

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

LICENCIATURA EN OCEANOLOGÍA

**“REMOLINOS EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC Y GOLFO DE PAPAGAYO
– TENDENCIAS ESPACIO TEMPORALES DE LA CONCENTRACIÓN DE
CLOROFILA DENTRO DE LOS REMOLINOS”**

TESIS

Que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO



Presenta:

Aacini Huerta Escamilla



Director de Tesis:

Dr. José Antonio Martínez Alcalá

Sinodales:

Dr. Luis Zavala Sansón

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

Ensenada, B.C.

Junio de 2013

Dedicado a:

Los que embosque en el camino y tuvieron la paciencia.

Papa, por los zapatos que me quedan grandes.

Mama, por no desheredarme y por las cucharas de madera.

Nisaaviñiii, por enderezarme en la vida.

Conett, por recordarme a tirarlo como si fuera caliente.

PJ, porque si bueno no.

La Chula, por llenarme la panza.

Hugo y Omar, por ayudarme a vaciar mi bolsillo.

Las novias de aquel entonces, por darme otro dolor de cabeza.

Los maestros, desde cálculo 1 hasta dinámica del océano y todos los de en medio, por hacerme apreciar lo que es trabajar y extrañar estudiar.

Los compañeros, por incomodarme.

Los perros, por recordarme quien soy.

Las olas, por las revolcadas y los raites.

RESUMEN

Los remolinos de mesoescala son de ocurrencia común en el Golfo de Tehuantepec (GT) y en el Golfo de Papagayo (GP). Con una base de datos de ocho años se encontró que en promedio se forman 15.57 ± 3.4 remolinos ciclónicos y 11.57 ± 2.9 remolinos anticiclónicos por año. Los remolinos ciclónicos tienen un tiempo de vida de aproximadamente la mitad de los anticiclónicos. Los remolinos ciclónicos duran 6.5 ± 4.3 semanas, mientras que la duración de los anticiclónicos es de 13.8 ± 11.2 semanas. Los remolinos ciclónicos tienen trayectorias más cortas y sin una dirección preferida, mientras que los remolinos anticiclónicos tienen trayectorias más largas y ordenadas. Se observó que los remolinos ciclónicos tienen mayor concentración de clorofila por unidad de área en su centro. En los remolinos anticiclónicos la mayor concentración de clorofila por unidad de área se encuentra en su límite exterior. Se encontró un gradiente horizontal de concentración de clorofila dentro de los remolinos ciclónicos que dura aproximadamente la mitad de su tiempo de vida. Los remolinos anticiclónicos tienden a homogenizar la concentración de clorofila dentro de sí mismos aproximadamente a $1/12$ de su tiempo de vida. Los remolinos ciclónicos al formarse tienen una concentración de clorofila aproximadamente 3 veces mayor que los remolinos anticiclónicos. Se encontró que en ambos remolinos la concentración de clorofila tiene una distribución temporal bimodal. Los remolinos ciclónicos presentan uno de los máximos de abundancia entre los meses de marzo y mayo mientras que el segundo pico de abundancia se presenta entre los meses de agosto a enero. Por otro lado, los remolinos anticiclónicos presentan un máximo de abundancia entre los meses de diciembre a febrero mientras que el segundo pico se presenta entre los meses de julio a septiembre. El aspecto bimodal que presentan los remolinos parece estar poco relacionado con la climatología mensual de la concentración de clorofila regional, la cual tiene una señal anual claramente definida.

Los remolinos ciclónicos al intensificarse tienden a aumentar la concentración de clorofila, mientras que en los remolinos tanto ciclónicos como anticiclónicos al debilitarse la concentración de clorofila disminuye. En los remolinos ciclónicos se observa una relación lineal entre la concentración de clorofila dentro del remolino y su energía potencial. En los remolinos anticiclónicos se encuentra un comportamiento similar para remolinos poco energéticos, pero la concentración de clorofila se vuelve independiente de la energía potencial si el remolino es muy energético. Con estos hallazgos se puede interpretar que los remolinos ciclónicos están siguiendo un comportamiento descrito por la teoría de modos normales verticales (baroclínico), mientras que los remolinos anticiclónicos aparentemente presentan una serie de procesos aún no explicados en cuanto a la producción biológica.

Palabras claves: Remolinos, Golfo de Tehuantepec, Clorofila

ÍNDICE

Resumen.....	iii
1. Introducción.....	1
2. Metodología y objetivo.....	4
3. Área de estudio.....	7
4. Resultados y discusión.....	10
5. Conclusiones.....	34

6. Referencias bibliográficas.....	38
------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudio.....	9
Figura 2 - Mapa de distribución espacial de la localización inicial de los remolinos.....	13
Figura 3 – Mapa de trayectorias de los remolinos anticiclónicos.....	14
Figura 4 – Mapa de trayectorias de los remolinos anticiclónicos.....	14
Figura 5 - Promedios ponderados de la concentración de clorofila en los diferentes radios de integración de los remolinos anticiclónicos.....	21
Figura 6 - Promedios ponderados de la concentración de clorofila en los diferentes radios de integración de los remolinos anticiclónicos.....	22
Figura 7 - Promedios ponderados de la concentración de clorofila mediante su tiempo de vida de un remolino típico en la suma de las tres áreas de integración.....	23
Figura 8 - Tendencia de crecimiento de la clorofila dentro de los remolinos según la tendencia de la altimetría.....	26

Figura 9 - Promedio ponderado de la energía potencial de los remolinos.....	29
Figura 10 - Promedio ponderado de la energía cinética de los remolinos.....	30
Figura 11 - Tendencia de concentración de clorofila con la energía potencial de los remolinos.....	32
Figura 12- Tendencia de concentración de clorofila con la energía potencial de los remolinos.....	33

1. INTRODUCCIÓN

La oceanografía física ofrece muchas excelentes explicaciones teóricas a muchos de los fenómenos observados en el océano. Los remolinos de mesoescala son de ocurrencia común en el Golfo de Tehuantepec (GT) y el Golfo de Papagayo (GP). Zamudio et al., (2004) describen una asociación entre la presencia de remolinos de mesoescala en el GT debido no sólo a la presencia de los eventos de vientos fuertes conocidos como *tehuanos*, sino también al paso de ondas atrapadas a la costa. Según un censo realizado por Palacios et al., (2005), los remolinos anticiclónicos de mesoescala se observan más frecuentemente durante la temporada fría (meses invernales en el hemisferio norte). En el mismo trabajo se encontró que la formación de remolinos ocurre por “*temporadas*”. La “*temporada*” se define como un periodo de tiempo continuo en el cual se forman remolinos. Las temporadas pueden variar entre los 161 días hasta los 420 días. Se ha encontrado una posible asociación entre la duración de la temporada de remolinos y la intensidad del fenómeno *El Niño*, ya que coincide con las variaciones anuales y estacionales (Cota et al., 1995). Se ha documentado que los remolinos viajan en dirección Oeste a una velocidad de migración similar a la velocidad de fase de las ondas de Rossby (baroclínicas no dispersivas) con una tendencia de los anticiclones a desviarse hacia el ecuador y los ciclones hacia el polo norte a lo largo de su migración (Chelton et al., 2007).

Al realizar una descripción física detallada del comportamiento y distribución espacio-temporal de los remolinos, se pretende, a través de observaciones, describir como los remolinos afectan el ámbito biológico.

Los remolinos ciclónicos se caracterizan por ser anomalías negativas en el nivel del mar. Esto causa que el agua aledaña migre hacia el centro del remolino, en sentido contrario al gradiente de presión. Gracias a el efecto de Coriolis, el agua que migra hacia el centro del

remolino es desviada a la derecha (en el hemisferio norte) causando un giro con dirección contraria a las manecillas del reloj, dando forma al clásico e inconfundible remolino ciclónico cuyo balance primordial es geostrófico. Ocurre un comportamiento similar en los remolinos anticiclónicos, con la gran diferencia de que estos se caracterizan por ser anomalías positivas en el nivel del mar. Esta anomalía positiva en el nivel del mar causa que el agua migre del centro del remolino hacia afuera. Al igual que los remolinos ciclónicos, los remolinos anticiclónicos sufren el efecto de Coriolis: las aguas que migran del centro del remolino hacia afuera son desviadas a la derecha (en el hemisferio norte) causando un giro con dirección a favor de las manecillas del reloj, dando forma al remolino anticiclónico. Las anomalías en el nivel del mar no sólo causan movimientos horizontales en la superficie del mar, además, producen movimientos verticales en la columna de agua. La teoría nos explica que en un modo baroclínico las anomalías del nivel de mar causan una anomalía contraria y de mayor magnitud en la piconoclina. Con esto se entiende que los remolinos ciclónicos (anomalías negativas en el nivel del mar) causan un levantamiento de la piconoclina, mientras que los remolinos anticiclónicos (anomalías positivas en el nivel del mar) causan un hundimiento (Duxbury et al., 2000). Se especula que la deformación de la piconoclinatiene efectos sobre el ámbito biológico ya que la piconoclinaestá usualmente acompañada de la nutriclina. Al alejar la nutriclina de la superficie del mar, se está privando la zona eufótica de nutrientes esenciales para el crecimiento del fitoplancton. En el caso contrario, al acercar la nutriclina a la superficie del mar, se incorporan aguas nutritivas a la zona eufótica y por lo tanto se fomenta el crecimiento fitoplantónico (Mann et al., 1991). Tomando en cuenta estos conocimientos de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, se puede empezar a consolidar conclusiones de lo esperado. En este caso la teoría predice que en el centro de los remolinos ciclónicos se incrementa la producción primaria, mientras que en el centro de los remolinos anticiclónicos disminuye. Los remolinos tienen un papel importante en la dinámica y biología de una zona debido a que se les atribuye el transporte de constituyentes químicos y biológicos (Willett et al., 2006). Gracias a la

teoría de modos baroclínicos se tiene una explicación maravillosa del efecto que producen los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, en la estratificación vertical y sobre el ámbito biológico; sin embargo se presenta la necesidad de realizar observaciones para corroborar ésta teoría e intentar explicar las observaciones por medio de la oceanografía física teórica conocida.

2. METODOLOGÍA Y OBJETIVO

El objetivo del trabajo es investigar cual es la relación, en el caso que exista, entre la concentración de clorofila y la magnitud de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos detectados en el GT y el GP.

Para lograr el objetivo se obtuvieron datos semanales de altimetría y diarios de concentración de clorofila. Los datos de altimetría corresponden al periodo del 5 de enero de 2000 al 31 de marzo de 2010, y fueron obtenidos de la página de Internet de *aviso* (i1). Los datos diarios de concentración de clorofila cubren el periodo del 10 de julio de 2002 al 13 de abril del 2011, y se obtuvieron de la página Web de *oceancolor* (i2). Los datos de concentración de clorofila consisten en información obtenida por el satélite *Modis/Aqua* Con una resolución espacial de cuatro por cuatro kilómetros. Debido a que los datos de concentración de clorofila son diarios, se hicieron imágenes compuestas semanales que coinciden con las fechas de los datos de altimetría. Con estas imágenes compuestas se tiene la libertad de ubicar un punto en la misma fecha en las imágenes de altimetría y concentración de clorofila.

Para iniciar el trabajo se identificaron visualmente de los datos de altimetría los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Se dio seguimiento a sus trayectorias (ciclónico y anticiclónico) guardando: altimetría, fecha y coordenadas del centro de cada remolino, desde el momento de su formación hasta el momento de su desintegración. Se consideró el siguiente criterio para la identificación de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos:

- Forma circular cerrada.
- Durar por lo menos dos semanas.

Con las coordenadas y fechas obtenidas de la identificación de remolinos se integró espacialmente la concentración de clorofila dentro de tres áreas circulares concéntricas y una

área total, utilizando como centro las coordenadas del máximo valor absoluto de nivel del mar (que se encuentra en el centro), con el fin de generar una serie de tiempo de concentración de clorofila a lo largo de la vida de cada remolino. Para definir el área de integración se utilizaron los siguientes criterios:

- Identificar el punto de inflexión de las velocidades geostróficas para encontrar el límite exterior del remolino.
- Medir la distancia entre el centro del remolino y el límite exterior para calcular el radio máximo.
- Dividir el radio máximo en tres, para generar las tres áreas circulares concéntricas.

Una vez definidas las tres áreas de integración y el área total (radio máximo), se integró la concentración de clorofila dentro del área de cada radio guardando la concentración de clorofila por unidad de área, fecha, radio superior y porcentaje de píxeles con datos válidos. Con esta información se obtuvieron 92 series de tiempo de remolinos anticiclónicos y 113 series de tiempo de remolinos ciclónicos. Posteriormente se hizo un promedio ponderado para tener un gráfico que sea representativo de las variaciones temporales para cada tipo de remolino por cada área de integración y el área total. Además, se integró la concentración de clorofila regional por cada mes del año. Para lograr esto se limitó el área de estudio: GT, GP y áreas adyacentes (Figura 1). Se realizó una integral de la concentración de clorofila y se dividió entre el área total de tal manera que se encontró la concentración de clorofila característica en la región para cada mes.

Posteriormente se calculó la tendencia de crecimiento neto de altimetría de cada remolino a través de un ajuste lineal por mínimos cuadrados. Por medio del mismo método se calculó la tendencia de crecimiento neto de la concentración de clorofila en cada remolino. Con

estos resultados se analizó la relación entre la energía mecánica y la concentración de clorofila dentro de los remolinos. Con la información obtenida se realizaron una serie de análisis, los resultados se presentan en la sección de *Resultados y Discusiones*.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Tehuantepec y el Golfo de Papagayo

El GT se encuentra en las costas de la frontera entre los estados de Oaxaca y Chiapas. En la zona del GT se encuentra la parte más ancha de la plataforma continental en la costa Mexicana del lado del océano Pacífico. Al llegar al quiebre de la plataforma continental se encuentra el punto más profundo del mar patrimonial mexicano (aproximadamente 6,000 metros de profundidad). Se especula que la batimetría tiene un efecto en cuanto a la traslación de los remolinos que comúnmente ocurren en estas aguas del océano Pacífico (Palacios et al., 2005). En el continente, la zona se caracteriza por ser una discontinuidad de las cadenas montañosas que corren en dirección este-oeste: la Sierra Madre del Sur, el Escudo Mixteco, la Sierra Septen de Chiapas y la Sierra Madre de Chiapas. En esta discontinuidad se encuentra el Paso de Chivela (PC) el cual tiene un ancho de aproximadamente 40 kilómetros (Romero et al., 2003). Durante la temporada fría se presentan sistemas de alta presión en el Golfo de México. Estos sistemas de alta presión en conjunto con sistemas de baja presión en el Océano Pacífico generan un gradiente de presión que produce vientos fuertes con dirección sur (Romero et al., 2003) a través del PC. Además se encuentra que entre los meses de mayo a octubre se presentan ondas atrapadas a la costa, las cuales pueden ser generadas entre otros procesos por los huracanes (Enfield et al., 1983).

El GP se encuentra al sur del GT, en el extremo norte de la costa del Pacífico de Costa Rica. Al igual que el GT, el GP es reconocido por ser una zona de alta productividad biológica con una alta influencia de movimientos de mesoescala (Clarke, 1988).

En el GT se encuentra una anomalía fría de temperatura superficial; al sur-este se encuentra el domo de Costa Rica, y al oeste se encuentra la alberca de agua cálida Mexicana. Frente al GT se encuentra una de las áreas que tradicionalmente ha sido importante en la captura de atún aleta amarilla, debido principalmente a las características oceanográficas y de alta productividad biológica (Arias Aréchiga, 2005).



Figura 1 – Área de estudio; GT, GP y áreas adyacentes. El polígono rojo representa el límite de la región de estudio donde se realizó la identificación de remolinos, así como la cuantificación de la concentración de clorofila en su interior.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las primeras tres secciones se presentan los resultados del número de observaciones, distribución espacial, y distribución temporal de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. En la cuarta sección se analiza la climatología mensual de la concentración de clorofila regional. En la sección cinco se encuentra la distribución temporal de la concentración de clorofila dentro de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Por último, la sección seis tiene los resultados más importantes: la relación entre la energía mecánica y la concentración de clorofila en los remolinos.

4.1) Censo general: duración y abundancia de remolinos

Con base en imágenes semanales de anomalía superficial del mar, en este estudio identificamos mediante la técnica descrita en la *Metodología*, 205 remolinos de tamaño mesoescala. De estos 205 remolinos 92 resultaron ser anticiclónicos, mientras 113 fueron ciclónicos. Tomando en cuenta los 205 remolinos identificados en los ocho años de datos, se obtuvo un promedio de 27 remolinos formados por año. Debido a que los remolinos ciclónicos tienen un efecto diferente sobre la columna de agua que los remolinos anticiclónicos, se censó la abundancia anual de cada tipo de remolino. Se encontró que se forman 15.57 ± 3.4 remolinos ciclónicos y 11.57 ± 2.9 remolinos anticiclónicos por año. Si se observan detalladamente estos valores son estadísticamente similares, pero se aprecia en los valores medios que los remolinos ciclónicos son un poco más abundantes que los remolinos anticiclónicos. Debido a la metodología utilizada para la identificación de remolinos, el número de remolinos observados es del orden de cinco veces mayor que los obtenidos por Palacios et al., (2005), ya que ellos consideraron únicamente remolinos anticiclónicos con duración mayor a cuatro semanas.

A pesar de que los remolinos ciclónicos son los más abundantes, estos son los menos longevos. Se observó que los remolinos ciclónicos duran 6.5 ± 4.3 semanas mientras los remolinos anticiclónicos duran 13.8 ± 11.2 semanas. Nuevamente los valores de duración son estadísticamente similares debido a la gran variabilidad que existe, pero se aprecia en las medias una gran diferencia donde los remolinos anticiclónicos duran, en promedio, el doble que los remolinos ciclónicos. Además se observó que los remolinos anticiclónicos tienen una gran variabilidad en cuanto a su tiempo de vida. En un caso particular se encontró un remolino anticiclónico que duró aproximadamente 60 semanas. Debido a que los mecanismos de formación y evolución no están exactamente identificados y explicados, no se puede descifrar aún la razón por la cual los remolinos ciclónicos duran aproximadamente la mitad que los remolinos anticiclónicos.

4.2) Distribución espacial de remolinos

El GT y el GP se caracterizan por eventos de vientos intensos (Chelton et al., 2007). Se especula que estos eventos de vientos fuertes no son el único factor que produce movimientos en forma de remolinos de mesoescala en la región, sino también debido a la presencia de ondas atrapadas a la costa (Zamudio et al., 2004). En la Figura 2 se encuentran representados por puntos de colores la localización de donde fueron observados por primera vez los remolinos; en puntos rojos se representan las posiciones donde fueron observados por primera vez los remolinos anticiclónicos mientras que los puntos azules representan las de los ciclónicos. Se logra apreciar en la Figura 2 una tendencia a la agrupación de los puntos en cuatro localidades: GT, Punta de Tehuantepec, en GP y una localidad al sur-este del GP. La razón por la cual la mayoría de los remolinos inician en estas localidades aún no ha sido aclarada formalmente, sin embargo algunos autores han asociado la formación de remolinos

con los eventos de viento característicos del GT y GP, así como a la presencia de ondas atrapadas a la costa (Zamudio et al., 2004, Chelton et al.; 2004, Palacios et al., 2005). Es importante remarcar que se encuentra una segregación inexistente entre los remolinos ciclónicos y anticiclónicos en las localidades de agrupaciones de donde fueron observados por primera vez, ver Figura 2.

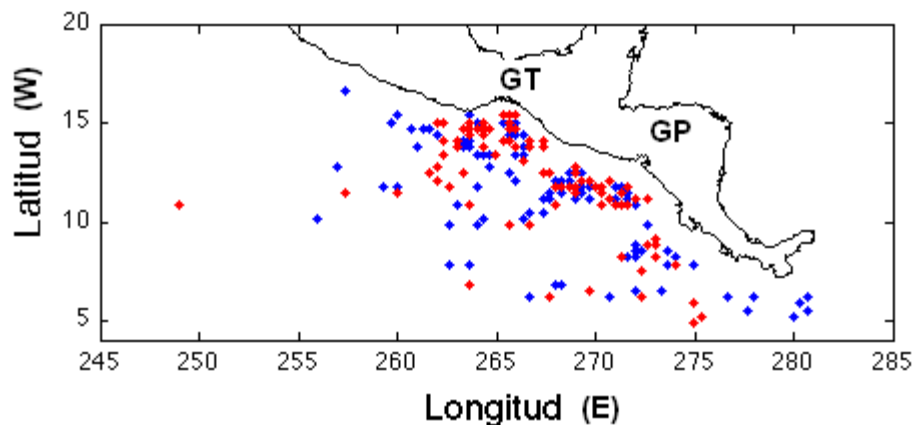


Figura 2 –Mapa de distribución espacial de la localización inicial de los remolinos. Los puntos azules representan los puntos de inicio de los remolinos ciclónicos. Los puntos rojos representan los puntos de inicio de los remolinos anticiclónicos.

Los remolinos anticiclónicos tienen trayectorias más definidas, con menor variación en su rumbo y con trayectorias más largas (Figura 3). La traslación de los remolinos anticiclónicos es la causa principal de la alta variabilidad en las anomalías del nivel del mar no sólo en la región del GT y GP, sino que se extiende hasta unos 4000 Km. hacia el oeste (colores rojos en la Figura 3). Además se observa en la variabilidad producida por los remolinos anticiclónicos una bifurcación hacia la costa, con el origen de una rama de alta variabilidad en el GT y la otra en la zona alrededor del GP. En la Figura 4 se observa que los remolinos ciclónicos tienen trayectorias muy variables, sin un rumbo claramente definido y con trayectorias menos largas. A pesar de esto, existe una zona de alta variabilidad de las anomalías negativas (colores rojos en la Figura 4) en la región del GT que coincide con la región donde se encuentran las

trayectorias de los remolinos ciclónicos. Además de tener un tiempo de vida más corto, los remolinos ciclónicos son más desordenados en cuanto a su traslación que los remolinos anticiclónicos, los cuales son más longevos y tienen una migración más ordenada.

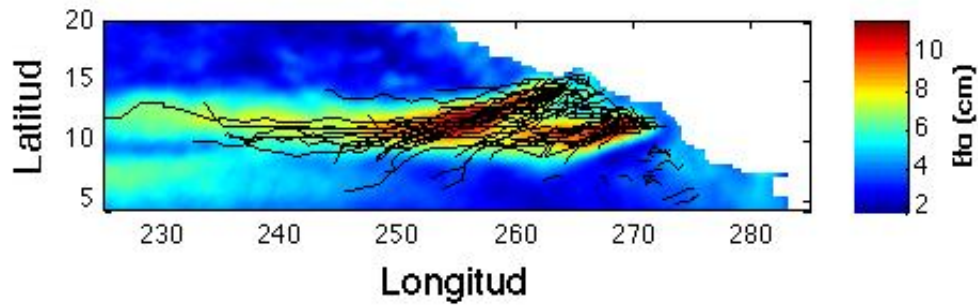


Figura 3 – Mapa de trayectorias de los remolinos anticiclónicos (líneas negras), superpuestos sobre la raíz cuadrática media (cm) de las anomalías positivas de nivel del mar. Los colores rojos representan alta variabilidad de anomalías positivas mientras que los azules representan baja variabilidad.

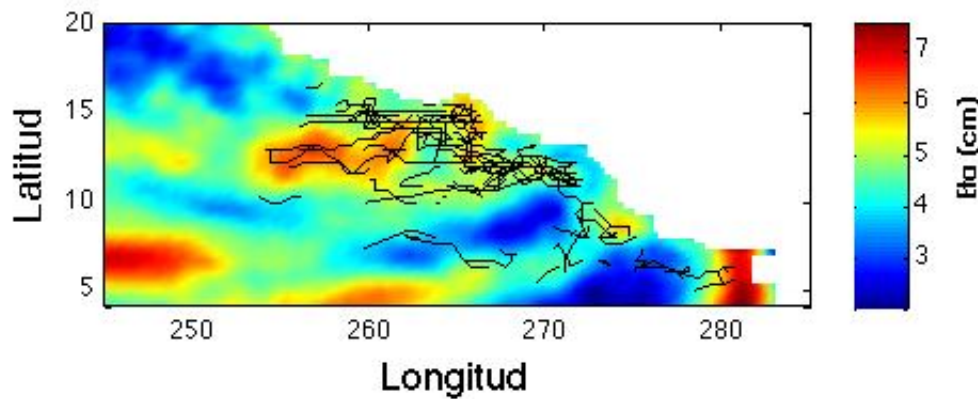


Figura 4 – Igual que la Figura 3 pero considerando sólo los remolinos ciclónicos. Las líneas negras son las trayectorias de los remolinos ciclónicos. Los colores rojos representan alta variabilidad de anomalías negativas mientras los azules representan baja variabilidad.

4.3) Distribución temporal de remolinos

En la Tabla I se presenta la climatología mensual del total de remolinos (ciclónicos y anticiclónicos). Se observa que el promedio de remolinos es mayor durante enero y diciembre; sin embargo, es difícil separar un mes de otro ya que los valores son estadísticamente similares debido a la gran variabilidad. La variabilidad es en algunos casos más alta que los valores medios observados (junio). En las medias se observa que durante un enero típico se van a iniciar el mayor número de remolinos, mientras que durante julio o noviembre el número de remolinos iniciados será menor. Según Zamudio et al., (2004) los eventos de vientos fuertes se presentan en los meses invernales. Al comparar esta ocurrencia meteorológica con la abundancia máxima de remolinos iniciados se encuentra una asociación. Al observar la Tabla I, no se logra apreciar una relación entre la presencia de ondas atrapadas a la costa (entre mayo y octubre, Enfield et al., 1983) y la abundancia de los remolinos. Además no se encuentra una tendencia de formación máxima en los meses de mayo a octubre, sino que se observan valores de medios a bajos en la formación de remolinos.

Tabla I – Climatología del número total de remolinos por mes.

Climatología del número total de remolinos por mes	
Enero	3.50 $\pm$ 1.51
Febrero	1.75 $\pm$ 1.04
Marzo	2.13 $\pm$ 1.13
Abril	2.13 $\pm$ 1.89
Mayo	2.38 $\pm$ 1.99
Junio	1.50 $\pm$ 1.51
Julio	1.22 $\pm$.97
Agosto	2.22 $\pm$ 1.39
Septiembre	1.67 $\pm$ 1.22
Octubre	1.89 $\pm$ 1.27
Noviembre	1.22 $\pm$.97
Diciembre	2.67 $\pm$ 2.12

La Tabla II tiene las climatologías mensuales de los remolinos anticiclónicos y ciclónicos. Los meses con el mayor número de formación de remolinos son enero y diciembre para los anticiclónicos, y mayo para los ciclónicos. En ambos casos, tanto para remolinos ciclónicos y anticiclónicos, se encuentra una tendencia bimodal. Esta tendencia contrasta con la expectativa de encontrar una tendencia anual debido a la asociación con los eventos de vientos fuertes o con la presencia de ondas atrapadas a la costa. Se encuentra en la Tabla II que uno de los picos de abundancia en la formación de remolinos anticiclónicos se presenta entre los meses de diciembre a febrero, y entre los meses de julio a septiembre. Se encuentra que la formación de remolinos ciclónicos es alta entre los meses de marzo y mayo así como entre los

meses de agosto a enero. Viendo con detalle la Tabla II se encuentra un desfase en los máximos de la abundancia con tendencia bimodal. Este desfase en la tendencia bimodal entre los remolinos ciclónicos y anticiclónicos posiblemente nos indique que existen diferentes mecanismos de formación para cada tipo remolino.

Tabla II – Climatología del número de remolinos ciclónicos y anticiclónicos por mes, definida por la misma ecuación que se describe en la Tabla I sólo que únicamente se separan los tipos de remolinos.

Mes	Climatología de número de remolinos ciclónicos	Climatología de número de remolinos anticiclónicos
Enero	1.63±1.30	1.88±.83
Febrero	.635 ±.74	1.13±.99
Marzo	1.38±1.06	.75±.71
Abril	1.25±1.39	.88±1.13
Mayo	1.88±1.46	.5±.76
Junio	.88±1.13	.63±.74
Julio	.44± .53	.78± .83
Agosto	1.00±.71	1.22 ±.97
Septiembre	1.00±.87	.67 ±.71
Octubre	1.33±1.5	.56±.73
Noviembre	.78±.67	.44±.53
Diciembre	1.22±1.65	1.44±1.01

4.4) Variación temporal de la concentración de clorofila regional

La señal anual se presenta claramente en la temperatura oceánica (Millero, 2006); en la Tabla III se logra apreciar esta misma tendencia de los valores de concentración de clorofila total en la región de estudio (GT, GP y áreas adyacentes (ver Figura 1), teniendo un comportamiento sinusoidal. Los meses invernales son los que tienen una mayor concentración de clorofila mientras los meses de verano son los meses con la menor concentración de clorofila. Esto puede ser debido a que existe un alto índice de correlación negativa entre la temperatura superficial y la concentración de clorofila, de tal manera que altas concentraciones de clorofila están usualmente asociadas con bajas temperaturas (invierno), y al aumentar la temperatura durante verano, la producción de clorofila se ve disminuida. Difícilmente se puede relacionar la climatología de los remolinos ciclónicos o anticiclónicos con la climatología de la concentración de clorofila; simplemente no se presenta una señal anual clara en los datos de la climatología de remolinos.

Tabla III –Climatología mensual de la integral de la concentración de clorofila en la zona de estudio (ver figura 1). La concentración de clorofila promedio en la zona de estudio está definida por $\bar{C} = A_j^{-1} \int_{A_j} C(x,y,t) dA$ donde $C(x,y,t)$ es la concentración de clorofila medida por el satélite al tiempo t y A_j es el área de estudio.

Concentración de clorofila regional (mg/m ³)	
Enero	.0099
Febrero	.0107
Marzo	.0097
Abril	.0095
Mayo	.008
Junio	.0077
Julio	.0073
Agosto	.0073
Septiembre	.0075
Octubre	.0081
Noviembre	.0084
Diciembre	.009

4.5) Tendencia temporal de la concentración de clorofila dentro de los remolinos

Como se mencionó en la *Metodología*, se generaron 3 áreas circulares concéntricas de integración. La concentración de clorofila dentro cada área de integración fue dividida entre el área máxima de integración para obtener la concentración de clorofila por unidad de área. De esta manera se pueden comparar los valores dentro de las 3 áreas de integración en un remolino, o entre remolinos. Más a fondo, la razón por la cual se utilizaron las tres áreas de

integración es para encontrar si se presentan diferencias en cuanto a la zonación de la concentración de clorofila dentro de los remolinos.

En la figura 5, como se mencionó en la sección 2, se muestra el promedio sobre todos los remolinos anticiclónicos de la concentración de clorofila por unidad de área de cada uno en función del tiempo de vida. Se logra apreciar en la Figura 5 que la mayor concentración de clorofila dentro de los remolinos anticiclónicos se encuentra en el radio externo (línea verde) y la menor concentración de clorofila en el radio interno (línea roja), sin embargo las diferencias son mínimas. Por el contrario, en los remolinos ciclónicos (Figura 6) la mayor concentración de clorofila se encuentra en el centro del remolino (línea roja) y la menor concentración en el radio externo (línea verde). En este caso los contrastes entre las concentraciones en los diferentes radios son mayores. Los mecanismos que producen este gradiente horizontal de concentración de clorofila dentro de los remolinos no son muy claros. Se puede especular que la velocidad vertical en los remolinos anticiclónicos causa una inyección de aguas ricas en nutrientes hacia la superficie en la zona de inflexión de las velocidades geostróficas en los extremos del remolino, mientras en el centro del remolino, el hundimiento de la termoclina causa la ausencia de nutrientes (Mahadevan et al., 2008). Se observa en la Figura 5 que en los remolinos anticiclónicos este gradiente horizontal de concentración de clorofila dura poco tiempo, aproximadamente tres semanas, después de lo cual la concentración de clorofila se vuelve uniforme en todo el remolino. Curiosamente en los remolinos ciclónicos este gradiente horizontal de concentración de clorofila tiene una duración mayor, de aproximadamente 10 semanas (ver Figura 6). Se puede decir que en casi la mitad del tiempo de vida de los remolinos ciclónicos se presenta un gradiente horizontal de concentración de clorofila, mientras que en los remolinos anticiclónicos este gradiente tiene una duración menor al 1/12 de su tiempo de vida, lo cual nos indica que se presenta una homogenización de la concentración de clorofila dentro del remolino anticiclónico.

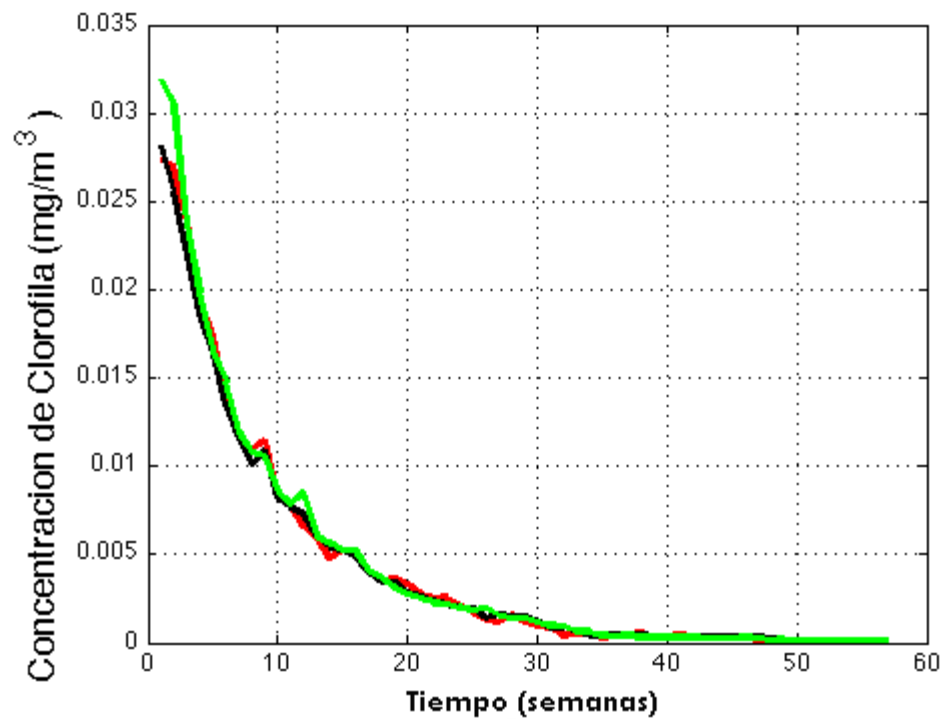


Figura 5 – Promedios ponderados de la concentración de clorofila en los diferentes radios de integración de los remolinos anticiclónicos. La línea roja representa la concentración de clorofila del radio interior, la línea negra representa la concentración de clorofila del radio intermedio y la línea verde representa la concentración de clorofila del radio externo; el eje horizontal representa el tiempo en semanas.

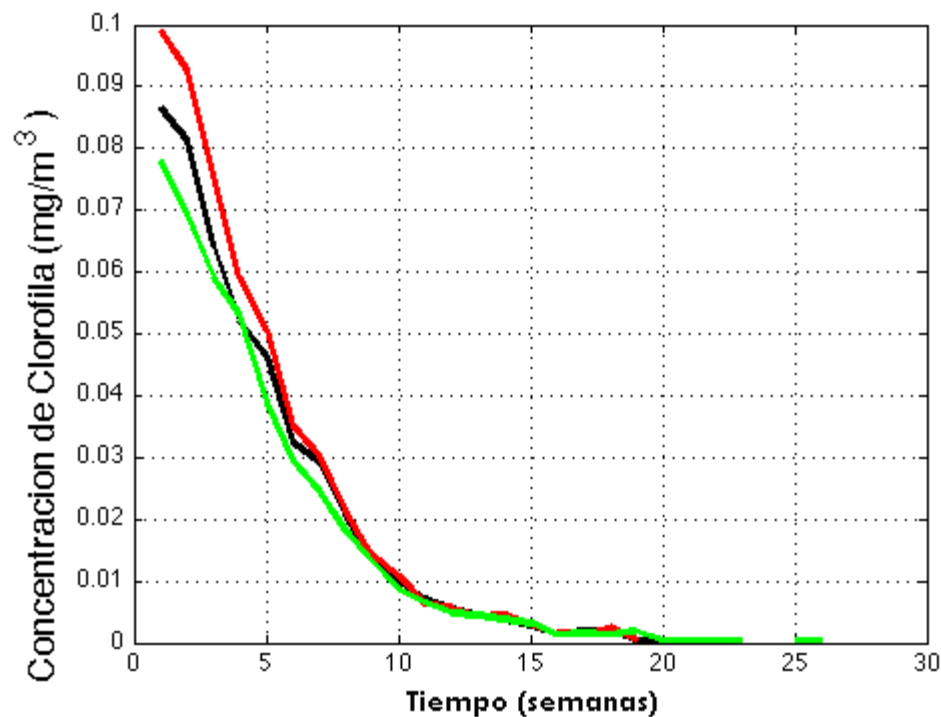


Figura 6 – Igual que la Figura 5 pero para remolinos ciclónicos

Los remolinos ciclónicos tienen una tendencia a tener una mayor concentración de clorofila al formarse, de casi 3 veces más que los remolinos anticiclónicos (ver Figura 7). De igual manera el decaimiento de la concentración de clorofila dentro de los remolinos ciclónicos es aproximadamente 3 veces más rápida en las primeras 10 semanas (mitad de su tiempo de vida) que el que ocurre dentro de los remolinos anticiclónicos. La razón por la cual los remolinos ciclónicos inician con una mayor concentración de clorofila que los remolinos anticiclónicos no puede ser explicada por la localización de inicio, ya que ambos tipos de remolinos comparten las 4 zonas principales de formación (ver Figura 2), ni por el mes de formación, ver Tabla III.

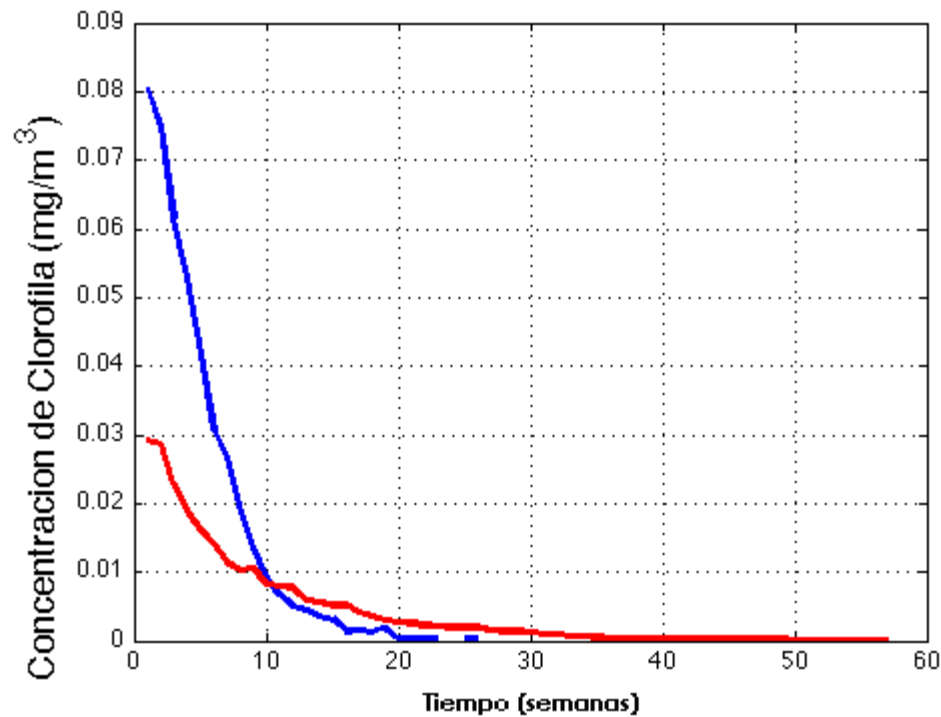


Figura 7 – Promedios ponderados de la concentración total de clorofila durante el tiempo de vida de un remolino típico (la suma de las tres áreas de integración). La línea roja representa los remolinos anticiclónicos, y la línea azul los remolinos ciclónicos; el eje horizontal es el tiempo en semanas.

La teoría de modos normales verticales, comúnmente usada para relacionar la productividad de los remolinos (Duxbury et al., 2000) nos indica que los remolinos ciclónicos deberían de fomentar la concentración de clorofila, o al menos mantenerla a través de lo largo de su tiempo de vida mientras que los remolinos anticiclónicos deberían de disminuir la concentración de clorofila a través de lo largo de su tiempo de vida. Curiosamente se encuentra un comportamiento bastante diferente; en la Figura 8 se logra apreciar la tendencia de la clorofila para remolinos ciclónicos y anticiclónicos. El eje vertical representa la altimetría promedio de cada remolino en centímetros, mientras el eje horizontal representa la tendencia de la concentración de clorofila de cada remolino. Los puntos dentro de los cuadrantes I y II de la Figura 8 son remolinos anticiclónicos; los remolinos anticiclónicos que a través de su tiempo

de vida tienden a debilitarse (ver *Metodología*) se representan en rombos rojos. Se encuentra que los rombos rojos, en su mayoría, tienen una dispersión vertical, tendiendo a concentrarse en el cuadrante II. Esto nos indica que los remolinos anticiclónicos que tienen una tendencia a debilitarse, tienden a lentamente disminuir la concentración de clorofila a una razón aproximada de $-0.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{semana}^{-1}$ a lo largo de su tiempo de vida. Los asteriscos azules representan a los remolinos anticiclónicos que tienden a intensificarse (ver *Metodología*). Observando la Figura 8 se puede apreciar que los asteriscos azules tienden a tener una agrupación vertical, tendiendo a concentrarse en el cuadrante II. Esto nos lleva a la misma conclusión que el caso anterior, sólo que en este caso no se apegan tanto al valor de $-0.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{semana}^{-1}$ sino a valores mas bajos.

Dentro de los cuadrantes III y IV de la Figura 8 se encuentran los remolinos ciclónicos; los remolinos ciclónicos que a través de su tiempo de vida tienden a intensificarse se representan en rombos color magenta. Estos rombos se encuentran con una agrupación tipo circular alrededor del origen. La mayor concentración de los puntos se encuentra en el cuadrante IV; esto nos indica que los remolinos ciclónicos que tienden a intensificarse tienden a aumentar la concentración de clorofila a lo largo de su tiempo de vida. En estos mismos dos cuadrantes se encuentran los asteriscos verdes que representan remolinos ciclónicos que tienden a debilitarse, se encuentra una agrupación similar al caso anterior sólo que la mayor parte se encuentra en el cuadrante III. Esta agrupación en el cuadrante III nos indica que los remolinos ciclónicos que tienden a debilitarse tienden a disminuir la concentración de clorofila a lo largo de su tiempo de vida. A través de la interpretación de la Figura 8 logramos apreciar que no se encuentra un comportamiento teórico donde sólo se identificarían puntos en los cuadrantes II y IV (el caso ideal).

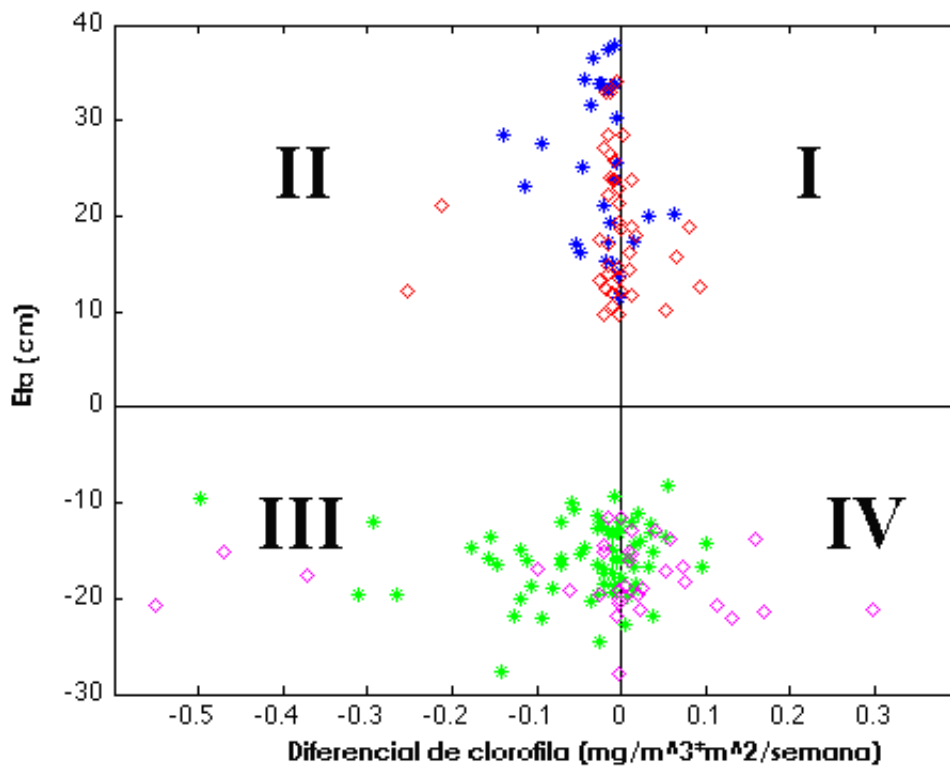


Figura 8 – Tendencia de crecimiento de la clorofila dentro de los remolinos según la tendencia de la altimetría. Los rombos rojos representan remolinos anticiclónicos que tienden a debilitarse, los asteriscos azules representan remolinos anticiclónicos que tienden a intensificarse, los rombos magentas representan remolinos ciclónicos que tienden a intensificarse, los asteriscos verdes representan remolinos ciclónicos que tienden a debilitarse. El eje horizontal representa la tendencia de la concentración de clorofila, los valores positivos representan una tendencia a aumentar la concentración de clorofila y los valores negativos representan una tendencia a disminuir la concentración de clorofila.

4.6) Tendencia temporal de la energía mecánica de los remolinos

En la realidad se encuentra que los remolinos tienen variaciones en su morfología y características dinámicas. No sólo varía la concentración de clorofila dentro de los remolinos. El balance geostrófico en el océano, haciendo un poco de memoria, nos indica una relación entre los gradientes de nivel del mar y las velocidades geostróficas: entre más grande sea el gradiente de nivel del mar (sin importar su signo) la magnitud de las velocidades serán, por lo tanto, más grandes. Dicho balance se puede expresar como:

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$
$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

donde g es la aceleración de la gravedad, f el parámetro de Coriolis, y η la elevación de la superficie. El balance geostrófico nos permite calcular las velocidades si conocemos la forma de la superficie (η), lo cual es muy útil ya que los satélites altimétricos justo estiman la forma de la superficie del océano. Conociendo η y las velocidades, entonces podemos calcular E_c y E_p .

Con este concepto fresco en la mente se puede ver la importancia de analizar los cambios de la energía potencial y de la energía cinética de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Las cuales se definen como:

$$Energia \text{ Potencial} = \frac{1}{2} \eta^2$$

$$Energia \text{ Cinetica} = \frac{1}{2} (u^2 + v^2)$$

Al tener mayor energía potencial, mayor será la anomalía del nivel del mar y por lo tanto será mucho mayor la deformación de la piconoclinea y viceversa. La Figura 9 demuestra los cambios de la energía potencial dentro de los remolinos a lo largo de su tiempo de vida. Al observar la línea roja se logra apreciar el comportamiento de los remolinos anticiclónicos desde su formación hasta que han sido disipados. Se aprecia que la energía potencial aumenta en el primer $1/3$ de su tiempo de vida, a partir del punto en el cual comienza a disminuir paulatinamente. Es un caso similar en los remolinos ciclónicos, representados por la línea azul, en el cual se observa que el incremento en la energía potencial dura mucho menos, aproximadamente un $1/10$ de su tiempo de vida. El decaimiento de la energía potencial en los remolinos ciclónicos es mucho más acelerado en comparación con el decaimiento de la energía potencial de los remolinos anticiclónicos. Los remolinos ciclónicos llegan a un mínimo de energía potencial aproximadamente a la mitad de su tiempo de vida, mientras que los remolinos anticiclónicos tardan casi $5/6$ de su tiempo de vida para llegar a un mínimo de energía potencial. Se puede observar un comportamiento casi idéntico en la Figura 10 para la energía cinética en función del tiempo de vida de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos.

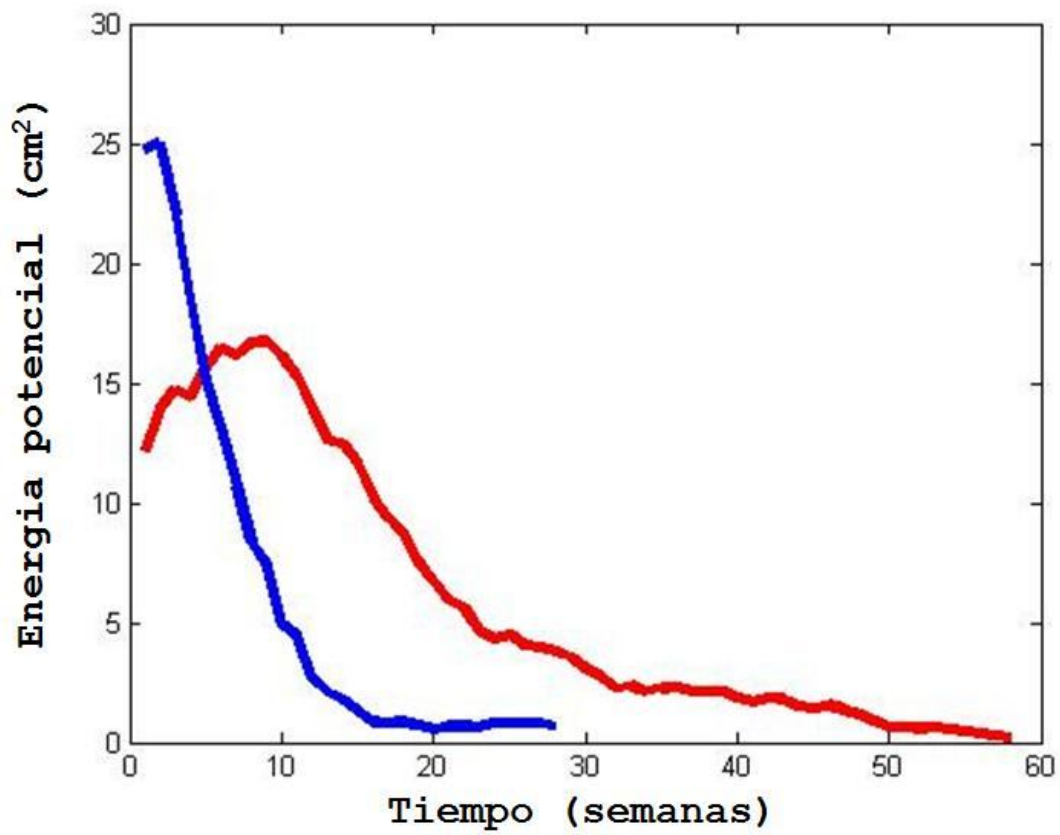


Figura 9 – Promedio ponderado de la energía potencial total de los remolinos. La línea roja representa la energía potencial de los remolinos anticiclónicos. La línea azul representa la energía potencial de los remolinos ciclónicos.

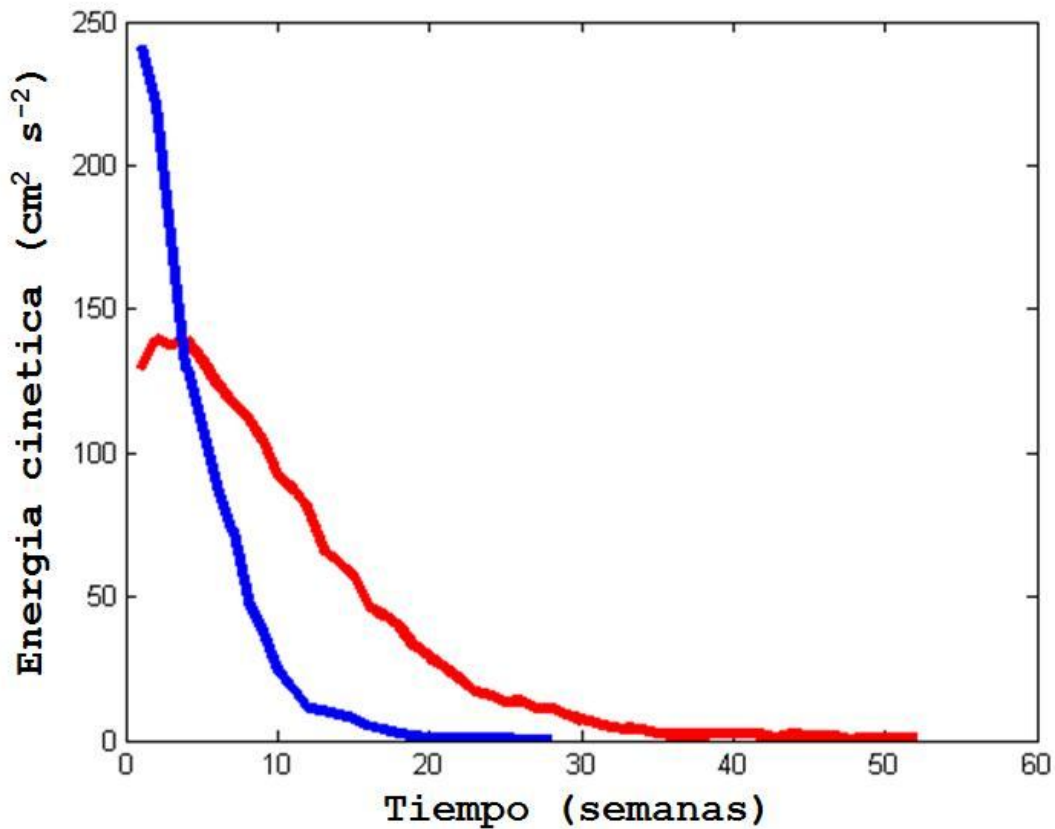


Figura 10 – Promedio ponderado de la energía cinética total en los remolinos. La línea roja representa la energía cinética de los remolinos anticiclónicos. La línea azul representa la energía cinética de los remolinos ciclónicos.

Tomando en cuenta la variación temporal de las energías potencial y cinética de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, se puede empezar a especular cual es la relación que existe entre estas mismas y la variación temporal de la concentración de clorofila en los remolinos. La Figura 11, afortunadamente nos permite ver la relación entre la energía potencial y la concentración de clorofila. Al observar la línea roja de esta figura, la cual representa la relación entre la energía potencial y la concentración de clorofila en los remolinos anticiclónicos, podemos ver un comportamiento bastante peculiar donde aparece un límite alrededor de los 12.5 cm², por encima del cual comienza un comportamiento no lineal. Entre los

12.5 cm^2 y los 16 cm^2 se encuentra que la concentración de clorofila es independiente de la magnitud de la energía potencial. Por otro lado se observa la línea azul, correspondiente a remolinos ciclónicos, donde se aprecia un bellísimo comportamiento con tendencia lineal: cuando se incrementa la energía potencial de los remolinos ciclónicos se encuentra un incremento lineal de la concentración de clorofila. Se encuentra un comportamiento casi idéntico cuando se relaciona la energía cinética y la concentración de clorofila, ver Figura 12, donde se encuentra una tendencia lineal hasta llegar a los 100 cm^2s^{-2} . Justo entre los 120 cm^2s^{-2} y los 145 cm^2s^{-2} se encuentra una relación independiente entre la magnitud de la energía cinética y la concentración de clorofila en los remolinos anticiclónicos.

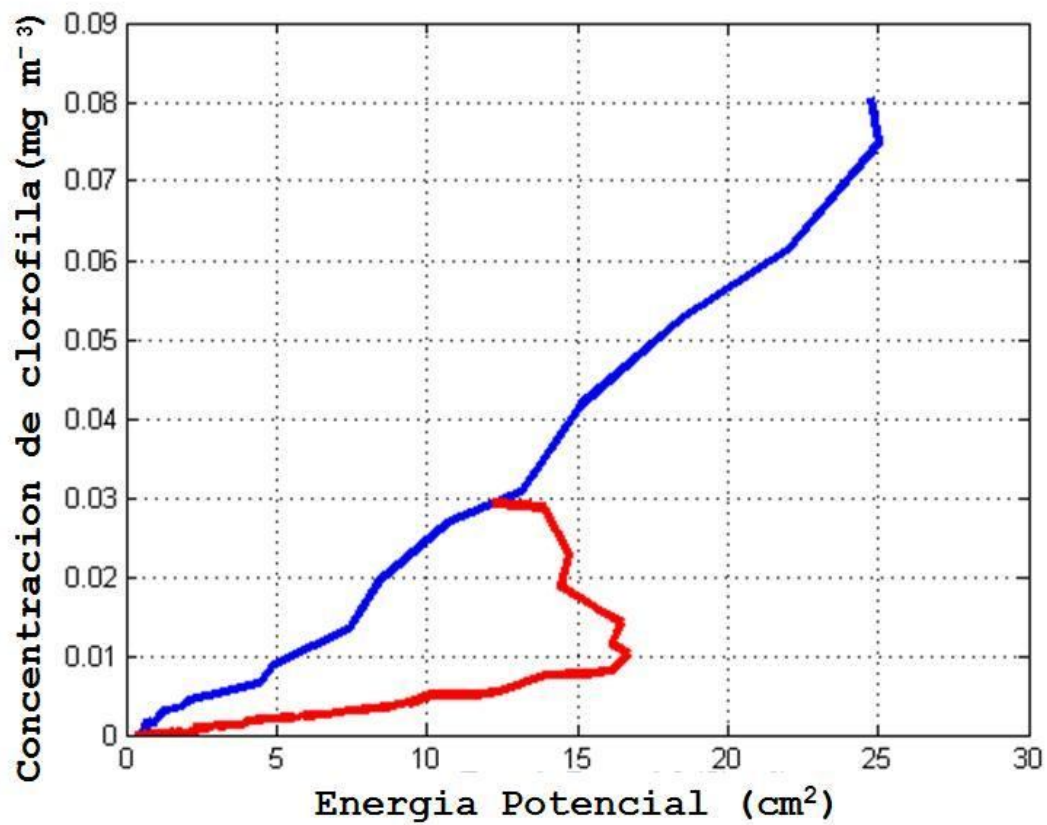


Figura 11 - Concentración de clorofila en función de la energía potencial de los remolinos. La línea roja representa la tendencia de la concentración de clorofila de los remolinos anticiclónicos en función de su energía potencial. La línea azul representa la tendencia de la concentración de clorofila de los remolinos ciclónicos en función a su energía potencial.

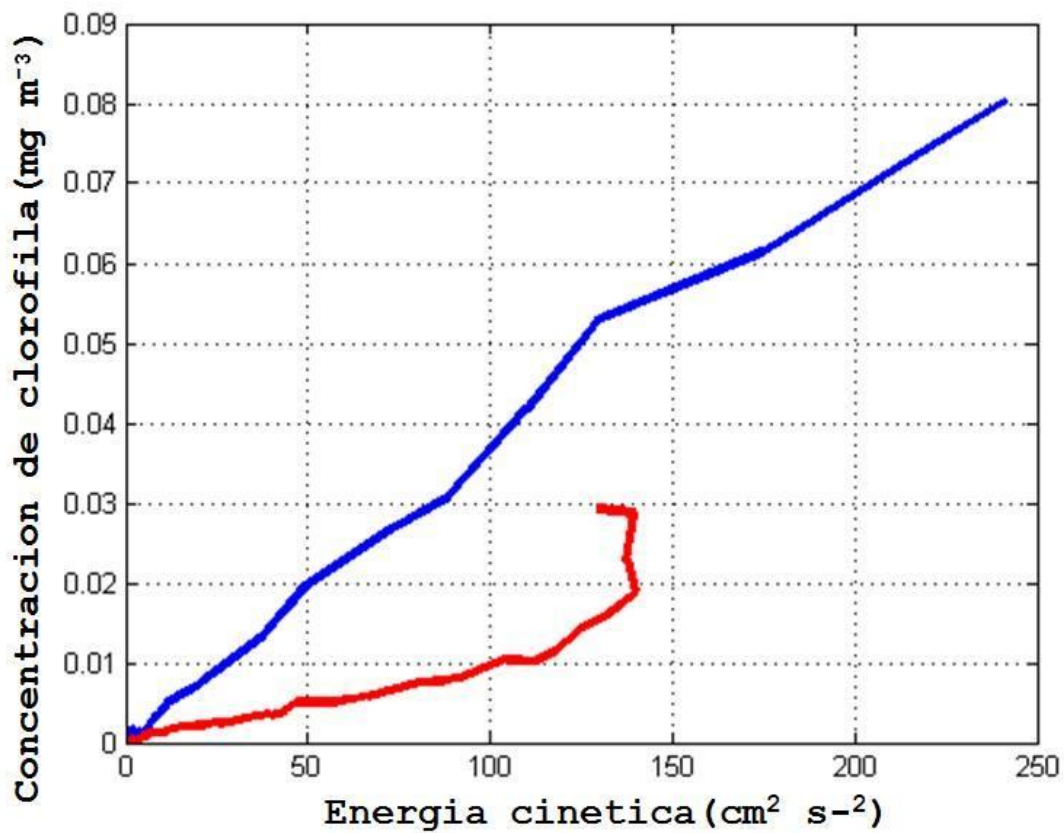


Figura 12 - Tendencia de concentración de clorofila con la energía cinética de los remolinos. La línea roja representa la concentración de clorofila de los remolinos anticiclónicos en función a su energía cinética. La línea azul representa la concentración de clorofila en función de la energía cinética para los remolinos ciclónicos.

CONCLUSIONES

Se encuentra que en un año se presentan un promedio de 27 remolinos de los cuales poco más de la mitad son ciclónicos (se forman 15.57 ± 3.4 remolinos ciclónicos por año, mientras se forman 11.57 ± 2.9 remolinos anticiclónicos). A pesar de ser ligeramente más abundantes los remolinos ciclónicos, estos son los menos longevos teniendo un tiempo de vida de aproximadamente la mitad del tiempo de vida de los remolinos anticiclónicos (los remolinos ciclónicos duran 6.5 ± 4.3 semanas, mientras los remolinos anticiclónicos duran 13.8 ± 11.2 semanas). Los remolinos ciclónicos tienen trayectorias más cortas y sin una dirección preferida mientras que los remolinos anticiclónicos tienen trayectorias más largas y ordenadas (ver Figuras 3 y 4).

Dentro de los remolinos se encuentra un comportamiento bastante peculiar, de tal manera que en los ciclónicos se observa que el centro del remolino es la zona donde encuentra la mayor concentración de clorofila por unidad de área, mientras que en el radio exterior se encuentra la menor concentración de clorofila por unidad de área (ver Figura 6). Este comportamiento concuerda con la teoría de modos baroclínicos donde la perturbación del nivel del mar causaría un levantamiento de la pycnoclina en el centro del remolino resultando en mayor productividad(). Por lo contrario, en los remolinos anticiclónicos se encuentra que el radio exterior es la zona con la mayor concentración de clorofila por unidad de área, y el radio interno es la zona con la menor concentración de clorofila por unidad de área (ver Figura 5). Curiosamente se puede observar en la Figura 6 que el gradiente horizontal de concentración de clorofila dentro de los remolinos ciclónicos se mantiene hasta aproximadamente la mitad del tiempo de vida; esto nos demuestra que existe una diferenciación en la zonación de la clorofila dentro de los remolinos ciclónicos, mientras los remolinos anticiclónicos tienden a homogenizar la concentración de clorofila dentro de sí mismos aproximadamente a $1/12$ de su tiempo de vida (ver Figura 5). Cuando se observa detalladamente la Figura 7, se aprecia una diferencia entre

la concentración de clorofila inicial de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, ya que los remolinos ciclónicos inician con una concentración de clorofila aproximadamente tres veces mayor que en los remolinos anticiclónicos. En la climatología mensual de abundancia de remolinos se encuentra que los remolinos ciclónicos y anticiclónicos tienen una tendencia bimodal. Los remolinos ciclónicos se forman principalmente entre los meses de marzo y mayo, así como durante los meses de agosto a enero (Tabla III). En la Tabla II se encuentra que los remolinos anticiclónicos se forman principalmente durante los meses de diciembre a febrero, así como de julio a septiembre. Esto, cuando se relaciona con la climatología mensual de la concentración de clorofila regional, tiene una correlación baja ya que la concentración de clorofila regional tiene una señal anual claramente definida. Más importante, el primer pico de abundancia de los remolinos ciclónicos (Tabla II), no coincide con la máxima concentración de clorofila de la región (Tabla I), pero el primer pico de abundancia de los remolinos anticiclónicos (Tabla II) sí coincide con la máxima concentración de clorofila de la región (Tabla I). La baja correlación entre la climatología mensual de abundancia de remolinos y la concentración de clorofila regional nos indica que la alta concentración de clorofila inicial de los remolinos ciclónicos mostrada en la Figura 7 no se debe a la variación anual de la concentración de clorofila regional. Además se presenta una diferencia inexistente entre la zona de formación de los remolinos, como se logra apreciar en la Figura 2, donde las cuatro zonas principales de formación de remolinos son compartidas por los dos tipos de remolinos.

En la Figura 8 se encuentran una serie de observaciones bastante interesantes: los remolinos ciclónicos que tienden a intensificarse, tienden a aumentar la concentración de clorofila, mientras que los remolinos ciclónicos que tienden a debilitarse y ambos tipos de remolinos anticiclónicos tienden a disminuir la concentración de clorofila. Estos hallazgos nos indican la necesidad de no sólo observar la clorofila a lo largo del tiempo de vida de los remolinos como en el caso de las Figuras 5, 6 y 7, sino también de observar la morfología y

dinámica de los remolinos como en el caso de las Figuras 9 y 10. En la Figura 9 se logra observar la variación temporal de la energía potencial de los remolinos. Se observa que los remolinos ciclónicos (línea azul) tienen un comportamiento bastante similar a la variación temporal de la concentración de clorofila de estos mismos. Pero los remolinos anticiclónicos (línea roja) tienen un incremento en su energía potencial lo cual nos indica que en el primer 1/3 de su tiempo de vida se presenta una intensificación. La Figura 10 tiene un comportamiento casi idéntico, sólo que se observa la variación temporal de la energía cinética de los remolinos.

La belleza de la Figura 11 es que nos permite relacionar directamente la magnitud de la anomalía del nivel del mar con la concentración de clorofila en los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Los remolinos ciclónicos, representados por la línea azul, presentan una tendencia lineal en la cual la concentración de clorofila aumenta al incrementarse la energía potencial. Este incremento en la energía potencial se traduce en un incremento en la magnitud de la anomalía del nivel del mar. Cuando aumenta la anomalía del nivel del mar la deformación de la piconclina es mayor. Los remolinos anticiclónicos, representados por la línea roja en la Figura 11, no presentan esta tendencia lineal. Entre los 12.5 cm^2 y los 16 cm^2 se encuentra que la concentración de clorofila se vuelve independiente de la energía potencial. Se observa un comportamiento casi idéntico para la Figura 12, en la que se analiza la relación entre la energía cinética y la concentración de clorofila. Al observar la Figura 12 se encuentra que la relación lineal que se identificó en la Figura 11 para los remolinos ciclónicos también se aplica para la energía cinética. Los valores entre los $120 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ y los $145 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ son donde se encuentra la terminación de la dependencia lineal entre la concentración de clorofila y la energía cinética en los remolinos anticiclónicos. Con estos hallazgos se puede interpretar que los remolinos ciclónicos están siguiendo un comportamiento consistente con la teoría de modos baroclínicos, mientras que los remolinos anticiclónicos aparentemente tienen una serie de procesos aún no explicados en relación con la producción biológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

l1) www.oceancolor.gsfc.nasa.gov

l2) www.aviso.oceanobs.com

Arias Aréchiga J.P., 2005, Oceanografía Pesquera del Golfo de Tehuantepec El caso Atún Aleta Amarilla *Thunnus albacares*, Tesis Maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B.C.S., México

Chelton B.D., Schlax G.M., Samelson M.R., Szoeké A.R., 2007, Global Observations of Large Oceanic Eddies, *GeoPhys. Res.* 34; L15606

Clarke, A. J. (1988), Inertial Wind Path and Sea Surface Temperature Patterns Near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo, *J. Geophys. Res.*, 93(C12), 15,491–15,501, doi:10.1029/JC093iC12p15491.

Cota E. S., Borrego A. S., Santamaría del Ángel M. E., Vázquez H. S., Muller-Krager E. F., 1995, El Golfo de Tehuantepec y Áreas Adyacentes: Variación Espaciotemporal de Pigmentos Fotosintéticos Derivados de Satélite, *Cien. Mar.* 23; 003: 329-340

Duxbury A. C., Duxbury A. B., Sverdrup K. A., 2000, *An Introduction to the World's Oceans*, 6th edn, McGraw Hill, Boston, 528 pp.

Enfield D. B., Allen J. S., 1983, The Generation and Propagation of Sea Level Variability Along the Pacific Coast of Mexico, *J. Phys. Ocean.* 13; 1012-1033

Mahadevan, A., Thomas L. N., Tandon A., 2008, Comment on "Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms", *Science Magazine*, 320; 5875: 448

- Mann K. H., Lazier J. R. N., 1991, Dynamics of marine ecosystems, Biological-Physical Interactions in the Oceans, Blackwell Science, 394 pp.
- Millero F. J., 2006, Chemical Oceanography, Third edition, Taylor and Francis Group, Miami, 496 pp.
- Palacios M. D., Bograd JS, 2005, A Census of Tehuantepec and Papagayo Eddies in the Northeastern Tropical Pacific. *Geophys Res.* 32, L23606
- Romero-Centeno R., Zavala-Hidalgo J, Gallegos A, O'Brien J. J., 2003. Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *J. Climate.* 16: 2628-2639
- Willett C. S., Leben R. R., Lavin M. F., 2006, Eddies and Tropical Instability Waves in the Eastern Tropical Pacific, A Review, *Progress in Oceanography*, 69: 218-238
- Zamudio L., Hurlburt E. H., Metzger J. E., Morey L. S., O'Brien J. J., Tilburt C, Zavala-Hidalgo J, 2004, Interannual Variability of Tehuantepec eddies, *Geophys. Res. Ocean.* 111: C5