

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina**

**Simulación de la tasa de crecimiento foliar de una pradera de
Zostera marina L. en el estero de Punta Banda, Ensenada
Baja California, México.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Alberto Salazar Barrios

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por
Alberto Salazar Barrios
y a probada por el siguiente Comité

Dra. Ma. Elena Solana Arellano
Director de tesis

Dra. Silvia Emilia Ibarra Obando
M. Ing. Carlos Eduardo Cabrera Ramos
Dr. Rafael Hernández Walls
Dr. Victor Manuel Wong Ortega



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis de Alberto Salazar Barrios, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Simulación de la tasa de crecimiento foliar de una pradera de *Zostera marina* L. en el estero de Punta Banda, Ensenada Baja California, México.

Resumen aprobado por:

Dra. Ma. Elena Solana Arellano
Director de tesis

El uso de modelos matemáticos para predecir las tasas de crecimiento de *Zostera marina* es fundamental en la protección de áreas naturales, debido a que en dichos modelos se ven representados los efectos antropogénicos y climáticos sobre la pradera, ayudando en la identificación de las épocas o estaciones en las que la pradera se encuentra más vulnerable y por lo tanto necesita de una protección más rigurosa. Mediante un análisis Multivariado de Componentes Principales (ACP), utilizando una serie de datos de 1999 a 2001 de temperatura del agua (°C), fosfatos (μM) y nitratos (μM) en la columna de agua y agua intersticial, salinidad (‰), luminosidad ($\text{fotones}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{seg}^{-1}$), Índice Oceánico el Niño (ONI) y horas de exposición, se encontraron las variables más importantes que estuvieran asociadas a la variable biológica tasa de crecimiento por haz (TCH) expresado en $\text{gramos de peso}\cdot\text{haz}^{-1}\cdot\text{quincena}^{-1}$. El ACP extrajo, en cuatro factores principales (con una varianza explicada del 77%), las siguientes variables: temperatura del agua *in situ* ($r=0.85$), fosfatos de la columna de agua (μM) ($r=0.73$) y horas de exposición al aire y a la luz solar ($r=0.8$) en el componente 1, en el componente 2 tenemos a los nitratos intersticiales (μM) ($r=0.88$), el componente 3 lo conforman los nitratos de la columna de agua (μM) (y en este mismo componente se encuentra la variable TCH), en el componente 4 está el Índice Oceánico El Niño ($r=0.87$) y en el componente 5 los fosfatos intersticiales (μM) ($r=0.95$), utilizando estas variables y la ecuación alométrica $W = \alpha L^\beta$, se realizó la simulación de la tasa de crecimiento de *Zostera marina* a través de tiempo. La simulación resultante fue proyectada y calibrada para un año anterior (1998) y para una serie posterior larga 2002-2003, 2006, 2008-2011. Los resultados de esta proyección muestran una buena concordancia entre los valores predichos y los valores observados con un coeficiente de correlación de concordancia de 0.67.

Palabras claves: Simulación, praderas de pastos marinos, *Zostera marina*, El Niño, La Niña, Punta Banda, Estuario.

Abstract of the thesis presented by Alberto Salazar Barrios as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Marine Ecology

Simulation of the growth foliar rate of a *Zostera marina* L. meadow located in the Punta Banda estuary, Ensenada Baja California, México.

Abstract approved by:

Ph. D. Ma. Elena Solana Arellano
Thesis director

The use of mathematical models to predict growth rates in *Zostera marina* is fundamental in the protection of natural areas, this because anthropogenic and climatic effects over the seagrass meadows are reflected in these models, helping in the identification of the seasons in which the meadow are more vulnerable and therefore rigorous protection is needed. Through a multivariate principal components analysis (PCA) using data for a series from 1999 to 2001 of water temperature (°C), phosphates (µM), and nitrates (µM) of the water column and porewater, salinity (‰), irradiance (photons·m⁻¹·seg⁻¹), El Niño Oceanic Index and exposed hours to the air, the variables associated to the biological variable, growth of shoot (TCH) expressed as dry weight grams·shoot⁻¹·biweekly⁻¹ were found. The PCA analysis extracted four principal components (expl. var. = 77%) composed of the following variables: water *in situ* temperature (°C) (r=0.85), water column phosphates (µM) (r=0.73) and exposition hour to the air and light (r=0.8) from factor 1, porewater nitrates (µM) (r= 0.88) from factor 2, the factor 3 is formed by the water column nitrates (µM) (r=0.83) together with the TCH, in the factor 4 we have the El Niño Oceanic Index (r=.87), and in the last factor the interstitial phosphates from sediment (r=0.95). Using these variables and the allometric equation $W = \alpha L^\beta$, we performed a simulation of the growth of *Z. marina* through time. The resulting simulation was projected and calibrated for a year before (1998) and for a posterior series 2002-2003, 2006, 2008-2011. The results of these projections showed that there was a good concordance between predicted and observed values, with a concordance correlation coefficient of 0.67.

Key Words: Simulation, sea grass meadows, *Zostera marina*, El Niño, La Niña, Punta Banda, Estuary

Dedicatoria

A mi padre Celestino Salazar Q.E.P.D.

Agradecimientos

A mi madre por su apoyo incondicional, su guía, su ejemplo, su paciencia, sus regaños, sus consejos, sus terapiadas, por apoyarme en los momentos más difíciles y felicitarme en los momentos más felices.

A mi tutora Dra. Elena Solana Arellano, le debo un enorme y sincero agradecimiento por su apoyo constante, por su paciencia infinita, por sus consejos invaluable, por sus aportaciones como experta en el área de estadística, simulación, matrices, etc., por darme la oportunidad de viajar al congreso de Colombia, por las idas a los muestreos de Bahía de Los Ángeles y lo más importante, por darme la oportunidad/es de terminar esta tesis. No pude tener mejor tutora en todo el mundo.

A la Dra. Silvia Ibarra por sus aportes es en la parte de biología y ecología, así como también en la redacción, gramática y estructura, sus acertados comentarios, su sinceridad, y su sentido del humor enriquecieron sustancialmente este trabajo e hicieron más fácil el proceso de escritura.

A mis Sinodales Dr. Rafael H. Walls y al M. Ing. Carlos Cabrera, por su ayuda en el área de programación y conceptos matemáticos y Dr. Victor Wong, por prestarme su tiempo y darme a oportunidad de terminar esta etapa.

A la Sria. Eli (Elizabeth Farías) que nos hecha la mano a mí y a muchos alumnos y siempre tiene la respuesta adecuada a unas preguntas no tan claras.

A mi hermano Meme y a mi hermana Caro, por ser mis hermanos, los quiero.

A mi comadre Viridy y a mi ahijadita Camila. A Ivonne por tantos paros que ya hasta perdí la cuenta. A mis amigos por los momentos de pary y relax tan necesarios, Eliceo (el guardaespaldas), Ramón 1 (Quiwi), Chacón (Israel), Luis (Luisito), a mi fiel amigo y escudero inmortal Rafita.

A Ensenada Spear FishingTM, luego conocido como Cervecería NautilusTM: Uriel (...), Gaspar (Gasparón), Ramón 2 (Ramoncito), Rigo (Tarzan, platanitos, etc...)

A los parsas Ceci, José (Geniardo), excelentes seres humanos que estuvieron de mi parte aun cuando estaba equivocado.

A Karen (mi Flakita), por estar a mi lado, por hacer lo bonito más bonito y apoyarme.

Al Dr. David Rivas Camargo por su paciencia.

Al CPP. por darme la oportunidad de finalizar.

Al CONACIT por la oportunidad de superarme y el apoyo de la beca.

A DIOS 26:1

Tabla de Contenido	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas.....	ix
Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Antecedentes.....	10
Capítulo 3. Área de estudio.....	12
Capítulo 4. Hipótesis.....	14
Capítulo 5. Justificación.....	15
Capítulo 6. Objetivos	
6.1 Objetivo general.....	16
6.2 Objetivos Específicos.....	16
Capítulo 7 Metodología	
7.1.- Materiales y métodos de campo	17
7.2.- Variables abióticas.....	18
7.3.- Metodología matemática.....	18
7.4.- Nomenclatura y unidades de las variables.....	24
Capítulo 8. Resultados	
8.1.- Variables de estudio.....	25
8.2.- Análisis de componentes principales.....	29
8.3.- Modelo alométrico.....	36
8.4.- Calibración del modelo matemático de la tasa de crecimiento para la primera serie de datos comprendida de 1998 a	39
8.5.- Calibración para toda la serie de datos.....	41

Capítulo 9. Discusión	
9.1.- Variables climáticas.....	44
9.2.- Modelo alométrico.....	51
9.3.- Simulación.....	53
Capítulo 10. Conclusión.....	58
10.1 Recomendaciones.....	59
Lista de referencias bibliográficas.....	60

Lista de figuras

Figura		Página
1	Estructura fundamental de un haz de <i>Zostera marina</i>	2
2	El recuadro superior izquierdo muestra la localización geográfica del estero de Punta Banda, en la península de Baja California. El mapa de la izquierda señala la macro localización del Área de estudio (flecha negra). El mapa de la derecha indica la estación de muestreo (punto rojo), y el relieve cuadriculado negro señala las marismas en el estero de Punta Banda, Ensenada, Baja California, México. Mapa modificado de Jiménez Pérez <i>et al.</i> (2009).....	13
3	Representación gráfica de la ley de tolerancia de Shelford (1848)....	19
4	Modelo conceptual a grandes rasgos del modelo de simulación de crecimiento expresado como la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco · haz ⁻¹ · quincena ⁻¹) de <i>Z. marina</i> , la información correspondiente a cada ecuación está explicada en la metodología matemática.	24
5	a: Concentración en el agua intersticial de: nitratos (línea continua) y fosfatos (línea segmentada). b: Concentración en la columna de agua de: nitratos (línea continua) y fosfatos (línea segmentada). Ambas gráficas representan el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda, B. C. México. La escala de tiempo es quincenal.....	26
6	Temperatura in situ y anomalías de temperatura para el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el área de estudio. Las anomalías positivas se presentan en color rojo, en tanto que las anomalías negativas están en color azul. El eje de las ordenadas de la izquierda contiene la escala en °C de las anomalías y el eje de las ordenadas de la derecha la escala en °C de la temperatura in situ.....	27
7	Índice Oceánico El Niño, mostrando las anomalías climáticas de temperatura para los años de 1991 a la primera mitad de 2015.....	28
8	Gráficas quincenales de salinidad, luminosidad, horas de exposición y La tasa de crecimiento por haz (g de peso seco · haz ⁻¹ · quincena ⁻¹), durante el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda Ensenada Baja California, México.....	29

9	Gráfica del análisis de componentes principales mostrando todas las combinaciones de factores, para el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda, las ecuaciones correspondientes a cada factor se encuentran en la parte superior de cada gráfica.....	33
10	a Gráfica del ACP para la zona de estudio en el periodo de 1999 a 2001 con respecto a los componentes principales del factor 1 contra el factor 2: factor 1 $U_1 = 0.84 TINSIT + 0.72NCA + 0.79HEX$, factor 2 $U_2 = 0.88 NINT$. b: Gráfica del factor 1 contra el factor 4: factor 1 $U_1 = 0.84 TINSIT + 0.72NCA + 0.79HEX$) factor 4 $U_4 = 0.87ONI$. Los meses fríos están en color rojo mientras que los cálidos están en color azul. Las dos gráficas señalan la distribución de los años con respecto a sus componentes principales.....	35
11	Análisis clúster de las variables de estudio para el periodo comprendido de agosto de 1999 a marzo de 2001. La figura (b es una ampliación de la figura (a, en la que se puede apreciar mejor la distribución de las variables. El dendograma se realizó mediante distancias euclidianas.	36
12	Tasa de crecimiento por haz calculados con el modelo alométrico para los años 2002, 2003, 2008, 2009, 2010 y 2011.....	37
13	Gráficas de los valores predichos contra los calculados de la variable tasa de crecimiento por haz (g peso seco haz ⁻¹ quincena ⁻¹) para los años 2002, 2003, 2008, 2009, 2010 y 2011, de los resultados modelo alométrico por año. La distribución de los puntos en un ángulo de 45° indica que sí hubo una buena representación de los datos por parte del modelo.....	38
14	Datos medidos y datos calculados de la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot haz ⁻¹ \cdot quincena ⁻¹), para agosto de 1998 a marzo de 2001.....	40
15	Coeficiente de correlación de concordancia (Lin 1989) del modelo para los años de abril de 1998 a diciembre de 2001.....	41
16	Datos medidos y datos calculados de la Tasa de crecimiento para el periodo de abril de 1998 a diciembre de 2001 en el estero de Punta Banda.....	41
17	Simulación vs datos reales de la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot haz ⁻¹ \cdot quincena ⁻¹) de 1998 a diciembre de 2001, en el Estero de Punta Banda.....	42

18	Comparación del modelo de simulación y los datos medidos de . La tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$), con la gráfica de anomalías de ENSO (El Niño Southern Oscillation).....	43
19	Esquema a grandes rasgos del posible comportamiento de la pradera de <i>Z. marina</i> con respecto a la temperatura durante los años 1998 -2001 y el comportamiento normal.....	55

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Máximos mínimos y promedios de las variables medidas en el estero de punta Banda durante el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001.....	25
2	Pruebas estadísticas de homocedasticidad de las variables ambientales del área de estudio y biológica para los meses de agosto de 1999 a marzo de 2001. Realizadas con la aplicación Statistica 7.....	30
3	Correlaciones entre las variables ambientales del área de estudio y biológica durante el periodo de agosto 1999 a marzo de 2001. Significativas con $p < 0.05$ $N=41$	30
4	Factores de Análisis de Componentes Principales, proporción total y varianza explicada de las variables ambientales en el área de estudio y la variable biológica, durante el periodo de muestreo de agosto de 1999 a marzo de 2001 (los valores marcados son >0.600000)	31
5	Parámetros del modelo alométrico, ajustados para cada año de datos y varianza explicada.....	37
6	Coefficiente de correlación de concordancia (Lin 1989) de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$), calculado contra la tasa de crecimiento por haz medida.....	39
7	Comparación de concentraciones de nitratos y fosfatos entre el estero de Punta Banda, Ensenada B. C. México y otras zonas templadas. La tabla se modificó de Lee <i>et al.</i> (2007).....	49
8	Comparación de las constantes alométricas α y β utilizadas en el modelo alométrico (eq. 10) para describir la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) del área de estudio, con otras localidades. Modificada de Solana-Arellano <i>et al.</i> (2014).....	53

Capítulo 1. Introducción

Zostera marina L. es el pasto marino característico de las lagunas costeras de Baja California (Ibarra-Obando, 1985), ocupa grandes zonas costeras del área templada del Norte del Pacífico y del Norte del Atlántico (Short *et al.*, 2007). Al igual que otros ecosistemas, como los bosques de kelp, al ser un productor primario ocupa la base de la trama trófica, por lo tanto los cambios que éste sufra afectarán a sus organismos asociados (Montgomery y Targett, 1992; Downie *et al.*, 2013). Asimismo Hughes *et al.* (2008) señalan la importancia de los pastos marinos como especie fundadora al ser el organismo base que sostiene el desarrollo de muchas otras especies, y al igual que Ellison *et al.* (2005) mencionan que muchas de estas especies están en peligro de extinción con lo cual se da el caso de que una especie de importancia ecológica (*Z. marina*) sirve de hábitat para otras especies protegidas. Un ejemplo del caso anterior sería *Branta bernicla nigricans* o ganso de collar, la cual se distribuye desde Alaska hasta las costas del pacífico de México y llega al estero de Punta Banda y otras lagunas costeras en invierno, a alimentarse y ganar peso para regresar a las costas del Norte y anidar (Ward *et al.*, 2005).

Las praderas de pastos marinos son también consideradas como ingenieros del ecosistema ya que modifican el medio ambiente en el que se encuentran. Esto lo logran atrapando partículas de sedimentos gracias a la forma y propiedades de las hojas y los haces (Figura 1) (Bos *et al.*, 2007). Lo anterior es explicado en detalle por Hemminga y Duarte (2000) quienes exponen en su investigación que las hojas tienen la capacidad de alterar el flujo de agua lo que contribuye a atrapar sedimentos y disminuir el tamaño de grano creando un ambiente menos turbulento y por lo tanto más adecuado para que ciertos organismos se desarrollen. Su calidad de ingenieros del ecosistema también incluye la capacidad de modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio ambiente (Wright y Jones, 2006).

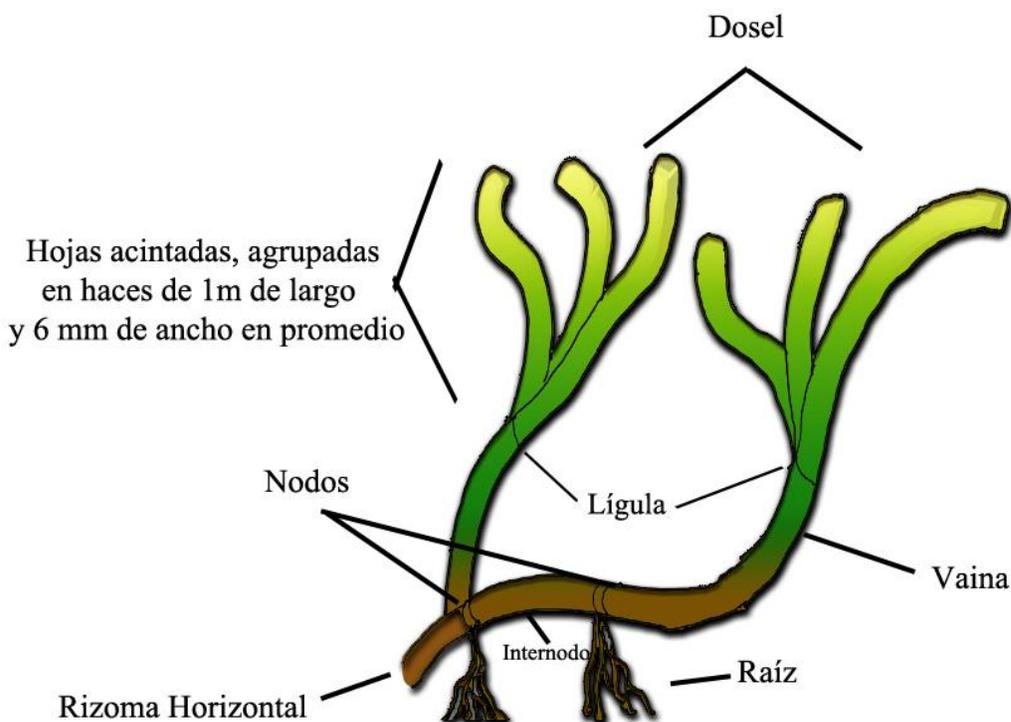


Figura 1. Estructura fundamental de un haz de *Zostera marina*.

Los pastos marinos son una fuente de alimento para grandes organismos como dugongos, manatíes y tortugas marinas y al crear un hábitat tridimensional permiten que muchas especies de peces, como el pez pipa, e invertebrados como los crustáceos, y bivalvos los utilicen como sitios de crianza o refugio durante una parte de su ciclo de vida. Por lo tanto los pastos marinos desempeñan un papel importante en las pesquerías costeras ya que sirven de hábitat para muchos organismos de importancia comercial (Green *et al.*, 2003).

A grandes rasgos, las praderas de pastos marinos tropicales se caracterizan por ser el fósforo un nutriente limitante, mientras que en las zonas templadas por lo regular el nitrógeno es el limitante. Además, es necesario considerar que las praderas están influenciadas por distintos factores, como por ejemplo las descargas residuales y los aportes fluviales (Erftemeijer y Middelburg, 1995; Gras *et al.*, 2003). En el Estero de Punta Banda, el nutriente limitante es el nitrógeno de la columna de agua, al tratarse de un área con poco o casi nulo aporte fluvial y al ser una zona que no ha sido altamente

impactada por el ser humano (Bect *et al.*, 1999; Martínez, 2005). Los pastos marinos se desarrollan en ambientes principalmente oligotróficos por lo tanto llevan a cabo un mecanismo de fijación de nutrientes altamente eficiente ya que a diferencia de las plantas terrestres no solo fijan nutrientes a través de las raíces sino que también son capaces de fijar nutrientes a través de las hojas (Hemminga y Duarte, 2000) y (Duarte, 1990)

Las praderas de pastos marinos tienen una estrecha correlación con los organismos que las habitan y muchas veces dependen de éstos para la dispersión de sus semillas ya que al pasar éstas a través del tracto digestivo de ciertos peces y tortugas son transportadas a lugares distantes y aislados, a los cuales les sería imposible llegar por mecanismos abióticos como corrientes marinas u oleaje (Sumoski y Orth, 2012).

A pesar de que su importancia está a la par de otros ecosistemas como manglares o arrecifes de coral (Green y Short, 2003), los pastos marinos no reciben tanta atención como éstos (Orth *et al.*, 2006). En su empeño por concientizar a la población mundial acerca de la importancia de los ecosistemas Costanza *et al.* (1997) realizó un estudio, basándose en los beneficios que los distintos hábitats aportan a la población (comida, protección, regulación climática, etc.) para posteriormente calcular el valor monetario por hectárea de dichos ecosistemas, obteniendo como resultado que los pastos marinos junto con las macroalgas (19,004 dll. por ha.²) fácilmente triplican el valor por hectárea de los arrecifes de coral (6,075 dll. por ha.²) (Costanza *et al.*, 1997).

Las praderas de pastos marinos no son un ecosistema aislado, ya que exportan materia orgánica hacia los arrecifes de coral en forma de hojas vivas, rizomas y raíces, lo cual ayuda a mantener la gran cantidad de organismos que habitan los arrecifes (Polunin, 1996). Asimismo, exportan materia orgánica fuera de la costa lo cual ha servido para mantener algunas de las mayores pesquerías, como por ejemplo la de algunos camarones peneidos de gran importancia comercial, en los que las larvas pasan la mayor parte de su etapa de desarrollo juvenil en las praderas de pastos marinos, para luego dirigirse hacia la plataforma continental adyacente. Esta pesquería se basa casi exclusivamente en la exportación de juveniles desde las praderas, las cuales cumplen la función de guardería (Ehrhardt *et al.*, 2001).

Una de las conexiones más importantes y recientemente descubiertas de las praderas es la exportación de detritus de hojas de pastos hacia el mar profundo, el cual es uno de los ambientes con poca comida disponible. Aunque las macroalgas también exportan detritus, éste se descompone fácilmente y muy poca cantidad llega al mar profundo; en cambio, el detritus proveniente de las praderas de pastos marinos es más resistente a la descomposición y se ha comprobado, mediante fotografía submarinas, que es capaz de sobrellevar el hundimiento y llegar a fertilizar el lecho marino (Suchanek *et al.*, 1985). Estos vínculos entre ecosistemas son de suma importancia y cuando se rompen, obligan a los organismos a desplazarse y buscar otras fuentes de alimentación, provocando una escases de recursos y daño a los ecosistemas vecinos (Heck Jr *et al.*, 2008).

La preocupación a nivel mundial por proteger y cuidar las áreas naturales ha ido en aumento, motivo por el cual se establecieron las Áreas Marinas Protegidas (AMP). Asimismo, la concientización del ser humano sobre las consecuencias de la intervención antrópica sobre los ecosistemas antes prístinos se hace cada vez más necesaria. Además de la presión originada por la actividad humana en la zona costera las praderas de pastos marinos también han estado sometidas a presiones mayores como el incremento en la intensidad de desastres naturales como huracanes y el calentamiento global. Sin embargo, a pesar de que los pastos han experimentado y superado cambios climáticos desde hace 100 millones de años la rapidez de los cambios actuales es mayor comparados con los cambios graduales a los que han sido sometidos con anterioridad (Orth *et al.*, 2006).

Por otro lado las praderas de pastos marinos son capaces de asimilar ciertos niveles de contaminantes y nutrientes, pero la saturación de nutrientes producida por descargas de aguas residuales y el agua de riego proveniente de zonas agrícolas reducen la capacidad fotosintética de los pastos al aumentar la ocurrencia de epífitas, propiciar florecimientos planctónicos y aumentar la competencia con las macroalgas (Green y Short, 2003). Un claro ejemplo de esta competencia es el de la alga invasora *Gracilaria vermiculophylla*, la cual se ha convertido en un problema a nivel mundial. Su éxito como alga invasora se debe a su resistencia a la herbivoría debida a su baja palatabilidad (Hammann *et al.*, 2013), a la plasticidad para desarrollarse en ambientes con escases al

igual que con exceso de nutrientes (Nejrup y Pedersen, 2010; Abreu *et al.*, 2011) y a su capacidad para competir y prevalecer sobre las praderas de *Z. marina* expuestas a altas temperaturas. Se sabe que a 27°C la mortalidad de *Z. marina* es máxima, no siendo así para el alga, lo que origina un dominio del alga sobre el ya debilitado pasto marino, siempre y cuando las condiciones adversas se sostengan por un largo periodo (Höffle *et al.*, 2011). Cabe mencionar que dicha alga ya ha sido identificada dentro del estero de Punta Banda, en Baja California y en zonas cercanas (Miller *et al.*, 2011; Aguilar-Rosas *et al.*, 2014) lo que indica un peligro latente.

Distintos esfuerzos de restauración se han llevado a cabo para la recuperación de praderas de pastos marinos altamente perturbadas. Entre ellos está el realizado por Leschen *et al.* (2010), donde se menciona que el éxito o fracaso de las repoblaciones, depende principalmente de las características ambientales específicas del sitio escogido para el trasplante. De manera similar Van Katwijk *et al.* (2009), no solo coinciden con la especificidad de las condiciones del sitio, sino que también argumentan la importancia de realizar un estudio sistemático de las características ambientales idóneas para que los nuevos brotes se desarrollen. Estos últimos autores también señalan que el primer punto para un trasplante exitoso es revertir el daño que ha sufrido el medio ambiente; es decir, regresarlo a sus condiciones iniciales previas al deterioro.

Debido a la dificultad que presenta la repoblación de áreas dañadas es importante conocer a fondo el comportamiento de las praderas de *Z. marina* para no solamente repoblar, si no prevenir su pérdida. Esto se puede lograr mediante proyectos de protección que pongan especial cuidado en resguardar las praderas en los períodos en los que se encuentre más debilitada los cuales se pueden identificar mediante el uso de simulaciones matemáticas. En la zona del estero de Punta Banda también se han hecho estudios de repoblación (Cabello-Pasini, 1984). Estos proyectos han sido relativamente exitosos, ya que en el caso de Van Katwijk *et al.* (2009), las praderas desaparecieron después de 8 años de monitoreo. En el proyecto elaborado por Cabello-Pasini (1984) las praderas de *Z. marina* desaparecieron totalmente después de 8 meses y en el proyecto de Leschen *et al.* (2010) ha transcurrido aún muy poco tiempo para asegurar su éxito.

El estero proporciona refugio para al menos 150 especies de peces de los cuales más del 50% son de importancia comercial y es un importante hábitat para 144 especies de aves de las cuales varias están reportadas como en peligro de extinción como el charran mínimo (*Sterna antillarum* Brown). También es lugar de refugio para mamíferos marinos, de los cuales algunos como el delfín común (*Delphinus delphinus*) y la foca vitulina (*Phoca vitulina*) están protegidos bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-059-2001 (Martínez, 2005).

El estero de Punta Banda está considerado como un sitio Ramsar por el convenio de Ramsar de humedales. Un sitio Ramsar es un humedal que cumple con alguno de los 9 criterios de importancia internacional de los cuales 8 son referentes a la biodiversidad (RAMSAR, 2000). El estero de Punta Banda cumple con 5 de los 9 criterios para esta clasificación, dentro de éstos criterios está el ser considerado como un sitio que no se encuentra alterado significativamente por el hombre, es un sitio que alberga especies protegidas importantes para el mantenimiento de la biodiversidad de la región Californiana y es hábitat para dos especies en peligro de extinción, 12 amenazadas y 15 de cuidado especial de acuerdo a la legislación mexicana (Martínez, 2005; RAMSAR, 2007). Cabe mencionar que a pesar de estar considerado como un sitio Ramsar, está sometido a presión antrópica constante por el desarrollo habitacional que lo circunda el cual disminuye el área disponible para la flora y fauna, por las actividades de pesca dentro del estero y por el uso agrícola de los ejidos aledaños, lo cual ha causado impacto negativo sobre el suelo y subsuelo (Martínez, 2005).

Las praderas de *Z. marína* se encuentran sometidas a la influencia de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS en español / ENSO, en inglés) o comúnmente conocido como El Niño. El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre la fase cálida (El Niño) y la fase fría (La Niña) que se manifiesta mediante un enfriamiento o calentamiento anormal de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental, sin embargo, estas variaciones de temperatura superficial se extienden hasta Norte y Sur América y traen consigo alteraciones climatológicas, presentándose a intervalos irregulares que oscilan entre los 3 y 7 años (Maturana *et al.*, 1997). Asimismo la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) toma el Índice Océánico El Niño (ONI) como el estándar para medir las anomalías de ± 0.5 °C,

considerado un efecto El Niño a anomalías mayores a 0.5 °C y efecto La Niña a anomalías menores de 0.5°C, las cuales se mantengan por un periodo de al menos 5 meses.

Además de la presión antrópica, el estero de Punta Banda está sometido a cambios climáticos originados por la influencia de los eventos año El Niño y La Niña y se ha demostrado, que estos dos eventos climáticos tienen influencia sobre distintas variables biológicas de plantas y animales. En el caso de *Z. marina*, se ha visto como el intervalo de plastocrono, el cual se define como el tiempo de formación entre dos hojas consecutivas, se ve afectado negativamente por el aumento de temperatura provocado por el fenómeno climático El Niño, concluyendo mediante análisis de correlación que la temperatura es un factor fundamental para ésta variable (Solana-Arellano *et al.*, 2010). En otro estudio relacionado se encontró que los cambios en la temperatura del agua, la luminosidad, y los nutrientes disueltos explican la variabilidad en el crecimiento de *Z. marina*, encontrándose que de las 3 variables antes mencionadas, la temperatura es probablemente la variable ambiental dominante (Solana-Arellano *et al.*, 2009).

El estero Punta Banda es un antiestuario en el que la salinidad aumenta significativamente de la boca hacia el interior. Sin embargo en un estudio realizado por Bect *et al.* (1999) se plantea la posibilidad de que durante eventos de año Niño fuertes, esta configuración cambie de un comportamiento de laguna costera antiestuarina a estuarina por periodos prolongados de hasta casi un año, lo anterior debido al aumento en las precipitaciones, lo que también podría ocasionar cambios en la concentración de los nutrientes.

También se han estudiado los efectos del fenómeno del niño en bahías cercanas, como es el caso de Bahía San Quintín. Echavarría-Heras *et al.* (2006) estudiaron el efecto de un evento fuerte de El Niño sobre la dinámica de las hojas de *Z. marina* y se encontró que las diferencias en las variables bióticas medidas (largo y ancho de hojas promedio, peso seco, etc.) entre años Niño y años bajo condiciones normales, podrían explicarse a que la temperatura es la variable ambiental de mayor influencia sobre *Z. marina* ya que a mayor temperatura el largo de hoja promedio disminuye,

comprobando así el posible efecto que las anomalías de temperatura el podrían tener sobre la pradera de pastos marinos.

El efecto que los cambios climáticos tienen sobre la pradera de *Z. marina* también ejercen presión sobre los organismos que las habitan, tal es el caso de la branta negra (*Branta bernicla nigricans*). Se ha observado que durante años Niño, la branta negra disminuye drásticamente su tasa de reproducción, comportamiento aparentemente ligado a los efectos que la temperatura tiene sobre las praderas de *Z. marina* (Sedinger *et al.*, 2006).

La mayor parte de la información anterior se conoce gracias a que durante los últimos 35 años se ha intensificado la necesidad de información acerca de los pastos marinos y su contribución a la productividad de los sistemas costeros y estuarinos, permitiendo el desarrollo de varios manuales, y publicaciones (Orth *et al.*, 2006) y culminando con la creación de un atlas mundial de pastos marinos (Green y Short, 2003). Sin embargo, aún existe la necesidad de profundizar en distintos conceptos, como por ejemplo la interacción de las variables biológicas (por ej. La biomasa), con las variables ambientales (la temperatura, la luminosidad, etc.) y las químicas (nutrientes entre otras). Frecuentemente dichas interacciones se dan a nivel local y es necesario monitorear las variables durante un tiempo determinado. El problema radica en decidir cuáles variables monitorear y cuáles no. Usualmente, al principio de cualquier trabajo de investigación se cuenta con un número grande de variables independientes las cuales deben ser sistemáticamente reducidas a un menor y conceptualmente más coherente conjunto de variables (Dunteman, 1989) . Con el actual desarrollo de aplicaciones computacionales y su facilidad para llevar a cabo operaciones algebraicas con matrices, una de las herramientas estadísticas más utilizadas es el Análisis de Componentes Principales o ACP, el cual consiste en construir estos “componentes principales” mediante una combinación lineal de las variables originales, con el objetivo de identificar patrones. Una vez identificados estos patrones, es posible comprimir la base de datos. Es decir, se puede disminuir el número de variables sin pérdida de información sustancial (Smith, 2002). Dicho análisis es el utilizado en este trabajo para discernir entre las variables de mayor peso y las de menor peso, desde un enfoque estadístico.

Las investigaciones biológicas experimentales afrontan distintos problemas, como los problemas éticos implícitos en la manipulación de especies protegidas, los problemas de logística, y las complejas interacciones lineales y no lineales entre las variables que controlan los procesos biológicos. Dichas complicaciones han hecho necesario el uso de herramientas utilizadas usualmente en ciencias como ingeniería y diseño. El uso de dichas herramientas ha permitido implementar técnicas de modelación y simulación computacional en sistemas biológicos con resultados satisfactorios (Peláez y Mejía, 2009). Se define como simulación a la ejecución de un modelo matemático mediante software computacional para obtener la respuesta a las ecuaciones para posteriormente compararlas con los datos reales de sistemas biológicos y así corroborar la exactitud o determinar los errores en la formulación del modelo (Peláez y Mejía, 2009).

Los proyectos de simulación matemática de praderas de pastos marinos permiten tener un panorama general acerca de futuros escenarios climáticos y otros disturbios antrópicos, y gracias a esta capacidad, es posible predecir el comportamiento de las praderas y la respuesta que éstas tendrán con respecto a los cambios en temperatura, luminosidad y nutrientes entre otras variables ambientales. En el pasado ya se han utilizado modelos matemáticos de simulación para localizar hábitats aptos para el desarrollo de praderas de pastos marinos con resultados satisfactorios (Valle *et al.*, 2011).

Se ha comprobado que no solo la luz es importante en el desarrollo de las praderas, sino que también la temperatura es un factor de suma importancia al controlar el crecimiento y distribución de los pastos marinos en algunos sitios geográficos, (McRoy y Helfferich, 1977; Solana-Arellano *et al.*, 2010).

Capítulo 2. Antecedentes

A través del tiempo se han utilizado modelos matemáticos para predecir el comportamiento de las praderas de pastos marinos. Valle *et al.* (2011) compararon dos modelos matemáticos distintos para localizar el hábitat adecuado para el desarrollo de *Z. Marina*, encontrando que cada modelo tiene distinto grado de exactitud y precisión y el uso de uno u otro depende de los resultados que se desean obtener y el fin para el cual serán utilizados. Lo anterior lo comprobaron Downie *et al.* (2013) mencionando además que ciertos modelos son más sensibles mientras que otros realizan una predicción más conservadora con una mayor especificidad, siendo más adecuada la utilización de los modelos más sensibles a los cambios ambientales para fines de protección y conservación.

Ya con anterioridad se ha hecho uso de la técnica de marcado de hojas para modelar el crecimiento y explicar los cambios estacionales en la producción y distribución de *Z. marina* (Kentula y McIntire, 1986; Ibarra-Obando y Huerta-Tamayo, 1987). Se han utilizado las variables ambientales como la temperatura del agua, la irradiancia solar y los movimientos del agua generados por el viento, además de variables fisiológicas, como edad de la planta. Se ha encontrado que la distribución vertical de *Z. marina* puede ser explicada tomando en cuenta las limitaciones de luz, el espacio disponible y la biomasa del rizoma, aunque se menciona la posibilidad de aumentar la sensibilidad de la simulación mediante el uso de datos de producción de semillas (Verhagen y Nienhuis, 1983).

Algunos autores utilizan modelos de simulación matemática para describir los patrones de crecimiento de *Z. marina*, considerando que esta variable se ve modificada principalmente por el efecto que tiene la temperatura para controlar e inhibir la producción y el reclutamiento de nuevos brotes (Bach, 1993), por la atenuación de la luz debido a la fluctuación estacional natural y a la turbidez ocasionada por el viento y las mareas (Kaldy y Lee, 2007) y por la disponibilidad de nutrientes (McRoy y Helfferich, 1977; Zharova *et al.*, 2001).

Aunque se ha mencionado que la luz es la variable más importante en el desarrollo de los pastos marinos, la temperatura también desempeña un papel importante, Kaldy y Lee (2007) mencionan que el efecto y la intensidad que estas dos variables tienen sobre *Z. marina* depende principalmente del sitio geográfico en el cual esté localizada la pradera. En el estudio de Kaldy y Lee (2007) se demuestra que la producción de hojas integrada anualmente de un sitio en el que la variable dominante es la luz y otro en el que la variable dominante es la temperatura, son muy similares, comprobando la plasticidad de la planta y su capacidad de adaptarse a las características del medio ambiente local. Harris (2006) responde varias preguntas acerca de la densidad de las praderas mediante la creación de una pradera virtual para reproducir el medio ambiente en el cual se desarrolla normalmente la pradera, y menciona la evolución que ha tenido el uso de las simulaciones gracias al desarrollo acelerado de programas de computación.

Por lo anterior el uso de las simulaciones como una herramienta matemática confiable para comprobar, y predecir la producción de las praderas de *Z. marina* es viable y depende del grado de exactitud que se requiera y de la información que se desee obtener. Sin embargo acorde con los resultados obtenidos por Kaldy y Lee (2007) y Solana A. (2013) el desarrollo y crecimiento de las praderas marinas está determinado en mayor parte por el área geográfica en el cual se encuentran y están estrechamente ligadas a las características del medio ambiente. Por lo tanto, es necesario realizar una simulación específica para cada área de estudio.

Capítulo 3. Área de estudio

El estero de Punta Banda se encuentra localizado a los 31°43' en su extremo Norte, a los 31°46' en su extremo Sur, a los 116°40' en el límite Oeste y 116°37' en el límite Este. Es un antiestuario con una temperatura promedio máxima en primavera-verano de 26°C y de 18.5 a 21.2°C en otoño-invierno (Celis-Ceseña y Alvarez-Borrego, 1975). En el interior del estero la temperatura del aire tiene una importante influencia sobre la fluctuación diurna de la temperatura del agua (Acosta-Ruiz y Alvarez-Borrego, 1974).

En condiciones normales el estero recibe muy poco aporte de agua dulce por parte de dos arroyos; La Grulla con un área de 980km² y San Carlos con un área de 815km², por lo tanto la evaporación desde la superficie del estero excede la precipitación. Solamente durante periodos cortos e inusuales en invierno, en los que ocurren tormentas, es posible que la precipitación cause que el ingreso de agua dulce exceda la evaporación (Pritchard *et al.*, 1978).

Las mareas en el estero son semidiurnas y ejercen un efecto notable sobre el estero, llegando a movilizar hacia el exterior del estero hasta un 60% del agua. El volumen total de agua varía entre 5,280,000 m³ en bajamar media inferior y 187,180,000 m³ en pleamar media superior. La media del intervalo de mareas es de 1.04m. La velocidad máxima de la corriente es de 1.2ms⁻¹ en la boca y va disminuyendo hacia la cabeza del estero. La profundidad del estero es variable, fluctuando entre 4 y7 m en la boca, dependiendo de la época del año. La profundidad del canal principal va de 6 a 1m, disminuyendo conforme se acerca a la cabeza del estero, que tiene entre 0 y 4 m. (Martínez 2005).

Dentro del estero se pueden distinguir cuatro principales subsistemas ecológicos: bajos lodosos, zonas de marismas, dunas costeras, canales de mareas, zonas de pastos marinos y zona de marismas (Ibarra-Obando y Huerta-Tamayo, 1987; Martínez, 2005)).

Las estaciones de la zona de estudio fueron distribuidas al azar a lo largo de un transecto previamente trazado, que comprendía una línea de aproximadamente 100m de longitud, ubicado a +0.1m del nivel de Bajamar Medio Inferior, procurando cubrir equitativamente toda el área en la cual se desarrolla la pradera de *Z. marina* (Figura 2).

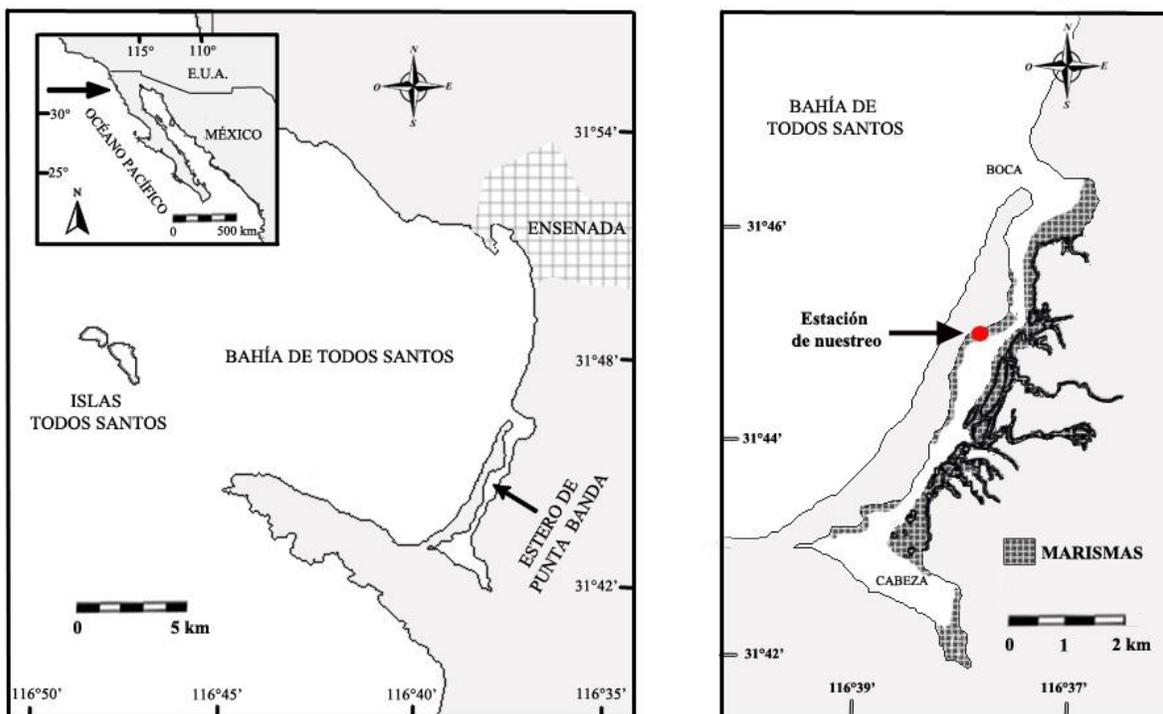


Figura 2. El recuadro superior izquierdo muestra la localización geográfica del estero de Punta Banda, en la península de Baja California. El mapa de la izquierda señala la macro localización del Área de estudio (flecha negra). El mapa de la derecha indica la estación de muestreo (punto rojo), y el relieve cuadriculado negro señala las marismas en el estero de Punta Banda, Ensenada, Baja California, México. Mapa modificado de Jiménez Pérez *et al.* (2009).

Capítulo 4. Hipótesis

La simulación mediante el modelo matemático que representa la tasa de crecimiento por haz, expresada en g peso seco por haz por quincena, describe correctamente el comportamiento de esta variable en la pradera de *Z. marina* en el estero de Punta Banda.

La temperatura, la luminosidad y los nutrientes inorgánicos disueltos en el agua son las variables más importantes para determinar la tasa de crecimiento por haz de *Z. marina* en el estero de Punta Banda.

Capítulo 5. Justificación

Se ha comprobado que para fines de protección y restauración de áreas naturales es necesario el uso de simulaciones que predigan el comportamiento del ecosistema y los efectos que la modificación de las variables más importantes, o de los factores limitantes, puedan tener sobre el ecosistema. Se ha demostrado la especificidad de cada simulación, haciendo necesario realizar simulaciones concretas para cada lugar geográfico, incluyendo las principales variables ambientales de dicho lugar.

Cabe destacar que aunque ya otros investigadores han trabajado con distintas facetas del desarrollo y crecimiento de las praderas de *Z. marina*, tanto a nivel global como regional, aún no hay un modelo matemático que describa de forma precisa el comportamiento del crecimiento de toda la pradera en el estero Punta Banda. En este trabajo se busca establecer las bases para una correcta representación del crecimiento de la pradera de *Z. marina* en el estero de Punta Banda y calibrar los resultados con datos anteriores y posteriores al periodo de tiempo 1998-2001. Se considera que esta información sería de gran ayuda para la protección del lugar, pues se identificarían los periodos en los que la pradera se encuentra más vulnerable a las presiones externas, y de ser posible, se tomarían las medidas necesarias para evitar que ésta experimente un daño irreparable, ya que, como ya se mencionó anteriormente, el estero de Punta Banda es una zona de refugio y crianza para peces de importancia comercial, es una zona de anidación de aves protegidas y es zona de descanso y refugio para varias especies de mamíferos marinos, lo que lo hace un elemento indispensable en la conservación de la biodiversidad (Martínez, 2005) .

Capítulo 6. Objetivos

6.1 Generales

Desarrollar un modelo de simulación de las tasas de crecimiento foliar de *Z. marina* a través del tiempo en el estero de Punta Banda, Baja California con datos colectados *in situ* de las variables abióticas: temperatura, nutrientes, salinidad y luminosidad y la variable biótica, tasa de crecimiento foliar.

6.2 Específicos

1. Encontrar las variables abióticas más importantes que determinen el desarrollo y crecimiento de la pradera de *Zostera marina* en el estero de Punta Banda
2. Proveer un marco conceptual para la simulación y una vez desarrollada ésta, predecir el comportamiento que tendrá la pradera al extender la escala de tiempo.
3. Calibrar el modelo de simulación para las la tasas de crecimiento con datos puntuales de años previos y posteriores a la serie de tiempo de los datos correspondiente a 1999-2001 (1998, 2002-2011).
4. Correlacionar el crecimiento foliar de *Z. marina* en el estero de Punta Banda con años El Niño, La Niña y Año Normal (no El niño, No La Niña).

Capítulo 7. Metodología

7.1 Materiales y métodos

La serie completa de datos para este estudio comprende desde abril de 1998 a diciembre de 2011, con periodos de tiempo donde no se muestreo correspondientes a marzo de 2002 a agosto de 2002, marzo de 2003 a septiembre de 2005 y abril de 2006 a mayo de 2008. La serie de datos utilizada para la simulación corresponde al intervalo comprendido entre 27 de agosto de 1999 y el 23 de marzo de 2001 debido que es el intervalo de tiempo en el cual se tienen mediciones completas de luminosidad, temperatura, concentración de nutrientes en la columna de agua e intersticiales. La simulación se calibró para datos anteriores (abril de 1998 a julio de 1999) y datos posteriores a la simulación (abril 2001 a diciembre de 2011). Se usó el modelo de simulación para obtener predicciones de tasas de crecimiento en los periodos no muestreados.

La técnica utilizada en el área de estudio para obtener los datos de crecimiento por haz (expresado en gramos de peso seco por haz), es una modificación de la propuesta por Kentula y McIntire (1986) para medir cambios en la biomasa referentes a la parte aérea de la pradera de pastos marinos. Dicha técnica se aplicó en muestreos quincenales, los cuales se hicieron sobre una línea de 100 m marcando aproximadamente 20 rizomas con haces a nivel de la lígula con una aguja, para medir su crecimiento. Posteriormente, a los 15 días se recuperaron los haces marcados y un nuevo conjunto de haces era marcado y así sucesivamente a lo largo de todo el periodo de muestreo. Los haces recuperados se transportaron en hieleras al laboratorio en donde se lavaron con agua destilada y se procedió a tomar mediciones de: largo, ancho y peso seco por hoja, número de hojas presentes por haz, crecimiento longitudinal y crecimiento por haz. El crecimiento por haz se obtuvo de cortar la porción marcada desde la lígula hasta la marca realizada con la aguja, se secó y cuantificó el peso seco libre de cenizas de dicha porción.

7.2 Variables abióticas

La salinidad se midió *in situ* con un refractómetro de mano. Se midieron la temperatura y la luminosidad con un sensor LI-COR 1400 de manera continua e integrada, tanto en la columna de agua, como en el aire. Muestras de nitratos y fosfatos, tanto de la columna de agua como en el agua intersticial, fueron tomadas y enviadas a la Universidad de California (UCLA) para obtener la concentración de estos nutrientes mediante la técnica general de análisis de inyección de flujo.

Con base en los datos de las concentraciones de nutrientes intersticiales y de la columna de agua, se calculó la concentración interna de la planta de fosfatos y nitratos mediante las fórmulas posteriormente descritas en la metodología matemática mediante las ecuaciones 5 y 6 . Se obtuvieron las horas de exposición de la pradera al aire y los rayos solares, considerando un nivel de agua de (Bajamar Media Inferior) BMI de +0.35m, mediante datos obtenidos de las tablas de marea proporcionadas por la aplicación Mar V1.0-2011 de CICESE.

Con los datos de 1999 a 2001 de las variables anteriormente descritas, y mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) explicado en la parte de metodología matemática, se identificaron las variables más importantes que describen el crecimiento foliar de *Z. marina*.

7.3 Metodología matemática

Para implementar el modelo se tomaron como referencia los siguientes factores :

a) El principio descrito por Liebig en 1848 referente a los factores limitantes, el cual señala que el crecimiento de un organismo está controlado por el nutriente más escaso o limitante.

b) También se tomó en cuenta la Ley de Tolerancia de Shelford (1911) la cual indica que el éxito de un organismo está basado en una serie de mediciones de la deficiencia o exceso cualitativo o cuantitativo de un factor o combinación de factores y qué tanto se aleja esta medición de la zona óptima. En la figura 3 se observa que entre más se alejan de la zona óptima, el número de organismos decrece, llegando a desaparecer totalmente en la zona de intolerancia.

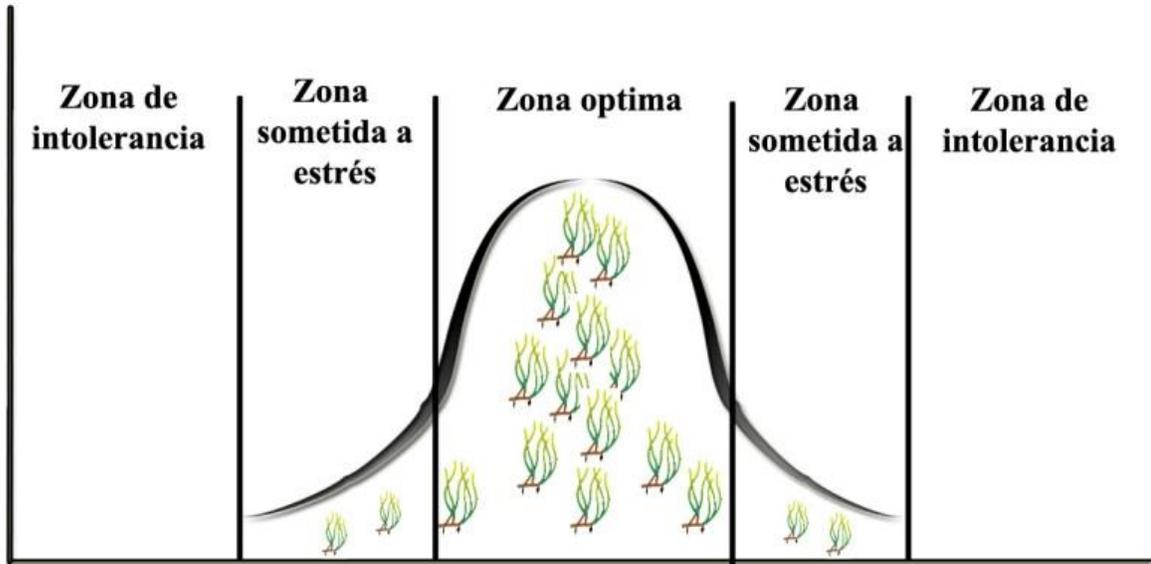


Figura 3. Representación gráfica de la ley de tolerancia de Shelford (1848)

Además, según describe Bach (1993), el crecimiento de los pastos marinos depende principalmente de tres factores luz $f(I)$, temperatura $f_1(T)$, y nutrientes $f(N,P)$, donde N y P representan la concentración de nitratos y fosfatos respectivamente. El modelo descrito por Bach (1993) es uno de los primeros modelos matemáticos en el cual se tomó en cuenta a los nutrientes como parte importante del crecimiento, ya que anteriormente se tomaba solamente a la luz como factor principal. La ecuación utilizada en este trabajo se modificó de Bach (1993) y se describe de la siguiente manera:

$$TCH = f_1(T) \cdot f(N,P) \cdot RD \dots\dots\dots(1)$$

TCH es la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$), $f(I)$ es la función de luz, $f_1(T)$ es la función temperatura, $f_1(N, P)$ representa los nitratos y fosfatos limitantes respectivamente, y RD es la duración relativa del día.

Para calcular la temperatura por área geográfica (2) tomando en cuenta la latitud del estero de Punta Banda se utilizó la siguiente ecuación (Charles-Edwards *et al.*, 1986).

$$T = T_M + T_D \sin[2\pi(t + z - \frac{N}{2})/365] \dots\dots\dots(2)$$

Donde: T_M es la temperatura media anual del lugar de estudio ($^{\circ}\text{C}$), T_D es la amplitud estacional de esta variación, t es el número de días después del primero de enero, el parámetro z depende del número de días después del 1ro de enero que tarda en ocurrir el equinoccio e otoño y N es la latitud del sitio a estudiar. Puesto que los años 2000, 2004 y 2008 fueron bisiestos, se modificó el número de días correspondiente, sumándole 1 día a las variables t y z .

La variable T_D se calculó mediante la siguiente ecuación(Charles-Edwards *et al.*, 1986):

$$\frac{T_D}{T_M} = 0.015 N - 0.10 \dots\dots\dots(3)$$

$$10 < N < 55$$

Donde T_M es la temperatura media anual del lugar de estudio ($^{\circ}\text{C}$), T_D es la amplitud estacional de esta variación y N es la latitud del sitio a estudiar. Esta fórmula es aplicable para latitudes de 10° a 55°N .

Una vez calculada la temperatura correspondiente a la latitud se utilizó la siguiente ecuación para representar el comportamiento de la temperatura dentro del modelo descrita por Short (1980)

$$T = T_m + T_D \cos \left[\frac{2\pi(t-\alpha)}{365} \right] \dots\dots\dots(4)$$

Donde T_m es la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), T_D es la amplitud estacional, t es el tiempo medido en días y α es un parámetro a ajustar.

La representación de los nutrientes dentro del modelo corresponde a las siguientes ecuaciones:

Para calcular la cantidad del nitrógeno intersticial que es absorbido por las raíces se utilizó la siguiente igualdad obtenida de Iizumi y Hattori (1982) tomado de Bach (1993):

$$UR(N) = UR_{max} \frac{C_{SN}}{C_{SN} + K_c} \dots\dots\dots(5)$$

Donde $UR(N)$ es la cantidad de nitrógeno asimilada por las raíces [$(\mu\text{M})^{-1} \text{quincena}^{-1}$], UR_{max} es la cantidad de nitrógeno máxima asimilada por las raíces [$(\mu\text{M})^{-1} \text{quincena}^{-1}$], C_{SN} es la concentración de nitrógeno inorgánico en las aguas intersticiales (μM) y K_c es la constante de Michaelis-Menten (μM), la cantidad de fósforo asimilada por las raíces está descrita por la misma ecuación (5) pero con los parámetros correspondientes para el fósforo.

La cantidad de fósforo de la columna de agua que es absorbido por las hojas está dada por la siguiente ecuación de Iizumi y Hattori (1982) tomada de (Bach, 1993).

$$UE(P) = UER \cdot UER \cdot C_p \dots\dots\dots(6)$$

Donde $UE(P)$ es la cantidad de fósforo asimilada por las hojas [$(\mu\text{M})^{-1} \text{quincena}^{-1}$], UER es la tasa constante (quincena^{-1}), y C_p es la concentración de fósforo inorgánico en el agua (μM). Asimismo la cantidad de nitrógeno asimilada por las hojas está descrita por la misma ecuación (6) pero con los parámetros correspondientes al Nitrógeno.

La concentración interna de nitrógeno se calculó sumando la cantidad de nitrógeno asimilado por las raíces y las hojas. Asimismo, la concentración interna de fósforo se calculó sumando la cantidad de fósforo asimilado por las raíces y las hojas, mediante las ecuaciones anteriores (5 y 6). Dichos resultados se utilizaron en la parte del modelo

correspondiente a los nutrientes mediante las siguientes ecuaciones de Swartzman G. L. y Bentley R. (1979) tomadas de Bach (1993) en las que $f(N)$ y $f(P)$ dependen de la concentración interna de nitrógeno $E(N)$ y fósforo $E(P)$ respectivamente por lo tanto:

$$f(N) = \frac{E[N]-E[N_{min}]}{E[N_{crit.}]-E[N_{min}]} \dots\dots\dots(8)$$

$$f(P) = \frac{E[P]-E[P_{min}]}{E[P_{crit.}]-E[P_{min}]} \dots\dots\dots(9)$$

En la función limitante para el nitrógeno (8) tenemos que $E[N]$ es la concentración interna de nitrógeno (μM), $E[N_{min}]$ es el mínimo de $E[N]$ (μM), y $E[N_{crit.}]$ es el valor crítico de $E[N]$ (μM). Asimismo en la función limitante para el fósforo (9) $E[P]$ es la concentración interna de fósforo (μM), $E[P_{min}]$ es el mínimo de $E[P]$ (μM), y $E[P_{crit.}]$ es el valor crítico de $E[P]$ (μM).

Las hojas de *Z. marina* tienen forma de listón con ancho relativamente constante, razón por la cual se les puede considerar rectangulares, debido a lo cual Duarte (1991), Solana-Arellano *et al.* (1992) Solana-Arellano *et al.* (1998), Echavarría-Heras *et al.* (2010) y Echavarría-Heras *et al.* (2011) han demostrado que sus hojas presentan una relación alométrica por lo que el crecimiento longitudinal o crecimiento nuevo, tiene también un crecimiento alométrico. La tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot $haz^{-1} \cdot quincena^{-1}$) está dado por la siguiente ecuación alométrica:

$$W = \alpha L^\beta \dots\dots\dots(10)$$

Donde W es el es la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot $haz^{-1} \cdot quincena^{-1}$) y L corresponde al largo de la hoja, α y β son parámetros alométricos Solana-Arellano *et al.* (2014) demostraron que los parámetros alométricos de la ecuación (10) además de ser invariantes en el tiempo, son específicos de la zona geográfica. Por lo anterior, podemos suponer que el crecimiento en peso, definido como la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot $haz^{-1} \cdot quincena^{-1}$) de la porción de crecimiento longitudinal, también puede ser definido por la ecuación (10). Debido a que

en muchas ocasiones este crecimiento es muy pequeño, su peso seco es imposible de obtener o está sujeto a error, por lo tanto los pesos secos faltantes o con errores se calcularon mediante la ecuación alométrica (10).

Se utilizó el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) descrito por Lawrence y Lin (1989) para demostrar la relación que existe entre los datos predichos y los datos observados del modelo alométrico y del modelo de simulación matemática de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) siendo el 1 la medida de máxima correlación. Dicho método permite observar que tan lejos se desvían dos series de datos entre sí, calculados por dos métodos distintos u observadores.

$$CCC = \frac{A+B^2-C^2}{A^2+B^2+D^2} \dots\dots\dots(11)$$

Donde A^2 es la varianza del método A , B^2 es la varianza del método B , C^2 es la Varianza de la diferencia entre los métodos A y B y D^2 es la Diferencia promedio de los dos métodos

Se utilizó la aplicación Statistica 7 para calcular los parámetros α y β correspondientes al modelo alométrico (ecuación 10). Se implementaron las rutinas de programación del modelo alométrico y del modelo de simulación matemática de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) utilizando la aplicación informática Matlab-R2013a, y se graficaron los resultados con la aplicación Sigma-Plot11.0 y Excel 2011. El coeficiente de correlación de concordancia de Lin (11) se calculó utilizando la aplicación informática R 3.03 con R-Studio 0.92.501 implementando la paquetería epi.ccc [epiR] versión 0.9-57.

Si consideramos que la tasa de crecimiento de *Z. marina* sigue el siguiente comportamiento: Con poca luminosidad, clima frío y sometida a pastoreo, la pradera de *Z. marina* produce pocos haces de tamaño pequeño y la tasa de crecimiento es mínima. Al aumentar la temperatura, en los meses cálidos, la pradera responde positivamente y aumenta el tamaño de los haces junto con la tasa de crecimiento. Más

sin embargo, si la temperatura continúa aumentando, los haces comienzan a decaer y la tasa de crecimiento disminuye considerablemente (Figura 4).

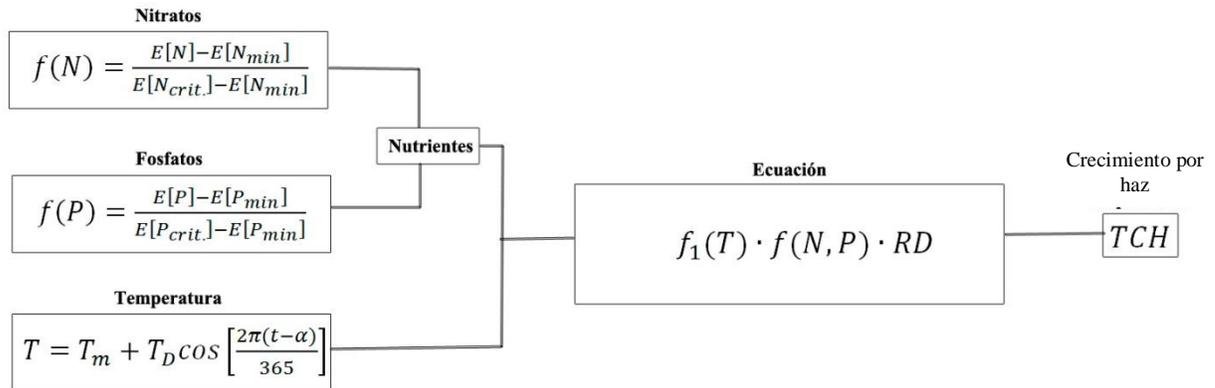


Figura 4. Modelo conceptual a grandes rasgos del modelo de simulación de crecimiento expresado como la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) de *Z. marina*, la información correspondiente a cada ecuación está explicada en la metodología matemática.

7.4 Nomenclatura y unidades para las variables

FINT = Concentración de fosfatos en el agua intersticial (μM)

FCA = Concentración de fosfatos en la columna de agua (μM)

NINT = Concentración de nitratos en el agua intersticial (μM)

NCA = Concentración de nitratos en la columna de agua (μM)

TINSIT = Temperatura *in situ* superficial del agua promedio por quincena ($^{\circ}C$)

TGEO = Temperatura por región geográfica calculada con la ecuación (2) ($^{\circ}C$)

S = Salinidad *in situ* ($^{\circ}/_{\infty}$)

TCH = Tasa de crecimiento por haz ($\text{g peso seco haz}^{-1} \text{ quincena}^{-1}$)

LUM = Luminosidad promedio en la columna de agua por quincena ($\text{fotones} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$)

HEX = Horas de exposición. Cantidad de horas a las cuales está expuesta la pradera al aire y a la luz solar considerando un nivel de agua de BMI de 0.35m

ONI = Índice Oceánico El Niño considerado el estándar por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para medir las anomalías de $\pm 0.5^{\circ}C$, considerado un efecto El Niño a anomalías mayores a $0.5^{\circ}C$ y efecto La Niña a anomalías menores de $-0.5^{\circ}C$, las cuales se mantengan por al menos 5 periodos consecutivos de la media de 3 meses. Los datos aquí utilizados se obtuvieron de la base de datos Extended Reconstructed Sea Surface Data versión 3b (ERSSTv3b).

Capítulo 8. Resultados

8.1 Variables de estudio

La tabla 1 presenta los máximos, mínimos y promedios de las variables que alimentaron el modelo de simulación. Podemos observar que las concentraciones de fosfatos y nitratos de los sedimentos fueron muy parecidas, con un promedio de 3.03 μM y 3.04 μM respectivamente. Sin embargo los fosfatos se mantuvieron relativamente constantes no siendo así los nitratos. De manera similar las concentraciones promedio de fosfatos y nitratos de la columna de agua fueron 0.68 μM para los fosfatos y 0.51 μM para los nitratos, pero en este caso los fosfatos tuvieron una variabilidad aparente ligeramente mayor. La temperatura promedio mensual tuvo un máximo de 25°C y un mínimo de 11°C. Se utilizaron los valores críticos para nutrientes propuestos Short (1980) y Bach (1993).

Tabla 1. Máximos mínimos y promedios de las variables medidas en el estero de Punta Banda durante el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001.

	Máximo	Mínimo	Promedio	Desv.Estandar
TINSIT	25	11	17.34	3
TCH	0.2402	0.03226	0.11	0.05
NINT	15	0.3	2.7	0.29
FINT	19.2	0.53	3.14	0.18
FCA	1.13	0.25	0.68	0.25
NCA	1.35	0.11	0.51	0.27
LUM	960	318.54	601.94	185.7
S	37	32	34.99	1.15
HEX	12.35	7.1	1.76	0.15

La concentración de fosfatos en la columna de agua reflejó un ligero aumento en los meses de septiembre-octubre de 1999 y junio-agosto de 2000 (Figura 5a). Por otra parte, las concentraciones de fosfatos intersticiales se mantuvieron relativamente constantes durante el periodo de muestreo, mientras que las concentraciones de nitratos de los sedimentos se elevaron ligeramente en los meses de agosto-septiembre de 1999 y febrero-marzo de 2000 y las concentraciones de nitratos en la columna de agua se mantuvieron relativamente constantes (Fig. 5b).

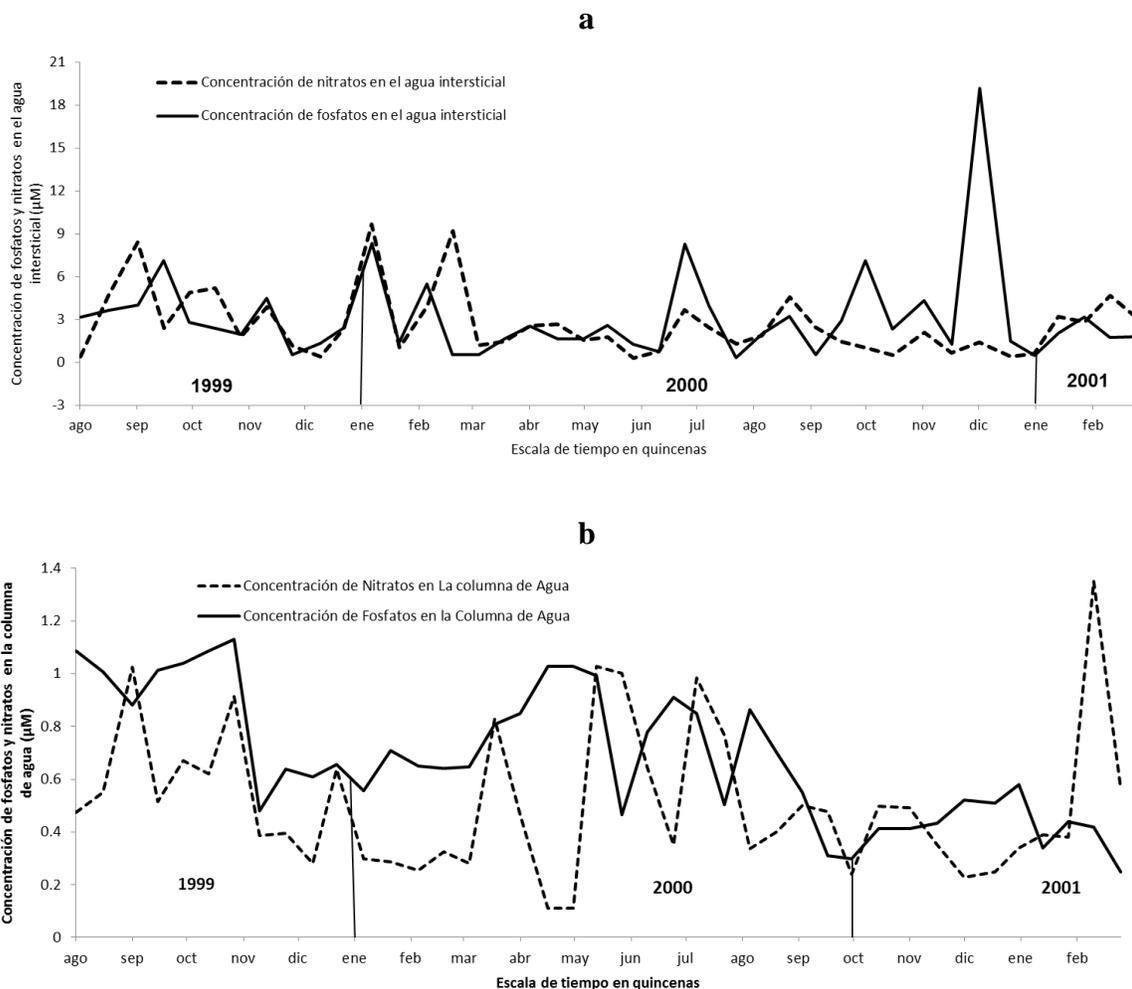


Figura 5. a Concentración en el agua intersticial de: nitratos (línea continua) y fosfatos (línea segmentada), **b** Concentración en la columna de agua de: nitratos (línea continua) y fosfatos (línea segmentada). Ambas gráficas representan el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda, B. C. México. La escala de tiempo es quincenal.

La temperatura *in situ* mostró una tendencia estacional en donde los meses cálidos fueron de mayo a noviembre y los fríos de enero a marzo (Figura 6). Los mínimos y máximos para el año 1998 fueron de 17.5°C a 27 °C, para el año 1999 fue de 15°C a 24°C, para el 2000 fue de 15°C a 27°C, y para el año 2001 fue de 13.6°C a 25°C.

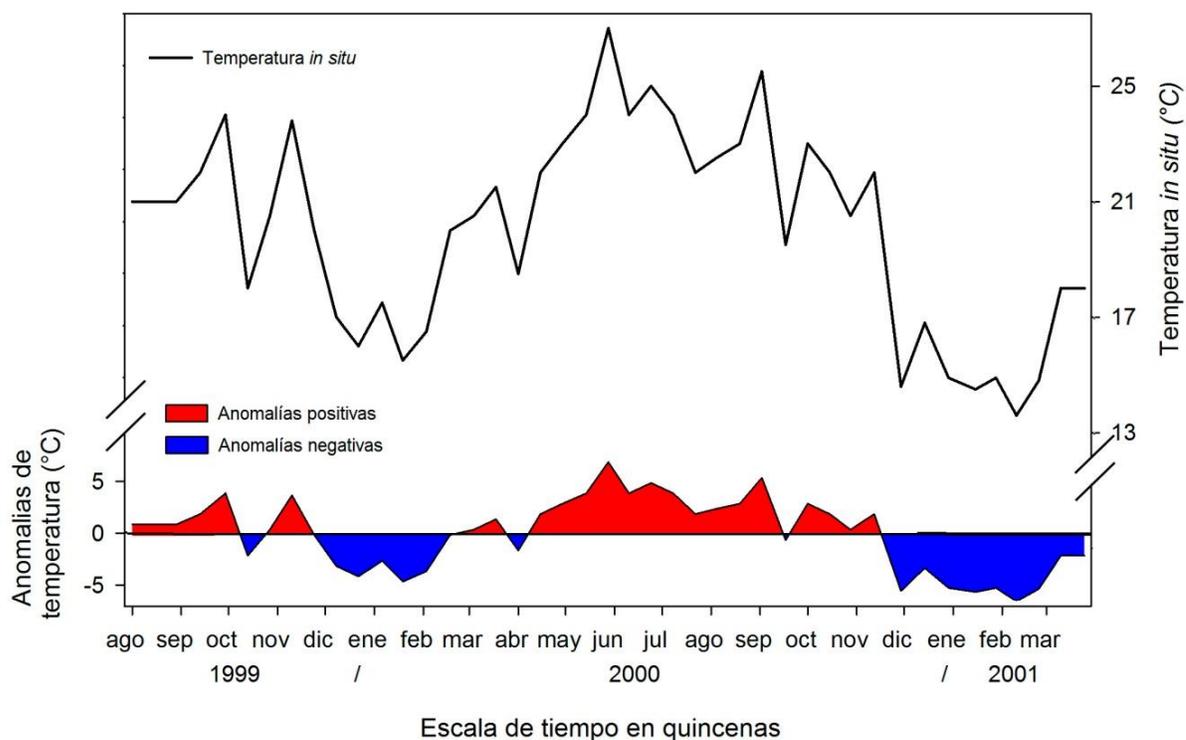


Figura 6. Temperatura *in situ* y anomalías de temperatura para el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el área de estudio. Las anomalías positivas se presentan en color rojo, en tanto que las anomalías negativas están en color azul. El eje de las ordenadas de la izquierda contiene la escala en °C de las anomalías y el eje de las ordenadas de la derecha la escala en °C de la temperatura *in situ*.

En cuanto al ONI se graficaron datos desde 1991 hasta 2015 (aunque los datos utilizados llegan hasta el 2011) y se puede apreciar que el evento La Niña de los años 1999, 2000 y 2001, ha sido el más intenso de los últimos 14 años. Asimismo, el evento El Niño de 1997-1998 ha sido el más intenso y algunos autores como Thom *et al.* (2003) lo catalogan como el más intenso de los últimos 100 años (Figura 7).

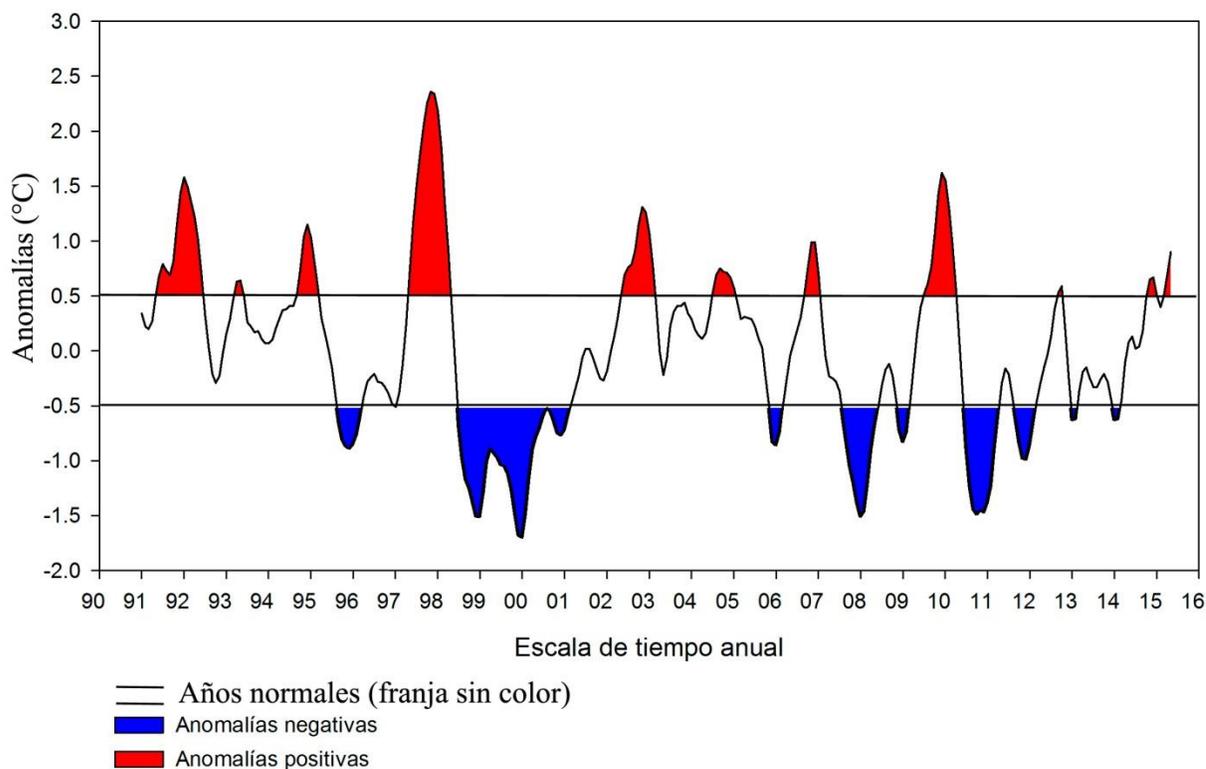


Figura 7. Índice Oceánico El Niño, mostrando las anomalías climáticas de temperatura para los años de 1991 a la primera mitad de 2015.

La tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco haz}^{-1} \text{ quincena}^{-1}$) tuvo 2 máximos, uno en marzo y otro en diciembre, y un mínimo en junio-julio (Fig. 8a). Las horas de exposición variaron, aumentando en los meses de enero-marzo y disminuyendo significativamente en los meses de junio a agosto (Figura 8b). La salinidad y la luminosidad no mostraron un comportamiento estacional claro (Figs. 8c y d).

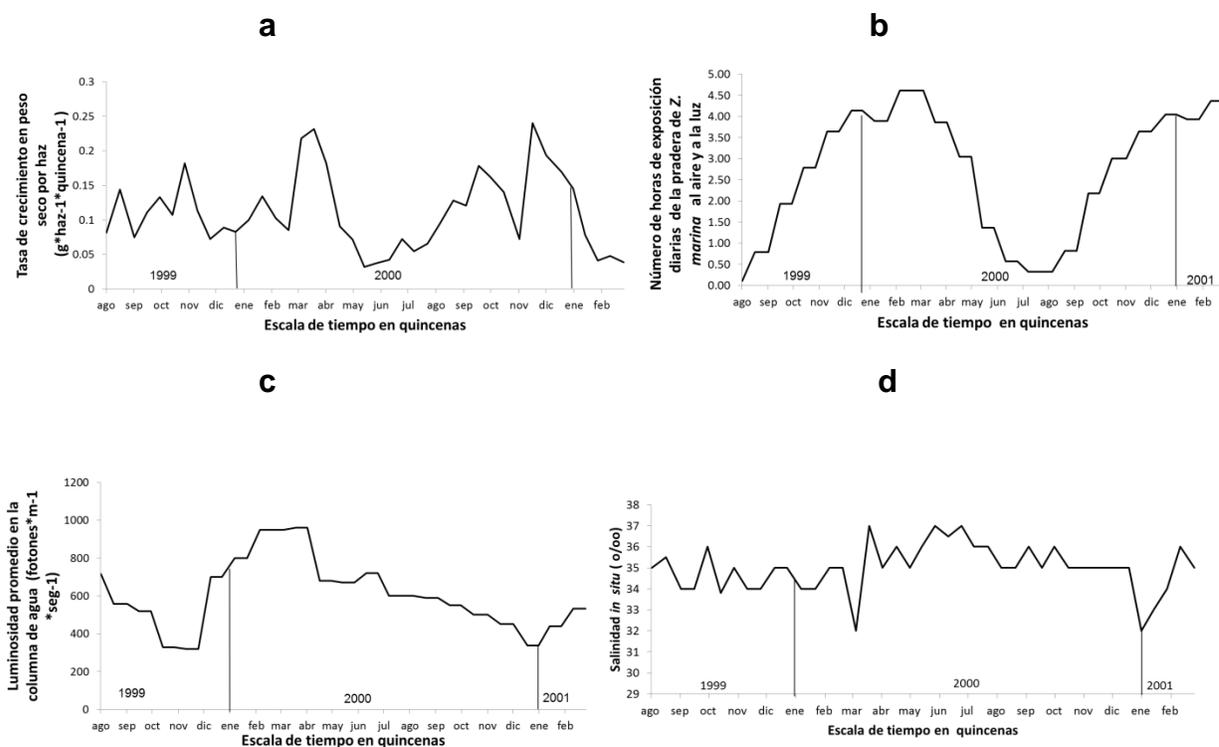


Figura 8. Gráficas quincenales de salinidad, luminosidad, horas de exposición y La tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot haz^{-1} \cdot quincena^{-1}), durante el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda Ensenada Baja California, México

8.2 Análisis de Componentes Principales

En el ACP primero se comprobó el supuesto de homocedasticidad de los datos, las variables nitratos de la columna de agua, fosfato intersticial y luminosidad no cumplieron este supuesto, por lo tanto se aplicó una transformación $\ln(y+1)$ a estos datos (Tabla 2).

A partir del ACP se extrajo 5 componentes principales con una varianza total explicada de aproximadamente 0.8. El primer factor está determinado principalmente por la temperatura del agua *in situ* ($r=0.84$), fosfatos de la columna de agua ($r=0.72$), y las horas de exposición ($r=0.79$) con una proporción de varianza explicada de 0.24. El segundo factor está determinado solamente por la concentración de nitratos intersticiales ($r=0.88$) y explica el 0.14 de la proporción total de la varianza. El tercer factor está representado por la concentración de nitratos en el agua (-0.83), y explica el 0.15 de la proporción total de la varianza. De manera similar, con una proporción total de la varianza explicada de 0.115 el cuarto factor está determinado por el ONI (Índice Oceánico el niño) ($r=0.87$). Finalmente el quinto factor representado principalmente por los fosfatos intersticiales ($r=0.95$) explica una proporción total de varianza de 0.11. Con ésta información se construyó la ecuación de los factores principales: $U_1 = 0.84 TINT + 0.72 FCA + 0.79 HEX$, $U_2 = 0.88 NINT$, $U_3 = 0.61 TCH - 0.83 NCA$, $U_4 = 0.87 ONI$, $U_5 = 0.95 FINT$. Cabe destacar que ni la luminosidad ni la salinidad se encuentran representada en estos factores (Tabla 4).

Tabla 4. Factores de Análisis de Componentes Principales, proporción total y varianza explicada de las variables ambientales en el área de estudio y la variable biológica, durante el periodo de muestreo de agosto de 1999 a marzo de 2001 (los valores marcados son >0.700000)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
TCH	-0.240952	0.368297	-0.619474	0.119709	0.056984
TINSIT	0.847085	0.155573	0.158328	0.048046	-0.141775
FCA	0.726778	0.163460	-0.135885	-0.392092	0.226603
FINT	-0.032483	0.066532	-0.019888	0.054061	0.958736
NCA	0.063017	0.211382	0.836724	-0.094764	-0.039367
NINT	-0.027218	0.884018	0.168250	-0.059971	0.136277
HEX	0.799889	-0.375799	0.264324	0.169120	-0.066959
ONI	0.031914	-0.006220	-0.082280	0.871684	0.083780
LUM	0.457873	0.556007	-0.173408	0.293040	-0.243904
S	0.490649	0.132007	0.529160	0.312278	0.137594
Var. Expl.	2.400808	1.484995	1.542810	1.157699	1.103916
Prp.Totl	0.240081	0.148500	0.154281	0.115770	0.110392

Para dilucidar qué variables explican la tasa de crecimiento, se graficaron solamente los componentes de los factores que no contienen esta variable. Por lo tanto, se excluyó el

componente principal o factor 3, ya que la relación entre TCH y nitratos es clara al encontrarse los dos en el mismo factor 3.

En la figura 9a (factor 1 contra el factor 2) podemos observar que la tasa de crecimiento está explicada por ambos factores de igual manera. Sin embargo, la temperatura afecta la tasa de crecimiento de manera negativa. Esto indica que la tasa de crecimiento por haz está igualmente determinada por el factor 1 ($U_1 = 0.84 TISIT + 0.72FCA + 0.79HEX$) y el factor 2 ($U_2 = 0.88 NINT$).

La figura 9b, factor 1 contra factor 4, indica que la tasa de crecimiento está determinada solamente, y de manera negativa, por el factor 1 ($U_1 = 0.84 TINSIT + 0.72NFCA + 0.79HEX$) y el mismo efecto se encuentra en la figura 9c.

Por otro lado la figura 9d, factor 2 contra factor 4, muestra que la tasa de crecimiento está completamente determinada por el factor 2 ($U_2 = 0.88NINT$) y lejos del factor 4 ($U_4 = 0.87ONI$) apoyando lo explicado por la figura 9a y 9b.

La figura 9e, en la cual se grafica el factor 2 ($U_2 = 0.88 NINT$) contra el factor 5 ($U_5 = FINT$), se observa que la tasa de crecimiento está completamente determinada por el factor 2 correspondiente a la concentración de nitratos intersticiales y lejos del ONI apoyando lo explicado por la figura 9a y 9c.

Finalmente, en la figura 9f, correspondiente a la gráfica del factor 4 ($U_4 = 0.87ONI$) contra el factor 5 ($U_5 = 0.95 FINT$), se observa que la tasa de crecimiento no está determinada por ninguna de las variables que componen estos factores.

El análisis de las gráficas de la figura 9, correspondientes al ACP, indica que la tasa de crecimiento de haces de *Zostera marina* está determinada principalmente por la temperatura del agua, las horas de exposición al aire, los fosfatos en la columna de agua y los nitratos intersticiales.

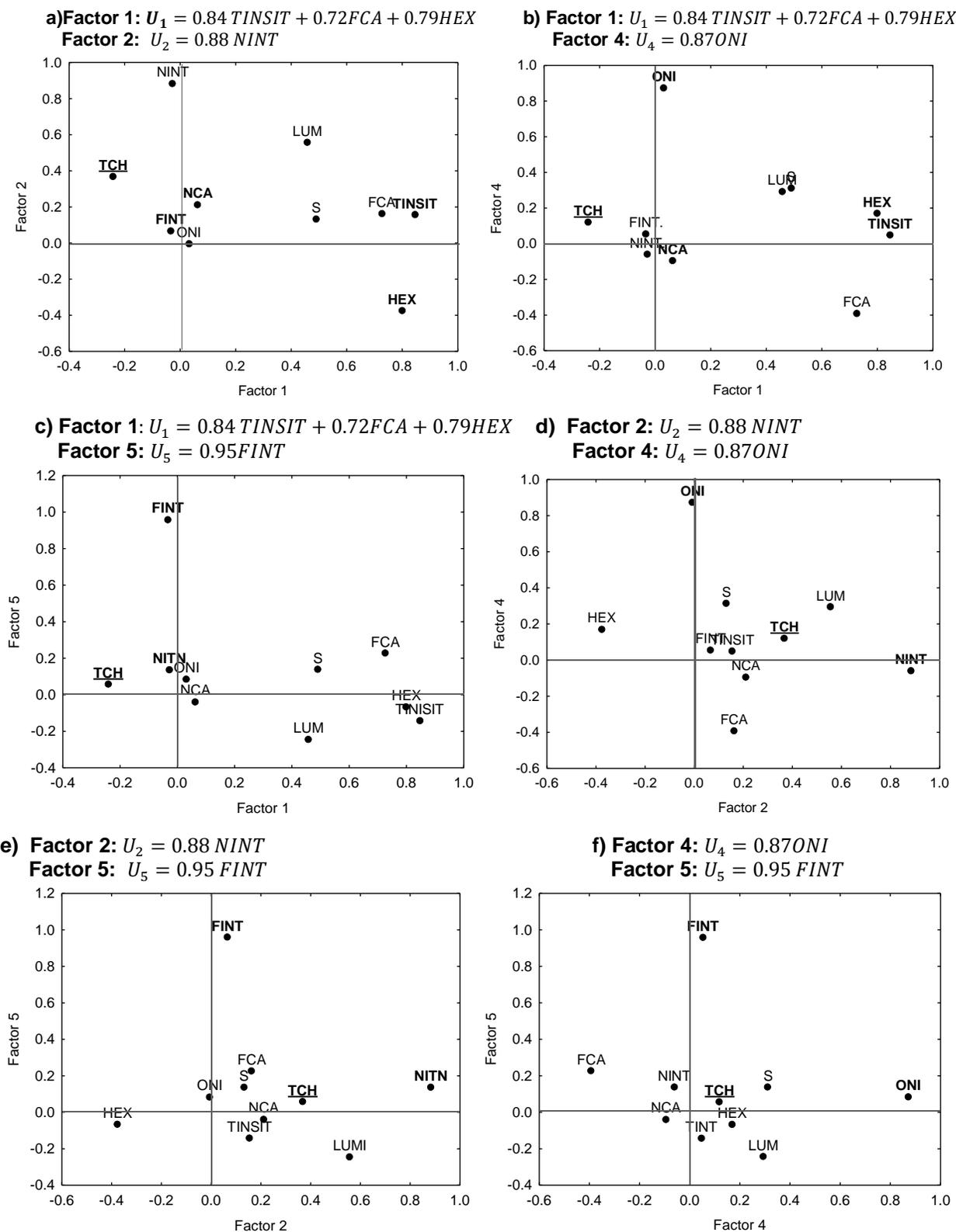


Figura 9. Gráfica del análisis de componentes principales mostrando todas las combinaciones de factores, para el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001 en el estero de Punta Banda, las ecuaciones correspondientes a cada factor se encuentran en la parte superior de cada gráfica.

La figura 10 representa la tasa de crecimiento foliar a través de los años con respecto a los componentes principales del factor 1 contra el factor 2 (10a) y el factor 1 contra el factor 4 (10b) ya que son los componentes que por sí solos explican la mayoría de la varianza. Asimismo, se observa que los meses cálidos se agrupan a la derecha y los fríos a la izquierda. Los meses fríos del año 1999 se dirigen hacia el conjunto de meses cálidos, posiblemente por la influencia del año El Niño de 1998. Los meses cálidos de los años 2000 y 2001 se encuentran cerca del conjunto de los meses fríos probablemente por la influencia del año La Niña 2000(10 a y b). Se observa también que el año 2001 probablemente influyó de forma negativa a la temperatura *in situ*, los fosfatos de la columna de agua, las horas de exposición y los nitratos intersticiales (10a). En cuanto al ONI se observa que el año 1999 (año el niño) lo influyó de forma positiva(10 b).

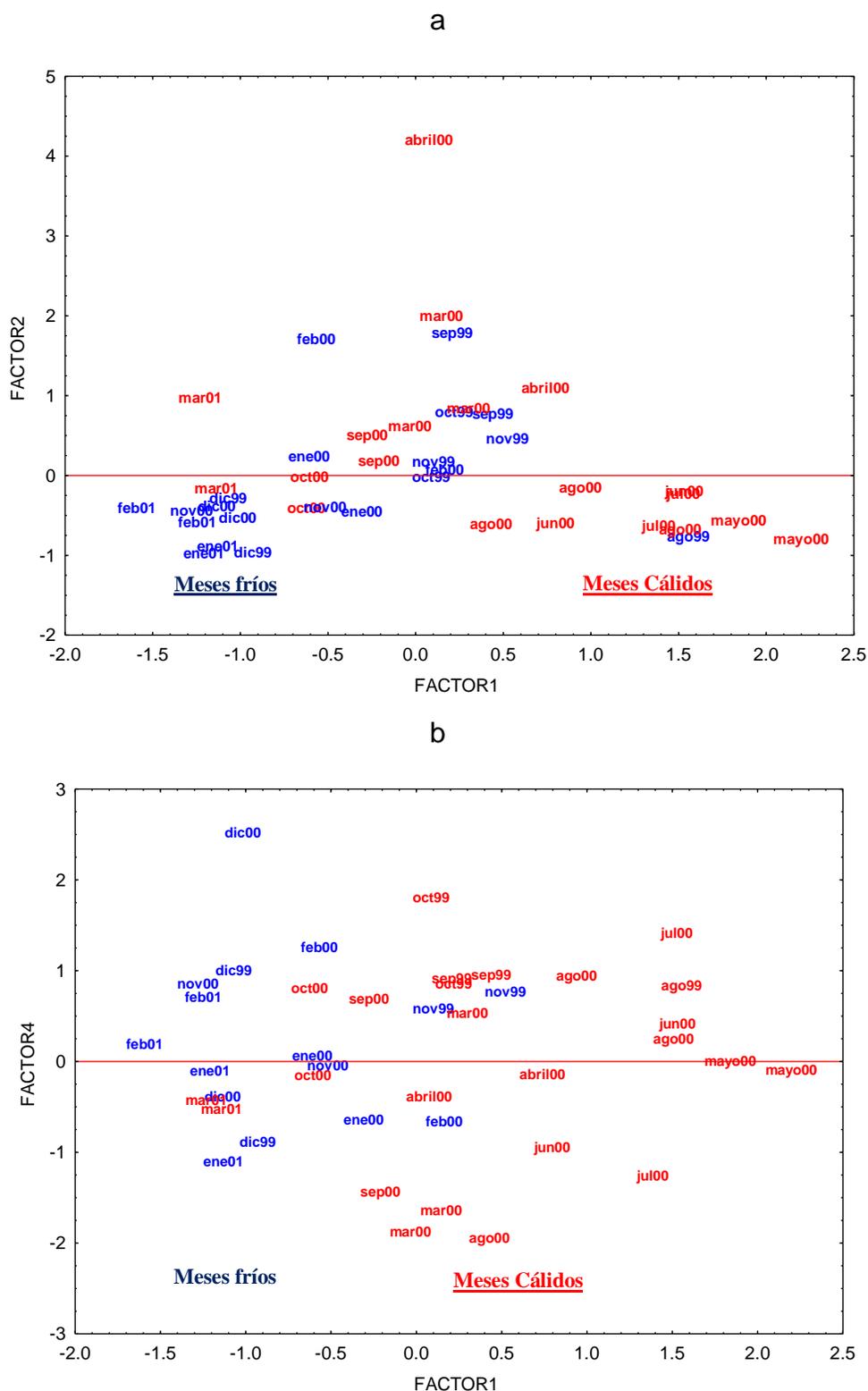


Figura 10. a: Gráfica del ACP para la zona de estudio en el periodo de 1999 a 2001 con respecto a los componentes principales del factor 1 contra el factor 2: factor 1 $U_1 = 0.84 TINSIT + 0.72NCA + 0.79HEX$, factor 2 $U_2 = 0.88 NINT$. b: Gráfica del factor 1 contra el factor 4: factor 1 $U_1 = 0.84 TINSIT + 0.72NCA + 0.79HEX$ factor 4 $U_4 = 0.87ONI$. Los meses fríos están en color rojo mientras que los cálidos están en color azul. Las dos gráficas señalan la distribución de los años con respecto a sus componentes principales.

Debido a que las correlaciones entre las variables no fueron tan altas como se esperaba y para corroborar los resultados del ACP, se realizó un análisis de clúster mediante distancias euclidianas, encontrando que efectivamente la luminosidad se encuentra apartada del resto del conjunto de variables (Figura 11 a) y la salinidad posiblemente esté representada por la temperatura. Sin embargo se conforma un conjunto de variables en el que la tasa de crecimiento está asociada al ONI, a los fosfatos intersticiales, a las horas de exposición, los nitratos y los fosfatos en la columna de agua (Figura 11b).

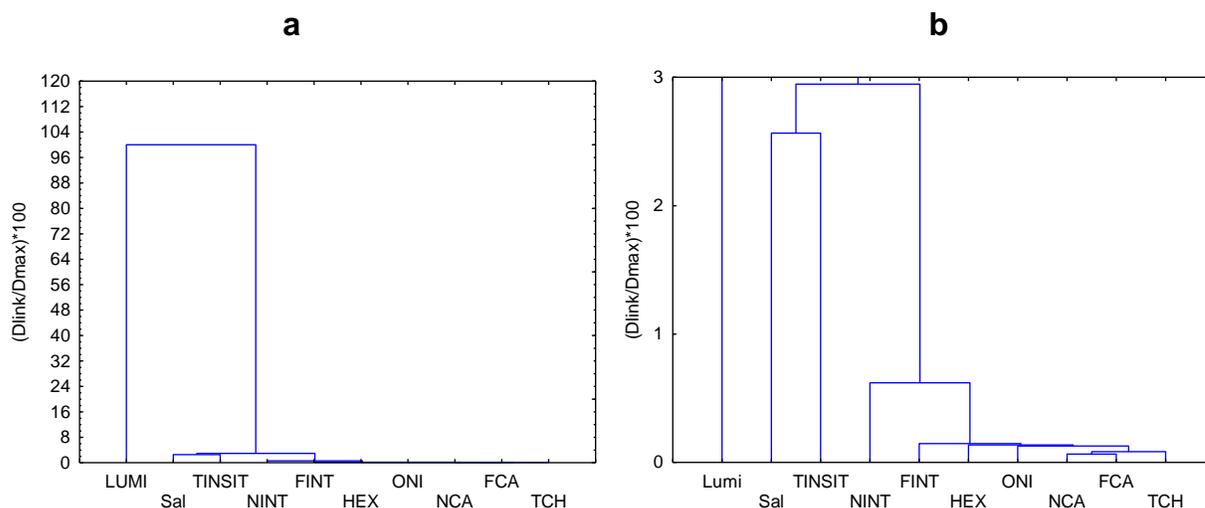


Figura 11. Análisis clúster de las variables de estudio para el periodo comprendido de agosto de 1999 a marzo de 2001. La figura b es una ampliación de la figura a, en la que se puede apreciar mejor la distribución de las variables. El dendograma se realizó mediante distancias euclidianas.

8.3 Modelo alométrico

Cómo ya se mencionó en la metodología, debido a la arquitectura de las hojas de *Z. marina* éstas presentan una relación alométrica. Debido a que algunas hojas fueron pastoreadas y solo se tenía el crecimiento longitudinal neto de algunas de ellas en un intervalo de tiempo, se calculó su tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) y el de algunas hojas nuevas mediante el modelo de crecimiento alométrico de la ecuación 10. La figura 12 representa la gráfica de la tasa de crecimiento por haz calculados con el modelo alométrico para los años 2002, 2003,

2008, 2009, 2010 y 2011, en la cual se observa que los años 1999 a 2001 tuvieron una tasa de crecimiento por haz mayor que el resto de la serie de tiempo.

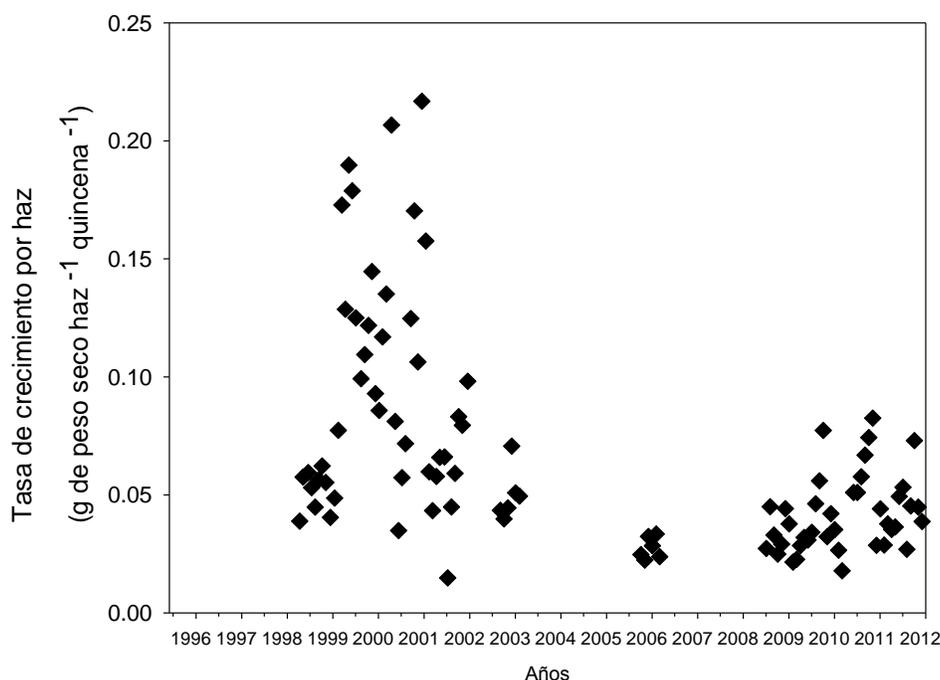


Figura 12. Tasa de crecimiento por haz calculados con el modelo alométrico para los años 2002, 2003, 2008, 2009, 2010 y 2011.

El análisis alométrico depende de los parámetros α y β los cuales fueron ajustados para cada año. Los valores de los parámetros ajustados con sus respectivos datos observados y la varianza explicada se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros del modelo alométrico, ajustados para cada año de datos y varianza explicada.

Año	α	β	r	Var. expl
2002	0.000016	1.303144	0.91321	83.3%
2003	0.000014	1.316293	0.96495	93.1%
2008	0.00001	1.255511	0.93409	89.2%
2009	0.000008	1.447967	0.94551	89.3%
2010	0.000008	1.409529	0.91663	84.2%
2011	0.000009	1.4113142	0.89459	84.9%

Asimismo las gráficas de los valores predichos vs los calculados del coeficiente de correlación de Lin (1989) nos muestran la buena correspondencia de los ajustes, ya que se distribuyen agrupándose principalmente en un ángulo de 45° (Figura 13).

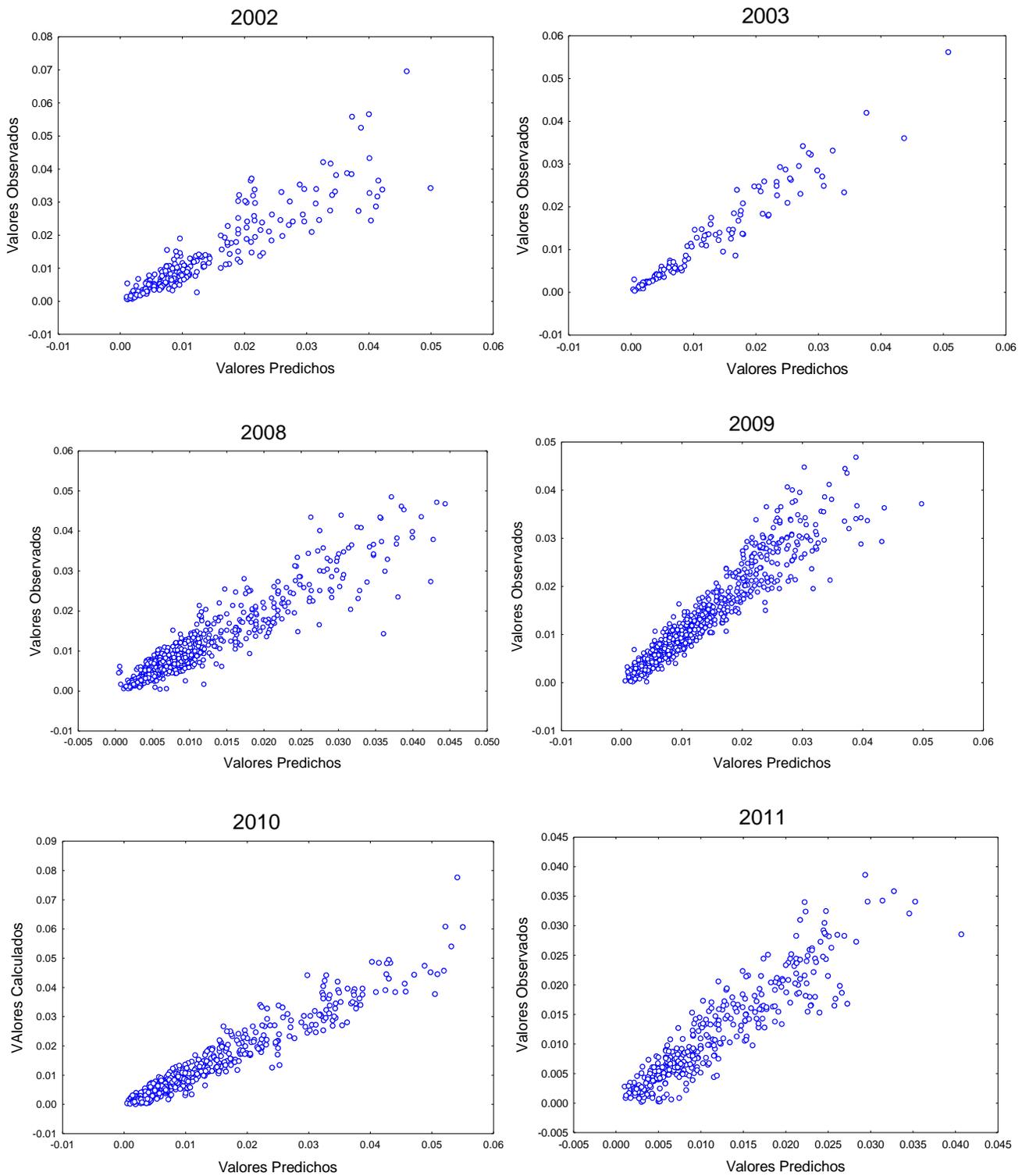


Figura 13. Gráficas de los valores predichos contra los calculados de la variable tasa de crecimiento por haz ($\text{g peso seco haz}^{-1} \text{ quincena}^{-1}$) para los años 2002, 2003, 2008, 2009, 2010 y 2011, de los resultados modelo alométrico por año. La distribución de los puntos en un ángulo de 45° indica que sí hubo una buena representación de los datos por parte del modelo.

Se comprobó la exactitud de los valores calculados con el modelo alométrico mediante el coeficiente de correlación de concordancia de Lin (1989) descrito en la ecuación 11, obteniendo los valores de la tabla 6 los cuales indican una muy buena aproximación.

Tabla 6. Coeficiente de correlación de concordancia (Lin 1989) de la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot haz⁻¹ \cdot quincena⁻¹), calculado contra la tasa de crecimiento por haz medida.

Año	Coeficiente de correlación de concordancia	Límites superior e inferior
2002	0.86	0.82 – 0.87
2003	0.77	0.69 - 0.84
2008	0.89	0.88 - 0.912
2009	0.94	0.93 - 0.95
2010	0.89	0.87 - 0.91
2011	0.89	0.87 - 0.91

8.4 Calibración del modelo matemático de la tasa de crecimiento para la primera serie de datos comprendida de 1998 a 2001.

Se aplicó una modificación del modelo descrito por Bach (1993), para la tasa de crecimiento por haz (g de peso seco \cdot haz⁻¹ \cdot quincena⁻¹). Dicho modelo toma como referencia valores mínimos, máximos y críticos. La simulación fue alimentada con 41 datos quincenales para todas las variables de agosto de 1999 a marzo de 2001. El modelo se calibró con las tasas de crecimiento *in situ* de 36 muestreos quincenales previos a agosto de 1999 y 122 muestreos posteriores a esta fecha sumando un total de 158 quincenas de muestreo. Además se interpoló para 120 quincenas, por lo que la simulación representa aproximadamente 13 años

La primera parte del modelo consiste en utilizar las variables identificadas como las más importantes en el análisis de componentes principales y el análisis de conglomerado para aplicarlas al modelo. En la figura 14 se observa el modelo correspondiente al periodo de tiempo comprendido entre el 27 de agosto de 1999 y el 23 de marzo de 2001. Para esta primera parte se utilizaron datos de ONI (Índice Oceánico El Niño) en la parte de temperatura del modelo, debido a que eran los que mejor se ajustaban.

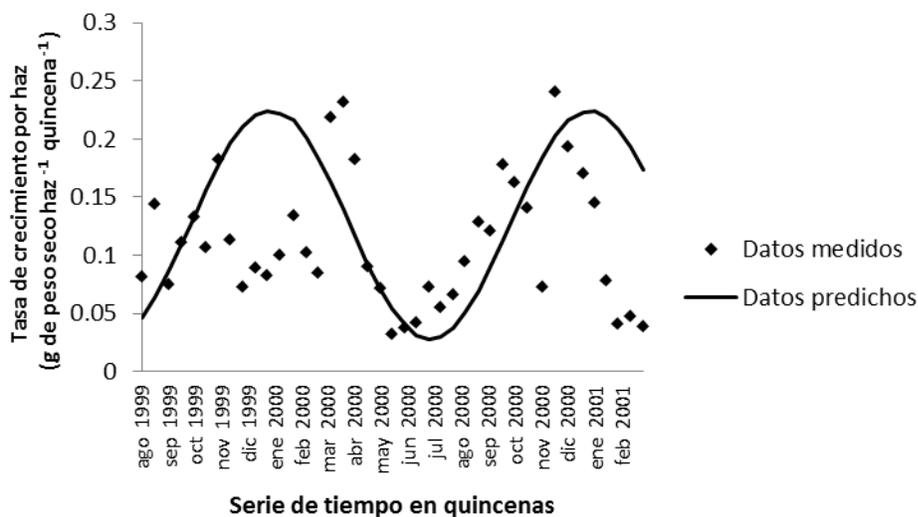


Figura 14. Datos medidos y datos calculados de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$), para el periodo de agosto de 1998 a marzo de 2001

Se comprobó la exactitud de la simulación mediante el coeficiente de correlación de concordancia de Lin (1989) descrito en la ecuación 11, al 95% de intervalo de confianza obteniendo un valor de 0.64. En la gráfica de la dispersión de los datos se aprecia la representación de los datos reales por parte del modelo, y que tanto se alejan los datos calculados de una línea de 45° (Figura 15)

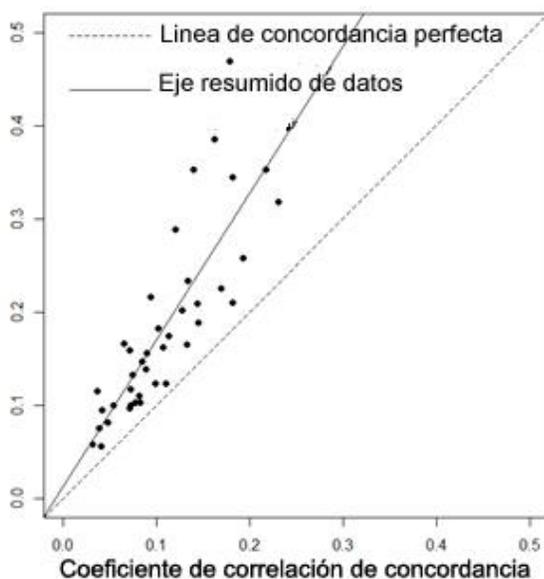


Figura 15. Coeficiente de correlación de concordancia (Lin 1989) del modelo para los años de abril de 1998 a diciembre de 2001.

Posteriormente se corrió la simulación hasta el 8 de abril de 1988 en el límite inferior y hasta el 28 de diciembre de 2001 en el límite superior (Figura 15), con los mismos datos del ONI (Índice Oceánico EL Niño) observando un desajuste al principio y al final de la gráfica y una disminución en el índice de concordancia de Lin (1989) descrito en la ecuación 11 a 0.58. Se observa que los datos de ONI se ajustan de forma correcta para el primer intervalo de tiempo (1988-2001) el cual está asociado con un evento La Niña fuerte.

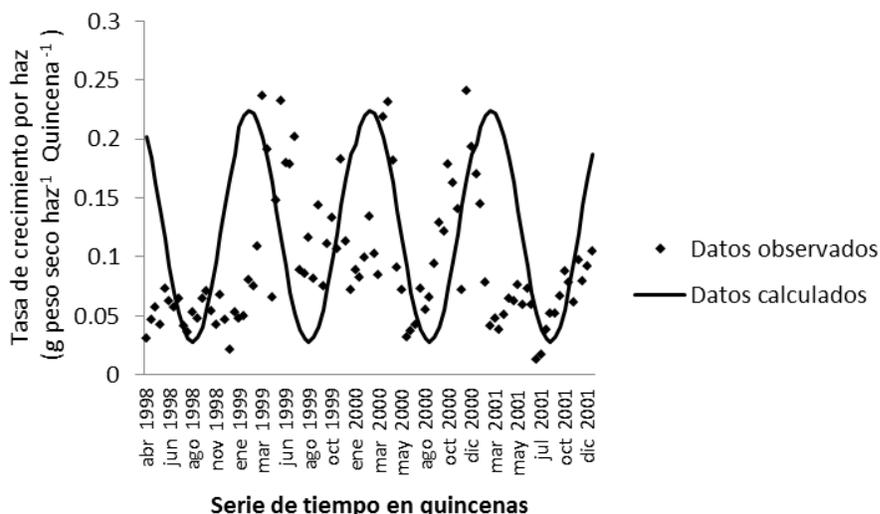


Figura 16. Datos medidos y datos calculados de la Tasa de crecimiento para el periodo de abril de 1998 a diciembre de 2001 en el estero de Punta Banda

8.5 Calibración para toda la serie de datos

Una vez completada la serie de datos con la ecuación alométrica, se calibró el modelo para toda la serie de datos comprendida de 1998 a 2013, encontrando que la primera parte, correspondiente a los años 1998 a 2001, tenía un comportamiento distinto al resto de la serie de datos (Figura 17), encontrando que de la tasa de crecimiento por haz para estos años es de 0.23 (g de peso seco \cdot haz⁻¹ \cdot quincena⁻¹), en comparación con el máximo de 0.06 para el resto de los años, lo que indica una diferencia de casi 4 veces mayor en el año 2000. Por lo tanto para ésta nueva simulación se utilizaron datos de temperatura (ONI) calibrados por año. Asimismo, se utilizaron los valores de nutrientes ya obtenidos en la primera parte de la simulación (agosto de 1999 a febrero de 2001).

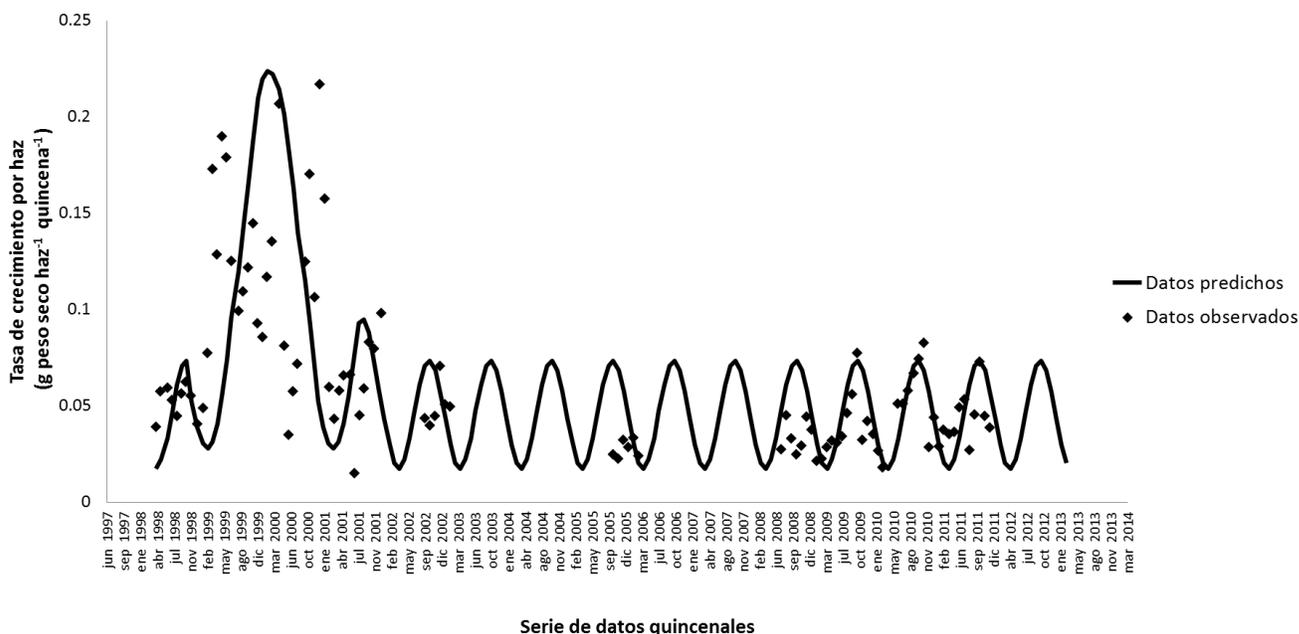


Figura 17. Simulación vs datos reales de la tasa de crecimiento por ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) para los años de 1998 a diciembre de 2001, en el Estero de Punta Banda

Se calculó el índice de Lin (ecuación 11) para el intervalo de julio de 2009 a septiembre de 2011 (Figura 18), debido a que en ese intervalo se tienen datos continuos medidos (sin datos faltantes) de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$). Se obtuvo un valor de 0.67, parecido al obtenido para el intervalo de abril de 1998 a diciembre de 2001.

Siguiendo con el razonamiento anterior se puede observar en la figura 18 que los datos de finales 1998 a 2001 corresponden a un evento La Niña fuerte para el período diciembre de 1998-1999 en los que las anomalías de temperatura son mayores a 0.5.

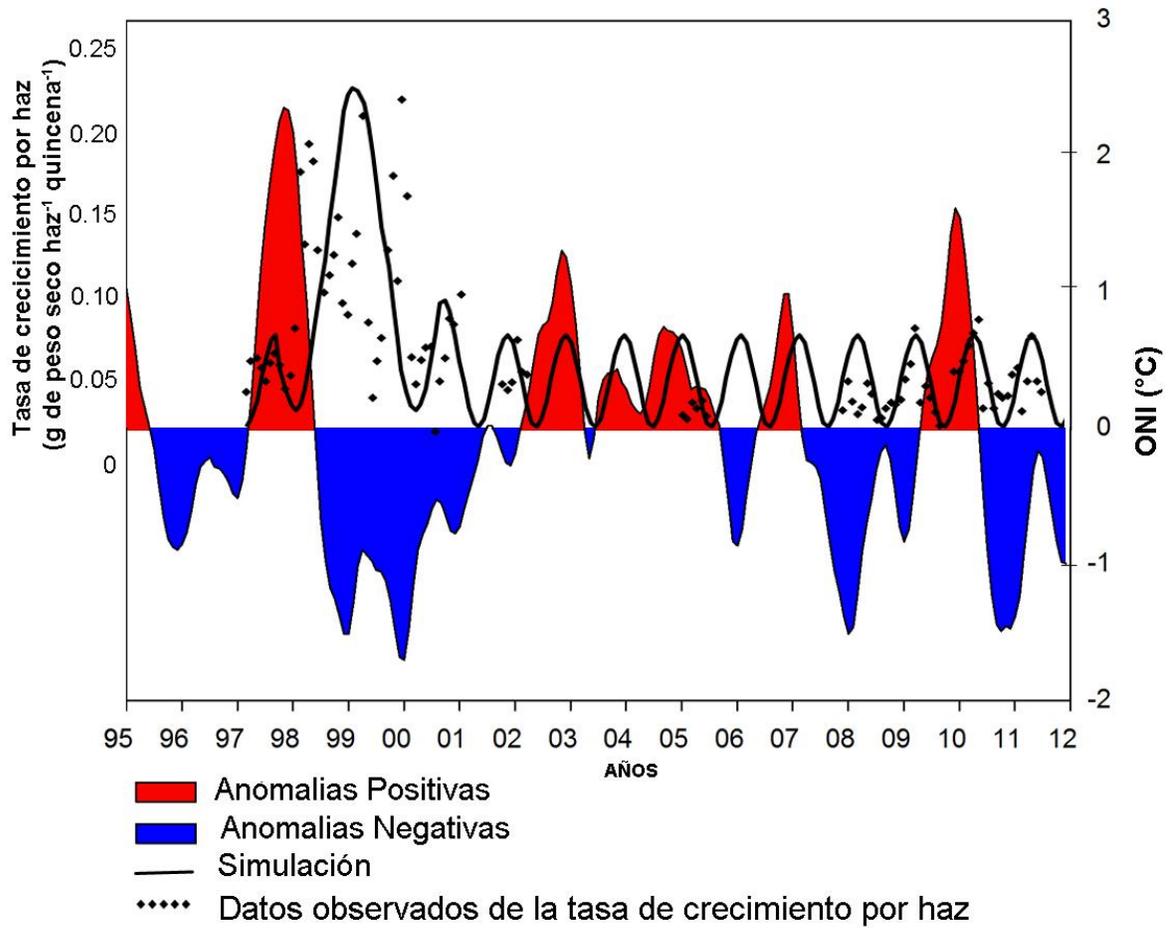


Figura 18. Comparación del modelo de simulación y los datos medidos de la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$), con la gráfica de anomalías de ENSO (El Niño Southern Oscillation).

Capítulo 9. Discusión

9.1 Variables Climáticas

En este trabajo, se recabaron datos de temperatura del agua, fosfatos, nitratos y horas de exposición de la pradera al aire y a la luz, salinidad y luminosidad y ONI (Índice Oceánico El Niño), durante el periodo de agosto de 1999 a marzo de 2001. El propósito era identificar cuáles de estas variables representan mejor el crecimiento de los haces de *Z. marina*, para posteriormente tomar dichas variables y alimentar un modelo de simulación para predecir el comportamiento de la pradera basándonos en la tasa de crecimiento por haz. Mediante un Análisis de Componentes Principales se comprobó que las variables más importantes que determinan el crecimiento de *Z. marina* en el estero de Punta Banda son la temperatura del agua, los nutrientes, y las horas de exposición de la pradera al aire y a la luz solar. Los resultados obtenidos se explicarán a continuación:

En el presente estudio se encontraron resultados de temperatura del agua con valores de 11-25 °C y 17.34°C en promedio. La temperatura del agua mínima para el año 1998 es de 17.5°C y la máxima de 27°C, las cuales son más altas que las encontradas por Cabello-Pasini *et al.* (2002) para el estero de Punta Banda: 16-22°C durante 1998. La diferencia podría deberse a que la mayoría de sus datos provienen de mediciones satelitales y según datos de la NOAA (Figura 6), durante el periodo de mayo de 1997 a junio de 1998, se registró un fenómeno El Niño fuerte (anomalías de +2.4), mientras que a partir de agosto de 1998 a marzo de 2001 se registró un fenómeno La Niña fuerte (anomalías de -1.9). Dichos eventos climáticos podrían haber causado las bajas temperaturas registradas en el estero de Punta Banda para los años 1999 2000 y 2001 y las altas temperaturas registradas para el año 1998 en el presente trabajo y el realizado por Cabello-Pasini *et al.* (2002). Ya se ha mencionado que, probablemente, el aumento en la temperatura del agua influyera de forma negativa las tasas de crecimiento de *Z. marina* en el estero de Punta Banda (Solana-Arellano *et al.*, 1998) y se ha demostrado para una bahía aledaña (San Quintín), que la temperatura sintetiza las influencias ambientales principales que regulan la dinámica de las hojas (área, longitud, anchura, etc.). La temperatura óptima de crecimiento de *Z. marina*, varía

conforme la localidad. Así por ejemplo, Ibarra-Obando y Huerta-Tamayo (1987), mencionan que para bahía San Quintín es de 17.6 a 19.8°C, mientras que Thom *et al.* (2001), para una bahía localizada en Washington, Estados Unidos, mencionan que el rango en el que *Z. marina* se encuentra más saludable es muy estrecho, por lo regular de 5-8°C, y que después de los 15°C comienza a mostrar signos de estrés.

Bect *et al.* (1999) reportaron para un estudio en el estero de punta banda, que la temperatura y la concentración de nutrientes se ven influenciados por eventos fuertes de El Niño, con lo que siguiendo los preceptos de la ley de tolerancia de Shelford los cambios en la temperatura podrían tener un efecto directo sobre la pradera de *Z. marina* en el estero de Punta Banda. Varios autores señalan la importancia que la temperatura tiene sobre *Z. marina*, algunos de los cuales se mencionan a continuación: Solana-Arellano *et al.* (1997) ; Echavarría-Heras *et al.* (2006) reportan que la temperatura es la variable ambiental que mayor influencia tiene sobre el desarrollo de *Z. marina*, encontrando evidencias de que temperaturas elevadas influyen negativamente el crecimiento de las hojas. Hosokawa *et al.* (2009), realizaron experimentos en Japón, y encontraron que las hojas de *Z. marina* son altamente sensibles a los incrementos en la temperatura del agua, ya que un aumento en ésta reduce la esperanza de vida de las hojas (tiempo en el cual la hoja permanece fija al haz), haciéndola posiblemente vulnerable a los cambios climáticos de temperatura (Hosokawa *et al.*, 2009).

Lee *et al.* (2007) consideran a la temperatura como el principal factor que controla el crecimiento estacional de *Z. marina* en Japón y señalan que las temperaturas elevadas durante el otoño y primavera podrían mejorar la producción de las praderas de pastos marinos, pero las altas temperaturas en verano podrían reducirla. Lo anterior indica que la temperatura del agua está correlacionada de forma positiva con el crecimiento durante los meses fríos. Sin embargo, durante los meses cálidos, la correlación es negativa, ya que las temperaturas elevadas inhiben el crecimiento conforme se acercan a los 20°C, provocando una afectación a los 26°C. Park y Lee (2007) mencionan la gran importancia de la temperatura, en caso de que se pretenda repoblar o salvaguardar la pradera de pastos marinos mediante métodos artificiales, ya que el escoger la época idónea es preponderante en el éxito de lo que se desea obtener. Lo anterior es también de especial importancia para poder identificar las épocas del año

en las que la pradera de pastos marinos se encuentre más vulnerable, ya sea por fenómenos climáticos naturales o por influencia antrópicas, y poder aumentar los esfuerzos de protección durante dichas épocas de importancia crítica.

En cuanto a los nutrientes, los fosfatos de la columna de agua se mantuvieron elevados a lo largo del año (máximos de $1.13\mu\text{M}$ y un mínimo de $0.25\mu\text{M}$) y dentro de los límites de tolerancia para *Z. marina* (Touchette y Burkholder, 2000; Burkholder *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007) sin ningún comportamiento estacional aparente. Esto puede deberse a que usualmente las altas concentraciones de fosfatos se originan de descargas de detergentes de provenientes de las zonas habitacionales, y agrícolas aledañas. Por lo anterior, durante el periodo de muestreo comprendido de agosto de 1999 a marzo de 2001, los fosfatos podrían considerarse como un nutriente no limitante en el estero de Punta Banda.

Si bien es sabido que, por lo general, en los estuarios templados el fósforo no es considerado como un nutriente limitante, por lo regular depende de los factores climáticos, físicos, biológicos y antrópicos de cada región (Erftemeijer y Middelburg, 1995; Gras *et al.*, 2003). Lo anterior se refuerza con lo mencionado por Howarth y Marino (2006) acerca de que el fósforo en las zonas templadas por lo regular se encuentra en altas concentraciones y aumenta aún más sus concentraciones en áreas con alta influencia humana.

Los niveles de fosfatos en el estero de Punta Banda son menores en comparación con los encontrados por Kaldy (2006) en Yaquina Bay, (Oregón, USA) periodo 2001 a 2002 (Figura 10). Esto podría deberse a que el periodo de muestreo durante el cual se recabaron los datos en Yaquina Bay, se desarrollaba un año La Niña débil y comenzaba un año El Niño, lo que ocasionaría un aumento en las lluvias con el consecuente aumento en los fosfatos, a diferencia del periodo de muestreo del presente trabajo, 1999 a marzo de 2001, en el cual terminaba un año El niño y comenzaba un año La Niña fuerte. Asimismo Sigleo y Frick (2007) realizaron un estudio para el río Yaquina (principal aporte fluvial de Yaquina Bay), en el que señalan que el fosfato disuelto tuvo sus concentraciones más altas durante los eventos de precipitación fluvial ocurridos en el año 2008 (año El Niño fuerte). Por otro lado Bect *et al.* (1999), señalan como posible

causa de la poca variabilidad de los fosfatos al hecho de que el estero de Punta Banda recibe poco a casi nulo aporte fluvial al año. Sin embargo, esta aparente estabilidad podría verse modificada durante eventos fuertes de El Niño, ya que estos usualmente ocasionan un aumento en la precipitación, y un aumento en los fosfatos. Lo anterior sucede debido a que la lluvia es un importante aporte de fósforo, ya que al caer ésta sobre las zonas aledañas a los esteros produce un deslave de desechos y materia orgánica, entre ellos el fósforo, los cuales finalmente se depositan en los cuerpos de agua costeros. Dicho fósforo proviene de forma natural de los desechos de plantas y animales, aunque sus niveles aumentan significativamente con actividades humanas que se llevan a cabo constantemente en los alrededores del estero, como la agricultura, desechos industriales y de aguas negras, y la construcción de carreteras para tráfico local (Arenas y de la Lanza, 1983).

Los resultados mostraron que los nitratos en el estero de Punta Banda durante el periodo de 1999 a 2001, se encontraban en concentraciones ligeramente menores que los fosfatos. Su concentración en la columna de agua fue de $0.11\mu\text{M}$ a $1.35\mu\text{M}$, con un promedio de $0.51\mu\text{M}$, y en el agua intersticial, de $0.3\mu\text{M}$ a $15\mu\text{M}$, con un promedio de $2.7\mu\text{M}$ (tabla 11). Se sabe que comúnmente, los nitratos son limitantes en la mayoría de los ecosistemas marinos costeros en la zona templada y son considerados como el principal regulador de la eutrofización (Howarth y Marino, 2006). En el estudio de Touchette y Burkholder (2000), se menciona que *Z. marina* presenta inhibición en el crecimiento con tasas de enriquecimiento de la columna de agua tan bajas como $3.5 - 7\mu\text{M}$ por 3 semanas, además de estimular proliferaciones algales y la posterior reducción de luz por el aumento de la turbidez. En cambio, señala que si el enriquecimiento se da en el agua intersticial, *Z. marina* es capaz de canalizar este exceso y traducirlo en crecimiento.

Por las concentraciones de nitratos encontrados en el presente estudio se puede considerar que eran niveles bajos. Sigleo y Frick (2007) realizaron un estudio de concentración de nutrientes para Yaquina Bay (Oregon E.UA.) ,en el que mencionan la influencia que podría tener el principal aporte fluvial, representado por el cauce del río Yaquina para el periodo de 1999-2002. Este estudio describe al año 2001 (Año La Niña), como un año seco en el que la precipitación fue mínima y los niveles de nitratos

fueron 4.5 veces menores. Asimismo, señalan que la concentración de nitratos fue más alta durante eventos de tormentas fuertes ocurridos durante 1998 (Año El Niño), llegando a concluir que el aporte fluvial es el principal aporte de nitrógeno. Hernández-Ayón *et al.* (2004) realizaron un estudio en Bahía San Quintín durante un evento El Niño 1997/1998, detectando un aumento en los nitratos en la columna de agua, el cual atribuyen a la remineralización y a la excreción de los cultivos de ostiones de la zona. En el mismo estudio también se monitoreó la concentración de nutrientes durante el año La Niña 2000, durante el cual se observan valores de nitratos en la columna de agua parecidos a los encontrados en este trabajo (Tabla 10). Asimismo, dichos autores señalan que durante el año 1997/1998 se encontraron concentraciones de nitratos en el agua intersticial más altas en la cabeza (1.0 a 3.3 μM) que en la boca (0.8 a 2.0 μM); más sin embargo, durante el año 2000 dicho patrón se invirtió. Cabe mencionar que el estero de Punta Banda se encuentra rodeado por zonas agrícolas y zonas destinadas a la acuicultura, esto aunado a lo señalado por Bect *et al.* (1999), referente a que durante eventos de El Niño fuertes los niveles de nitratos el estero de Punta Banda podrían aumentar, harían a la pradera de *Z. marina* especialmente vulnerable.

La vulnerabilidad de *Z. marina* al aumento de nitratos en la columna de agua es explicado por Touchette y Burkholder (2000) como una consecuencia de la falta de un mecanismo que regule la absorción de nitrógeno. Esto debido a que *Z. marina* se ha desarrollado en ambientes oligotróficos, en los que el nitrógeno es escaso y por lo tanto ha hecho más eficiente su absorción, ocasionando que la planta esté constantemente tratando de fijar el nitrógeno circundante lo que se traduce en un desgaste energético continuo y un aumento en la respiración.

En la tabla 10, se presenta una comparación de las concentraciones de nitratos y fosfatos con respecto a otros trabajos similares. Dichos trabajos están distribuidos dentro de la zona comprendida entre los 29° y los 57°N, conocida como la Zona Templada del Pacífico Norte (desde Corea hasta Baja California, México). Esta zona se caracteriza por una alta diversidad de praderas de pastos marinos (15 especies dentro de las cuales se incluye a *Z. marina*) en estuarios lagunas y áreas costeras, además de ser la principal zona de distribución de *Z. marina* en el Pacífico Short *et al.* (2007). Los valores de nutrientes en la columna de agua encontrados por Lee *et al.* (2006)

transcurrieron durante el año de julio de 2001 a julio de 2002, la primera mitad de la serie de datos de desarrolla en lo que se podría considerar como un año normal (es decir que las anomalías de temperatura no superan el 0.5°C), y el mismo autor señala que, en promedio, las concentraciones de nutrientes en la columna de agua no fueron limitantes.

Aunque las concentraciones de nutrientes en el estero de Punta Banda son parecidas a las de las localidades de la Tabla 7, se debe tener en cuenta que no solo el nitrógeno y sus especies, nitratos, nitritos y amonio son considerados precursores de la eutrofización, sino que también el fósforo puede desempeñar un papel importante (Howarth y Marino, 2006). En un estudio realizado por Riosmena-Rodríguez *et al.* (2015), en el que utiliza a *Z. marina* como bioindicador, se señala que en el estero Punta Banda, junto con otros 5 cuerpos costeros entre ellos Bahía San Quintín y Bahía Magdalena, ya se han reportado reducciones en la cobertura y densidad de las praderas de *Z. marina*, como resultado de la eutrofización.

Tabla 7. Comparación de las concentraciones de nitratos y fosfatos en lagunas costeras de la zona templada, en las que crece *Z. marina*. La tabla se modificó de Lee *et al.* (2007).

Autor	Localidad	Año de Muestreo	Latitud	Columna de agua (µm)		Agua intersticial (µm)	
				Nitratos	Fosfatos	Nitratos	Fosfatos
Lee <i>et al.</i> (2006)	Dadae Bay, Korea	2001-2002	34°N	0.1 – 6.0	0.03 – 2.3		
Kaldy (2006)	Yaquina Bay, Oregon, USA	2001-2000	44°N		0.5 – 2		5-45
Lee <i>et al.</i> (2005)	Koje Bay, Korea	2001-2003	34°N	0.2 - 9.0	0.2 – 1.8	58.3 – 650.1	0.8 – 6.5
Lee <i>et al.</i> (2005)	Kosung Bay, Korea	2001-2003	34°N	0.0 – 21.3	0.1 – 2.9	57.2 – 473.9	0.7 – 18.9
Hernández-Ayón <i>et al.</i> (2009)	Baía San Quintín	2000	30°N	0.4±0.3	1.1±0.3		
(Bect <i>et al.</i> , 1999)	Esteros de Punta Banda México	1998	31°N	0.2 -2.3	0.5 – 3.5		
Este trabajo (2015)	Esteros de Punta Banda, México	1999-2001	31°N	0.11 – 1.35	0.25 – 1.13	0.3 - 15	0.53 – 19.2

Las horas de exposición diarias de la pradera al aire y a la luz solar tuvieron un patrón estacional con un máximo de 4 horas y un mínimo de 1 hora a lo largo del año, con el mayor número de horas de exposición durante los meses de noviembre a marzo y el valor mínimo de julio a septiembre. Esto implica que durante los meses fríos, la pradera estaba más expuesta a aire y a la luz solar, que durante los meses más cálidos. Lo anterior es debido a que en los meses cálidos, las mareas bajas de mayor amplitud se presentan durante la noche; En cambio, durante los meses fríos, las mareas bajas se presentan durante el día. Boese *et al.* (2003) señalan que la exposición prolongada de *Z. marina* al aire ocasiona que la planta se deshidrate y se seque, lo que resulta en un daño a las hojas que están directamente expuestas, por la pérdida de pigmentos fotosintéticos y necrosis, con el posterior rompimiento de la hoja afectada. En un intento por adaptarse, la planta redistribuye los nutrientes hacia las zonas no dañadas, y produce hojas más cortas, las cuales estarán menos expuestas a la desecación (Stapel *et al.*, 1997).

La salinidad (32 - 37 ‰) y a la luminosidad promedio de la columna de agua (318 – 960 fotones $m^{-1} \text{seg}^{-1}$), fueron excluidas por el Análisis de Componentes Principales, ya que su contribución a la varianza explicada fue muy baja. Con respecto a la salinidad Alvarez-Arellano y Gaitán Morán (1994) y Bect *et al.* (1999) encontraron valores parecidos en el estero de Punta Banda (33.85 – 37.74 ‰), señalando que ésta no varía significativamente a lo largo del año, pues al ser un antiestuario, y tener poco aporte fluvial, la disolución no es suficiente para modificar en gran medida la salinidad del lugar. Lo anterior podría ser la razón por la cual el Análisis de Componentes Principales lo excluyó (Tabla 4). Sin embargo, dicha salinidad podría verse modificada durante eventos fuertes de El Niño, en los que la precipitación aumenta y el estero se comporta como un estuario, en el que la salinidad disminuye desde la cabeza hacia la boca (Bect *et al.*, 1999)

En este trabajo, la luminosidad promedio de la columna de agua durante los meses de muestreo varió de 318 a 960 fotones $m^{-1} \text{seg}^{-1}$, con un promedio de 601.94 fotones $m^{-1} \text{seg}^{-1}$. Los valores máximos se presentaron en marzo, abril y mayo, y los mínimos en noviembre y diciembre, coincidiendo con los máximos y mínimos encontrados por Cabello-Pasini *et al.* (2002) para el estero de Punta Banda. Asimismo, coincide con los

máximos y mínimos encontrados por Kaldy y Lee (2007) en Jindong Bay, Corea la cual se encuentra a 34°N, en comparación con los 31°N del presente estudio.

El Análisis de Componentes Principales excluyó a la variable luminosidad y el análisis cluster de distancias euclidianas lo coloca en otro grupo totalmente alejado del resto de las variables. Lo anterior no indica que la luz no sea importante para el ecosistema, pues se ha comprobado en diferentes cuerpos de agua costeros que la luz puede ser la variable limitante más importante que regula la densidad de haces de las praderas de pastos marinos (Verhagen y Nienhuis, 1983). También en el trabajo de Kaldy y Lee (2007) en el que se hace una comparación entre dos cuerpos de agua, uno en Oregon, Estados Unidos y el otro en Corea, se menciona que el principal factor que regula el crecimiento y la densidad de los pastos marinos en Oregon es la luminosidad, mientras que en Corea son regulados por la luminosidad y la temperatura, en conjunto. Dennison y Alberte (1982), en Massachussetts, Estados Unidos, encontraron que *Z. marina* responde a las variaciones de temperatura modificando las tasas de producción de hojas y su , y que esta respuesta es más intensa conforme aumenta la profundidad. Por lo anterior, se podría concluir que la importancia de las variables ambientales en la modulación del crecimiento y producción foliar de los pastos marinos, dependerá de las características propias del lugar de estudio, como latitud, clima, etc. El hecho de que la luminosidad haya sido excluida por los análisis estadísticos, ACP y Cluster, podría indicar que dicha variable puede estar representada por una combinación lineal de otras variables y que probablemente los niveles de luminosidad no se reducen lo suficiente como para influenciar el balance de recursos disponibles, apoyando los resultados encontrados por Hosokawa *et al.* (2009), en la bahía de Tokyo, Japón.

9.2 Modelo alométrico

Las hojas de *Z. marina* se caracterizan por tener forma de listón, con un ancho poco variable, el cual se puede considerar constante (Figura 1), debido a tales características se considera a las hojas como rectangulares y basándose en este supuesto Duarte (1991), Solana-Arellano *et al.* (1992), Solana-Arellano *et al.* (1998) y Echavarría-Heras *et al.* (2010) demostraron que las hojas de *Z. marina*, presentan una relación alométrica

entre el peso seco, largo y ancho de estas; dicha relación esta descrita por la ecuación (10). Más aun Echavarría-Heras *et al.* (2010) y Solana-Arellano *et al.* (2014) demostraron que los parámetros alométricos α y β de la ecuación (10) son dependientes de la zona geográfica. En la tabla 8 se presentan los resultados de los parámetros alométricos calculados en el presente trabajo, comparados con los ajustados por Echavarría-Heras *et al.* (2010) y Solana-Arellano *et al.* (2014) para otras localidades. Podemos observar, que los parámetros ajustados para el estero de Punta Banda en este estudio, son muy similares para a los ajustados para este sitio y para Bahía San Quintín por Solana-Arellano *et al.* (2014) , los cuales fueron estadísticamente iguales ($p > 0.05$), corroborando lo mencionado por los autores. Por lo anterior y utilizando los resultados de Echavarría-Heras *et al.* (2010), en el que se demuestra que dicho parámetros pueden ser utilizados para encontrar las tasas de crecimiento, el modelo alométrico nos permitió llenar los datos faltantes de crecimiento foliar 2002, 2003, 2008, 2009, 2010 y 2011 y posteriormente utilizarlos para alimentar el modelo de simulación (Figura 12).

Tabla 8 Comparación de las constantes alométricas α y β utilizadas en el modelo alométrico (eq. 10) para describir la tasa de crecimiento por haz ($\text{g de peso seco} \cdot \text{haz}^{-1} \cdot \text{quincena}^{-1}$) del área de estudio, con otras localidades. Modificada de Solana-Arellano *et al.* (2014).

Autor	Localidad	Fecha del muestreo	α	β
Solana-arellano et al. (2014)	Jindong Bay, Corea	2008-2009	0.000172	1.21
Solana-arellano et al. (2014)	Kosung Bay, Corea	2007-2008	0.000087	1.205
Solana-arellano et al. (1998)	Bahía San Quintín, México	1992-1993	0.000009	1.43
Solana- arellano et al. (2014)	Estero de Punta Banda, México	1999	0.000007	1.43
Este Trabajo (2015)	Estero de Punta Banda, México	2002	0.000016	1.3031
		2003	0.000014	1.3162
		2008	0.00001	1.4479
		2009	0.000008	1.4479
		2010	0.000008	1.4095
		2011	0.000009	1.4113

9.3 Simulación

El proveer de un marco conceptual para la simulación, permitirá predecir, con cierto margen de error, el comportamiento que tendrá la pradera en un futuro. En cualquier simulación es necesario establecer valores de entrada, los cuales darán forma a los posibles escenarios futuros (Peláez y Mejía, 2009). En este caso, al no contarse con algunos de los datos de entrada, se tomaron de otras investigaciones sobre *Z. marina*, tomando como referencia la zona 4 de Short *et al.* (2007), descrita como la zona del Pacífico en la cual se distribuye *Z. marina* (Zona Templada del Pacífico Norte). Por lo tanto se debe tener en cuenta este hecho y tomar los resultados con cautela, ya que lo ideal sería alimentar la simulación con datos medidos directamente en el sitio de estudio, de acuerdo a Bach (1993), Lee *et al.* (2005) y Kaldy y Lee (2007), quienes señalan que el elemento más importante para alimentar la simulación son las condiciones químicas, físicas y biológicas del lugar en donde se va a realizar el estudio.

La simulación se corrió en una primera instancia con los datos de 1999 a 2001, ya que hasta ahí se contaba con datos para todas las variables (temperatura del agua *in situ*, luminosidad, salinidad, horas de exposición, nitratos, fosfatos y ONI). A partir de ahí, solo se tenían datos de ONI (ya que estos se obtuvieron en línea de la página de la NOAA), y de la variable biológica crecimiento por haz se tenían datos hasta el 2011, la cual, era la variable más importante, pues mediante ésta se calibraría el modelo de simulación. Al correr la simulación se encontró que la serie de datos correspondientes a los años 1999-2001 presentaba una tasa de crecimiento por haz mayor al resto de la serie de 2002 a 2011 (Figura 9). Esto podría deberse a que en esos años se presentó un evento La Niña de larga duración, y probablemente este efecto se haya visto incrementado por el hecho de que inmediatamente antes de éste ocurrió un evento El Niño. Lo anterior coincide con lo mencionado por Behrenfeld *et al.* (2001), quien reporta que durante eventos de transición entre El Niño - La Niña la producción global neta aumenta de 2 a 3 veces, particularmente en la zona del Pacífico Norte.

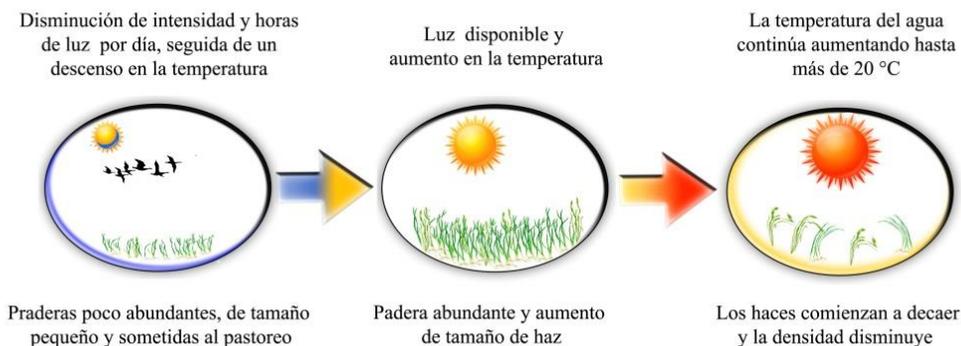
En las investigaciones de Echavarría-Heras *et al.* (2006) y Solana-Arellano *et al.* (2009) para Bahía San Quintín, se describen los posibles efectos negativos y positivos que

tienen las anomalías de temperatura sobre las praderas de *Z. marina* en la dinámica del crecimiento de las hojas. Asimismo, Cabello-Pasini *et al.* (2002) mencionan que el estero de Punta Banda acerca se ve influenciado por las fluctuaciones globales de temperatura como El Niño o La Niña. Por tal motivo, se decidió utilizar el ONI como variable para describir los efectos de la temperatura del agua sobre la pradera de *Z. marina*, pues la temperatura *in situ* de la columna de agua reflejaba demasiada variabilidad en los datos. Dicha variabilidad podría deberse a la forma en la que se tomaron los datos, ya que el sensor de temperatura se colocó a la altura de la pradera de *Z. marina* y al igual que ésta había momentos en los que quedaba expuesto al aire. Otro factor para no utilizar los datos de temperatura *in situ* de la columna de agua fue que, por problemas técnicos, solo se pudieron recabar datos de 1999 a 2001. Ya se ha demostrado anteriormente que la Temperatura Superficial del Mar (SST) es un buen indicador de la dinámica de crecimiento de las praderas de *Z. marina* (Echavarría-Heras *et al.*, 2006; Solana-Arellano *et al.*, 2010), por lo tanto, se podría decir que la variable ONI representa de manera aceptable parte de la variabilidad del sistema, ya que por sí sola representa el 11% de la variabilidad en el ACP (Figura 4).

El hecho de que la pradera de pastos marinos se vea influenciada por los eventos climáticos provoca consecuencias no vistas normalmente, como lo mencionado en el trabajo de Höffle *et al.* (2011), en el que se registraron altas mortalidades de *Z. marina* durante eventos de altas temperaturas, lo que ocasionó que la pradera se debilitara y se hiciera más vulnerable a la depredación, y que disminuyera la densidad de haces y su biomasa. Esto, entre otras cosas, debido al sombreado que producen las algas oportunistas, especialmente el desplazamiento de algas invasoras como *Gracilaria vermiculophylla*. Se tienen registros de que dicha alga se encuentra en el estero de Punta Banda (Miller *et al.*, 2011) y de que probablemente la razón por la cual no ha tenido consecuencias devastadoras, como en otras lagunas costeras se deba a que los niveles de nitratos no son lo suficientemente altos. Por lo tanto, se debe poner especial cuidado en controlar dicha variable ya que el estero de Punta Banda se encuentra rodeado por zonas destinadas a la agricultura, actividad conocida por utilizar nitratos como fertilizante, los cuales son posteriormente deslavados hacia el estero. También se encuentran granjas de producción acuícola, cuyos desechos podrían aumentar los

niveles de nitrógeno y sus especies (nitratos, nitritos, amonio). Los efectos de la temperatura del agua en la pradera durante un año El Niño o La Niña y un año normal podrían resumirse en la figura 19.

CONDICIONES CLIMATICAS NORMALES



AÑOS 1998-2001

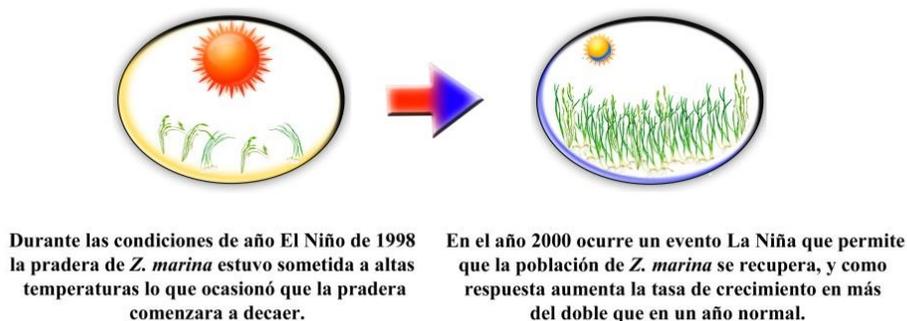


Figura 19. Esquema del posible comportamiento de la pradera de *Z. marina* con respecto a la temperatura durante los años 1998 -2001 y el comportamiento normal.

En un estudio realizado por Thom *et al.* (2003) en una laguna costera en Washington y otra en Oregon, en el cual coinciden parte de las fechas de muestreo con este estudio (1998-2001), se encontraron resultados parecidos a los de este trabajo. Durante el año 2001, los niveles de biomasa aumentaron más del doble, comparados con el año 1998. Asimismo, la densidad disminuyó durante ese año, lo que ocasionó estrés en la planta y la posterior producción de flores como respuesta a esta perturbación. Thom *et al.*

(2003) también mencionan que el evento El Niño de 1998 ha sido uno de los más intensos en los últimos 100 años, lo cual coincide con los datos de la NOAA. Los mismos autores señalan que durante los años 1999-2000 los inviernos fueron más cálidos y los veranos más fríos, lo que refuerza lo ya dicho anteriormente en el presente trabajo: la variabilidad climática parece tener una influencia regional extensa en *Z. marina*, pero la respuesta a estas variaciones difieren para cada estuario.

El estero de Punta Banda es un cuerpo de agua de suma importancia para mantener la biodiversidad, de ahí que esté clasificado como sitio Ramsar desde hace más de 9 años. Sin embargo, uno de los requisitos más importantes para obtener esta designación es que el sitio no esté altamente impactado por actividad antrópica. Por lo tanto, es necesario mantener el sitio bajo un programa de manejo sustentable. El impacto que la población tiene sobre los ecosistemas costeros, se ve directamente reflejado en la salud de los ecosistemas. Por ello, es necesario conocer los procesos físicos, químicos y biológicos que se realizan en estos cuerpos de agua, con el fin de conocer el efecto de la actividad humana sobre dichos procesos. Anteriormente ya se han utilizado poblaciones de *Z. marina* como indicadores de salud ecosistémica en la zona del Pacífico Mexicano (Riosmena-Rodríguez *et al.*, 2015).

De esta experiencia, se sabe que no es posible abordar la parte biológica como un elemento aislado, sino, como un elemento estrechamente ligado con los fenómenos físicos y químicos. Por lo tanto, en este caso, es importante comprender qué variables influyen en el crecimiento de *Z. marina*. Sin embargo, por cuestiones logísticas y para facilitar la interpretación de los resultados, se debe establecer un límite en la cantidad de información que se va a recabar. Dicha información está representada por las variables escogidas para representar el fenómeno que se va a estudiar.

La evolución de la tecnología ha permitido el uso con fines ecológicos de herramientas que antes estaban destinadas a la ingeniería o el diseño, debido a la dificultad que representa el trabajar con un sistema en el que no se tienen claras las entradas y las salidas de información (Peláez y Mejía, 2009). En el marco conceptual del modelo de simulación de crecimiento por haz, utilizado en éste trabajo, sirve como referencia para

conocer a grandes rasgos el comportamiento que tendrá la pradera y los posibles efectos que los fenómenos climáticos tendrán sobre ésta. No se descarta la plasticidad de los modelos de simulación y su posible utilización en otras localidades, siempre y cuando se tenga muy en cuenta lo expresado por (Thom *et al.* (2003)) acerca de que la respuesta de la pradera de *Z. marina* a las influencias externas dependen de la misma población en sí y sus características específicas.

Capítulo 10. Conclusión

1. Se desarrolló un modelo de simulación de la tasa de crecimiento foliar de *Z. marina* en el estero de Punta Banda con datos conectados *in situ* de las variables abióticas: temperatura y nutrientes, las variables salinidad y luminosidad no se utilizaron ya que el Análisis de Componentes Principales las excluyó del sistema. Utilizando las variables descritas se observó que la pradera presentó un crecimiento por haz mayor para los años 1999, 2000, 2001, lo cual puede deberse a la respuesta de *Z. marina* hacia las anomalías climáticas, en especial a los cambios de temperatura.

2. Mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) se dedujo que las variables más importantes que determinan el crecimiento de *Z. marina* en el estero de Punta Banda durante el periodo de muestreo 1999 2000 y 2001 son la temperatura del agua, los nutrientes (nitratos y fosfatos), y las horas de exposición de la pradera al aire y a la luz solar.

3. El modelo de simulación fue calibrado con datos puntuales de años previos y posteriores a la serie de tiempo de los datos correspondiente a 1999-2001 (1998, 2002-2011), obteniendo un coeficiente de correlación de 0.67.

4. Durante el periodo de mayo de 1997 a junio de 1998, se registró un fenómeno El Niño fuerte (anomalías de 2.4), mientras que a partir de agosto de 1998 a marzo de 2001 se registró un fenómeno La Niña fuerte (anomalías de -1.9), ésta transición entre eventos El Niño y La niña fuertes podría haber causado los niveles máximos de crecimiento por haz de la pradera de *Z. marina* en el estero de Punta Banda para los años 1999 2000 y 2001.

10.1 Recomendaciones

El presente trabajo toma datos durante un evento completo La Niña 1999-2001 pero solo toma parte de la serie de tiempo del evento El Niño de 1998. La NOAA pronostica

que en el año 2015 habrá un evento El Niño casi tan fuerte como el ocurrido durante el año 1998, sería interesante monitorear el comportamiento de la pradera durante éste evento El Niño fuerte, y comparar los resultados con los encontrados en este trabajo.

Se recomienda utilizar éste modelo en otros sitios de la región como por ejemplo Bahía San Quintín, que estén sometidos a las anomalías climáticas El Niño y La Niña, para comparar resultados y observar las diferencias en la respuesta de la pradera de pastos marinos a los estímulos climáticos.

Es importante seguir con el monitoreo de la variable crecimiento por haz, para años posteriores y así contar con datos para su calibración.

El modelo es susceptible a ser utilizado con otras especies de pastos marinos, siempre y cuando los valores de entrada sean los correspondientes a dicha especie y que las características climáticas sean del área en la cual se desarrolla.

Lista de referencias bibliográficas

- Abreu, M. H., Pereira, R., Buschmann, A., Sousa-Pinto, I., y Yarish, C. (2011). Nitrogen uptake responses of *Gracilaria vermiculophylla* (Ohmi) Papenfuss under combined and single addition of nitrate and ammonium. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 407(2), 190-199.
- Acosta-Ruiz, M. d. J., y Alvarez-Borrego, S. (1974). Distribución Superficial de Algunos Parametros Hidrológicos Físicos y Químicos, en el Estero de Punta Banda, BC, en Otoño e Invierno. *Ciencias Marinas*, 1(1), 16-45.
- Aguilar-Rosas, L. E., Flores Pedroche, F., y Zertuche-Gonzales, J. A. (2014). Algas marinas no nativas en la costa del Pacífico mexicano. In: R. Mendoza y P. Koleff (Eds.), *Especies acuáticas invasoras en México* (pp. 211-222.). México Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Alvarez-Arellano, A. D., y Gaitán Morán, J. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano. In: G. de la Lanza-Espino y C. Caceres Martínez (Eds.), (pp. 13-74) Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Arenas, V., y de la Lanza, G. (1983). Annual phosphorus budget of a coastal lagoon in the northwest of Mexico. *Ecological Bulletin*(35), 431-440.
- Bach, H. K. (1993). A dynamic model describing the seasonal variations in growth and the distribution of eelgrass (*Zostera marina* L.) I. Model theory. *Ecological modelling*, 65(1), 31-50.
- Bect, M. S. G., Bect, L. A. G., Ayón, J. M. H., Lou, F. L., y Borrego, S. Á. (1999). Efecto de El Niño en los nutrientes y el carbón orgánico total de una laguna costera del Noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas*, 25(2), 225-237.
- Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., McClain, C. R., Feldman, G. C., Los, S. O., Tucker, C. J., Falkowski, P. G., Field, C. B., Frouin, R., y Esaias, W. E. (2001). Biospheric primary production during an ENSO transition. *Science*, 291(5513), 2594-2597.
- Boese, B. L., Alayan, K. E., Gooch, E. F., y Robbins, B. D. (2003). Desiccation index: a measure of damage caused by adverse aerial exposure on intertidal eelgrass (*Zostera marina*) in an Oregon (USA) estuary. *Aquatic Botany*, 76(4), 329-337.
- Bos, A. R., Bouma, T. J., de Kort, G. L., y van Katwijk, M. M. (2007). Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: sediment accretion and modification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(1), 344-348.
- Burkholder, J. M., Tomasko, D. A., y Touchette, B. W. (2007). Seagrasses and eutrophication. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1), 46-72.

- Cabello-Pasini, A. (1984). Transplantes de *Zostera marina* L. en el estero de Punta Banda, Baja California Mexico, durante el verano de 1983 y su comportamiento a través de otoño e invierno. *Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, Mexico.*, 77.
- Cabello-Pasini, A., Lara-Turrent, C., y Zimmerman, R. C. (2002). Effect of storms on photosynthesis, carbohydrate content and survival of eelgrass populations from a coastal lagoon and the adjacent open ocean. *Aquatic Botany*, 74(2), 149-164.
- Celis-Ceseña, R., y Alvarez-Borrego, S. (1975). Distribución superficial de algos parámetros hidrológicos físicos y químicos en el Estero de Punta Banda B. C. en primavera y verano. *Ciencias Marinas*, 2(1), 98-105.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., y Paruelo, J. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *nature*, 387(6630), 253-260.
- Charles-Edwards, D. A., Doley, D., y Rimmington, G. M. (1986). The Environment Modelling plant growth and development (pp. 201-203) Academic Press.
- Dennison, W. C., y Alberte, R. S. (1982). Photosynthetic responses of *Zostera marina* L. (eelgrass) to in situ manipulations of light intensity. *Oecologia*, 55(2), 137-144.
- Downie, A.-L., von Numer, M., y Boström, C. (2013). Influence of model selection on the predicted distribution of the seagrass *Zostera marina*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 121–122(0), 8-19.
- Duarte, C. M. (1990). Seagrass nutrient content. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 6(2), 201-207.
- Duarte, C. M. (1991). Allometric scaling of seagrass form and productivity. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 77(2), 289-300.
- Dunteman, G. H. (1989). Principal components analysis Quantitative Applications in the Social Sciences (pp. 5-7) Sage Publications.
- Echavarría-Heras, H., Solana-Arellano, E., y Franco-Vizcaíno, E. (2010). An allometric method for the projection of eelgrass leaf biomass production rates. *Mathematical biosciences*, 223(1), 58-65.
- Echavarría-Heras, H. A., Solana-Arellano, E., y Franco-Vizcaíno, E. (2006). The role of increased sea surface temperature on eelgrass leaf dynamics: onset of El Niño as a proxy for global climate change in San Quintin Bay, Baja California. *Bulletin, Southern California Academy of Sciences*, 105(3), 113-127.
- Echavarría-Heras, H., Lee, K. S., Solana-Arellano, E., y Franco-Vizcaíno, E. (2011). Formal analysis and evaluation of allometric methods for estimating above-ground biomass of eelgrass. *Annals of Applied Biology*, 159(3), 503-515.

- Ehrhardt, N. M., Legault, C. M., y Restrepo, V. R. (2001). Density-dependent linkage between juveniles and recruitment for pink shrimp (*Farfantepenaeus duorarum*) in southern Florida. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 58(5), 1100-1105.
- Ellison, A. M., Bank, M. S., Clinton, B. D., Colburn, E. A., Elliott, K., Ford, C. R., Foster, D. R., Kloeppel, B. D., Knoepp, J. D., y Lovett, G. M. (2005). Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(9), 479-486.
- Erftemeijer, P. L., y Middelburg, J. J. (1995). Mass balance constraints on nutrient cycling in tropical seagrass beds. *Aquatic Botany*, 50(1), 21-36.
- Gras, A. F., Koch, M. S., y Madden, C. J. (2003). Phosphorus uptake kinetics of a dominant tropical seagrass *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany*, 76(4), 299-315.
- Green, E., y Short, F. T. (2003). World atlas of seagrasses: University of California Pr.
- Green, E., Spalding, M., Taylor, M., Ravilious, C., y Short, F. (2003). The distribution and status of seagrasses. In: E. P. Green y F. T. Short (Eds.), World atlas of seagrasses. California University of California Pr.
- Hammann, M., Wang, G., Rickert, E., Boo, S. M., y Weinberger, F. (2013). Invasion success of the seaweed *Gracilaria vermiculophylla* correlates with low palatability. *Marine Ecology Progress Series*, 486, 93-110.
- Harris, L. A. (2006). *The virtual eelgrass meadow: A simulation of Zostera marina L. linking physiology to population level processes*. (Doctor of Philosophy in Oceanography), University of Rhode Island, U.S.A.
- Heck Jr, K. L., Carruthers, T. J., Duarte, C. M., Hughes, A. R., Kendrick, G., Orth, R. J., y Williams, S. W. (2008). Trophic transfers from seagrass meadows subsidize diverse marine and terrestrial consumers. *Ecosystems*, 11(7), 1198-1210.
- Hemminga, M. A., y Duarte, C. M. (2000). Seagrass ecology. In: Cambridge (Ed.), (Vol. 1, pp. 297) Cambridge University Press.
- Hernández-Ayón, J. M., Galindo-Bect, M. S., Camacho-Ibar, V., García-Esquivel, Z., González-Gómez, M. A., y Ley-Lou, F. (2004). Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998. *Ciencias Marinas*, 30(1A), 119-132.
- Höffle, H., Thomsen, M. S., y Holmer, M. (2011). High mortality of *Zostera marina* under high temperature regimes but minor effects of the invasive macroalgae *Gracilaria vermiculophylla*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(1), 35-46.
- Hosokawa, S., Nakamura, Y., y Kuwae, T. (2009). Increasing temperature induces shorter leaf life span in an aquatic plant. *Oikos*, 118(8), 1158-1163.

- Howarth, R. W., y Marino, R. (2006). Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 364-376.
- Hughes, A. R., Williams, S. L., Duarte, C. M., Heck Jr, K. L., y Waycott, M. (2008). Associations of concern: declining seagrasses and threatened dependent species. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(5), 242-246.
- Ibarra-Obando, S. E. (1985). Introducción al método de marcado para medir la producción de pastos marinos. In: M. d. divulgación (Ed.), Universidad Autónoma de Baja California, México (pp. 12-16).
- Ibarra-Obando, S. E., y Huerta-Tamayo, R. (1987). Blade production of *Zostera marina* L. during the summer-autumn period on the Pacific coast of Mexico. *Aquatic Botany*, 28(3), 301-315.
- Iizumi, H., y Hattori, A. (1982). Growth and organic production of eelgrass *Zostera marina* L. in temperate waters of the Pacific coast of Japan. III. The kinetics of nitrogen uptake. *Aquatic Botany*, 12, 245-256.
- Jiménez Pérez, L. C., Cueva, H. d. I., Molina-Peralta, F., y Estrada-Ramirez, A. (2009). Avifauna del Estero de Punta Banda, Baja California, México. *Acta zoológica mexicana*, 25(3), 589-608.
- Kaldy, J. E. (2006). Production ecology of the non-indigenous seagrass, dwarf eelgrass (*Zostera japonica* Ascher. & Graeb.), in a Pacific Northwest estuary, USA. *Hydrobiologia*, 553(1), 201-217.
- Kaldy, J. E., y Lee, K.-S. (2007). Factors controlling *Zostera marina* L. growth in the eastern and western Pacific Ocean: Comparisons between Korea and Oregon, USA. *Aquatic Botany*, 87(2), 116-126.
- Kentula, M. E., y McIntire, C. D. (1986). The autecology and production dynamics of eelgrass (*Zostera marina* L.) in Netarts Bay, Oregon. *Estuaries*, 9(3), 188-199.
- Lawrence, I., y Lin, K. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, 255-268.
- Lee, K.-S., Park, S., y Kim, J.-B. (2005). Production dynamics of the eelgrass, *Zostera marina* in two bay systems on the south coast of the Korean peninsula. *Marine Biology*, 147(5), 1091-1108.
- Lee, K.-S., Park, S. R., y Kim, Y. K. (2007). Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1-2), 144-175.

- Lee, S. Y., Kim, J. B., y Lee, S. M. (2006). Temporal dynamics of subtidal *Zostera marina* and intertidal *Zostera japonica* on the southern coast of Korea. *Marine Ecology*, 27(2), 133-144.
- Leschen, A. S., Ford, K. H., y Evans, N. T. (2010). Successful eelgrass (*Zostera marina*) restoration in a formerly eutrophic estuary (Boston Harbor) supports the use of a multifaceted watershed approach to mitigating eelgrass loss. *Estuaries and coasts*, 33(6), 1340-1354.
- Martínez, L. R. D. R. (2005). Ficha informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Recuperado de: [http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR RAMSAR/Baja California/Estero de Punta Banda/Estero de Punta Banda.pdf](http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR_RAM SAR/Baja_California/Estero_de_Punta_Banda/Estero_de_Punta_Banda.pdf)
- Maturana, J., Bello, M., y Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile*, 2000, 13-27.
- McRoy, C. P., y Helfferich, C. (1977). Seagrass ecosystems. A scientific perspective. *Marine Science*, 4, 122-127.
- Miller, K. A., Aguilar-Rosas, L. E., y Pedroche, F. F. (2011). Reseña de algas marinas no nativas de California, EUA y Baja California, México. *Hidrobiológica*, 21(3), 365-379.
- Montgomery, J. L. M., y Targett, T. E. (1992). The nutritional role of seagrass in the diet of the omnivorous pinfish *Lagodon rhomboides* (L.). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 158(1), 37-57.
- Nejrup, L. B., y Pedersen, M. F. (2010). Growth and biomass development of the introduced red alga *Gracilaria vermiculophylla* is unaffected by nutrient limitation and grazing. *Aquatic Biology*, 10(3), 249-259.
- Orth, R. J., Carruthers, T. J., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck Jr, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., y Olyarnik, S. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience*, 56(12), 987-996.
- Park, J.-I., y Lee, K.-S. (2007). Site-specific success of three transplanting methods and the effect of planting time on the establishment of *Zostera marina* transplants. *Marine Pollution Bulletin*, 54(8), 1238-1248.
- Peláez, A., y Mejía, S. (2009). Conceptos básicos de modelación matemática y simulación computacional de sistemas biológicos. *CES Odontología*, 13(1), 51-55.
- Polunin, N. V. (1996). Trophodynamics of reef fisheries productivity Reef fisheries (pp. 113-135) Springer.

- Pritchard, D. W., De-La-Paz-Vela, R., Cabrera-Muro, H., Farreras-Sanz, S., y Morales, E. (1978). Hidrografía Física Del Estero De Punta Banda Parte 1: Análisis De Datos. *Ciencias Marinas*, 5(2), 1-23.
- RAMSAR. (2000). Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales. *Oficina de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza*. Recuperado de: <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-01sp.pdf>, 2014
- RAMSAR. (2007). ¿ Qué es la Convención de Ramsar sobre los Humedales? Recuperado de: <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convenci%C3%B3n-de-ramsar-y-su-misi%C3%B3n>, 2014
- Riosmena-Rodríguez, R., López-Calderón, J. M., Muñoz-Salazar, R., López-Vivas, J. M., Torre-Cosío, J., y Meling, A. (2015). Parámetros poblaciones de *Zostera marina* como indicadores de salud ecosistémicos.
- Sedinger, J. S., Ward, D. H., Schamber, J. L., Butler, W. I., Eldridge, W. D., Conant, B., Voelzer, J. F., Chelgren, N. D., y Herzog, M. P. (2006). Effects of El Niño on distribution and reproductive performance of black brant. *Ecology*, 87(1), 151-159.
- Short, F. T. (1980). A simulation model of the seagrass production system. . In: C. P. M. R. C. Phillips (Ed.), *Handbook of seagrass biology: an ecosystem perspective* (pp. 277-295). New York Garland.
- Short, F. T., Carruthers, T., Dennison, W., y Waycott, M. (2007). Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1–2), 3-20.
- Sigleo, A., y Frick, W. (2007). Seasonal variations in river discharge and nutrient export to a Northeastern Pacific estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(3), 368-378.
- Smith, L. I. (2002). A tutorial on principal components analysis. *Cornell University, USA*, 51, 52.
- Solana-Arellano, E., Borbon-Gonzalez, D. J., y Echavarría-Heras, H. (1998). A general allometric model for blade production in *Zostera marina* L. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 97(1), 39-48.
- Solana-Arellano, E., Echavarría-Heras, H., y Leal-Ramírez, C. (2009). Characterisation of environmental forcing on *Zostera marina* L. plastochrone interval dynamics in the Punta Banda Estuary, BC Mexico: an empirical modelling approach. *Scientia Marina*, 73(1), 95-103.
- Solana-Arellano, E., Echavarría-Heras, H., Leal-Ramírez, C., y Lee, K.-S. (2014). The effect of parameter variability in the allometric projection of leaf growth rates for eelgrass (*Zostera marina* L.). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(5), 1099-1108.

- Solana-Arellano, E., Ibarra-Obando, S. E., y Echavarría-Heras, H. (1992). Calibración de un modelo alométrico para evaluar la producción foliar de *Zostera marina* L. *Hidrobiologica*, 1(2), 41-44.
- Solana-Arellano, M. E., Echavarría-Heras, H., y Ibarra-Obando, S. (1997). Leaf-size Dynamics for *Zostera marina* L. in San Quintin Bay, México: a Theoretical Study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 351-359.
- Solana-Arellano, E., Echavarría-Heras, H., y Franco-Vizcaíno, E. (2010). A dynamical model for characterising seasonality effects on eelgrass plastochron intervals. *Annals of Applied Biology*, 157(1), 99-110.
- Stapel, J., Manuntun, R., y Hemminga, M. A. (1997). Biomass loss and nutrient redistribution in an Indonesian *Thalassia hemprichii* seagrass bed following seasonal low tide exposure during daylight. *Marine Ecology Progress Series*, 148, 251-262.
- Suchanek, T. H., Williams, S. L., Ogden, J. C., Hubbard, D. K., y Gill, I. P. (1985). Utilization of shallow-water seagrass detritus by Caribbean deep-sea macrofauna: $\delta^{13}\text{C}$ evidence. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32(2), 201-214.
- Sumoski, S. E., y Orth, R. J. (2012). Biotic dispersal in eelgrass *Zostera marina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 471, 1-10.
- Swartzman G. L., y Bentley R. (1979). A review and comparison of plankton simulation models. *ISEM J(1-2)*, 30-81.
- Thom, R. M., Borde, A. B., Blanton, S. L., Woodruff, D. L., y Williams, G. D. (2001). The Influence of Climate Variation and Change on Structure and Processes in Nearshore Vegetated Communities of Puget Sound and other Northwest Estuaries (pp. 2-6): Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US).
- Thom, R. M., Borde, A. B., Rumrill, S., Woodruff, D. L., Williams, G. D., Southard, J. A., y Sargeant, S. L. (2003). Factors influencing spatial and annual variability in eelgrass (*Zostera marina* L.) meadows in Willapa Bay, Washington, and Coos Bay, Oregon, estuaries. *Estuaries*, 26(4), 1117-1129.
- Touchette, B. W., y Burkholder, J. M. (2000). Review of nitrogen and phosphorus metabolism in seagrasses. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250(1), 133-167.
- Valle, M., Borja, Á., Chust, G., Galparsoro, I., y Garmendia, J. M. (2011). Modelling suitable estuarine habitats for *Zostera noltii*, using Ecological Niche Factor Analysis and Bathymetric LiDAR. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 94(2), 144-154.

- Van Katwijk, M., Bos, A., De Jonge, V., Hanssen, L., Hermus, D., y De Jong, D. (2009). Guidelines for seagrass restoration: importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. *Marine Pollution Bulletin*, 58(2), 179-188.
- Verhagen, J., y Nienhuis, P. (1983). A simulation model of production, seasonal changes in biomass and distribution of eelgrass (*Zostera marina*) in Lake Grevelingen. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 10(2), 187-195.
- Ward, D. H., Reed, A., Sedinger, J. S., Black, J. M., Derksen, D. V., y Castelli, P. M. (2005). North American Brant: effects of changes in habitat and climate on population dynamics. *Global Change Biology*, 11(6), 869-880.
- Wright, J. P., y Jones, C. G. (2006). The concept of organisms as ecosystem engineers ten years on: progress, limitations, and challenges. *Bioscience*, 56(3), 203-209.
- Zharova, N., Sfriso, A., Voinov, A., y Pavoni, B. (2001). A simulation model for the annual fluctuation of *Zostera marina* biomass in the Venice lagoon. *Aquatic Botany*, 70(2), 135-150.