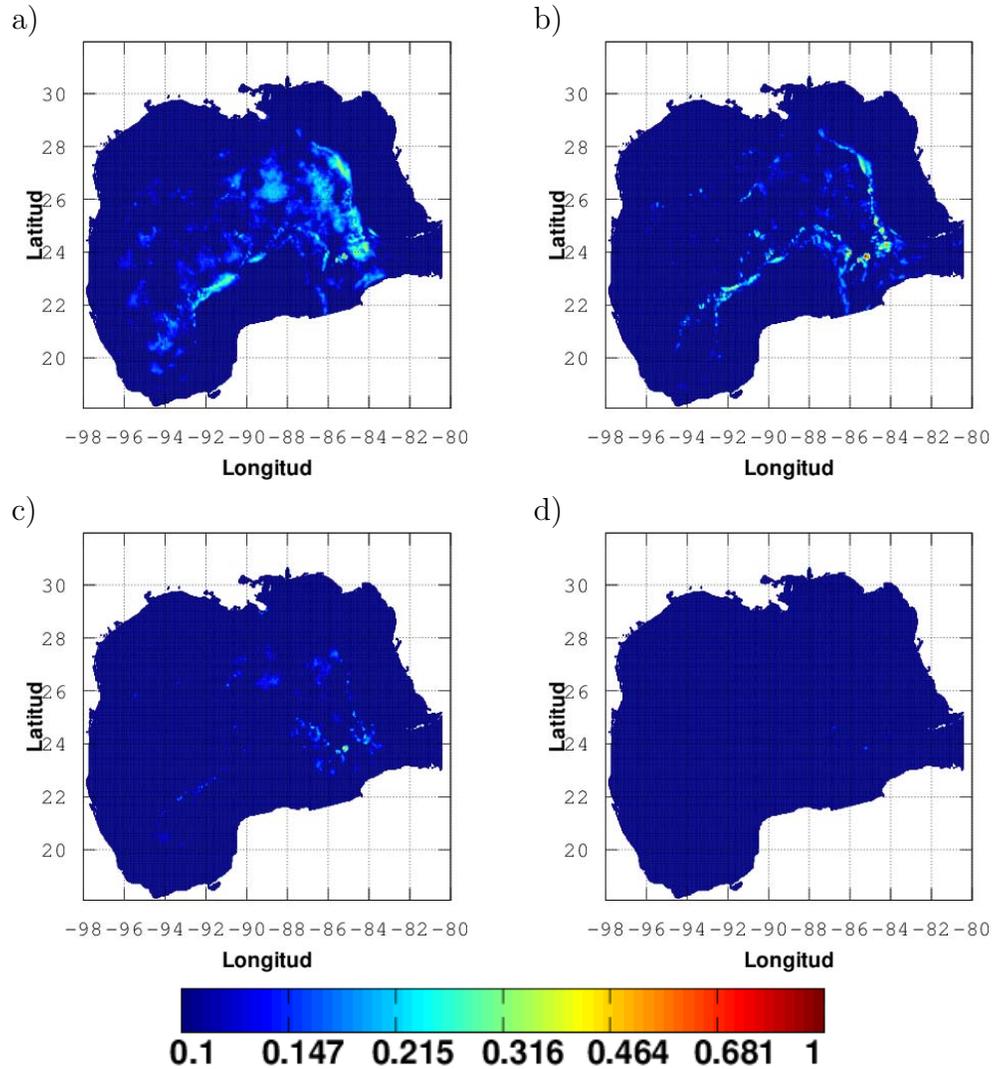


Figura C.5: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

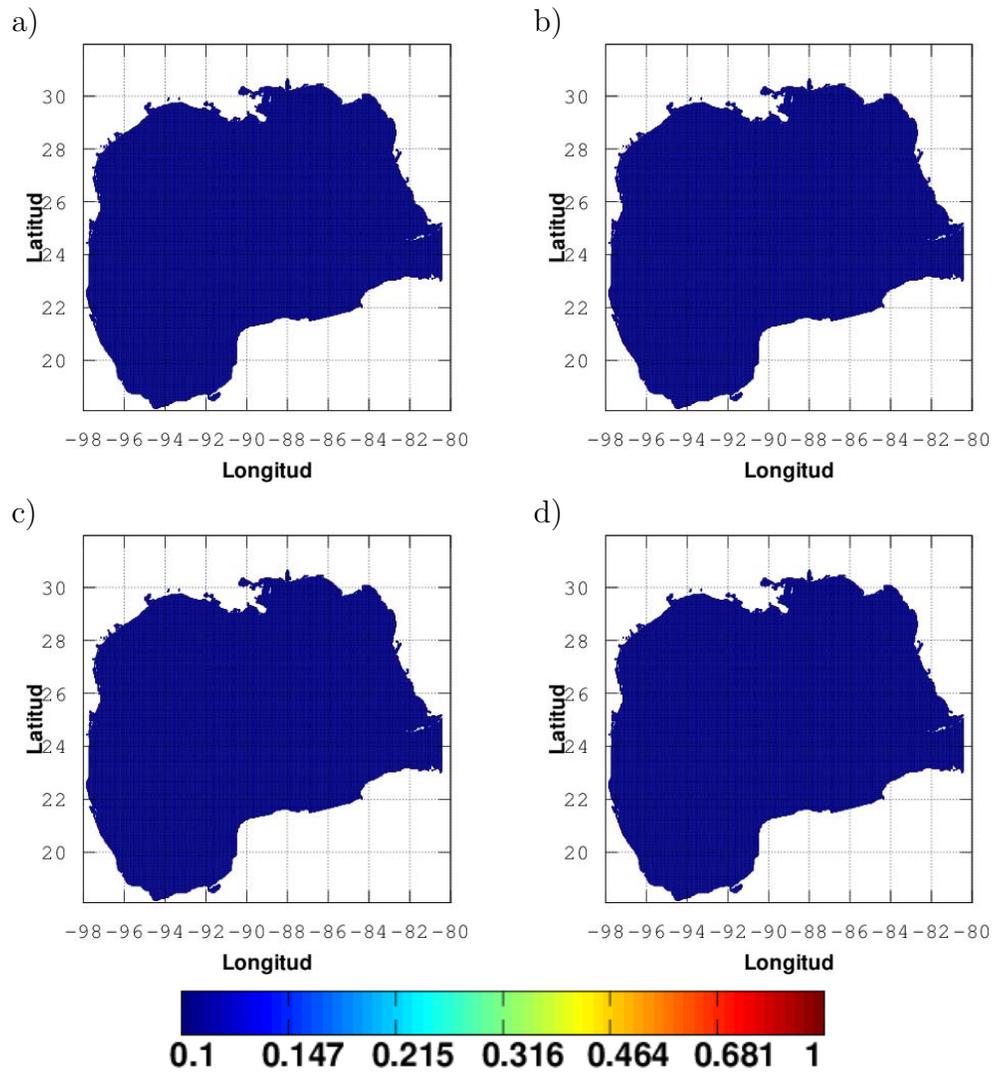


Figura C.6: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

C.4. Banda temporal de 110-150 días

En las figuras C.7 y C.8 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $5.29 \cdot 10^{-4} m/s$.

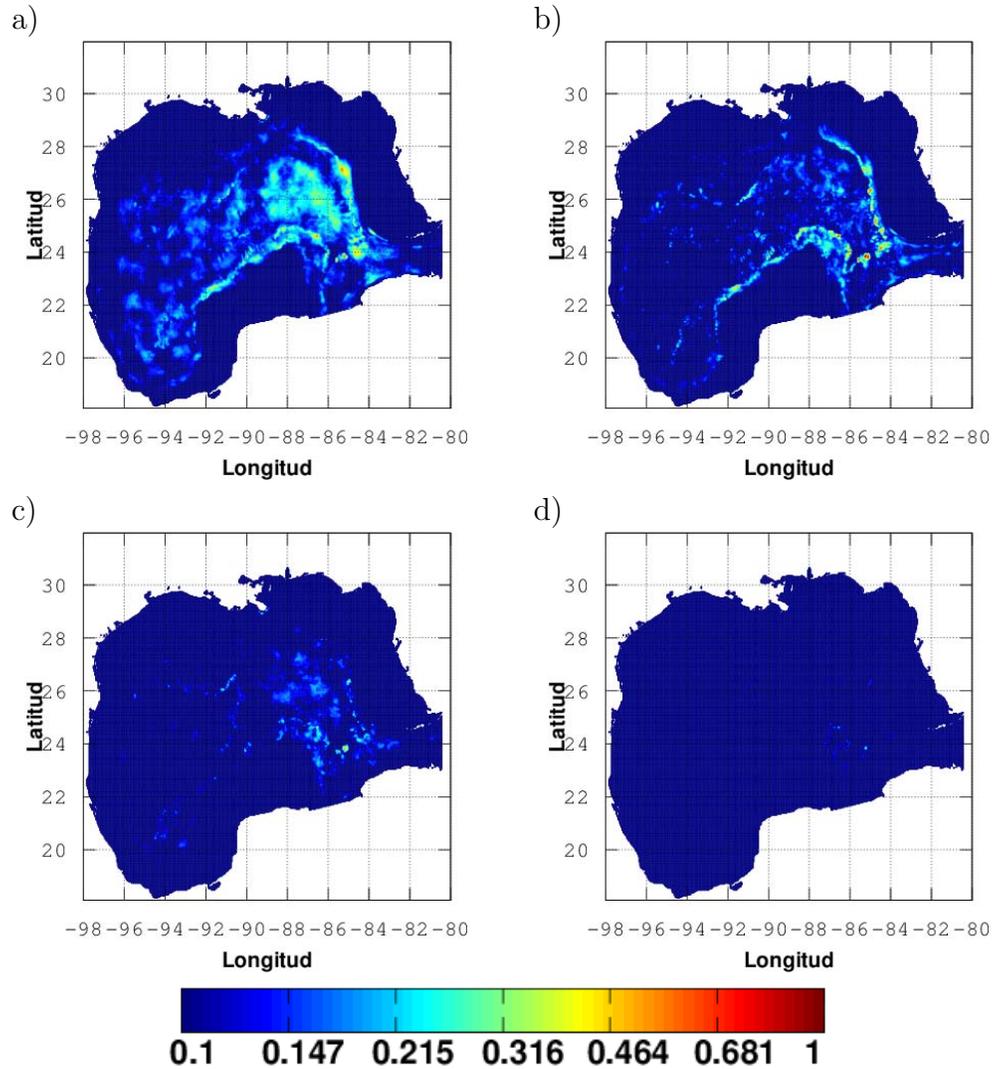


Figura C.7: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

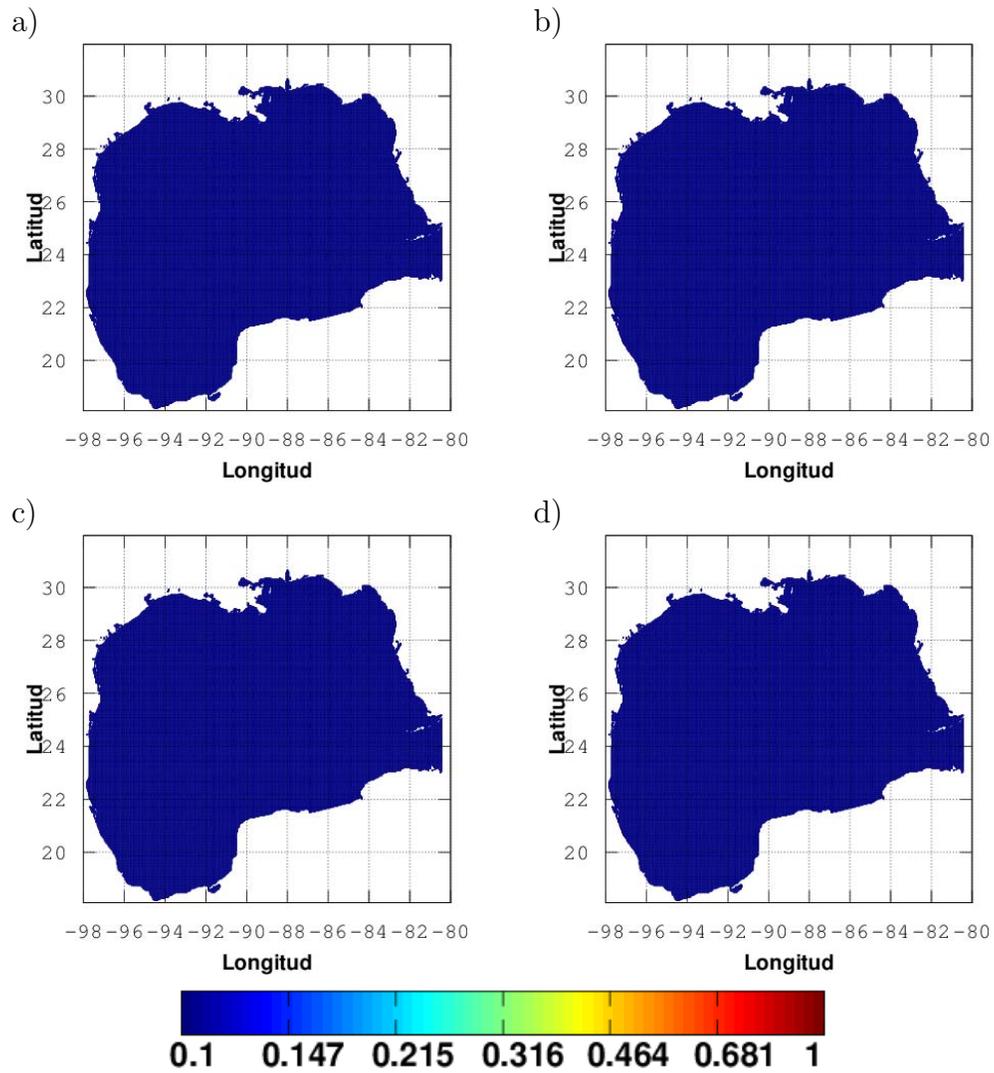


Figura C.8: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

C.5. Banda temporal de 85-110 días

En las figuras C.9 y C.10 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $4.77 \cdot 10^{-4} m/s$.

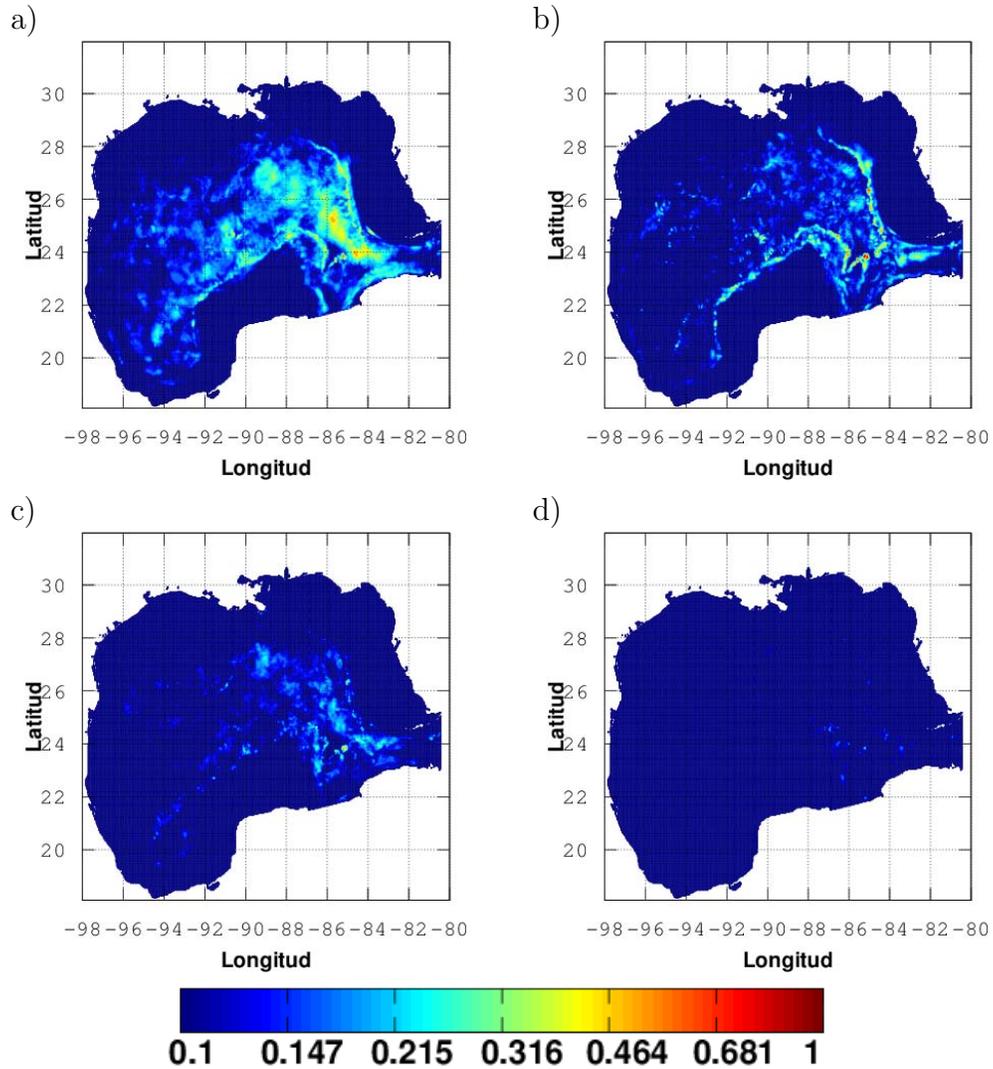


Figura C.9: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

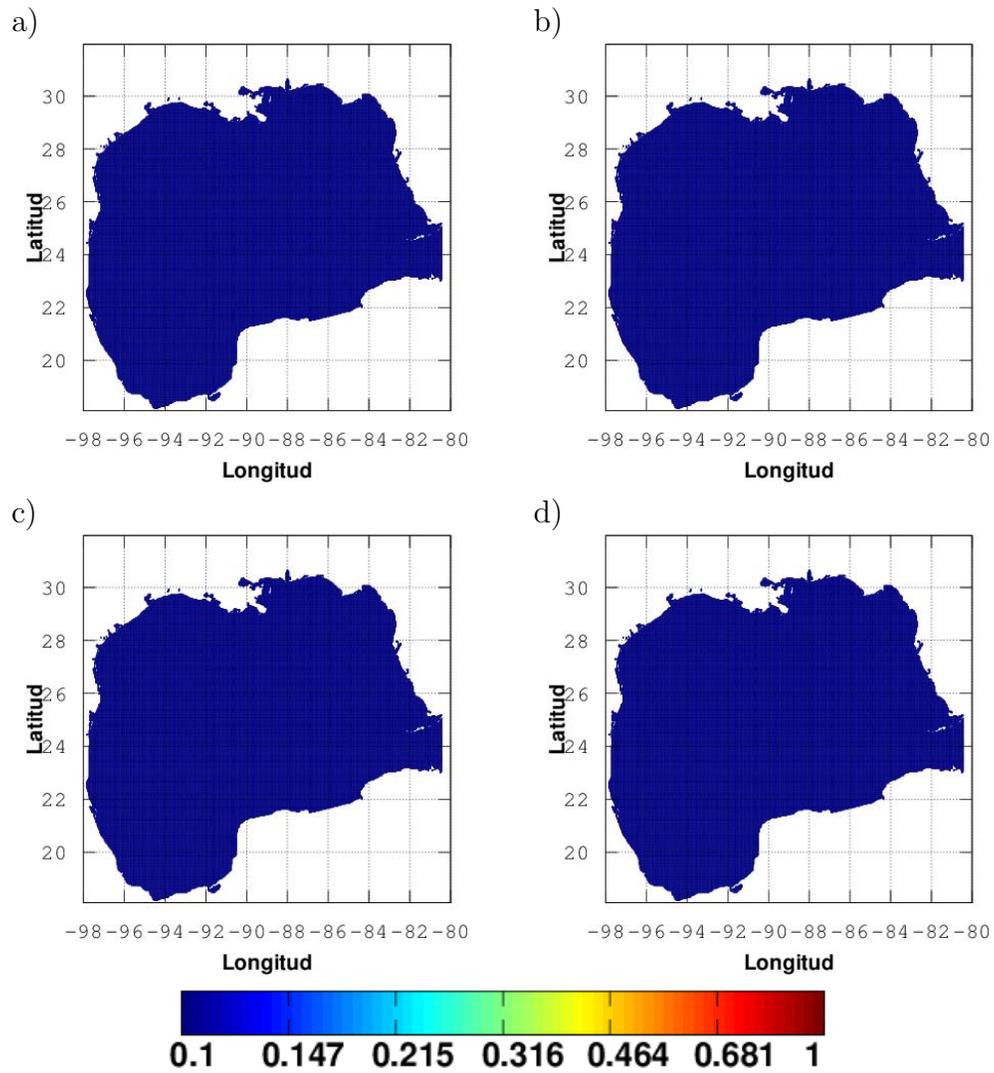


Figura C.10: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

C.6. Banda temporal de 40-85 días

En las figuras C.11 y C.12 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $5.91 \cdot 10^{-4} m/s$.

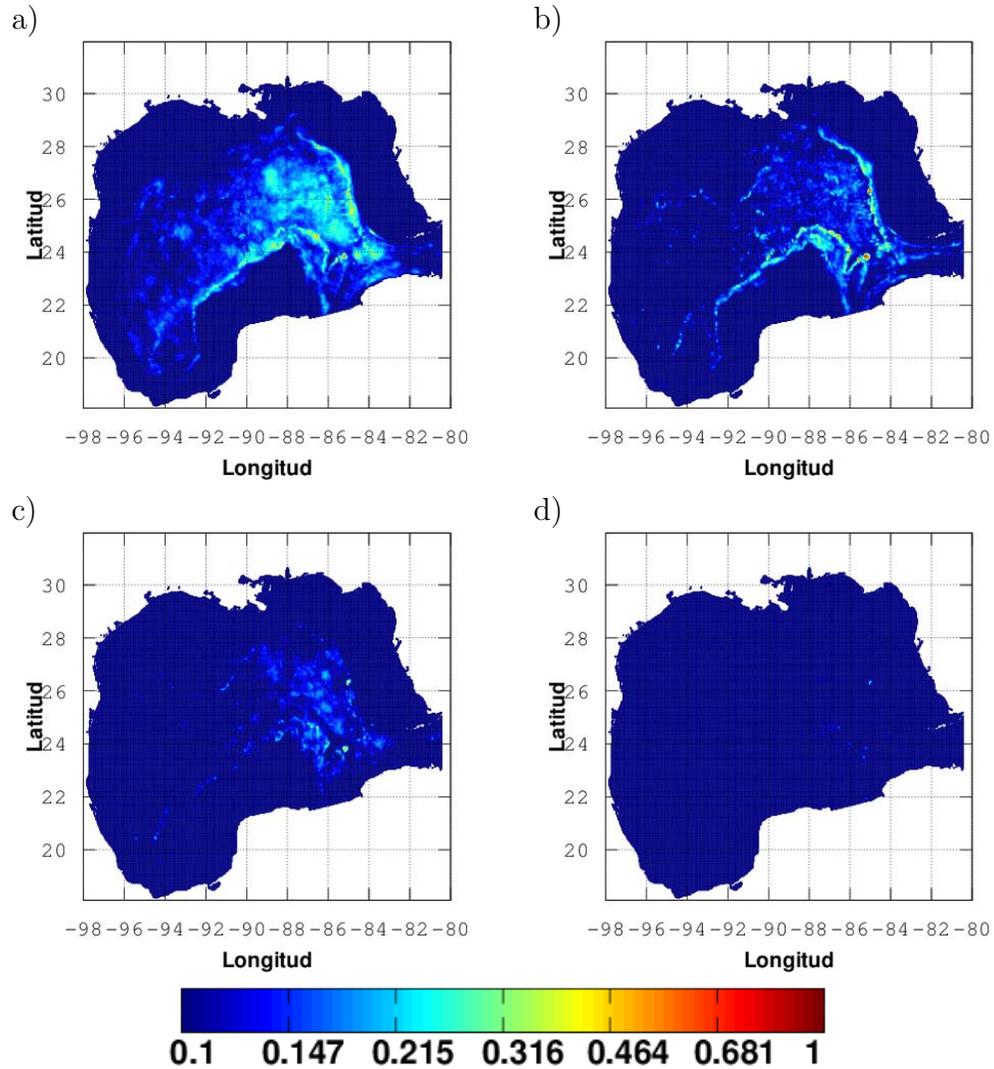


Figura C.11: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

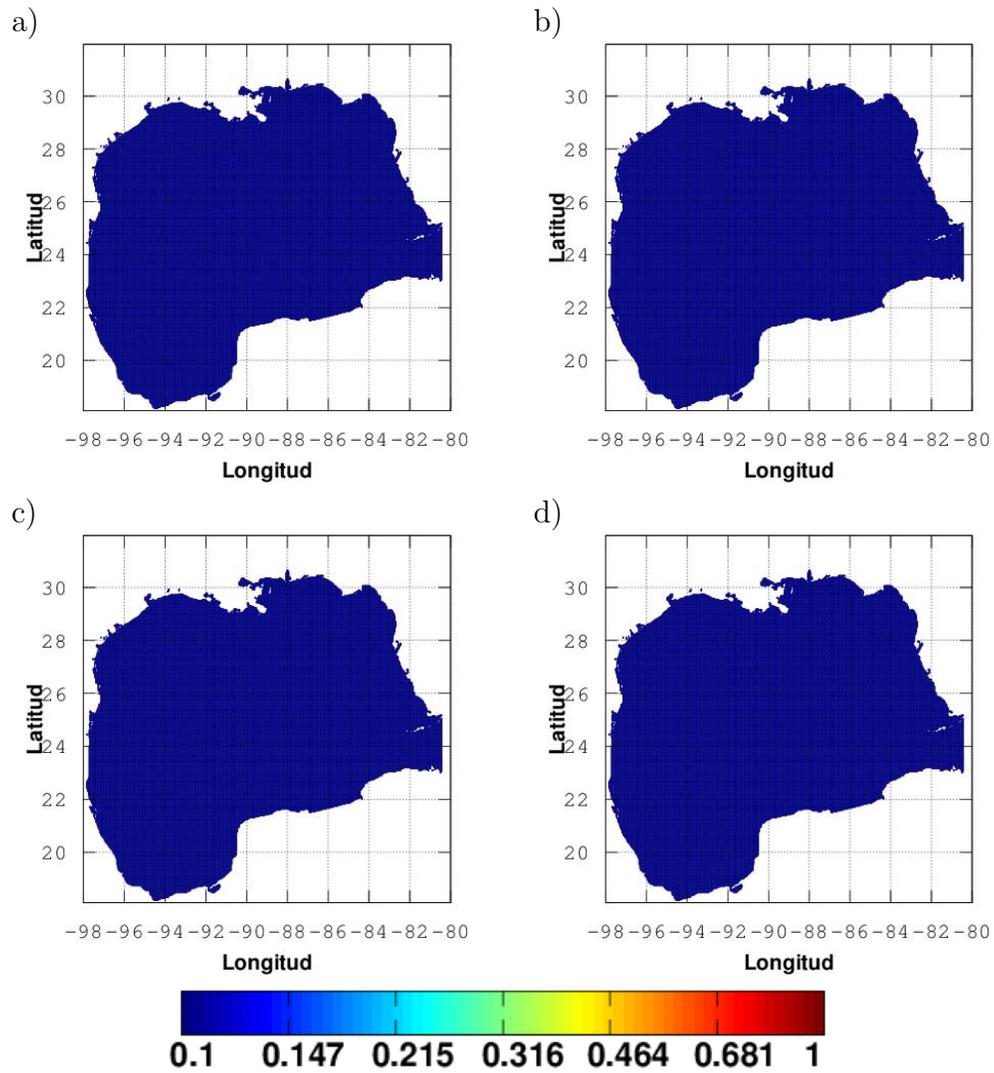


Figura C.12: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

C.7. Banda temporal de 2-40 días

En las figuras C.13 y C.14 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $3.79 \cdot 10^{-4} m/s$.

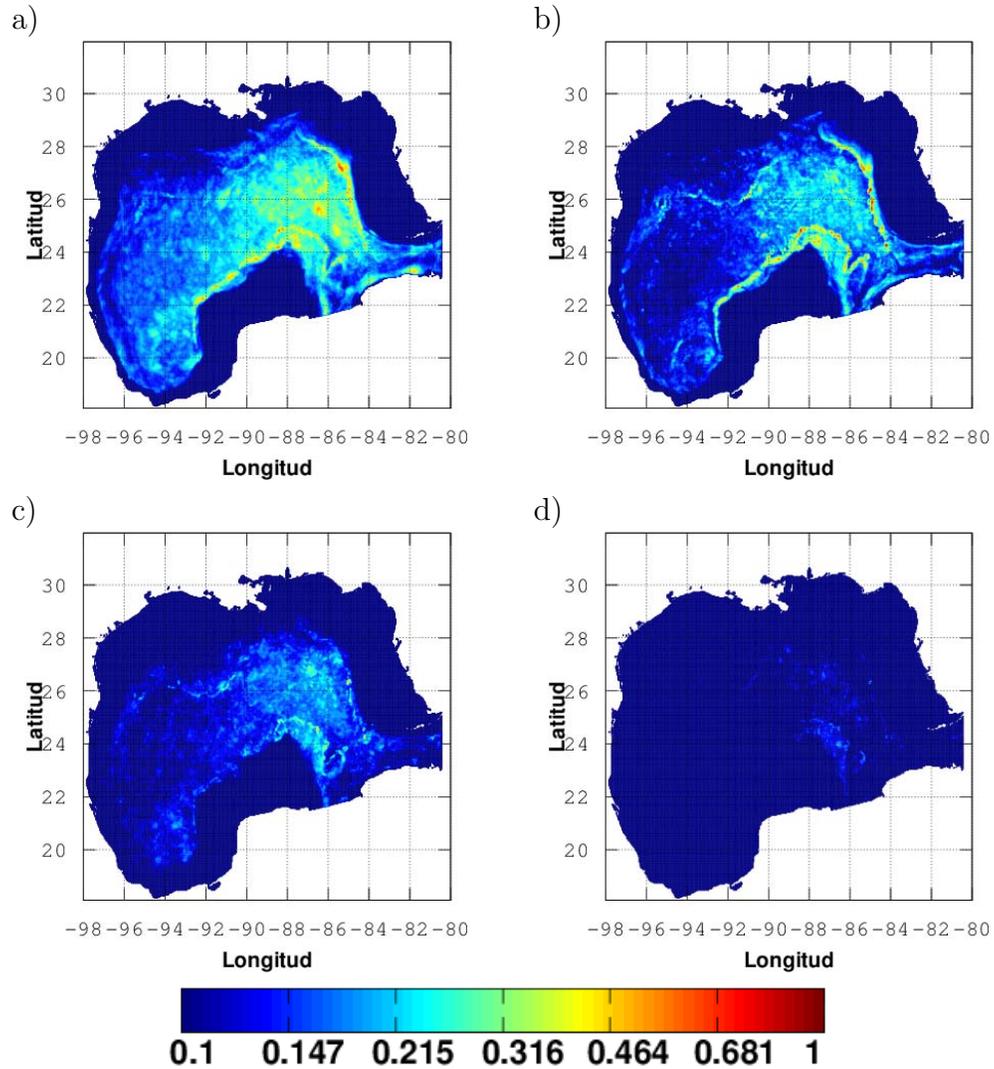


Figura C.13: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

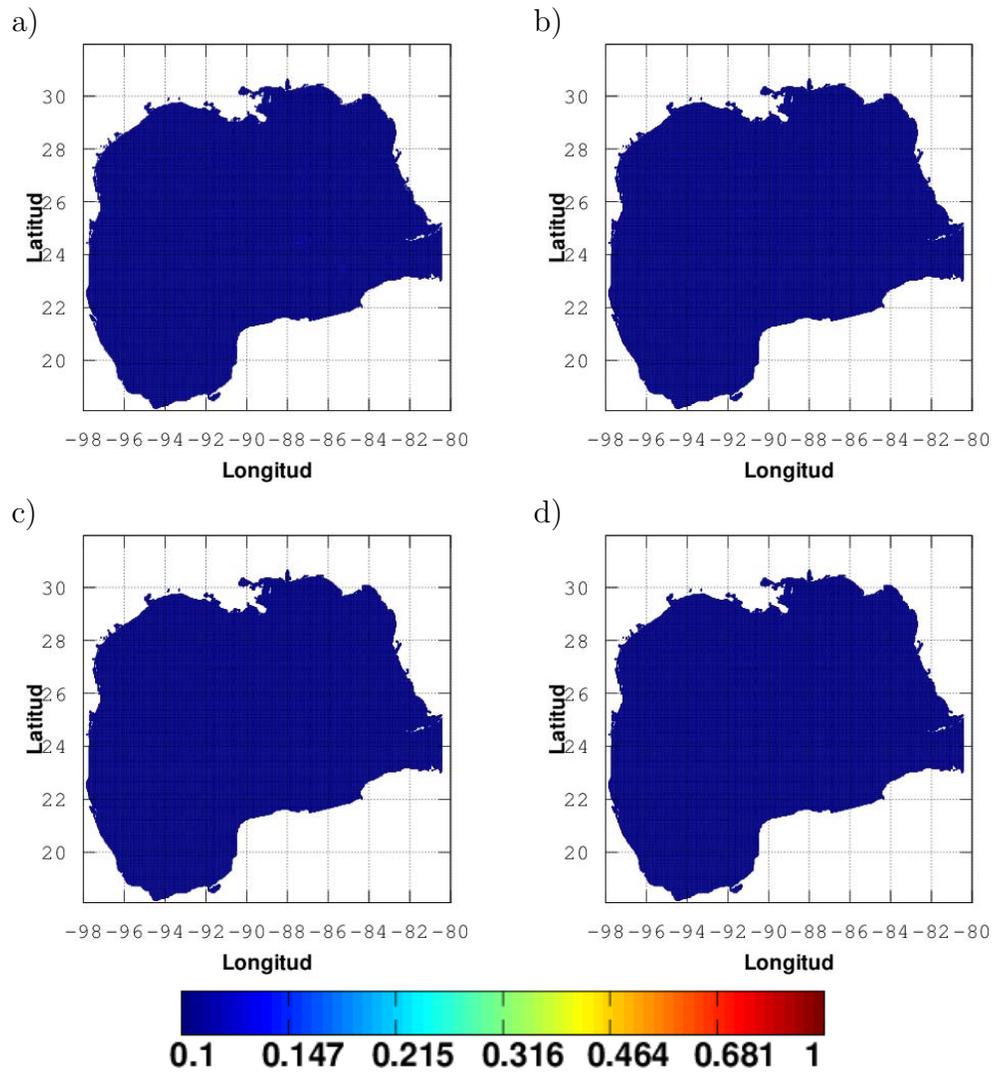


Figura C.14: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

Apéndice D

Resultados en la componente de la temperatura

D.1. Banda temporal de 330-460 días

En las figuras D.1 y D.2 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $9.51^{\circ}C$.

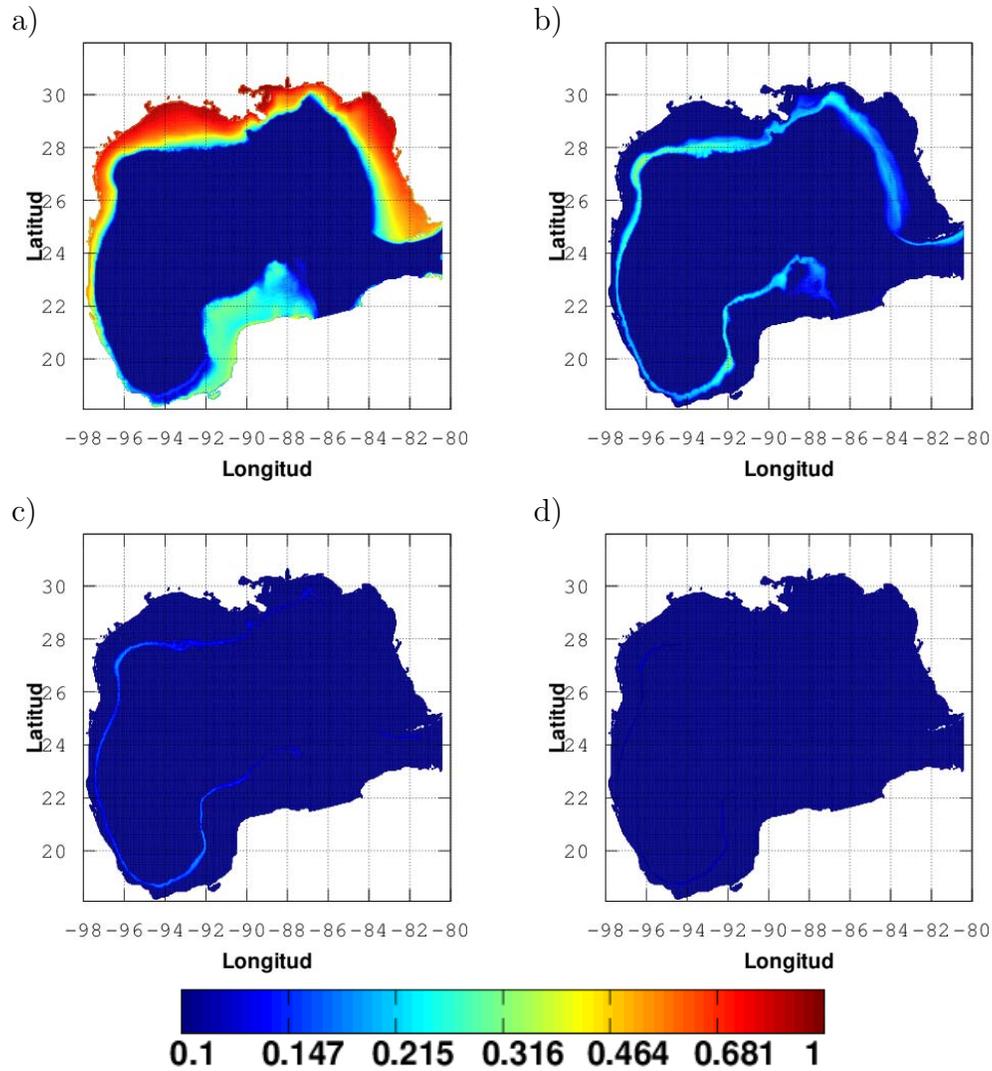


Figura D.1: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

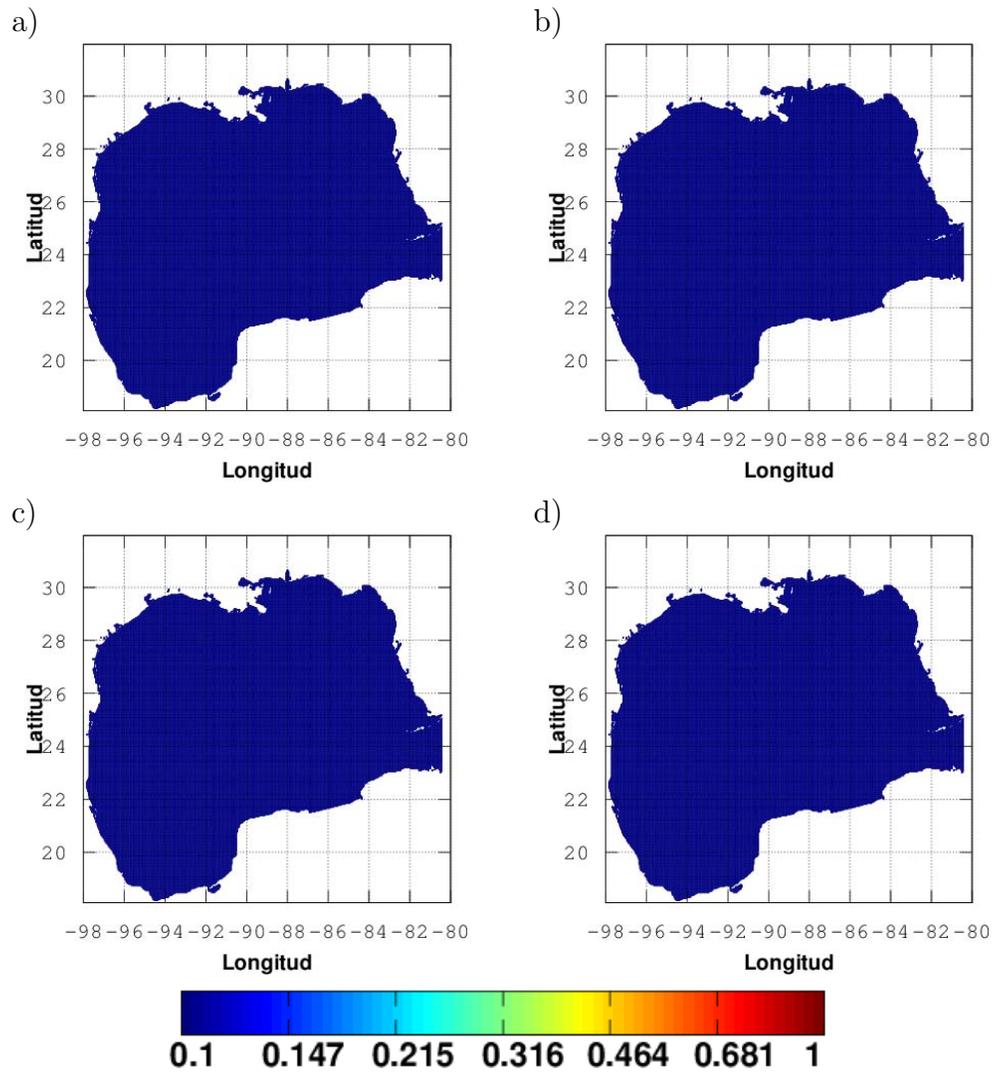


Figura D.2: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

D.2. Banda temporal de 225-330 días

En las figuras D.3 y D.4 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $6.45^{\circ}C$.

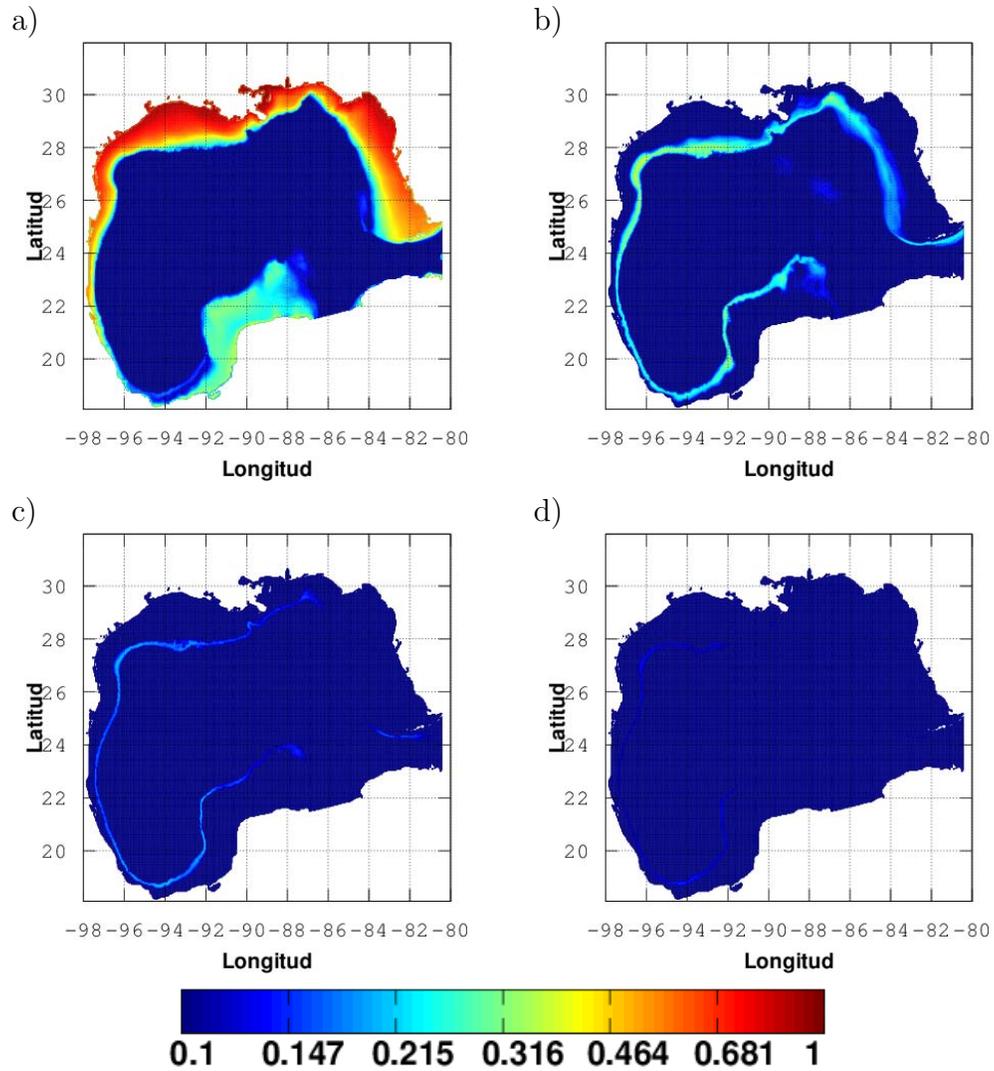


Figura D.3: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

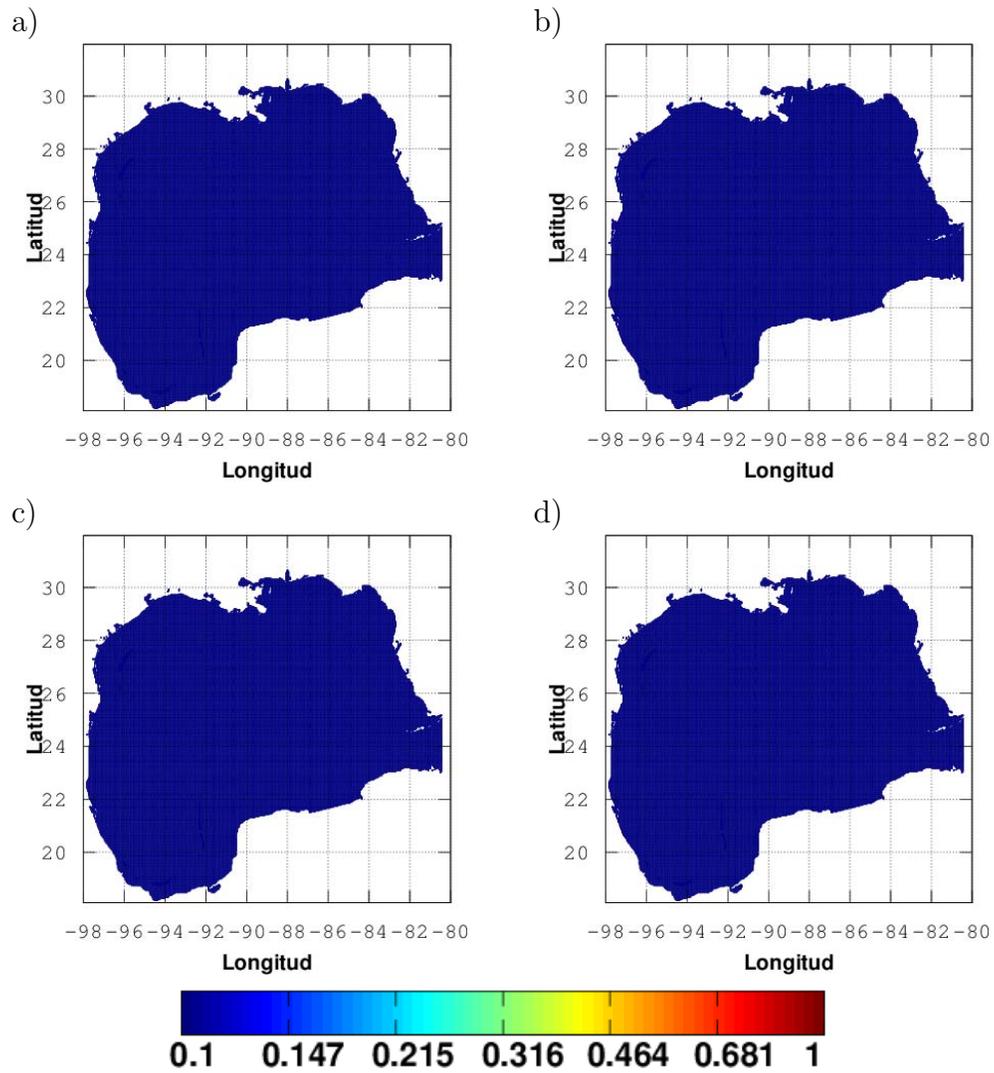


Figura D.4: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

D.3. Banda temporal de 150-225 días

En las figuras D.5 y D.6 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $1.40^{\circ}C$.

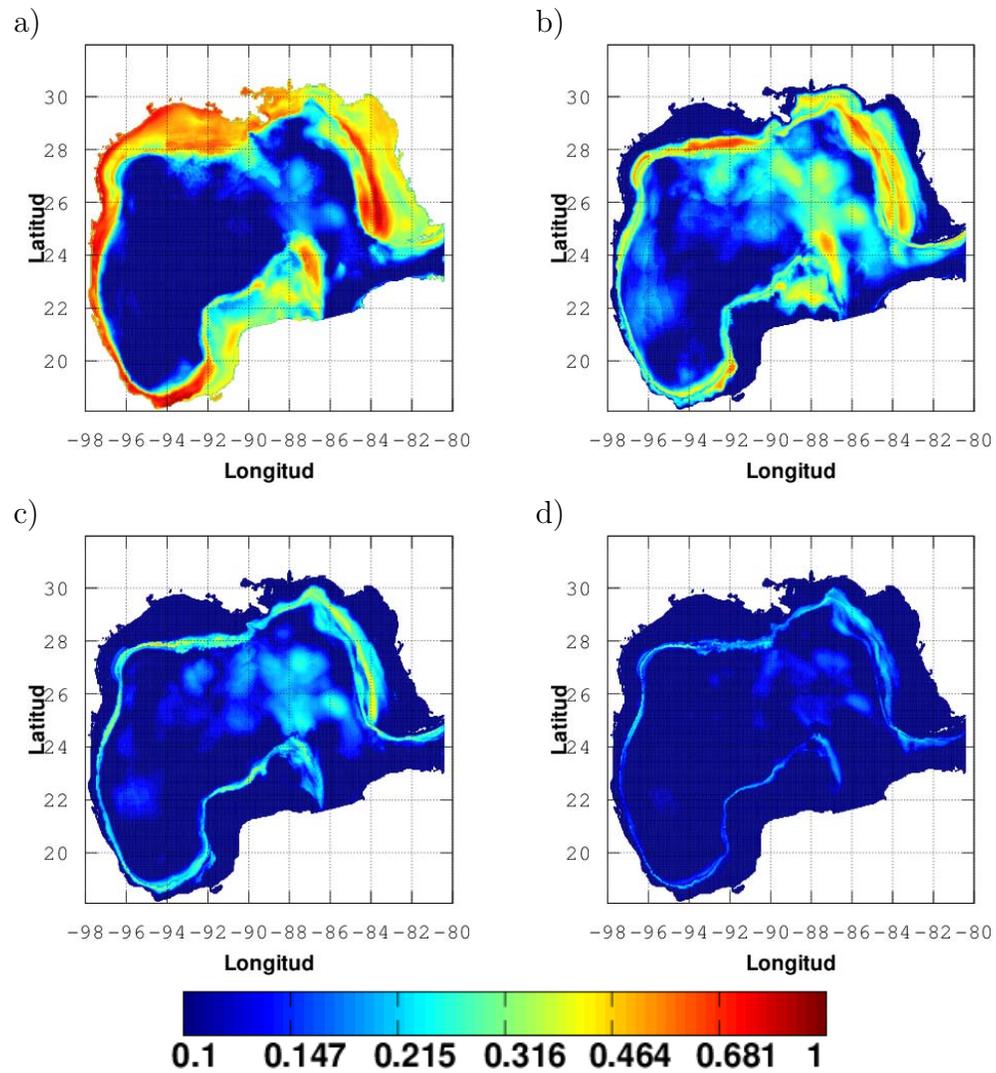


Figura D.5: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

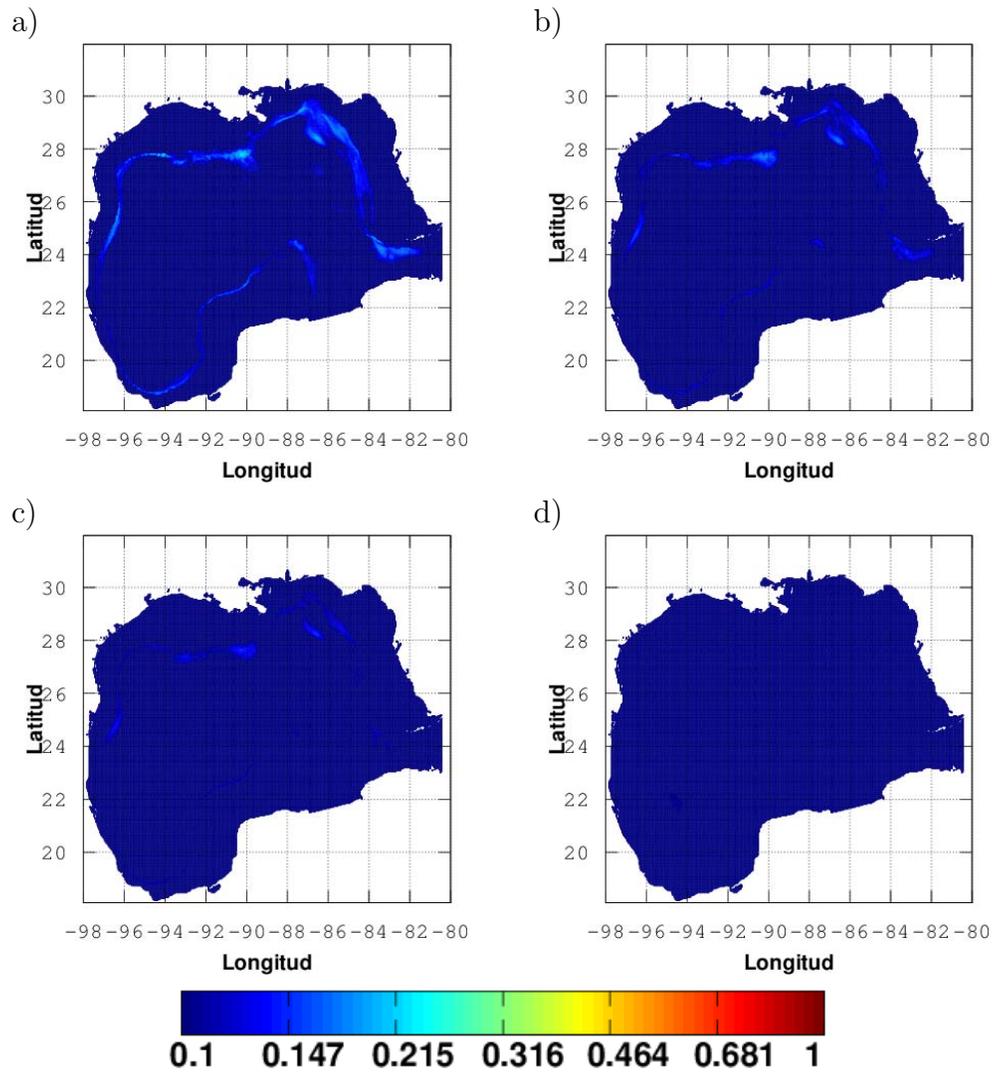


Figura D.6: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

D.4. Banda temporal de 110-150 días

En las figuras D.7 y D.8 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.97^{\circ}C$.

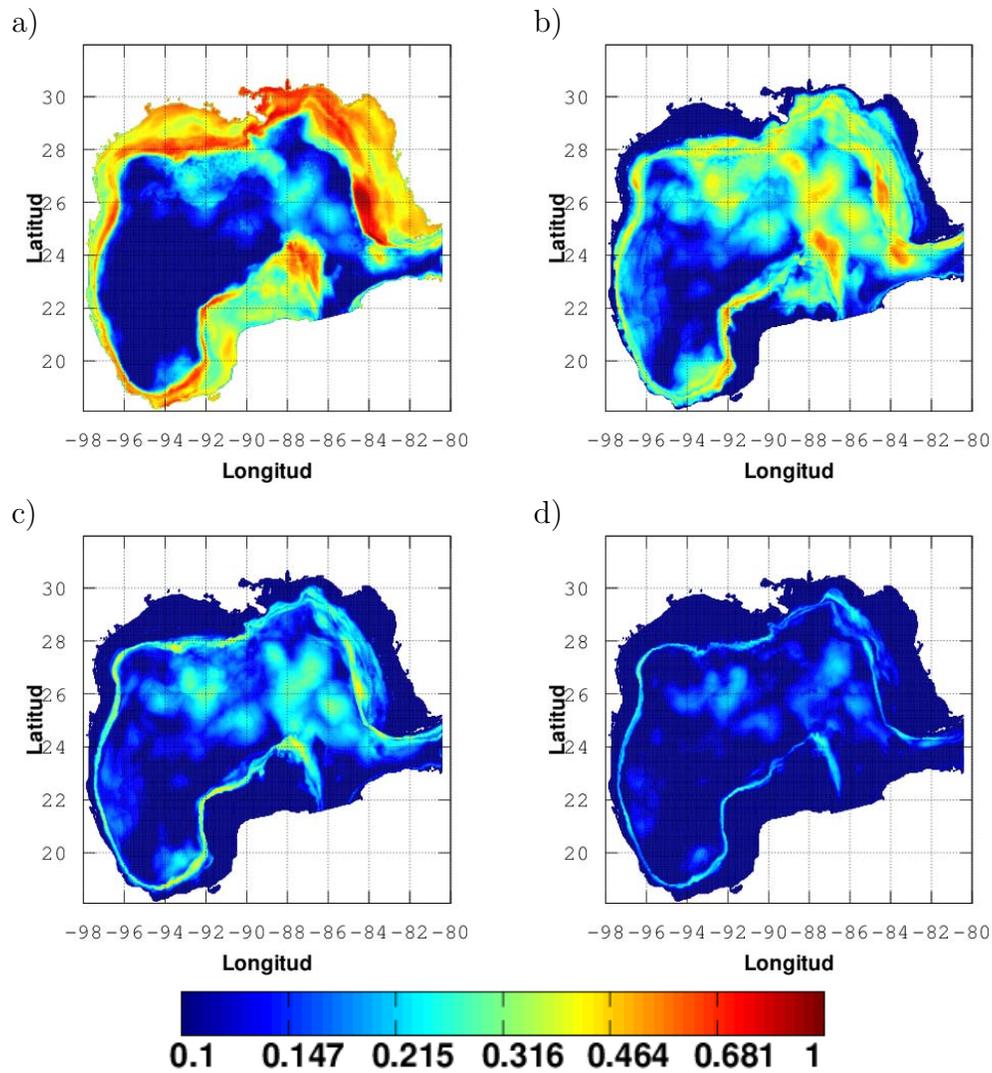


Figura D.7: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

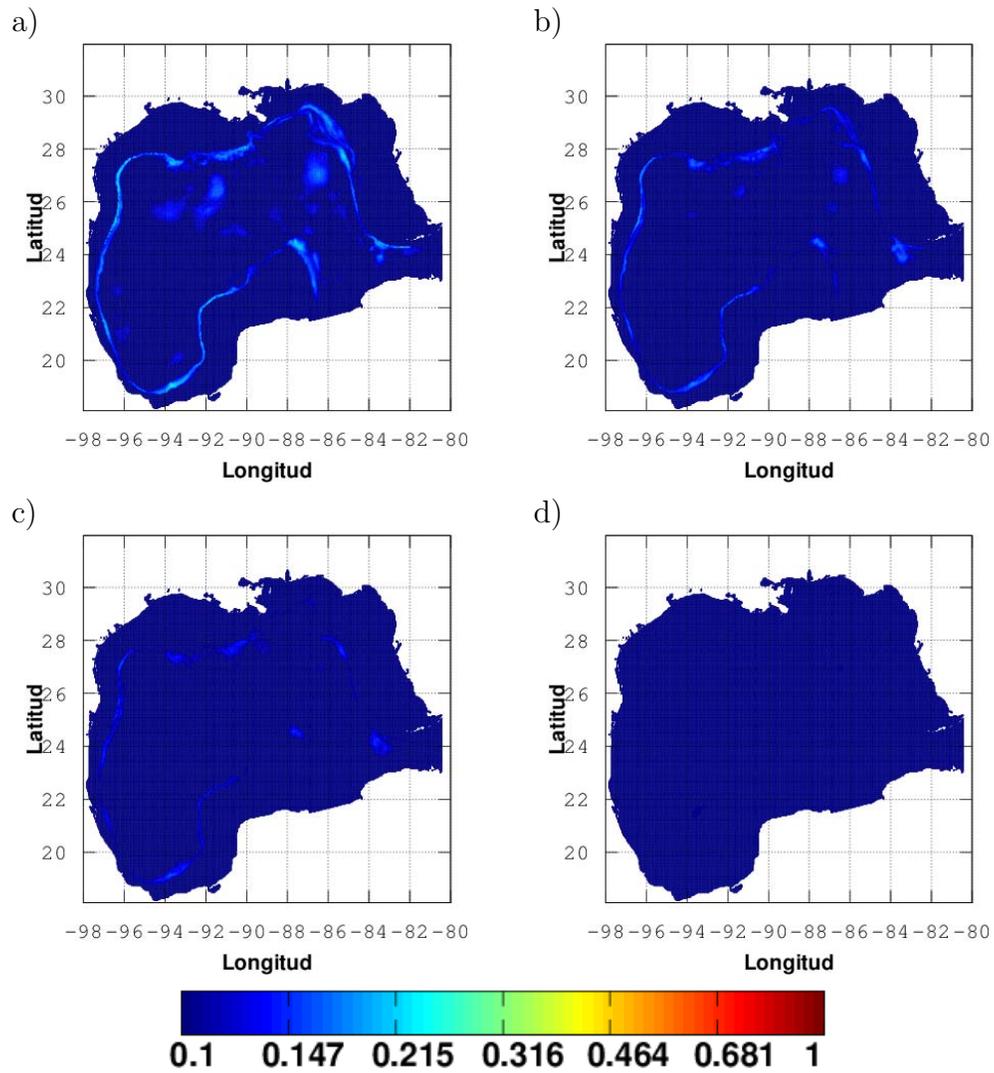


Figura D.8: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

D.5. Banda temporal de 85-110 días

En las figuras D.9 y D.10 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $1.07^{\circ}C$.

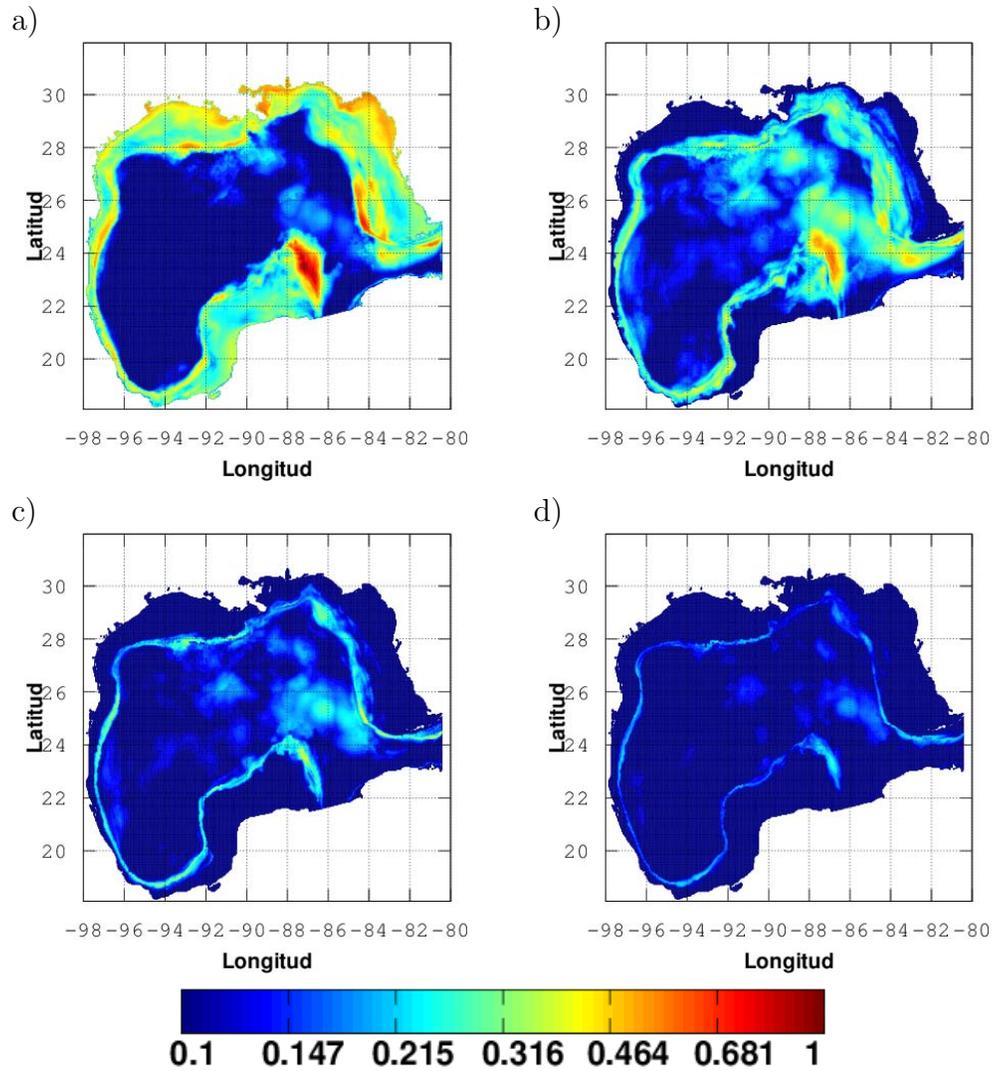


Figura D.9: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

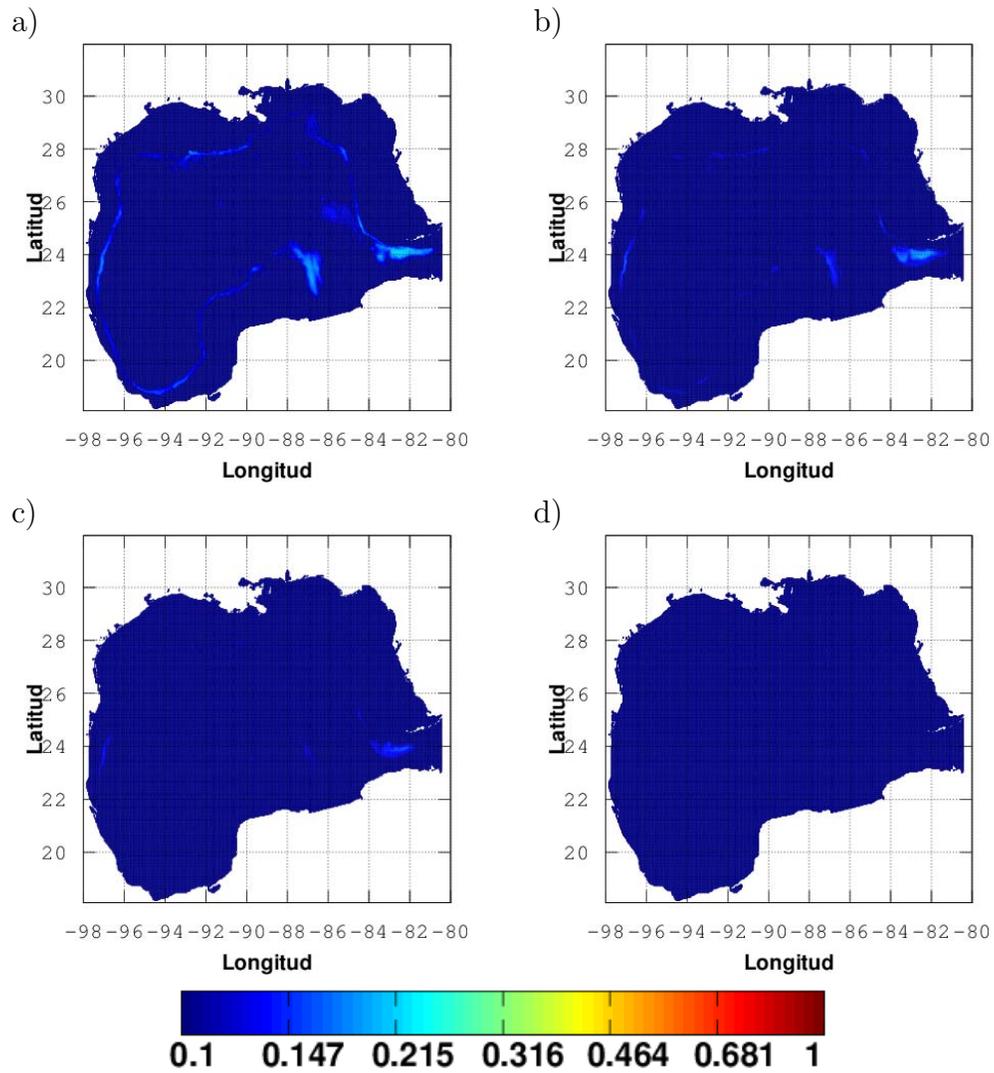


Figura D.10: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

D.6. Banda temporal de 40-85 días

En las figuras D.11 y D.12 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $1.02^{\circ}C$.

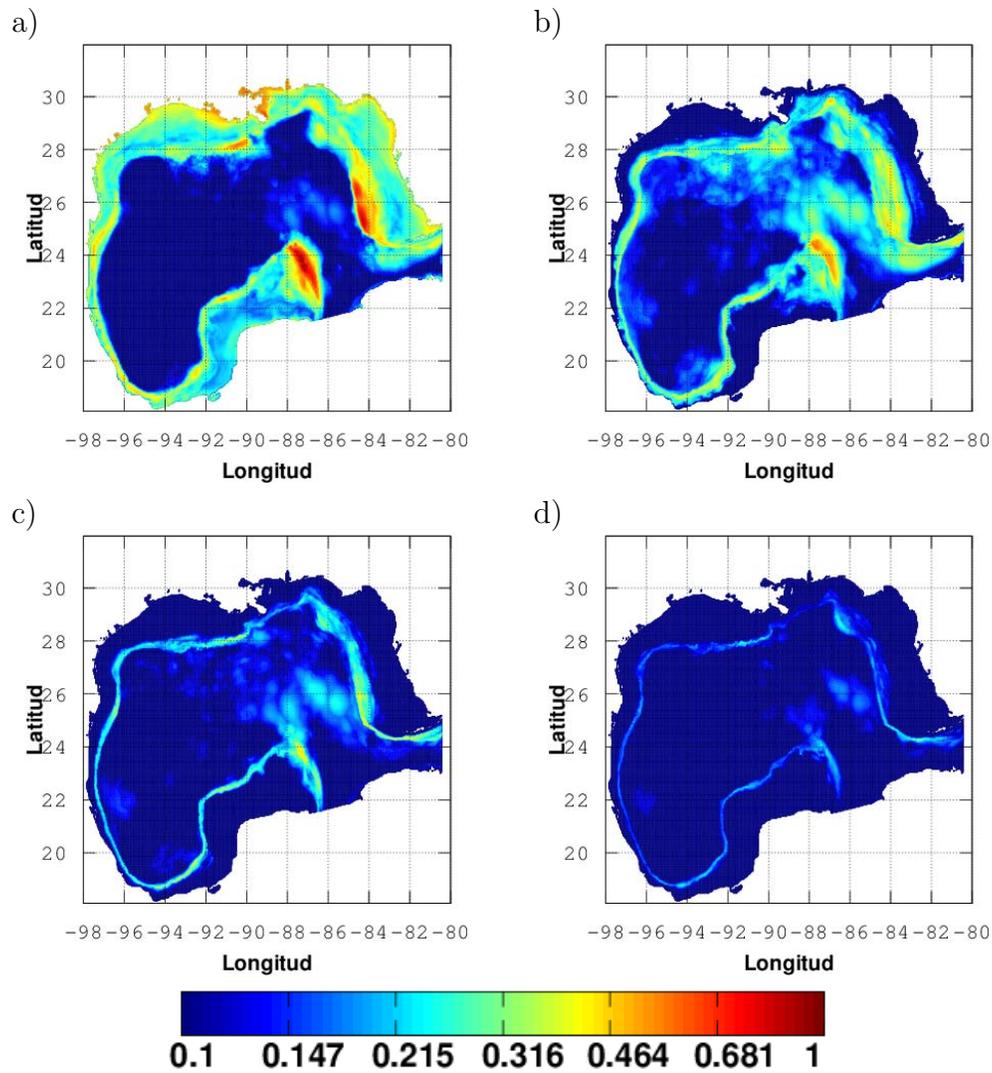


Figura D.11: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

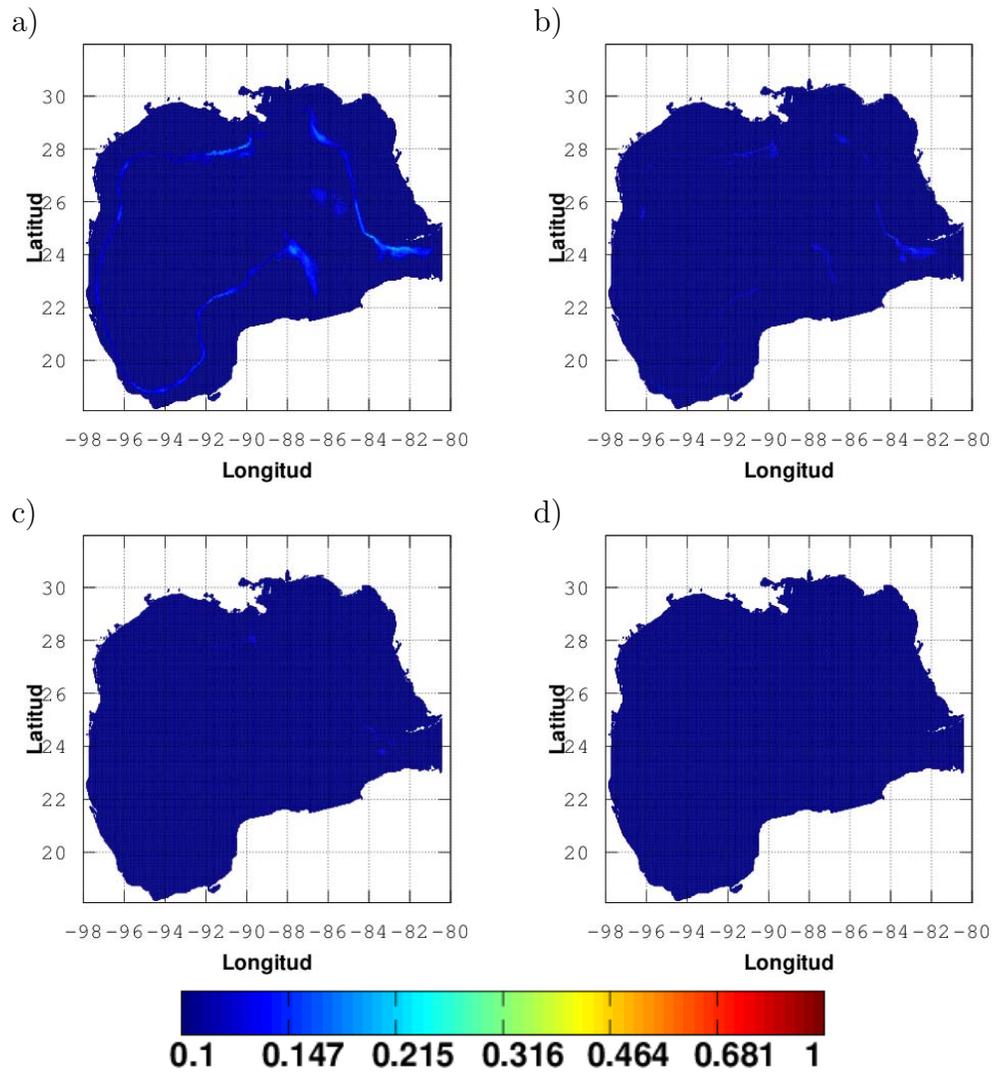


Figura D.12: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

D.7. Banda temporal de 2-40 días

En las figuras D.13 y D.14 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $0.64^{\circ}C$.

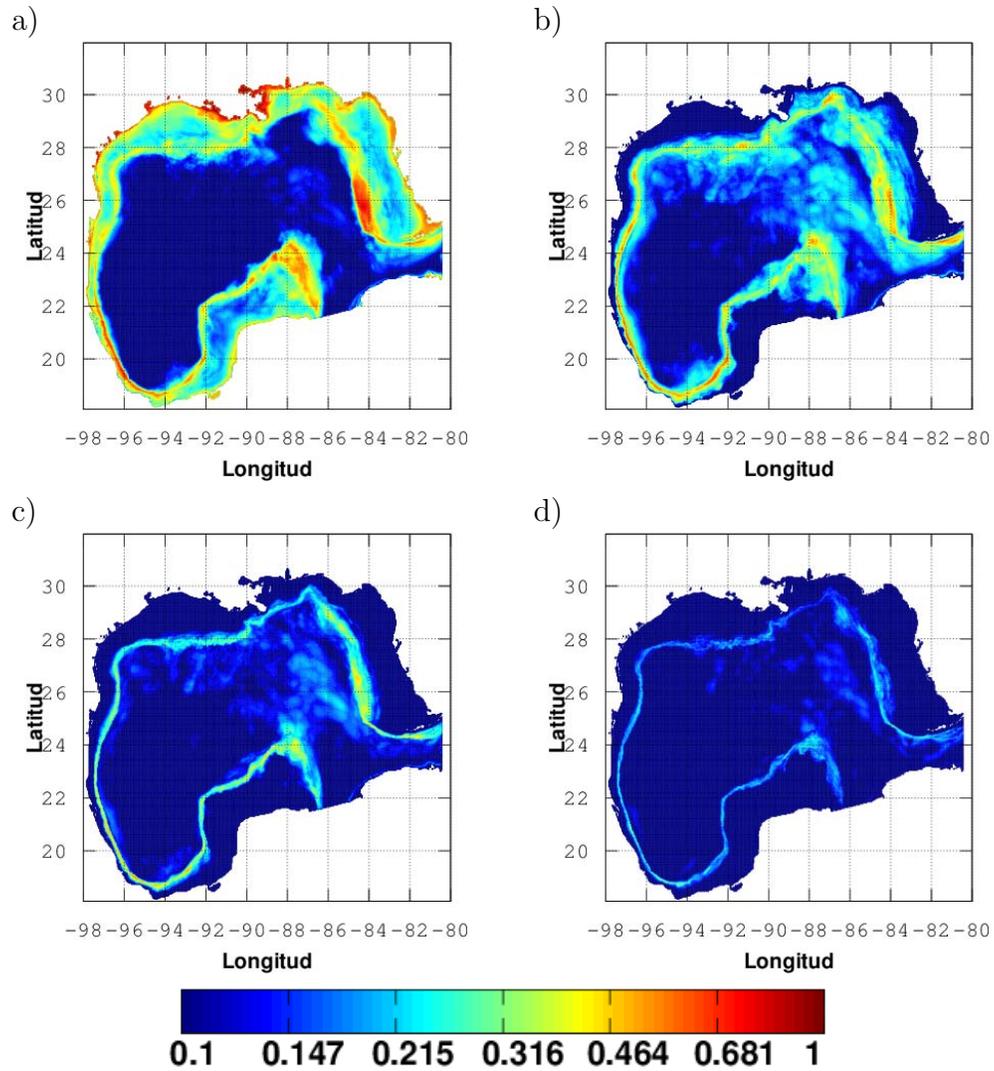


Figura D.13: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

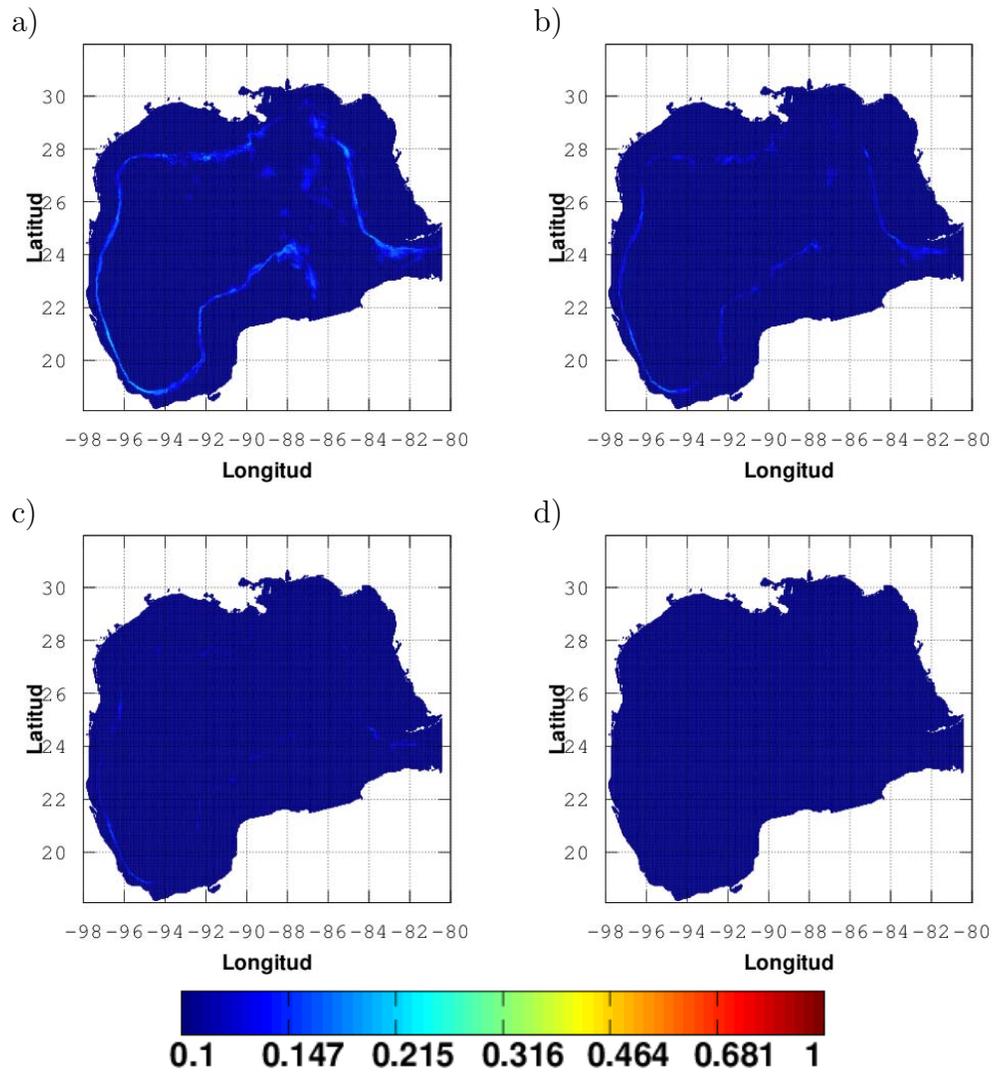


Figura D.14: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

Apéndice E

Resultados en la componente de salinidad

E.1. Banda temporal de 330-460 días

En las figuras E.1 y E.2 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $8.41[ups]$.

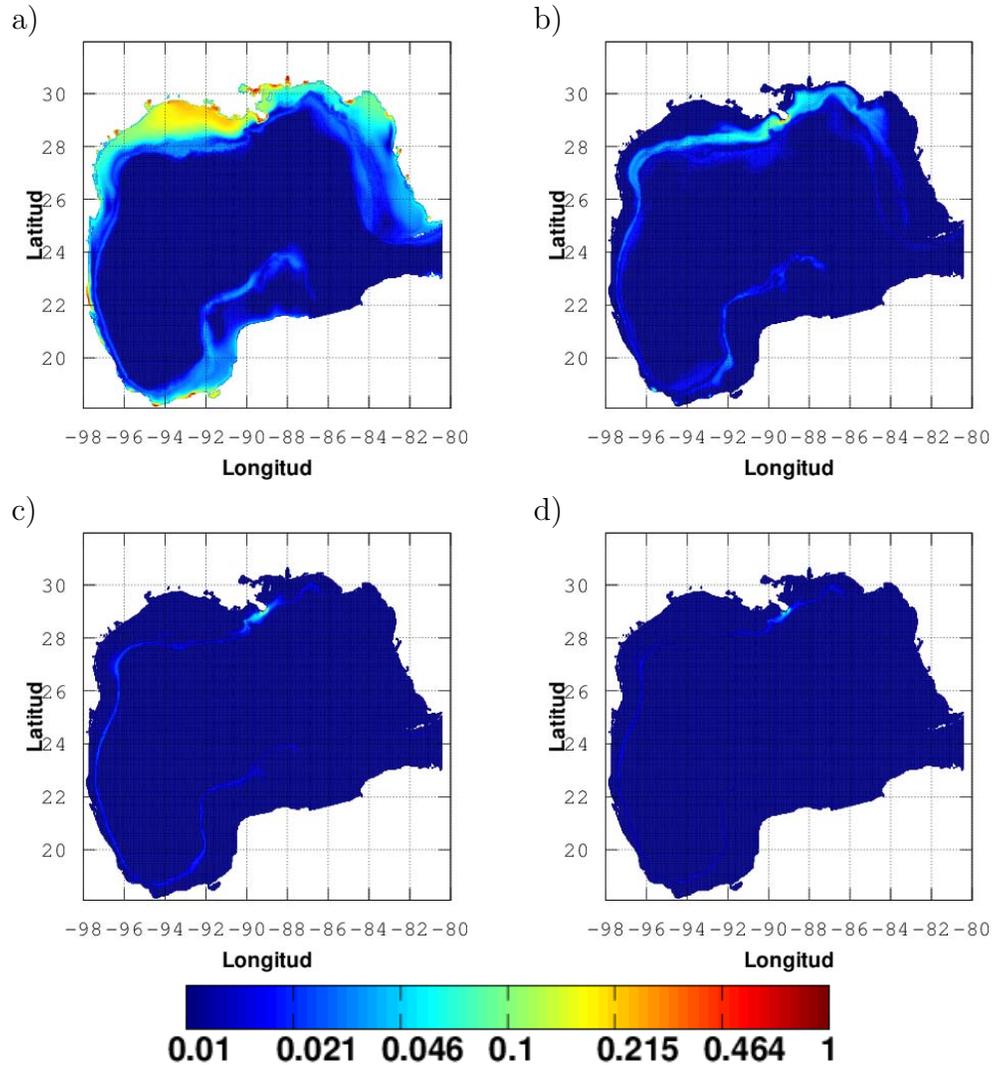


Figura E.1: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

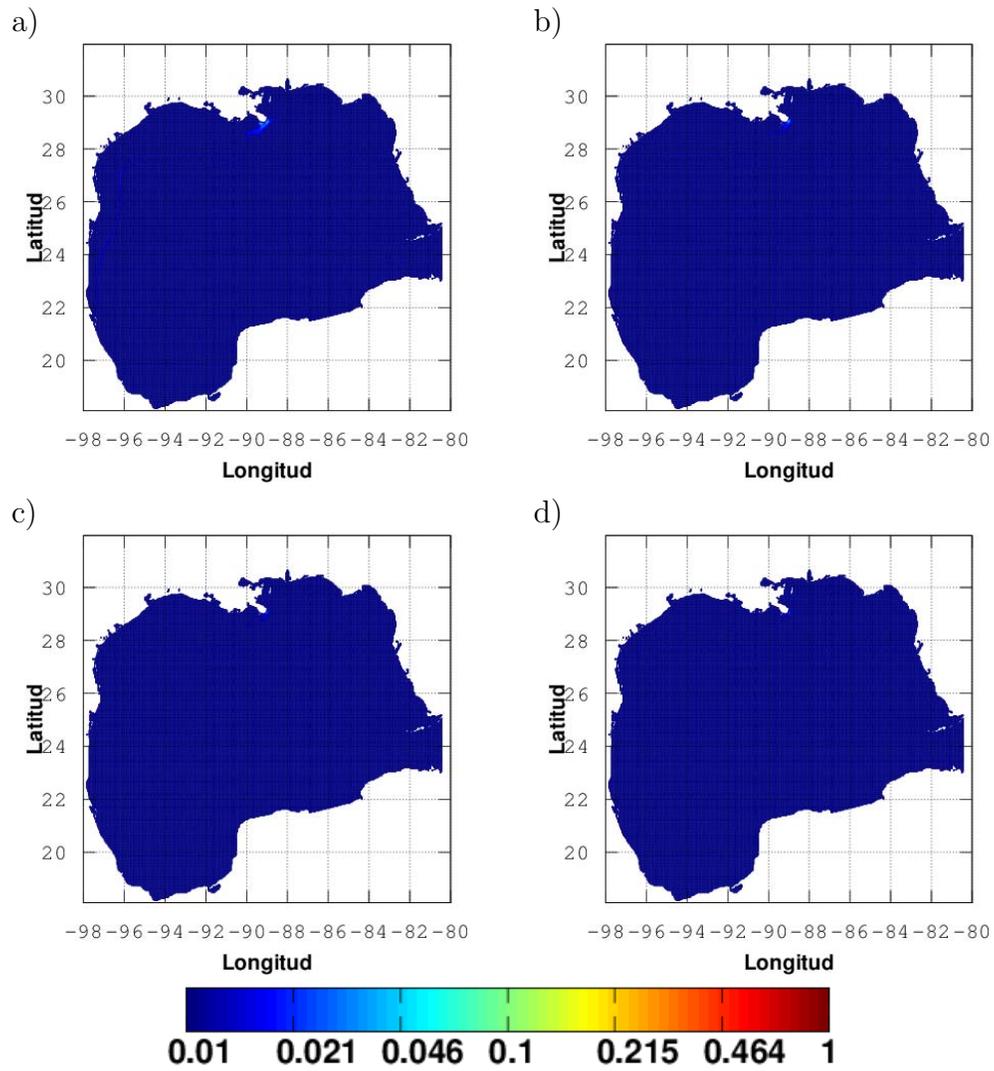


Figura E.2: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 330-460 días.

E.2. Banda temporal de 225-330 días

En las figuras E.3 y E.4 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $5.92[ups]$.

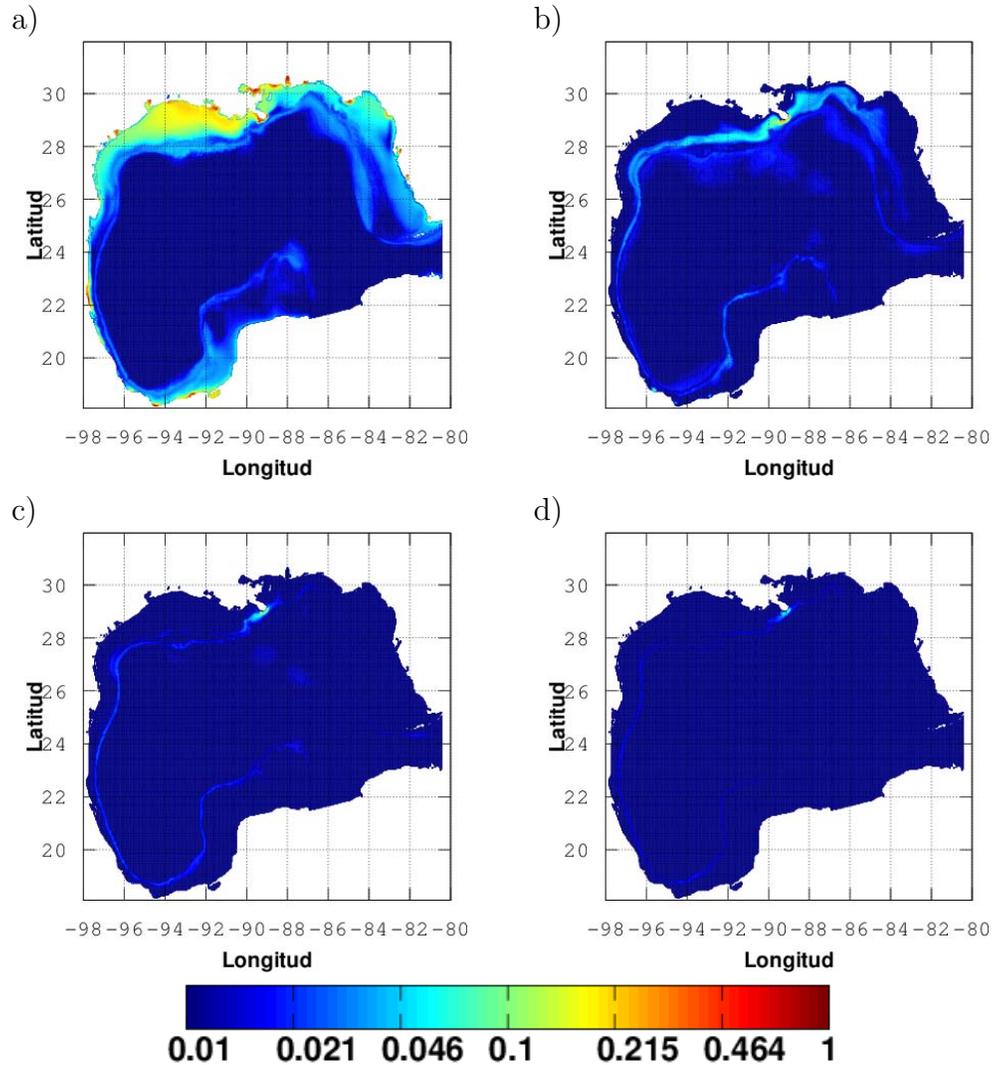


Figura E.3: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

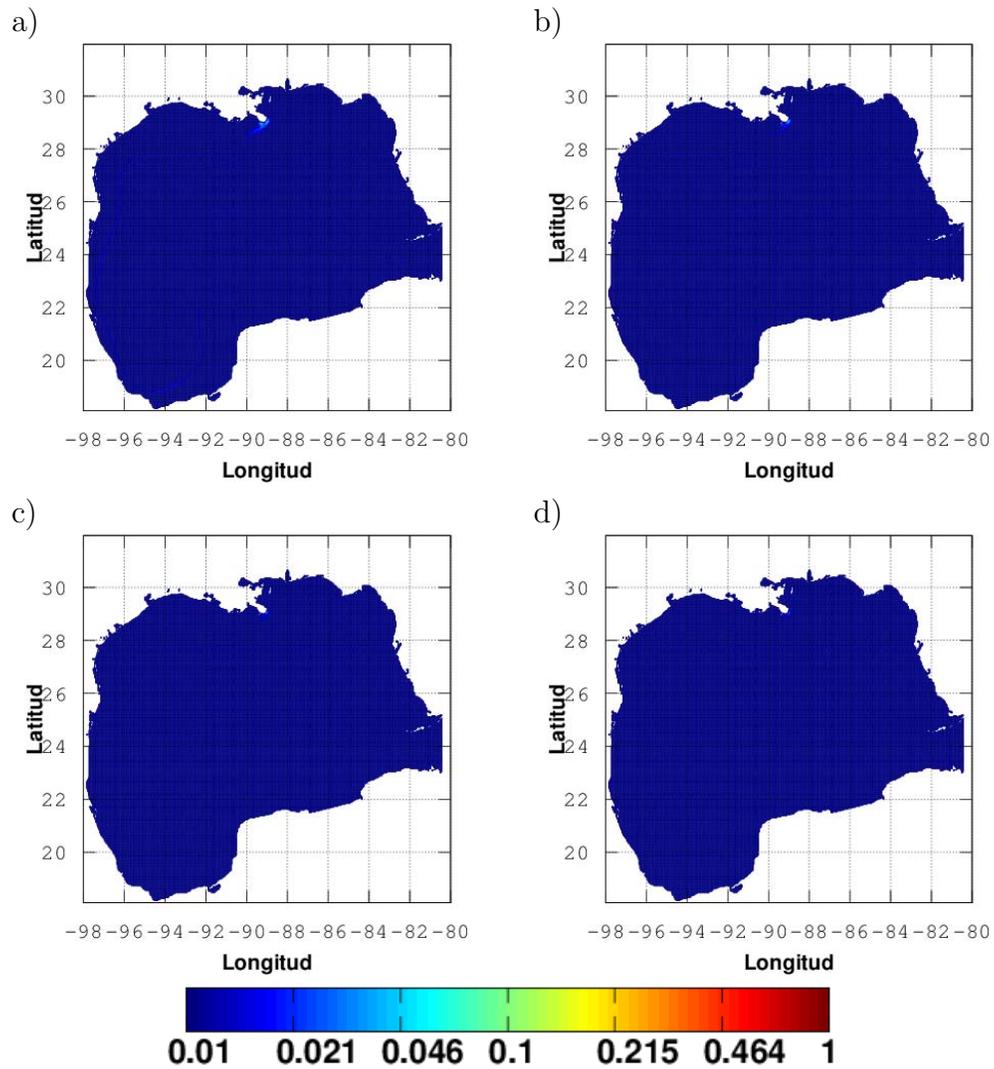


Figura E.4: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 225-330 días.

E.3. Banda temporal de 150-225 días

En las figuras E.5 y E.6 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $4.60[ups]$.

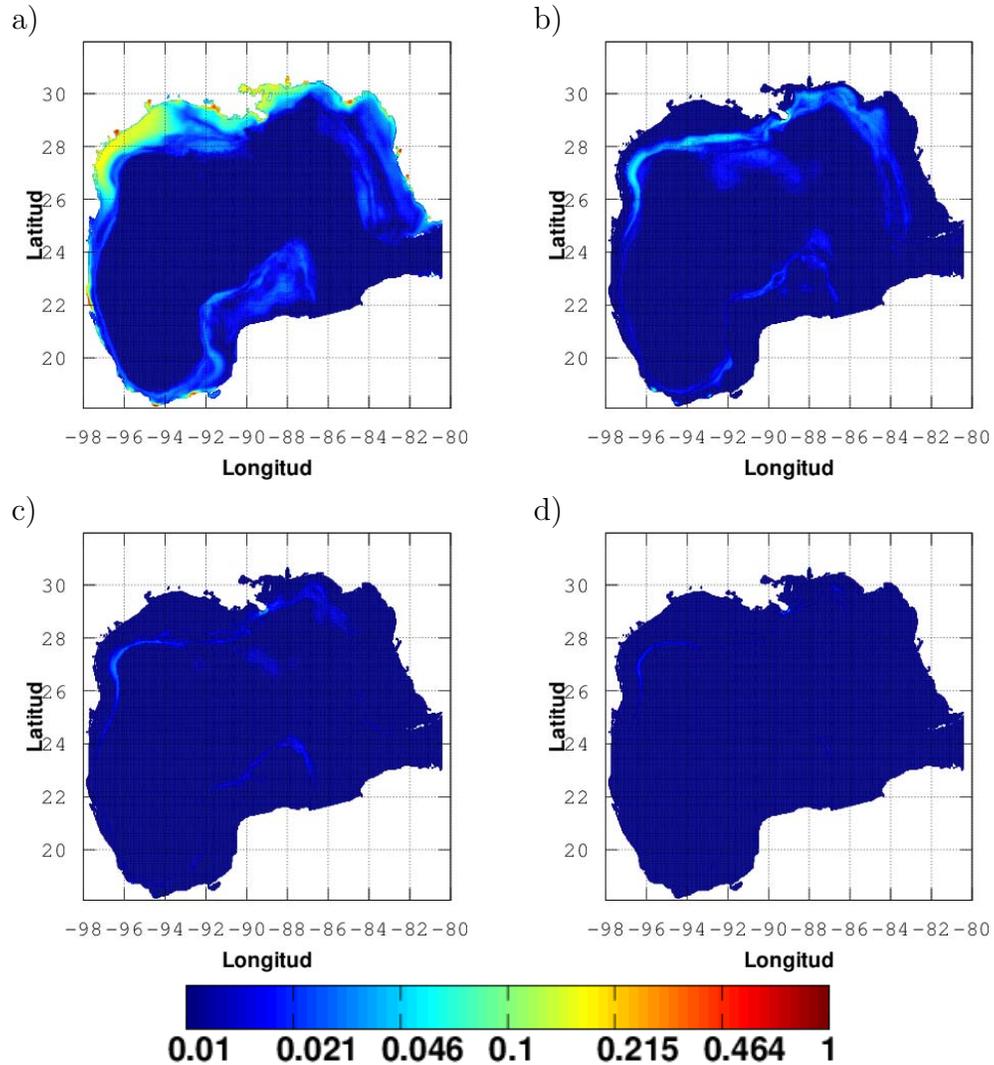


Figura E.5: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

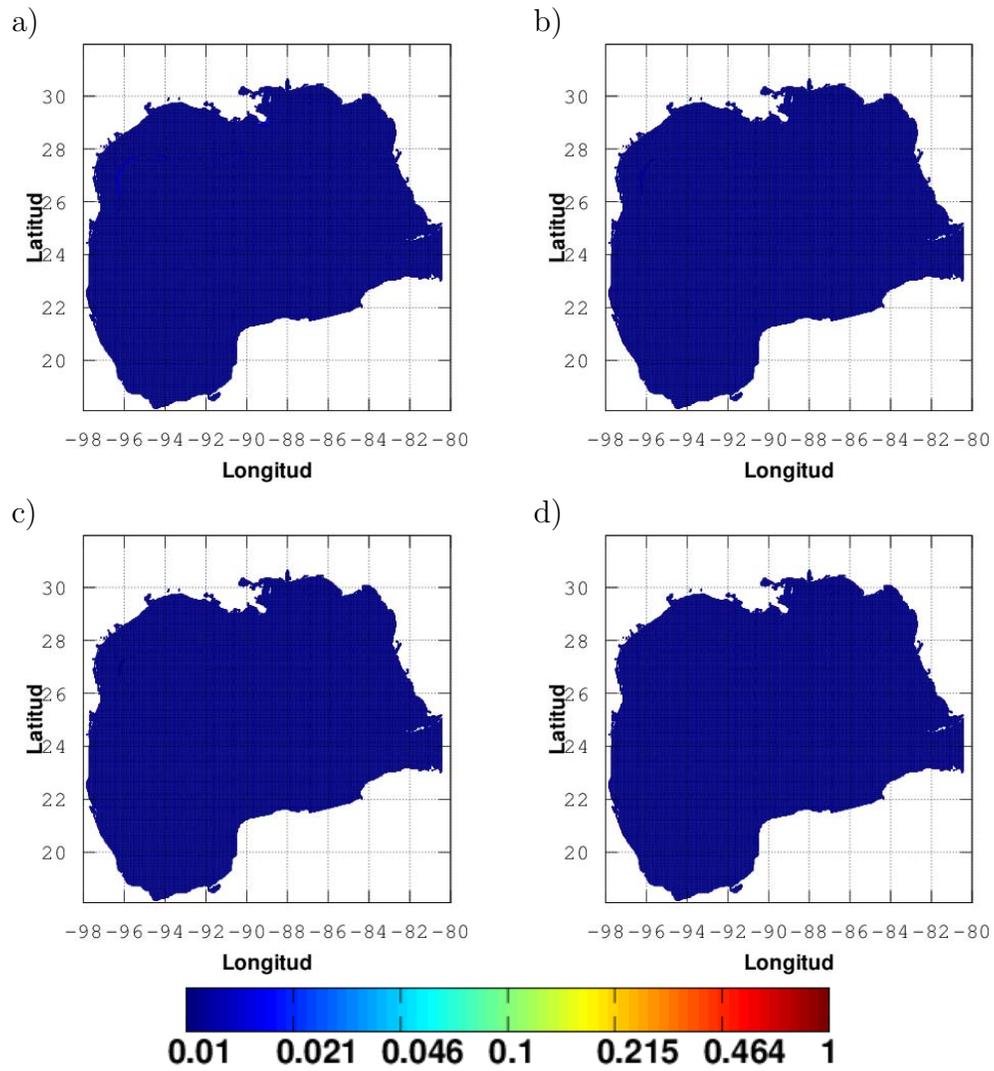


Figura E.6: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 150-225 días.

E.4. Banda temporal de 110-150 días

En las figuras E.7 y E.8 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $2.61[ups]$.

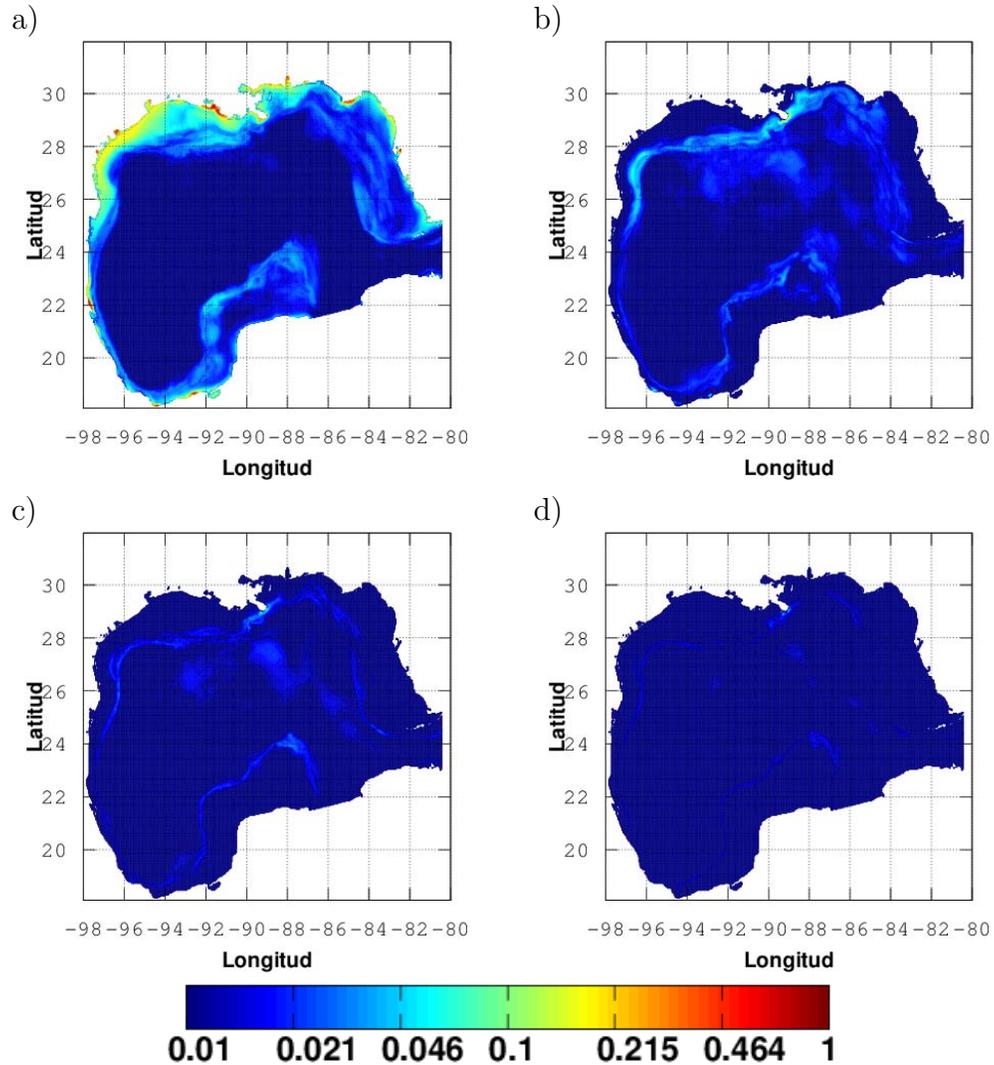


Figura E.7: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

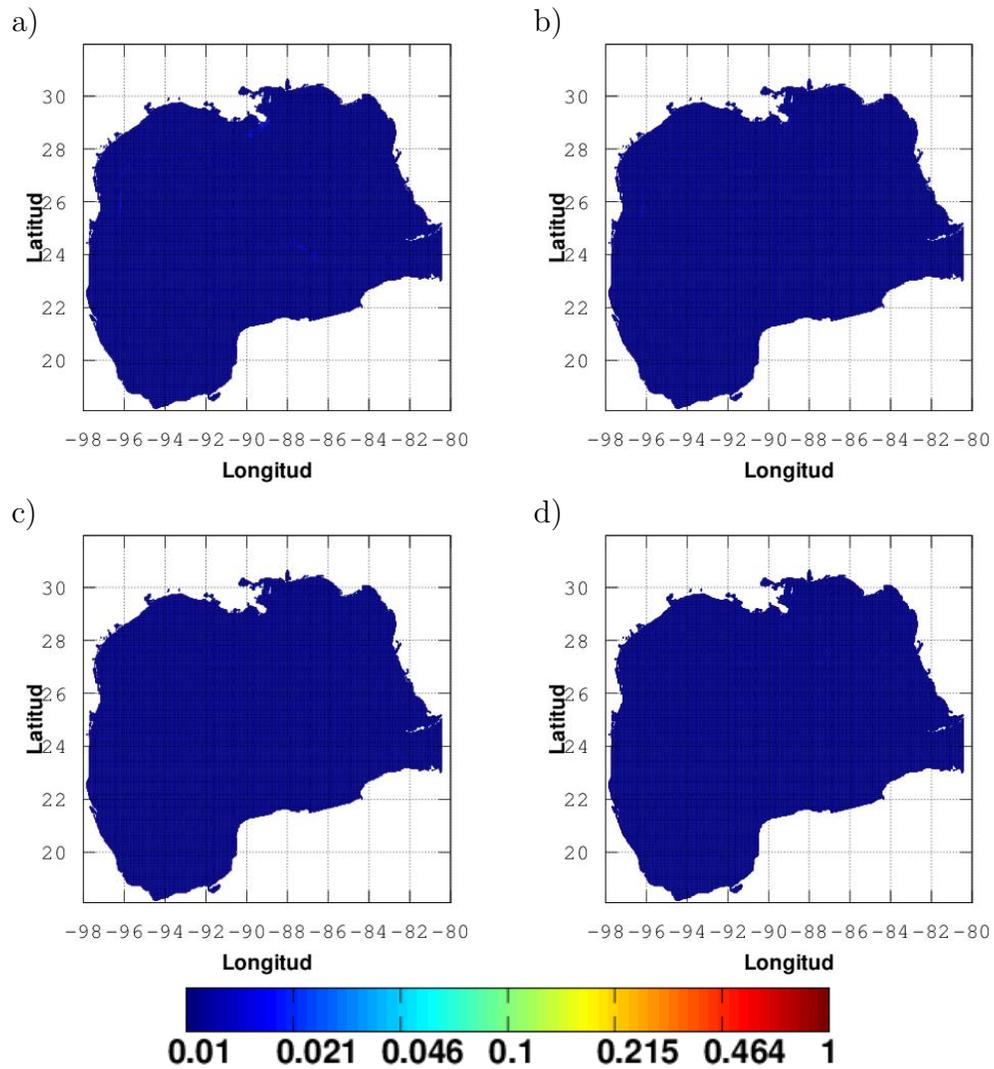


Figura E.8: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 110-150 días.

E.5. Banda temporal de 85-110 días

En las figuras E.9 y E.10 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $1.79[ups]$.

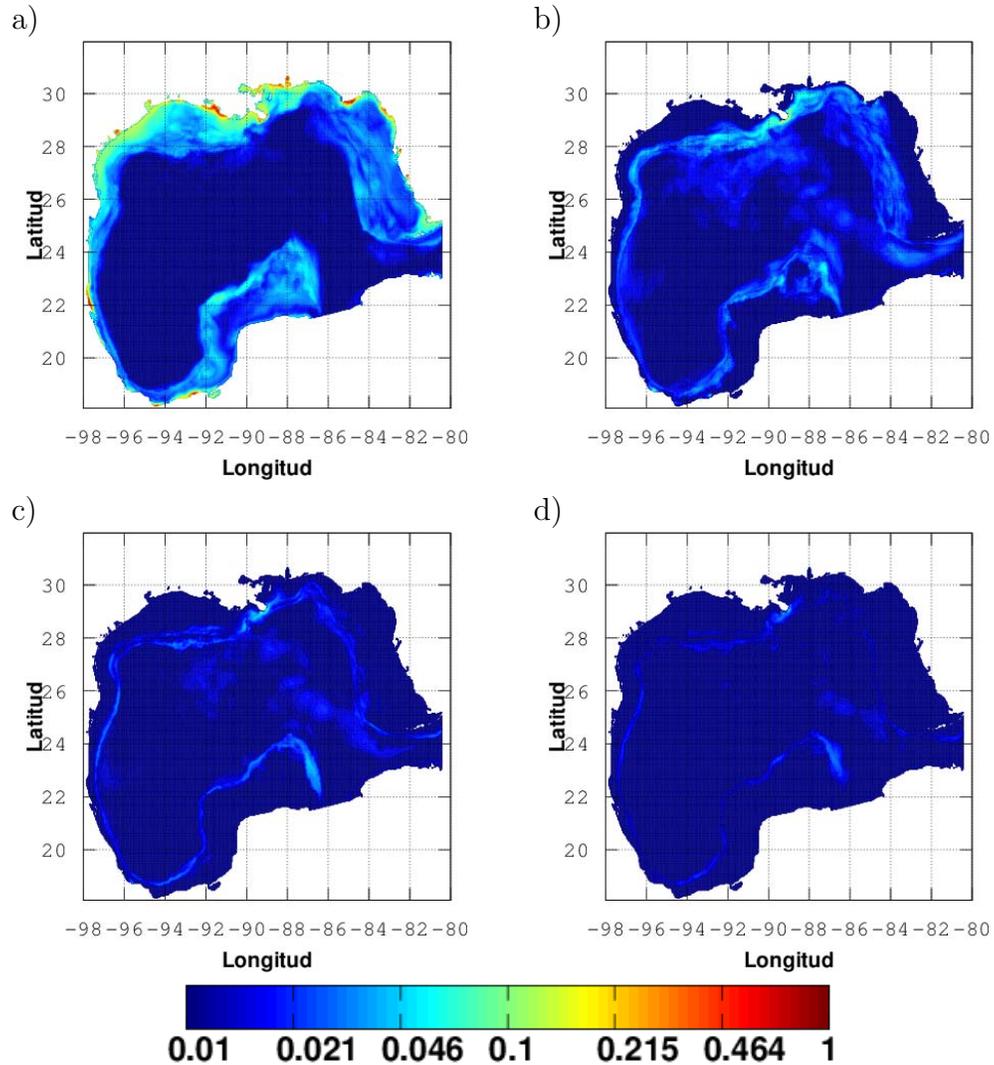


Figura E.9: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

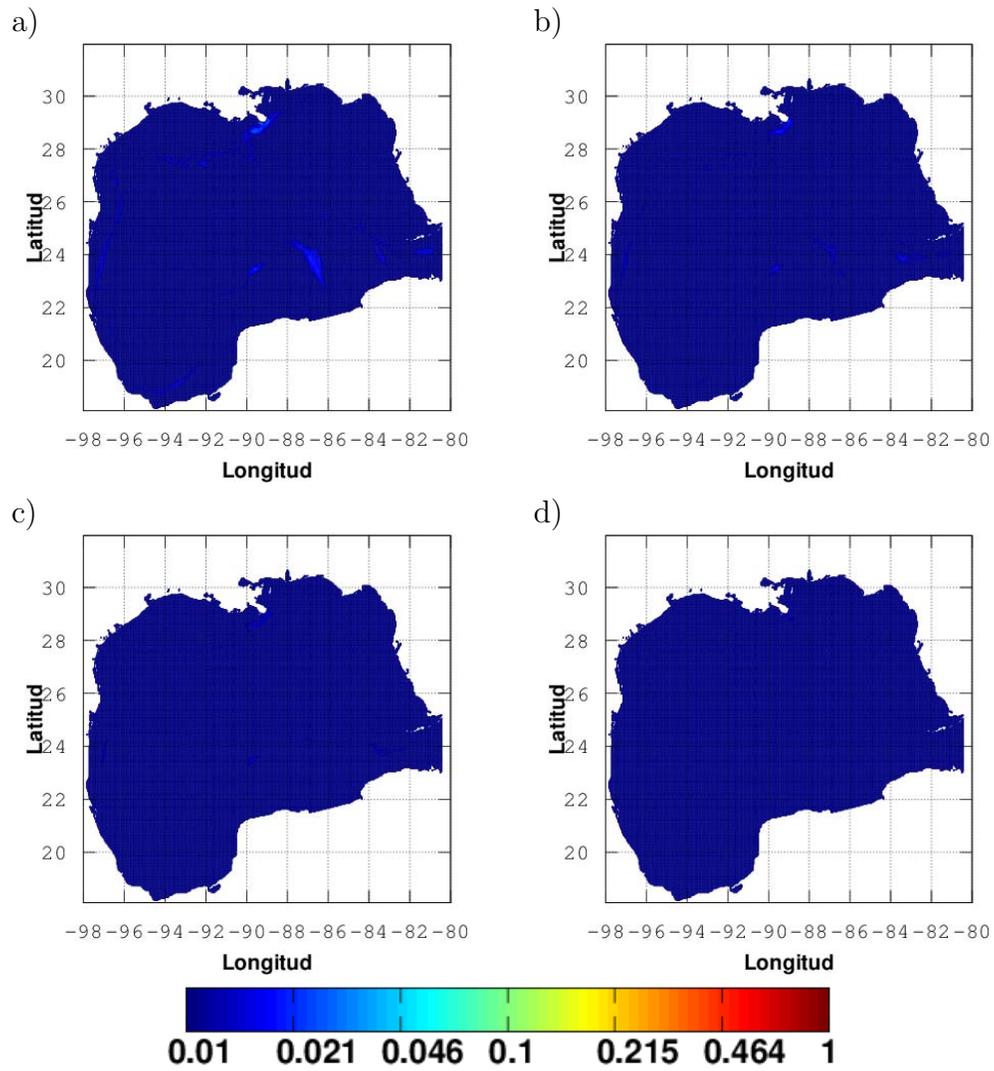


Figura E.10: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 85-110 días.

E.6. Banda temporal de 40-85 días

En las figuras E.11 y E.12 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $2.70[ups]$.

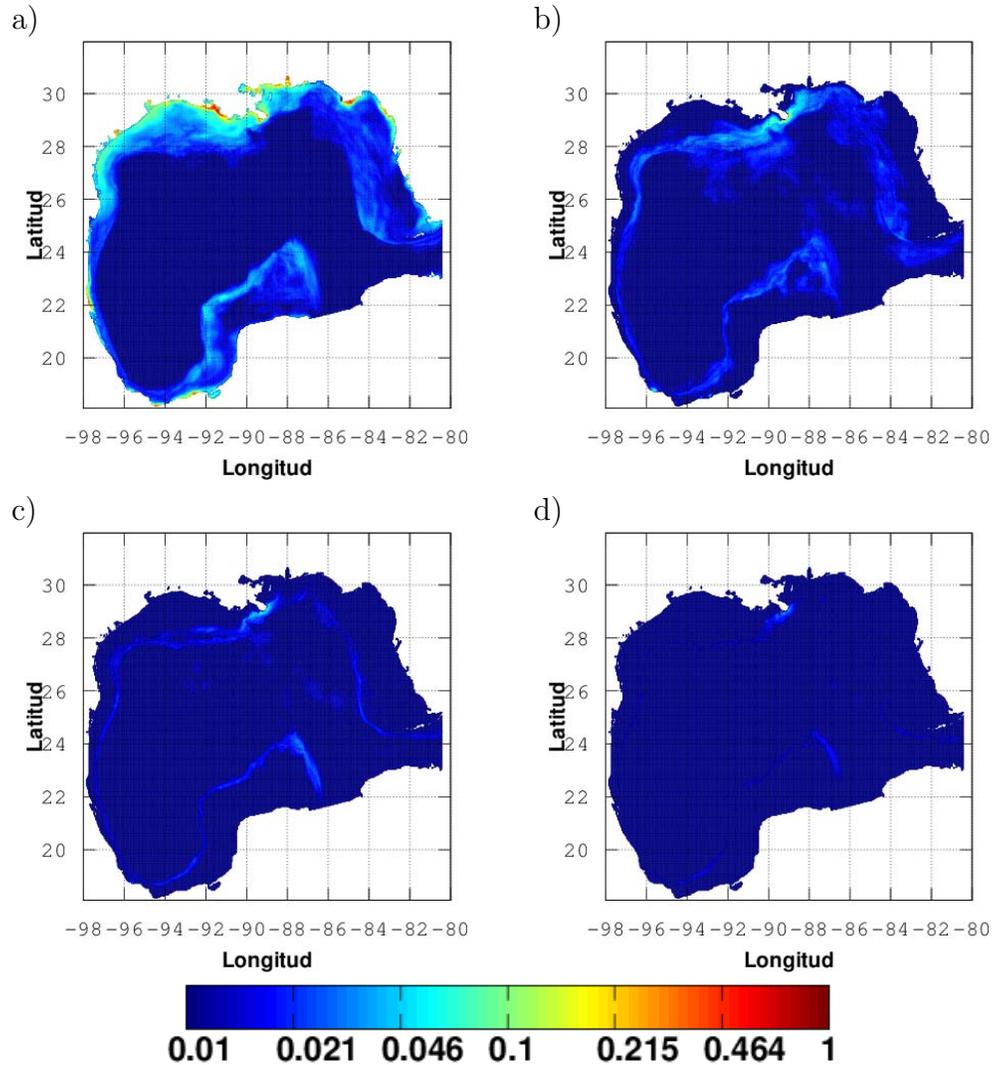


Figura E.11: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

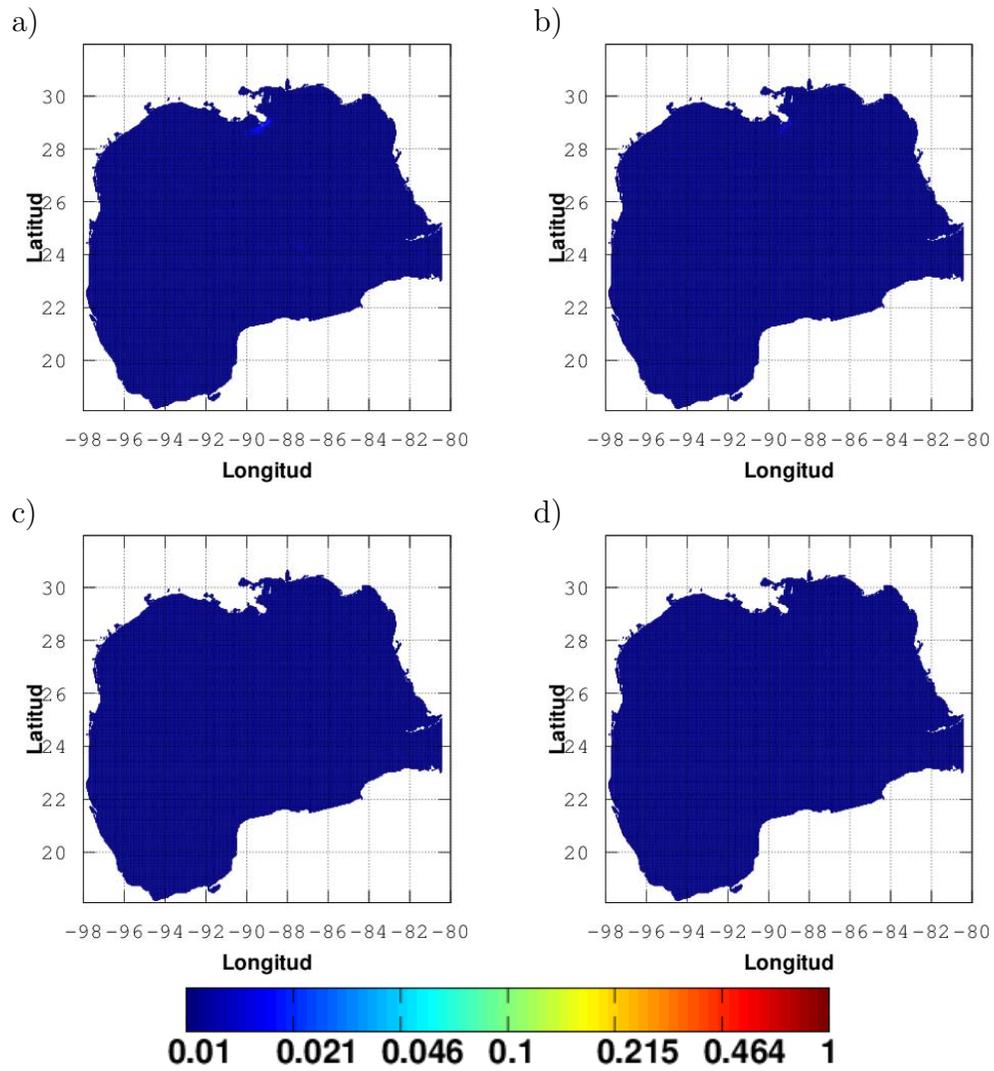


Figura E.12: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 40-85 días.

E.7. Banda temporal de 2-40 días

En las figuras E.13 y E.14 se escalan a 1 el valor máximo de oscilación de $2.16[\text{ups}]$.

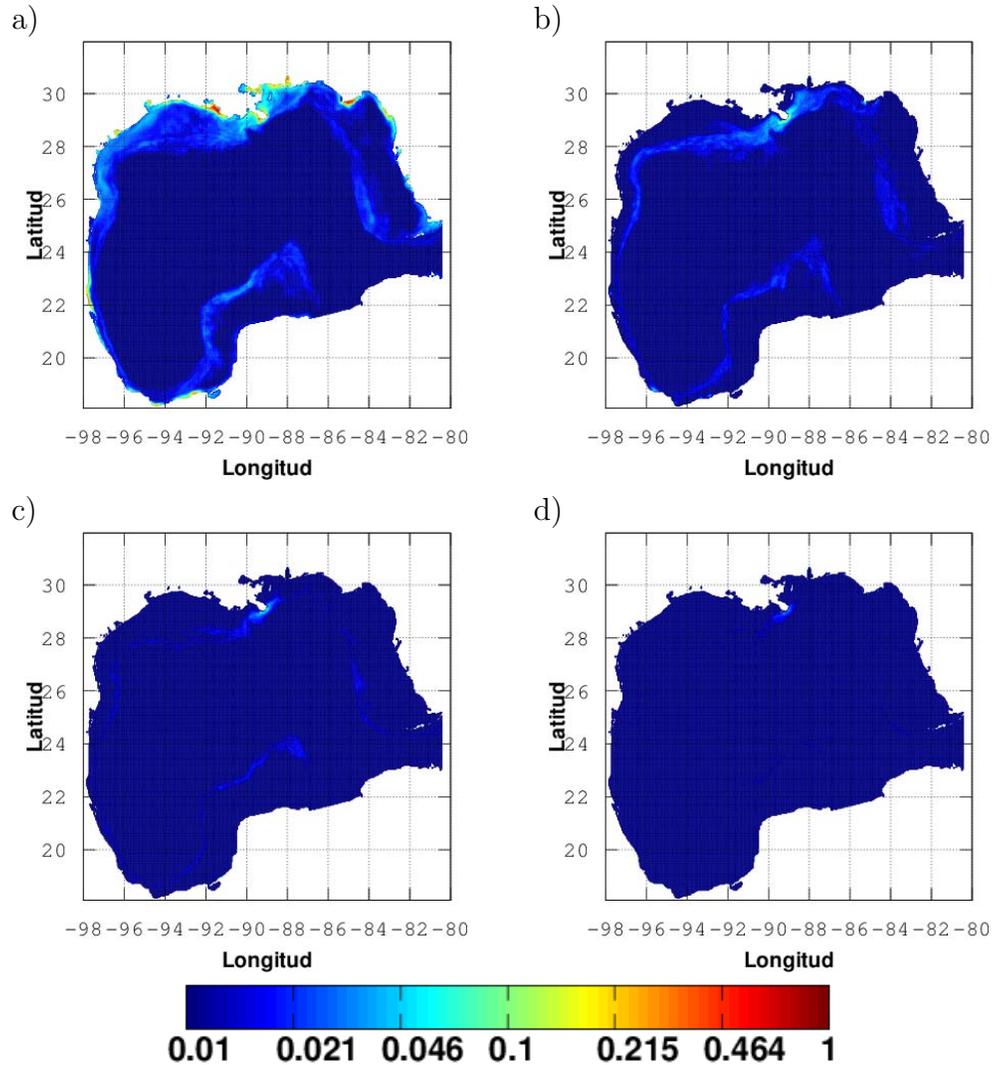


Figura E.13: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

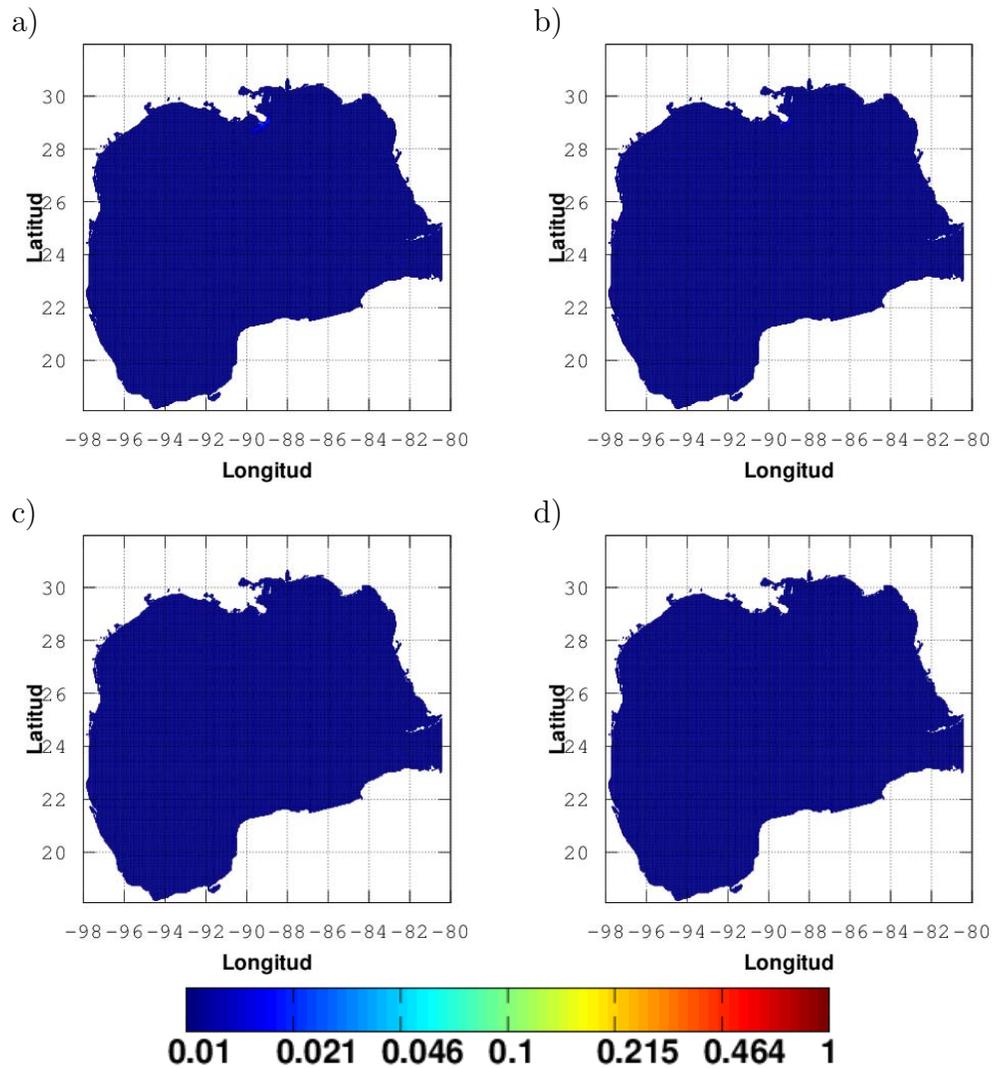


Figura E.14: Distribución de amplitudes de oscilación de los modos a) m_0 , b) m_1 , c) m_2 y d) m_3 en la banda temporal de 2-40 días.

Bibliografía

- [1] *Circulation in the gulf of mexico: Observations and models*, ch. Intermediate-Depth Circulation in the Gulf of Mexico Estimated from Direct Measurements, American Geophysical Union, (2005).
- [2] A.Aubanell, A.Benseny,A.Delshams, *Útiles básicos de cálculo numérico*, Editorial Labor, 1993.
- [3] L.R.A. Capurro and J.L. Reid, *Contributions on the physical oceanography of the gulf of mexico*, Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Gulf Pub. Co., 1972.
- [4] J. A. Cummings, *Operational multivariate ocean data assimilation*, Q.J.R. Meteorol. Soc (2005).
- [5] Peter R. Gent, Kathleen O'Neill, and Mark A Cane, *A model of the semiannual oscillation in the equatorial indian ocean*, Journal of physical oceanography **13** (1983), no. 12, 2148–2160.
- [6] F.J. Harris, *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform*, Proceedings of the IEEE **66** (1978), no. 1, 51–83.
- [7] Monson H. Hayes, *Statistical digital signal processing and modeling*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1996.
- [8] Ingle, V.K. and Proakis, J.G., *Digital signal processing using matlab*, Cengage Learning, 2011.
- [9] L.I. Ivanov and B.A. Magnell, *Classification of strong current events based on gulf of mexico boem ntl dataset*, Oceans, 2012, Oct 2012, pp. 1–9.

- [10] Rosario Romero-Centeno Jorge Zavala-Hidalgo and STEVEN L. y Benjamín Martínez-López Adriana Mateos-Jasso, Steven L. Morey, *The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years?*, *Atmósfera* **27** (2014), 317 – 334.
- [11] VassilikiH. Kourafalou, Ge Peng, HeeSook Kang, PatrickJ. Hogan, Ole-Martin Smedstad, and RobertH. Weisberg, *Evaluation of global ocean data assimilation experiment products on south florida nested simulations with the hybrid coordinate ocean model*, *Ocean Dynamics* **59** (2009), no. 1, 47–66.
- [12] H.-C. Lee and G. L. Mellor, *Numerical simulation of the gulf stream system: The loop current and the deep circulation*, *J. Geophys. Res.* (2003).
- [13] Alexis Lugo-Fernández, *Is the loop current a chaotic oscillator?*, *J. Phys. Oceanogr.* (2007).
- [14] L.-Y. Oey, T. Ezer, and H.-C. Lee, *Loop current, rings and related circulation in the gulf of mexico: A review of numerical models and future challenges*, pp. 31–56, American Geophysical Union, 2005.
- [15] Tania Santiago Arce and DavidAlberto Salas de León, *Vorticity and internal waves in the campeche canyon, gulf of mexico*, *Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics* (Jaime Klapp, Anne Cros, Oscar Velasco Fuentes, Catalina Stern, and Mario Alberto Rodriguez Meza, eds.), Environmental Science and Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 163–169 (English).
- [16] W. J. Schmitz, D. C. Biggs, A. Lugo-Fernandez, L.-Y. Oey, and W. Sturges, *A synopsis of the circulation in the gulf of mexico and on its continental margins*, pp. 11–29, American Geophysical Union, 2005.
- [17] W. Sturges and J. C. Evans, *On the variability of the loop current in the gulf of mexico*, *Journal of Marine Research* **41** (1983), no. 4.
- [18] W. Sturges and R. Leben, *Frequency of ring separations from the loop current in the gulf of mexico: A revised estimate*, *J. Phys. Oceanography* **30** (2000), 1814–1819.

- [19] W. Sturges, A. Lugo-Fernandez, and M. D. Shargel, *Introduction to circulation in the gulf of mexico*, pp. 1–10, American Geophysical Union, 2005.
- [20] A. M. Vázquez De La Cerda, R. O. Reid, S. F. DiMarco, and A. E. Jochens, *Bay of campeche circulation: An update*, pp. 279–293, American Geophysical Union, 2005.
- [21] Wong, W., *Discrete fourier analysis*, Pseudo-Differential Operators: Theory and Applications, Springer Basel, 2011.
- [22] M. A. Monreal-Gómez y D. A. Salas de León, *Simulación de la circulación en la bahía de campeche*, **29** (1990), no. 2, 101–111.
- [23] Zhaoru Zhang and Robert Hetland, *A numerical study on convergence of alongshore flows over the texas-louisiana shelf*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **117** (2012), no. C11.