

TESIS DEFENDIDA POR
Juan Pablo Hernández Fonseca
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Director del Comité

M.C. Vicente Ferreira Bartrina
Miembro del Comité

Dr. Smith Stephen Vaughan
Miembro del Comité

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Miembro del Comité

Dr. Axayácatl Rocha Olivares
*Coordinador del programa de
posgrado en Ecología Marina*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

31 de mayo de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ECOLOGÍA MARINA**

**Estimación de la vulnerabilidad de las comunidades
coralinas del Pacífico mexicano ante el cambio climático.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Juan Pablo Hernández Fonseca

Ensenada, Baja California, México, mayo de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Juan Pablo Hernández Fonseca**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ecología Marina. Ensenada, Baja California. Mayo de 2010.

Estimación de la vulnerabilidad de las comunidades coralinas del Pacífico mexicano ante el cambio climático.

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera

Los arrecifes coralinos son ecosistemas de reconocida importancia ecológica, económica y social, por los bienes y servicios ambientales que proporcionan. Sin embargo, el incremento de emisiones de los gases de efecto invernadero está provocando un cambio climático que repercute directamente sobre estos ecosistemas debido al aumento de la temperatura superficial del mar y de la presión parcial de CO₂, entre otros factores. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la vulnerabilidad de cinco comunidades coralinas del Pacífico mexicano (Cabo Pulmo, Baja California Sur, Isla Isabel e Islas Marietas (Bahía de Banderas), Nayarit, Ixtapa – Zihuatanejo, Guerrero y Bahías de Huatulco, Oaxaca) ante un escenario de cambio climático, bajo la hipótesis de que las localidades sujetas a mayor variación natural en sus características oceanográficas serían menos vulnerables que aquellas acostumbradas a un intervalo de variación estrecho. En este trabajo, vulnerabilidad se define como la incapacidad de un sistema para absorber, los efectos de un determinado cambio en su ambiente, es decir, su incapacidad para adaptarse a ese cambio. Se adoptó el blanqueamiento coralino como una métrica de la vulnerabilidad, fenómeno ampliamente estudiado. Para estimar la vulnerabilidad de cada localidad, se construyeron series de tiempo (julio 2002 – julio 2009) de las variables de reconocida influencia sobre el blanqueamiento: temperatura superficial del mar (TSM), concentración de Clorofila a (CLa), Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) e índice de surgencia (IS). Se analizaron 250 imágenes de sensores remotos (Aqua MODIS y SeaWiFS) con una resolución espacial de 9 km y temporal de un mes para TSM, CLa y PAR y 86 datos puntuales derivados de promedios mensuales del IS. Las localidades estudiadas presentaron un comportamiento muy diferente entre ellas, pues mientras en Cabo Pulmo es clara la estacionalidad, en Bahía de Banderas es poca. El año 2008 fue anómalo en todas las variables, documentándose un evento de blanqueamiento en mayo de 2008 en Islas Marietas. Con base en los resultados obtenidos, se sugiere que Bahías de Huatulco es la localidad que sería más vulnerable al blanqueamiento, seguida de Islas Marietas. El sitio con más tolerancia al estrés ocasionado por cambios en alguna de las variables o la interacción entre ellas fue Cabo Pulmo.

Palabras Clave: comunidades coralinas, vulnerabilidad ambiental, cambio climático, sensores remotos, Pacífico mexicano.

ABSTRACT of the thesis presented by **Juan Pablo Hernández Fonseca** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Marine Ecology. Ensenada, Baja California, México. Mayo de 2010.

Corals reefs are ecologically and economically valuable ecosystems because of the goods and services they provide to society. However, the increasing emission of green-house effect gases is causing climate change that directly impacts upon these ecosystems, mainly because of higher sea surface temperature and CO₂ partial pressure. The CO₂ partial pressure is important because of its influence on the seawater saturation state with respect to aragonite, the CaCO₃ mineral used by corals for skeletogenesis. The aim of this work was to assess the vulnerability of five coral communities from the Mexican Pacific (Cabo Pulmo, Baja California Sur, Isla Isabel and Islas Marietas (Bahía de Banderas), Nayarit, Ixtapa – Zihuatanejo, Guerrero and Bahías de Huatulco, Oaxaca) under a climate change scenario. The underlying hypothesis was that coral communities where the natural variability is large would be more resilient than those where oceanographic conditions are steady all year long. In this work, vulnerability is understood as the impeding capacity of a system to adapt, by self-regulation, to a changing environment due to climate change. Coral bleaching was chosen as a proxy variable of vulnerability, because it is a well-known process and easily identifiable. Therefore, time series (July 2002 – July 2009) of sea surface temperature (SST), Chlorophyl-a (Chla), photosynthetic active radiation (PAR) and upwelling index (UI) were built for the five locations. A total of 250 images of remote sensors (AQUA MODIS and SeaWiFS), with a 9 km spatial resolution and one month of temporal resolution, for SST, Chla and PAR were analyzed and 86 data locally estimated for UI. Results show that the five locations are very different; from the another. For example, Cabo Pulmo exhibits a clear seasonality while Bahía de Banderas does not. 2008 was a very anomalous year, particularly at Islas Marietas where bleaching was documented in May 2008. Results point out that Huatulco would be the most vulnerable location while Cabo Pulmo would be more resilient.

Key words: Coral reefs, Climate change, Marine Protected Area, Mexican Pacific.

Dedicatoria.

A las personas más importantes en mi vida:

Juan, Mara y Columba.

¡Los quiero mucho!

Gracias...

AGRADECIMIENTOS

- Al Dr. Luis Calderón. Gracias por darme la oportunidad de trabajar en el proyecto de vulnerabilidad y por darme la libertad de plantear, estructurar y dirigir mi tesis de acuerdo a mi intención de formación académica.
De la misma forma, agradezco el tiempo que como amigo y compañero de trabajo me brindaste, a mí y a mis hermanos Alejandro y Orión.
- M. en C. Vicente Ferreira, fue un placer conocerte, he aprendido muchas cosas de ti, tanto en lo personal como en lo académico, fuiste una persona fundamental en mi proceso de formación. Tu capacidad de dejar del lado el pensamiento ortodoxo y pensar de diferentes formas al abordar una situación, por mencionar solo algo, es una cosa que me llevo como un ejemplo de que el aprendizaje debe trascender de lo académico.
- Dr. Smith Stephen Vaughan. Infinitamente agradecido por haber accedido a formar parte de mi comité de tesis. Tu experiencia es algo admirable y fue de gran valor durante el desarrollo de este trabajo.
- Dr. Reginaldo Durazo. Gracias por el valioso aporte a mi tesis. De igual forma, tus comentarios y opiniones han ayudado a direccionar la visión de este barco que estoy navegando.
- A CICESE, especialmente al posgrado de Ecología Marina, por haberme dado la oportunidad de entrar y pasar a formar parte de mi crecimiento académico.
- A CONACYT por ser fundamental para mi estancia en Ensenada.
- Aunque antes que CONACYT, están todas aquellas personas que con sus impuestos pagan la educación que recibimos en CICESE y muchos centros como este, creo que sería más difícil e imposible para muchos, poder hacer un posgrado sin el dinero de esta gente. Gracias.
- Karlita, la mejor roomie que pude haber tenido durante año y medio.

- A la fabulosa “familia incómoda”. Karlita, Ricardo, César, Yuka, Aby, Roomie, Alex, Gemma, Magnolia, Andreita, Augusto, Lupita y Brenda (preferí omitir los apodos). De verdad que existen cosas maravillosas en la vida y se dan justamente como resultado de la interacción de las piezas adecuadas en un lugar y tiempo determinado, y para mí, ustedes fueron las piezas adecuadas en Ensenada.
- A mis hermanos académicos, Alejandro y Orión, por esas formativas y constructivas platicas científicas que desarrollábamos de vez en cuando.
- Elizabeth Farías y Lucy Román, gracias por el apoyo cuando lo necesitábamos, desde un sacapuntas, trámites de viáticos, comprobación de facturas, etc.
- Anelena, simplemente gracias por haber hecho mi estancia y mi vida más placentera en Ensenada, por ese lenguaje inventado por nosotros y para nosotros y por todo lo lindo que desde Colombia se vino contigo para quedarse aquí conmigo. Te quiero mucho nena!
- En general a toda la gente que colaboro en el desarrollo de mi trabajo de tesis y que estuvo cerca de mi durante estos dos años, muchísimas gracias.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Antecedentes	4
I.1.2 Comunidades coralinas.....	4
I.1.3 Amenazas a las comunidades de coral.....	5
I.1.4 Mecanismos de blanqueamiento de coral.	7
I.1.5 Factores ambientales que aumentan la resiliencia de la comunidad.....	11
I.2 Hipótesis.....	12
I.3. OBJETIVOS	12
I.4. JUSTIFICACIÓN.....	13
I.5. ÁREA DE ESTUDIO	15
II. MATERIAL Y MÉTODOS	18
II.1. FUENTE DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.	18
II.1.1 Temperatura superficial del mar (TSM).....	19
II.1.2 Radiación fotosintéticamente activa (PAR).	19
II.1.3 Concentración de clorofila.....	21
II.1.4 Índice de surgencia.....	21
II.2. Procesamiento y análisis de datos.	23
III. RESULTADOS	29
III.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	29
III.1.1 Cabo Pulmo.	29
III.1.2 Isla Isabel.....	34
III.1.3 Islas Marietas, Bahía de Banderas.	39
III.1.4 Ixtapa Zihuatanejo.....	44
III.1.5 Bahías de Huatulco.....	49
IV. DISCUSIÓN	58
Temperatura.	59
Radiación fotosintéticamente activa.....	62
Índice de surgencia y clorofila.....	65
V. CONCLUSIONES	69
VI. LITERATURA CITADA	71

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación de las comunidades arrecifales estudiadas. Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa Zihuatanejo y Bahías de Huatulco.	17
2	Mecanismos que actúan en el proceso de formación de surgencias. Fuente: pfeg.noaa.gov.	22
3	Polígono mexicano utilizado como base para establecer sub-polígonos y extraer los datos de clorofila y PAR.	27
4	Disposición del ángulo de alfa (ángulo de costa) según la línea de costa.	27
5	Temperatura media mensual en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Latitud N 23.43, Longitud W -109.36. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov	29
6	Temperatura media mensual, en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 - julio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar, “o” outliers y “*” los puntos extremos. Datos de satélite interpolados a Latitud N 23.43, Longitud W -109.36. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	30
7	Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Cabo Pulmo durante el periodo julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	31
8	Índice de surgencia en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -109.5, Latitud 24.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.	31
9	Índice de surgencia en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -109.5, Latitud 24.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.	32
10	Concentración de clorofila en Cabo Pulmo para el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	33

LISTA DE FIGURAS (Continuación).		Página
11	Concentración de clorofila y climatología en Cabo Pulmo para el período 2002 - 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	33
12	Temperatura media mensual en Isla Isabel durante el periodo julio 2002 - julio 2009. Datos de satélite interpolados a Latitud N 21.87, Longitud W -105.88. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	34
3	Temperatura media mensual, en Isla Isabel durante el período julio 2002 - julio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 21.87, Longitud W -105.88. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	35
14	Luz fotosintéticamente activa (PAR) en durante el periodo 2002-2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	36
15	Índice de surgencia en Isla Isabel durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -107.5, Latitud 21.5N. Fuente: pfeg.noaa.gov	36
16	Índice de surgencia en Isla Isabel durante el período 2002 - 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -107.5, Latitud 21.5N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	37
17	Concentración de clorofila en Isla Isabel para el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	38
18	Concentración de clorofila y climatología en Isla Isabel para el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	38
19	Temperatura media mensual en Islas Marietas durante el período julio 2002 – julio 2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Latitud N 20.65, Longitud W -105.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	39

LISTA DE FIGURAS (Continuación).		Página
20	Temperatura media mensual en Islas Marietas durante el período 2002-2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 20.65, Longitud W -105.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	40
21	Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Islas Marietas durante el periodo julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	41
22	Índice de surgencia en Islas Marietas durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -105.5, Latitud 20.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	41
23	Índice de surgencia en Islas Marietas durante el período 2002 - 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -105.5, Latitud 20.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	42
24	Concentración de clorofila en Islas Marietas para el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov	43
25	Concentración de clorofila y climatología en Islas Marietas para el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov	43
26	Temperatura media mensual en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – julio 2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Latitud N 17.63, Longitud W -101.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	44
27	Temperatura media mensual en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 17.63, Longitud W -101.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	45

LISTA DE FIGURAS (Continuación).		Página
28	Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Ixtapa Zihuatanejo durante el periodo 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	45
29	Índice de surgencia en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -102.5, Latitud 14.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	46
30	Índice de surgencia en Ixtapa Zihuatanejo durante el período 2002 – 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -102.5, Latitud 14.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	47
31	Concentración de clorofila en Ixtapa Zihuatanejo para el período 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	47
32	Concentración de clorofila y climatología en Islas Marietas para el período 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	48
33	Temperatura media mensual en Bahías de Huatulco durante el período 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Latitud N 15.54, Longitud W -96.45. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	49
34	Temperatura media mensual en Bahías de Huatulco durante el período 2002-2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 15.54, Longitud W -96.45. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov .	50
35	Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Bahías de Huatulco durante el periodo 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96-10, Longitud W -96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov	50
36	Índice de surgencia en Bahías de Huatulco durante el período julio 2002 - julio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -97.5, Latitud 13.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov .	51

	LISTA DE FIGURAS (Continuación).	Página
37	Índice de surgencia en Bahías de Huatulco durante el período 2002 – 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W - 97.5, Latitud 13.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.	52
38	Concentración de clorofila en Bahías de Huatulco para el período 2002-2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96-10, Longitud W -96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	52
39	Concentración de clorofila y climatología en Islas Marietas para el período 2002-2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96-10, Longitud W -96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	53
40	Temperatura media mensual, para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos satelitales del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov	54
41	Radiación fotosintéticamente activa PAR, para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	55
42	Índice de surgencia para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: pfeg.noaa.gov.	56
43	Concentración de clorofila para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.	57

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Características de los datos obtenidos	20
II	Matriz de coordenadas empleadas por SeaDAS 5.3 para la extracción de los datos de temperatura. Ejemplo: Isla Isabel. En el centro las coordenadas que corresponden al sitio de estudio y que es delimitado por el investigador.	25
III	Límites geográficos para procesamiento en Matlab de los sitios de estudio.	25
IV	Datos (coordenadas y ángulo de costa) ingresados en el sitio web de NOAA para obtener los datos de índice de surgencia.	26
V	Localización de los sitios de trabajo y las temperaturas registradas en cada uno de ellos.	60

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características ecológicas de los arrecifes y comunidades coralinas es importante y necesario para la identificación oportuna de los síntomas de disfuncionalidad que presentan estos ecosistemas como respuesta a disturbios naturales o de origen antropogénico, para lo cual una descripción detallada, cualitativa y cuantitativa de la estructura de la comunidad coralina es esencial (Carrquiry y Reyes-Bonilla, 1997).

En el caso de la costa mexicana del Pacífico, los arrecifes de coral se presentan en aguas someras (0 a 25 m de profundidad), desde el sur del Golfo de California hasta Oaxaca y las Islas Revillagigedo, generalmente en estructuras de poco relieve, menos de 3 m de espesor (Reyes-Bonilla, 2003). Las condiciones ambientales para su crecimiento son desfavorables ya que la región presenta poca superficie de plataforma continental, temperaturas relativamente bajas (producto de múltiples zonas de surgencia y de la influencia de aguas relativamente frías de la Corriente de California), y es uno de los sitios con valores más bajos de pH superficial en el océano mundial (Kleypas *et al.*, 1999).

Como en muchos otros ecosistemas, las actividades humanas han impactado a los arrecifes química, física y biológicamente. La eutrofización, sedimentación, contaminación química y la sobrepesca, son algunas de las amenazas que se producen en todo el mundo (Hallock, 2005). Se han identificado una serie de impactos que el cambio climático global, como el incremento en los gases de tipo invernadero, ejerce en los arrecifes de coral, de los cuales los más importantes son: aumento en el nivel del mar, incremento en las temperaturas, tasas de calcificación reducidas, patrones de circulación oceánica alterados y mayor frecuencia de eventos climáticos severos y cambios en la química del océano (Smith y Buddemeier, 1992; Westmacott *et al.*, 2000; Hughes *et al.*, 2003; Sheppard y Rioja-Nieto, 2005).

Durante eventos climáticos de gran escala como "El Niño", se produce una respuesta en los corales hermatípicos conocida como "blanqueamiento", que ha

sido ampliamente estudiada. El blanqueamiento de coral sucede ya sea por la pérdida de zooxantelas y/o disminución de la concentración de pigmentos en ellas. Principalmente se atribuye a temporadas que presentan un incremento o descenso en la temperatura del agua, así como cambios en la química del agua (acidificación y/o salinidad) y por aumentos en los niveles de sedimentación (Hughes *et al.*, 2003; Fabricius *et al.*, 2007).

Cuando hay blanqueamiento, los corales pierden entre el 60-90% de sus zooxantelas, y cada una pierde entre 50 y 80% de sus pigmentos fotosintéticos (Glynn, 1996.). Aunque se han propuesto varias hipótesis sobre las razones de su ocurrencia, todo indica que el blanqueamiento se presenta en casos en los que las zooxantelas sufren daños en el fotosistema II (Iglesias Prieto *et al.*, 1992; Hoegh-Guldberg, 1999). El daño ocurre a nivel enzimático y puede presentarse por variadas causas.

El incremento en la temperatura de la superficie marina, se considera como la principal causa a gran escala de eventos de blanqueamiento de corales, los cuales se han incrementado desde las últimas tres décadas. Se espera que las temperaturas superficiales del mar se incrementen junto con la concentración en la atmósfera de los gases de tipo invernadero, dejando los ecosistemas coralinos cada vez más susceptibles a futuros eventos de blanqueamiento (Hughes *et al.*, 2003; Stone, 2007; Kleypas *et al.*, 2008). Los primeros impactos observados en los corales ante episodios de calor extremo son un estrés en los organismos fotosintéticos seguido de blanqueamiento y por tanto un incremento en la mortalidad, tanto de los corales como de otras especies sensibles a los cambios de temperatura (Fabricius *et al.*, 2007). Dichos episodios también pueden impactar las historias de vida al reducir las tasas de crecimiento y reclutamiento de los corales. De esta forma se ve disminuida la diversidad en los arrecifes inmediatamente después del disturbio (episodios de calor), mientras que las especies más robustas son las que permanecerán ahí propiciando nuevas

condiciones para el establecimiento de otras o en su caso, una recolonización por las que se vieron afectadas antes de tal disturbio.

Esta investigación pretende evaluar la importancia relativa de la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila, el índice de surgencia y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) sobre el fenómeno del blanqueamiento coralino, tanto en corto como en largo plazo y a diferentes escalas espaciales. De la misma manera se busca identificar las áreas con comunidades coralinas de las costas del Pacífico mexicano más vulnerables ante el posible incremento en la temperatura superficial del mar, como consecuencia del cambio climático global. Aquí se adopta el concepto propuesto por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, 2007), donde se define vulnerabilidad como: “Medida en que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, incluso la variabilidad climática y los episodios extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud y el índice de variación climática a que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación”.

I.1. Antecedentes

I.1.2 Comunidades coralinas.

Las comunidades coralinas se encuentran entre los ecosistemas más diversos del planeta, generalmente se encuentran en aguas poco profundas circuntropicales (Maina, 2007) y son parte importante del ecosistema marino global. Los arrecifes representan valiosos recursos por su diversidad y gran productividad, a menudo se les considera como un bosque tropical lluvioso (Irigoyen, 2004).

Los corales zooxantelados son organismos simbiotes cuyo esqueleto está constituido de carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de aragonita, lo que les ha permitido convertirse en los principales constructores de estructuras arrecifales en las zonas tropicales del mundo (Veron y Stafford-Smith, 2000). Su formación o disolución dependen de la alcalinidad del agua de mar, ya que el carbono disuelto en el agua se precipita como carbonato en condiciones “naturales” de alcalinidad, o bien puede formar ácido carbónico disminuyendo el pH. Esto responde al efecto del ambiente sobre la fisiología de los pólipos del celenterado como de las algas endosimbiontes llamadas zooxantelas, células de género *Symbiodinium*, las cuales son responsables de la gran productividad de las comunidades de arrecifes coralinos y de fijar una cantidad importante de carbono al año ($\sim 700 \times 10^{12}$ gC) (Crossland *et al.*, 1991; McClanahan *et al.*, 2002; Douglas, 2003).

Las zooxantelas son autótrofas y proveen de oxígeno y alimento a los organismos coralinos a través de la fotosíntesis, mientras que el coral provee de nutrientes esenciales a la zooxantelas a través de sus desechos metabólicos (Mistr y Bercovici, 2003). La mayoría de los corales hermatípicos contienen entre uno y cinco millones de zooxantelas por cm^2 de superficie de tejido vivo, y cada una de ellas a su vez contiene de 2-10 pg de clorofila-a. La simbiosis generalmente muestra variación temporal en la densidad y contenidos de pigmentos de las células algales, con mínimos valores al final de una temporada

de altas temperaturas de la superficie marina (Dykens y Shik, 1984; Brown, 1997; Fitt *et al.*, 2000).

Los tipos de especies que se encuentran en los ecosistemas coralinos a menudo varían entre comunidades y dentro de una región geográfica (Cornell *et al.*, 2007). Por ejemplo, los corales scleractinios zooxantelados crecen en un intervalo muy estrecho de condiciones ambientales y son por lo tanto sensibles a los cambios en la temperatura (Fabricius *et al.*, 2007). Esta variación en la comunidad le confiere complejidad a los ecosistemas, por esto, la sensibilidad ante los cambios del ambiente es variable entre taxa. El término “sensibilidad” se define como el grado al cual un sistema es afectado negativa o positivamente por estímulos relacionados al clima, por las características climáticas promedio, así como por la variabilidad climática y la frecuencia y magnitud de los eventos extremos (Fabricius *et al.*, 2007).

I.1.3 Amenazas a las comunidades de coral.

Las comunidades coralinas se ven influenciadas por una variedad de disturbios de origen natural o antropogénico, los cuales se dan a diferentes escalas espaciales y temporales (Karlson, 1999). En algunas localidades, se encuentran severamente amenazados por las actividades humanas como el daño producido por las anclas de los botes (y por los botes mismos), la contaminación derivada de actividades como el turismo y la hotelería. Aunado a esto, el buceo en estas zonas se vuelve una importante fuente de ingresos para los locales (Hoegh-Guldberg, 1999; Maina, 2007), lo que también es una de las causas de daño a dichos ecosistemas. Por su parte, las dinámicas de la comunidad y los fenómenos naturales también originan daños a las colonias de coral, por ejemplo depredación y competencia o tormentas y ciclones (Irigoyen, 2004).

La susceptibilidad de los corales al deterioro por estos procesos es variada, debido a las diferencias morfológicas. Por ejemplo, las especies ramificadas son

más propensas a ser perjudicadas por las tormentas y los buzos, mientras que las especies masivas e incrustadas son más vulnerables al sobrecrecimiento de algas (Rogers, 1993; Irigoyen, 2004). Por tanto, su habilidad para recuperarse del daño también es variable, su regeneración es enérgicamente costosa y las especies difieren en la distribución de recursos entre la regeneración y otros recursos demográficos. Para explicar la variación en la capacidad de regeneración de las lesiones, localizadas en diferentes sitios dentro de la colonia, se han propuesto factores como la reducción en los niveles de luz, la densidad de los pólipos y las interacciones con el sustrato (Douglas, 2003; Irigoyen, 2004; Maina, 2007).

Las lesiones reducen la capacidad de una colonia en tres formas: 1) la regeneración requiere energía, de modo que los recursos deben dividirse entre crecimiento y reproducción; 2) la herida permite la entrada de organismos perjudiciales y el establecimiento de algas y esponjas u otros corales que pueden competir por el alimento y el espacio o causar daño estructural al esqueleto; 3) disminuye el área disponible para la alimentación, fotosíntesis y reproducción (Irigoyen, 2004)

Con esto, se puede resaltar que la importancia de los factores intrínsecos de las comunidades juega un rol determinante en el mantenimiento de este tipo de ecosistemas. Sin embargo la balanza se inclina por los factores abióticos como la principal causa de disturbio a los arrecifes. Estudios recientes afirman que cerca del 27% de los arrecifes de coral del mundo se han perdido con el solo hecho del evento masivo de blanqueamiento ocurrido en 1998, observó un declive en la cobertura de coral en muchas partes del mundo (Kleypas *et al.*, 1999; Irigoyen, 2004; Maina *et al.*, 2008), que en su mayoría han sido relacionados con blanqueamiento ocasionado por incrementos en la temperatura.

I.1.4 Mecanismos de blanqueamiento de coral.

Los arrecifes de coral son el medio de subsistencia de millones de personas en el mundo, por lo que la alteración a estos ecosistemas se reconoce ampliamente como un factor de daño para las ya frágiles economías de varios países en desarrollo y los modos de supervivencia de su gente (Douglas, 2003; Maina *et al.*, 2008; McClanahan *et al.*, 2008). El dramático aumento en la incidencia y severidad de los eventos de blanqueamiento en las dos últimas décadas, ha conducido a la percepción de que el blanqueamiento es fundamentalmente un fenómeno no natural. Los eventos de blanqueamiento se están incrementando en frecuencia y severidad (Wilkinson, 1999), y el colapso ecológico de los arrecifes del mundo ha sido predicho por modelos de simulación que se basan en datos actuales de la incidencia de blanqueamiento y el cambio climático proyectado (Douglas, 2003). Por ejemplo, en una larga temporada de elevadas temperaturas de la superficie marina y cuanto mayor sea la máxima temperatura registrada en ese periodo, se predice un mayor blanqueamiento en las simbiosis donde se encuentren presentes algas del género *Symbiodinium* (Hoegh-Guldberg, 1999).

Ciertamente, el blanqueamiento se presenta en los corales. Sin embargo es inadecuado suponer que sólo en estos organismos se puede localizar. El blanqueamiento no está restringido a los corales pues, también se expresa en todos los animales que tienen algas dinoflageladas como simbiosis (zooxantelas) (Douglas, 2003).

En laboratorio, el blanqueamiento se dispara por múltiples factores tales, como extremos de temperatura (caliente y fría), alta irradiancia, prolongados periodos de oscuridad, exposición a altas concentraciones de metales pesados (especialmente cobre y cadmio), y exposición a microorganismos patógenos (Hoegh-Guldberg, 1999; Brown, 2000).

Los eventos recientes a gran escala de blanqueamiento, hablando de corales, se han atribuido principalmente al aumento en la temperatura del mar, a menudo combinado con el incremento en la radiación solar, y que también han sido relacionados con cambios a largo plazo en el régimen climático global, agravado por los eventos de El Niño (Stone *et al.*, 1999; Walther *et al.*, 2002).

La contaminación es también un factor de consideración, que aunado con otros, puede ocasionar estragos en las comunidades coralinas por ejemplo, la virulencia de la bacteria *Vibrio shiloi*, agente causal de blanqueamiento en el coral *Oculina gonica*, es fuertemente dependiente de la temperatura, ya que requiere temperaturas por encima de los 25°C (Douglas, 2003).

Uno de los síntomas del blanqueamiento es la reducción en la densidad de *Symbiodinium*. Los corales que parecen completamente blanqueados a simple vista, han experimentado una reducción de un 70-90% de su densidad algal (Fitt *et al.*, 2000).

Los daños por la acción de uno o varios de los disparadores de blanqueamiento juntos se pueden expresar o identificar de varias maneras, por ejemplo: a) se presenta daño y reducción en la proteína D1 del centro de reacción del fotosistema II de las células de *Symbiodinium* (Jones *et al.*, 1998), sugerido como uno de los mecanismos que llevan al blanqueamiento en respuesta a altas temperaturas y alta irradiancia. b) La inhibición de la fotosíntesis en las células de *Symbiodinium* en respuesta a una toxina producida por el patógeno *Vibrio shiloi* (Sawyer y Muscatine, 2001).

El monitoreo de los eventos de blanqueamiento ha revelado una marcada variación interespecífica e intraespecífica en los sitios donde se ha observado el blanqueamiento, por ejemplo, entre corales. Las formas con ramificaciones como algunas especies de *Acropora* y *Pocillopora*, generalmente se blanquean más intensamente que las formas masivas de coral (McClanahan *et al.*, 2001).

Se ha encontrado en el género *Symbiodinium* cierta variación genética a nivel de su ARN molecular, variación comprendida entre los clados del filotipo A y otro que incluye al filotipo B y al C (Rowan, 1998; Wilcox, 1998). Los tres filotipos son cosmopolitas y se distribuyen por el Atlántico y algunas provincias del Indo Pacífico, aunque el filotipo C, es raro y poco probable de encontrar en latitudes altas (> 35-40°) (Douglas, 2003).

Rowan *et al.*, (1997), realizaron estudios en campo con *Monastrea annularis* y *M. faveolata* en la costa caribeña de Panamá y compararon colonias de corales que contenían los ribotipos (B y C). Aquellos con poblaciones de algas dominados por “B” (>80% de células algales) no mostraron blanqueamiento detectable a simple vista en respuesta a elevada temperatura/irradiación a finales del verano de 1995 mientras que aquellos con poblaciones de algas que comprendían el 35% o más del ribotipo C, se detectaron un poco pálidas o blanqueadas. Brown y colaboradores realizaron estudios con *Goniastrea aspera*, coral masivo de aguas poco profundas, en Phuket Tailandia y encontraron que en varios años de la última década, la temperatura del mar en la región ha excedido los niveles medios registrados previamente en abril/mayo, lo cual ha causado un blanqueamiento por las elevadas temperaturas (Brown *et al.*, 1996). Aunado a esto, se encontró que los costados de los corales que estaban expuestos al oeste, presentaron blanqueamiento, derivado probablemente de la radiación solar (Douglas, 2003).

Buddemeier y Fautin (1993), hablan del blanqueamiento como un “riesgo ecológico”, pero a la vez como una estrategia adaptativa del animal asociado para remplazar al simbionte “inferior” por uno más resistente.

Esta hipótesis presupone tres procesos:

- El simbionte desplazado es inferior al simbionte invasor. En este sentido, el ribotipo A puede ser descrito como más invasivo que el ribotipo C, sin embargo esta capacidad de establecerse (invasor), no significa superioridad.

- El remplazo de una población residente de *Symbiodinium* en algún animal requiere una reducción de la población.
- Una cepa alternativa de *Symbiodinium* (supuestamente superior), está disponible para poblar al animal huésped blanqueado.
- Las poblaciones restantes son regularmente observadas como una simbiosis que muestra blanqueamiento, y ellas pueden repoblar nuevamente y relativamente rápido al animal por proliferación dentro de unas pocas células hospederas infectadas (Buddemeier y Fautin, 1993; Douglas, 2003; Buddemeier *et al.*, 2004; Maina, 2007).

Baker (2001) realizó experimentos de traslado de colonias de un lugar a otro y observó que las colonias transferidas de aguas someras a aguas profundas, sufrieron mayor mortalidad que aquellas que se movieron en la dirección opuesta, y que sólo las colonias de aguas profundas mostraron blanqueamiento con el remplazo de *Symbiodinium* con ribotipo C. Esto parece ser congruente con la hipótesis del blanqueamiento adaptativo. Sin embargo no hay evidencia de que una supervivencia superior de la colonia trasplantada de agua profunda a somera, haya sido una consecuencia de su blanqueamiento (Baker, 2001).

Es posible establecer que los efectos negativos del blanqueamiento son variables debido a las características en que se presenta y que sinérgicamente las variables del entorno bióticas y abióticas, pueden desencadenar efectos que podrían ir desde un evento de disminución de células simbiotes (el cual se puede llegar a considerar estacional), hasta mortalidad en masa como se ha mencionado.

I.1.5 Factores ambientales que aumentan la resiliencia de la comunidad.

Los ecosistemas acuáticos a menudo están expuestos a una variedad de disturbios, la cual compromete la resiliencia de una población, comunidad o ecosistema, lo que puede repercutir en la incapacidad de responder a disturbios adicionales o de diferente intensidad (Kashian *et al.*, 2007). La respuesta de los organismos arrecifales a cambios de temperatura es distinta y depende de su resiliencia. Algunos factores como la latitud, las condiciones oceanográficas, profundidad, determinarán el grado de exposición que tenga el arrecife a los efectos del disturbio y por tanto, lo vulnerable que pudiera ser el ecosistema (Smith y Buddemeier, 1992).

La presencia de un disturbio altera la estructura de la comunidad (Maina *et al.*, 2008) y por tanto la tasa de recambio que mantiene la estabilidad o “equilibrio” en el ecosistema que plantea la teoría. Los disturbios ponen a prueba la resiliencia de las comunidades, que es la capacidad de volver a su estado original después de haber pasado el disturbio (Peterson *et al.*, 1998). Algunos de los factores que determinan la sensibilidad son el grado de especialización de cada especie, la capacidad de movilidad, las relaciones simbióticas y la complejidad estructural de la comunidad. Ésta última está basada en lo estrecho del rango de condiciones ambientales en las que se desarrollan. Por su parte, la especialización nos indica la amplitud del nicho y por tanto la tolerancia que las especies tienen a las condiciones oceanográficas (Hirzel *et al.*, 2002), en este caso del Pacífico mexicano.

I.2 Hipótesis

Es sabido que la temperatura superficial del mar es la causa principal del blanqueamiento de los corales. La vulnerabilidad de los corales al blanqueamiento está determinada por el intervalo de variación de temperatura al que están expuestos. Las comunidades que habitan en zonas cuya variación de temperatura sea mayor, serán más resistentes al blanqueamiento. Asimismo, bajo el supuesto que un organismo euribionte será menos vulnerable a las anomalías ambientales que uno estenobionte, las localidades que presenten los intervalos más amplios en la media histórica anual de concentración de clorofila, índice de surgencia y radiación fotosintéticamente activa (PAR), serán menos vulnerables al blanqueamiento.

Hipótesis.

Ho: El blanqueamiento es indistinto del intervalo de variación de temperatura y de otras variables al que están expuestos los corales.

H1: Existe una correlación entre vulnerabilidad al blanqueamiento y el intervalo de temperatura y otras variables en el que habitan los corales.

I.3. Objetivos

- Caracterizar las localidades en las que se encuentran arrecifes coralinos en función de su temperatura superficial media mensual, concentración de clorofila, índice de surgencia y PAR.
- Identificar las variables ambientales que disparan el blanqueamiento de corales y evalúa su importancia relativa en diferentes escalas de tiempo y espacio.

I.4. Justificación

Los ecosistemas son vulnerables ante las alteraciones de los regímenes climáticos. Los cambios en la frecuencia e intensidad de estos regímenes rigen la mayoría de los ciclos de vida de los organismos, sea cual sea el medio (terrestre o acuático). Por otra parte las sociedades humanas se ven afectadas de manera similar ya que al verse constantemente alterados los recursos de los cuales dependen, disminuye cada vez más la capacidad de mantener el “equilibrio” de los bienes naturales, hasta que llega el momento en que los productos no pueden sostener la demanda. Aunque se diseñan estrategias para mitigar los efectos de las alteraciones a los ecosistemas es posible que ya se encuentren vulnerables.

En arrecifes, una temporada de máximas o mínimas fluctuaciones en la temperatura del mar puede ocasionar alteraciones fisiológicas, modificando así los ciclos vitales de los corales y de las especies asociadas a ellos de forma que la capacidad de recolonizar estará condicionada por la sensibilidad de la especie a tales cambios (Kashian *et al.*, 2007). De ahí que sea muy importante caracterizar los intervalos de temperatura a los cuales se enfrentan los arrecifes coralinos y no únicamente su posible exposición a altas temperaturas.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto VULNERABILIDAD DE LOS ARRECIFES CORALINOS DE LAS COSTAS MEXICANAS POR EFECTO DEL CAMBIO GLOBAL Y POSIBLES CONSECUENCIAS SOCIOAMBIENTALES (Fondo Sectorial CONACYT – SEMARNAT –INE Ref. 023390), cuyo objetivo general es estimar los posibles efectos que tendrían el incremento en la temperatura superficial del mar y de la presión parcial atmosférica de bióxido de carbono sobre los arrecifes coralinos de las costas mexicanas del Pacífico, como consecuencia del cambio global. Básicamente trata de identificar los factores físicos, biológicos y sociales que determinan la vulnerabilidad de los arrecifes coralinos, así como las consecuencias socioambientales que tendría la degradación de estos ecosistemas. En el contexto de la convocatoria del fondo sectorial CONACYT-INE-SEMARNAT, la vulnerabilidad puede ser entendida

como la incapacidad de un sistema para absorber, mediante autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su ambiente, es decir, su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse a ese cambio. En este sentido, los patrones regionales y locales de cambio ambiental, a su vez derivados de los procesos de cambio global (incluyendo el cambio climático, las transformaciones y transiciones demográficas –urbanización, migraciones--, el cambio en la recurrencia de eventos extraordinarios, etc.) merecen la atención de la agenda de investigación para retro-alimentar la política pública ambiental en estos temas (SEMARNAT-CONACYT, 2006).

En particular, esta tesis analizará series de tiempo de variables ambientales de posible influencia sobre el blanqueamiento de posible corales hermatípicos.

I.5. Área de estudio

II.1.1 Cabo Pulmo.

Arrecife al Norte del Pacífico mexicano, está localizado en la entrada del Golfo de California ($23^{\circ} 50' N$, $109^{\circ} 25' W$), en una zona de transición entre el Pacífico templado y tropical (Figura 1). Las concentraciones de oxígeno son bajas y van desde 1mg/m^3 a 150 mg/m^3 (Calderon-Aguilera y Reyes-Bonilla, 2006). Este arrecife está dividido naturalmente en tres secciones: una sección norte que se caracteriza por fondos arenosos, baja cobertura de coral y gran influencia temporal de agua dulce en verano y otoño; una región central, con grandes áreas de sustrato duro (granito, arenisca y conglomerado) que soportan una alta cobertura de coral y la sección más extensa que se encuentra al sur, donde el movimiento de las aguas es bajo debido a la protección que le brinda Cabo Los Frailes.

II.1.2 Islas Marietas.

El Parque Nacional Islas Marietas (Figura 1), se ubica entre los $20^{\circ} 42' 47''$ y $20^{\circ} 41' 11'' N$ y $105^{\circ} 33' 18''$ y $105^{\circ} 33' 18'' W$ con una superficie de 1,400 ha. Las Islas Marietas se localizan en la Bahía de Banderas en el Océano Pacífico, frente a las costas del estado de Nayarit, México, a 6 km hacia el suroeste de la península conocida como Punta de Mita (RAMSAR, 2004). La localidad costera más importante cercana a las Islas Marietas es Puerto Vallarta, ubicada a 39 km y que cuenta con una población total de 177,000 habitantes (INEGI, 2009).

A pesar de su relativa importancia, son pocos los antecedentes al respecto. Squires en 1959 presentó un listado de nueve especies, (dos ahermatípticas y otra taxonómicamente inválida), la cual a la fecha es considerada como endémica (Squires, 1959; Carriquiry y Reyes-Bonilla, 1997).

II.1.3 Isla Isabel

El parque Nacional Isla Isabel (Figura 1), Nayarit se ubica entre los 21° 51' 21" y 21° 50' 56" N y 105° 53' 31" y 105° 52' 43" W; (Ríos-Jara *et al.*, 2008), con una superficie de 194.17 ha (Anónimo, 1980). Es una isla volcánica y una de las islas de anidación de aves marinas más importantes en el Pacífico (RAMSAR, 2003). Se ha registrado la presencia de 10 especies de corales, las cuales han construido estructuras arrecifales verdaderas (Figura 1) (Carriquiry y Reyes-Bonilla, 1997; Medina-Rosas *et al.*, 2005).

II.1.4 Ixtapa – Zihuatanejo

La bahía de Ixtapa – Zihuatanejo (Figura 1), Guerrero, se ubica entre los 17° 40' 40" y 17° 37' 16" N y 101° 32' 44" y 101° 38' 45" W (Figura 1); con una extensión de 3.52 km². Se conocen cinco arrecifes ubicados en bahías y caletas protegidas del oleaje directo y desarrollándose sobre fondos duros. Por su forma corresponden a arrecifes de tipo bordeante, presentan una profundidad máxima de 10 m con tamaños que van de 4 a 40 ha, lo cual los coloca dentro de los de mayor extensión en el Pacífico mexicano. por la cantidad de especies de corales, peces y equinodermos que sostienen (Zamorano y Leyte-Morales, 2009), se encuentran entre los más diversos en comparación con ambientes similares de Jalisco y Oaxaca.

II.1.5 Bahías de Huatulco

En la costa de Oaxaca, se encuentra el Parque Nacional Huatulco (Figura 1), con una superficie de 12,000 ha, de las cuales ~5,500 ha pertenecen a la zona marina e incluye nueve bahías. El parque se ubica entre los 15° 39' 12" y 15° 47' 10" N y 96° 06' 30", 96° 23' W. Comprende una porción del litoral caracterizada por ser una costa de acantilados donde no existen llanuras y entre las cuales se han formado pequeñas bahías de fondo rocoso y escasa profundidad creando un

ambiente propicio para el desarrollo de arrecifes coralinos, con especies como *Pocillopora eydouxi* (RAMSAR, 2003).

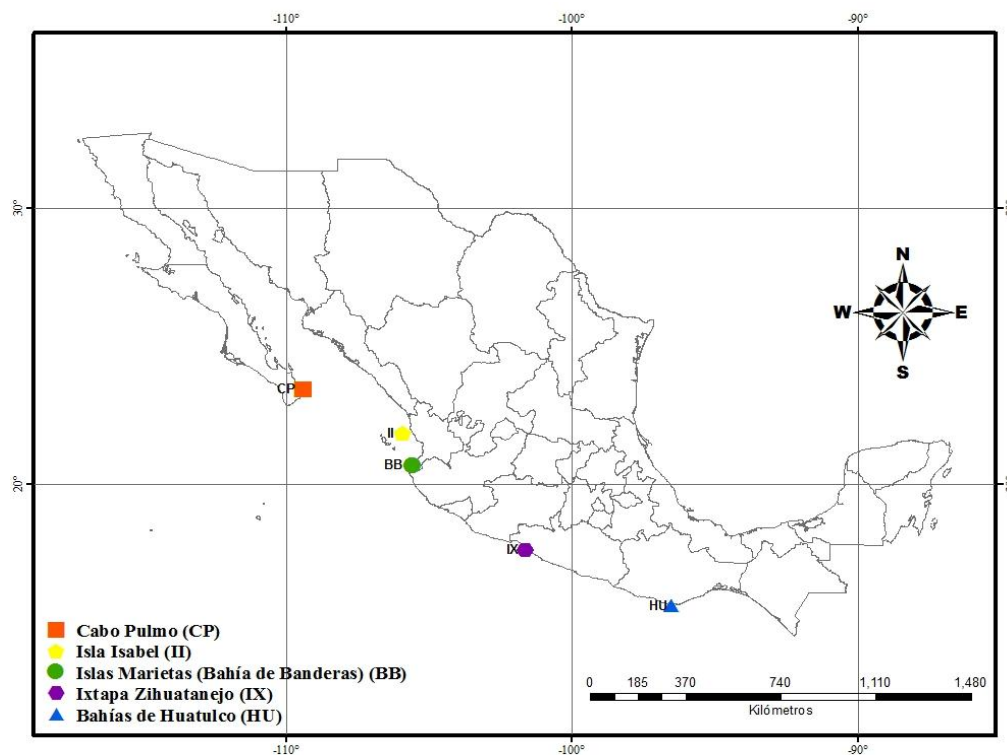


Figura 1. Ubicación de las comunidades arrecifales estudiadas. Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa Zihuatanejo y Bahías de Huatulco.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

II.1. Fuente de datos y procesamiento de información.

Las variables seleccionadas se han considerado como posibles factores que reflejan características que contribuyen a la vulnerabilidad de las comunidades arrecifales (Szlafsztein y Sterr, 2007). Los conjuntos de datos de temperatura superficial del mar, concentración de clorofila y radiación fotosintéticamente activa (PAR) fueron obtenidos del sitio web Ocean color ¹(URL y fecha de acceso se indican en la Tabla 1). Por su parte, los datos de índice de surgencia fueron tomados de la página del laboratorio ambiental de pesquerías del Pacífico ²(PFEL, URL en la Tabla 1) de NOAA.

Los productos obtenidos de Ocean color están dispuestos en formato HDF (Hierarchical Data Format), el cual es un formato de archivos muy versátil que soporta diferentes modelos de datos, cada uno de los cuales define un tipo específico de datos y provee una interface conveniente para la lectura, la escritura y la organización como un conjunto único de elementos. El formato HDF tiene también la cualidad de almacenar varios tipos de datos en el mismo archivo³.

El formato de los datos se categoriza en el sitio web como “Ocean Level-3 Standard Mapped Image Products⁴ (SMI)”, los cuales son imágenes o representaciones de los datos obtenidos por los sensores como SeaWIFS, MODIS, OCTS o CZCS. Los datos en cada producto SMI representan una imagen del parámetro especificado por el parámetro de atributos global. Este

¹ <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>

² http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html

³ <http://www.ifremer.fr/cersat/en/data/manuals/hdf.htm>

⁴ <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/ocformats.html>

objeto es una matriz bidimensional de una proyección cilíndrica equidistante del globo. Los valores pueden ser almacenados como bytes, 2-bytes íntegros o 4-bytes flotantes. Los primeros dos son escalados a los valores reales y pueden ser convertidos a valores geofísicos usando los atributos de escalamiento global, ecuación de escalamiento, base, pendiente e intercepto.

II.1.1 Temperatura superficial del mar (TSM).

Los datos de temperatura superficial del mar fueron obtenidos del sitio web de NASA, Ocean color (URL en la Tabla 1) y provienen del sensor Aqua MODIS. El set comprende una compilación de 85 archivos HDF con imágenes de nivel 3 y con una resolución espacial de 9 km y temporal de un mes.

Algunos estudios orientados a validar la viabilidad de los datos satelitales refieren a la sociedad para la conservación de la vida silvestre (WCS, por sus siglas en inglés) quienes han tomado datos *in situ* de temperatura (McClanahan y Maina, 2003; McClanahan *et al.*, 2008) desplegados a profundidades aproximadas de 5 m en lagunas con comunidades coralinas en Kenia y Mauritania, los cuales fueron utilizados para ser comparados con los datos recabados por el satélite entre 1997 y 2005. La exactitud de su estimación está dentro de los 0.35-0.4°C a temperatura ambiente (McClanahan y Maina, 2003). La comparación de los datos obtenidos en campo con los datos de satélite, mostraron un error cuadrático medio (RMSE) de los residuales de 0.87°C, indicando una correspondencia satisfactoria entre los dos conjuntos de datos.

II.1.2 Radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Los datos de luz fotosintéticamente activa (PAR, Einsteins/m²/día), fueron obtenidos del sensor de amplio campo de visión del mar (SeaWiFS, por sus siglas en inglés). Para el presente trabajo se utilizaron las imágenes correspondientes al periodo de julio de 2002 - julio de 2009.

PAR está definido como el flujo de energía quantum desde el sol en el rango espectral de los 400-700 nm, o el rango de longitud de onda visible (Frouin *et al.*, 2003; Maina *et al.*, 2008). Los datos de PAR de nivel 3 y de una resolución de 9 km fueron descargados en formato HDF del sitio de SeaWIFS (tabla 1). Se obtuvieron un total de 81 imágenes, debido a la falta de tres meses del año 2008, lo cual se resolvió con la técnica de remuestreo o “Bootstrapping”, de modo que, estadísticamente fueron asignados los valores que más se podrían acercar o parecer a los correspondientes de los meses faltantes.

El algoritmo usado para convertir la irradiancia reflejada de la superficie del mar se describe en Frouin *et al.*, 2000. Dichos autores, describen la evaluación de este algoritmo usando varios años de datos *in situ* de PAR en Canadá, y reportaron buena relación entre los datos de satélite y los recopilados en campo. Observaron diferencias de 6.2 (15.0%), 3.79 (9.1%) y 3.3 (8.1%) sobre las escalas diarias, semanales y mensuales, sugiriendo que los promedios mensuales son más exactos que los datos diarios o los semanales (Maina *et al.*, 2008).

Tabla I. Características de los datos obtenidos.

Tipo de producto	Satélite/ Sensor/ Modelo	Resolución espacial.	Escala temporal	Número de imágenes	Sitio Web	Fecha de obtención.
Temperatura superficial del mar (°C).	Aqua MODIS	9 Km	Mensual; Julio 2002-Julio 2009	85	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3	15/02/09
Clorofila (mg/m ³)	Aqua MODIS	9 Km	Mensual; Julio 2002-Junio 2009	84	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3	19/02/09
Radiación fotosintéticamente activa (Einstein/m ² /día)	SeaWIFS	9 Km	Mensual; Julio 2002-Junio 2009	81	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3	20/02/09
Índice de surgencia (m ³ /segundo /100m de línea de costa)		Dato puntual	Mensual; Julio 2002-Septiembre 2009	Serie de tiempo (Archivo de texto)	http://las.pfeg.noaa.gov/las6_5/servlets/constrain?var=1641	25/04/09

II.1.3 Concentración de clorofila.

Los datos de concentración superficial de clorofila son derivados de SeaWiFS, usando un algoritmo (OC4V4) para clorofila-*a* (O'Reilly *et al.*, 2000). El sensor SeaWiFS, es calibrado rigurosamente con el objetivo de medir clorofila-*a* en el rango del 0.01 – 64 mg/m³ con un 35% de exactitud (Hooker y McClain, 2000).

Otra validación de SeaWiFS, fue realizada por el trabajo de Lavender *et al.*, (2004), quienes compararon mediciones de clorofila-*a* obtenidas a bordo de un barco oceanográfico con aquellas mediciones obtenidas por el satélite. Ellos reportaron que en promedio SeaWiFS sobre-estimó la concentración de clorofila-*a* a los valores *in situ* por un factor de tres (Maina *et al.*, 2008).

El set de datos de clorofila obtenidos del sitio web “ocean color” (ver tabla 1), son de nivel 3, con una resolución espacial de 9km y una resolución temporal de un mes.

II.1.4 Índice de surgencia.

El estrés friccional que genera el viento en la superficie del mar (con la costa de su lado izquierdo), en relación con el efecto de la rotación de la tierra, causa que el agua que está en la superficie se mueva hacia afuera de la línea de costa⁵.

Este movimiento de agua hacia afuera de la costa es remplazado por agua que emerge o que fluye hacia la superficie desde profundidades de 50 a 100 metros o más (figura 2). El agua de surgencia es fría y más salada que la que originalmente se encuentra en la superficie y típicamente tiene concentraciones de nutrientes tales como nitratos, fosfatos y silicatos mucho mayores, los cuales son claves para el mantenimiento de la producción biológica. Es por esto que los ecosistemas marinos con estas características son altamente productivos y capaces de mantener grandes florecimientos de plancton y por tanto grandes

⁵ http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/what_is_upwell.html

cantidades de biomasa de peces como sardinas y anchovetas, así como de mamíferos marinos (Bakun, 1975). Se puede considerar como un buen ejemplo a la corriente de California en el noroeste de América.

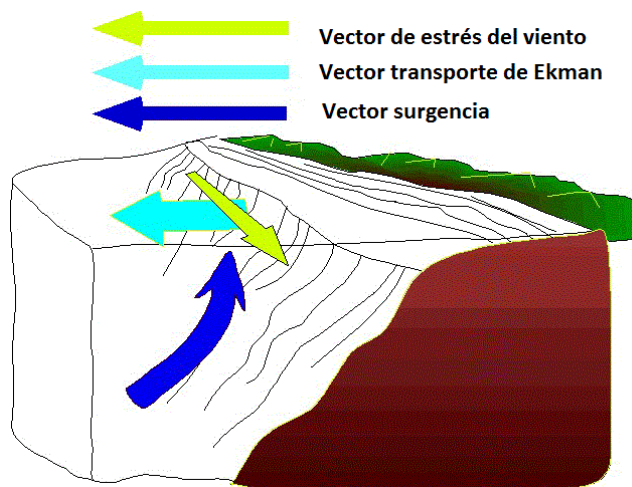


Figura 2. Mecanismos que actúan en el proceso de formación de surgencias. Modificado de: pfcg.noaa.gov.

En el laboratorio ambiental de pesquerías del Pacífico ⁶(PFEL, por sus siglas en inglés), han calculado el índice de surgencia basados en la teoría del transporte de Ekman hacia afuera de la costa debido al estrés del viento. Bajo la suposición de homogeneidad (densidad constante), viento uniforme y un estado de condiciones normales, el transporte superficial de las masas de agua debido al estrés del viento es 90° a la derecha de la dirección del viento en el hemisferio norte.

El transporte de Ekman es definido como el estrés del viento dividido entre el parámetro de Coriolis, el cual es función del movimiento de rotación de la tierra y de la latitud. La profundidad a la cual es apreciable una cantidad de este

⁶ http://www.pfcg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/how_computed.html

transporte hacia afuera de la costa, ocurre en la superficie de la capa de Ekman, la cual se encuentra generalmente entre 50 y 100 metros de profundidad.

El transporte de Ekman está dispuesto respecto a la orientación local de la línea de costa. La magnitud de éste se considera un índice de la cantidad de agua que emerge de la base de la capa de Ekman. Los valores positivos, en general, son el resultado de estrés del viento que favorecen las surgencias. Los valores negativos, implican hundimiento o movimiento de advección hacia la costa de las aguas superficiales. Los datos para este estudio, fueron derivados de la media mensual de datos de velocidad del viento, resultado de campos de presión atmosférica sobre la superficie del mar. Estos datos (series de tiempo e imágenes) mensuales, son calculados a partir de una malla de interpolación de tres grados y se pueden obtener para puntos geográficos particulares⁷.

II.2. Procesamiento y análisis de datos.

Una vez agregadas las imágenes satelitales, se procedió a su lectura para la extracción de los datos deseados de la siguiente manera. Las imágenes de temperatura superficial del mar se manipularon mediante el software que provee el mismo sitio web de donde fueron extraídos los datos. SeaDAS⁸ 5.3 fue la versión utilizada para procesar las imágenes y poder extraer los datos de temperatura de los polígonos deseados. Este software corre bajo sistemas UNIX, tiene la capacidad de leer y desplegar datos de dichas imágenes, que a su vez, provienen de sensores como SeaWifs, MODIS y AVHRR por mencionar sólo algunos. Los datos que se pueden manipular con esta herramienta van desde imágenes de formatos como GeoTIFF, las cuales contienen información georeferenciada, es decir, incluye lo necesario para establecer una buena

⁷ http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/transition_doc.html

⁸ <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>

referencia espacial de los datos del archivo; imágenes PNG (Portable Network Graphics); lectura de archivos en formato HDF (Hierarchical Data Format) que contienen datos gráficos y numéricos, entre otras funciones.

Los polígonos de análisis de datos se establecieron conforme a las ubicaciones geográficas de los sitios de muestreo y de las comunidades coralinas: Cabo Pulmo Latitud 23.43, Longitud -109.36; Isla Isabel Latitud 21.87, Longitud -105.88; Islas Marietas Latitud 20.65, Longitud -105.54; Ixtapa Zihuatanejo Latitud 17.63, Longitud -101.54 y Bahías de Huatulco Latitud 15.54, Longitud -96.45. SeaDAS 5.3 permite la entrada de las coordenadas geográficas, de modo que las opciones resultantes para extraer los datos de polígonos están ya preestablecidas, es decir, se pueden extraer los datos geofísicos de las imágenes en polígonos que van desde un solo pixel de datos, a polígonos de 3 x 3, 5 x 5, 9 x 9, entre otros.

Para los sitios considerados en este análisis se utilizó una matriz de 3 X 3 pixeles (en Bahías de Huatulco se utilizó una matriz de 5 X 5 pixeles por la extensión del área de estudio), teniendo que ingresar sólo las coordenadas del pixel central, el cuál correspondería a la ubicación del sitio como se muestra en la tabla 3 en un ejemplo para Isla Isabel.

Al tener ocho pixeles rodeando al de interés (24 el caso de Huatulco), fue necesario enmascarar los valores por encima de 35°C y por debajo de 10°C, considerados como valores que caen en tierra y valores registrados por el satélite correspondientes a periodos de alta nubosidad respectivamente. Enmascarados estos valores para los pixeles que los presentaron se obtiene el promedio de los pixeles que se encuentran dentro del rango “valido”.

Producto de lo anterior, se obtuvieron los datos de temperatura para cada sitio en una matriz de 3 X 3 elementos, proceso que se realizó para cada una de las imágenes de temperatura y para cada uno de los sitios.

Tabla II. Matriz de coordenadas empleadas por SeaDAS 5.3 para la extracción de los datos de temperatura. Ejemplo: Isla Isabel. En el centro las coordenadas que corresponden al sitio de estudio y que es delimitado por el investigador.

21.95 N, -105.95	21.95 N, -105.87	21.95 N, -105.79
21.87 N, -105.95	21.87 N, -105.88	21.87 N, -105.79
21.79 N, -105.95	21.792 N, -105.87	21.792 N, -105.79

Las imágenes de clorofila y PAR se procesaron en MATLAB 7.9.0. Se establecieron los límites de latitud y longitud para delimitar el polígono mexicano (figura 3), y posteriormente, se establecieron los límites del polígono de cada localidad como se muestra en la tabla 3.

Tabla III. Límites geográficos para procesamiento en Matlab de los sitios de estudio.

Localidad	Latitud	Longitud
Cabo Pulmo	24.16, 23.33	-110.00, -109.00
Isla Isabel	21.90, 21.80.	-105.90, -105.80
Islas Marietas	20.80, 20.40	-105.80, -105.30
Ixtapa Zihuatanejo	17.70, 17.50	-101.80, -101.54
Bahías de Huatulco	15.70, 15.60	-96-10, -96.25

Se definieron los vértices del polígono y los parámetros de la recta de regresión para reconstruir el valor de temperatura con los datos de cada una de las imágenes, dado que el programa es capaz de hacer el mismo proceso para cada una de ellas en una sola corrida. Se delimitó la matriz de salida para los datos de interés, enmascarando aquellos que cayeran en tierra o que podrían ser considerados como nubosidad, hecho que alteraría considerablemente los promedios resultantes. Como salida se obtuvo una matriz que reúne los valores geofísicos del conjunto de imágenes de clorofila y PAR respectivamente. El procedimiento fue el mismo para cada set de imágenes de las variables mencionadas.

Para la obtención de los datos del índice de surgencia, se ingresaron las coordenadas de cada uno de los sitios en la página web ⁹que los hace disponibles, así como el ángulo de costa, el cual es el ángulo que se forma hacia la parte interior de la costa con un vector que apunta hacia el norte (figura 4). El ángulo alfa es lo que debe ser ingresado como “ángulo de costa” en la página web. Las coordenadas se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Datos (coordenadas y ángulo de costa) ingresados en el sitio web de NOAA para obtener los datos de índice de surgencia.

Localidad	Latitud N	Longitud W	Angulo de costa
Cabo Pulmo	24.5	-109.5	315°
Isla Isabel	21.5	-107.5	150°
Islas Marietas	20.5	-105.5	210°
Ixtapa Zihuatanejo	14.5	-102.5	118°
Bahías de Huatulco	13.5	-97.5	63°

⁹ http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/how_computed.html

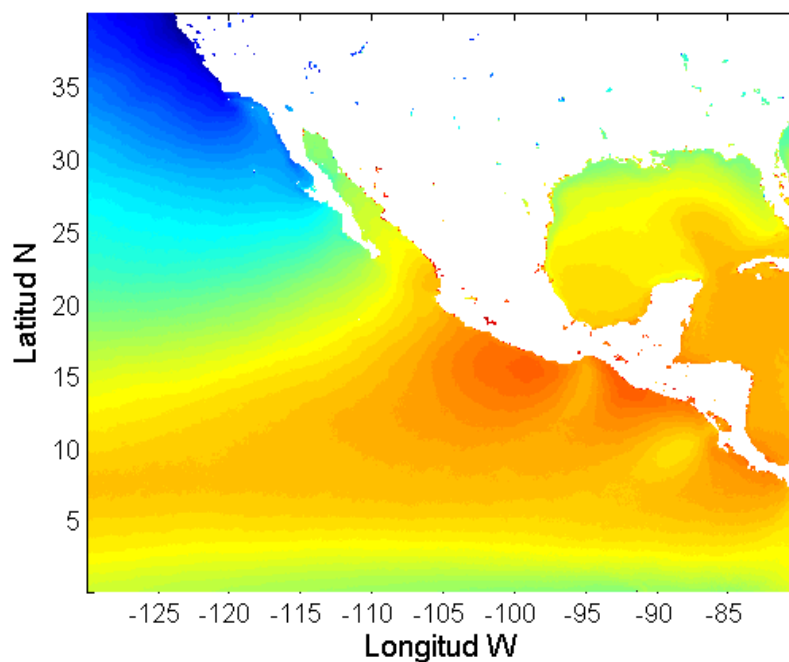


Figura 3. Polígono mexicano utilizado como base para establecer sub-polígonos y extraer los datos de clorofila y PAR.

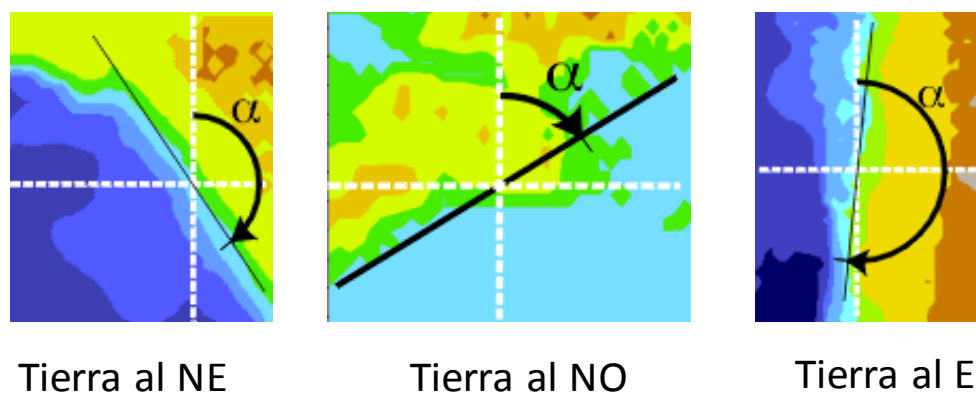


Figura 4. Disposición del ángulo de alfa (ángulo de costa) según la línea de costa. Modificado de: las.pfeg.noaa.gov.

Como resultado se obtuvieron cinco matrices que representan a cada sitio, indicando los valores del índice de surgencia del periodo seleccionado, que comprendió de julio del 2002 a septiembre del 2009.

Una vez reagrupadas las matrices de salida en cada uno de los programas utilizados, se exportaron a hojas de cálculo (EXCEL), donde se dispusieron de forma que se concentraran todos los archivos de salida de cada variable, en un archivo destinado para cada una de ellas. En cada una de las matrices resultantes y correspondientes a cada uno de los sitios, se obtuvo la “climatología” de los datos. Esta se obtuvo al calcular el promedio del conjunto de todos los datos de enero, febrero, y así sucesivamente, con el fin de obtener los valores “tipo” de cada mes para cada una de las variables, durante el periodo de estudio (junio 2002- septiembre 2009). Lo anterior se realizó para explorar la variación de cada dato en particular, respecto a la media histórica en cada sitio y para cada una de las variables.

Estas matrices fueron importadas a STATISTICA 8 para los análisis posteriores.

III. RESULTADOS

III.1. Caracterización de los sitios de estudio

Se obtuvieron un total de 250 imágenes, para las variables PAR, clorofila y temperatura superficial del mar con una resolución espacial de 9 km de escala global y temporal de un mes, además de 86 datos puntuales derivados de promedios mensuales del índice de surgencia, con lo que se caracterizaron los sitios con base en las variables obtenidas, generando series de tiempo para cada uno de los sitios y para cada una de las variables.

III.1.1 Cabo Pulmo.

La temperatura media (climatología) en esta localidad varía entre los 19 y 31°C (Figura 5), aunque con intervalos amplios, sobre todo en enero y febrero, y corto en agosto (Figura 6). En 2008, se registraron en enero, febrero y marzo las temperaturas más bajas del período de estudio (2002-2009), hasta dos grados por debajo de la climatología.

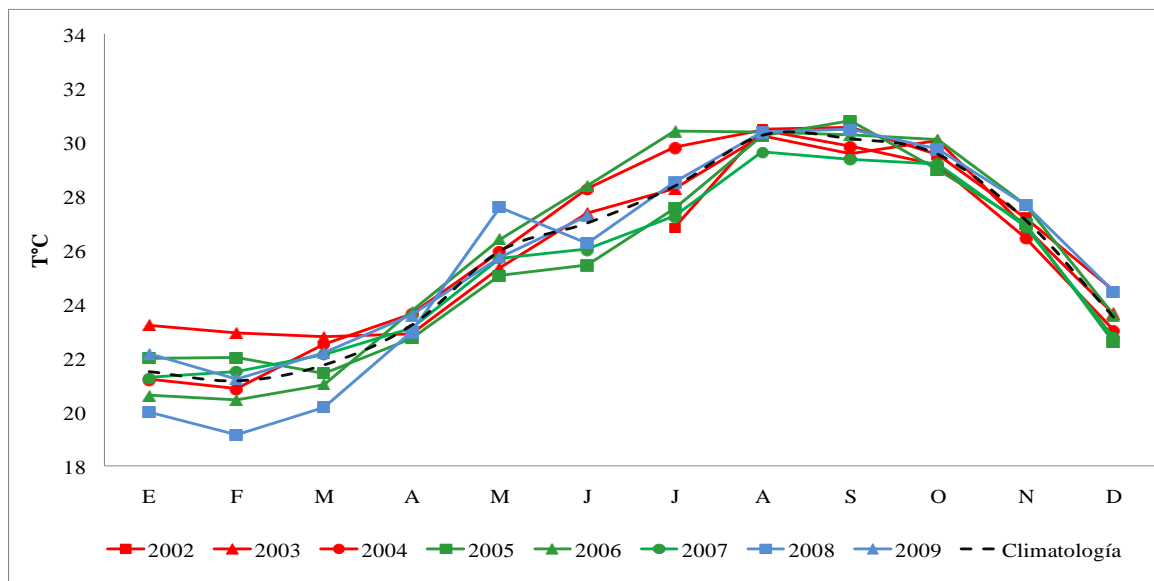


Figura 5. Temperatura media mensual en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a latitud N 23.43, longitud W -109.36. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

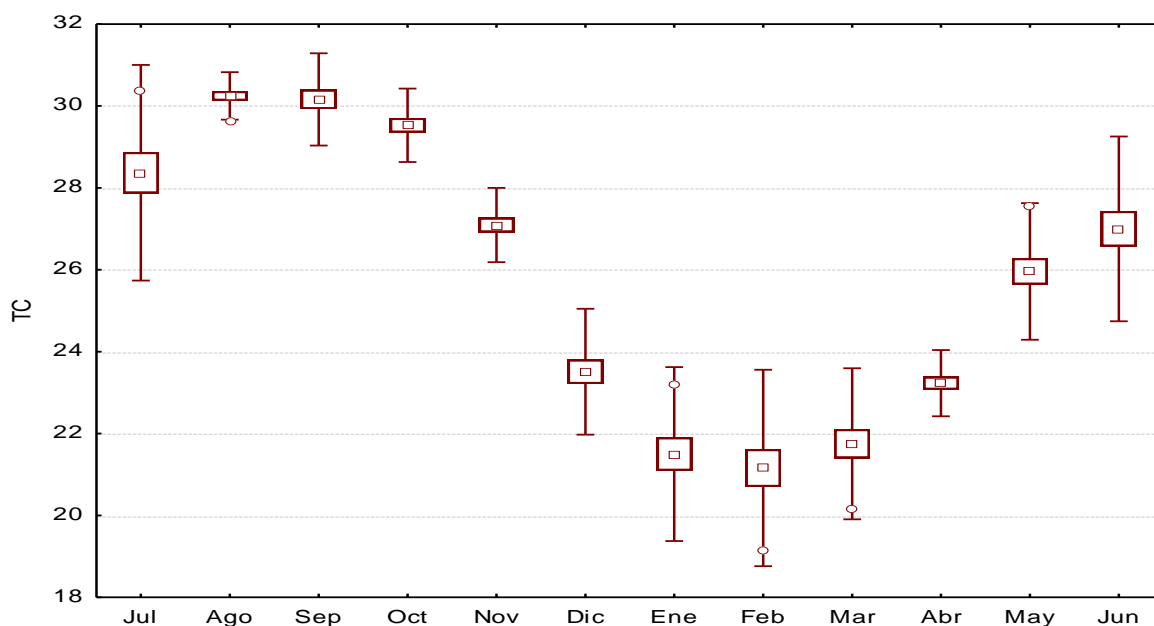


Figura 6. Temperatura media mensual, en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 - junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar, "o" outliers y "*" los puntos extremos. Datos de satélite interpolados a Latitud N 23.43, Longitud W -109.36. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

Los valores registrados de PAR (Figura 7), en general muestran poca variación con respecto a la media climática. El máximo y mínimo de radiación se presenta en los meses junio y enero respectivamente.

Los valores obtenidos del índice de surgencia (Figura 8) muestran poca variación en los primeros meses del año, aumentando a partir de agosto. Aunque es marcada la estacionalidad, se puede apreciar un evento en el que probablemente grandes cantidades de agua emergieron en el 2004.

En la figura 9 observamos la estacionalidad de las surgencias, así como las anomalías presentes en los años analizados, lo que nos indica si hubo surgencia o hundimiento de masas de agua, resaltando el evento del 2004 señalado en la figura 8.

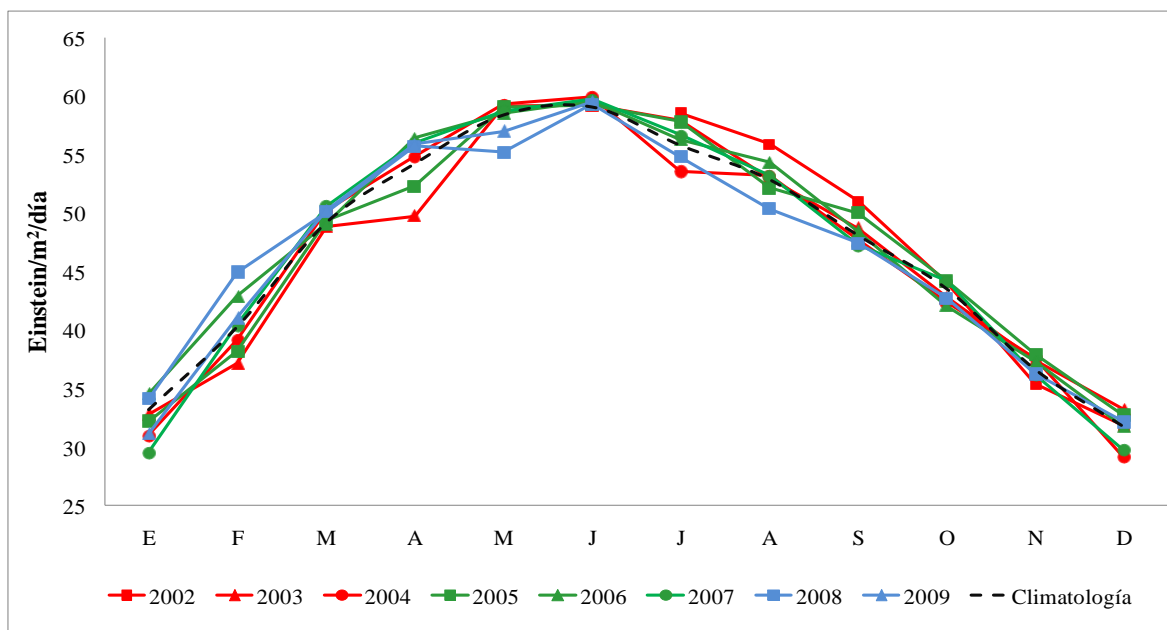


Figura 7. Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Cabo Pulmo durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

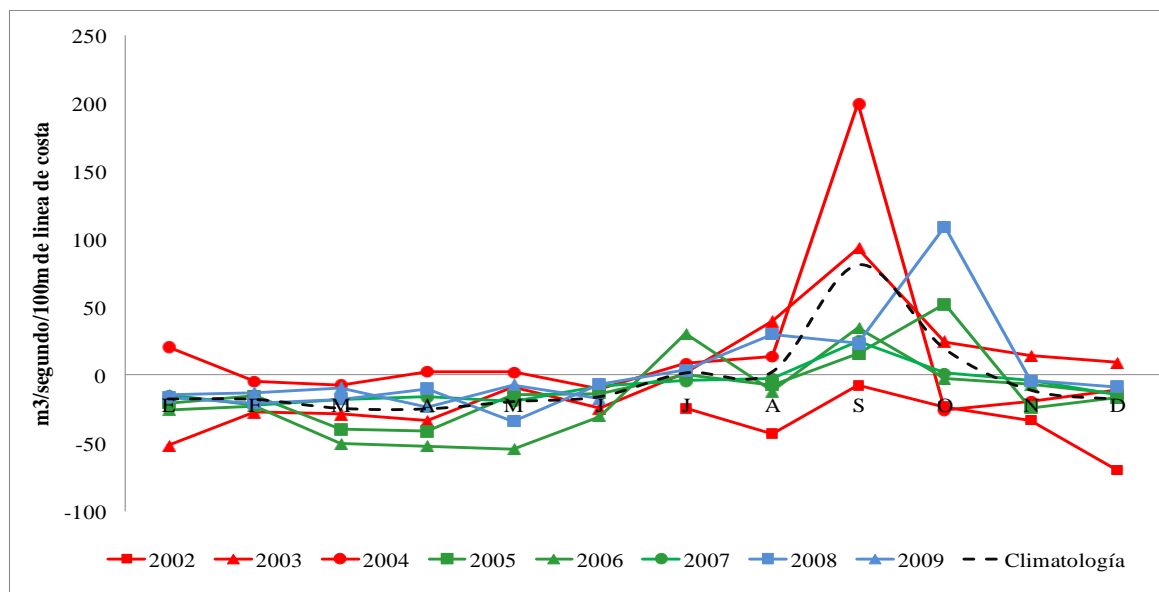


Figura 8. Índice de surgencia en Cabo Pulmo durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -109.5, Latitud 24.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

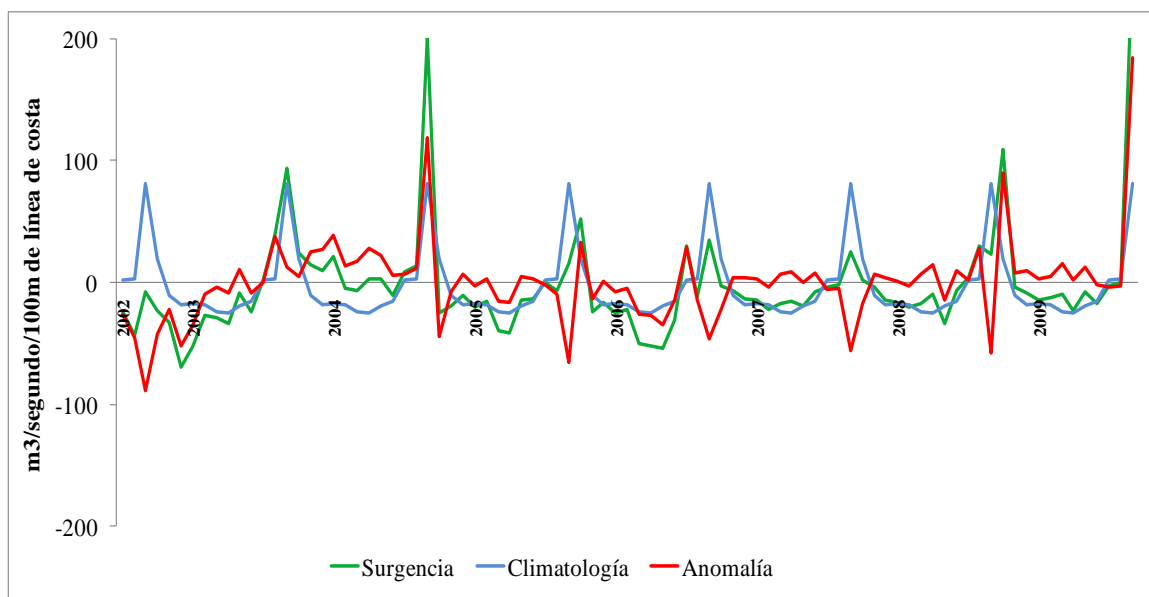


Figura 9. Índice de surgencia en Cabo Pulmo durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -109.5, Latitud 24.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

En febrero de 2009 se observaron las máximas concentraciones de clorofila, de casi 2 mg/m³. La concentración de clorofila (Figura 10) se presenta de modo que, comienza a incrementarse a finales del otoño (noviembre). Por su parte, el verano en Cabo Pulmo presenta concentraciones de clorofila más cercanas al valor climatológico, el cual se encuentra por debajo de los 0.5 mg/m³.

En 2008 y 2009 se presentó una alta producción, de acuerdo a los demás años, de más de 1.5 mg/m³ (Figura 11).

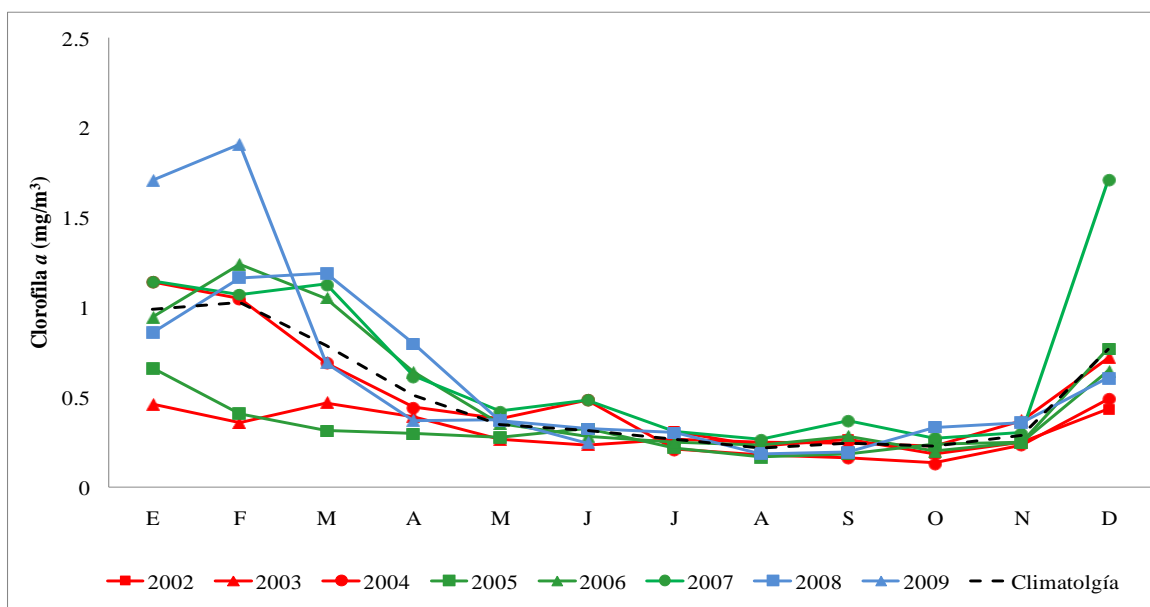


Figura 10. Concentración de clorofila en Cabo Pulmo para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

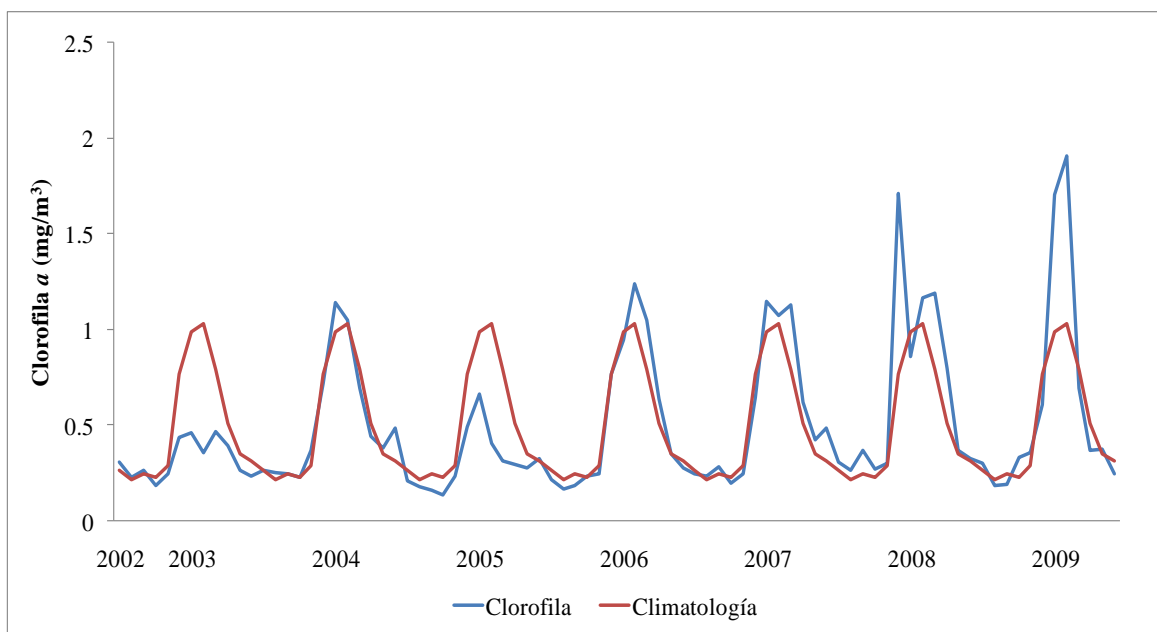


Figura 11. Concentración de clorofila y climatología en Cabo Pulmo para el período 2002 - 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -110.000, Longitud W -109.000, Latitud N 24.167 y Latitud N 23.333. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

III.1.2 Isla Isabel.

Los valores de temperatura en Isla Isabel (Figura 12), mostraron una estacionalidad marcada comenzando a incrementarse a partir de junio y presentando sus máximos en agosto (32°C) hasta octubre, donde nuevamente comienza a descender la temperatura. En 2008 presentó los valores de temperatura más bajos en el análisis, con 21°C en enero. Asimismo, se observa mayo con temperaturas de casi 30°C, cuando la media climática se establece para ese mes (marzo) en 28°C aproximadamente.

El mes que más variación presentó en sus valores de temperatura fue enero (Figura 13). Por su parte, agosto y septiembre presentan un intervalo de variación de menos de 2°C.

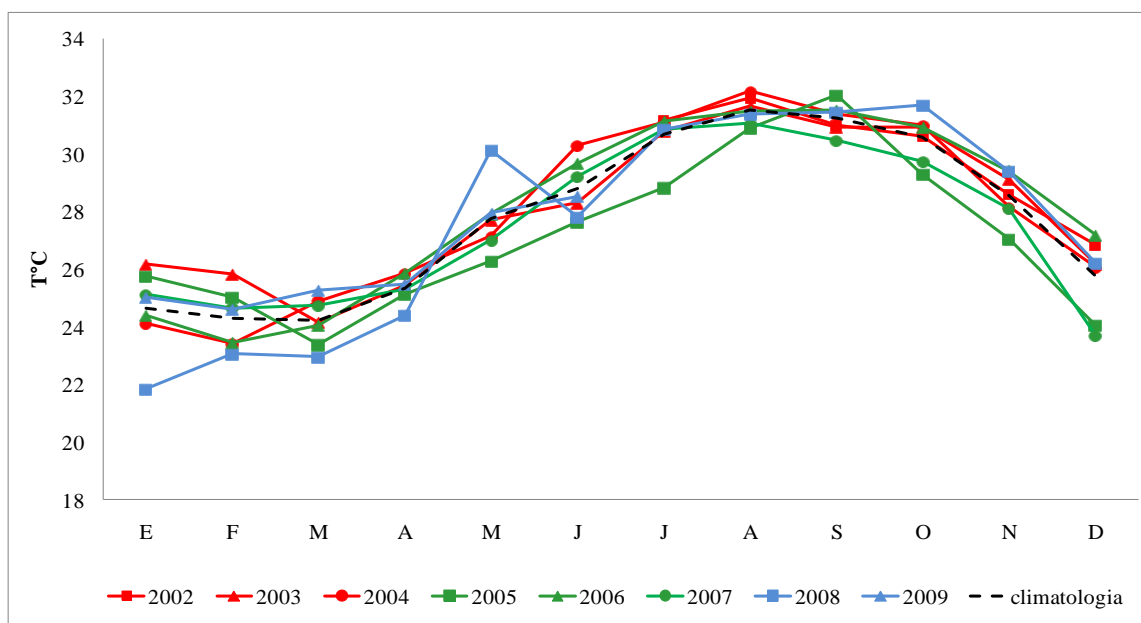


Figura 12. Temperatura media mensual en Isla Isabel durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Latitud N 21.87, Longitud W -105.88. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

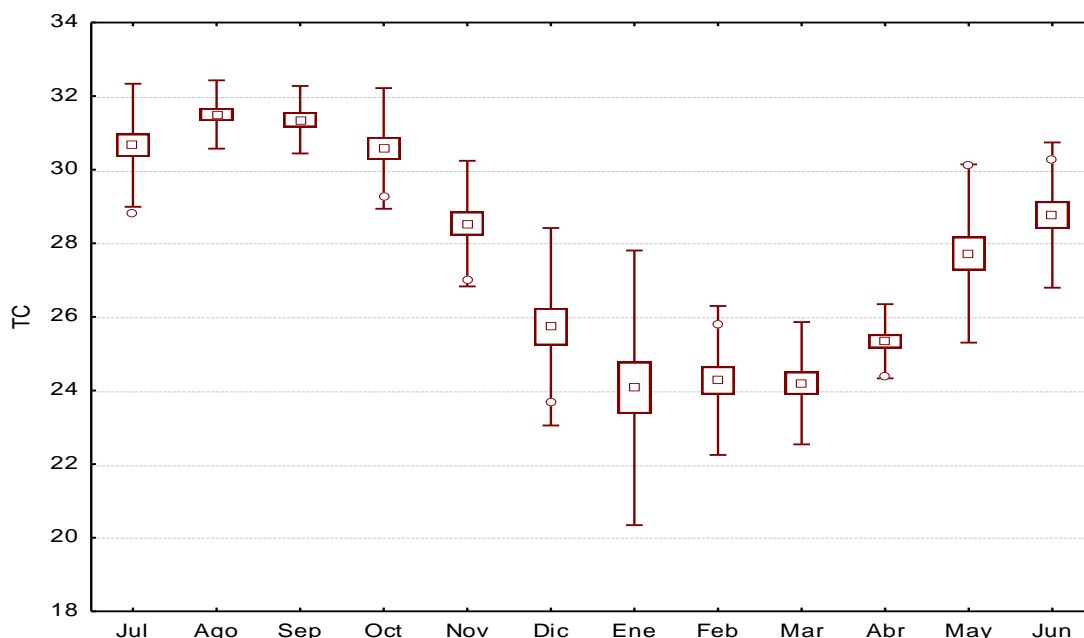


Figura 13. Temperatura media mensual, en Isla Isabel durante el período julio 2002 – junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 21.87, Longitud W -105.88. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

Respecto a los datos de radiación fotosintéticamente activa (Figura 14), se observaron niveles similares de radiación en todos los años, en los meses de máximos, marzo a mayo con 57 a 58 Einstein/m²/día. El máximo se presenta en mayo 58 Einstein/m²/día, y a partir de junio se presenta oscilación de los niveles de radiación. El año 2008 presentó los valores más altos en febrero y marzo 46-52 Einstein/m²/día, sin embargo no es muy grande la diferencia con respecto a la media histórica.

El año 2004 presentó surgencias constantes durante enero – junio con 94 y 13 m³/seg/100 línea de costa respectivamente. Los meses de mayor actividad de surgencia en la región de Isla Isabel, se presentan desde agosto hasta octubre.

La temporada de surgencias en el año 2003, presentó los niveles más altos respecto a los demás años en septiembre, mes donde se muestran los valores más altos para este índice 160 m³/seg/100, dando pie a los altos valores que presentó el año 2004. Isla Isabel se observó como un lugar con anomalías negativas la mayor parte del año (Figura 16), excepto para el año 2004.

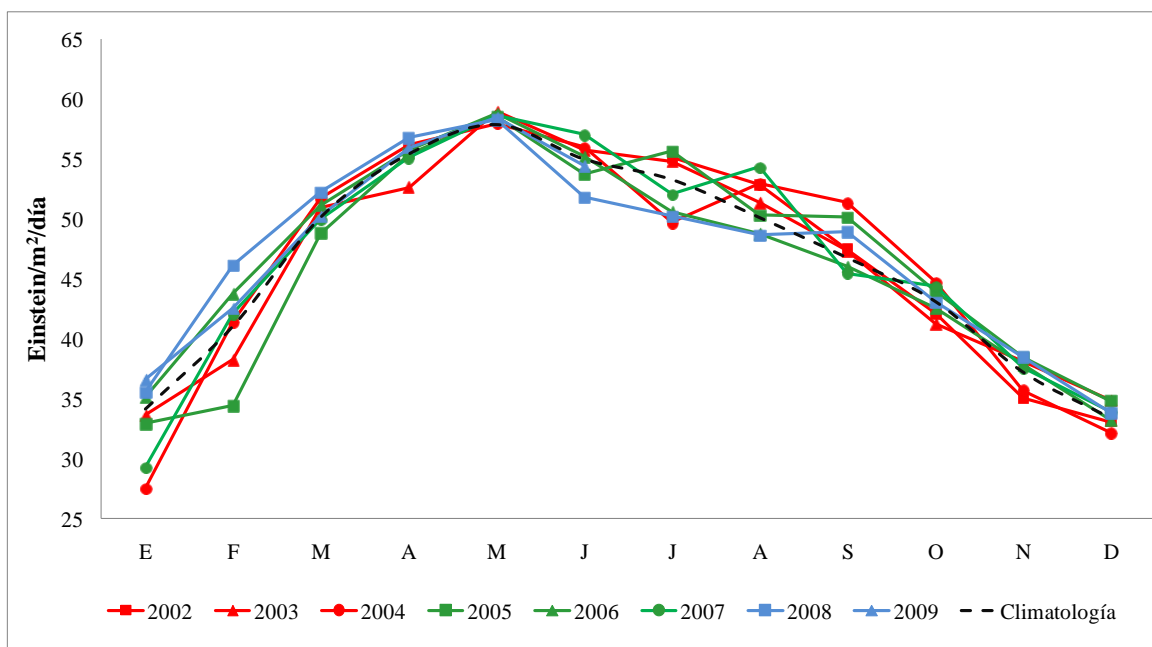


Figura 14. Luz fotosintéticamente activa (PAR) en durante el periodo julio 2002 – junio 2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

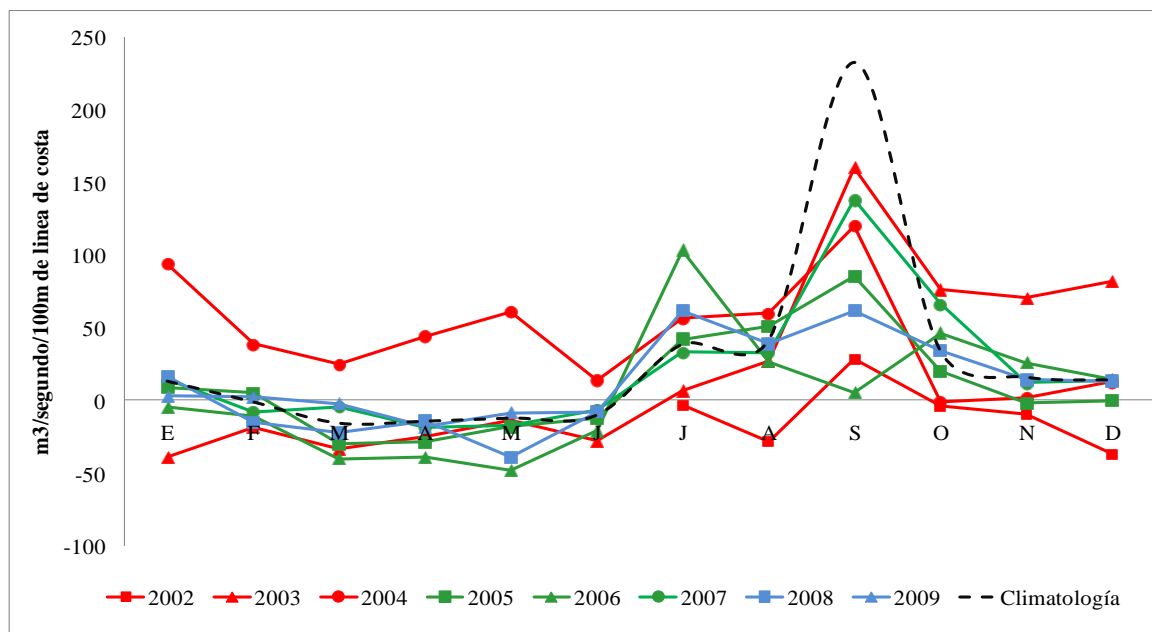


Figura 15. Índice de surgencia en Isla Isabel durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -107.5, Latitud 21.5N. Fuente: pfg.noaa.gov.

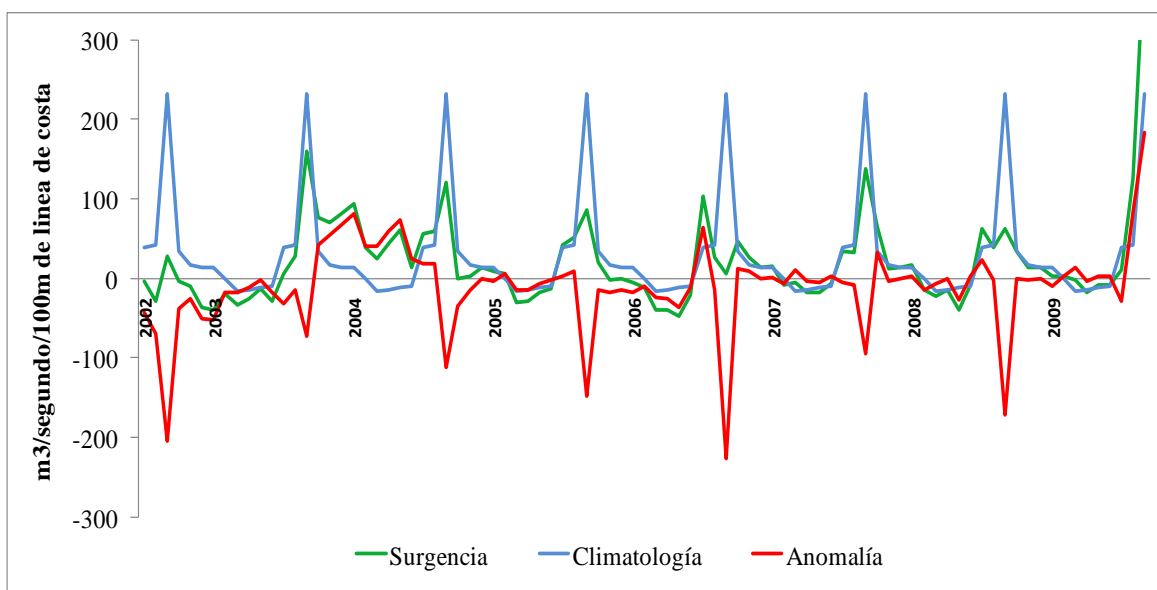


Figura 16. Índice de surgencia en Isla Isabel durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -107.5, Latitud 21.5N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

Los niveles de clorofila-a en Isla Isabel (Figura 17), se mostraron en concentraciones similares durante la primera mitad del año, prácticamente en todos los años con cantidades por debajo de los 2 mg/m^3 , con una temporada de máximos que comienza en julio y termina en octubre, apenas rebasando los 2 mg/m^3 . El año donde se observaron las mayores concentraciones de clorofila fue el 2008 (Figura 18), donde se registraron concentraciones de clorofila de más de 5 mg/m^3 .

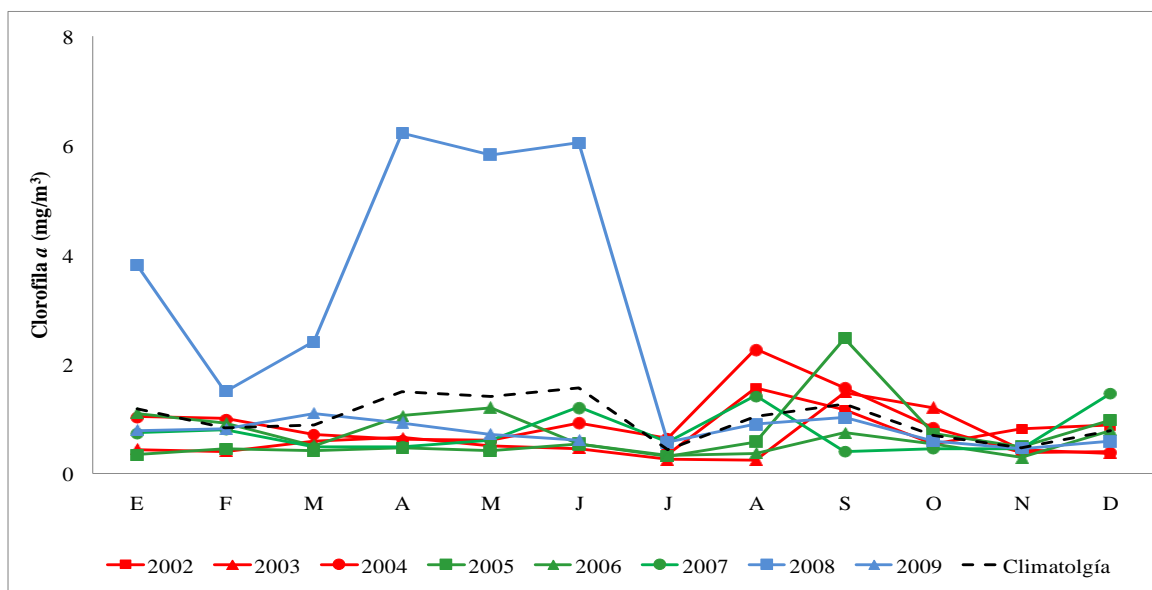


Figura 17. Concentración de clorofila en Isla Isabel para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

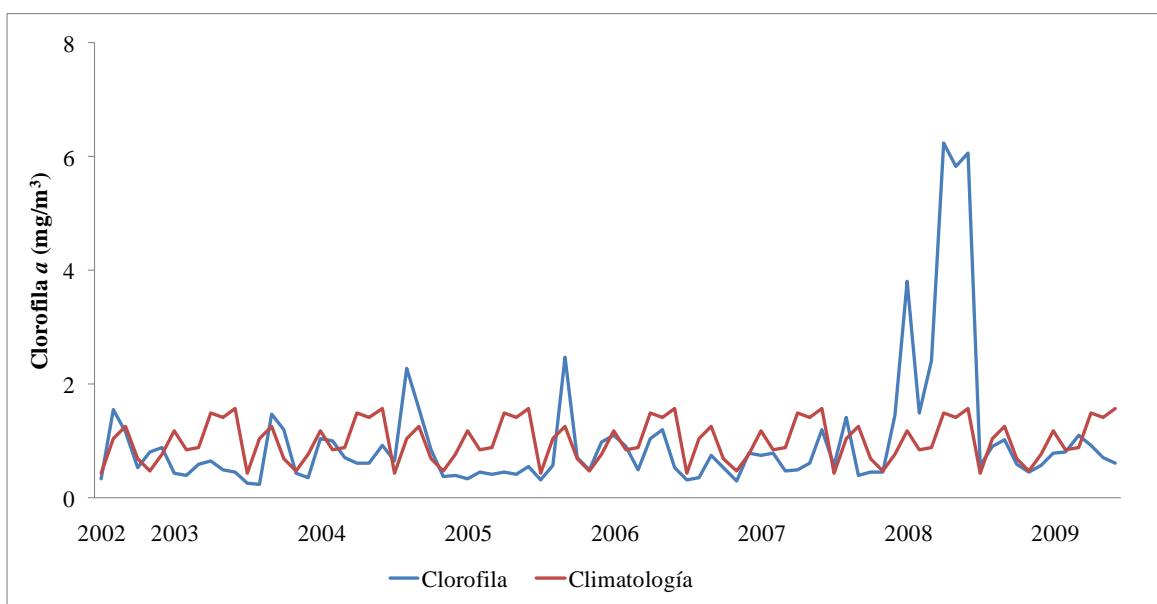


Figura 18. Concentración de clorofila y climatología en Isla Isabel para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.90, Longitud W -105.80, Latitud N 21.90 y Latitud N 21.80. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

III.1.3 Islas Marietas, Bahía de Banderas.

La temperatura de Islas Marietas (Figura 19) se mantiene constante casi todo el año. Presenta una variación entre sus valores máximos y mínimos de 2°C para un mismo de un mismo, en el conjunto de años. Las máximas temperaturas, 31°C, se presentan de julio a septiembre y la mínima en marzo, encontrándose que el 2008 presentó la temperatura más baja de la serie para esa temporada con 21°C. Los meses que presentaron mayor variación en los valores de temperatura son los que comprenden el invierno en la serie de datos y que van de octubre a febrero (Figura 20).

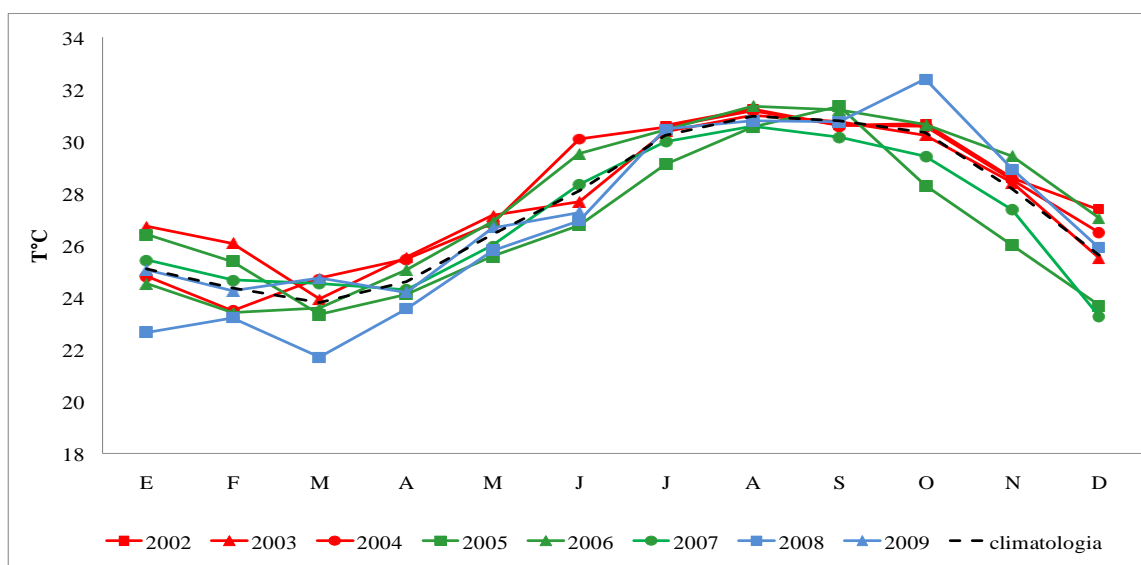


Figura 19. Temperatura media mensual en Islas Marietas durante el período julio 2002 – junio 2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Latitud N 20.65, Longitud W -105.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

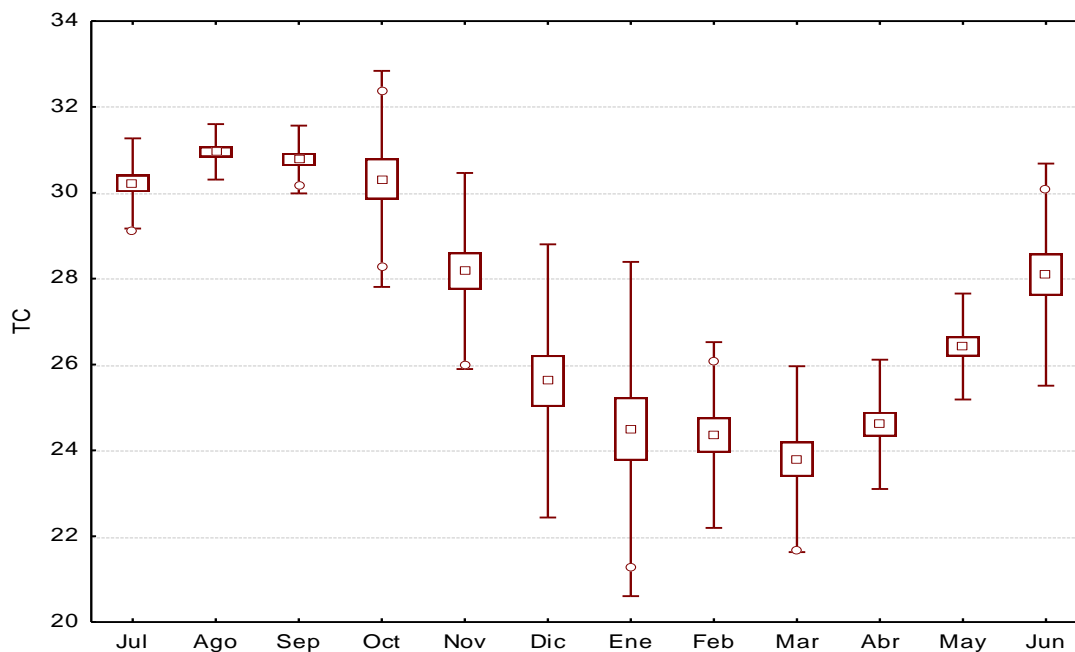


Figura 20. Temperatura media mensual en Islas Marietas durante el período julio 2002 – junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 20.65, Longitud W -105.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

La radiación fotosintéticamente activa en la Bahía de Banderas se presentó con sus máximos valores en el mes de mayo, con 57.34 Einstein/m²/día (Figura 21), con respecto a los demás años considerados para el análisis.

En todos los años se observó oscilación en los niveles de PAR en los meses de mayo a septiembre.

La figura 22 nos muestra los resultados para el índice de surgencia. En 2003 se observó una gran cantidad de agua 468 m³/seg/100m de línea de costa, ascendiendo a la superficie en los meses de enero a julio. En los mismos meses pero del año 2004, se presentaron valores negativos, -316 m³/seg/100m de línea de costa. La estacionalidad es levemente marcada por dos temporadas, en las que el periodo enero-agosto se muestran cómo meses de relativamente poca actividad en las masas de agua, ya sea positiva o negativamente, es decir, surgencia o hundimiento (Figura, 23).

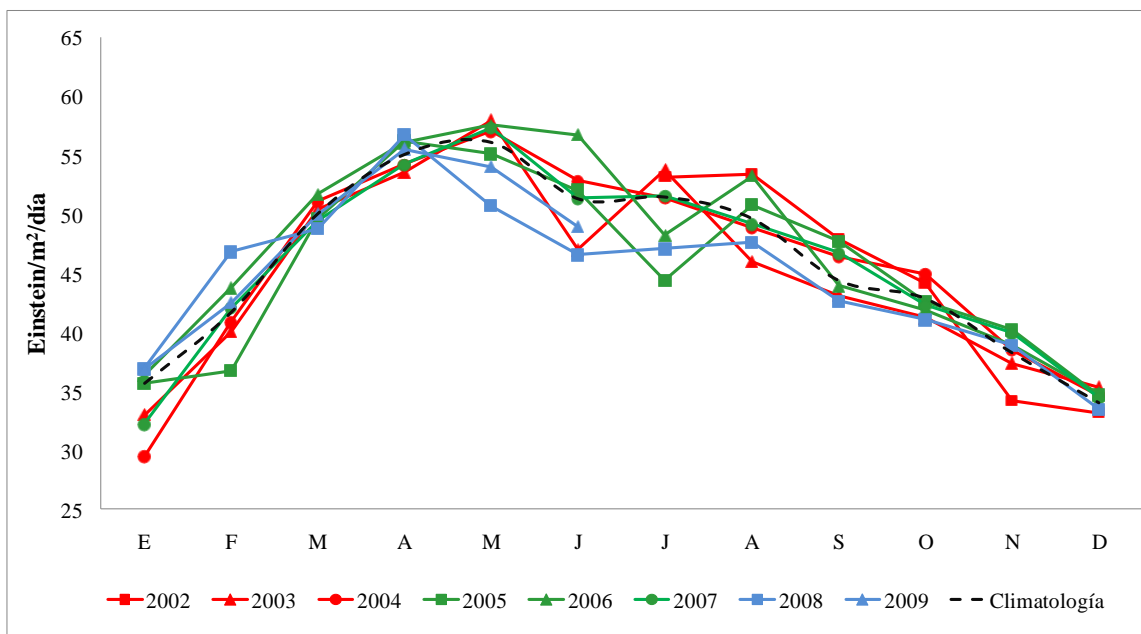


Figura 21. Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Islas Marietas durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

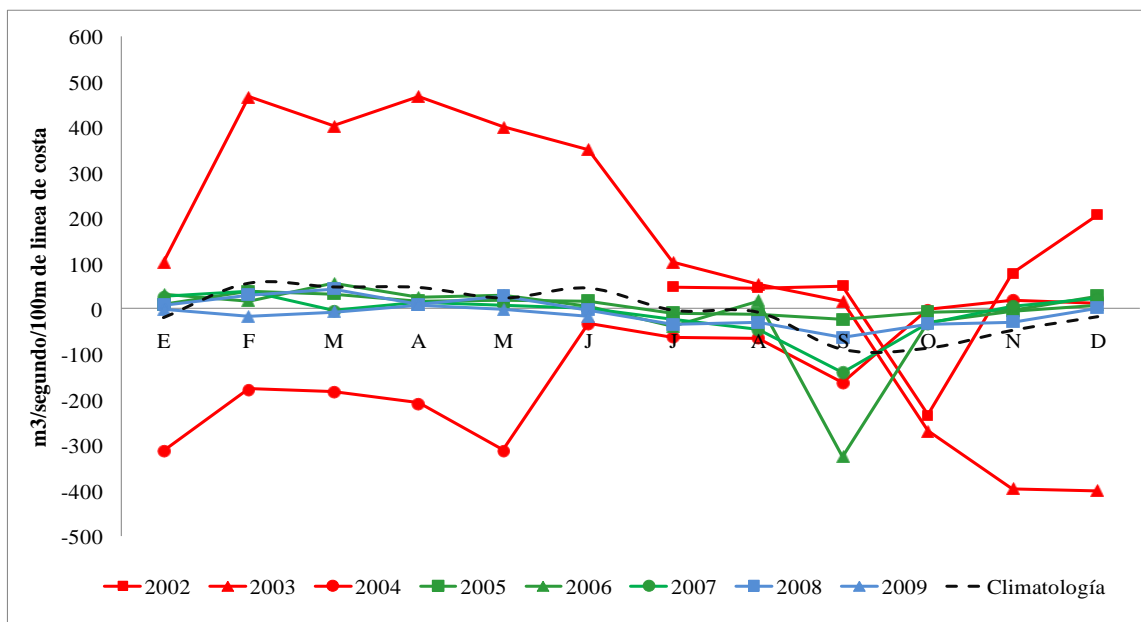


Figura 22. Índice de surgencia en Islas Marietas durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -105.5, Latitud 20.5 N. Fuente: pfeeg.noaa.gov.

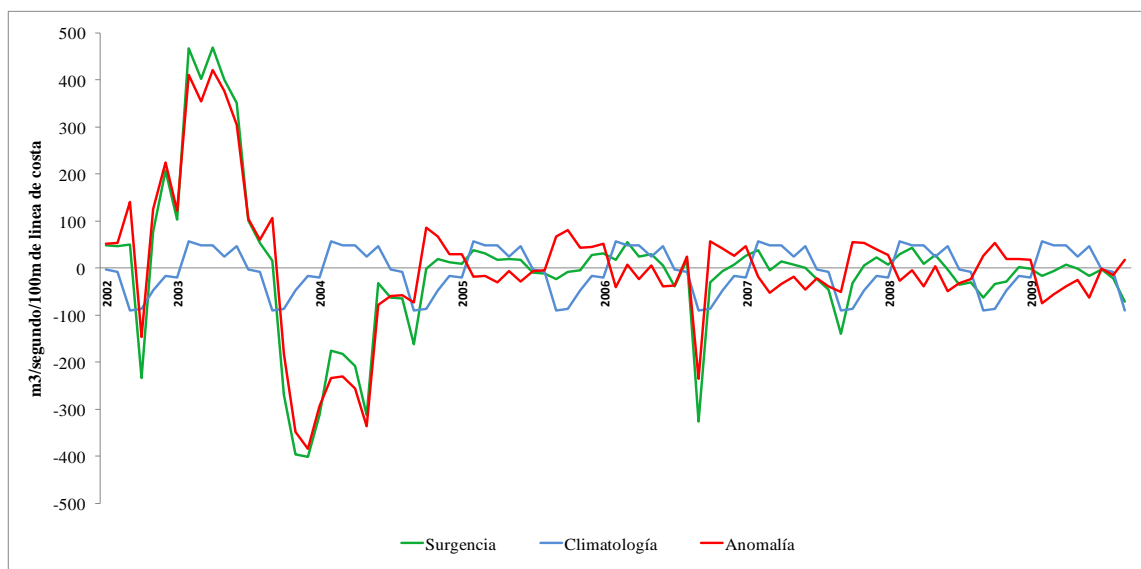


Figura 23. Índice de surgencia en Islas Marietas durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -105.5, Latitud 20.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

Los niveles de clorofila (Figura 24) comienzan a incrementarse en el mes de noviembre hasta alcanzar sus niveles más altos en los meses de abril y mayo con 14.5 mg/m^3 aproximadamente. El periodo de altas concentraciones de clorofila abarca gran parte del año, la climatología nos dice que dichas concentraciones en la bahía se encuentran alrededor de los 6 mg/m^3 , llegando a las máximas concentraciones en los primeros meses del año siguiente (Figura 25).

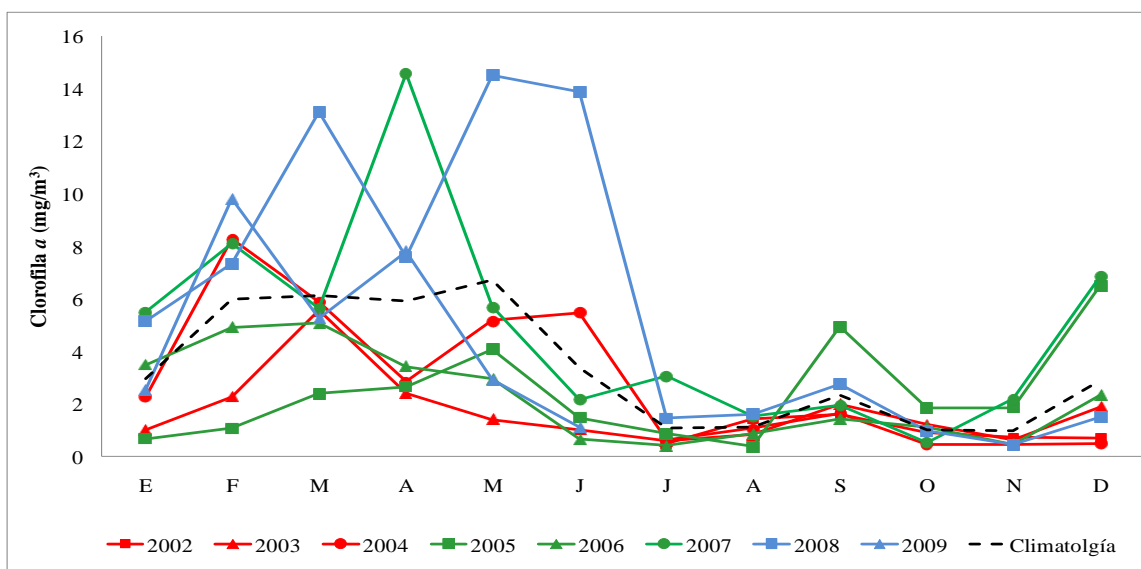


Figura 24. Concentración de clorofila en Islas Marietas para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov

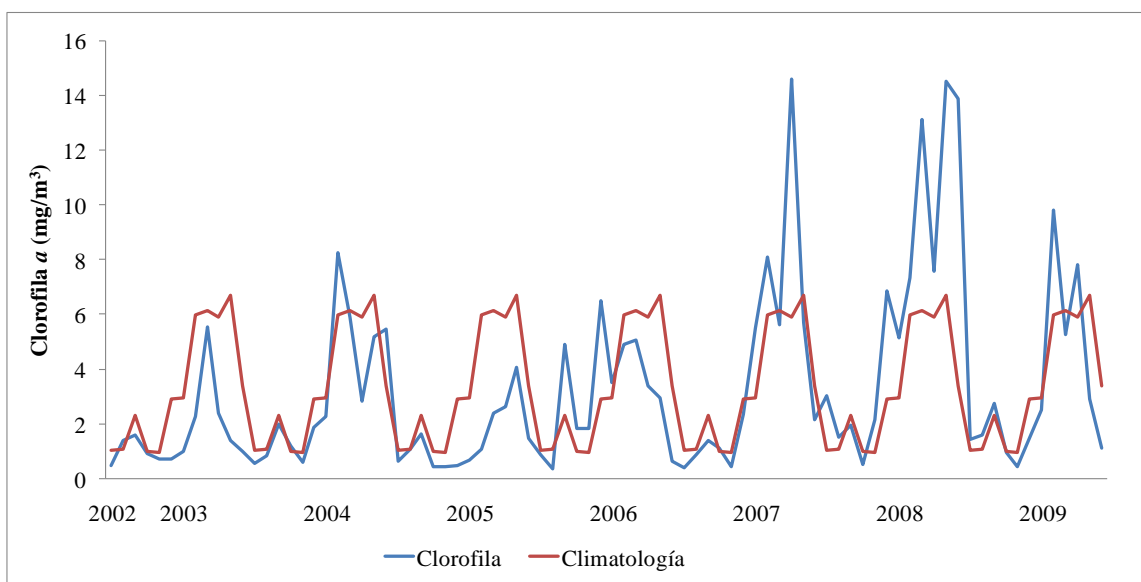


Figura 25. Concentración de clorofila y climatología en Islas Marietas para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -105.80, Longitud W -105.30, Latitud N 20.80 y Latitud N 20.40. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov

III.1.4 Ixtapa Zihuatanejo.

Las temperaturas más bajas se presentaron en el mes de marzo de los años 2005 y 2008 (Figura 26), con 25.3 y 25.6°C respectivamente. Los datos de temperatura media mensual de Ixtapa (Figura 27), nos dicen que la temporada más fría en la región se presenta entre los meses de febrero-abril (25°C). Por su parte, las temperaturas más altas se presentan en agosto (31°C), sin presentarse una notable diferencia con respecto de la media histórica.

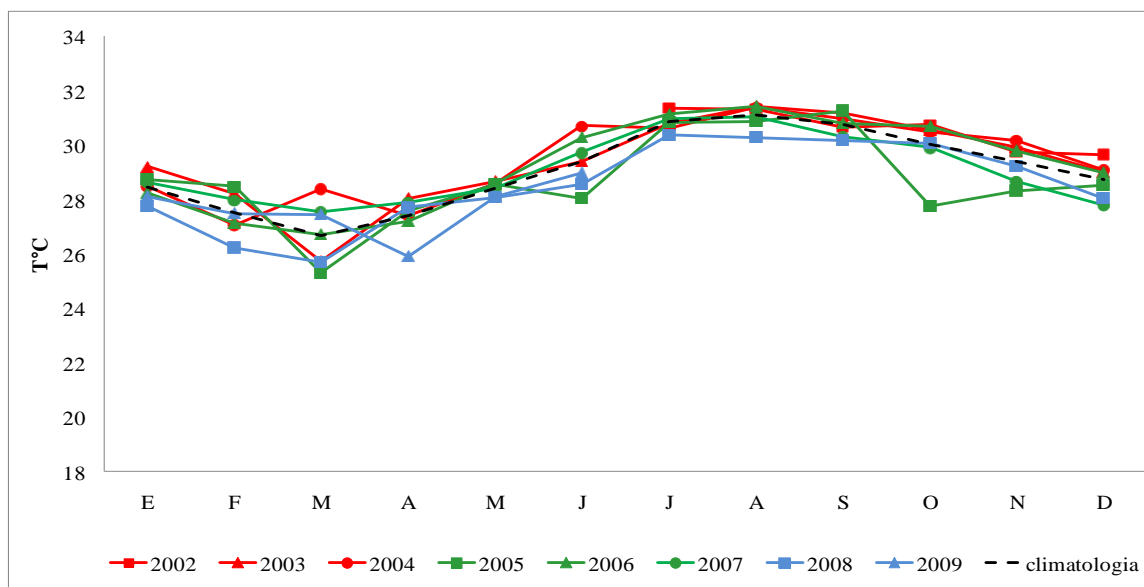


Figura 26. Temperatura media mensual en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – junio 2009. La climatología se refiere a la media mensual del período considerado. Datos de satélite interpolados a Latitud N 17.63, Longitud W -101.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

Los niveles de PAR en la región se comportan muy cercanos a la media climática casi en todos los años (Figura 28), en un periodo que va de enero a mayo, llegando a su máximo en abril (56.87 Einstein/m²/día). Observamos gran oscilación de los valores de PAR entre los años analizados, a partir del mes de junio a octubre, pues no se observa una tendencia, apegada a la media histórica o climatología.

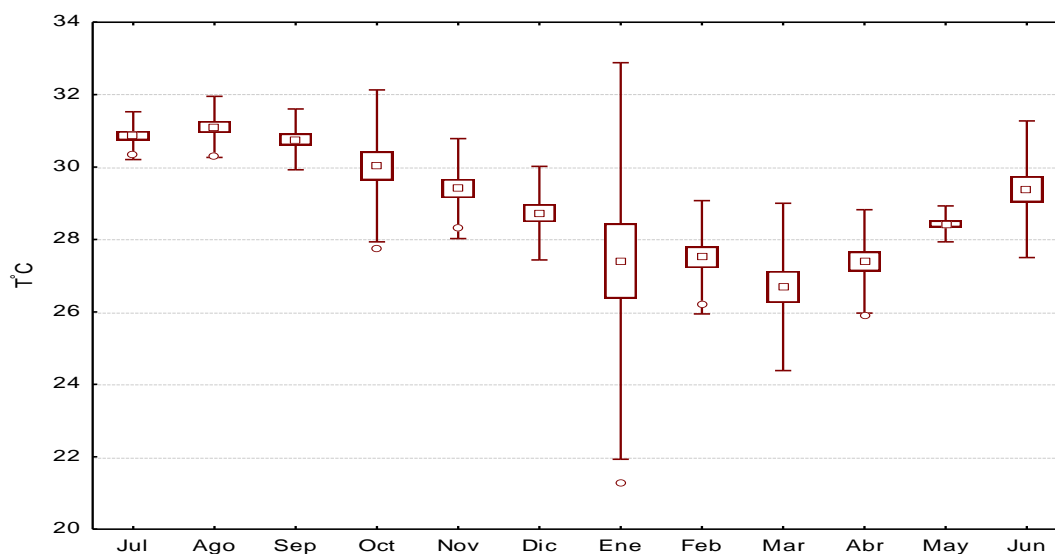


Figura 27. Temperatura media mensual en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 17.63, Longitud W -101.54. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

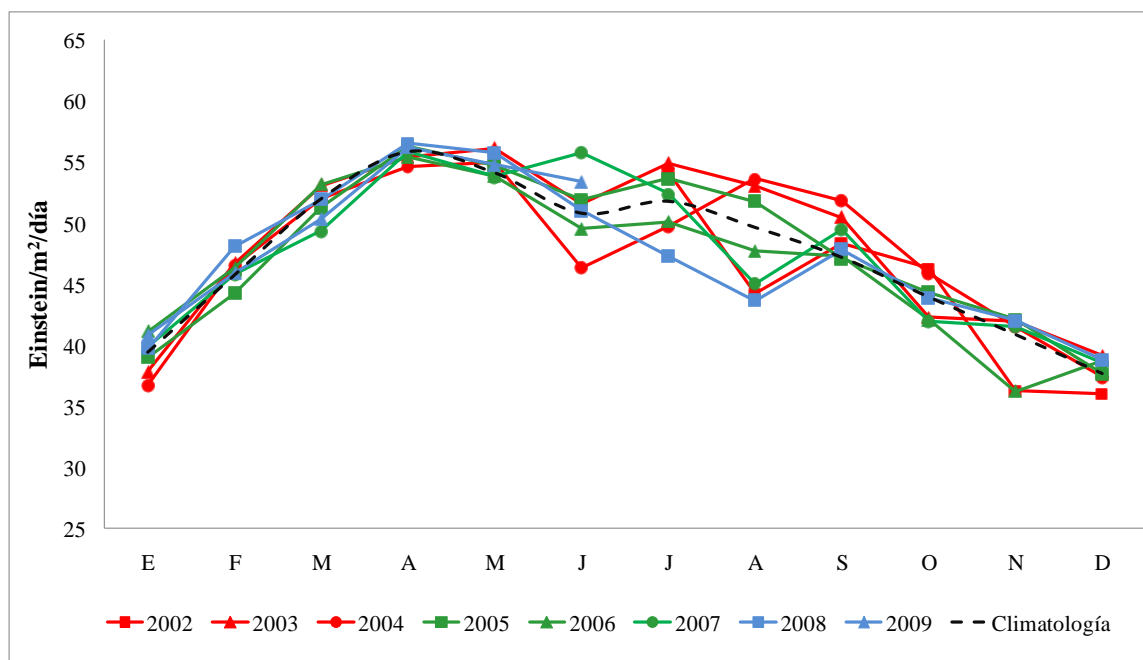


Figura 28. Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Ixtapa Zihuatanejo durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

El índice de surgencia en Ixtapa (Figura 29), mostró un comportamiento cercano a la media climática en los meses de enero a abril y con una mayor variación de marzo a noviembre, siendo este periodo el que presentó en su mayoría un transporte de las masas de agua hacia la costa ($\sim 145 \text{ m}^3/\text{seg}/100$ metros de línea de costa). El mes de octubre se muestra como mes de surgencias, lo que hace pensar que en septiembre y octubre predominan los vientos que van de norte a sur. Los años con surgencias de mayor intensidad fueron 2005 y 2006 (Figura 30) ($\sim 90 \text{ m}^3/\text{seg}/100$ metros de línea de costa).

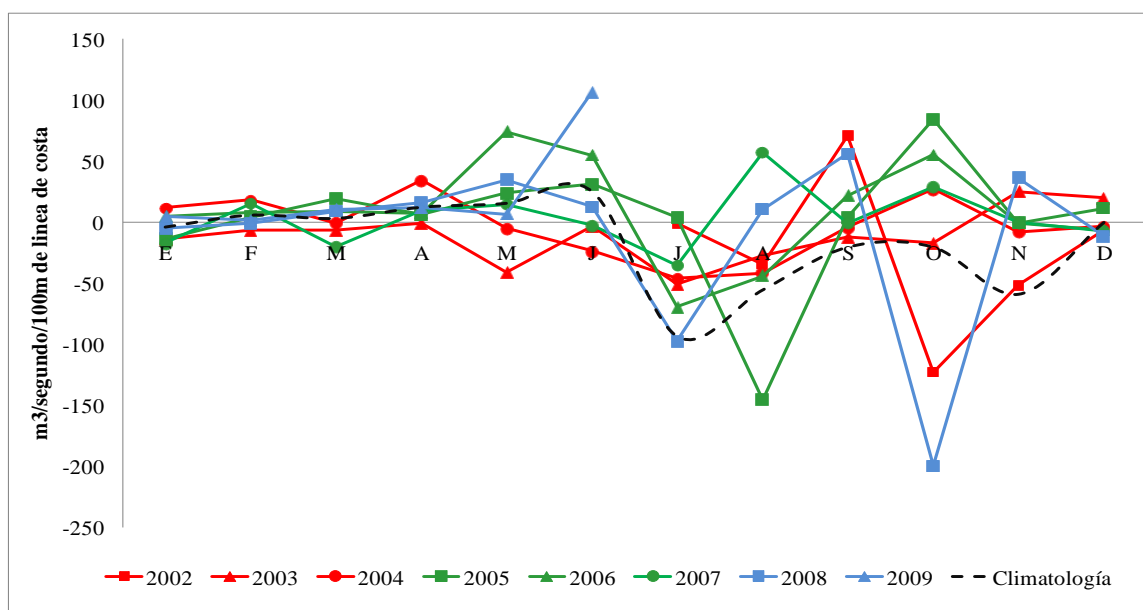


Figura 29. Índice de surgencia en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -102.5, Latitud 14.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

Respecto a las concentraciones de clorofila en Ixtapa (Figura 31), se observó que las máximas concentraciones ($4 \text{ mg}/\text{m}^3$) se dan en los meses de marzo y abril prácticamente en todos los años. La temporada de bajas concentraciones ($0.28 \text{ mg}/\text{m}^3$) se presenta desde junio hasta septiembre. La figura 32 nos muestra la oscilación en la concentración de clorofila en los años considerados en este estudio, que se encontró en los $3 \text{ mg}/\text{m}^3$ aproximadamente. Se muestra al 2008 como el año con los niveles más altos del pigmento, respecto a la media histórica.

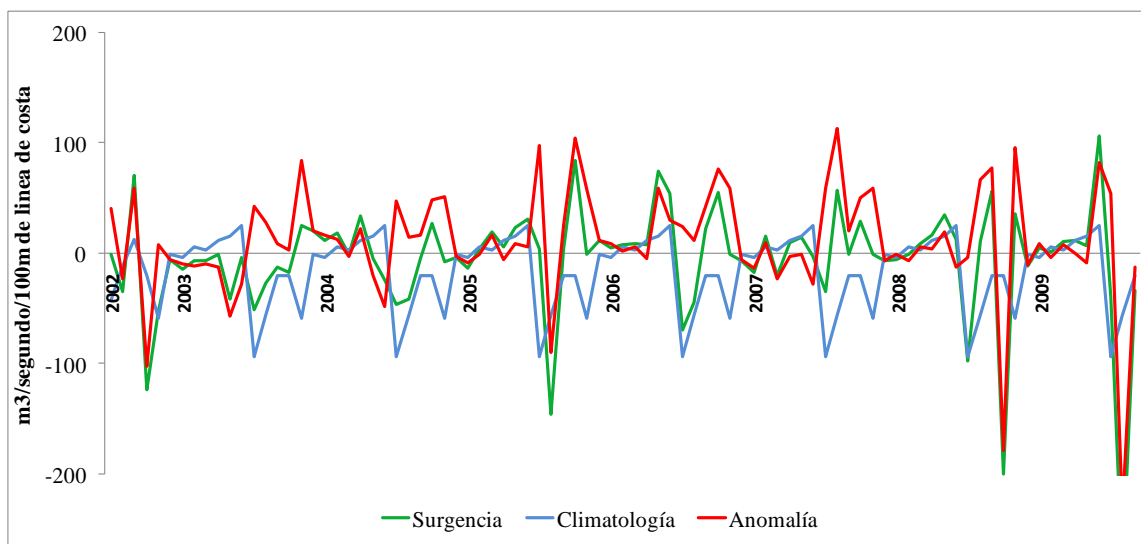


Figura 30. Índice de surgencia en Ixtapa Zihuatanejo durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -102.5, Latitud 14.5 N. Fuente: pfcg.noaa.gov.

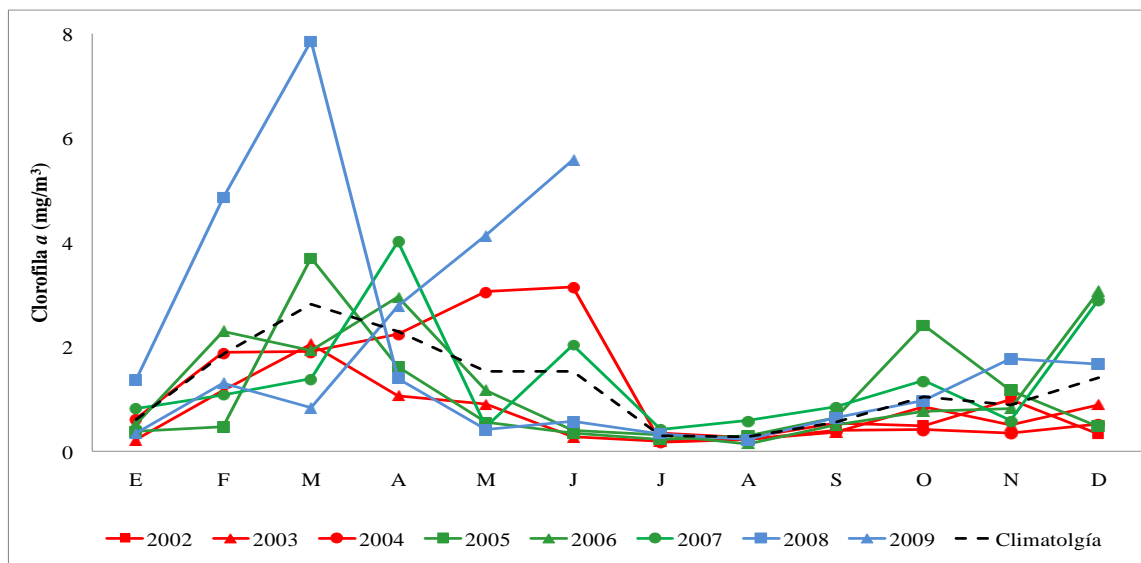


Figura 31. Concentración de clorofila en Ixtapa Zihuatanejo para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

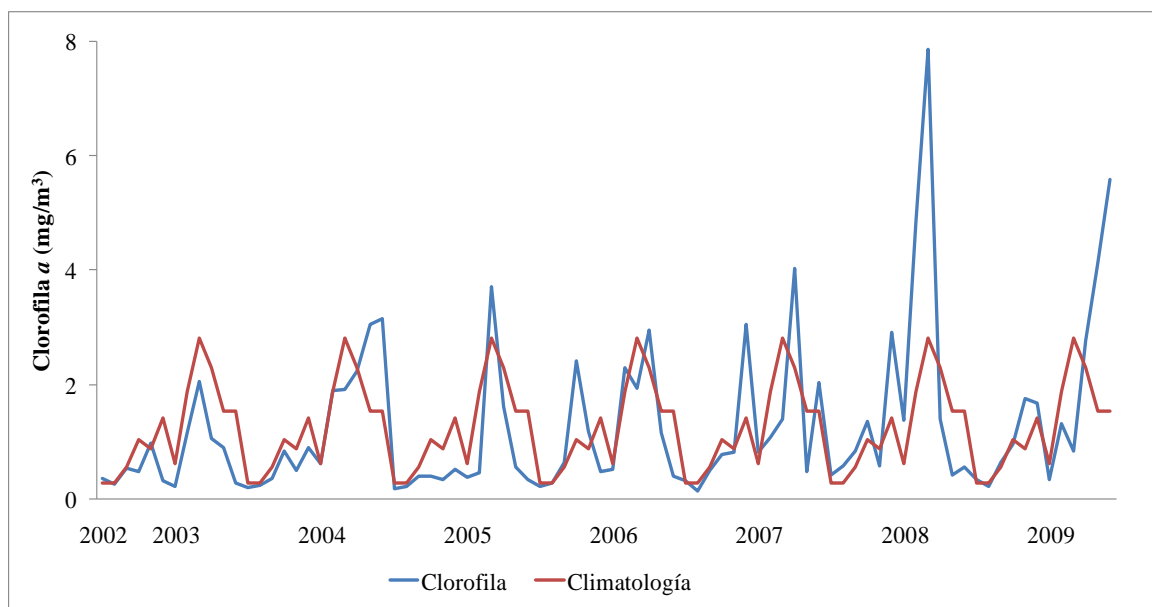


Figura 32. Concentración de clorofila y climatología en Ixtapa Zihuatanejo para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -101.80, Longitud W -101.54, Latitud N 17.70 y Latitud N 17.50. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

III.1.5 Bahías de Huatulco

La temperatura en Huatulco mostró una variación de alrededor de 2°C prácticamente todo el año (Figura 33). Los meses de máximas y mínimas temperaturas son enero y agosto, con 26 y 31°C respectivamente.

El mes que presentó mayor variación en sus datos de temperatura fue enero (Figura 34), posiblemente indicando que todos los años analizados han sido diferentes entre sí en este mes en particular, con un intervalo de temperaturas que va desde los 22°C hasta 33°C aproximadamente.

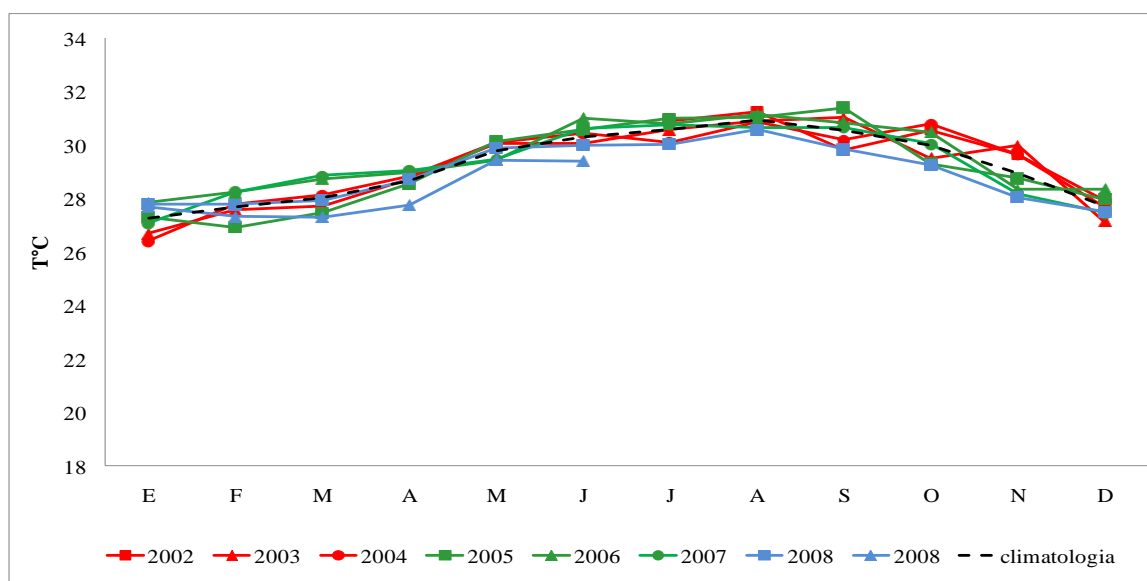


Figura 33. Temperatura media mensual en Bahías de Huatulco durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Latitud N 15.54, Longitud W -96.45. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

Los resultados obtenidos referentes a PAR (Figura 35), se caracterizan en este análisis por un comportamiento poco oscilatorio respecto a la climatología, en los primeros meses de los años analizados (enero-abril). Se alcanzan los máximos valores de radiación en el mes de abril (56 Enisteins/m²/día) y los mínimos valores en diciembre-enero (~36 Enisteins/m²/día). La figura 35 nos muestra una oscilación con tendencia a disminuir y a oscilar a partir del mes de abril y hasta enero.

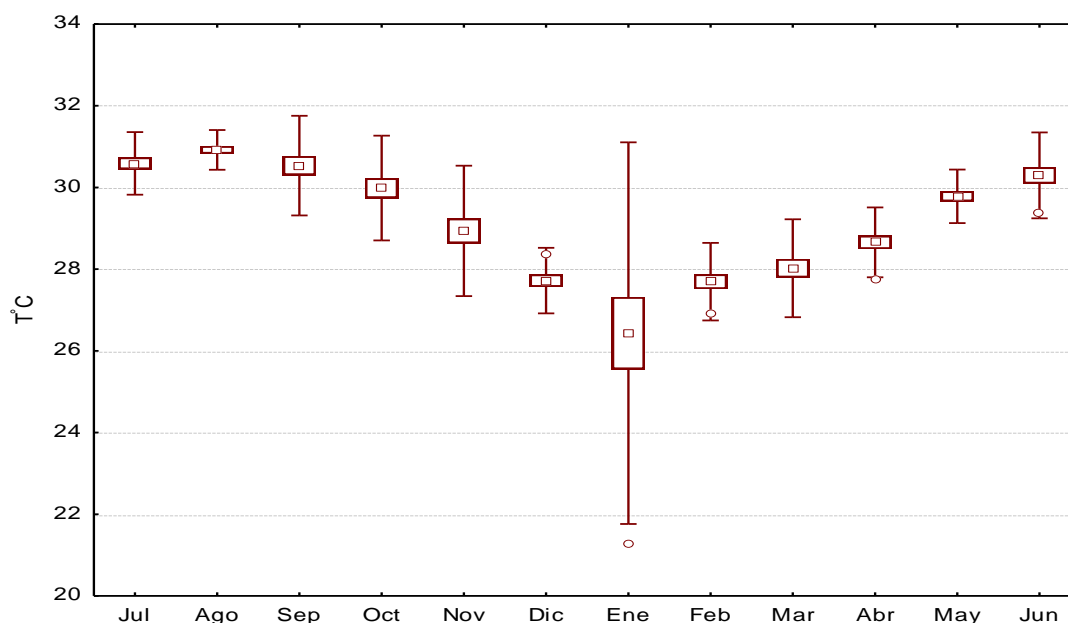


Figura 34. Temperatura media mensual en Bahías de Huatulco durante el período julio 2002 – junio 2009. Las cajas comprenden el error estándar, el punto medio la media de los datos y el valor de los bigotes la desviación estándar. Datos de satélite interpolados a Latitud N 15.54, Longitud W -96.45. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

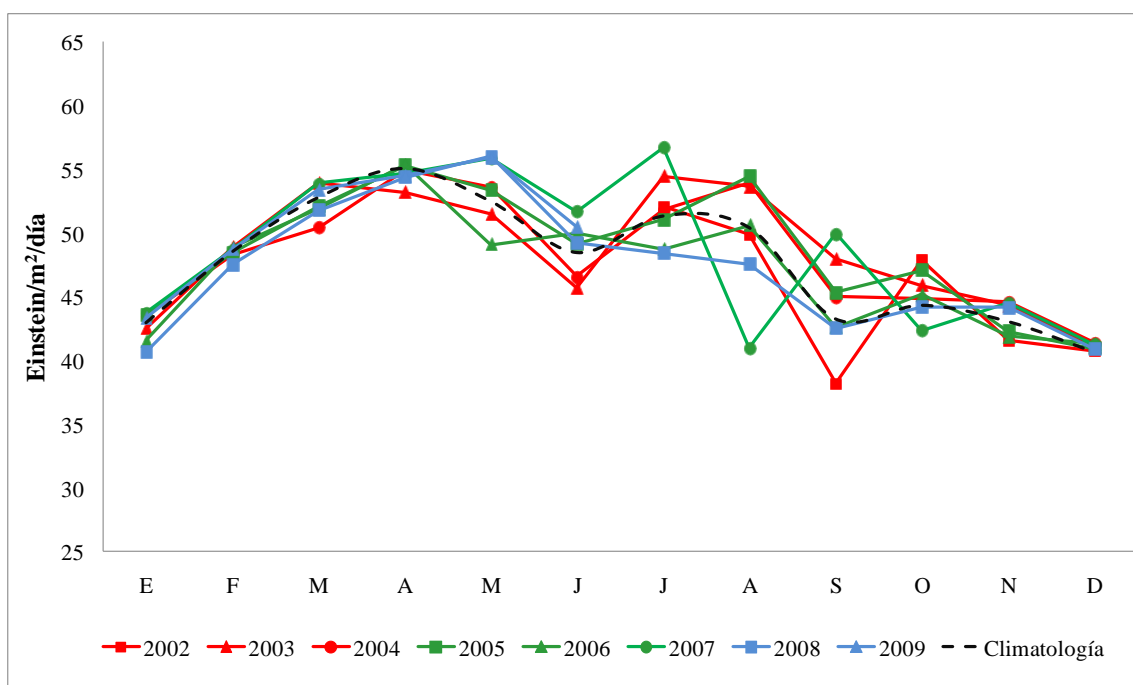


Figura 35. Luz fotosintéticamente activa (PAR) en Bahías de Huatulco durante el periodo julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96.10, Longitud W -96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov

El índice de surgencia en Huatulco (Figura 36), presentó valores positivos a partir del mes de junio y hasta octubre, alcanzando máximos de $\sim 100 \text{ m}^3/\text{seg}/100$ metros de línea de costa. A partir de noviembre los valores se muestran negativos hasta marzo, con valores de $\sim -170 \text{ m}^3/\text{seg}/100$ metros de línea de costa. En los años 2005 y 2006 se presentaron los meses con las surgencias más intensas en la zona (Figura 37), con 153 y $100 \text{ m}^3/\text{seg}/100$ metros de línea de costa.

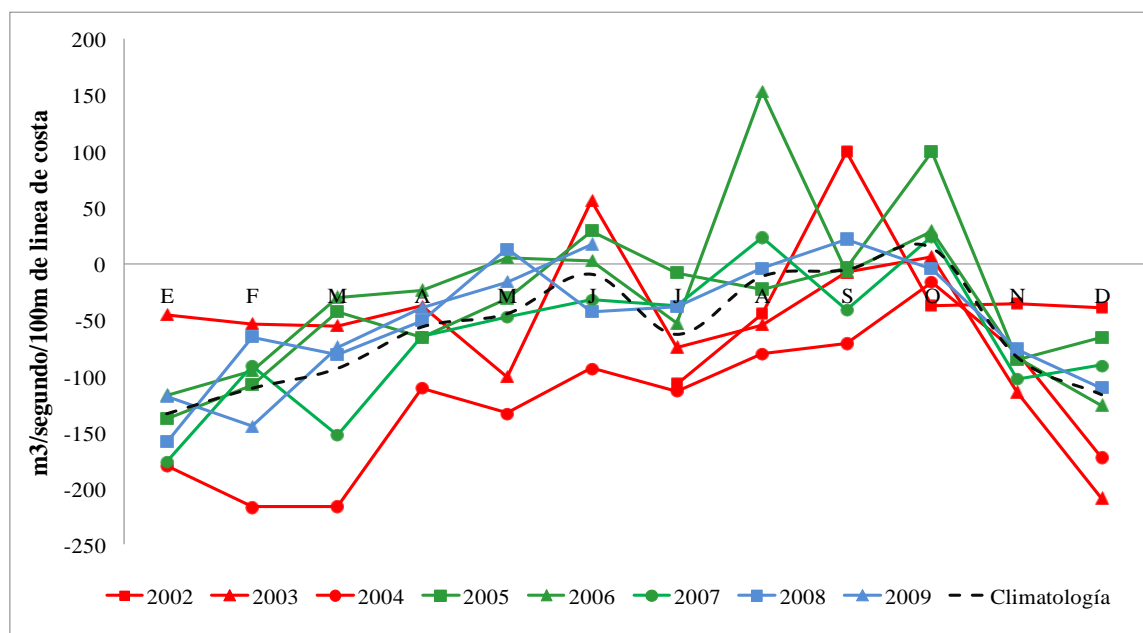


Figura 36. Índice de surgencia en Bahías de Huatulco durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -97.5, Latitud 13.5 N. Fuente: pfgg.noaa.gov.

Los datos de clorofila para Huatulco (Figura 38), reflejan que las máximas concentraciones se presentan en los meses de diciembre-enero ($\sim 4 \text{ mg}/\text{m}^3$). Comienza a incrementarse en septiembre para tener un máximo en diciembre y otro segundo pico en febrero, los cuales rondan los $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, según los valores de la media histórica. Por su parte, las concentraciones más bajas se observaron en los meses de junio a septiembre ($\sim 0.17 \text{ mg}/\text{m}^3$). Los años que presentaron mayores concentraciones de clorofila (Figura 39) fueron 2003, 2007, 2008 y 2009, en los que observó clorofila por arriba de los $4 \text{ mg}/\text{m}^3$.

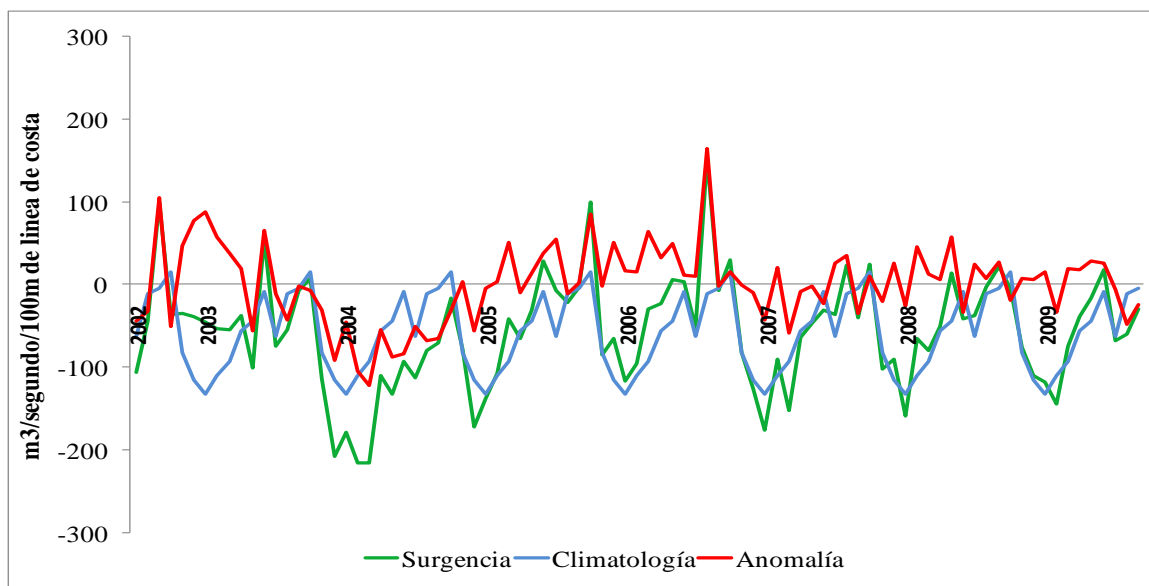


Figura 37. Índice de surgencia en Bahías de Huatulco durante el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados de Longitud W -97.5, Latitud 13.5 N. Fuente: pfeg.noaa.gov.

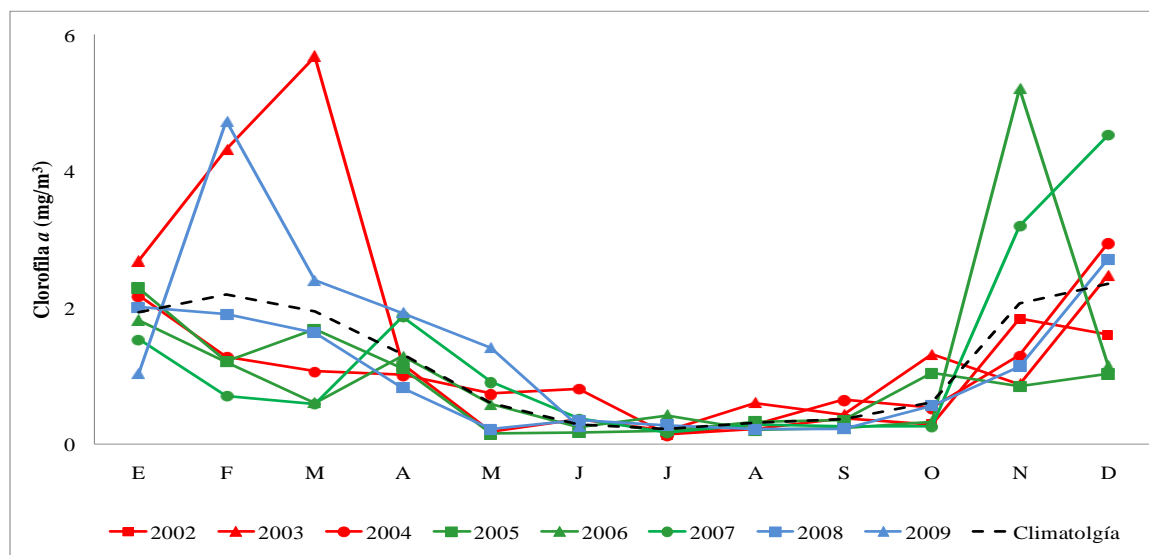


Figura 38. Concentración de clorofila en Bahías de Huatulco para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96-10, Longitud W -96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

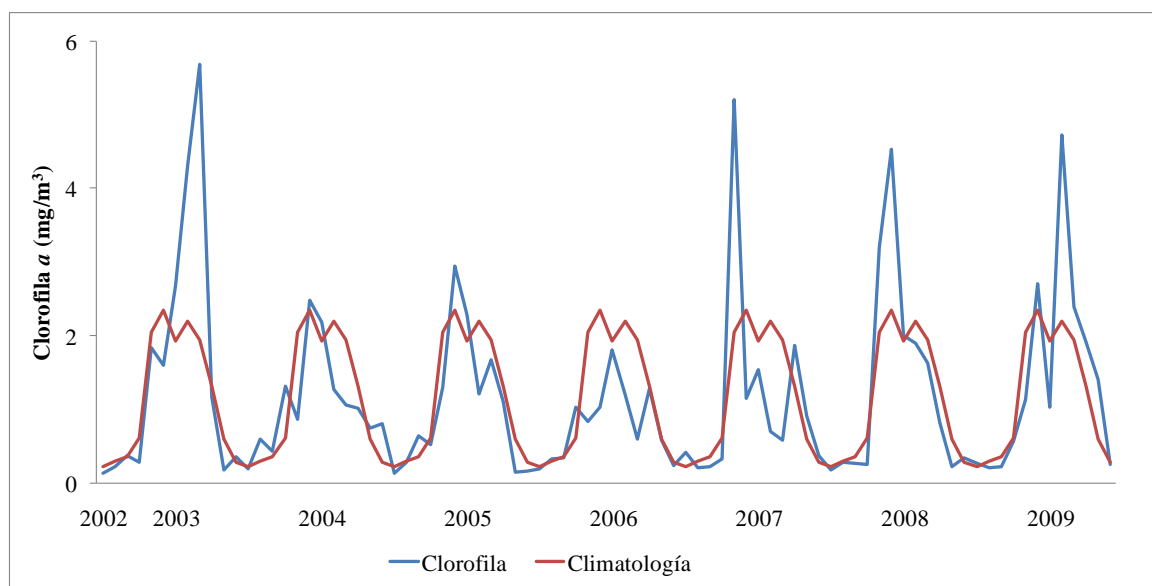


Figura 39. Concentración de clorofila y climatología en Bahías de Huatulco para el período julio 2002 – junio 2009. Datos de satélite interpolados a Longitud W -96-10, Longitud W - 96.25, Latitud N 15.70 y Latitud N 15.60. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

III.3 Análisis comparativo de las variables estudiadas.

En la figura 40 se muestran los datos de temperatura en cada uno de los sitios analizados. El intervalo de variación en Cabo Pulmo es de 11.6°C, por su parte, en Bahías de Huatulco se presenta un intervalo de 4.5°C.

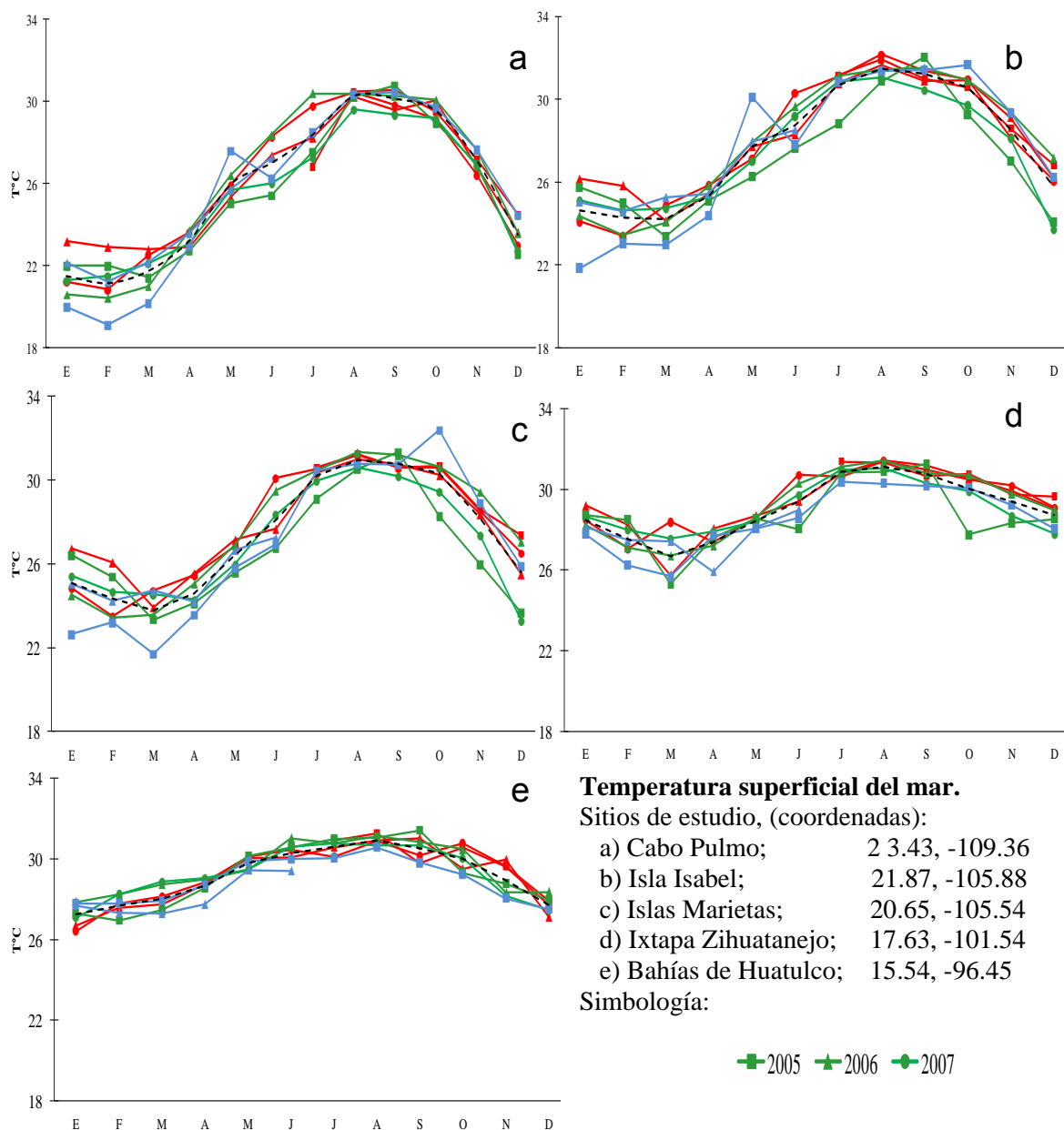


Figura 40. Temperatura media mensual, para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos satelitales del periodo julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

Los datos de PAR (Figura 41), muestran poca variación en Cabo Pulmo, durante todo el año. Los máximos de radiación en Huatulco se presentan aproximadamente dos meses antes que en Cabo Pulmo (marzo y abril respectivamente).

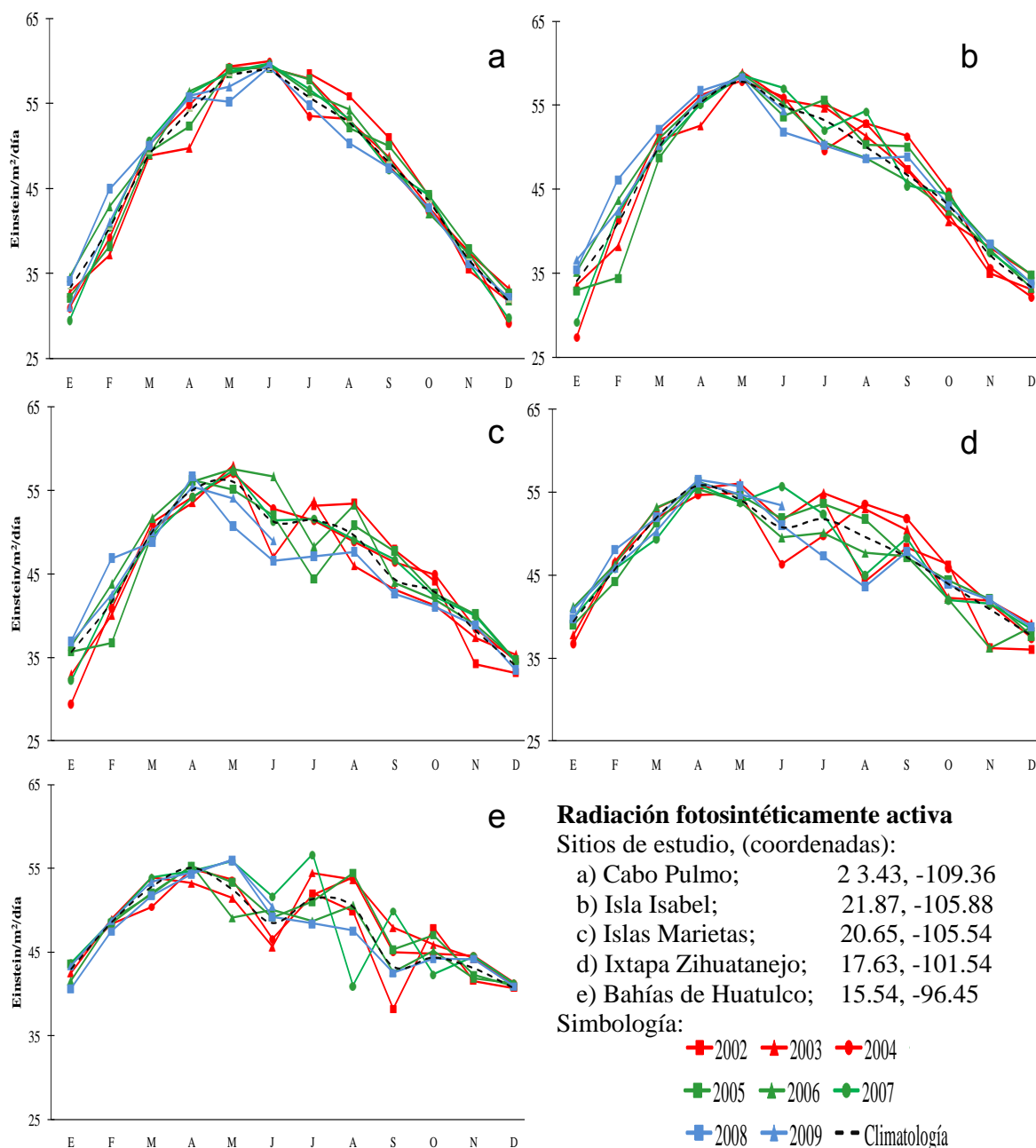


Figura 41. Radiación fotosintéticamente activa PAR, para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

En la figura 42 se muestran los datos del índice de surgencia, que muestran un comportamiento estacional en el Pacífico mexicano, en donde los meses de agosto a noviembre se observan como el periodo de actividad de surgencias.

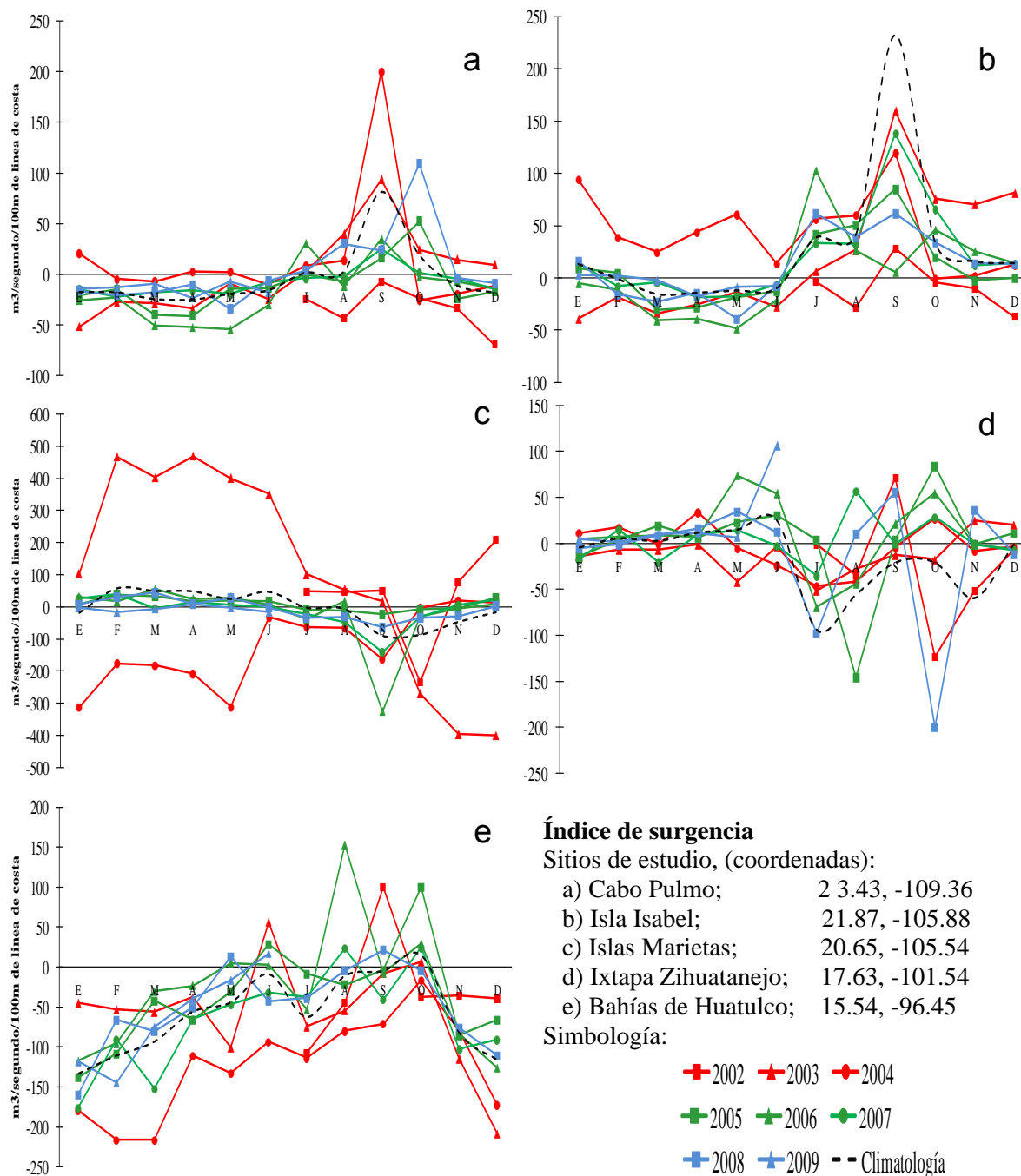


Figura 42. Índice de surgencia para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del periodo julio 2002 – junio 2009. Fuente: pfeq.noaa.gov.

En los datos de clorofila (Figura 43) se observó a Islas Marietas (Bahía de Banderas) como el sitio con mayores concentraciones de clorofila en la mayoría de los años considerados.

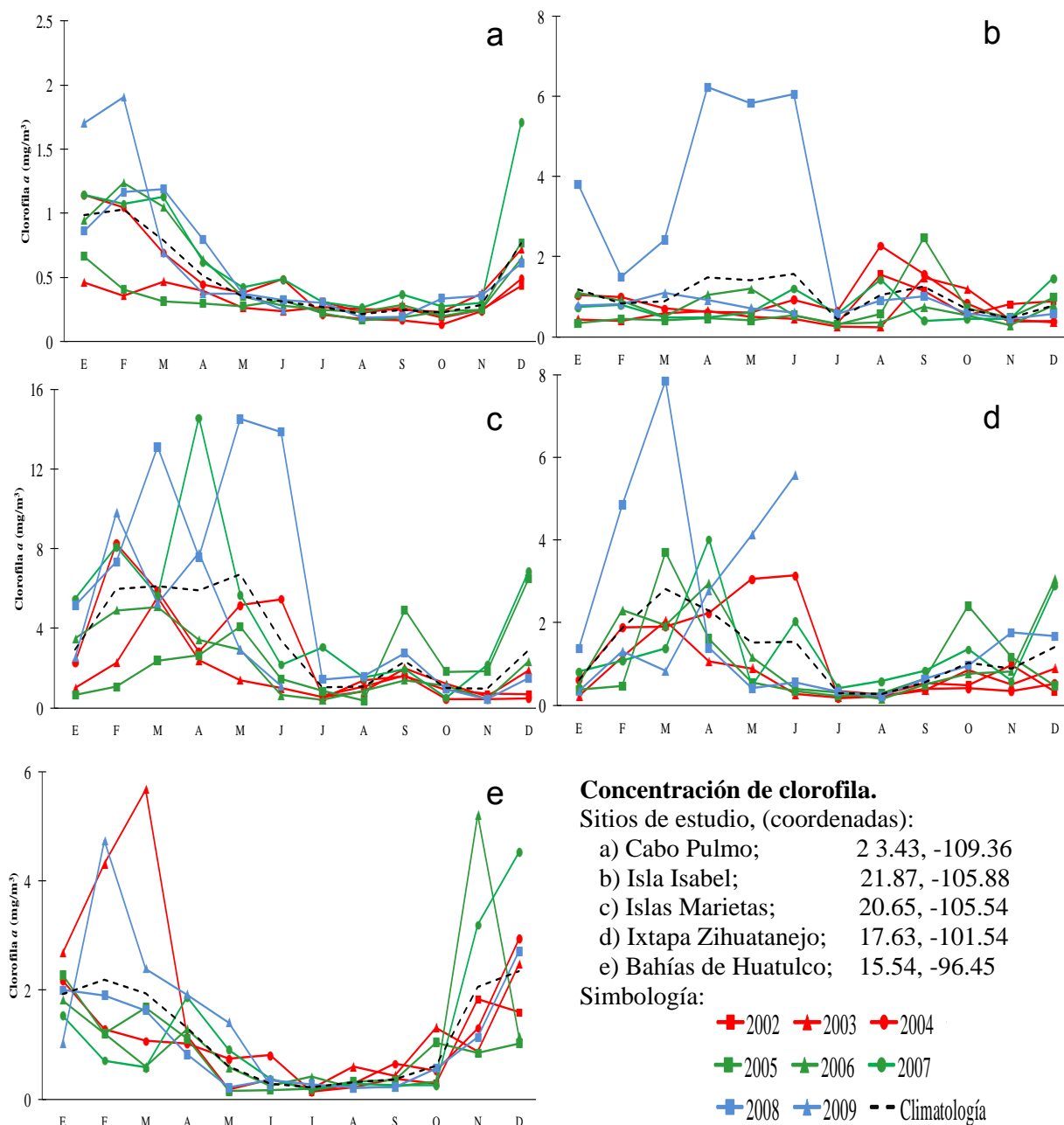


Figura 43. Concentración de clorofila para los cinco sitios de estudio (Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Huatulco). Datos del período julio 2002 – junio 2009. Fuente: oceancolor.gsfc.nasa.gov.

IV. DISCUSIÓN

Los corales hermatípicos son organismos muy sensibles a las condiciones ambientales. Por tanto su distribución está limitada por la temperatura, transparencia y alcalinidad del agua, disponibilidad del sustrato, entre otros factores. Ante un escenario de cambio climático (CC), en el que se prevén mayores temperaturas y un incremento en la presión parcial del CO₂ (IPCC, 2007) resulta relevante evaluar la vulnerabilidad de las comunidades coralinas, ya que son ecosistemas de gran importancia ecológica. Más aún, es necesario tomar medidas para su protección y conservación y jerarquizar la prioridad de atención en función de su vulnerabilidad.

El Pacífico mexicano (PM) puede considerarse un laboratorio natural para el estudio del efecto del cambio climático sobre comunidades coralinas, ya que las condiciones que aquí se encuentran son inhóspitas o poco adecuadas para su desarrollo: aguas más frías que en el Caribe, ricas en nutrientes por las surgencias que ocurren en sus costas, plataforma continental estrecha y, sobretodo, baja alcalinidad (Calderón-Aguilera, 2005; Calderon *et al.*, 2009).

La evaluación de la vulnerabilidad al CC de las comunidades coralinas del PM en este trabajo, se realizó con base en la temperatura superficial del mar (TSM), radiación fotosintéticamente activa (PAR), clorofila e índice de surgencia (IS). Se eligió el blanqueamiento como indicador de vulnerabilidad, por ser un fenómeno ampliamente reconocido y cuyo estudio ha cobrado fuerza en los últimos años.. En este trabajo se obtuvieron dichas variables oceanográficas para evaluar la vulnerabilidad al blanqueamiento en las localidades de Cabo Pulmo, Isla Isabel, Islas Marietas, Ixtapa y Bahías de Huatulco.

Temperatura.

La temperatura es una de las variables de mayor consideración como uno de los factores que intervienen en el proceso del blanqueamiento. De ahí que se considere a la temperatura y su intervalo de variación como el factor de más peso en el proceso que lleva al blanqueamiento del coral (Hoegh-Guldberg, 1999). Puesto que las temperaturas en las que se desarrollan los corales van de los 18 a los 30°C aproximadamente (Veron, 1986), podemos intuir que es el rango de temperatura óptimo para el desarrollo de corales hermatípicos, ya que por debajo de los 18°C y generalmente a latitudes mayores a 30°, el número de especies formadoras de arrecifes de coral comienza a descender rápidamente (Hoegh-Guldberg, 1999). Desde El Niño 1982-83 en el que la mortalidad de corales en América Central y otros lugares fue casi del 100%, quedó de manifiesto que la temperatura superficial del mar es un claro disparador de blanqueamiento (Wilkinson *et al.*, 1999).

De los sitios analizados, fue Cabo Pulmo donde se observó el intervalo más amplio de variación de la temperatura superficial del mar de con 11.6°C (diferencia entre la mínima y la máxima temperatura; Tabla 5). En consecuencia, se esperaría que los corales en esa región tengan mayor tolerancia a las oscilaciones térmicas. Aun con lo anterior, (Iglesias-Prieto *et al.*, 2003) reportaron que en el evento de El Niño de 1997-1998, se registraron más casos de blanqueamiento en las regiones al norte del Golfo de California, hecho que relacionaron con el incremento en la temperatura de 2 hasta 3°C. Hoegh-Guldberg, 1999, menciona que la temperatura, la salinidad y la influencia de la luz, son factores de impacto considerable para el establecimiento y mantenimiento de los corales. Considerando que Cabo Pulmo no tiene una barrera que lo aisle de la variabilidad oceánica regional, observamos que durante el invierno y la primavera, el giro del Pacífico Norte es fuerte y las aguas de la corriente de California llegan hasta la boca del golfo (López, 2007). Durante el verano y el otoño se fortalece el sistema ecuatorial y se intensifica la Corriente

Costera de Costa Rica, que se extiende hacia la boca del golfo (Bernal y Carriquiry, 2001), lo que podría tener influencia sobre la estacionalidad de surgencias observada para esta región, la cual muestra sus máximos relativos en el mes de septiembre.

En Bahía de Banderas el intervalo fue 10.7°C, en contraste, en Huatulco el intervalo es de sólo 5°C (tabla 5), por lo que podría presumirse mayor vulnerabilidad a la temperatura. Sin embargo, no necesariamente un intervalo más amplio implica menor vulnerabilidad y viceversa. En el evento del ENSO 1997-98, (Reyes Bonilla, 2001) reportaron mayor blanqueamiento en el Golfo de California (alrededor del 60%) y en Bahía de Banderas (cercano al 100%), mientras que en Oaxaca apenas y se manifestó. Esto puede deberse a las condiciones oceanográficas particulares de cada sitio, que actúan como amortiguadores del incremento de la temperatura (Calderon-Aguilera y Reyes-Bonilla, 2006).

Tabla V. Localización de los sitios de trabajo y las temperaturas registradas en cada uno de ellos.

	Cabo Pulmo	Isla Isabel	Islas Marietas	Zihuatanejo	Huatulco
Latitud	23.43 N	21.87 N	20.65 N	17.63 N	15.54 N
Longitud	-109.36 W	-105.88 W	-105.54 W	-101.54 W	-96.45 W
T°C					
Media	25.7	27.7	27.3	29.1	29.2
Máxima	30.7	32.2	32.4	31.4	31.3
Mínima	19.1	21.8	21.7	25.3	26.4
Diferencia	11.6	10.3	10.7	6.1	4.9
SD	3.40	2.87	2.78	1.54	1.34

Esto tiene relación con los resultados obtenidos, ya que los datos presentan gran variabilidad en los meses de invierno y parte de la primavera como lo reportan (Bernal *et al.*, 2001), es decir la variabilidad oceánica presentada en la región, especialmente en los primeros meses del año contribuyen a que las corrientes, que a su vez están relacionadas con la intensidad de los vientos, ocasionen una variabilidad en los valores de temperatura. Por su parte, en los meses de verano

y otoño, y debido a la influencia de la Corriente de Costa Rica, la cual tiene influencia hasta la entrada del Golfo de California, observamos las temperaturas que se registran en la región de Cabo Pulmo, se elevan y se mantienen constantes, es decir, en los años del estudio las temperaturas registradas no varían por más de dos grados centígrados.

Carriquiry y Reyes-Bonilla, 1997, reportaron una temperatura promedio para la zona de Isla Isabel hasta las Islas Marietas, de 23 a 30°C en el año, con los valores extremos en marzo y septiembre respectivamente. En invierno y primavera hay descensos marcados de la temperatura en la zona, llegando hasta los 20°C en la superficie, causadas principalmente por las surgencias que se presentan en la Bahía de Banderas. Lo anterior ocasiona que aparezca la termoclina a profundidades someras de hasta 20 m, haciendo que la capa de mezcla se sitúe en la zona a los 30 m de profundidad en promedio. De este modo, las condiciones para el desarrollo y supervivencia de comunidades coralinas en la zona son adecuadas (Carriquiry y Reyes-Bonilla, 1997).

En el Golfo de California, durante el evento de El Niño de 1997-1998, (Iglesias-Prieto *et al.*, 2003) reportaron que se presentó mayor blanqueamiento en la parte norte del Golfo de California, donde las temperaturas fueron más altas. Sin embargo, en el evento de ese año, los corales estuvieron bajo anomalías térmicas de hasta 3°C.

Asimismo, encontraron que los corales que sufrieron más blanqueamiento, fueron aquellos encontrados en las zonas someras, a diferencia de los que están en las zonas más profundas, hecho que relaciona la influencia de la luz fotosintéticamente activa e incluso el índice de surgencia, ya que, la combinación “adecuada” de estas variables, puede poner de manifiesto las condiciones propicias para que se presente blanqueamiento. En este evento, la mortalidad fue menor que otros también documentados, como el de El Niño 82-83 en Centroamérica, donde se reportó una mortalidad de (75-95%) y el evento reportado para el Océano Índico, en el que se reportó (80-90%) de mortalidad (Iglesias-Prieto *et al.*, 2003)

En general el año 2008 se presentó como un año frío, como observamos en los resultados, los datos de temperatura de dicho año para los cinco sitios, se mostraron por debajo de la media histórica, lo cual señala que fue un año de “La Niña”. Exceptuando a Huatulco, en los demás sitios observamos el efecto de una baja temperatura. Los datos del satélite indican que el descenso de temperatura, fue de más de dos grados en los meses de enero a marzo, coincidiendo con lo reportado por (Cupul-Magaña y Calderón, 2008), quienes observaron en mayo del mismo año, blanqueamiento al 100% en Islas Marietas, ocasionado por la baja temperatura.

Radiación fotosintéticamente activa.

La disponibilidad de luz en el mar es un factor muy importante para el establecimiento y desarrollo de las comunidades coralinas, así como para las reacciones fotosintéticas. Sin embargo, esta disponibilidad es condicionada por factores como la nubosidad atmosférica o la cantidad de material orgánico disuelto en la columna de agua (sólidos disueltos totales-SDT). Ciertamente, la nubosidad y los SDT serán un limitante para las reacciones metabólicas de las zooxantelas (Hoegh-Guldberg, 1999), ya que, junto con las formas de carbono disueltas en el agua y la cantidad de luz disponible, estas algas simbiotes aportan los nutrientes que el pólipo necesita para su crecimiento o en su caso para la regeneración del tejido dañado por algún evento estresante.

La disponibilidad de luz fotosintéticamente activa juega un papel muy importante en la vulnerabilidad del coral al blanqueamiento y uno de los efectos que puede tener es directamente sobre el alga (zooxantela), la cual, al depender de la cantidad de luz (Paz-García y Reyes-Bonilla, 2006), puede verse limitada en su reproducción y crecimiento. Desde este punto de vista podríamos apuntar que la luz fotosintéticamente activa es un factor que podría determinar qué tan vulnerables son los corales al blanqueamiento, de modo que, si se afecta el alga, incluso antes de que ésta se encuentre en el pólipo, puede condicionar el éxito

que tenga para colonizar (Hoegh-Guldberg, 1999) o recolonizar un coral afectado por algún evento que le pudiese poner en una condición de daño irreparable.

En el Pacífico mexicano observamos características físicas regionales que en gran medida están influenciadas por otras variables, tal es el caso de PAR. La variación de los valores de PAR en los sitios del estudio de norte a sur, podría indicar una serie de factores como mencione antes, que influyen en las lecturas del satélite. Por ejemplo, existe gran variabilidad entre un año y otro a partir de los meses de verano en los resultados obtenidos para Huatulco, con lo cual podemos intuir que las condiciones atmosféricas de la región, dificultan en cierta medida recolección de datos satelitales. Por ejemplo, las condiciones que se presentan en la zona oaxaqueña correspondiente a la alberca cálida mexicana (ACM), se ven influenciados por los Nortes del Golfo de Tehuantepec y Papagayo (Strong *et al.*, 1972; Trasviña *et al.*, 1995; Trasviña *et al.*, 1999). Considerando esto, podemos decir que la variabilidad de temperatura en esta región está fuertemente influenciada por los procesos atmosféricos, lo cual puede explicar la variabilidad observada en los datos de PAR para la región de Guerrero y Oaxaca, correspondientes a Ixtapa y Huatulco.

Como se indicó antes, quizá las condiciones atmosféricas predominantes en la región de Ixtapa y Huatulco, sean un factor de importancia para explicar la variabilidad de los datos de PAR. Dicha variabilidad, refleja una zona muy susceptible a la nubosidad la mayor parte del año, lo cual podría atribuirse como un factor estresante para los corales, ya que la variabilidad en la disponibilidad de luz, se puede volver una limitante para las algas zooxantelas, por lo que hemos mencionado antes. Sin embargo, la luz sería limitante, como resultado de la interacción con otras variables características de la zona (Magaña *et al.*, 1999), tales como el régimen de corrientes, que a su vez generan surgencias principalmente en los meses de mayo a octubre. De este modo, se vería afectada la disponibilidad de luz en la columna de agua, aunado al aporte de

materia orgánica derivada de escurrimiento por precipitación que se presentan en la región.

Específicamente en los casos de Ixtapa y Huatulco, podemos entender que la interacción de estas características regionales físico-químicas (corrientes, vientos, disponibilidad de luz, etc.), como un conjunto sinérgico, nos da una idea más clara de que la vulnerabilidad coralina al blanqueamiento estará en función de una serie de factores actuando simultáneamente. Por ejemplo, los intervalos de temperatura reportados en este trabajo, para Ixtapa y Huatulco, son de 6.1 y 4.9 °C con lo que podemos pensar que la oscilación en los valores de PAR, podría ser un factor limitante ya que la temperatura en esa región se ve influida por otros factores como la alberca de agua cálida del Pacífico Tropical Occidental (Trasviña *et al.*, 1995; Trasviña *et al.*, 1999; Alfaro y Lizano, 2002; Trasviña *et al.*, 2003) que influye a su vez, a la Alberca Cálida Mexicana, la cual se mantiene con temperaturas superiores a los 28°C durante todo el año (Magaña *et al.*, 1999).

Si bien es cierto que se observó gran variabilidad en los datos de PAR, casi en todos los sitios, excepto en Cabo Pulmo, es de considerar que el año 2008 presenta un desfase respecto a los demás años, como si se adelantara la estacionalidad típica de cada región. Lo que es claro, es que los niveles registrados de PAR en cada uno de los sitios para ese año en particular, son más bajos que los demás años.

Si bien el evento de “La Niña”, observado en el 2008, se relaciona con la temperatura, creo que podemos inferir que la participación de PAR en el proceso de blanqueamiento registrado en el mismo año, es trascendente desde el punto de vista de la resiliencia de los organismos coralinos ante un evento estresante como este. La baja disponibilidad de luz fotosintéticamente activa, registrada en los cinco sitios, pudo haber limitado la capacidad de recuperación (recolonización) o incluso se pudo ver afectada la capacidad de otras especies, del género *Symbiodinium*, de colonizar el coral, de modo que con poca disponibilidad de luz, las reacciones fotosintéticas necesarias para los procesos

vitales del alga simbiote se verían mermadas afectando posiblemente su capacidad de incrementar su tamaño poblacional (Hoegh-Guldberg, 1999; Walther *et al.*, 2002; Hughes *et al.*, 2003). Cupul-Magaña y Calderón Aguilera (2008) reportaron blanqueamiento de coral de casi 100% en Islas Marietas en mayo de 2008, hecho que relacionaron con la disminución de la temperatura.

Índice de surgencia y clorofila.

En el presente análisis se encontró que Cabo Pulmo es una zona de surgencias en los últimos meses del año principalmente en septiembre y octubre, correspondiendo a que durante el verano y otoño llegan a esa región masas de agua ecuatorial, reportado por (Bernal y Carriquiry, 2001). Lo anterior, podría explicar las surgencias observadas en los meses de agosto a noviembre en todos los años comprendidos en el análisis, hecho que viene seguido de un incremento en las concentraciones de clorofila, alcanzando sus máximos relativos en el mes de febrero.

Podemos relacionar la variabilidad de la temperatura con la variación en las concentraciones de clorofila en los primeros meses del año que se presentan en la zona de Cabo Pulmo. Es decir, la variabilidad en las concentraciones de clorofila encontradas para esta área podrían estar variando de acuerdo a las condiciones oceanográficas regionales (Calderon-Aguilera y Reyes-Bonilla, 2006), tomando en cuenta que la variabilidad de la temperatura superficial del mar está íntimamente ligada a los procesos de corrientes marinas que ahí convergen. Por su parte, la estacionalidad mostrada respecto a las concentraciones de clorofila, muestra una relación muy cercana con el proceso de surgencias para esta zona. La temporada de mayor actividad de surgencias en Cabo Pulmo se presenta a partir del mes de agosto hasta el mes de noviembre, mes en el que comienza a incrementar las concentraciones de clorofila y que a su vez, pudiera influir en la variabilidad presentada en esta temporada, que está caracterizada por la baja temperaturas superficiales del mar.

La producción primaria en la región de las costas de Guerrero y Oaxaca fue analizada por (Müller-Karger y Fuentes-Yaco, 2000) quienes reportaron que las concentraciones de fitoplancton variaban entre 2 y más de 10 mg m^{-3} dentro de los primeros 70 km fuera de la costa y que era de cerca de 1 mg m^{-3} a 600 km fuera de la costa.

La región de Isla Isabel, Islas Marías, alcanzando incluso las Islas Marietas, se caracteriza porque cerca de ahí convergen tres sistemas de corrientes o masas de agua importantes. La Corriente de California, la cual es fría, de baja salinidad y fluye hacia el sur. La Corriente Costera de Costa Rica, la cual es caliente y fluye hacia el norte, y el agua del Golfo de California, la cual es agua cálida y densa. Estas tres corrientes convergen en un punto para después unirse a la Corriente Norecuatorial (Carriquiry y Reyes-Bonilla, 1997). En la región de Isla Isabel se observó que la estacionalidad de las surgencias coincide con el incremento de clorofila en el periodo de agosto a octubre.

En el caso de las Islas Marietas (Bahía de Banderas), encontramos elevadas concentraciones de clorofila, prácticamente toda la primera mitad del año y aparentemente no hay relación con el índice de surgencia en el periodo mencionado, ya que, respecto a éste, observamos una corta temporada de agosto a octubre y aparentemente de no gran intensidad e incluso de hundimientos de agua. Podríamos suponer que la influencia de actividades de origen antropogénico están actuando como un aporte permanente de nutrientes hacia la bahía, lo cual provee de una parte elemental para el para la producción algal. Incluso la protección que la misma geografía de la bahía provee al sistema acuático de Bahía de Banderas, puede limitar en cierta medida el flujo de las corrientes de aire o incluso de las masas de agua, propiciando que los nutrientes queden suspendidos en la columna de agua o disponibles por más tiempo para su aprovechamiento por el fitoplancton. Asimismo, los niveles máximos de PAR obtenidos en este estudio, se presentan en la misma temporada de las máximas concentraciones de clorofila.

En este sentido, podemos dirigir la atención hacia la interacción de varios factores que pueden hacer a los corales vulnerables al blanqueamiento, por estrés ocasionado por una anomalía de alguna de las variables consideradas. Aunque la temperatura es un factor determinante para ello, podemos ver que la interacción con variables como el aporte de material orgánico derivado de la actividades antropogénicas, tales como descargas de desechos directamente a la bahía o incluso por escurrimiento propiciado por la deforestación.

Los corales localizados en las zonas someras son más vulnerables al blanqueamiento que aquellos que están en zonas más profundas, debido a que la temperatura será mayor en las zonas poco profundas. Además las surgencias acarrearán aguas con nutrientes y partículas suspendidas totales, inhibiendo el paso de la luz en la columna de agua. Por tanto debemos considerar dos factores, por una parte, el descenso de la temperatura por la surgencia, aunado a esto, la cantidad de materia orgánica que se presenta en la zona aumenta considerablemente, hecho que limita el paso de la luz por la columna de agua. (Iglesias-Prieto *et al.*, 2003). De este modo, podemos decir, que la simple presencia de un evento de surgencia, no es factor determinante para la aparición de blanqueamiento en corales, sino que es dependiente de la sinergia que se presenta con alguna otra variable, en este caso mencione a PAR.

Algunos autores dicen que un factor oceanográfico importante en la determinación del clima local, tanto atmosférico como oceánico, es la aparición de zonas de afloramiento en las regiones del Golfo de Tehuantepec (Bakun, 1975; Alfaro y Lizano, 2002). Estas zonas se caracterizan por tener una termoclina somera y son importantes por su influencia sobre los ecosistemas marinos existentes en esta región del Pacífico, debido a que brindan nutrientes a la zona eufótica y así sostener la productividad biológica.

Trasviña *et al.*, (1999), dicen que la variabilidad en el Golfo de Tehuantepec podría estar dominada por aspectos de mayor escala que la local, tales como ENOS y/o las variaciones interanuales de la piscina de agua caliente del Pacífico

Tropical Noreste, ya que durante los eventos cálidos de ENOS se observa una mayor intensidad del viento noreste sobre Centroamérica (Alfaro y Lizano, 2002).

V. CONCLUSIONES

Derivado del análisis de los resultados obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

- Cabo Pulmo presentó el intervalo de variación de temperatura más amplio y Huatulco, el intervalo más angosto.
- La región de Huatulco se encuentra más expuesta a la actividad que se da en la Alberca de Agua Cálida Mexicana y al régimen estacional que influye en los procesos climáticos de la zona costera de Oaxaca. Lo que ocasiona que la temperatura no cambie mucho a lo largo del año.
- Los vientos Tehuanos desencadenen eventos de surgencia, hecho que posiblemente afecte a los corales en cierto grado.
- En las costas de Nayarit, Isla Isabel e Islas Marietas, se reportó blanqueamiento en el periodo de estudio, coincidiendo con el evento de “La Niña” del 2008. Sin embargo, es de considerar que la bahía de Banderas se ve afectada por procesos de influencia humana, como la descarga de desechos, eutrofizando la zona, lo cual puede poner en competencia y quizá en desventaja a las algas zooxantelas con otras especies, impidiendo así la recolonización del coral después de un evento estresante.
- El efecto aislado de cada una de las variables, no parece ser suficiente para detonar eventos de blanqueamiento que pudieran llevar a la muerte del organismo.
- La relación entre PAR y Temperatura superficial del mar es estrecha, de modo que la observación de registros históricos de ambas variables, podrían servir para formular escenarios confiables, útiles para el manejo y conservación de los ecosistemas marinos.

Caracterizando los sitios de estudio, a través de su temperatura, PAR, índice de surgencia y clorofila, pudimos observar que existen patrones, como la variabilidad de los niveles de PAR, o la estacionalidad observada en las

concentraciones de clorofila, etc., en cada uno de los sitios, hechos que en cierto momento, podrían condicionar la permanencia de las comunidades coralinas del Pacífico mexicano.

VI. LITERATURA CITADA

- Alfaro, E. y O. Lizano. 2002. Algunas relaciones entre las zonas de surgencia del Pacífico Centroamericano y los océanos Pacífico y Atlántico tropicales. *Revista de biología tropical* 49: 185-194
- Baker, A. 2001. Ecosystems: Reef corals bleach to survive change. *Nature* 411(6839): 765-766
- Bakun, A. (1975). Daily and Weekly Upwelling, West Coast of North America, 1967-73. Report No. NMFS SSRF-693, National Marine Fisheries Services, NOAA
- Bernal, G., Pedro Ripa y J. C. Herguera. 2001. Variabilidad Oceanográfica y Climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas* 27(4): 597-617
- Bernal, G. R. y J. D. Carriquiry. 2001. El registro isotópico paleoambiental de un coral de Cabo Pulmo, boca del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 27(2): 155-174
- Brown, B. 2000. The significance of pollution in eliciting the "bleaching" response in symbiotic cnidarians. *International Journal of Environment and Pollution* 13(1): 392-415
- Brown, B., R. Dunne y H. Chansang. 1996. Coral bleaching relative to elevated seawater temperature in the Andaman Sea (Indian Ocean) over the last 50 years. *Coral Reefs* 15(3): 151-152
- Brown, B. E. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16 (5): 129-138
- Buddemeier, R. W., A. C. Baker, D. G. Fautin y J. R. Jacobs. 2004. The adaptive hypothesis of bleaching. *Coral Health and Disease*, Springer-Verlag, Heidelberg: 427-444
- Buddemeier, R. W. y D. G. Fautin. 1993. Coral bleaching as an adaptive mechanism. *BioScience*: 320-326
- Calderon-Aguilera, L. E. y H. Reyes-Bonilla. 2006. Can local oceanographic conditions in the Mexican Pacific buffer the El Niño-Southern Oscillation effects on coral reefs? :
- Calderón-Aguilera, L. E., y Héctor Reyes Bonilla. 2005. Una Interacción de Bella Complejidad. *Ciencia Y Desarrollo*: 8-11
- Calderon, A. L., B. H. Reyes, P. R. A. López, A. L. Cupul-Magaña, M. D. Herrero, J. D. Carriquiry y P. Medina-Rosas. 2009. Fauna asociada a arrecifes coralinos del Pacífico mexicano. *Ciencia y Desarrollo* 35(230): 38-45
- Carriquiry, J. D. y H. Reyes-Bonilla. 1997. Estructura de la Comunidad y Distribución Geográfica de los Arrecifes Coralinos de Nayarit, Pacífico de México. *Ciencias Marinas* 23(2): 227-248

- Cornell, H., R. Karlson y T. Hughes. 2007. Scale-dependent variation in coral community similarity across sites, islands, and island groups. *Ecology* 88(7): 1707-1715
- Crossland, C. J., B. G. Hatcher y S. V. Smith. 1991. Role of coral reefs in global ocean production. *Coral Reefs* 10: 55-64
- Cupul-Magaña, A. L. y A. L. E. Calderón (2008). Blanqueamiento de coral por baja temperatura del agua de mar en el parque nacional Islas Marietas, Nayarit, México. XV Congreso Nacional de Oceanografía. Asociación de Oceanólogos de México, A.C., Boca del Rio, Veracruz
- Douglas, A. 2003. Coral bleaching—how and why? *Marine Pollution Bulletin* 46(4): 385-392
- Dyken, J. A. y J. Shik. 1984. Photobiology of the symbiotic sea anemone, *Anthopleura elegantissima*: defenses against photodynamic effects, and seasonal photoacclimatization. *The Biological Bulletin* 167(3): 683
- Fabricius, K., E., O. Hoeg-Guldberg, J. Johnson, McCook, L. y J. Lough. 2007. Chapter 17 Vulnerability of coral reefs of the Great Barrier Reef to climate change. In: PA, J. J. a. M. (ed) *Climate Change and the Great Barrier Reef*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia, p 818 pp.
- Fitt, W., F. McFarland, M. Warner y G. Chilcoat. 2000. Seasonal patterns of tissue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching. *Limnology and Oceanography*: 677-685
- Frouin, R., B. Franz y M. Wang. 2003. Algorithm to estimate PAR from SeaWiFS data Version 1.2-Documentation. NASA Tech Memo 206892(22): 46–50
- Glynn, P. W. 1996. . Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. . *Global Change Biol* 2: 495-509
- Hallock, P. 2005. Global change and modern coral reefs: new opportunities to understand shallow-water carbonate depositional processes. *Sedimentary Geology* 175(1-4): 19-33
- Hirzel, A., J. Hausser, D. Chessel y N. Perrin. 2002. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* 83(7): 2027-2036
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshwater Res*, 50 (8): 839-866
- Hooker, S. y C. McClain. 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography* 45(3-4): 427-465
- Hughes, T., A. Baird, D. Bellwood, M. Card, S. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. Jackson y J. Kleypas. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301(5635): 929
- Iglesias-Prieto, R., H. R. Bonilla. y R. R. Rodríguez. 2003. Effects of 1997-1998 ENSO on coral reef communities in the Gulf of California, Mexico. *GEOFISICA INTERNACIONAL-MEXICO-* 42(3): 467-472
- Iglesias Prieto, R., J.L. Matta, W.A. Robbins y R. K. Trench. 1992. Photosynthetic response to elevated temperature in the symbiotic dinoflagellate *Symbiodinium microadriaticum* in culture. . *Proc Nat Acad Sci* 89: 302-305

- INEGI. 2009. Web Page. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>. 22 de febrero de 2010
- IPCC (2007). Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático., Ginebra, Suiza
- Irigoyen, C. G. M. 2004. Restauración en arrecifes de coral. *Ciencias*(76): pp. 42-45
- Jones, R., O. Hoegh-Guldberg, A. Larkum y U. Schreiber. 1998. Temperature-induced bleaching of corals begins with impairment of the CO₂ fixation mechanism in zooxanthellae. *Plant Cell and Environment* 21(12): 1219-1230
- Karlson, R. H. 1999. *Dynamics of Coral Communities*, Vol 23. Kluwer Academic Publisher, Delaware
- Kashian, D., R. Zuellig, K. Mitchell y W. Clements. 2007. The cost of tolerance: Sensitivity of stream benthic communities to UV-B and metals. *Ecological Applications* 17(2): 365-375
- Kleypas, J., G. Danabasoglu y J. Lough. 2008. Potential role of the ocean thermostat in determining regional differences in coral reef bleaching events. *Geophys Res Lett* 35: L03613
- Kleypas, J. A., R. W. Buddemeier, D. Archer, J. P. Gattuso, C. Langdon y B. N. Opdyke. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on Coral Reefs. *Science* 284(5411): 118-120
- López, D. C. 2007. Variabilidad de la productividad primaria en la región de Cabo Corrientes, México., CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada).
- Magaña, V., J. Amador y S. Medina. 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 12(6):
- Maina, J., V. Venus, T. R. McClanahana y M. Atweberhana. 2008. Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological Modelling* 212: 180–199
- Maina, J. M. 2007. Modelling Ecological Susceptibility of Coral Reefs to Environmental Stress Using Remote Sensing, GIS, and *in situ* Observations: A case study in the Western Indian Ocean. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation
- McClanahan, T., N. Muthiga y S. Mangi. 2001. Coral and algal changes after the 1998 coral bleaching: interaction with reef management and herbivores on Kenyan reefs. *Coral Reefs* 19(4): 380-391
- McClanahan, T., N. Polunin y T. Done. 2002. Ecological states and the resilience of coral reefs. *Conservation Ecology* 6(2): 18
- McClanahan, T. R., J. E. Cinner, J. Maina, N. A. J. Graham, T. M. Daw, S. M. Stead, A. Wamukota, K. Brown, M. Atweberhan y V. Venus. 2008. Conservation action in a changing climate. *Conservation Letters* 1(2): 53-59
- McClanahan, T. R. y J. Maina. 2003. Response of Coral Assemblages to the Interaction between Natural Temperature Variation and Rare Warm-Water Events. *Ecosystems* 6(6): 551-563

- Medina-Rosas, P., J. Carriquiry, A. Cupul-Magaña y D. Ixtapa. 2005. Reclutamiento de Porites (Scleractinia) sobre sustrato artificial en arrecifes afectados por El Niño 1997–98 en Bahía de Banderas, Pacífico mexicano Recruitment of Porites (Scleractinia) on artificial substrate in reefs affected by the 1997–98 El Niño in Banderas Bay, Mexican Pacific. *Ciencias Marinas* 31(1A): 103-109
- Mistr, S. y D. Bercovici. 2003. A theoretical model of pattern formation in coral reefs. *Ecosystems* 6(1): 61-74
- Müller-Karger, F. y C. Fuentes-Yaco. 2000. Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *J Geophys Res* 105: 1271–1284
- O'Reilly, J., S. Maritorena, D. Siegel, M. O'Brien, D. Toole, B. Mitchell, M. Kahru, F. Chavez, P. Strutton y G. Cota. 2000. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. NASA Tech Memo 206892(11): 9-27
- Paz-García, D. A. y H. Reyes-Bonilla. 2006. Variaciones temporales en la tasa de regeneración a lesiones artificiales de dos morfotipos de Porites panamensis/Temporal variation in the regeneration rate of artificial lesions in two morphotypes of Porites panamensis. *Ciencias Marinas* 32(1B): 187-194
- Peterson, G., C. Allen y C. Holling. 1998. Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems* 1(1): 6-18
- RAMSAR. 2003. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Web Page. <http://ramsar.conanp.gob.mx/documentos/fichas/9.pdf>. 20 de Agosto de 2009
- RAMSAR. 2004. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Web Page. <http://ramsar.conanp.gob.mx/documentos/fichas/32.pdf>. 20 de Agosto de 2009
- Reyes-Bonilla, H. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. *Latin American Coral Reefs*: 331-349
- Reyes Bonilla, H. 2001. Effects of the 1997-1998 El Niño-Southern Oscillation on coral communities of the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science* 69(1): 251-266
- Ríos-Jara, E., C. Galván-Villa y F. Solís-Marín. 2008. Equinodermos del Parque Nacional Isla Isabel, Nayarit, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79: 131-141
- Rogers, C. S. 1993. Hurricanes and coral reefs: The intermediate disturbance hypothesis revisited. *Coral Reefs* 12(3): 127-137
- Rowan, R. 1998. Diversity and ecology of zooxanthellae on coral reefs. *Journal of Phycology* 34(3): 407-417
- Sawyer, S. y L. Muscatine. 2001. Cellular mechanisms underlying temperature-induced bleaching in the tropical sea anemone *Aiptasia pulchella*. *Journal of Experimental Biology* 204(20): 3443
- SEMARNAT-CONACYT (2006). Convocatoria 2006/01. DEMANDAS ESPECÍFICAS DEL SECTOR. Tema general: Cambio global: análisis de las implicaciones socioambientales en México

- Sheppard, C. y R. Rioja-Nieto. 2005. Sea surface temperature 1871–2099 in 38 cells in the Caribbean region. *Marine environmental research* 60(3): 389-396
- Smith, S. y R. Buddemeier. 1992. Global change and coral reef ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23(3): 89-118
- Squires, D. 1959. Corals and coral reefs in the Gulf of California. *Bull Am Mus Nat Hist* 118: 367-432
- Stone, L., A. Huppert, B. Rajagopalan, H. y. Bhasin y Y. Loya. 1999. Mass coral reef bleaching: A recent outcome of increased El Niño activity? *Ecol Lett*, 2(5): 325-330
- Stone, R. 2007. A World Without Corals? *Science* 316: 678-681
- Strong, A., R. De Rycke y H. Stumpf. 1972. Satellite detection of upwelling and cold water eddies, paper presented at 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment. *Environ Res Inst of Mich, Ann Arbor*: 1067-1081
- Szlafsztein, C. y H. Sterr. 2007. A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation* 11(1): 53-66
- Trasviña, A., E. Barton, J. Brown, H. Velez, P. Kosro y R. Smith. 1995. Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *J Geophys Res* 100(20): 649–620
- Trasviña, A., E. Barton, H. Vélez y J. Brown. 2003. Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *GEOFISICA INTERNACIONAL-MEXICO*- 42(1): 101-114
- Trasviña, A., D. Lluch, A. Filonov y A. Gallegos. 1999. El Pacífico Tropical Mexicano y El Niño. In: *Impacto del Niño en México*. UNAM, Mexico
- Veron, J. y M. Stafford-Smith. 2000. *Corals of the World*, Vol. Australian Institute of Marine Science Townsville
- Veron, J. E. N. 1986. *Corals of Australia and the Indo-Pacific*. Angus and Robertson, Sydney:
- Walther, G., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. Beebee, J. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg y F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416(6879): 389-395
- Westmacott, S., K. Teleki, S. Wells y J. West (2000). Manejo de arrecifes de coral blanqueados o severamente dañados. In: UICN (ed). Gland (Suiza), Suiza y Cambridge, Reino Unido, p 36 pp.
- Wilcox, T. 1998. Large-subunit ribosomal RNA systematics of symbiotic dinoflagellates: morphology does not recapitulate phylogeny. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 10(3): 436-448
- Wilkinson, C. 1999. Global and local threats to coral reef functioning and existence: review and predictions. *Marine & Freshwater Research* 50(8): 867-878
- Wilkinson, C., O. Linden, H. Cesar, G. Hodgson, J. Rubens y A. Strong. 1999. Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral mortality in the Indian Ocean: An ENSO impact and a warning of future change? *Ambio* 28(2): 188

Zamorano, P. y G. Leyte-Morales. 2009. EQUINODERMOS ASOCIADOS A FORMACIONES ARRECIFALES EN ZIHUATANEJO Y ACAPULCO, GUERRERO, MÉXICO. BOLETÍN DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS 38: 7