

CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN

HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y
FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA

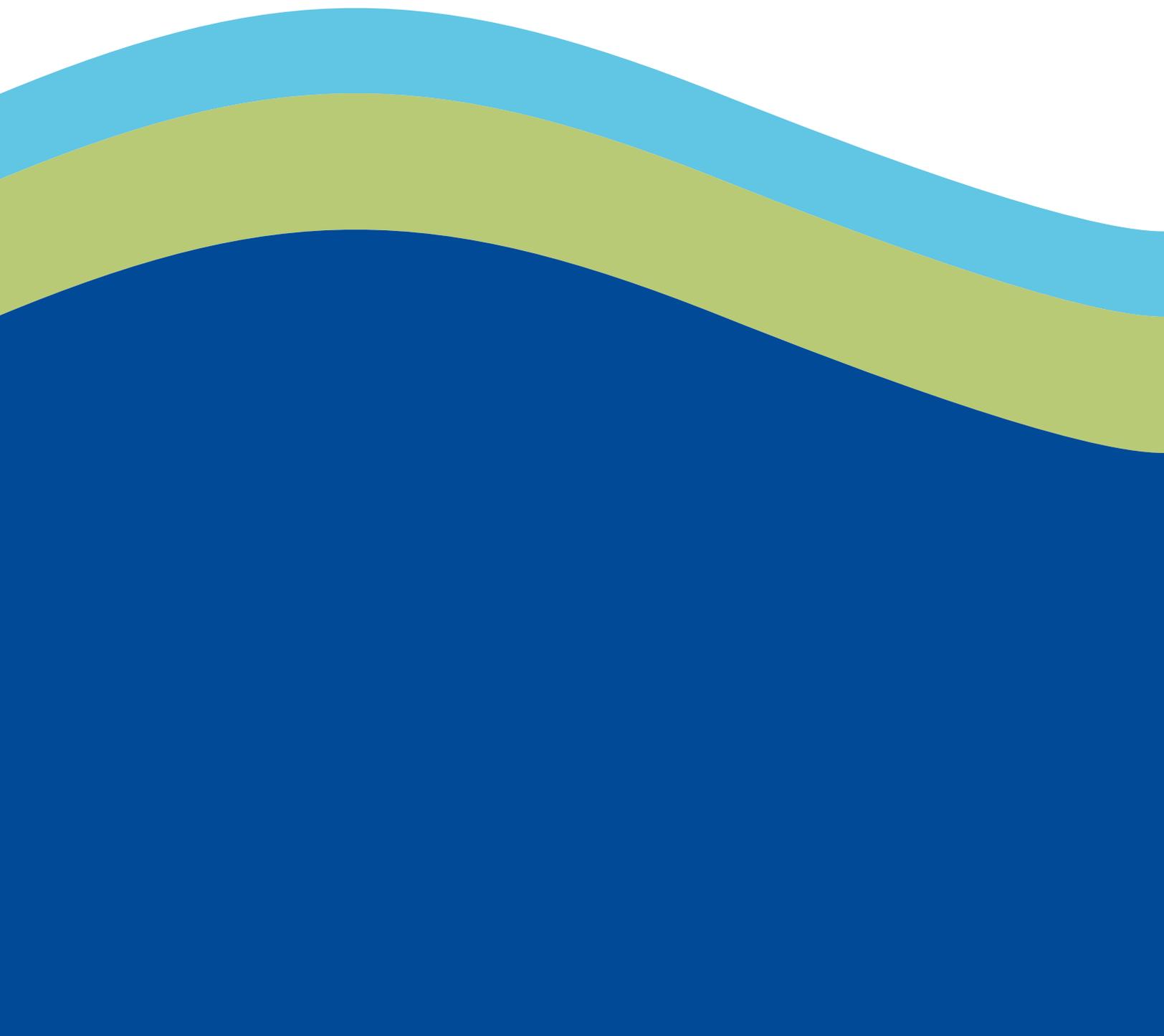


Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera

Joaquín Rodrigo Garza Pérez

Irina Ize Lema

Editores





CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN

HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y
FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA

Joaquín Rodrigo Garza Pérez
Irina Ize Lema
Editores

CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN
HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA

Producido por LANRESC (Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera). Febrero 2017.
D.R. © LANRESC

Editorial Dante S.A. de C. V.
Calle 17 No. 138 B por Prol. Paseo de Montejo Col. Itzimmá, 97100. Mérida, Yucatán, México.

I.S.B.N

Editores: Joaquín Rodrigo Garza Pérez & Irina Ana Rosa Ize Lema.

Fotografías: Sergio Medellín (Portada y pág. 8), Cortesía del USGS (pág. 14), Tonatíuh Mendoza (pág. 89), Rodrigo Garza (pág. 135), Alec Torres (pág. 163).

Cita sugerida: Garza-Pérez J.R. & Ize-Lema I.A.R. 2017. Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán. LANRESC, Yucatán, México.

Diseño gráfico: Gabriela Calero.

Este volumen es un producto del Proyecto LANRESC CONACyT P. 271544 “Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (Primera Consolidación).”

Esta publicación se ha producido por el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera, una plataforma de investigación interdisciplinaria y multi-institucional enfocada al estudio integral y soluciones sustentables que contribuyan a la conservación de las zonas costeras de México, Centro América, y el Caribe.

En esta publicación se presenta información multidisciplinaria de la zona de estudio de la comunidad costera de Sisal, la reserva estatal de el Palmar, la laguna aledaña conocida como la 'Bocana' o la 'Carbonera' y los fondos marinos en la costa noreste del estado de Yucatán.

El LANRESC permite la integración de grupos de expertos de diferentes áreas y disciplinas así como el uso de diferentes técnicas y herramientas para evaluar los diversos procesos relevantes y determinantes de la resiliencia costera.

El LANRESC tiene como objetivo principal la caracterización y el estudio del comportamiento, la variabilidad y la resiliencia de los diversos ambientes costeros y sus procesos, así como el desarrollo de soluciones sustentables para la adaptación o transformación de sus sistemas socio-ambientales ante perturbaciones de diferente naturaleza, como: intervenciones antropogénicas, eventos extremos, y cambio climático.



ÍNDICE

- 9 **PRÓLOGO** Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida
- 11 **INTRODUCCIÓN** Joaquín Rodrigo Garza-Pérez
- 14 **SECCIÓN 1**
- 15 **CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN SISAL** Bernardo Figueroa-Espinoza, Paulo Salles, José López-González, Angel Ruiz-Angulo y Gonzalo U. Martín-Ruiz
- 30 **CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN** José López González, Miguel F Domínguez Sandoval
- 40 **CARACTERIZACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA COSTERA DURANTE EVENTOS DE BRISAS Y NORTES FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN** Alec Torres-Freyermuth y Jack A. Puleo
- 49 **ESTACIÓN DE VIDEO MONITORIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN INTER-ANUAL DE LA PLAYA DE SISAL** E.T. Mendoza, E. Ojeda, A. D. Gracia-Barrera, P. I.Espadas
- 58 **VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA MORFOLOGÍA DE LA PLAYA EN SISAL, YUCATÁN** Gabriela Medellín
- 67 **VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DEL NOROESTE DE YUCATÁN EN EL PERIODO 2004-2014** A.P. Ruiz-Beltrán, R. Rioja-Nieto
- 75 **CICLONES TROPICALES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN** Christian M. Appendini, Brenda Olivares López, Citlaly Cauich Poot, Rafael Meza-Padilla

89 **SECCIÓN 2**

90 **MONITOREO AMBIENTAL DE LARGO PLAZO, HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA RESILIENCIA DE SISTEMAS COSTEROS** Xavier Chiappa-Carrara, Cecilia Enriquez, Ismael Mariño-Tapia, Maribel Badillo, Alfredo Gallardo, Carlos Yañez Arenas, Etzaguery Marin-Coria, Leticia Arena, Patricia Guadarrama, Korinthya López-Aguiar, Santiago Capella

102 **DINÁMICA TEMPORAL DE LOS PAISAJES SUBLITORALES DE SISAL, YUCATÁN** Joaquín Rodrigo Garza Pérez, Julia Naranjo García, Dominique Pamela Orvañanos Donis

121 **ASOCIACIÓN DE ESPECIES ÍCTICAS A FONDOS MARINOS EN SITIOS DE PESCA RECREATIVA-DEPORTIVA FRENTE A SISAL, YUCATÁN** Vidal Hernández Laura, Rodrigo Garza Pérez, Xavier Chiappa Carrara, Daniel Arceo Carranza

137 **SECCIÓN 3**

138 **CONTAMINACIÓN HISTÓRICA POR HIDROCARBUROS EN EL PUERTO DE SISAL, YUCATÁN** Noreña-Barroso, Elsa; Iturria-Dawn Raquel Aidé; Árcega-Cabrera, Flor

152 **RESILIENCIA, CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y DESECHOS EN SISAL: UNA ECUACIÓN SIN RESOLVER** U. Urrea, G. Alcalá

165 **SECCIÓN 4**

166 **DIVERSIDAD DE BACTERIAS DEL GÉNERO *STREPTOMYCES* EN SEDIMENTOS COSTEROS DE LA LAGUNA LA CARBONERA Y EL PUERTO DE CHELEM EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN Y SU POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO** Parera-Valadez, Yessica, Yam-Puc Alejandro, Borges-Argáez Rocio, Cáceres-Farfán Mirbella, López-Aguiar Korynthia, Prieto-Davó, Alejandra

185 **SENSIBILIDAD A LAS OSCILACIONES TÉRMICAS DE LAS ESPECIES DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA Y PESQUERA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN ANTE ESCENARIOS DE CALENTAMIENTO GLOBAL** Nelly Tremblay, Maite Mascaró, Fernando Díaz, Claudia Caamal-Monsreal, Adolfo Sánchez, Cristina Pascual, Carlos Rosas



PRÓLOGO

Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida

LANRESC

El Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC) fue creado en el año 2015 en respuesta a la convocatoria de Laboratorios Nacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). En un esquema novedoso que fomenta el trabajo interdisciplinario entre diferentes instituciones, el LANRESC tiene por misión el evaluar la capacidad de sistemas y comunidades costeras para recuperarse y adaptarse a perturbaciones de origen natural o antropogénico para el estudio de la resiliencia costera en el contexto de la sustentabilidad y del cambio global.

El LANRESC está actualmente conformado por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) como institución responsable y del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), el Centro de Cambio Global y de la Sustentabilidad del Sureste (CCGSS) y la Facultad de Ciencias de la UNAM de la Unidad Académica Yucatán (UAY-Ciencias) como instituciones asociadas. Participan también en el LANRESC otras instituciones académicas como el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad de Baja California (UABC), el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y la Unidad de Química Sisal de la Facultad de Química de la UNAM, así como el grupo de hidrología del Instituto de Ingeniería en Ciudad Universitaria.

El LANRESC se concibe como una plataforma generadora de conocimiento sobre los sistemas costeros a nivel nacional, fomentando la colaboración de grupos de expertos de diferentes áreas y disciplinas que buscan también, como uno de sus ejes fundamentales, la formación de recursos humanos que adquieran los conocimientos, las herramientas y el enfoque interdisciplinario necesarios al estudio de la resiliencia costera.

Lo anterior se logra mediante la observación y el monitoreo de variables en campo (percepción remota e in situ) a largo plazo y con alta resolución espacial y temporal en sitios representativos y de probado interés, el análisis de muestras diversas en laboratorio, así como por medio de la modelación física y numérica de diversos procesos relevantes

y determinantes de la resiliencia en las zonas costeras. La observación, caracterización y análisis de las condiciones y variabilidad del clima así como de la dinámica oceánica, lagunar, eco-hidrológica y geohidrológica proporcionan resultados clave para la evaluación de los impactos ambientales en la costa como la erosión, la inundación, la intrusión salina superficial y subterránea, entre otros, que posteriormente permiten evaluar la resiliencia y los riesgos tanto de los ecosistemas costeros como de los aspectos socioeconómicos asociados a las actividades productivas de estas zonas.

Debido a la presencia del Campus Sisal en la Unidad Académica Yucatán de la UNAM desde hace ya un poco más de una década, existe en esta zona de la costa noreste de Yucatán una importante masa crítica de información de este tipo generada por los investigadores del Campus que estudiamos los diferentes ecosistemas en los alrededores de la comunidad y del puerto de Sisal así como de las zonas aledañas de la Reserva Estatal de 'El Palmar' y la laguna de la Carbonera o "bocana".

La recopilación de esta información de muy diferentes disciplinas y formatos realizada en el presente volumen 'CARACTERIZACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN. HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y FORTALECIMIENTO DE LA RESILIENCIA', es un primer paso para la comprensión multidisciplinaria de los complejos y frágiles socio-ecosistemas que constituyen en la actualidad las comunidades costeras de nuestro país, contribuyendo para su gestión integral y generando conocimiento para el fortalecimiento de su resiliencia ante presiones como el cambio climático y la degradación de los recursos naturales.

Esperamos que este esfuerzo abone a la comprensión de esta zona costera así como de las diferentes comunidades costeras del país.

INTRODUCCIÓN

Joaquín Rodrigo Garza-Pérez^{1,2}

¹ Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera

² UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM

CONSIDERACIONES PARA UNA GESTIÓN DE LA RESILIENCIA EN SISTEMAS COSTEROS BAJO PRESIONES SINÉRGICAS ANTROPOGÉNICAS Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Palabras Clave: Bienestar humano, Desarrollo, Ecosistemas, Impactos Agudos, Impactos Crónicos.

La resiliencia en el contexto de los sistemas, es la propiedad que estos poseen de regresar a un punto de equilibrio similar al anterior al efecto de alguna perturbación. Esta definición involucra muchos otros conceptos inherentes a la composición de la estructura del sistema y la función de cada uno de estos componentes que se encuentran finamente entrelazados. En términos de estructura, se entiende que un sistema con una mayor diversidad de componentes en equilibrio, podrá ofrecer una redundancia de funciones, y esta propiedad de redundancia incrementará la resiliencia del sistema, al poder continuar funcionando después de un disturbio. En este punto es importante hacer énfasis en que el punto medular en el interés de la investigación de la resiliencia de los sistemas consiste en su aplicación para la preservación de la función del sistema.

Si transportamos estos conceptos teóricos a sistemas socio-ambientales, la función de estos sistemas consiste por una parte en proveer servicios ambientales, y por otra parte en regular el aprovechamiento sustentable de los recursos, para que en un escenario óptimo se lograra mejorar el bienestar humano y al mismo tiempo preservar el sistema ambiental. Los servicios ambientales que presta el sistema solo se pueden preservar a través de regulaciones de uso derivadas de la implementación de un manejo racional

y sustentable de los recursos. En términos de diversidad de los componentes de los sistemas socio-ambientales (para aumentar la redundancia y con ello la resiliencia del sistema), esta se da desde la parte ambiental a través de la biodiversidad, y desde la parte socio-económica a través de la diversificación de las actividades económicas. La pregunta emergente es ¿Cómo gestionar la resiliencia de estos sistemas para preservar su función bajo los múltiples factores de disturbio a los que se ven enfrentados cotidianamente?

En primer lugar se deben de considerar los insumos indispensables para la gestión de la resiliencia en sistemas socio-ambientales costeros:

a) El conocimiento de la estructura del sistema y sus componentes cambiantes, respondiendo a las preguntas ¿Qué hay? ¿Cuánto hay? ¿En dónde está? y ¿En que condición se encuentra? Asimismo, acerca del componente social ¿Como es la apropiación de los recursos? ¿Como es la participación comunitaria? y ¿Cual es el nivel de vulnerabilidad de la población local?

b) El entendimiento de la función individual de los componentes del sistema, a través de la definición de las relaciones ecológicas, económicas y de los servicios ambientales que aportan.

c) La caracterización de los tipos de disturbios (naturales y antrópicos) sobre el sistema y sus componentes, tomando en cuenta las escalas espaciales y temporales en las que operan, así como sus magnitudes y frecuencias.

d) El desarrollo de un marco legal sólido y robusto que permita la implementación de regulaciones de uso, protección y conservación de los recursos, así como la aplicación de ajustes a estas regulaciones para mejorar su efectividad.

En el marco de la implementación de esta gestión de la resiliencia en zonas costeras, tenemos el caso de Sisal Yucatán, que es una zona en la costa noroeste del estado de Yucatán, en esta zona se asienta el poblado de Sisal, con una larga historia que comienza como un puerto comercial prehispánico y posteriormente, en el año 1585 con la fundación del puerto Santa María de Sisal, que comunicaba con Mérida. En años posteriores el puerto de Campeche aventajó comercialmente a Sisal, pero en 1807 adquiere relevancia al recibir autorización de descarga de mercancías como puerto principal, y el asentamiento crece a la par del auge del henequén, que constituyó el detonador económico de la región y fue el producto de exportación más importante. En 1871, esta actividad comercial portuaria se traslada a Puerto Progreso y Sisal pierde una vez más relevancia y es hasta la década de 1970 con el declive en la industria henequenera en Yucatán, que Sisal (y el resto de las poblaciones costeras) comienza a recibir influjo de inmigrantes del interior del estado, enfocando y aumentando las actividades económicas de estas poblaciones hacia la pesca. A finales de la década de 1990 y principios del siglo XXI, se desarrolló en Sisal una empresa acuícola de camarón, que llegó a tener un gran volumen de producción y creó fuentes de trabajo locales, pero un manejo sanitario deficiente acabó por disminuir la producción y la empresa cerró.

La perspectiva de una futura gestión de la resiliencia en Sisal, debe de integrar esta rica historia de apropiación de los recursos, la dinámica social en constante evolución y los conflictos por espacio que se gestan actualmente en la zona asociados al cambio en el uso de suelo y expansión urbana. Todo esto en el contexto de actividades económicas basadas en pesquerías sobreexplotadas, turismo no sustentable y legislaciones con vacíos legales, solapamiento de funciones entre organismos y poca observancia.

En 2004, la Universidad Nacional Autónoma de México abrió las puertas de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal, como parte de la Facultad de Ciencias, y posteriormente, se incorporó la Unidad Sisal de la Facultad de Química y el Laboratorio de Ingeniería en Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería, constituyendo así la Unidad Académica Sisal, ahora Unidad Académica de Ciencia y Tecnología Yucatán, de la UNAM, que incorpora a su vez a personal del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas. De esta masa crítica de investigadores y profesores en múltiples líneas de investigación, surge una miríada de estudios para caracterizar la zona costera de Sisal y su área de influencia.

Desde los estudios de caracterización de los agentes forzantes de cambio del ambiente físico que abarcan tormentas y huracanes, viento, oleaje, características hidrodinámicas de la costa, morfología de la playa y cambios en la línea de costa; pasando por la caracterización y evaluación tanto de los ambientes costeros y sublitorales como de las relaciones con las comunidades que los componen, y los efectos de las actividades humanas sobre el ambiente, hasta la caracterización de la actividad bacteriana en la zona costera y los posibles efectos del cambio climático global sobre una de las pesquerías más importantes de la región, el *Octopus maya*. Los estudios que aquí se presentan son una colección representativa de estas aproximaciones que incluyen desde escalas y procesos microscópicos, pasando por escalas locales, hasta escalas regionales y estudios a través de técnicas de percepción remota.

Esta larga historia y el cambio del uso de los recursos que se ha dado a lo largo de los siglos, ha dado como resultado el estado actual del sistema socio-económico. Y en este volumen se presenta la información que la Universidad Nacional Autónoma de México ha generado en el período de 2004 a 2016, como uno de los primeros pasos para lograr la gestión de la resiliencia de la zona costera de Sisal: se presentan caracterizaciones ambientales, análisis de componentes del sistema y evaluaciones de cambio en el sistema que servirán de base para futuros estudios integrales en la zona para establecer estrategias de manejo para la preservación del sistema costero y sus funciones.



SECCIÓN 1

CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN SISAL

**Bernardo Figueroa-Espinoza, Paulo Salles,
José López-González, Angel Ruiz-Angulo
y Gonzalo U. Martín-Ruiz**

LIPC-Instituto de Ingeniería, UNAM, bfigueroae@iingen.unam.mx

RESUMEN

Se presenta una revisión del trabajo realizado desde la llegada del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM (en adelante LIPC) a Sisal, Yucatán. La caracterización del viento en la zona es de vital importancia para trabajos de investigación así como de Ingeniería Costera. Se revisan resultados publicados entre 2010 y 2016 y se presentan algunos resultados inéditos de mediciones realizadas entre el nivel de terreno y 50 m de altura usando una torre meteorológica y anemómetros sónicos.

Palabras clave: anemometría sónica, perfil vertical de viento, potencial eólico efectivo, densidad de energía eólica, capa límite atmosférica.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la meteorología, y en particular el viento, es un tema relevante en el contexto de la Ingeniería Costera y más aún si se desea hacer un estudio multidisciplinario en el marco de la Resiliencia Costera (o para fines de alto impacto en la toma de decisiones en políticas públicas.) Desde el punto de vista científico es primordial contar con mediciones confiables que permitan tanto la caracterización como la obtención de modelos conceptuales, matemáticos y numéricos que permitan hacer predicciones

de variables importantes para los fines antes mencionados.

Los estudios que se realizan en el LIPC relacionan múltiples aspectos del medio físico costero como la interacción océano-atmósfera, oleaje-estructura, morfología de playas, procesos de erosión/acreción, transporte de sedimento, peligro, vulnerabilidad y riesgo debido a eventos extremos, así como el uso de energías renovables en un marco que incluya aspectos de impacto social y ambiental. Es claro que el viento juega un papel importante en todos los ejemplos antes mencionados.

A pesar de que en la literatura es posible encontrar varios trabajos publicados sobre la meteorología de la Península de Yucatán[18], [22], [3], [2] (la mayoría referente a huracanes, dada su importancia en toda la región del Caribe), antes de la llegada del equipo de trabajo del LIPC a Yucatán existían solo unas pocas investigaciones relacionadas con viento en Sisal; entre lo más destacado, Soler-Bientz [21] reportó información de potencial eólico (rapidez, dirección, exponentes de corte) para un sitio tierra adentro más cercano a Mérida que a Sisal. Saldaña y Miranda [19] reportan mediciones a 20 m y 40 m de altura en el campus de la Unidad Sisal de la UNAM, se estimaron el potencial eólico a 20 m y 40 m, y se hace una extrapolación, suponiendo una ley de potencias para el perfil vertical de rapidez de viento a 80 m. Este estudio es particularmente relevante pues es justo esa torre la que se reconstruyó e instrumentó para llevar a cabo nuestras primeras mediciones, en el marco de un proyecto CFE-CONACYT cuyos principales objetivos son la caracterización de la capa límite atmosférica y obtención del Potencial Eólico Efectivo en el noroeste de la Península de Yucatán.

EL EXPERIMENTO

La torre, se localiza en las coordenadas 90° 02' 48" W, 21° 09' 53" N en Sisal, Yucatán, una población pesquera a aproximadamente 50 km al noroeste de la capital Mérida, como se muestra en la Ilustración 1.

La torre fue instrumentada con cinco anemómetros sónicos, dos de ellos 3D (mide dos

componentes horizontales y la vertical de velocidad de viento) y tres 2D. Los anemómetros fueron colocados a distintas alturas, a 3, 6, 12.5, 25 y 51 metros de altura, de modo que se obtenga información del perfil vertical de viento hasta la altura máxima de la torre (ver Tabla 1).

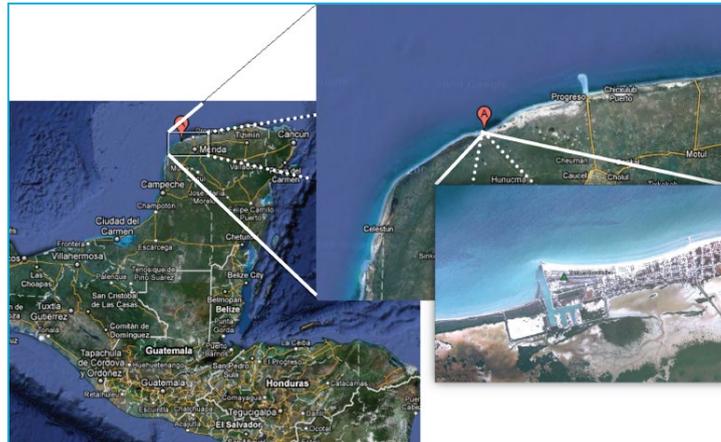


Ilustración 1. Localización del experimento (c) Google, 2012.

Tabla 1. Tipo de anemómetro y altura sobre nivel del terreno.

ID	tipo	z(m)
0	2D	3.0
2	2D	6.0
3	3D	12.5
1	2D	25.0
4	3D	51.0

También se instrumentó un sensor de temperatura y humedad, así como un sensor de presión.

Los anemómetros sónicos trabajan a alta frecuencia (10 Hz) y envían la velocidad a un registrador de datos, el cual se comunica con la red del instituto por medio de un puente Ethernet. En las instalaciones del laboratorio un programa copia la información directamente del registrador

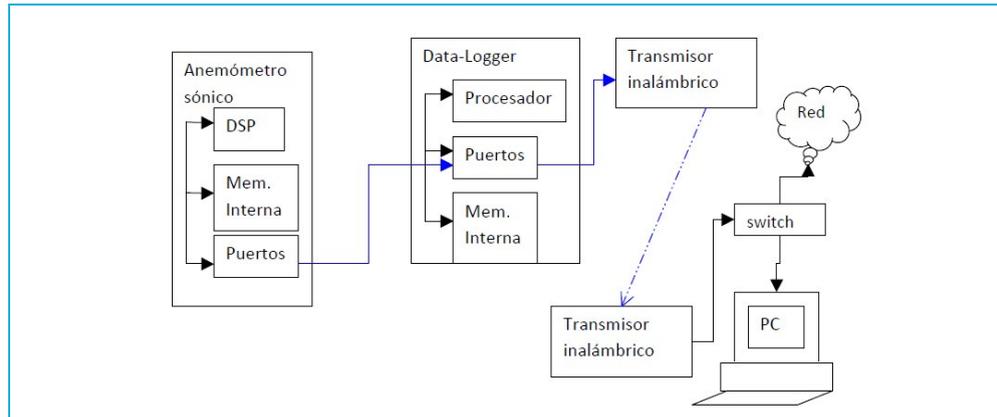


Ilustración 2. El registrador de datos (data-logger) recopila información en tiempo real y la publica en la red por medio de un puente Ethernet inalámbrico.

de datos crudos a un disco duro en un servidor (ver Ilustración 2).

Durante la recolección, los datos estuvieron disponibles por red en tiempo real (hasta ocho horas de datos) y se creó una base de datos accesible al público con los componentes de viento promediados cada hora o cada cinco minutos, que hoy día forma parte del observatorio costero: <http://observatoriocostero.iingen.unam.mx/web/Viento.php>

El mismo sitio contiene una liga donde se describe con detalle una base de datos de acceso libre y un ejemplo de aplicación. Dicha base de datos está hecha por medio del código libre MySQL® y se puede consultar directamente por medio del lenguaje estructurado de consultas SQL. La base de datos abierta también contiene datos históricos de la estación meteorológica que se encuentra en el campus que también es accesible vía web y que pertenece al CINVESTAV (<https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IYUCATAN5>).

Los datos obtenidos durante el experimento fueron sometidos a una fase de condicionamiento

de señal y detección de errores. Entre los procedimientos que se llevaron a cabo están:

- Eliminación de tendencias
- Remoción de picos
- Eliminación de archivos con huecos (mayores a medio segundo)
 - Llenado de huecos menores a 0.2 segundos (en algunos casos, pues un llenado solamente se aplica cuando es estrictamente necesario)
 - Un procedimiento de detección de efectos no estacionarios [10] y
 - Esquema de triple rotación de ejes, de modo que la media de fluctuaciones verticales sea cero, alineando la componente u con el vector de viento [15].

Todos estos procesos son descritos en [8] y referencias ahí citadas. Los datos crudos a alta frecuencia se usan para obtener variables turbulentas, como el transporte turbulento de calor y moméntum, por medio de la técnica de covarianza de remolinos [15].

Los resultados que se presentan en este documento son variados, algunos provenientes de simulación numérica, pero la mayoría experimentales. El experimento se terminó en noviembre

de 2014 y ha sido la base de productos académicos como congresos y artículos en revistas que se citan a lo largo de este texto.

CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y LA BRISA

La Península de Yucatán es una vasta región que se caracteriza por su falta de orografía. Esto hace que los vientos provenientes del norte penetren profundamente tierra adentro, y se vea influenciada por patrones de gran escala dada la cercanía con el límite entre las zonas áridas y tropicales[16]. En la península hay también una variedad de climas que van desde selva húmeda perennifolia al Sureste hasta selva baja caducifolia al Noroeste. Existen tres estaciones anuales, secas (marzo a junio), lluvias (junio a octubre) e invierno (octubre a febrero). La temperatura media anual oscila entre 25° y 26°C, con mínimos por debajo de los 10°C en enero y máximos superiores a los 40°C en mayo. Las precipitaciones anuales en Sisal son bajas, inferiores a 600 mm por año, pero esta cifra puede fluctuar entre 300 y 900 mm por año, dependiendo del paso de

huracanes y tormentas invernales. La Península de Yucatán presenta un gradiente de humedad importante, pudiendo llegar a 1400 mm por año en el sureste de la península, a menos de 350 km de distancia de Sisal[25].

El viento en Sisal se caracteriza por vientos dominantes del sureste y noreste, siendo más común el primero y más intenso el segundo, como se observa de la rosa de vientos en la Ilustración 3, que muestra un comparativo del viento medido a 50 m de altura con simulaciones de mesoescala realizadas por el equipo de trabajo del Dr. Jorge Zavala Hidalgo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. El gran parecido indica que esta técnica de simulación podría ser usada para buscar zonas con potencial de generación, aplicable a zonas con planicies costeras muy extendidas [8].

Los valores más intensos de rapidez de viento se presentan durante la primavera y durante el invierno debido a eventos de mesoescala provenientes del norte del Golfo de México conocidos como “Nortes”. Estos eventos se originan en las

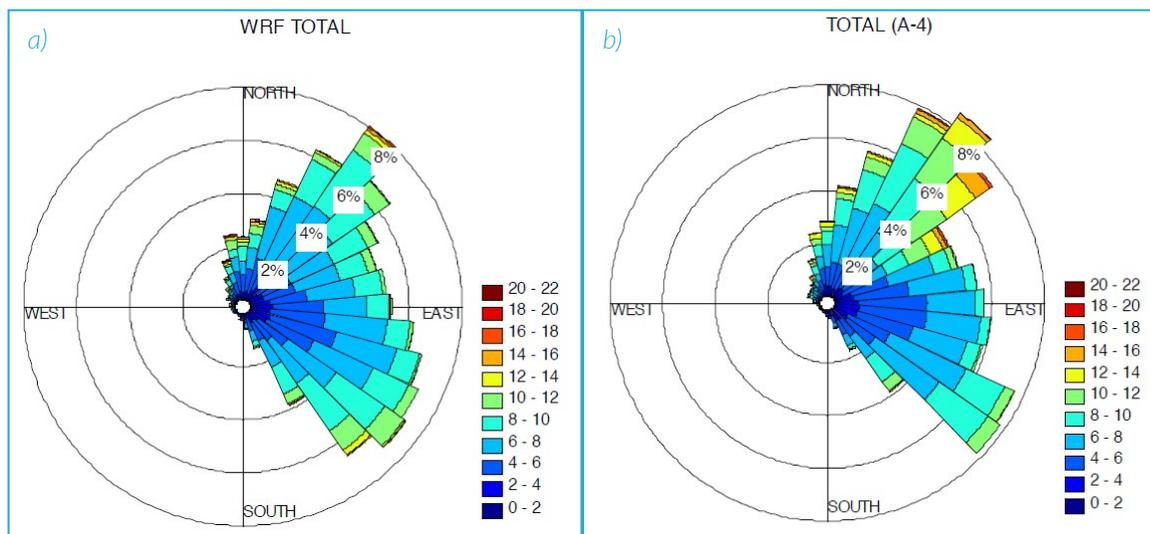


Ilustración 3. a) Rosa de vientos proveniente de simulación de mesoescala. b) rosa de vientos medida a 50 m.

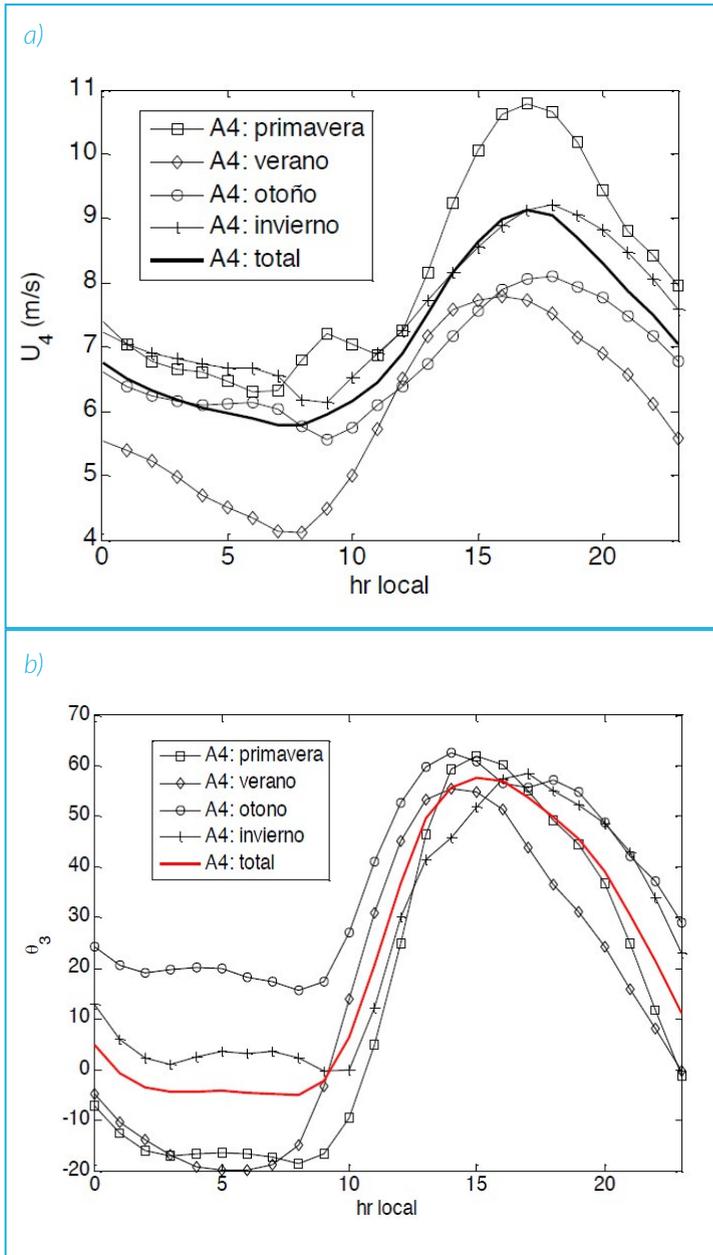


Ilustración 4. Rapidez de viento (a) y dirección (b) por hora del día, por estación del año para el anemómetro que se encuentra a 50 m del terreno A4 (basada en equinoccios y solsticios).

y cálidos del Golfo de México. El frente viaja hacia el sur y sureste desplazándose a través del Golfo de México y llega a Sisal, normalmente precedido por un aumento de la presión atmosférica, seguido por un fuerte aumento de la intensidad de viento y dirección, proveniente del norte.

Existe también un régimen de brisas diurnas dominado por la brisa marina, que alcanza sus valores máximos entre las 17:00 y 18:00 hrs. Esta brisa es causada por la diferencia de temperaturas entre la tierra y el agua adyacente a la costa, y dada la falta de orografía puede penetrar varios kilómetros tierra adentro[23],[24].

En la Ilustración 4 se muestra la rapidez de viento por hora del día (local) y por estación del año para los cinco anemómetros sónicos a distintas alturas, durante el periodo de septiembre 2010 a septiembre de 2011[8].

El comportamiento de la brisa en Sisal difiere de la hodógrafa elipsoidal que predice la teoría lineal [12], [20] debido a factores como la configuración geográfica y efectos no lineales. Dicha hodógrafa, que en general tiene rotación horaria (en el hemisferio norte), muestra un rizo en las primeras horas de la mañana, como

grandes llanuras centrales de Estados Unidos y Canadá, donde se encuentran vientos fríos y secos provenientes del norte con vientos húmedos

lo muestra la Ilustración 5, donde se presentan hodógrafas para todo el 2014, la primavera del mismo año, y un Norte típico, obtenido

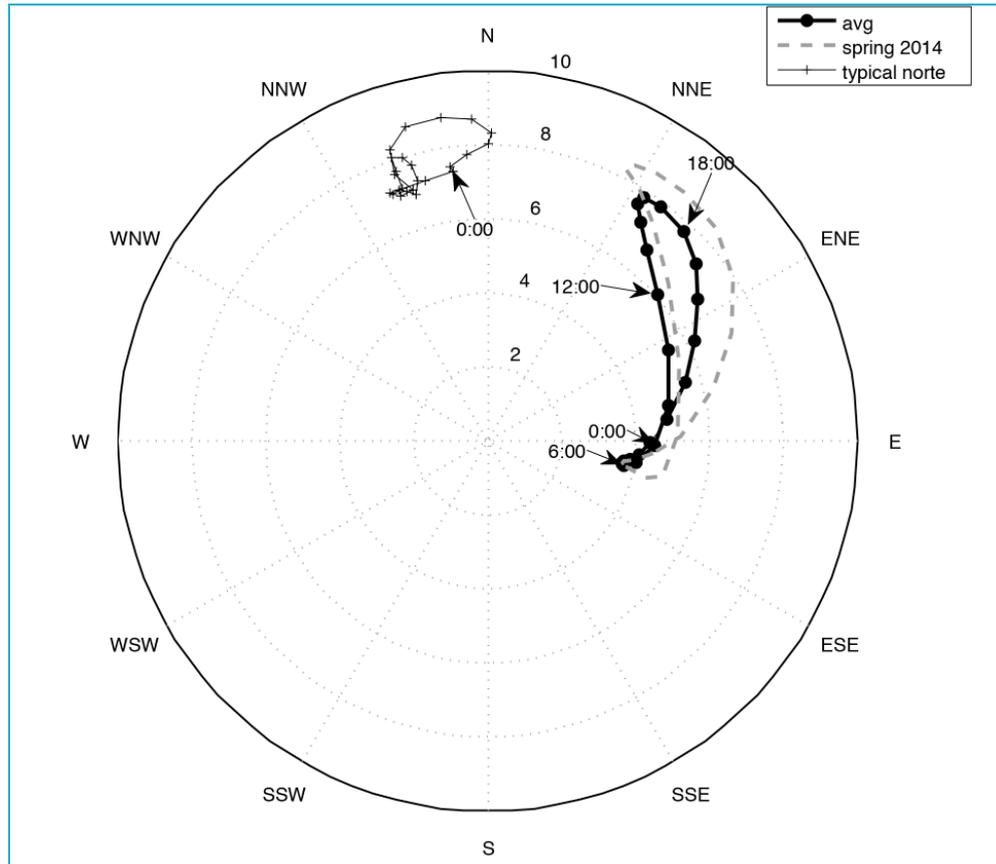


Ilustración 5. hodógrafa de viento en Sisal, ocupando promedios horarios para el año de 2014 (línea continua), la primavera de 2014 (línea discontinua), y un Norte típico (cruces y línea continua).

promediando los Nortes de la estación de 2014. También se observa un rizo, producto seguramente de la interacción entre el Norte y la brisa.

TERRENO HETEROGÉNEO Y CAPA LÍMITE INTERNA

Cuando el viento se mueve a través de un salto de rugosidad importante, como es el caso de la línea de costa, existen implicaciones en las características del viento aguas abajo. Cuando el viento de mar pasa la línea de costa, la influencia del terreno (playa) más rugoso que el agua se hace sentir cada vez más conforme uno se

aleja tierra adentro. Esta influencia provoca que el aire más cercano al suelo se “frene”, causando variaciones en el perfil vertical de velocidades e intensidad turbulenta, formando una Capa Límite Interna (CLI) similar a una capa límite causada al contacto de un flujo uniforme con una placa plana. Existen muchos estudios que describen las características de dichas CLI[11]. En la Ilustración 6 se muestran perfiles verticales de velocidad de viento para dos casos: (a) viento de tierra y (b) viento de mar en Sisal. Estos perfiles se obtuvieron a partir de información de casos con estabilidad cuasi-neutral. Se calculó

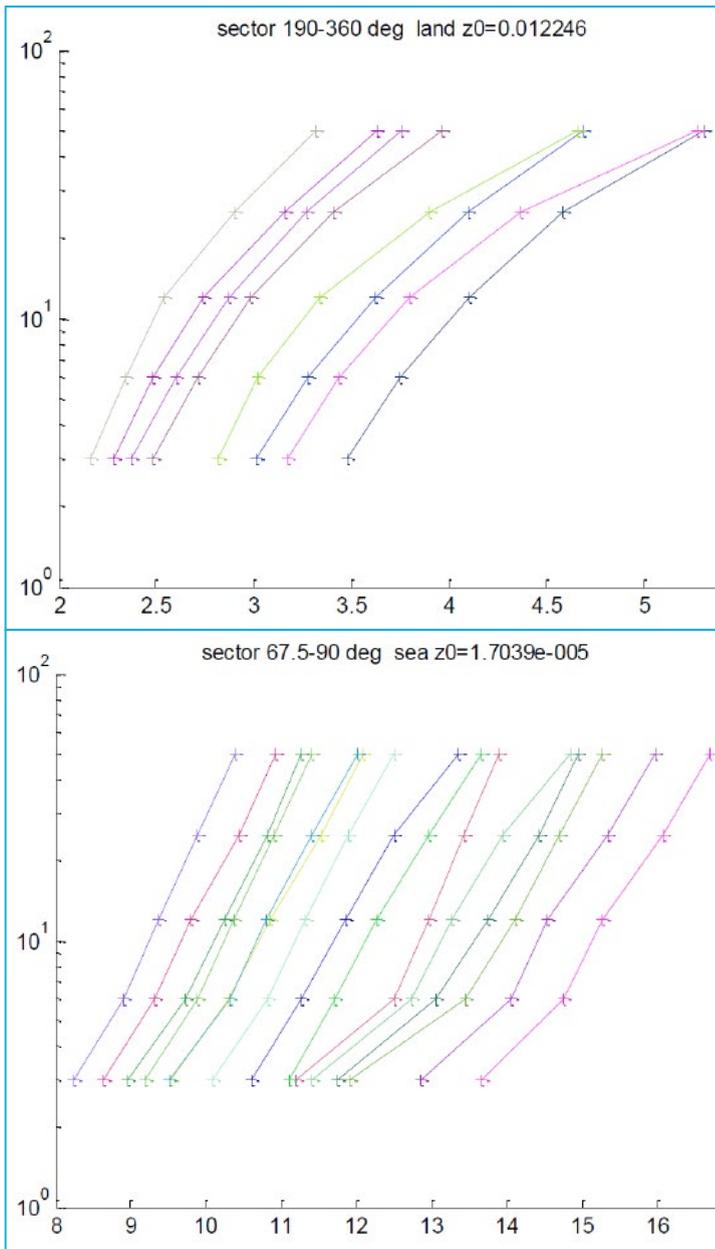


Ilustración 6. Perfil vertical de rapidez de viento para (a) viento de tierra, y (b) viento de mar.

la Longitud de Monin-Obukhov a partir de las lecturas de los anemómetros sónicos [9] y se separaron los casos donde se cumplen aproximadamente las condiciones de neutralidad (el

efecto de la flotabilidad debido a diferencias de temperatura es despreciable comparado con los esfuerzos turbulentos). Bajo estas condiciones, el perfil vertical de velocidad en escala semi-logarítmica debería ser una línea recta. En la Ilustración 6 se observa un “quiebre” en las líneas; para el caso de vientos de tierra la altura del quiebre es mayor que para vientos de mar. La altura de la CLI se aproxima a la posición de dicho cambio de pendiente en los perfiles (aproximadamente 6 m para vientos de mar y 20 m para vientos de tierra). Arriba de dichos perfiles las características de esfuerzo turbulento, intensidad turbulenta, y velocidad de fricción son similares a aquellas aguas abajo, mientras que debajo de la altura de CLI hay una capa donde el esfuerzo turbulento varía con la altura. En presencia de una CLI las suposiciones de terreno homogéneo se rompen y no es posible usar los mismos métodos para caracterizarlos (teoría de similitud de Monin-Obukhov[15]).

Debido a estas limitaciones se llevó a cabo un estudio sobre cómo se comportan las variables turbulentas en la cercanía de la

- Se puede aplicar para terreno costero mientras que el método tradicional no (depende de la suposición de homogeneidad horizontal).

- Requiere solamente un anemómetro sónico
- La rugosidad superficial obtenida es representativa del *footprint* del anemómetro, de modo que depende de la altura y velocidad de viento. Los resultados mostraron poca variación con la altura de la medición, salvo en casos con muchos obstáculos como el pueblo de Sisal.

- Este método aprovecha todas las mediciones, no solamente mediciones neutrales.

Dicha metodología consistió en dividir el terreno en sectores, según las direcciones de viento que provengan de terrenos con características similares, como se muestra a continuación:

Se sabe que aún para terreno homogéneo, si la estabilidad no es neutral, el perfil vertical de velocidad de viento ya no es proporcional al

logaritmo de la altura. La desviación con respecto a esta línea recta (proporcionalidad) es una función de la estabilidad atmosférica, y se conoce como *integrated stability function* $\psi(z/\Lambda)$ [9] o función integrada de estabilidad, de modo que la velocidad ya no es una recta en una gráfica semi-logarítmica:

$$\frac{\kappa U}{u_*} = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{\Lambda}\right)$$

Si uno grafica esa función ψ para el caso no homogéneo en función de z/Λ (donde Λ es la Longitud de Obukhov medida a una altura dada), la ordenada al origen de dicha curva es el logaritmo natural de la rugosidad superficial efectiva $z_{0\text{eff}}$. Esta rugosidad efectiva se comparó con estimados (con una importante incertidumbre) basados en la pendiente de tramos del perfil vertical de velocidades para el caso de estabilidad neutral; los resultados se muestran en la Ilustración 8.

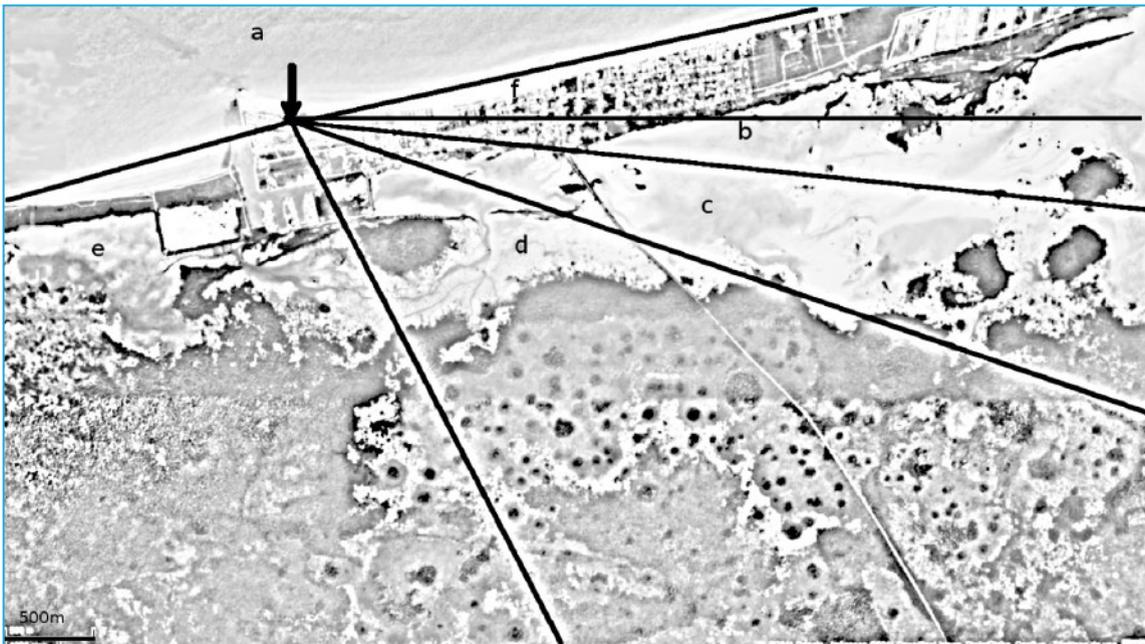


Ilustración 7. Sectores de distinta rugosidad superficial. Se separó el mar (a), la laguna costera (b y c), el pueblo (f), y el terreno al oeste, más homogéneo (e).

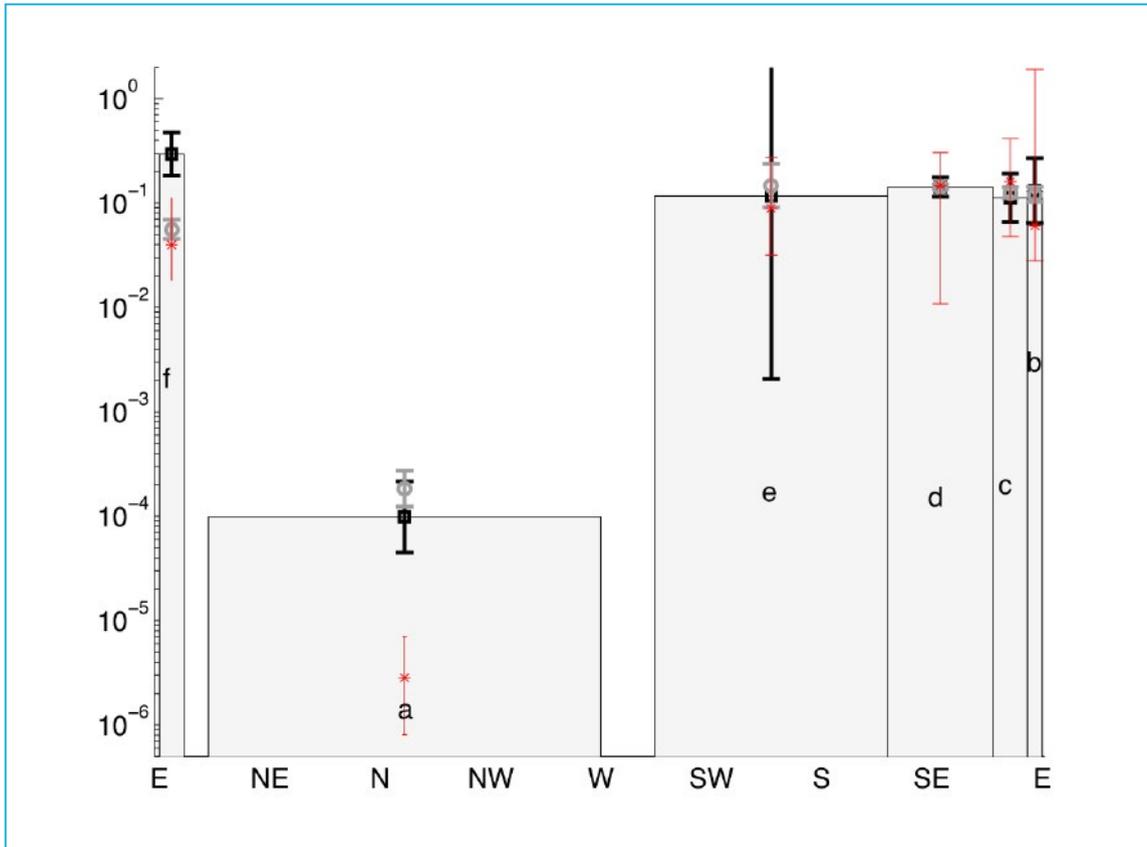


Ilustración 8. Rugosidad superficial efectiva. Círculos: z=12.5 m; Cuadros: z=50 m; Asteriscos: método tradicional (de perfil de velocidad).

Los resultados son suficientemente consistentes. Nótese que las barras de error para z=12.5 m son menores que el método tradicional. Las inconsistencias provienen principalmente del sector f, que es el viento que viene del pueblo de Sisal, lo que muestra su sensibilidad a heterogeneidades del terreno. La diferencia más notoria proviene de vientos de mar; esto se debe a que el método es sensible a la rugosidad del mar a una distancia importante de la torre (entre más alto, más distancia), del orden de 5 km para z=50 m. La rugosidad del mar puede variar muchísimo dependiendo del estado del mar.

POTENCIAL EÓLICO EFECTIVO

La energía disponible del viento depende del cubo de la rapidez, de modo que vientos más fuertes producirán mucha más energía. La manera de calcular el potencial eólico efectivo es haciendo una integral o sumatoria que pondere la energía del viento en función de la velocidad. Esto se hace por medio de la integral de la velocidad al cubo multiplicada por la densidad de probabilidad en función de la rapidez del viento[17]:

$$D(U) = \int_0^{\infty} f(U) \frac{1}{2} \rho U^3 dU$$

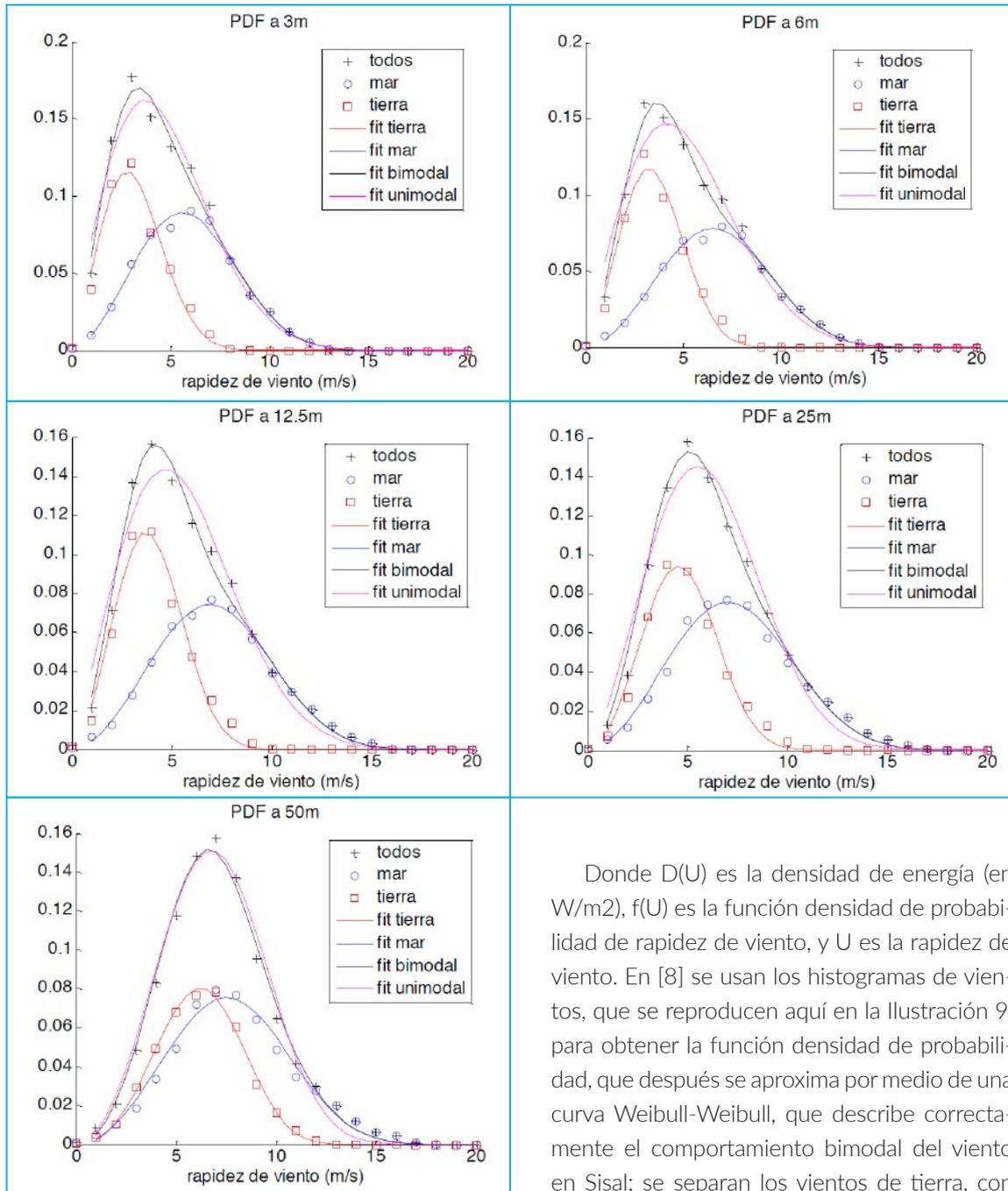


Ilustración 9. Función densidad de probabilidad a distintas alturas del terreno: círculos: viento de mar, cuadros: viento de tierra. Se muestran también ajustes Weibull y bimodal.

Donde $D(U)$ es la densidad de energía (en W/m^2), $f(U)$ es la función densidad de probabilidad de rapidez de viento, y U es la rapidez de viento. En [8] se usan los histogramas de vientos, que se reproducen aquí en la Ilustración 9, para obtener la función densidad de probabilidad, que después se aproxima por medio de una curva Weibull-Weibull, que describe correctamente el comportamiento bimodal del viento en Sisal; se separan los vientos de tierra, con una probabilidad de ocurrencia p de los vientos de mar con probabilidad $(1-p)$, se ajustan curvas Weibull separadas y después se combinan, para caracterizar finalmente la función $f(U)$.

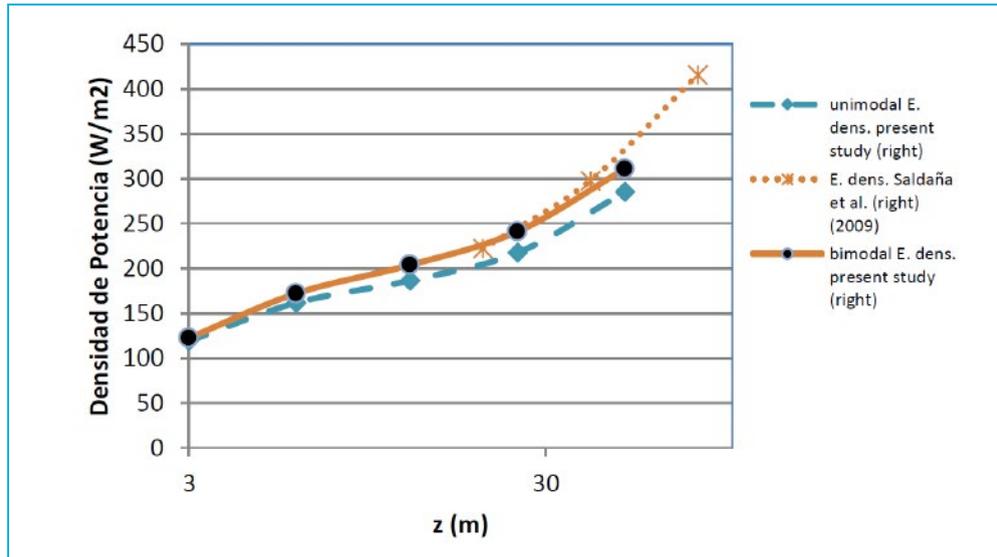


Ilustración 10. Densidad de potencia a distintas alturas. Comparación con Saldaña et al. 2009.

El resultado es la densidad de potencia como función de la altura sobre el terreno, pues este procedimiento se lleva a cabo para cada anemómetro. Los resultados se compararon con los obtenidos por... [19], de manera muy satisfactoria, como lo muestra la Ilustración 10. También se muestra el resultado de usar una curva Weibull unimodal. Nótese que el estimado en este estudio corresponde a un año de datos, mientras que el de Saldaña y Miranda, 2009 [19] usa tres años de datos. El procedimiento bimodal muestra una mejora considerable; el potencial eólico efectivo a 50 m es aproximadamente 300 W/m², lo cual se considera interesante para fines de aprovechamientos eólicos.

La energía que se puede obtener del viento puede ser afectada por múltiples factores. Uno muy importante que puede incluso dañar los aerogeneradores es la intensidad turbulenta. Ésta se define como

$$I = \frac{\sqrt{(U - \bar{U})^2}}{\bar{U}}$$

Donde U es la rapidez de viento y \bar{U} es el promedio (para el caso en que U está alineada con el vector velocidad). Se calculó la intensidad turbulenta por hora del día, para distintas épocas del año, así como sus histogramas de ocurrencia. Aquí se presenta solamente el perfil vertical de intensidad turbulenta[5].

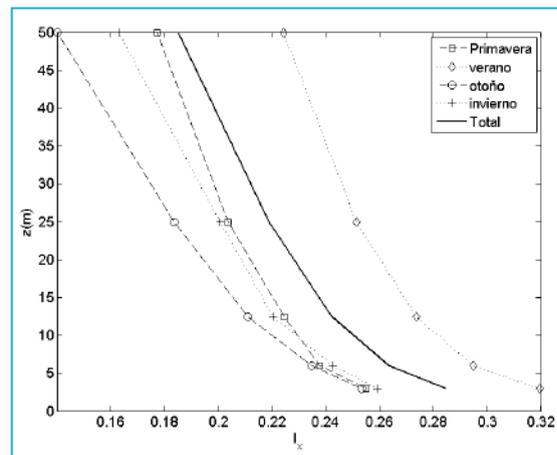


Ilustración 11. Intensidad turbulenta a distintas alturas sobre el terreno para las distintas estaciones del año. Comparación con Saldaña et al. 2009.

Nótese que los niveles más altos de intensidad turbulenta se presentan durante el verano, cuando la rapidez de viento es menor. Se recomienda que la intensidad turbulenta sea menos de 0.10 para aplicaciones de energía eólica. Como es una función decreciente con la altura, es probable que un aerogenerador moderno, cuyo centro de rotor se encuentra cerca de los 100 m de altura, encuentre siempre niveles aceptables de intensidad turbulenta en Sisal. El uso de anemómetros sónicos permite estudiar fluctuaciones turbulentas, esfuerzos turbulentos, efectos de transporte turbulento de calor, velocidad de fricción, etc [13]. La base de datos crudos que se guardó con el experimento sigue siendo usada para distintos fines, algunos de los cuales se mencionan a continuación.

EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE LA CAPA LÍMITE CERCA DE LA LÍNEA DE COSTA

Durante una campaña piloto, la capa límite convectiva típica de la región de Sisal ha sido identificada y cuantificada para el mes de junio, 2012. La altura promedio es de 2000 metros sobre el nivel medio del mar. El desarrollo temporal fue obtenido por medio de un ceilómetro Väisälä CL31, conocido como un sistema LIDAR. El instrumento emplea un láser pulsátil que se emite verticalmente y captura la distribución vertical de la retro-dispersión generada principalmente por aerosoles distribuidos en la atmósfera. Por definición, la altura de la capa de mezcla se encuentra en la base de la base de las nubes, justo donde se acumulan la mayoría de los aerosoles. A partir del perfil de retro-dispersión es posible ubicar la máxima varianza del perfil, correspondiente a una discontinuidad

en la cantidad de aerosoles, y así identificar la altura de la capa de mezcla.

Particularmente durante esta semana se presentaron distintos eventos de precipitación; sin embargo, el día 8 de Junio de 2012 muestra un evento que ilustra muy claramente el desarrollo diurno de la capa de mezcla. La Ilustración 12 muestra el desarrollo diurno, en tiempo local, de la capa de mezcla medida en Sisal. A las primeras horas de la mañana, se encuentra por debajo de los 200 m y a partir de las 8 de la mañana comienza su monótonico crecimiento hasta

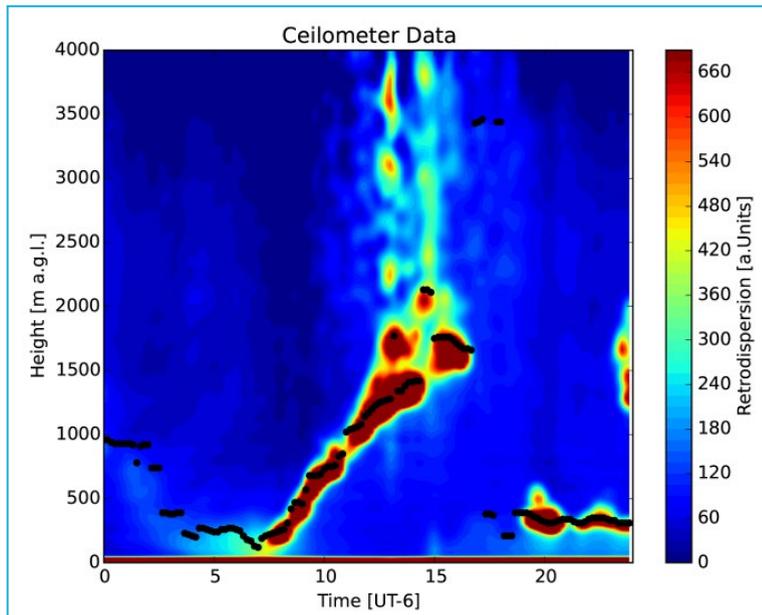


Ilustración 12. Desarrollo diurno de la capa límite convectiva obtenida por medio de un ceilómetro Väisälä CL31. El mapa de colores representa la cantidad de retro-dispersión medida y los puntos negros corresponden a la altura de la capa límite estimada por medio del método de máxima varianza de intensidad óptica. Imagen correspondiente al 8 de junio de 2012, tiempo en UTC-06.

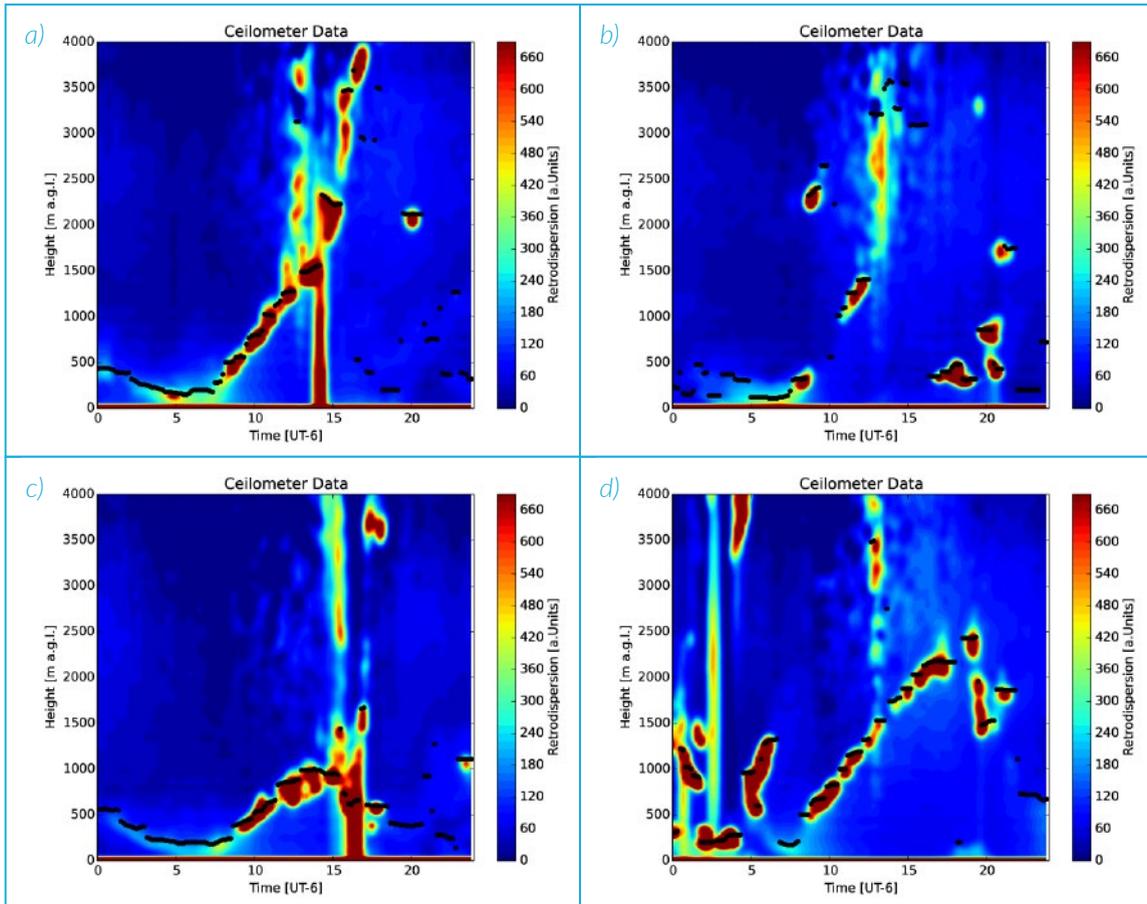


Ilustración 13. Desarrollo diario de la capa límite convectiva obtenida por medio de un ceilómetro Väisälä CL31. Paneles (a) y (b) corresponden a los días 5 y 6 de junio, 2012 y los paneles (c) y (d) a los días 8 y 9 de junio de 2012.

alcanzar su etapa madura cerca de las 15:00 hrs. Posteriormente, cerca de las 19:00 hrs cuando la actividad convectiva ha disminuido se puede observar el resultado del colapso de la capa de mezcla hasta una altura muy similar a aquella con la que comenzó en las primeras horas de la mañana.

Las regiones costeras se caracterizan por una ventilación altamente dinámica debido a las intensas brisas de mar y tierra. Esta dinámica ocasiona que la capa límite convectiva residual sea mínima y los ciclos diarios comiencen con una señal muy clara del crecimiento típico

de la altura de capa de mezcla. Las mediciones de altura de capa límite utilizando el método de LIDAR se ve comúnmente afectada por la precipitación y la formación de tormentas convectivas. Bajo estas condiciones no es posible estimar la altura ya que la distribución vertical del índice de retro-dispersión es bastante heterogénea, como se muestra en la Ilustración 13.

OTROS ESTUDIOS

Actualmente se están llevando a cabo estudios en el dominio de la frecuencia que permiten obtener términos de la ecuación de energía cinética

turbulenta como la disipación [7], o incluso la altura de la capa límite usando anemómetros sónicos. El estudio de la meteorología de viento y micrometeorología ha servido también de base para iniciar pruebas con aerogeneradores pequeños y trabajos de simulación numérica de la interacción océano-atmósfera [4] y simulación numérica para efectos de *micro-siting* y pruebas de desempeño de un aerogenerador pequeño.

Adicionalmente, se trabaja en integrar al LIPC en la red universitaria de observatorios atmosféricos de la UNAM (RUOA) para tener una plataforma confiable y compartida de monitoreo atmosférico a largo plazo para continuar con las actividades del laboratorio, cada vez más interdisciplinarias desde la creación del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera LANRESC.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración entusiasta de los becarios y doctorantes Martín Esquivelzeta Rabell (doctorado), Elsa María Hernández Jiménez (maestría), Clément Gouriou (maestría), así como la valiosa contribución de los colegas de otras instituciones: Dr. Jorge Zavala Hidalgo (CCA-UNAM), Dr. Dominique Legendre (IMFT), Dra. Alicia Aguilar (U. Michoacana de Sn. Nicolás de Hidalgo), Dr. Roberto Quintal P. (UADY Mérida, Yuc), Dr. Michel A. Grutter de la Mora (CCA-UNAM) y Dr. Alejandro Bezanilla Morlot (CCA-UNAM). Finalmente, este trabajo fue posible gracias al proyecto CONACYT-CFE 89073, titulado "Caracterización de la capa límite atmosférica en la zona noroeste de la Península de Yucatán (primeros 40 metros)". Un agradecimiento especial al personal de ambas instituciones por sus sugerencias y su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Appendini, Christian M., et al. "Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast." *J. Climate* 27.4 (2014): 1619-1632.
- [2] Atlas climatológico de ciclones tropicales, CENAPRED, <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- [3] Calverley, M. J., D. Szabo, V. J. Cardone, E. A. Orelup, and M. J. Parsons. Wave climate study of the Caribbean Sea. *Proc. Seventh Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Banff, AB, 2002, Canada, Environment Canada*. [http://www.waveworkshop.org/7thWaves/Papers/Calverly_et al.pdf.]
- [4] Esquivelzeta-Rabell, F.M., Figueroa-Espinoza, B., Legendre, D. & Salles, P., A note on the onset of recirculation in a 2D Couette flow over a wavy bottom. *Phys. Fluids* 27(1), 014108, 2015
- [5] Figueroa, B. y Salles, P., Caracterización de la capa límite atmosférica en la zona noroeste de la Península de Yucatán: reporte final. *Informe Final de Proyecto, CONACYT*, acceso restringido.
- [6] Figueroa-Espinoza, B., Quintal, R., Gouriou, C. & Aguilar, A., Performance test of a low cost roof-mounted wind turbine, *APS Division of Fluid Mechanics Abstracts, Vol 1*. 2013
- [7] Figueroa-Espinoza, B. & Salles, P., Turbulence characterization in a coastal zone using Sonic anemometry, 2015
- [8] FIGUEROA-ESPINOZA, Bernardo; SALLES, Paulo; ZAVALA-HIDALGO, Jorge. On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmosfera*, 27, 1, p. 77-89, 2014.
- [9] FIGUEROA-ESPINOZA, Bernardo; SALLES, Paulo. Local Monin-Obukhov similarity in heterogeneous terrain. *Atmospheric Science Letters*, 15, no 4, p. 299-306, 2014
- [10] Foken Th. and B. Wichura, Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agr. Forest Meteorol.* 78, 83-105, 1996
- [11] Garrat JR. 1990. The internal boundary layer – a review. *Boundary-Layer Meteorology* 50: 171–203, 1990
- [12] Haurwitz, B., Comments on the Sea Breeze Circulation, *Journal of Meteorology*, 4, No. 1, 1-8, 1946.
- [13] Hernández-Jiménez, E.M., Rugosidad superficial y velocidad de fricción en la capa límite atmosférica

costera al noroeste de la Península de Yucatán, *Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM*, 2012

[14] JOHNS, William E., *et al.* On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea. *Deep Sea Research Part : Oceanographic Research Papers*, 2002, 49-2, p. 211-243.

[15] Kaimal J. C. and J. J. Finnigan, Atmospheric bound-ary layer flows: Their structure and Measurement. *Oxford University Press*, New York, 289 pp., 1993

[16] Orellana, R. E., Conde, C., & Gay, C., Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán (No. CY/574.522209726 A8), 2009

[17] Rohatgui J. S. and V. Nelson, Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power. *Alternative Energy Institute*, Canyon, TX, 1994.

[18] Romero-Centeno R., Zavala-Hidalgo J., Gallegos A. and OBrien J.J., Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal. *J. Climate*, 16, 2628-2639, 2003.

[19] Saldaña, R. and Miranda, U., Estudio del potencial eoloenergético en un sitio de interés ubicado en la zona costera norte de la Península de Yucatán. *XVIII Congreso Mexicano de Meteorología, Cancún, Quintana Roo, México*, 2009.

[20] Schmidt, F.H., An elementary theory of land and sea breeze circulation, *Journal of Meteorology*, 4 , 9-15, 1947

[21] Soler-Bientz, R., Watson, S., Infield, D., Evaluation of the Wind Shear at a Site in the North-West of the Yucatán Peninsula, México. *Wind Eng.*, 33, 93-107, 2009

[22] Soler-Bientz, R., Watson, S., Infield, D., and Ricalde-Cab, L. Preliminary study of the offshore wind and temperature profiles at the North of the Yucatán Peninsula. *Energ. Convers. Manage.*, 52, 2829-2843, 2011

[23] Taylor-Espinosa, Nidia. Análisis y Visualización de la Componente Diurna de los Vientos en el Sur del Golfo de México. *Tesis Licenciatura*, Facultad de Ciencias, UNAM, 2009.

[24] Taylor-Espinosa, N., Estudio de la variabilidad diurna de los vientos en el sur del Golfo de México, *PhD. Dissertation*, Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, 2014.

[25] Torres-Freyermuth, A., Puleo, J.A., DiCosmo, N., Allende-Arandia, M.E., Chardón-Maldonado, P., López, J., Figueroa, B. Nearshore hydrodynamics during intense wind events on a sea breeze dominated beach, *Continental Shelf Res.*, submitted in sep. 2016.

CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN

José López González, Miguel F Domínguez Sandoval

RESUMEN

Se presentan los resultados de observaciones de oleaje de la zona noroeste de la Península de Yucatán. El régimen de oleaje de la zona noroeste de la Península de Yucatán, se determinó a partir de mediciones in situ con equipo ADCP (por sus siglas en inglés, Acoustic Doppler Current Profiler) de la marca RDi colocado en dos sitios en diferentes temporadas, aproximadamente a la misma profundidad a partir de 2010 a la fecha (2016). Las observaciones reflejan que existen dos temporadas bien definidas (primavera-verano y otoño-invierno) en las cuales la intensidad y dirección del oleaje cambia significativamente. En ambas temporadas el régimen de oleaje se ve fuertemente influenciado por la variabilidad del régimen de viento. En primavera-verano por la mañana, se presentan vientos suaves de la dirección sureste (de tierra) que no generan oleaje significativo en la costa; por la tarde, la dirección del viento cambia al noreste observándose brisas marinas que generan oleaje y corrientes en la misma dirección. En temporada invernal, este régimen de brisas marinas se combina con los llamados "Nortes" debido a que la zona se encuentra expuesta a los conocidos frentes fríos que viajan de Norteamérica hacia el sur con vientos intensos del noroeste los cuales generan un importante régimen de oleaje de esa dirección [Figueroa-Espinoza et al., 2014].

INTRODUCCIÓN

La plataforma continental de la Península de Yucatán se extiende por más de 100 km a partir de la línea de costa con una pendiente del terreno muy suave del orden de 1:1000 conformada mayormente por rocas sedimentarias depositadas sobre un basamento paleozoico

[Carranza et al., 1979; Lugo-Hubp and Aceves-Quezada, 1992]. Por lo anterior, los procesos de generación y transformación de oleaje son muy particulares ya que el oleaje dominante es principalmente generado en la zona. Por lo tanto, conocer el régimen marítimo de la zona costera, es fundamental ya que de esto

dependen muchos de los procesos costeros como: el transporte de sedimentos, la erosión e inundación entre otros [Appendini et al., 2012; Cuevas et al., 2013; Silva et al., 2014] Además, esta información es muy importante para el diseño y planeación de infraestructura costera debido al embate de ciertos fenómenos meteorológicos intensos que inciden en la costa como huracanes y tormentas tropicales [Meyer-Arendt, 1993]

En 2009-2010, el Instituto de Ingeniería de la UNAM establece una sede denominada, "Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros" (LIPC) en el estado de Yucatán. Desde entonces, se inician diversas acciones para determinar las condiciones que imperan en la región dentro de las cuales se abarcan modelaciones numéricas [Appendini et al., 2014; Enriquez et al., 2010], así como campañas de campo para determinar los parámetros físicos y oceanográficos con la finalidad de crear una base de datos y determinar las condiciones y los parámetros relacionados al clima marítimo de la zona.

Han existido diversos esfuerzos y estudios para determinar algunos de estos parámetros, sin embargo éstos han sido esporádicos y limitados en tiempo y espacio, por lo cual, el objetivo del LIPC es medir continua y sistemáticamente

los parámetros más importantes de la zona costera como son viento, oleaje, corrientes y mareas aprovechando su ubicación geográfica.

De esta manera, en 2010 se inició la medición de oleaje y corrientes frente a los poblados de Chelem y Chuburná con la finalidad de conocer los factores que influyen en la zona. Posteriormente, por conveniencia logística y por la ubicación del laboratorio, el punto de medición se cambió frente al poblado de Sisal a 21 km del punto de medición anterior.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la costa noroeste de la Península de Yucatán. Debido al fuerte deterioro que han sufrido las playas de esta zona y sobre todo, las de los poblados de Chelem y Chuburná [Lira-Pantoja et al., 2012], se decidió colocar el instrumento de medición frente a estos poblados, a una distancia aproximada de 10 km y una profundidad de alrededor de 8 m en las coordenadas 21°19'14.04" latitud norte y 89°50'4.38" longitud oeste. Posteriormente, el punto de medición se cambió al oeste frente al poblado de Sisal, donde se han continuado las campañas de medición hasta la fecha. En la Figura 1 se muestra la localización de los puntos de medición.

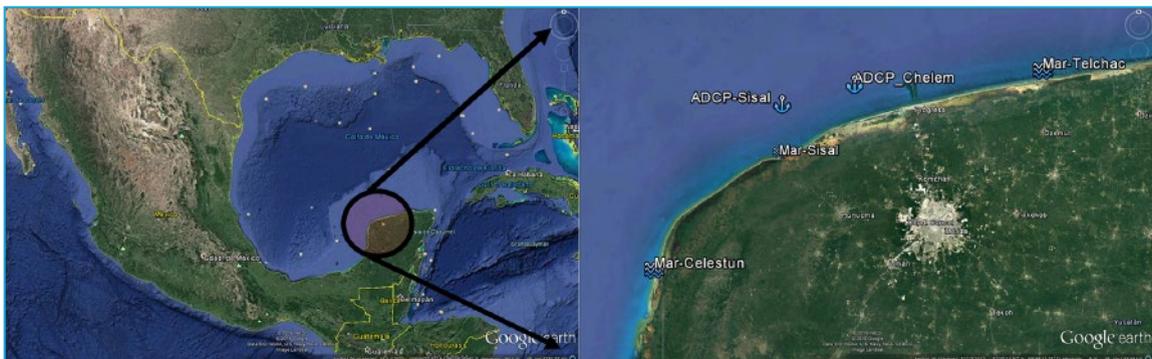


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN

En la Tabla 1 se muestran las fechas y periodos de medición de las campañas realizadas, primero frente a los poblados de Chelem y Chuburná y posteriormente frente al poblado de Sisal. En las tablas se pueden observar barras de color que representan las temporadas de medición para cada campaña para las cuales en algunas de ellas se abarcan dos estaciones del año.

MÉTODOS Y MATERIALES

A la fecha, el LIPC cuenta con 3 mareógrafos operados coordinadamente con el servicio mareográfico del Instituto de Geofísica de la UNAM los cuales se encuentran en 1) Celestún, en una caseta sobre el muelle del pueblo con

coordenadas 20°51.50' latitud norte y 90°24.20' longitud oeste; 2) en Sisal, a la entrada del puerto de abrigo con coordenadas 21°9.70' latitud norte y 90°2.90' longitud oeste y el último 3) en Telchac, también a la entrada del puerto de abrigo con coordenadas 21°20.40' N -89°18.50' W. Los datos de los mareógrafos se pueden consultar en la página del servicio mareográfico nacional o en la página del observatorio costero del LIPC donde además se pueden consultar datos de viento y oleaje.

<http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones>

<http://observatoriocostero.iingen.unam.mx/web/Mareografo.php?graf=3&ubi=3>

Tabla 1. Fechas de las campañas de medición con equipo ADCP frente a los poblados de Chelem y Chuburna.

Camp	Año	Fecha		Invierno		Primavera			Verano			Otoño			
		Inicial	Final	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
1	2010	17-jun	02-sep												
2	2010	02-sep	03-ene												
3	2011	04-mar	15-jun												
4	2011	08-jul	29-sep												
5	2011	29-sep	09-dic												
6	2012	09-dic	16-feb												
7	2012	08-mar	13-may												
8	2012	26-jun	25-oct												
9	2012	16-nov	13-feb												
10	2013	13-feb	29-may												
11	2013	30-may	30-sep												

Tabla 2. Fechas de las campañas de medición con equipo ADCP, Sisal Yucatán.

Camp	Año	Fecha		Invierno		Primavera			Verano			Otoño			
		Inicial	Final	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
1	2013	14-dic	27-ene												
2	2014	25-mar	29-may												
2	2014	25-mar	22-may												
3	2014	01-jul	01-oct												
4	2014	21-nov	15-feb												
5	2015	17-mar	04-jul												
5	2015	17-mar	11-may												
6	2015	13-ago	07-oct												
7	2015	10-dic	20-abr												
8	2016	30-mar	26-may												

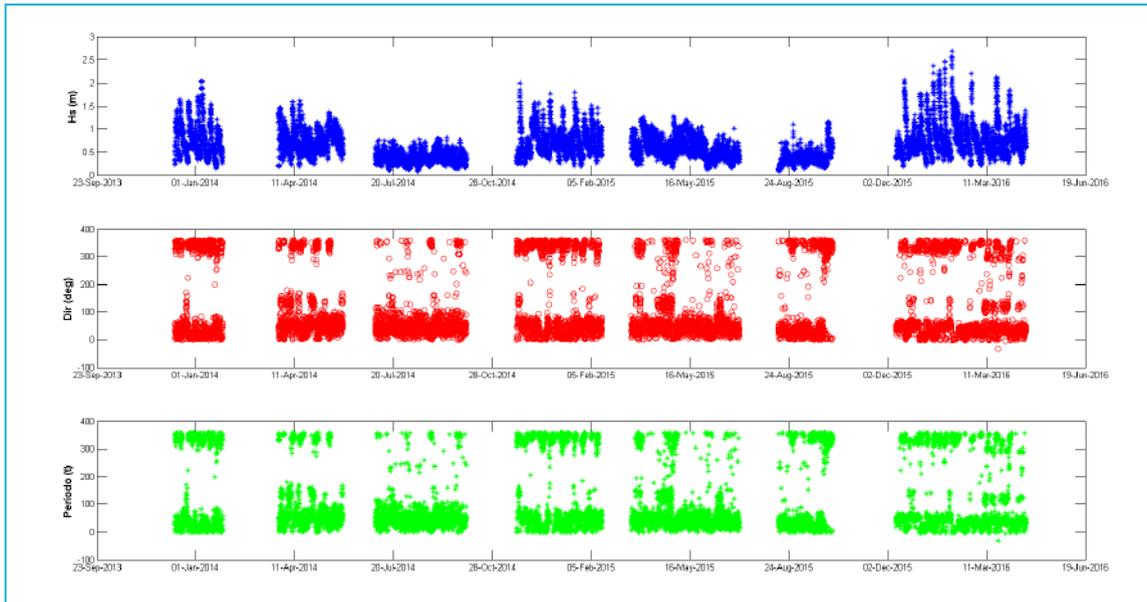


Figura 2. Serie de oleaje. Datos obtenidos a partir de las mediciones del ADCP colocado en la costa de Sisal.

La medición de oleaje y corrientes, consiste en campañas de campo utilizando un equipo ADCP de la marca RDI, el cual se programa para realizar mediciones de la velocidad y dirección de las corrientes en la columna de agua en capas de 50 cm de espesor hasta alcanzar la superficie libre. Los registros son un promedio de 50 lecturas a una frecuencia de 2 Hz cada 30 minutos. Con respecto al oleaje, éste se registra con una frecuencia de 2 Hz durante 20 min cada hora y para el caso de la presión y la temperatura las mediciones se realizan cada hora.

Una vez programado el equipo, se coloca en una plataforma de metal o fibra de vidrio con suficiente peso para permanecer en el fondo marino por lo menos durante 3 meses. Una vez cumplido este tiempo, que es la duración aproximada de las baterías, se recupera y se sustituye por otro equipo previamente programado, al equipo recuperado se le da mantenimiento y se le extraen los datos.

DESCRIPCIÓN DEL RÉGIMEN DE OLEAJE

En la Figura 2 se presenta la serie de tiempo de los datos de oleaje obtenidos con el mencionado equipo de enero de 2014 hasta junio de 2016. En el panel superior de esta figura se presenta la altura de ola significativa (H_s) que presenta un máximo de 2.5 m en el periodo invernal. El panel intermedio se muestra la dirección de incidencia del oleaje que tiene una orientación reinante del NNE y una orientación dominante de NNO, las cuales tienen relación directa con la dirección del viento. Las alturas máximas de la dirección reinante son del orden de 1.5 m y en las dominantes mayores a 2.5 m debido a las condiciones de tormenta que se presentan en la temporada invernal. En el panel inferior se presenta el periodo del oleaje; siguiendo con la relación de las alturas de ola se puede observar que el oleaje dominante tiene periodos de hasta 10 s y para el oleaje reinante los periodos oscilan entre 4 y 8 s.

CLIMA MARÍTIMO ESTACIONAL

El clima marítimo de la zona de Sisal se caracteriza por tener temporadas o estaciones del año muy marcadas. Así mismo tiene una marcada variabilidad diaria: por las mañanas se percibe una relativa calma en el oleaje, el cual incrementa a partir del mediodía hasta alcanzar el máximo por la tarde. En la noche comienza el descenso nuevamente hasta una relativa calma.

Sin embargo, en temporada invernal, estas condiciones diarias se ven afectadas por temporales de oleaje y viento intenso proveniente del norte noroeste llamados “Nortes”, los cuales se superponen a las condiciones “normales”. Estas condiciones se caracterizan por el incremento de la altura de oleaje y la velocidad del viento, así como el cambio de la dirección de incidencia de ambos, la cual es principalmente del norte.

Para el estudio, el clima se ha dividido en las siguientes estaciones (Tabla 4): primavera, del 21 de marzo al 20 de junio; verano, del 21 junio al 22 de septiembre; otoño, del 21 de septiembre al 20 de diciembre e invierno, del 21 de diciembre al 20 de marzo.

A partir de esta división, se agruparon las cuatro temporadas para determinar la variabilidad en la intensidad del oleaje y la dirección de incidencia. De esta manera, por ejemplo, se tomaron los datos del ADCP de las 4 temporadas de invierno registradas y los resultados se muestran en forma de rosa de direcciones para cada año de medición con altura de ola significativa. En la Figura 3 se muestran los datos de dirección y altura de ola significativa de la temporada invernal. En el panel a) se muestran los datos

del invierno 2013 correspondientes a los meses de diciembre y enero, siendo solo la mitad de la temporada invernal por lo que se puede observar una gran acumulación de oleaje incidente del NNO con intensidades y alturas de ola en su mayoría superiores a 1.5m. En la temporada invernal 2014 en el panel b) se puede observar oleaje predominante en la dirección NNE con alturas de 0.75 a 1m y por otro lado, en la dirección NNO un oleaje con mayor intensidad y alturas significantes de 1.5 m y mayores, que indica la participación de los Nortes en el aumento de la altura y dirección del oleaje. En el invierno de 2015 mostrado en el panel c), las condiciones de oleaje fueron similares al año anterior con dirección de incidencia de NNO y NNE siendo en mayor frecuencia oleaje de aproximadamente 1 m de altura significativa, pero en esa ocasión las alturas provenientes del NNO presentaron un aumento considerable llegando a una altura de ola mayor de 1.75 m. Para la última temporada, panel d), se puede observar que las frecuencias del oleaje incidente del NNE se redujeron y aumentaron las provenientes del N y NNE originadas por los Nortes. También se puede observar que las alturas de ola son mayores que en las tres primeras temporadas alcanzando un máximo de 2.5m. En esta temporada los Nortes se extendieron hasta el final de la temporada, por lo que fue un caso extraordinario con más eventos “Nortes” hacia el final de la temporada. La dirección de incidencia fue del NNO y NNE de la misma manera que en los casos anteriores.

En primavera, el oleaje está modulado principalmente por el viento ya que, en la mayoría de

Tabla 4. Temporadas climáticas de la Costa de Sisal.

Invierno		Primavera				Verano			Otoño		
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic

los casos, la orientación es del NNE siendo ésta en gran parte similar a la dirección del viento. Como se observa en la Figura 4, el oleaje es del orden de 0.75 a 1.5 m, y para esta temporada se observa con menos frecuencia oleaje provocado por eventos de “Nortes”. Sin embargo, en esta temporada aún persisten algunos de ellos en menor proporción y conforme avanza la temporada estos efectos se ven reducidos.

En la temporada de verano el oleaje se mantiene de la dirección NNE. Sin embargo la

intensidad y las alturas se reducen de manera que la máxima altura significativa de ola oscila entre 0.25 m a 0.75 m, lo cual es un oleaje de menor intensidad a lo presentado en la temporada de invierno y conforme se aleja de la temporada toma condiciones estables, con oleaje local provocado por las brisas locales

Llegada la temporada de otoño (Figura 5), el oleaje empieza a cambiar. Al inicio de la temporada las condiciones continúan hasta cierto punto con la tendencia de la temporada anterior y

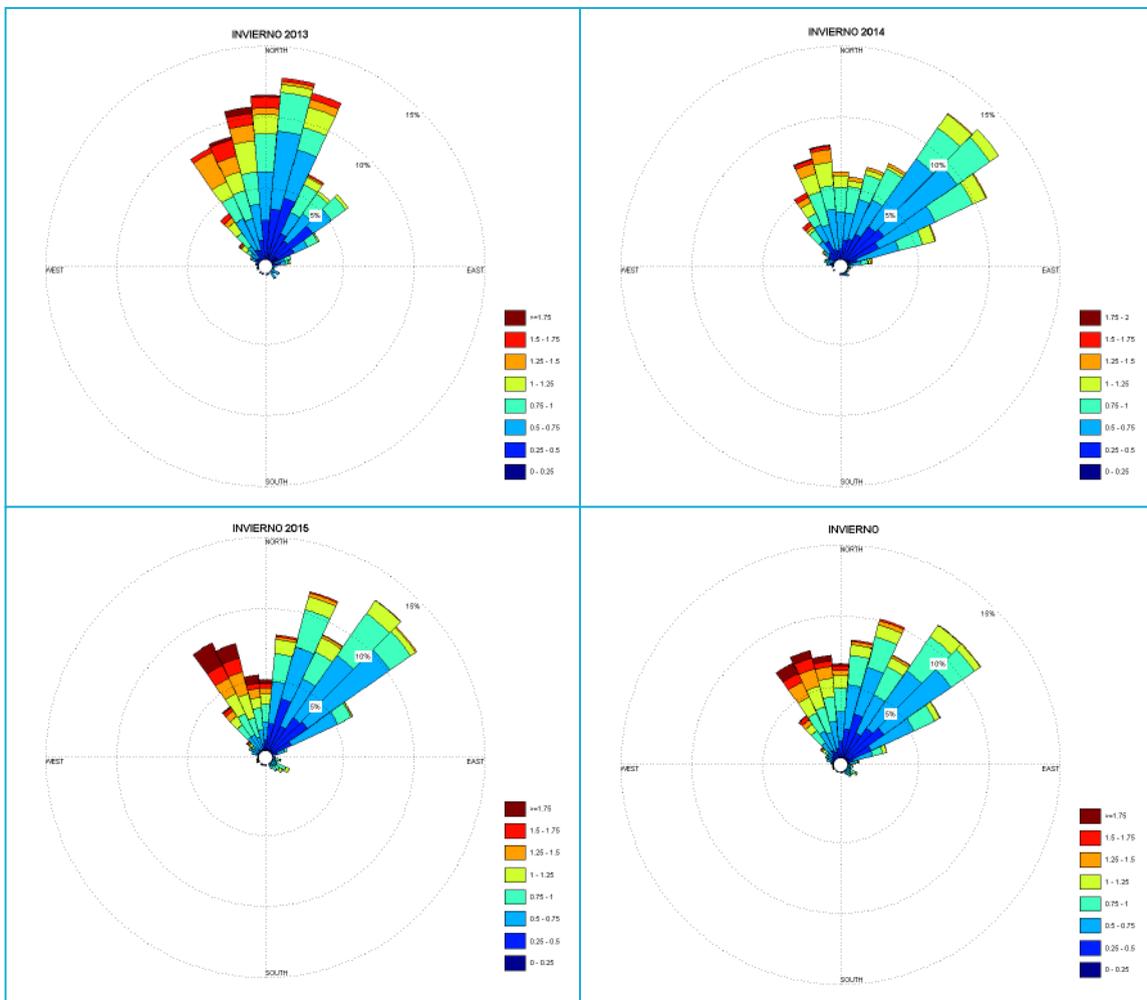


Figura 3. Dirección e intensidad de oleaje en temporada invernal.

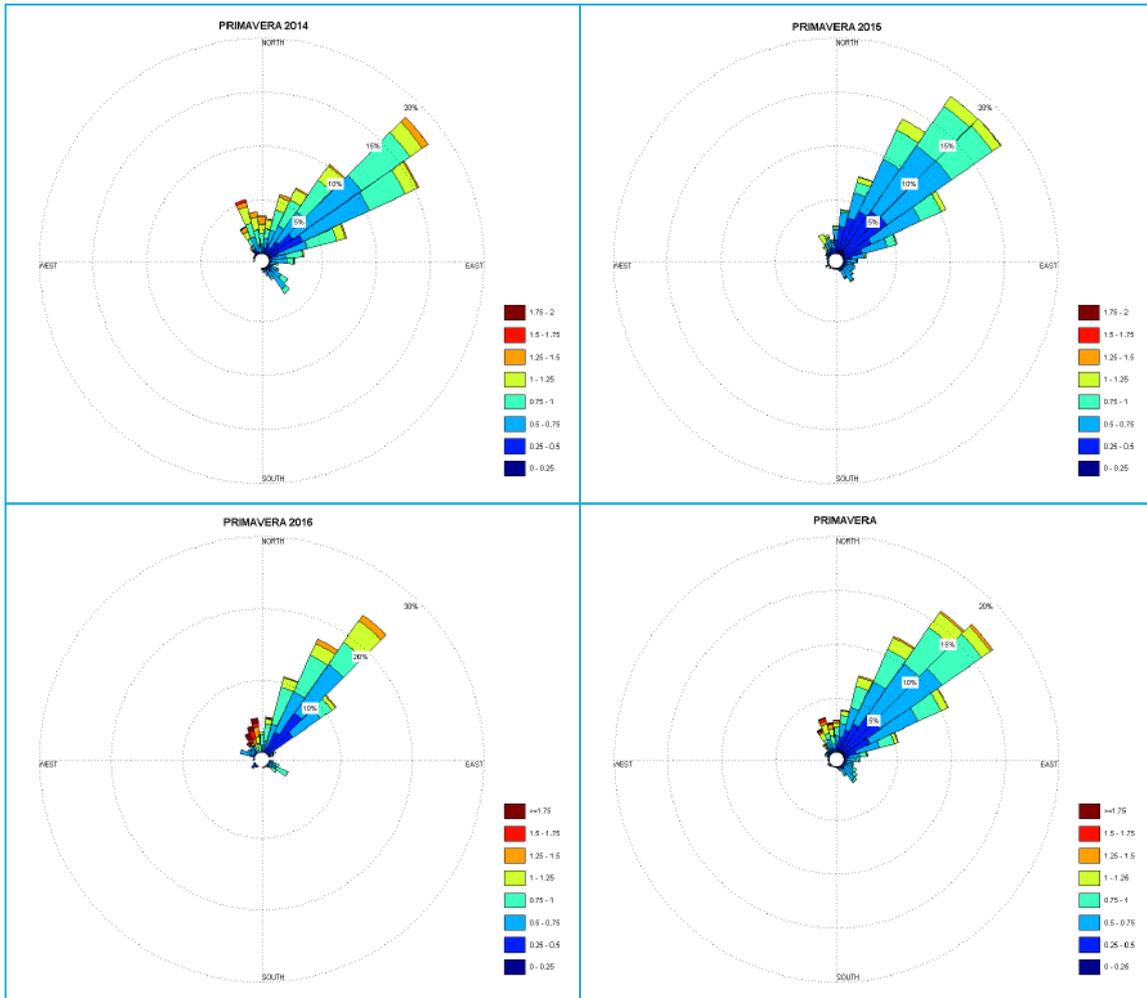


Figura 4. Dirección e intensidad de oleaje en periodo de primavera.

conforme llegan los meses de noviembre y diciembre, las condiciones van cambiando debido al inicio de la temporada de “Nortes” que en algunas ocasiones suceden antes de la temporada invernal, afectando la dirección del oleaje y la altura significativa de ola. En esta temporada se pueden observar direcciones dominantes NNE con alturas de ola de 0.25 a 1.25m y de la dirección NNO las frecuencias e intensidades aumentan con alturas mayores a 1.25 m. Esto debido, como se mencionó anteriormente, a la transición

de las 2 estaciones al inicio de verano a otoño y al final de otoño a invierno cuando se presentan la mayoría de las tormentas.

DISCUSIÓN

Como la zona de estudio se encuentra dentro de la plataforma continental de la Península de Yucatán, no presenta cambios abruptos en la batimetría, por lo que el oleaje es modificado en menor parte por este factor. Los datos medidos de las condiciones de oleaje, permitieron analizar

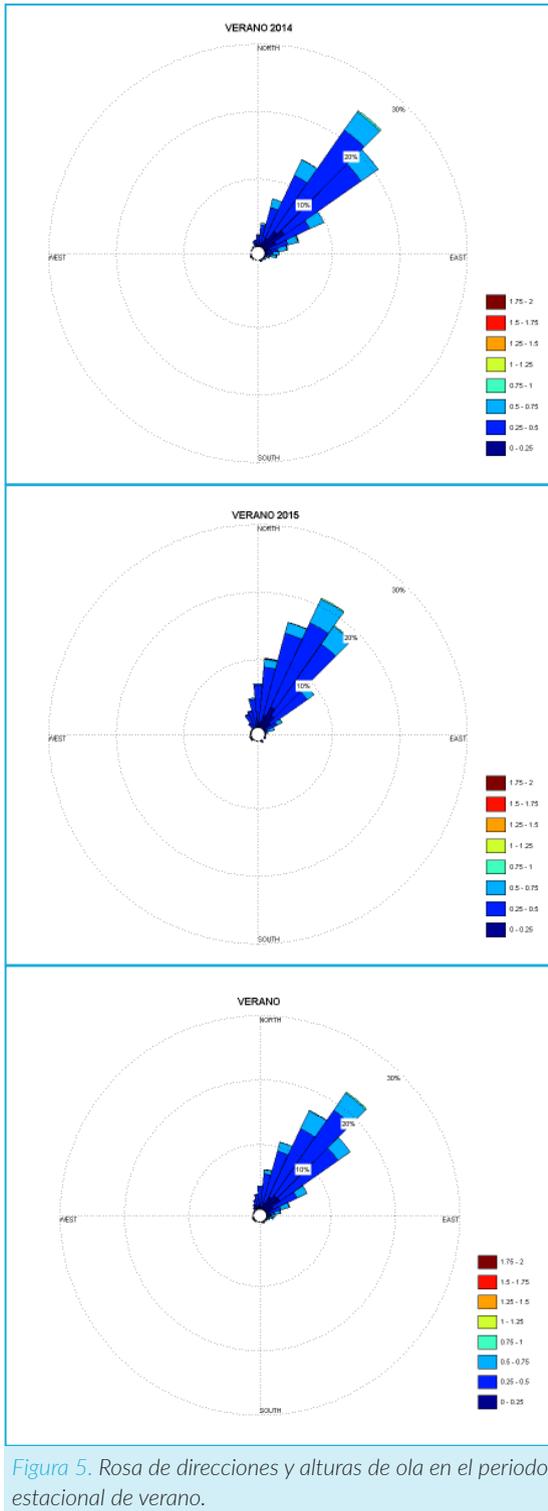


Figura 5. Rosa de direcciones y alturas de ola en el periodo estacional de verano.

y clasificar las estaciones del clima marítimo de la región.

La zona tiene muy marcado un régimen estacional, es decir las estaciones del año se definen con claridad en las condiciones del clima marítimo. Se observa que existen dos temporadas bien definidas: primavera-verano con oleaje moderado principalmente de NNE y otoño-invierno con periodos de oleaje intenso del NNO con alturas mayores a 1.75 m lo cual para la zona es considerado como oleaje de tormenta.

Las condiciones de oleaje en esta temporada son muy variables ya que dependen de los Nortes que se generen, por lo que se puede tener relativa calma por la mañana, oleaje moderado a medio día y al día siguiente tormenta. Estos cambios bruscos son los que definen esta temporada invernal y los datos recolectados por el ADCP lo demuestran claramente.

Por otra parte, la temporada primavera-verano, muestra oleaje moderado en cuanto a altura se refiere y dirección predominantemente de NNE, cuando se acerca a la mitad de la temporada se puede observar que el oleaje alcanza alturas máximas de alrededor de 0.5 m. En esta temporada se puede observar el cambio diario y bien marcado que tiene el sistema marítimo. Por la mañana se presenta calma en las costas con oleaje menor a 0.5 m y conforme va avanzando el día y los vientos empiezan a hacer efecto sobre la superficie, se puede observar claramente el incremento de las alturas de ola lo cual ocurre generalmente a partir del mediodía, en la tarde-noche el oleaje empieza a descender terminando así el ciclo diario del clima marítimo primavera-verano. Este comportamiento se ve afectado en la temporada invernal sin embargo en la temporada de primavera-verano es muy estable.

Los datos obtenidos por instrumentos como el ADCP son muy útiles para el análisis del comportamiento de los procesos físicos costeros del área. Además, sirven para calibrar modelos numéricos de oleaje que tendrán mayor cobertura tanto temporal como espacial.

En este caso se utilizaron datos de 4 años de medición y lo observado fue similar en los 4 años de estudio, con ello se pudo determinar con claridad las temporadas en la zona. Sin embargo

cabe mencionar que no se registraron eventos extremos como tormentas tropicales o huracanes por lo que este estudio no es concluyente y es por esto conveniente seguir con las mediciones para contar con una base de datos más amplia y completa.

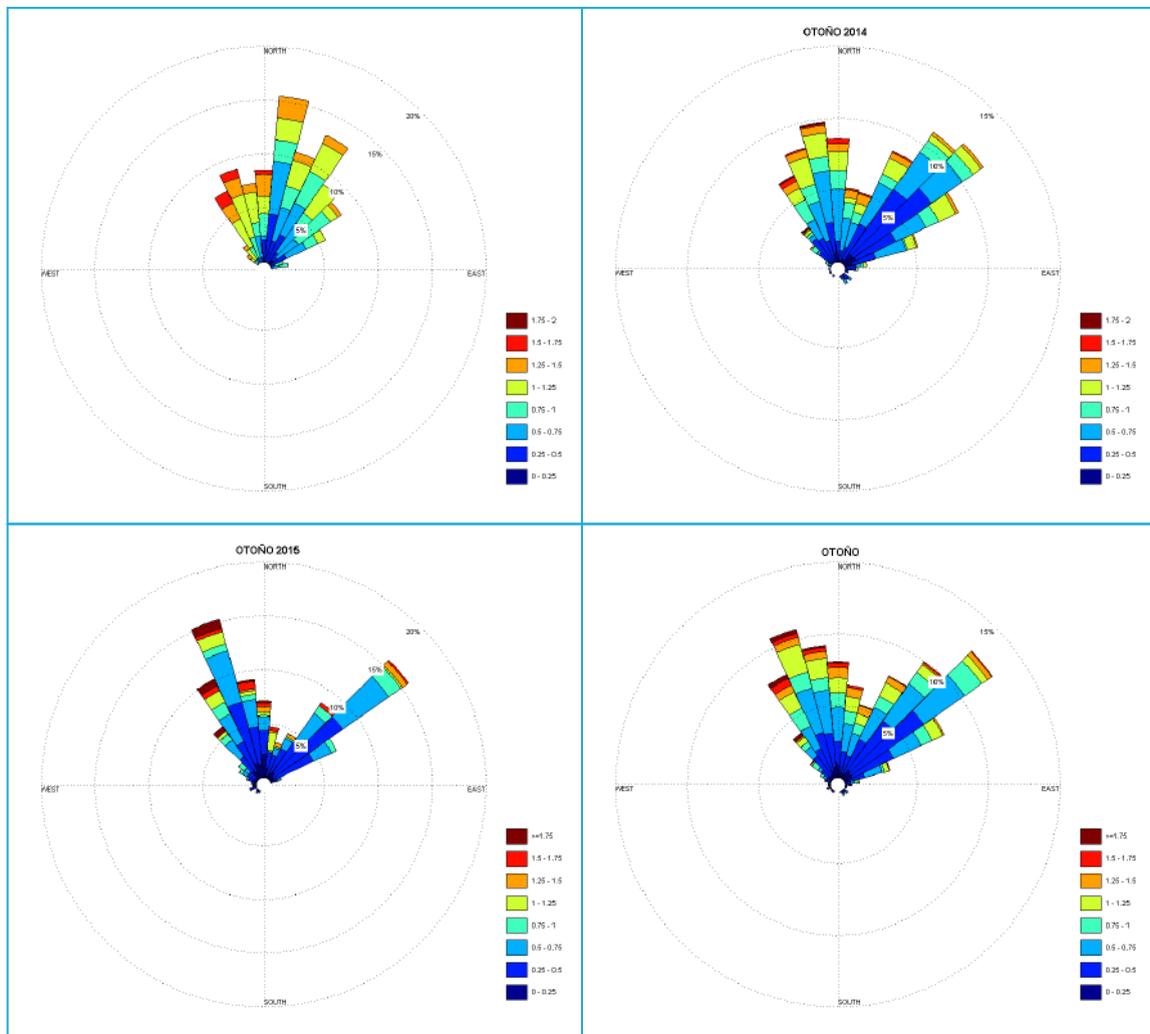


Figura 6. Direcciones de oleaje y alturas de ola para el periodo de otoño.

BIBLIOGRAFÍA

- Appendini, C. M., P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, and A. Torres-Freyermuth (2012), Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula, *Journal of Coastal Research*, 1404-1417.
- Appendini, C. M., A. Torres-Freyermuth, P. Salles, J. López-González, and E. T. Mendoza (2014), Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast, *Journal of Climate*, 27(4), 1619-1632.
- Carranza, E., A. M. Gutiérrez, and R. Rodríguez (1979), Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas, México, *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. UNAM*, 2.
- Cuevas, E., M. d. I. Á. Liceaga-Correa, L. A. Rincón-Sandoval, G. Mexicano-Cíntora, L. Arellano-Méndez, J. I. Euán-Ávila, H. Hernández-Núñez, and S. Mulsow (2013), Evaluación morfológica y sedimentológica de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México, *Ciencias marinas*, 39, 83-99.
- Enriquez, C., I. Mariño-Tapia, and J. A. Herrera-Silveira (2010), Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events *Continental Shelf Research*, 30(2), 127-137.
- Figueroa-Espinoza, B., P. Salles, and J. Zavala-Hidalgo (2014), On the wind power potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico, *Atmósfera*, 27(1), 77-89.
- Lira-Pantoja, M. A., A. Torres-Freyermuth, C. M. Appendini, D. Fernandez, P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, and A. Pedroso-Acuña (2012), Chronic beach erosion induced by coastal structures in Chelem, Yucatán, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33).
- Lugo-Hubp, J., and A. Aceves-Quezada (1992), Relieve estructural V.2.1.1., Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Meyer-Arendt, K. J. (1993), Shoreline changes along the north Yucatan coast, *Coastlines of the world series*, American Society of Civil Engineers.
- Silva, R., et al. (2014), Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America, *Journal of Coastal Research*, 1-16.

CARACTERIZACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA COSTERA DURANTE EVENTOS DE BRISAS Y NORTES FRENTE A LA COSTA DE SISAL YUCATÁN

Alec Torres-Freyermuth y Jack A. Puleo

RESUMEN

La caracterización de la hidrodinámica cercana a la costa es fundamental para comprender los procesos que controlan el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes en playas. En este trabajo se estudia la hidrodinámica frente a la costa de Sisal asociada a los eventos de escala: (i) local (brisas) y (ii) escala grande (Nortes), los cuales controlan la dinámica de la costa en esta zona. Para ello, se llevó a cabo una campaña de campo intensiva durante 12 días en la primavera del 2014 en la playa de Sisal, Yucatán. Se realizaron mediciones de corrientes desde la plataforma interior hasta la playa, así como de los principales forzamientos. El análisis de las mediciones muestra que durante las brisas las corrientes dominantes son hacia el Oeste y pueden ser muy importantes dentro de la zona de rompientes. Sin embargo, los mecanismos que controlan la circulación varían a lo ancho de la plataforma. Por otro lado, durante el evento de Norte se observan corrientes hacia el Oeste fuera de la zona de rompientes y hacia el Este corrientes inducidas por la rotura del oleaje. Por lo tanto, la hidrodinámica durante brisas y Nortes es importante y debe ser tomada en cuenta para cualquier actuación en la zona costera.

Palabras claves: hidrodinámica; plataforma interior; zona de rompientes; oleaje; transporte de sedimentos; dispersión de contaminantes; brisas y Nortes.

INTRODUCCIÓN

La circulación cercana a la costa juega un papel importante en el transporte de contaminantes, fitoplancton, y sedimento entre la plataforma interior y la zona costera (Hendrickson & MacMahan,

2009). Sin embargo, el rol de los diferentes procesos físicos y su acoplamiento que inducen dicho transporte son poco comprendidos en algunas regiones de México debido a la falta de mediciones concurrentes a diferentes profundidades.

La costa norte de Yucatán se caracteriza por la influencia de vientos intensos asociados con eventos de escala local y sinóptica. Las brisas del mar son fenómenos locales que ocurren en las costas, inducidos por las diferencias del calentamiento entre la tierra y el océano (Masselink & Pattiaritchi, 1996). Por otro lado, vientos intensos del norte son comunes en la Península de Yucatán durante los meses de invierno (Figuroa-Espinoza *et al.*, 2014). Estos eventos de escala grande, conocidos como Nortes, ocurren en el período comprendido entre los meses de septiembre a abril y son parte de sistemas de alta presión presentes en el Golfo de México (Appendini *et al.*, 2012). La duración típica de estos eventos es de más de 24 horas y pueden tener un impacto negativo en las actividades económicas que se realizan en el Golfo de México (Appendini *et al.*, 2013).

Los trabajos previos en la Península de Yucatán han estado enfocados en estudiar la circulación en la plataforma continental. Específicamente, en investigar los mecanismos que controlan las surgencias (Merino 1992, 1997; Reyes-Mendoza *et al.*, 2015), la dispersión de la marea roja (Enriquez *et al.*, 2010), el papel del viento en la circulación (Zavala *et al.*, 2003; Ruiz-Castillo *et al.*, 2016) y los procesos termo-halinos (Enriquez *et al.*, 2013). Sin embargo, no existen estudios en la literatura que aborden el estudio de la hidrodinámica en aguas someras (profundidades menores a 10 m).

Los trabajos enfocados al entendimiento de la hidrodinámica en ambientes costeros dominados por brisas son relativamente escasos, a pesar del rol importante en la circulación a través de la plataforma, la generación de oleaje y la circulación en la zona de rompientes. Por lo tanto, este trabajo pretende caracterizar la hidrodinámica

en una playa dominada por brisas durante eventos de vientos intensos asociados con eventos locales y sinópticos. Para ello, se utilizan mediciones *in situ* de corrientes en diferentes profundidades y de los principales forzamientos que las generan. La zona de estudio y los métodos utilizados en este trabajo se presentan en la sección Materiales y Métodos. Las observaciones de los forzamientos y la hidrodinámica son presentados en la sección Resultados. En la sección Discusión se argumenta sobre el papel de los diferentes forzamientos en la circulación observada, seguida por la sección de Conclusiones de este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio está localizada en la playa de Sisal ubicada en la costa norte de Yucatán. La playa fue instrumentada en un transecto localizado entre el Puerto de Abrigo y el Muelle de Sisal (Figura 1). Esta zona se encuentra equidistante de las estructuras existentes en la costa, las cuales alteran la orientación de la costa en zonas aledañas, por lo que presenta una dinámica más estable a lo largo del año y una orientación cercana a Este-Oeste. El clima de oleaje presenta mayor energía durante los meses de invierno y menor energía durante el verano (Figura 2a). El oleaje está fuertemente correlacionado a los vientos en la zona de estudio, dominados por brisas marinas y Nortes. Las brisas están presentes a lo largo del año pero son más frecuentes e intensas en los meses de abril y mayo. Por otro lado, los Nortes ocurren en los meses de invierno pero han sido registrados también en los meses de primavera (Figura 2b).

Con el objetivo de caracterizar la hidrodinámica durante eventos de brisas y Nortes se llevó a cabo una campaña de campo intensiva de 12 días,

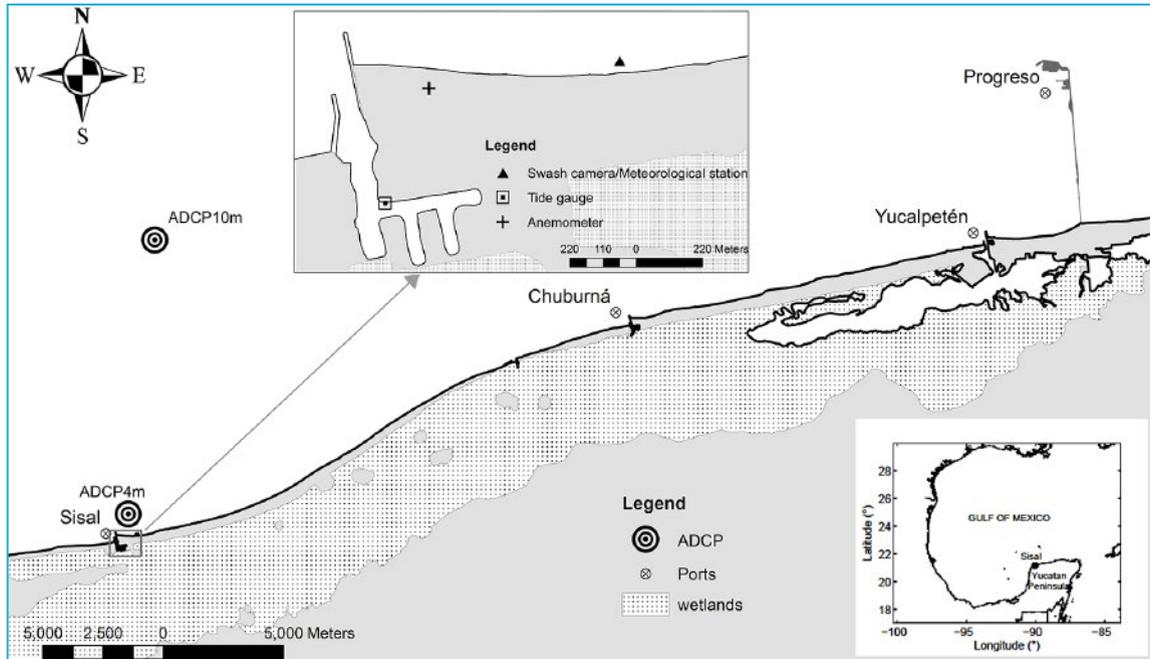


Figura 1. Localización del área de estudio y de los sistemas de medición de viento, oleaje y nivel del mar.

del 1 al 12 de abril del 2014, en la playa de Sisal. Se realizaron mediciones de viento con sensores ultrasónicos instalados en una torre de 50 m localizada en la Unidad Académica Sisal de la UNAM (<http://observatoriocostero.iingen.unam.mx>). El oleaje costa afuera fue medido con un Perfilador Acústico de Corrientes marca RDI instalado a 11 km de la costa y a 10 m de profundidad. Mediciones de altura de ola significativa, período de pico y dirección fueron obtenidas cada hora durante el período de estudio. Asimismo, mediciones del nivel del mar fueron registradas en la estación del Servicio Mareográfico

Nacional (<http://tepeu.sisal.unam.mx/vientosisal/>) localizado en el Puerto de Abrigo de Sisal.

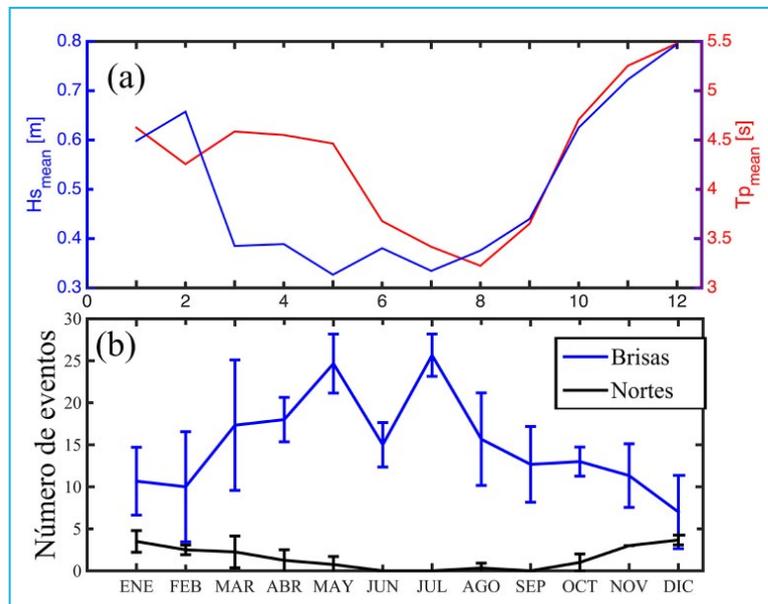


Figura 2. Clima de (a) oleaje (altura y período medio) y de (b) viento (frecuencia de brisas y Nortes) mensual en el área de estudio. oleaje y nivel del mar.

Las corrientes fueron medidas a 10 m de profundidad en la plataforma interior y fuera de la zona de rompientes, profundidad de 2.5 m, utilizando Perfiladores de Corrientes Acústicos (ADCP). Asimismo, se midieron corrientes dentro de la zona de rompientes (sobre las barras y entre ellas), y en la zona de lavado, utilizando velocímetros acústicos ADV con una alta frecuencia de muestreo. Las mediciones de corrientes a diferentes profundidades (ver Figura 3) permiten una caracterización espacio-temporal de la hidrodinámica bajo diferentes condiciones.

RESULTADOS

Los vientos registrados estuvieron asociados a brisas marinas durante los primeros días de la campaña (1 a 5 de abril). Las velocidades W máximas de estos vientos superaron los 10 ms^{-1} provenientes del NE (Figura 4a). Asimismo, los vientos de menor intensidad del SE están asociados a brisas terrestres que ocurren durante las primeras horas del día y que se intensifican antes de la llegada del Norte (6 y 7 de abril). Las mediciones

de oleaje a 10 m de profundidad están altamente correlacionadas con la variación diaria de las brisas, incrementando su altura de ola significativa H_s de 0.3 a 0.7 m provenientes del NE (Figura 4c). Un sistema de baja presión (Figura 4b), que precede la llegada de un Norte, provoca que las brisas marinas desaparezcan y que las brisas terrestres con vientos del SE se intensifiquen el 6 y 7 de abril. El 8 de abril llega un Norte, asociado a un sistema de alta presión, a la playa de Sisal con vientos de 15 ms^{-1} del N. El oleaje durante el Norte se incrementa significativamente, alcanzando 1.5 m de altura de ola significativa a 10 m de profundidad. Asimismo, la dirección del oleaje cambia y proviene del NNO. Este evento tiene una duración de aproximadamente 48 horas y conforme se desplaza disminuye la altura de ola hasta que el 10 de abril se presentan nuevamente condiciones de brisas marinas. El nivel del mar durante las brisas no presenta diferencias con la predicción de CICESE (<http://predmar.cicese.mx/calendarios/>) que considera únicamente la marea astronómica. Sin embargo, durante el Norte

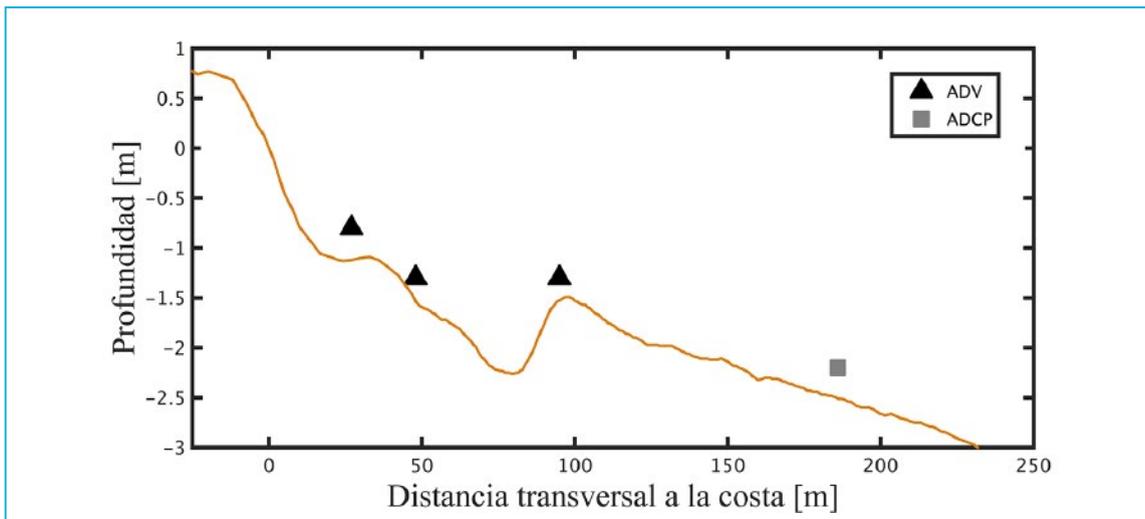


Figura 3. Localización de los sensores para las mediciones de corrientes en aguas someras (dentro de la zona de rompientes: ADV; fuera de la zona de rompientes: ADCP).

existen diferencias de hasta 0.4 m relacionadas con la sobre-elevación del nivel del mar inducida por el viento (Figura 4d).

Mediciones de corrientes V a 10 m de profundidad muestran una corriente con dirección hacia el Oeste durante los eventos de brisas marinas intensas (Figura 5a y 5b). La magnitud varía entre 0.2 y 0.05 ms^{-1} en función de la marea. La intensidad de la corriente disminuye y aumenta

la variabilidad en la dirección durante el período que precede la llegada del Norte (6 y 7 de abril). Con la llegada del Norte, la corriente se intensifica nuevamente con una alta variabilidad en la dirección con relación al Oeste, alcanzando los 0.2 ms^{-1} .

A los 3 m de profundidad la intensidad de la corriente está altamente controlada por el viento durante las brisas, presentando variaciones

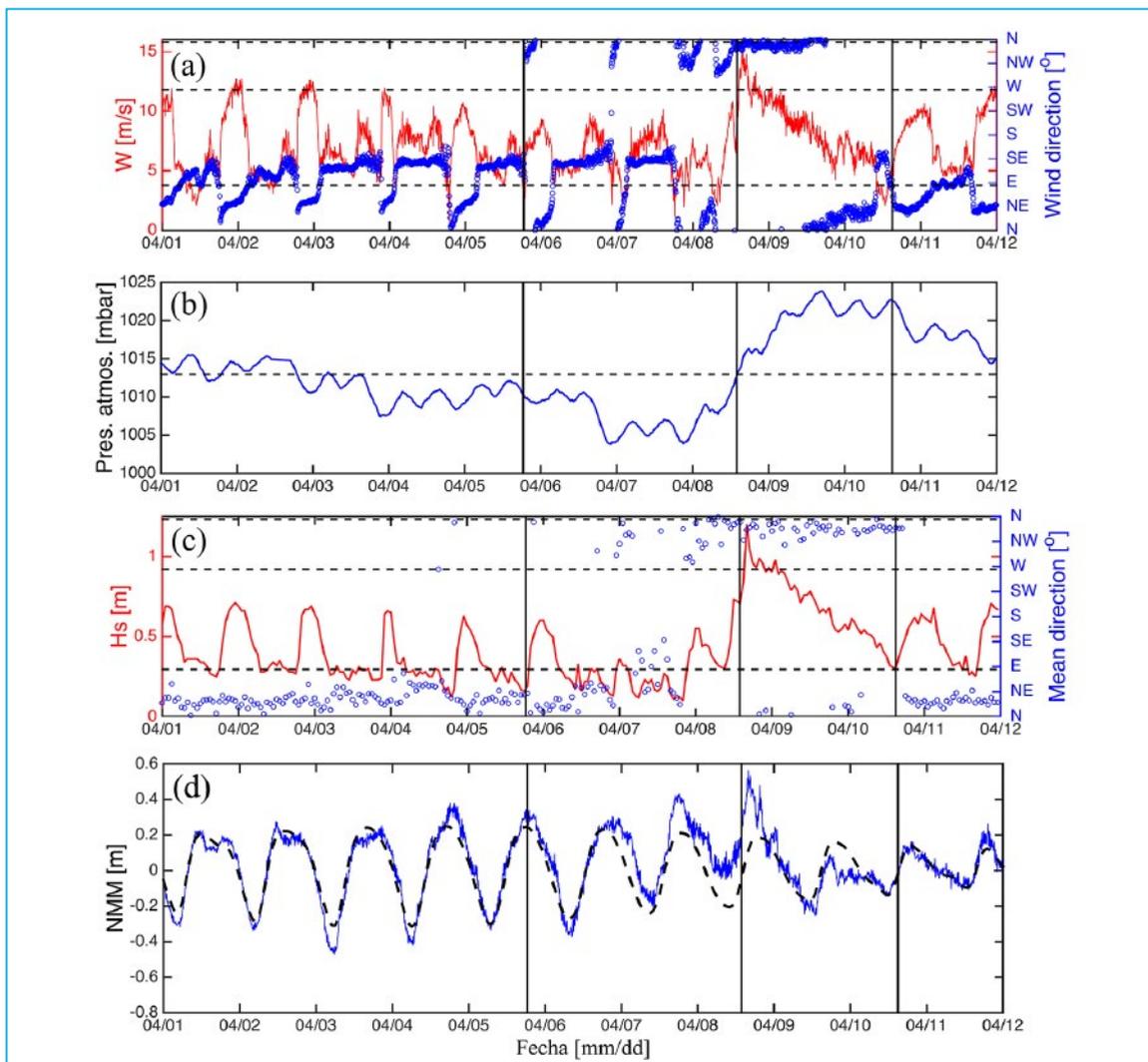


Figura 4. Condiciones atmosféricas y oceánicas durante la campaña de campo. (a) Intensidad y dirección del viento W , (b) presión atmosférica, (c) Altura y dirección del oleaje, y (d) Nivel del mar medido (azul: medido; negro: predicción CICESE).

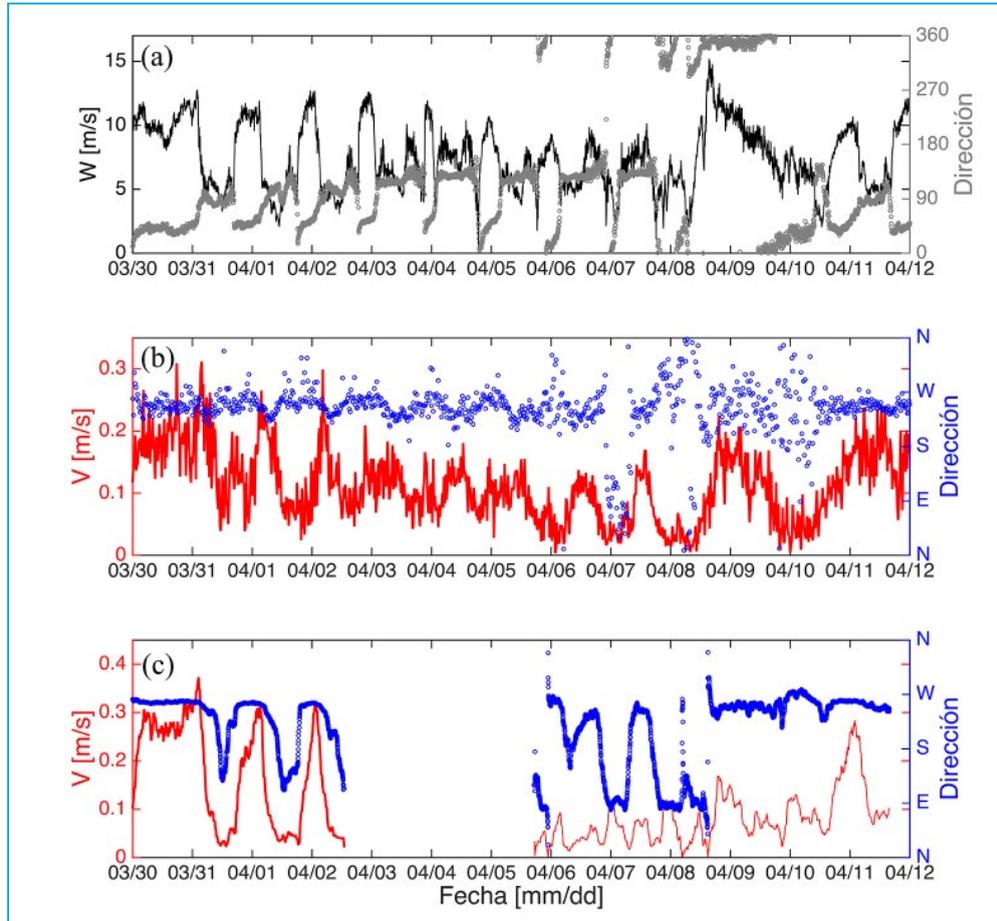


Figura 5. Intensidad y dirección de la corriente V con respecto a la (a) intensidad y dirección del viento W en: (b) $h=10$ m y (c) $h=2.5$ m de profundidad.

de intensidad de hasta 0.3 ms^{-1} en el transcurso del día (Figuras 5a y 5c). Durante el período de brisas terrestres intensas las corrientes son despreciables en esta zona y se incrementan ligeramente durante el Norte, que presenta corrientes hacia el Oeste durante todo el evento. El evento de brisas posterior al Norte sugiere que las variaciones en la dirección observadas en los primeros días de abril son inducidas por la marea.

Mediciones de la intensidad y dirección de la corriente dentro de la zona de rompiente (Figura 6) muestran el potencial de las brisas en

el transporte litoral. Durante brisas intensas (1 al 5 abril y 11 y 12 de abril) la corriente se incrementa de 0 a 0.5 m/s con dirección al Oeste. Esta corriente es inducida por la rotura del oleaje proveniente del Este. Los tres sensores localizados dentro de la zona de rompiente muestran un comportamiento similar en la dirección de la corriente, siendo más intensa en aquellos localizados sobre las barras de arena que inducen la rotura del oleaje (Figuras 5b y 5d). Durante el período pre-Norte (6 y 7 de abril), cuando las brisas terrestres son más intensas, las corrientes

dentro de la zona de rompientes son despreciables. La llegada del Norte induce una corriente intensa en dirección al Este principalmente. Al término del período de estudio la dirección de la corriente cambia hacia el Oeste debido a las brisas marinas.

DISCUSIÓN

Las mediciones de los forzamientos ambientales (marinos y atmosféricos) y las corrientes hacen

posible identificar cuáles son los procesos que controlan la circulación costera a diferentes profundidades y bajo diferentes condiciones frente a la costa de Sisal, Yucatán. Un análisis de correlación sugiere que:

(1) Las corrientes en la plataforma interior están controladas por la corriente de Yucatán y la corriente de marea.

(2) Las corrientes a 2.5 m de profundidad están controladas por el viento.

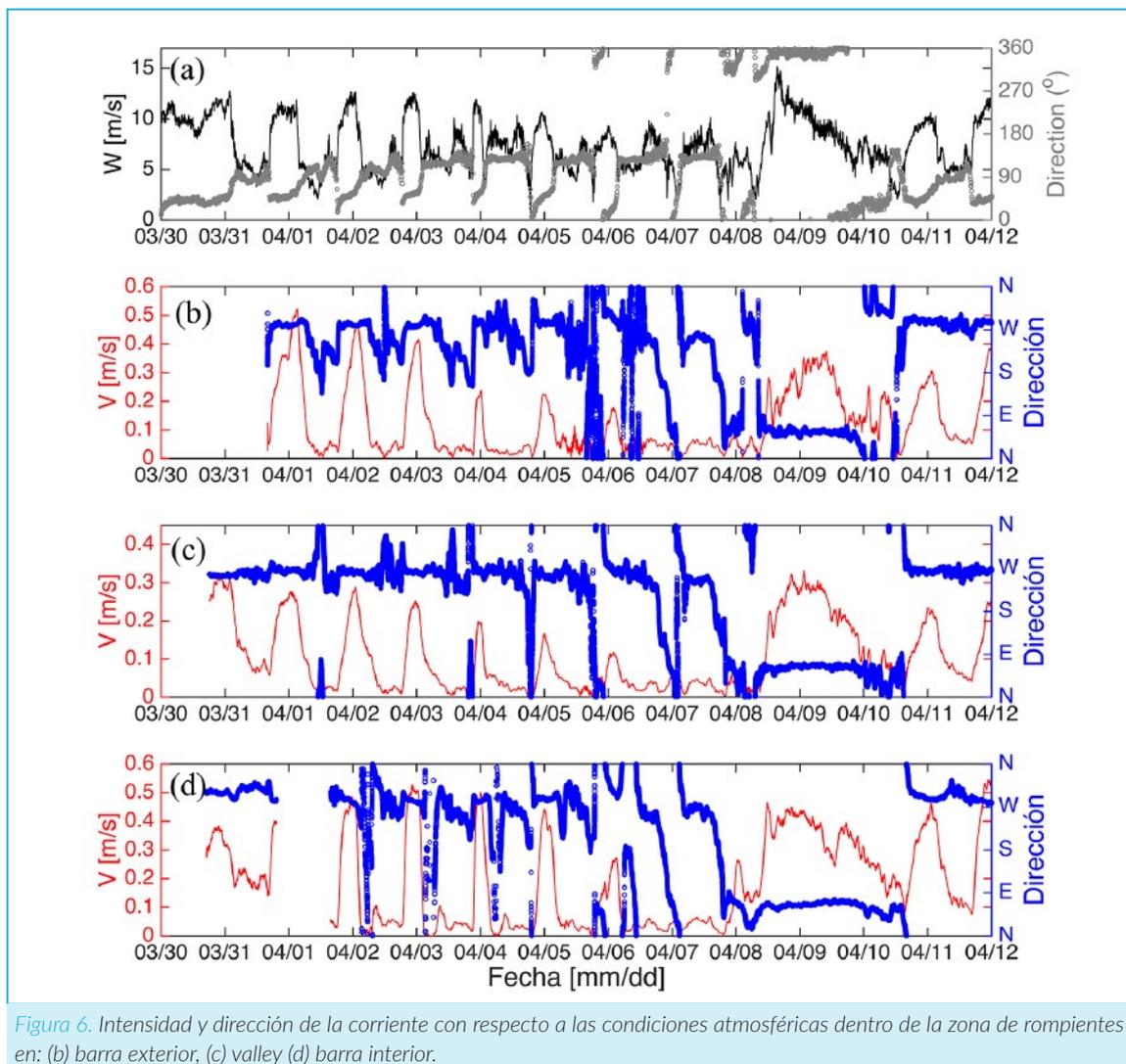


Figura 6. Intensidad y dirección de la corriente con respecto a las condiciones atmosféricas dentro de la zona de rompientes en: (b) barra exterior, (c) valley (d) barra interior.

(3) Las corrientes dentro de la zona de rompientes están controladas por la rotura del oleaje.

CONCLUSIONES

La hidrodinámica frente a la costa de Sisal, Yucatán fue estudiada con mediciones de corrientes obtenidas con sensores, instalados desde la plataforma interior hasta la costa, para eventos de brisas marinas y Nortes. Las brisas marinas generan vientos intensos del NE que generan oleaje de esa misma dirección. Las corrientes son hacia el Oeste, siendo más intensas en la zona de rompientes. Durante los Nortes las corrientes dentro de la zona de rompiente cambian de dirección, mientras que a 2.5 y 10 m de profundidad conservan su dirección hacia el Oeste. Los resultados muestran que la circulación inducida por las brisas marinas tiene una magnitud similar a la observada durante un evento de Norte. Por lo tanto, la hidrodinámica asociada a estos dos tipos de eventos juega un papel importante en el transporte de sedimentos y dispersión de contaminantes en la zona costera.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado a través del Instituto de Ingeniería en el marco de un Proyecto de Colaboración Internacional con la Universidad de Delaware y el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LN 271544). Agradecemos el apoyo en campo de investigadores y estudiantes del II-UNAM, UD, Texas A&M y la UABC. Gabriela Medellín proporcionó la Figura 1.

REFERENCIAS

- Appendini, C. M., P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, & A. Torres-Freyermuth (2012) Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 28(6): 1404-1417, ISSN 0749-0208.
- Appendini, C. M., A. Torres-Freyermuth, F. Oropeza, P. Salles, J. López, & E. T. Mendoza (2013) Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalyses assessment, *Applied Ocean Research*, 39: 20-30, ISSN: 0141-1187.
- Enriquez, C., I. J. Mariño-Tapia, Jorge A Herrera-Silveira, (2010) Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events, *Continental Shelf Research*, Volume 30, Issue 2, Pages 127-137, ISSN 0278-4343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.005>.
- Enriquez, C., I. Mariño-Tapia, G. Jeronimo, L. Capurro-Filigrasso, (2013) Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*, Volume 69, Pages 101-109, ISSN 0278-4343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>.
- Figueroa-Espinoza, B., P. Salles, J. Zavala, (2014) "On the Wind Power Potential in the northwest of the Yucatan Peninsula in Mexico". *Atmosfera*, 27-1,77-89, ISSN: 0187-6236.
- Hendrickson, J. and J. MacMahan, (2009) Diurnal sea breeze effects on inner-shelf cross-shore exchange, *Continental Shelf Research*, Volume 29, Pages 2195-2206, doi: 10.1016/j.csr2009.08.011.
- Masselink, G. and C. B. Pattiaratchi, (1998) The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment suspension, *Marine Geology*, 146: 115-135.
- Medellín, G., I. Mariño-Tapia, and J. Euán-Ávila, (2015). The influence of a seawall on postnourishment evolution in a sea-breeze-dominated microtidal beach. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1449-1458. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Merino, M., (1992) Afloramiento en la Plataforma de Yucatán: estructura y fertilización, Doct. Dissertation, Unidad Acad. Ciclos Prof. Posgrado Colegio Cienc. Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México, D. F., 285 pp.
- Merino, M., (1997) Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence, *Journal of Marine Systems*, 13: 101-121.

Reyes-Mendoza, O., I. Mariño-Tapia, J. Herrera-Silveira, G. Ruiz-Martínez, C. Enriquez, and J. L. Largier, (In press). The effects of wind on upwelling off Cabo Catoche, *Journal of Coastal Research*, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00043.1.

Ruiz-Martínez, G., I. Mariño-Tapia, E. G. Mendoza Baldwin, R. Silva Casarín, and C. Enriquez, (2015). Identifying coastal defense schemes through morphodynamic numerical simulations along the Northern coast of Yucatan, Mexico, *Journal of Coastal Research*, doi: <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00009.1>.

Ruiz-Castillo, E., Jose Gomez-Valdes, Julio Sheinbaum, Rodolfo Rioja-Nieto, (2016). Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf, *Continental Shelf Research*, Volume 118, 15, Pages 63-76, ISSN 0278-4343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.010>.

Zavala-Hidalgo, J., S. L. Morey, J. O. O'Brien (2003) Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model, *Journal of Geophysical Research*, 108, C12, 108(C12), 3389, doi:10.1029/2003JC001879.

ESTACIÓN DE VIDEO MONITORIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN INTER-ANUAL DE LA PLAYA DE SISAL

E.T. Mendoza¹, E. Ojeda²,
A. D. Gracia-Barrera¹, P. I. Espadas¹

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Puerto de Abrigo s/n, 92718, Sisal, México. eojedac@iingen.unam.mx

²CONACYT - Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Yucatán 97356, México

RESUMEN

Este trabajo presenta las características principales de la estación de video monitorización de Sisal, la cual está integrada por: los componentes, el sistema de adquisición de imágenes y la obtención de las vistas en planta. Adicionalmente se presenta un caso práctico de la utilidad de las imágenes para obtener la línea de costa y sus variaciones interanuales el cual es un rasgo geomorfológico que permite conocer la resiliencia de la costa en términos de erosión y acreción a los agentes forzantes como el oleaje.

Palabras clave: Imagen video, sensores remotos, monitoreo costero, Sirena, Yucatán.

INTRODUCCIÓN

La zona costera y, en particular las playas arenosas, son un medio altamente dinámico y complejo sujeto a la acción de diferentes agentes forzantes (el viento, las mareas y el oleaje, entre otros). Esta zona responde a los cambios espaciales y temporales de las condiciones energéticas y también a la velocidad con la que se producen estas variaciones (1). Otros factores que aumentan la complejidad de esta zona, corresponden a un gran número de intervenciones humanas (rellenos, dragados, construcción de puertos, viviendas, estructuras de protección,

por señalar algunos de ellos.) que, por lo general, no consideran las repercusiones que estos tienen en los procesos naturales y rompen el equilibrio dinámico del sistema. Asimismo, otro factor importante a considerar son los efectos del cambio climático que sugieren un incremento en la altura del oleaje y la intensidad de las tormentas (2) y el aumento del nivel medio del mar. Estos factores incrementarán la vulnerabilidad y el riesgo en la zona costera (3).

Los procesos que afectan a las playas arenosas ocurren en un amplio rango de escalas espacio-temporales, que van desde horas (efecto

de un temporal en el perfil de la playa) a siglos (cambios asociados a fluctuaciones del nivel del mar) y desde decenas de centímetros (formación de rizaduras) a decenas de kilómetros (migración de bancos de arena) (4). Es por ello que para determinar la resiliencia de la zona costera es necesario contar con observaciones continuas por períodos largos que capturen los diferentes procesos que tendrán un papel importante en su determinación.

En muchas ocasiones, no se cuenta con la información a la escala y resolución necesarias para comprender la resiliencia costera. Esta carencia está directamente asociada a los costos y las complicaciones logísticas propias de la medición en la zona costera en general y de la interfaz tierra agua en particular. La obtención de información sobre la morfología e inundación de la playa se complica aún más durante eventos extremos; es por ello que surge la necesidad de utilizar técnicas de percepción remota para el estudio de los procesos costeros.

Una de las técnicas de percepción remota que ha sido ampliamente utilizada en la zona costera está basada en el uso de estaciones de monitorización con video. El inicio de ellas (5) supuso una mejora sustancial en la capacidad de medir y observar la costa. Estos sistemas obtienen datos con una alta frecuencia temporal (generalmente cada hora se muestrean 10 minutos de imágenes con una frecuencia de entre 1 y 10 Hz) y, gracias al proceso automatizado de captación de datos, se pueden llegar a tener series a largo plazo (multi anuales), cubriendo una área de hasta 5 km (6). Estas imágenes tienen un proceso de calibración y referenciación geográfica que permite la cuantificación de los procesos (morfología e inundación de playas) durante largos períodos de manera continua, incluyendo espacios de

tiempo en condiciones adversas que es cuando más complicado es obtener mediciones in situ. La video monitorización es un sistema fiable, como queda demostrado en un gran número de publicaciones científicas (5) y por las diferentes aplicaciones como las orientadas a observar los cambios de la línea de costa a diferentes escalas temporales y los que se realizan en respuesta a eventos de tormenta o a regeneraciones artificiales (7, 8), así como a la formación y persistencia de topografías rítmicas (9), además de los estudios de la zona intermareal (10-12); estudios de los sistemas de barras de arena sumergidas (13, 14) e inundación de playas (15).

En este sentido el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) concretó la primera fase de la estación de video monitorización de Sisal en Noviembre de 2011 y completó dicha estación cubriendo la totalidad de la playa frente a la Unidad Académica de Yucatán en Agosto de 2013. Este trabajo tiene como objetivo presentar las características principales de la estación de video monitorización de Sisal; los componentes utilizados, el sistema de adquisición de imágenes, la obtención de las vistas en planta y finalmente un ejemplo práctico de la aplicación de las imágenes para obtener la línea de costa y sus variaciones interanuales.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio es una porción de la playa del puerto de Sisal, que pertenece al municipio de Hunucmá en el estado de Yucatán (Fig. 1). La Península de Yucatán es una placa caliza formada por el depósito de sedimentos carbonatados sobre roca caliza antigua. La plataforma continental, tiene una amplitud de 245 km y se extiende hacia el norte con una pendiente aproximada de 1/1000. La parte emergida

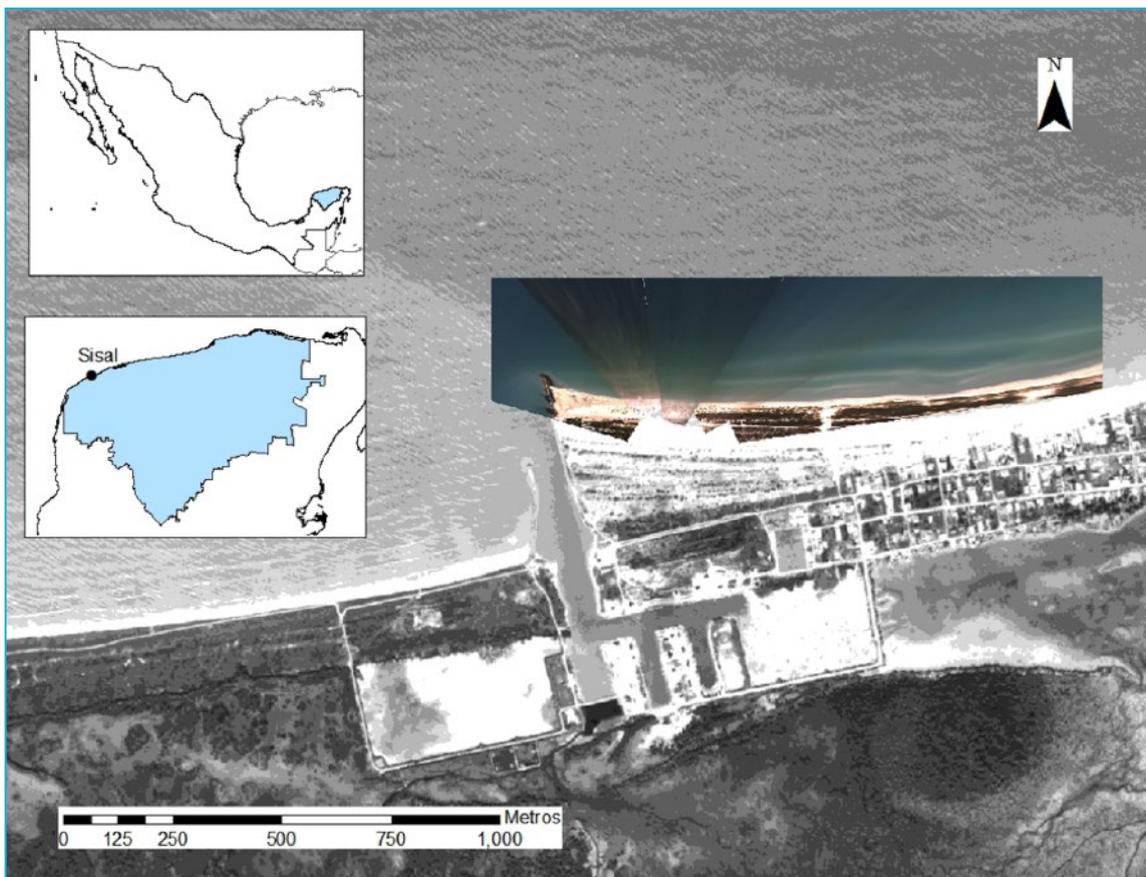


Figura 1. Localización del área de estudio, el panel superior izquierdo muestra la ubicación de Yucatán en México. El panel inferior izquierdo muestra la localización del puerto de Sisal en el estado de Yucatán. En el panel principal se presenta una vista aérea de la población de Sisal y en color se muestra la sección de la playa observada desde la estación de monitoreo por las 5 cámaras, que corresponde al área de estudio.

presenta una topografía cárstica que carece de un sistema de drenaje superficial. La zona litoral de Yucatán está conformada por un sistema de lagunas costeras que preceden a una isla de barrera discontinua con largas áreas de manglares (16, 17) El régimen de mareas es mixto y predominan las mareas diurnas, con mareas semi-diurnas durante las mareas muertas. El rango de marea varía de 0.15 metros en mareas muertas hasta 1 metro en mareas vivas (18). Para el Golfo de México la altura de oleaje significativa media en la zona es de 1.25 m con un periodo

pico medio de 6.28 s (19). El área de estudio tiene una longitud de 1.8 km desde la escollera del puerto de abrigo hasta el muelle del pueblo de Sisal con un tamaño de sedimento de D50 entre 0.3 y 0.45 mm (20).

ESTACIÓN DE VIDEO MONITORIZACION Componentes

La estación se compone de una torre meteorológica de 50m y un conjunto de cinco cámaras situadas a 43 m de altura. El conjunto de cámaras está compuesto de dos cámaras AVT

modelo Stingray F125CF con conexión de fibra óptica (GOF por sus siglas en inglés) y tres cámaras AVT modelo Stingray F125C con conexión IEEE 1394b todas las cámaras tienen una resolución de píxel de 1296x966. Las cámaras con el conector GOF son las encargadas de enviar la información a una estación de trabajo que se encuentra en el LIPC a una distancia de 350 m a través de una tarjeta PCI 1394b con un puerto GOF.

METODOLOGÍA

Adquisición

La adquisición de imágenes está a cargo del Sistema Remoto de Monitorización de Playas -Sirena- (21) de código abierto inicialmente desarrollado por el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) el cual ha sido modificado y mejorado de manera conjunta entre el Instituto de Ciencias del Mar en Barcelona y el LIPC. El hecho que sea de código abierto permite una constante evolución adaptándose a las condiciones de trabajo de cada sitio.

Las 5 cámaras de la estación están programadas para capturar imágenes diariamente entre las 11 y las 23 horas UTC. Estas cubren desde la entrada del puerto de abrigo hasta el muelle de Sisal en un tramo aproximado de 1.8 km (Fig. 1 y 2).

El sistema genera cada media hora 3 productos: una imagen instantánea (snapshot), imagen de exposición temporal y una imagen de varianza. La Fig. 3a presenta una imagen instantánea, la Fig. 3b una imagen de exposición temporal, éstas son obtenidas al promediar las imágenes instantáneas adquiridas durante 10 minutos cada media hora a una frecuencia de 7.5 cuadros por segundo (fps). La Fig. 3c presenta una imagen de varianza la cual se obtiene de la misma forma que la de exposición temporal pero obteniendo la desviación estándar. Estos tres productos pueden ser consultados en la página: <http://tepeu.sisal.unam.mx/video-sisal/images.jsp>.

Vistas en planta

Las vistas en planta son imágenes corregidas y geo-referenciadas que permiten hacer medidas reales ya que todos los píxeles que conforman la imagen tienen el mismo tamaño. Para lograr este tipo de imágenes se requiere de corregir la aberración de las lentes mediante una calibración intrínseca y posteriormente geo-referenciar las imágenes; es decir, transformar las coordenadas de la imagen a coordenadas reales para lo cual, se debe conocer la posición XYZ de las cámaras y de una serie de puntos de control localizados en su campo de visión. Finalmente las

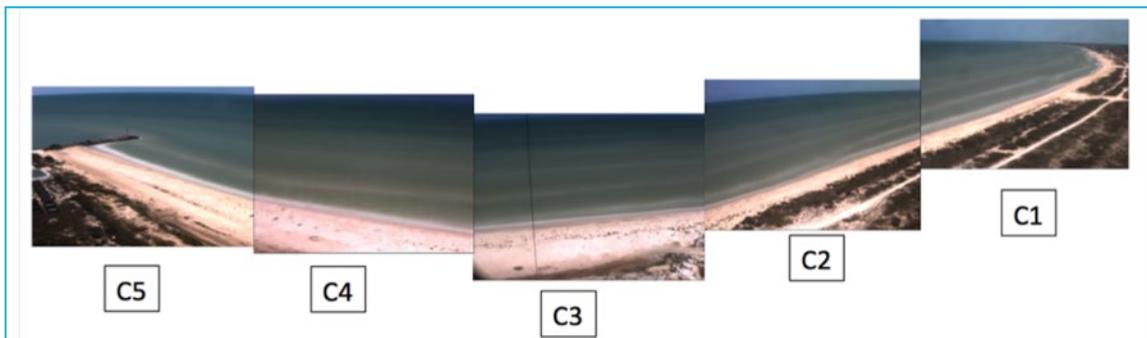


Figura 2. Imágenes oblicuas de las cinco cámaras cubriendo una distancia de 1.8 km de la playa de Sisal.



Figura 3. Imágenes generadas por la cámara uno a) Imagen instantánea b) Imagen de exposición temporal c) Imagen de Varianza.

cinco imágenes se unen para crear un solo mosaico (Fig. 4).

Obtención de la línea de costa

La línea de costa se obtiene a través un proceso semi automatizado diseñado para la playa de Sisal (22) en el cual se evalúan 5 métodos (Umbral HS-media, Umbral HSV-media, LoG, Canny y Umbral HS-Otsu) y el usuario elige la opción que mejor se ajusta a la línea de costa observable, con la posibilidad de editar si se considera necesario (Fig. 5).

Evolución de la línea de costa de la playa de Sisal

Se hizo una evaluación de las variaciones interanuales de la línea de costa para un periodo de tiempo entre Agosto 2012 a Diciembre 2015 para toda la zona de estudio (Fig. 4). Se

extrajeron los datos correspondientes al nivel medio del mar (MWL) con un rango entre -0.05 y 0.05 metros.

RESULTADOS

Evolución de la línea de costa de la playa de Sisal

La figura 5 presenta los cambios de la línea de costa para el período de estudio para los valores de MWL. La barra lateral indica para los colores fríos (azul) el retroceso de la línea de costa, mientras que los rojos indican el avance de la línea de costa en metros. Las líneas negras horizontales negras representan tormentas con oleaje con alto contenido energético. Los espacios en blanco son los momentos en los que no se tienen datos.

La Figura 6, (diagrama espacio-temporal) muestra la distancia a lo largo de la playa de las

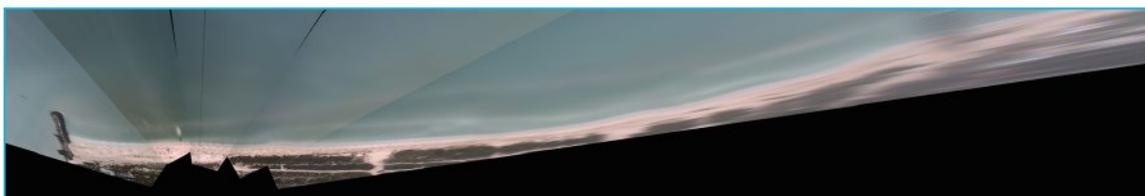


Figura 4. Vista en planta de las cinco cámaras, esta imagen tiene una resolución de 2 pixel/metro.



Figura 5. Imagen con 5 líneas de costa obtenidas por los métodos Umbral HS-media, Umbral HSV-media, LoG, Canny y Umbral HS-Otsu.

cámaras durante el periodo de tiempo del estudio (eje vertical). La escala de colores está en metros y representa el cambio en la distancia, los colores fríos representan valores de erosión y los colores cálidos denotan acreción. Las líneas negras horizontales representan eventos de tormenta.

De la figura 6, podemos extraer varios procesos importantes que ocurren en la playa de estudio. En general, toda la playa presenta una tendencia de acreción, esto se ve claramente en la parte superior de la figura (al final del periodo de estudio) en la cual se observan tonalidades de colores más cálidos (amarillos y rojos) en

comparación a las tonalidades de colores más fríos (verde y azul) del inicio del estudio, de esta tendencia de acreción, el mayor avance se presentó en el extremo oeste (entrada al puerto de abrigo -posición $x=-200$) y en la zona situada entre la posición longitudinal $800 > x < 1200$. En el primer caso los valores máximos de erosión fueron de -30m mientras que para la acreción los valores máximos fueron de 25 m .

De manera adicional, se pueden observar los ciclos típicos estacionales de una playa con avances y retrocesos, a lo largo de toda la costa, esto es muy claro en el periodo: diciembre de 2013 – febrero de 2014. En los cuales dominan

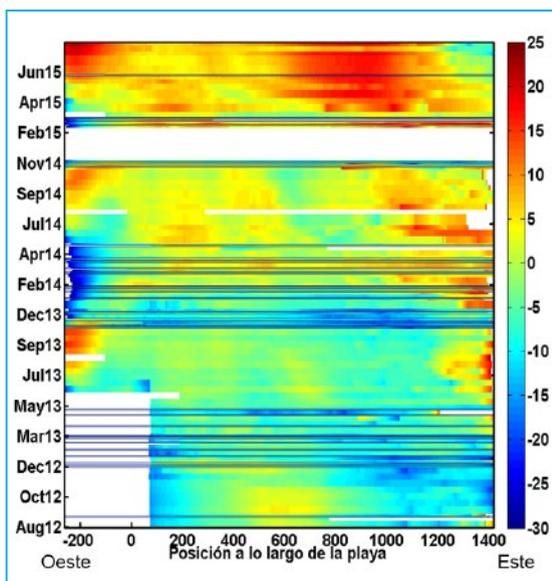


Figura 6. Vista en planta de la playa de Sisal con la ubicación de los transectos

los colores fríos. A partir de febrero de 2014 se presentan colores cálidos. Los extremos de la zona de estudio (zonas cercana al muelle y a la escollera de entrada al puerto de abrigo) presentan una alta variabilidad en la posición de la línea de costa. El periodo de diciembre 2013- abril 2014 la zona de la escollera presentó erosión mientras que la zona cercana al muelle presentó acreción. Al final del periodo de estudio (junio 2015) se presentó un comportamiento contrario, la zona de escollera presentó acreción y la zona del muelle erosión.

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la dinámica de la línea de costa utilizando imágenes de un sistema de video-monitoreo durante un período de 3 años y medio, en una playa disipativa micro-mareal (carrera de marea promedio de 0.5 metros).

Esta playa es un sistema semi-cerrado dado que del lado este de la playa está situado un

muelle que permite el paso de sedimento y del lado oeste se sitúa un espigón el cual restringe el transporte de sedimento longitudinal.

Los cambios estacionales que presenta la playa de Sisal, coinciden con la época del año en las que se presentan frentes fríos y oleaje más energético. En contraste, los periodos de avance están situados en la época del año correspondientes a las brisas y la época de oleaje poco energético.

A pesar de estas fluctuaciones estacionales de la playa, la playa presenta una tendencia general de crecimiento (acreción), esto es debido a la estructura que protege la entrada al puerto de abrigo en el extremo oeste, que funciona como trampa de sedimento la cual influye en toda la costa.

La playa responde a la dirección del oleaje incidente y cambia la orientación de toda la playa presentando variaciones máximas en los extremos de la misma; este tipo de movimiento ha sido observado en otras playas (7, 8). Se detectó que cada evento de tormenta registrado en este estudio genera un comportamiento diferente en la playa, dependiendo de varios factores, como el estado previo de la playa al evento, la intensidad del evento y la dirección del oleaje. Así mismo, se observó que en algunos eventos se presenta un retroceso de toda la playa, mientras que en otros la playa avanza hacia mar.

En conclusión, para el periodo de estudio de 3 años y medio, la playa de Sisal, presentó una tendencia predominante de acreción. En este mismo periodo, la playa presentó episodios estacionales, alternando la orientación de la misma entre una posición para invierno y otoño; y otra posición para primavera y verano con valores máximos de -30m en el caso de erosión y de 25 m en el caso de acreción. Finalmente, la costa

presenta una buena resiliencia a las condiciones del oleaje ya que a pesar de que la costa retrocede en la época de eventos de tormenta en invierno, ésta se recupera durante los periodos de calma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos internos del instituto de Ingeniería número 5341 y número 6602. Al proyecto INFR-2014-01-225561 de CONACYT. A José López, Bernardo Figueroa y Gonzalo Martín por el apoyo a la implementación de la estación. La estación inicial fue financiada por los Proyectos de Colaboración Internacional del Instituto de Ingeniería de la UNAM dentro del proyecto "Estudio de barras por medio de monitoreo de video en la zona de Sisal Yucatán".

BIBLIOGRAFÍA

1. L. D. Wright, A. D. Short, Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology* 56, 93-118 (1984).
2. P. D. Komar, in *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, E. Wolanski, D. McLusky, Eds. (Academic Press, Waltham, 2011), pp. 285-308.
3. R. J. Nicholls, F. M. J. Hoozemans, M. Marchand, Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change* 9, Supplement 1, S69-S87 (1999).
4. M. J. F. Stive *et al.*, Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering* 47, 211-235 (2002).
5. R. A. Holman, J. Stanley, The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering* 54, 477-491 (2007).
6. A. Kroon *et al.*, Application of remote sensing video systems to coastline management problems. *Coastal Engineering* 54, 493-505 (2007).
7. E. Ojeda, J. Guillén, Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology* 253, 51-62 (2008).
8. M. J. P. van Duin, N. R. Wiersma, D. J. R. Walstra, L. C. van Rijn, M. J. F. Stive, Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering* 51, 813-837 (2004).
9. R. Almar *et al.*, Nearshore bathymetric inversion from video using a fully non-linear Boussinesq wave model. *Journal of Coastal Research*, 20-24 (2011).
10. S. G. J. Aarninkhof, I. L. Turner, T. D. T. Dronkers, M. Caljouw, L. Nipius, A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering* 49, 275-289 (2003).
11. R. A. Holman, T. C. Lippmann, P. V. O'Neill, K. Hathaway, Video estimation of subaerial beach profiles. *Marine Geology* 97, 225-231 (1991).
12. A. J. Madsen, N. G. Plant, Intertidal beach slope predictions compared to field data. *Marine Geology* 173, 121-139 (2001).
13. I. M. J. van Enckevort, B. G. Ruessink, Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research* 23, 501-512 (2003).

- 14.I. M. J. van Enckevort, B. G. Ruessink, Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research* 23, 513-532 (2003).
- 15.H. F. Stockdon, R. A. Holman, P. A. Howd, A. H. Sallenger Jr, in *Coastal Engineering*. (2006), vol. 53, pp. 573-588.
- 16.A. Cuevas-Jiménez, J. Euán-Ávila, Morphodynamics of carbonate beaches in the Yucatan Peninsula. *Ciencias Marinas* 35, 307-320 (2009).
- 17.C. Enriquez, I. J. Mariño-Tapia, J. A. Herrera-Silveira, Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research* 30, 127-137 (2010).
- 18.C. Enriquez, I. Mariño-Tapia, G. Jeronimo, L. Capurro-Filigrasso, Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research* 69, 101-109 (2013).
- 19.C. Appendini, A. Torres-Freyermuth, P. Salles, J. Lopez-Gonzalez, E. Mendoza, Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast. *Journal of Climate* 27, 1619-1632 (2014).
- 20.E. T. Mendoza *et al.*, Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 790-795 (2013).
- 21.M. A. Nieto *et al.*, An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 1712-1719 (2010).
- 22.A. D. Gracia-Barrera, Undergraduate thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería (2016).

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA MORFOLOGÍA DE LA PLAYA EN SISAL, YUCATÁN

Gabriela Medellín

RESUMEN

La playa es una zona altamente dinámica que responde a las perturbaciones naturales y antropogénicas. El viento, oleaje y mareas inducen el transporte de sedimento transversal y longitudinal durante condiciones medias y extremas. Asimismo, las estructuras costeras y la presencia de infraestructura en la playa también generan cambios en su condición de equilibrio bajo condiciones naturales. La problemática relacionada a la erosión de la playa se debe principalmente al desconocimiento de su variabilidad y sensibilidad a las intervenciones que se llevan a cabo. La playa de Sisal, Yucatán es un sitio ideal para el estudio de la dinámica natural y los efectos de estructuras costeras. En este trabajo se llevó a cabo un monitoreo con alta resolución espacio-temporal orientado a conocer la morfodinámica en el tramo comprendido entre la escollera al este del Puerto de Sisal y el Muelle de Sisal. Perfiles de playa realizados con una frecuencia semanal durante la mayor parte del periodo de muestreo (05/2015–05/2016) a lo largo de 20 transectos permiten identificar cuatro zonas que responden de manera diferenciada al clima de oleaje generado por brisas y Nortes. La zona con mayor variabilidad es la zona aledaña a la escollera del Puerto de Abrigo, la cual incrementa el ancho de playa de manera significativa durante la época de brisas y la reduce durante los Nortes, con variaciones máximas de 50 m en el ancho de playa. Por otro lado, la zona aledaña al oeste del Muelle de Sisal presenta un comportamiento contrario, con incrementos en el ancho de playa durante la época de Norte y reducción de la playa durante la época de brisas. La zona localizada entre dichas estructuras permanece relativamente estable, presentando variaciones de ~15 m a lo largo del año. Sin embargo, a pesar de estas variaciones, el análisis a lo largo de un año muestra que no existe tendencia acresiva/erosiva en esta zona. Esto sugiere que a pesar de las perturbaciones, como tormentas y estructuras, la playa de Sisal se encuentra en un equilibrio dinámico gracias en parte a la conservación del sistema de barras sumergidas y la duna costera vegetada.

Palabras claves: morfología de playas; levantamientos topo-batimétricos; morfodinámica de playas; ancho de playa; Sisal, Yucatán; brisas y Nortes.

INTRODUCCIÓN

En el Estado de Yucatán, el número de habitantes de los pueblos costeros ha aumentado de 27,000 habitantes en 1970 a más de 100,000 en el año 2000 (Herrera Silveira, *et al.*, 2004), acrecentado el impacto a los ecosistemas costeros. Adicionalmente, durante los meses de verano la población se incrementa notablemente en las comunidades de la costa debido al “turismo de segunda residencia” (García de Fuentes, *et al.*, 2011). La playa es por tanto una importante zona de recreo, así como el hábitat de varias especies, entre ellas sitio de anidamiento de la tortuga Carey (*Eretmochelys imbricata*), tortuga blanca (*Chelonia mydas*), y tortuga caguama (*Caretta caretta*) (Pronatura Península de Yucatán, A.C., <http://pronatura-ppy.blogspot.mx/p/ppytorugas.html>). Sin embargo, la erosión de playas en varios puntos a lo largo del litoral Yucateco ha alcanzado niveles críticos que han derivado en la pérdida de hábitat de estas especies y de infraestructura.

La erosión de playas en Yucatán está relacionada con la presencia de Puertos de Abrigo a lo largo de los 360 km de costa, que interrumpen el transporte litoral predominante hacia el Oeste la mayor parte del año, siendo más evidente en zonas aledañas a las estructuras costeras. Sin embargo, esta situación se ha extendido a otras zonas debido a la construcción de casas sobre la duna costera y a la construcción de estructuras costeras no autorizadas (rompeolas y espigones) por parte de particulares que buscan la protección de sus casas. En 1984, durante un reconocimiento aéreo, se documentaron 178 espolones en una sección

de 8.8 km de costa al oeste de Progreso y para finales de 1999 se contabilizaron 100 más hacia el este (Meyer-Arendt, 2001). Para remediar esta situación, en el año 2001 se llevó a cabo un programa de rehabilitación de playas por parte del gobierno del Estado que contempló la eliminación de aproximadamente 300 espolones, la realimentación de algunas playas, y la implementación de técnicas de by-pass. El análisis del monitoreo en la zona cercana a Progreso, llevado a cabo por el CINVESTAV, sugiere que la remoción de las estructuras fue favorable (Medellín *et al.*, 2015). Sin embargo, no se han implementado programas de monitoreo sistemáticos que permitan evaluar el efecto de las medidas de mitigación en otras zonas. Recientemente, Tereszkievicz (2016) reportó la existencia de 305 estructuras en un tramo de 13 km de Yucalpetén a Chuburná, la mayoría de ellos construidos de manera tradicional (espolones) y más de la mitad en malas condiciones. Esto pone en evidencia la falta de continuidad en los programas de control de la erosión y el papel de los propietarios de las casas de playa en el mismo.

El desarrollo sustentable de la zona costera requiere de un entendimiento de la dinámica natural de playas y los efectos de las estructuras en ella. Por lo tanto, se inició un programa de monitoreo de la playa en Sisal Yucatán con el propósito de mejorar el entendimiento de la variabilidad de las playas alteradas y no alteradas por estructuras costeras en el corto, mediano y largo plazo. Este tipo de estudios son fundamentales para proponer soluciones integrales a lo largo del litoral Yucateco.

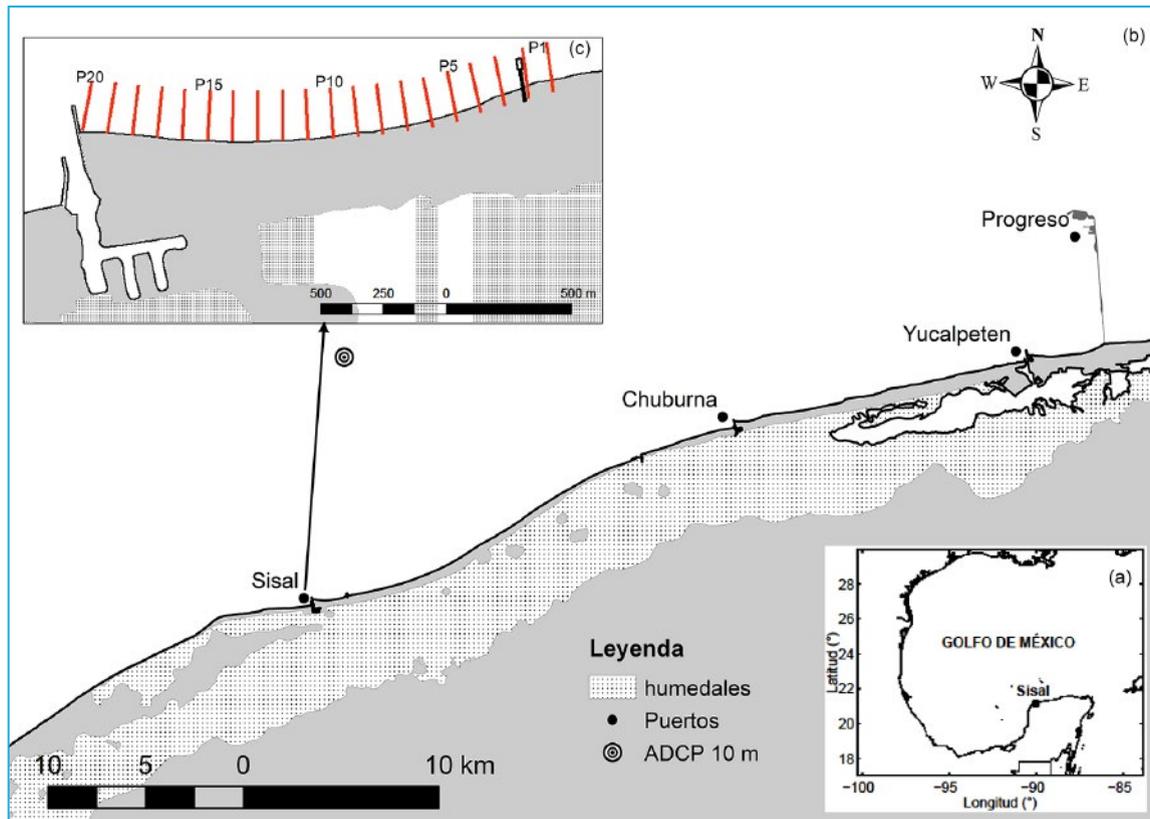


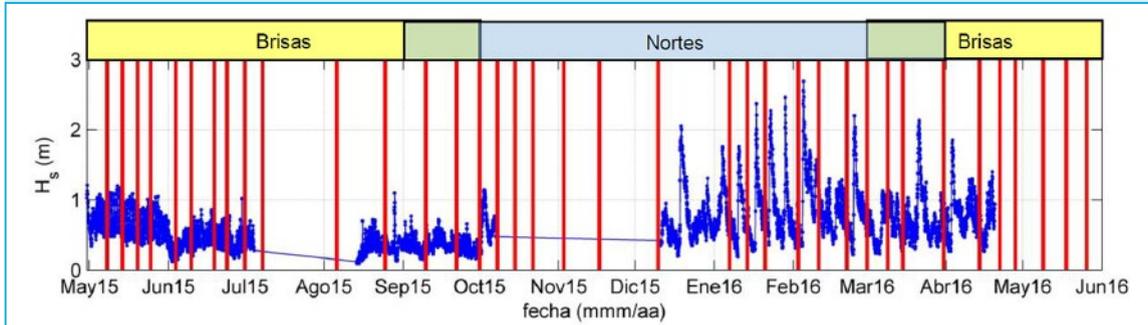
Figura 1. Localización del área de estudio mostrando (a) la ubicación de Sisal en la Península de Yucatán, (b) la zona de estudio, señalando puertos cercanos, zonas de humedales, y ubicación del ADCP a 10 m de profundidad, y (c) distribución de los 20 transectos medidos a lo largo de la playa de Sisal.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza en Sisal, Yucatán (Figura 1a) y comprende una sección de playa ubicada entre el Puerto de Abrigo y el Muelle de Sisal (Figura 1b). Perfiles de playa ubicados cada 100 m a lo largo de 2 km de playa (Figura 1c) permiten evaluar la variabilidad de la morfología de la playa a lo largo de un año (08/05/2015 al 26/05/2016). Las mediciones topo-batimétricas se llevaron a cabo utilizando un sistema GPS diferencial en modo RTK (tiempo real). El sistema consiste en una base ubicada en el techo del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros y una antena móvil (rover)

transportada en una mochila. Los perfiles de playa inician en la duna y se extienden mar adentro hasta donde la profundidad permita caminar sin que sea sumergida la antena móvil. Todos los perfiles fueron realizados por el mismo operador por lo que la longitud de los levantamientos está en función de la batimetría, la energía del oleaje, y el nivel de la marea. Se realizaron un total de 37 levantamientos con una frecuencia semanal durante la mayor parte del año. Esta información permite no sólo estimar las variaciones en el ancho de playa (distancia entre la duna y la intersección del perfil de playa con el nivel medio del mar) sino que

Figura 2. Fechas de los levantamientos topo-batimétricos (líneas rojas verticales) con respecto a la disponibilidad de los datos de oleaje. Las condiciones de oleaje se dividen en: época de brisas (amarillo), época de Nortes (azul), y época de transición (verde.)



también los cambios en la parte emergida (berma y duna) y sumergida (barras) de la playa.

Asimismo, mediciones de oleaje realizadas a 10 m de profundidad (Figura 1), y a aproximadamente 11 km de la costa, durante este mismo período (López *et al.*, este libro) permiten correlacionar los cambios observados en la morfología de la playa con las condiciones de oleaje en la zona. La disponibilidad de los datos de oleaje con respecto a las campañas de campo se muestra en la Figura 2.

RESULTADOS

El oleaje en la zona de estudio es dominado por brisas (mayo-septiembre) y Nortes

(octubre-abril), con dos épocas de transición, una al inicio de la primavera (marzo-abril) y otra al final del verano (septiembre). Los cambios en los perfiles de playas están fuertemente relacionados con el clima de oleaje. Es por ello que, para facilitar la presentación de los resultados se muestran los cambios morfológicos asociados a oleaje dominado por brisas y Nortes por separado.

El análisis de las mediciones en la sección de dos kilómetros de playa estudiada sugiere la existencia de cuatro zonas diferenciadas por su dinámica a lo largo del año. La dinámica de las cuatro zonas se describe a continuación (ver Figura 3 para ubicación de perfiles):



Figura 3. Zonación de la playa de Sisal de acuerdo a su morfodinámica, de este a oeste: 1) zona al este del muelle, 2) zona al oeste del muelle, 3) zona central, y 4) zona aledaña al espigón del puerto de abrigo.

1) Zona aledaña al este del muelle de Sisal (Perfiles 1 y 2).- Esta zona está influenciada por el muelle de Sisal (Figura 3). Su evolución anual se representa en la Figura 4. Durante el verano presenta acreción debido a la interrupción parcial causada por el muelle de Sisal del transporte litoral asociado a las brisas (Figura 4b). También se caracteriza por la presencia de un *ridge-runnel* en la zona intermareal. En la temporada de Nortes esta zona es erosionada debido al gradiente del transporte provocado por el Muelle que interrumpe parcialmente el transporte de Oeste a Este y se observa un incremento en la altura de la berma por transporte hacia la costa (Figura 4c). Las variaciones en la localización de la línea de costa son del orden de 28 m a lo largo del año.

2) Zona aledaña al oeste del muelle de Sisal (Perfiles 3 a 5).- Esta zona presenta la dinámica contraria a la de la zona 1 (Figura 3) y su evolución a lo largo del año se representa en la Figura 5. Durante los meses de brisas presenta erosión por la interrupción parcial del transporte de sedimento (Figura 5b y 5d). En esta época llega a presentar un escarpe de ~0.5 m durante el retroceso de la línea de costa. Por otro lado, durante los Nortes (Figura 5c) se observa acreción asociada al efecto del muelle por interrupción parcial del transporte de Oeste a Este. En general la magnitud de las variaciones en la línea de costa son similares a la zona 1. Es importante recalcar la alta variabilidad en la parte emergida del perfil de playa debido al efecto del muelle en el transporte eólico.

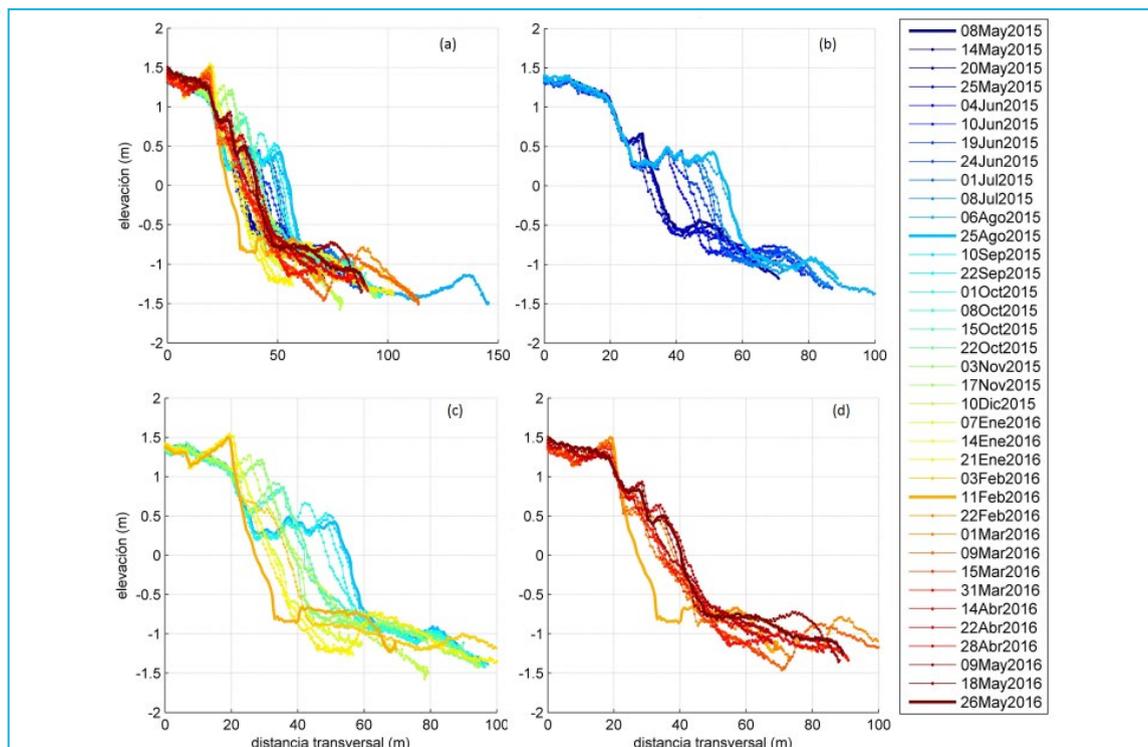


Figura 4. Evolución (a) anual, (b) durante brisas predominantes, (c) durante Nortes predominantes, y (d) durante época de transición entre Nortes y brisas del perfil aledaño al este del muelle de Sisal, ubicado en la Zona 1.

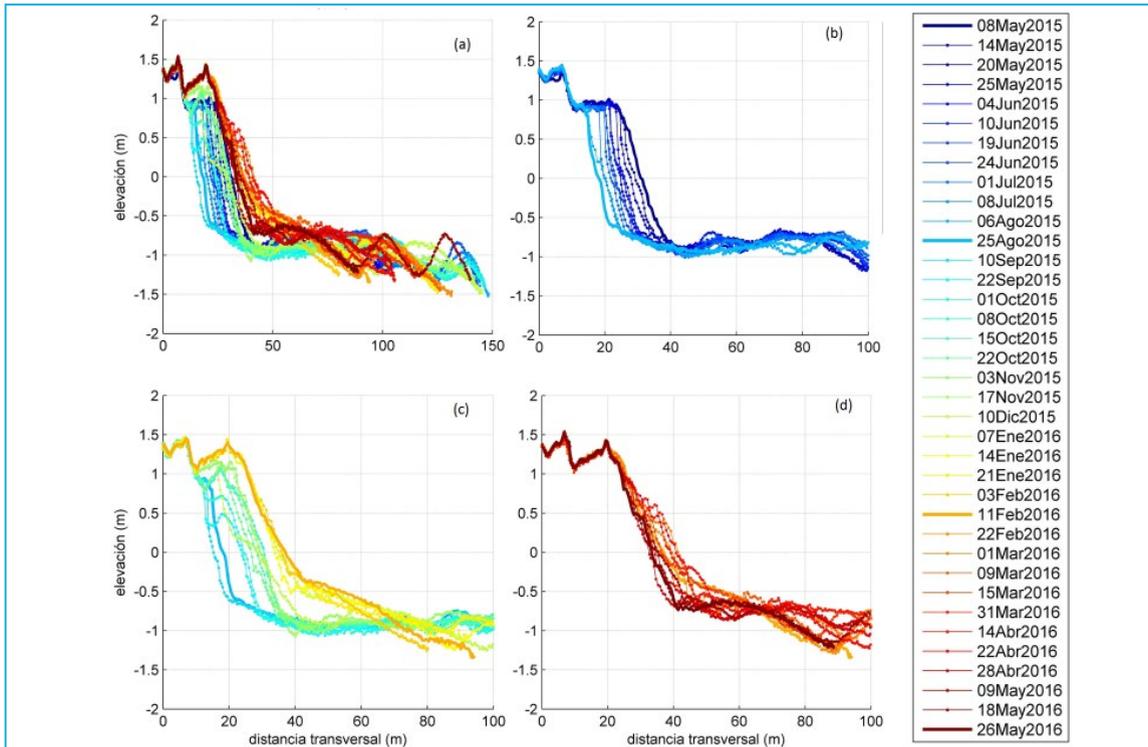


Figura 5. Evolución (a) anual, (b) durante brisas predominantes, (c) durante Nortes predominantes, y (d) durante época de transición entre Nortes y brisas del perfil aledaño al oeste del muelle de Sisal, ubicado en la Zona 2.

3) Zona central (Perfiles 6 a 18).- La zona central comprende la mayor parte de la zona entre el Muelle y el Puerto de Sisal (Figura 3). Esta zona presenta poca variación a lo largo del año debido a que no está influenciada directamente por las estructuras costeras de la zona (Figura 6). Se observa un sistema de barras de arena que presenta una migración hacia el mar durante las brisas (Figura 6b) y hacia la costa durante el invierno (Figura 6c) del orden de 20 metros. No existen variaciones importantes en el perfil emergido salvo en los eventos más energéticos que ocurren al final del verano y presenta con una variabilidad máxima del ancho de playa de 10 m. Es un tramo de playa considerado estable.

4) Zona aledaña al espigón del puerto de abrigo (Perfiles 19 y 20).- Esta zona (Figura 3)

presenta la mayor variabilidad en la posición de la línea de costa, la cual oscila hasta 50 m a lo largo del año (Figura 7). Durante las brisas presenta un crecimiento importante debido a la interrupción del transporte litoral de Este a Oeste (Figura 7b y 7d). Este crecimiento está limitado por la extensión de la estructura y al final del verano ocurre un bypass natural. Al inicio de la temporada de los Nortes el sedimento es transportado hacia el este por lo que existe un retroceso importante en cada evento de Norte (Figura 7c). Asimismo, existe un crecimiento importante del volumen de arena en la playa emergida (berma) lo cual incrementa su capacidad de protección ante los niveles elevados asociados a las tormentas. El retroceso se interrumpe en el mes de febrero, cuando la presencia de brisas

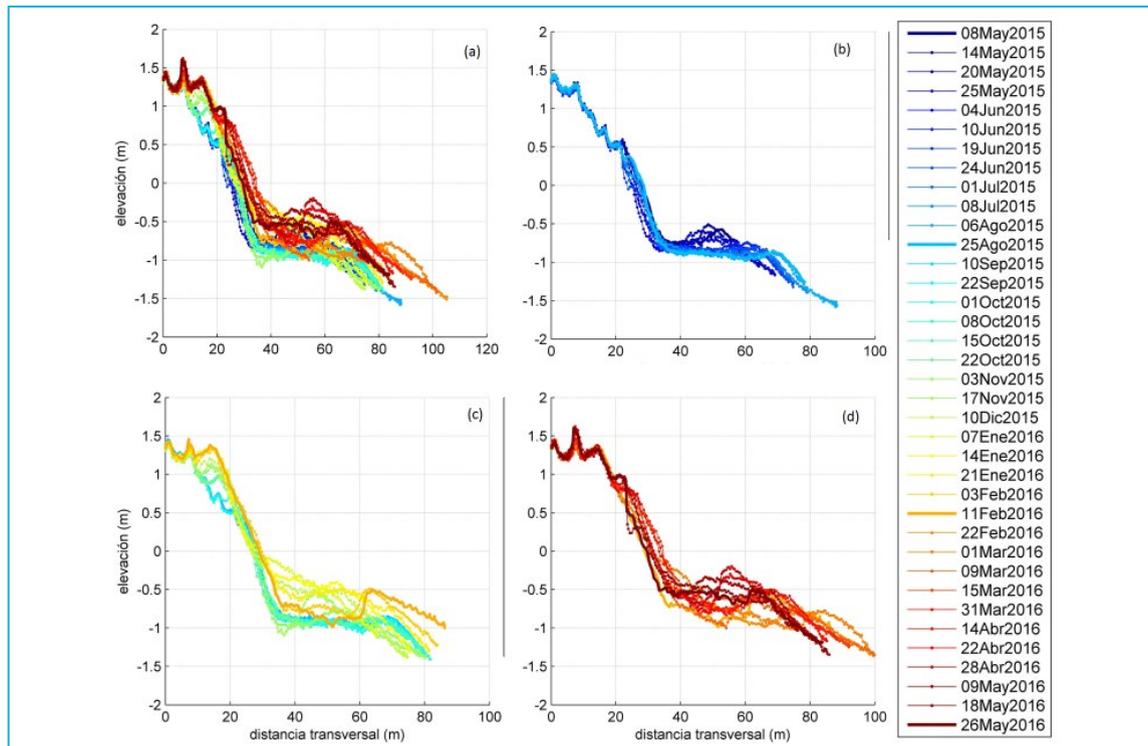


Figura 6. Evolución (a) anual, (b) durante brisas predominantes, (c) durante Nortes predominantes, y (d) durante época de transición entre Nortes y brisas del perfil ubicado en la zona central de la playa de Sisal, Zona 3.

induce nuevamente un transporte hacia el Oeste que recupera el ancho de playa.

DISCUSIÓN

La morfodinámica de la playa de Sisal presenta un comportamiento diferente ante la influencia de brisas marinas y Nortes. Durante las brisas existe una acumulación/erosión importante al este/oeste de cualquier estructura perpendicular a la costa asociada al transporte litoral hacia el Oeste y las barras sumergidas presentan una migración costa afuera (Figura 8a). Por otro lado, durante los Nortes se observa una migración de las barras de arena tierra adentro y el crecimiento de la berma (Figura 8b). Asimismo, pueden causar erosión/depositación al este/oeste de las estructuras asociadas a transporte litoral hacia el Este.

CONCLUSIONES

La dinámica en la playa de Sisal está controlada principalmente por el clima de oleaje asociado a las fuertes brisas presentes en la zona (mayo-septiembre) y Nortes (octubre-abril), con periodos de transición entre ambos periodos. En la zona comprendida entre el Puerto de Abrigo y el Muelle de Sisal se han identificado cuatro zonas de acuerdo a su variabilidad morfodinámica. Las zonas alejadas a estructuras presentan una variabilidad mayor a la observada en la zona alejada de las estructuras, siendo esta última relativamente estable a lo largo del año. Independientemente del grado de variabilidad, se observa en general un ciclo anual para todas las zonas, en donde el perfil medido en el mes de mayo 2015 es muy similar al del mes de mayo del 2016. No se observa

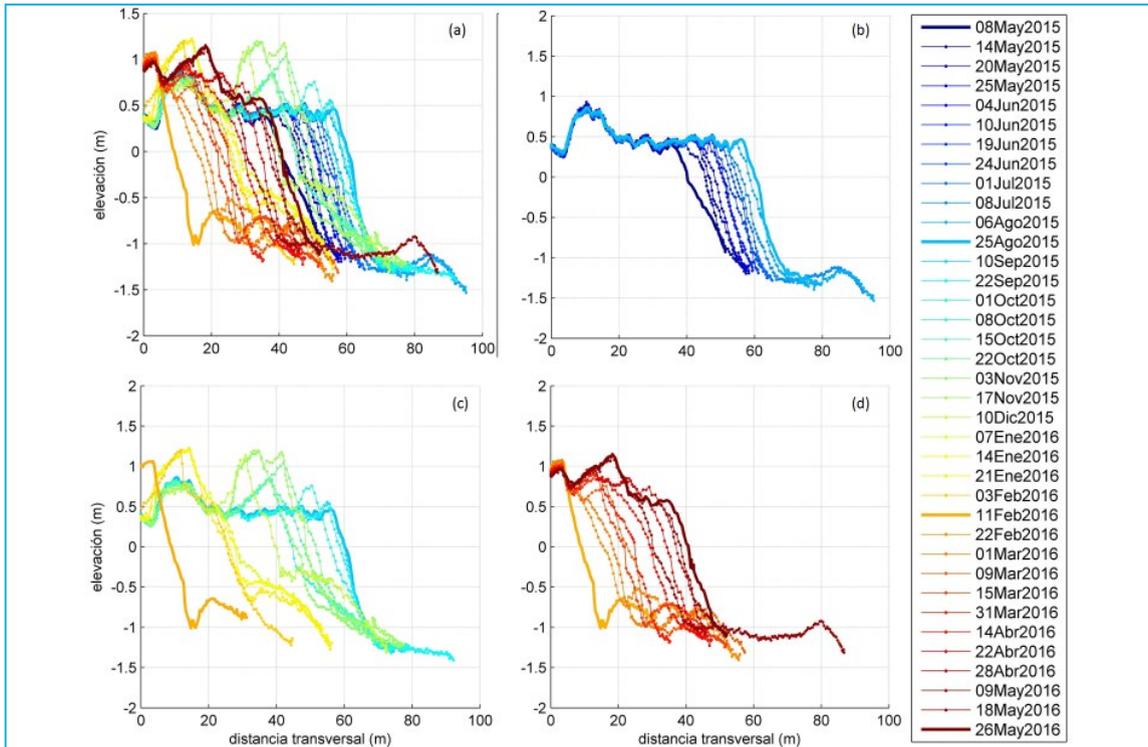


Figura 7. Evolución (a) anual, (b) durante brisas predominantes, (c) durante Nortes predominantes, y (d) durante época de transición entre Nortes y brisas del perfil aledaño al espigón del puerto de abrigo, Zona 4.

un crecimiento/decrecimiento neto anual del ancho de playa para ninguna zona, sin embargo, es necesario continuar con las observaciones

topo-batimétricas para investigar tendencias multianuales relacionadas con los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático.

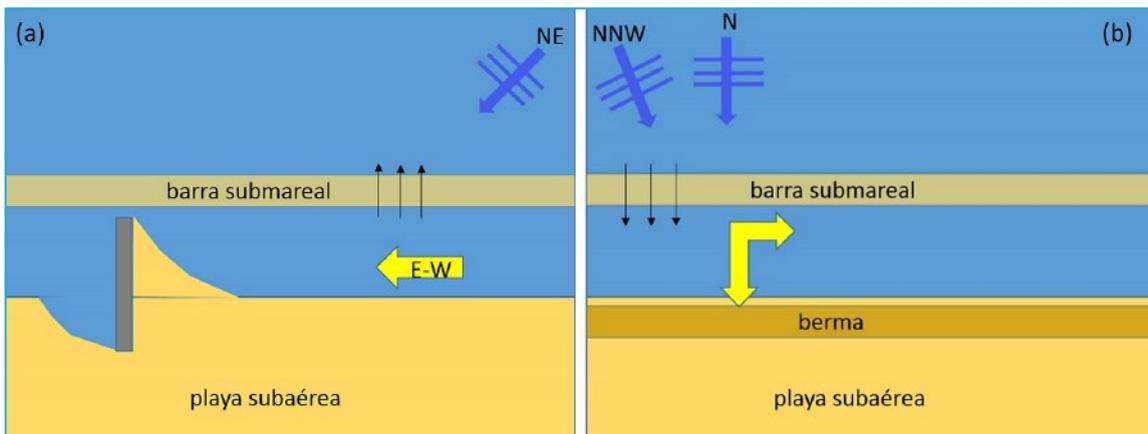


Figura 8. Diagrama ilustrando los principales cambios morfológicos observados durante (a) brisas y (b) Nortes en la playa de Sisal.

REFERENCIAS

- García de Fuentes, A., Xool Koh, M., Euán Ávila, J., Munguía Gil, A., y Cervera Montejano, M.D., 2011. La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico. Corredor Biológico Mesoamericano México Serie Conocimientos / Número 9, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Herrera-Silveira, J.A., Comín, F. A., y Luis Capurro. L., 2004. Los Usos Y Abusos De La Zona Costera En La Península De Yucatán. El Manejo Costero en México, Casos de Estudio (26) 387-396. Editor: Evelia Rivera Arriaga, EPOMEX, 654 p..
- Medellín, G.; Mariño-Tapia, I., and Euán-Ávila, J., 2015. The influence of a seawall on postnourishment evolution in a sea-breeze-dominated microtidal beach. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1449–1458.
- Meyer-Arendt, K.J., 2001. Recreational development and shoreline modification along the north coast of Yucatán, Mexico. *Tourism Geographies*, 3(1), 87–104.
- Tereszkiewicz, P.A., 2016. Comparison of permeable and impermeable groins along the Northern Yucatan Coast. University of West Florida, Master's thesis, 98p.

VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DEL NOROESTE DE YUCATÁN EN EL PERIODO 2004-2014

A.P. Ruiz-Beltrán^(a,c), R. Rioja-Nieto^(a,b)

^(a) Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera

^(b) Facultad de Ciencias, UNAM

^(c) Instituto de Ingeniería, UNAM

aruizb@iingen.unam.mx, rrioja@ciencias.unam.mx

RESUMEN

El mapeo de la línea de costa y la detección de sus cambios facilitan la planeación ambiental y la protección de la infraestructura costera. Los cambios detectados pueden ser analizados para conocer las zonas más vulnerables en la costa. Es sabido que la costa norte de la Península de Yucatán, es una región muy dinámica. Este estudio tiene como objetivo detectar y cuantificar los cambios espaciales a lo largo de la costa noroeste de la Península de Yucatán en un periodo de 10 años usando imágenes satelitales de la plataforma SPOT-5 y herramientas de SIG. Se observó acreción y erosión en toda el área de estudio, siendo la playa de Sisal el área con menor cambio.

Palabras clave: imágenes satelitales, cambio de línea de costa.

INTRODUCCIÓN

Las áreas costeras son muy dinámicas y complejas, con cambios que ocurren en distintas escalas de tiempo, que van desde segundos hasta millones de años [1]. La línea de costa es un elemento de la zona costera que se define como la frontera entre el agua y la tierra [2]. Los cambios de ésta se asocian a perturbaciones naturales como el viento, las olas, corrientes, tormentas, huracanes, etc. [3, 4] y antropogénicos como resultado de la construcción de infraestructura (ej. caminos, puertos, hoteles), el asentamiento

de comunidades humanas y las actividades socio-económicas asociadas.

La erosión de la línea de costa es considerada uno de los principales problemas costeros, ya que tiene dimensiones ecológicas, económicas y sociales. En la costa de Yucatán, esto es particularmente relevante. El transporte de sedimentos es modificado por las construcciones mal planeadas y la remoción excesiva de la vegetación de dunas, además de la pérdida de arena que se produce en lapsos muy cortos por Nortes y huracanes.[5].

Por lo antes mencionado, la protección de la línea de costa es importante para promover la conservación de su biodiversidad y resguardar los servicios y bienes ecosistémicos que brinda. El mapeo de la línea de costa, la detección de sus cambios y evaluación permite hacer un análisis, gestión y planificación ambiental para el uso sustentable de los recursos naturales y construcción de la infraestructura costera [4,6]. Esto es debido a que su detección permite construir indicadores de estado y seguimiento ambiental [7].

Distintas técnicas y métodos han sido utilizados para el mapeo de la línea de costa. Dentro de los sensores remotos, las fotografías aéreas han sido la fuente más usada para el mapeo de línea de costa [1,8]. Otros sensores remotos que han sido utilizados son radares de apertura sintética, LIDAR (*Light Detection and Ranging* en inglés) e imágenes de satélite [8]. Cada uno presenta sus respectivas ventajas y desventajas, y es posible combinar técnicas para así obtener una mayor precisión en este tipo de trabajos.

Diversos estudios han utilizado imágenes de satélite de forma satisfactoria para la detección del cambio de línea de costa [2,4,6,9]. Las ventajas del uso de imágenes satelitales para estos estudios reside en la cobertura espacial y temporal: gran cobertura espacial y la continua toma de datos desde años anteriores.

Estudios previos han observado y modelado la dinámica costera en la costa de Yucatán. Se ha observado que la variabilidad espaciotemporal de la costa es alta [10-13] y propicia para los procesos de erosión [14, 15].

El presente estudio tiene como objetivo la detección de zonas de erosión y acreción en la costa noroeste del estado de Yucatán en un periodo de 10 años utilizando imágenes satelitales.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está localizada en la costa noroeste de Yucatán en el municipio de Hunucmá. La zona de estudio tiene una longitud de 25.6 km a lo largo de línea de costa (Figura 1). La sección Este del área de estudio se encuentra localizada dentro de la Reserva ecológica “El Palmar”, mientras la oeste comprende desde Sisal hasta dos kilómetros antes de una laguna costera conocida como La Carbonera, dentro del área protegida estatal “Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán”. La única infraestructura costera que se encuentra en el área de estudio corresponde al puerto de Sisal, que tiene una escollera de longitud ~ 200 m.

MÉTODOS

Se utilizaron dos imágenes (multiespectral y su par pancromático) del satélite para la observación de la tierra 5 (SPOT-5, en francés “*Satellite Pour l’Observation de la Terre*”) de los años 2004 y 2014, para extraer la línea de costa. Las imágenes fueron proporcionadas por la Estación de Recepción México Nueva Generación a cargo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Las fechas de la toma de las imágenes corresponden al 3 de marzo de 2004 y el 10 de marzo de 2014, respectivamente. Aunque la marea fue distinta para cada uno de los momentos en que se tomaron las imágenes, 144.91 mm para 2004 y 12.98 mm para 2014[16], ésta no fue considerada dado que el cambio de la línea de costa es menor a la escala espacial que se maneja en el presente trabajo.

La imagen pancromática tiene una resolución espacial de 2.5 metros abarcando del 0.48 a los 0.71 μm , mientras la multiespectral cuenta con 4 bandas: verde (G, 0.50 - 0.59 μm), roja (R,

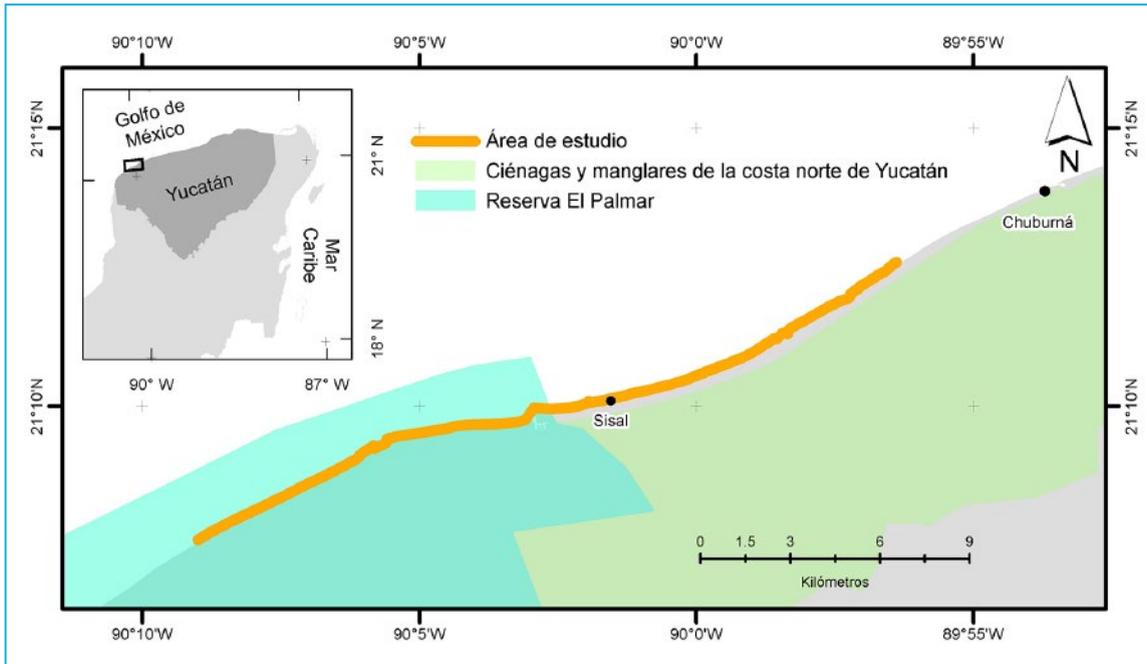


Figura 1. Área de estudio.

0.61 - 0.68 μm), infrarroja cercana (NIR, 0.78 - 0.89 μm) e infrarroja media (MIR, 1.58 - 1.75 μm). Cada una con una resolución espacial de 10 metros. La resolución radiométrica de todas las imágenes es de 8 bits.

Pre-procesamiento de las imágenes

Con el objetivo de incrementar la resolución espacial, manteniendo la fidelidad espectral, se hizo una fusión de imágenes multiespectrales con sus pares pancromáticos. El algoritmo utilizado para la fusión de los datos fue *Hyperspherical Color Space Resolution Merge* [17] utilizando la interpolación bilineal como método de re-muestreo. Este algoritmo fue utilizado ya que presenta mayor precisión con respecto a otros [18]. Las imágenes pancromática y multiespectral 2014 fueron co-registradas antes de hacer este proceso ya que hacía coincidir mejor los elementos geométricos de ambas. Se empleó la herramienta

IMAGINE AutoSync Workstation para realizar este proceso, teniendo como parámetros la georreferenciación con un modelo geométrico polinomial de tercer orden. Los procesos antes mencionados fueron realizados en el programa para sensores remotos Erdas IMAGINE 2015.

Para determinar el cambio en la línea de costa entre los años de estudio y que éste refleje variación real y no debida a diferencias en la alineación de las imágenes, se co-registró la imagen del año 2004 a la imagen fusionada 2014.

Extracción de la línea de costa y análisis de cambio

Para la extracción de la línea de costa se utilizó una metodología basada en el método desarrollado por Jesek y Liu en el año 2004 [19]. Este método detecta automáticamente la línea de costa utilizando únicamente una banda, integrando el algoritmo de canny para la detección

de bordes y métodos de detección del umbral adaptados localmente.

La banda verde fue empleada para la extracción de la línea de costa. Esta imagen tuvo que ser procesada previo al análisis aplicando un filtro de reducción de ruido y un filtro de convolución con la función de detección de bordes con un kernel de 7X7.

Las líneas extraídas se interpretaron visualmente para corroborar que fueran consistentes con lo observado en las imágenes satelitales. Para esto, la línea extraída se contrapuso con la imagen fusionada en RGB con la combinación MIR, NIR y G debido a que es la combinación más efectiva para la extracción de línea de costa [2,19]. Aquellas áreas que no fueron detectadas correctamente fueron eliminadas y corregidas manualmente, para que su error no influyera en los análisis posteriores. La imagen 2004 presentaba nubosidad y en esas zonas la línea de costa no pudo ser extraída.

Utilizando el complemento *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) 4.3.4730 del programa ArcGIS [21] se dividió el área de estudio

en 514 transectos con una distancia de 50 metros entre cada uno. Aquellos transectos que tenían una orientación diagonal fueron eliminados para que no interfirieran en una sobreestimación de los resultados. Se calculó el movimiento neto de costa (NSM, en inglés “*Net Shoreline Movement*”) el cual reporta la distancia del cambio de línea de costa entre los tiempos analizados. Si es erosión el valor será negativo y si es acreción el cambio será reportado positivo.

RESULTADOS

Se observaron cambios de la línea de costa a lo largo de toda la zona de estudio (Figura 2). El cambio observado varía entre los -79.5 y 28.3 m.

La mayor erosión se observó en la zona noroeste. Los cambios oscilaban entre los -79.52 y -40.71 metros. Esta zona se encuentra antes de la bocana de la lengüeta de la laguna de La Carbonera (figura 3).

La acreción mayor fue de 28.3 metros localizada al este de la escollera de Sisal, mientras del

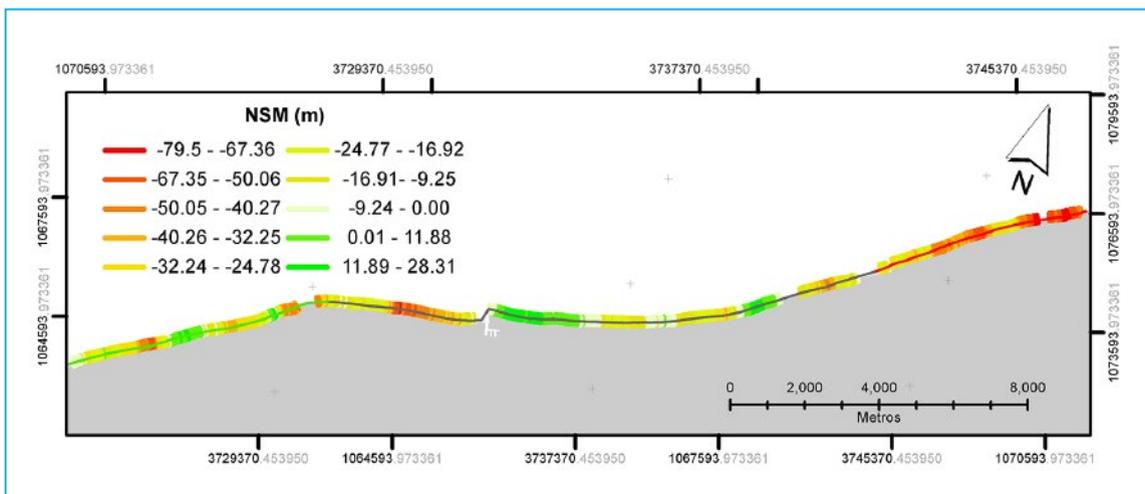


Figura 2. Movimiento neto de costa en metros.

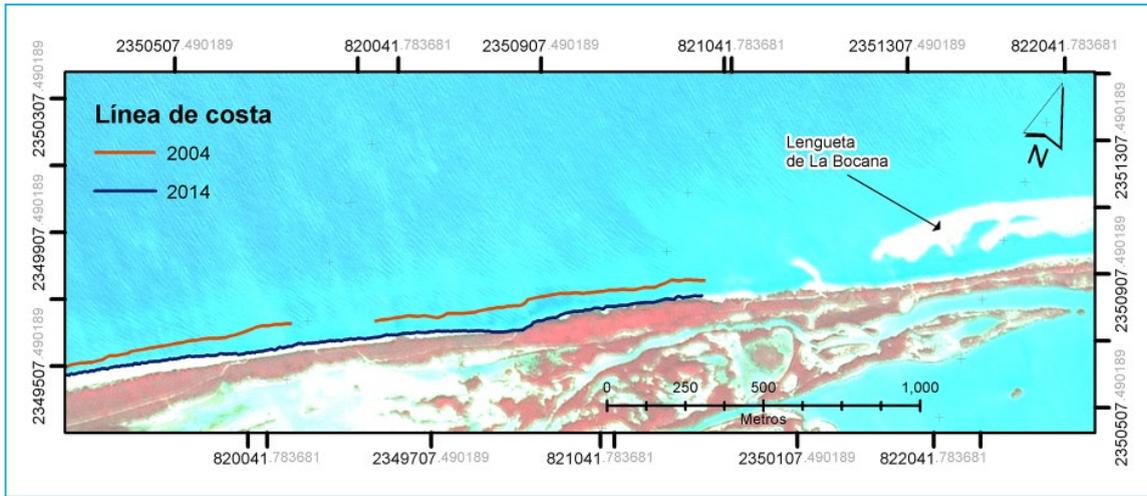


Figura 3. Zona en donde se observa el mayor cambio de erosión.

lado oeste, ~ 1 km de la escollera, se detectó la segunda zona con mayor erosión, con un intervalo de cambio entre -41.7 a -67.3 m (Figura 4).

La zona que presenta mayor estabilidad está localizada en el centro de la zona de estudio. Esta zona comprende la playa oeste de Sisal y el frente de playa de las antiguas granjas camaroneras (Figura 5). Los cambios en esta zona oscilaron entre -10 y 10 metros.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se determinó el cambio en la línea de costa observado en una década (periodo 2004-2014) mediante el uso de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica. Se observaron cambios en toda la línea de costa que pueden ser atribuidos a la combinación de diferentes factores como el oleaje, la orientación de la playa, tormentas e infraestructura costera.

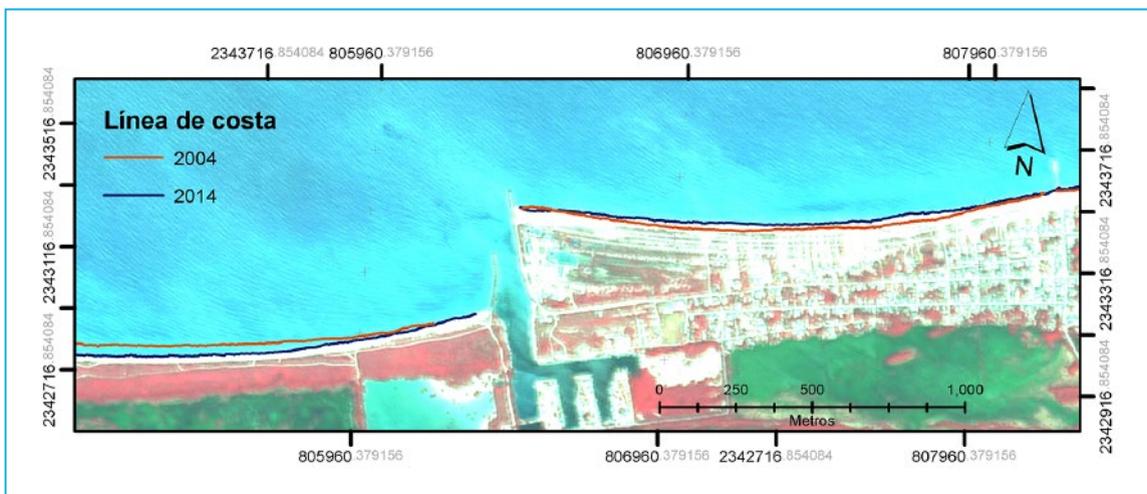


Figura 4. Zona con mayor acreción.

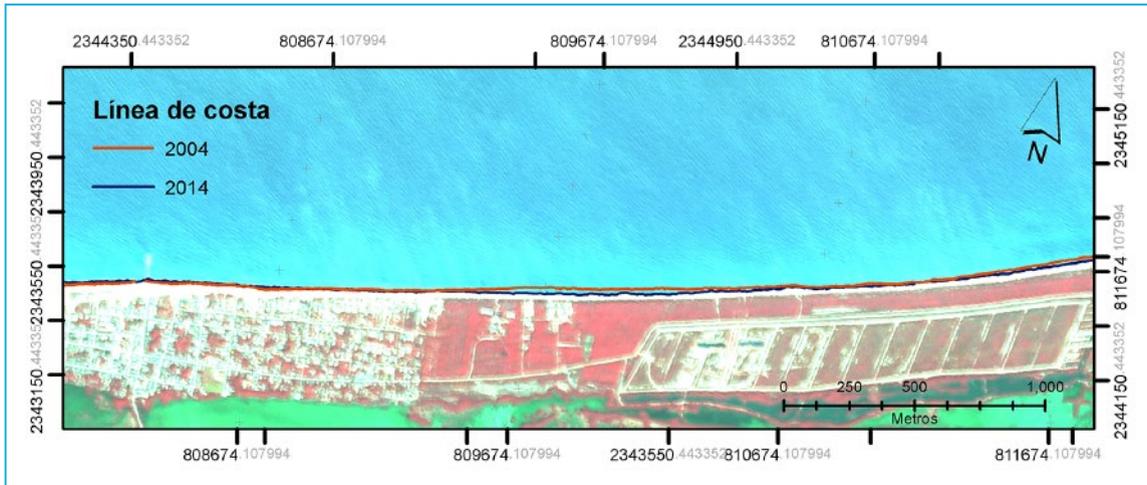


Figura 5. Zona de menor cambio.

Al comparar los resultados con un estudio previo donde se utilizó un modelo numérico de transporte de sedimentos para determinar zonas de erosión y acreción [14] se observa que la zona de mayor erosión coincide en ambos estudios mientras que las zonas de estabilidad lo hacen de manera parcial. La alta erosión en esta zona puede estar relacionada, entre otros factores, a la orientación de la playa y la lengua y cordones litorales que existen a la entrada de una laguna costera conocida como La Carbonera, la cual ha crecido aproximadamente 1 km en el periodo analizado. Esta formación podría estar reteniendo sedimento, ya que el transporte predominante de sedimentos es hacia el oeste [14], creando un efecto similar al que se observa en la escollera.

El área del pueblo de Sisal e instalaciones de granjas camaroneras, presenta la zona de mayor estabilidad, lo cual ha sido modelado anteriormente [14]. Sin embargo, en la zona de la escollera de Sisal se presenta la zona de mayor acreción y la segunda de mayor erosión. La zona de mayor acreción se observa al este de la escollera

y la de mayor erosión al Oeste. Estudios anteriores determinan la zona este de la escollera con una tendencia de acreción [11, 13].

El uso de imágenes satelitales es adecuado para detectar cambios en la línea de costa. Es necesario considerar que el cambio de 2014 con respecto a 2004 en la costa Noroeste de Yucatán sólo considera dos fechas, por lo que es importante realizar un análisis con una mayor resolución temporal para caracterizar la dinámica costera de la región.

La metodología empleada en el presente estudio es útil para analizar variaciones espacio-temporales de la línea de costa y por lo tanto caracterizar su resiliencia. Para detectar cambios a largo plazo del nivel medio del mar, pueden emplearse imágenes satelitales de alta resolución espacial, fotografías aéreas históricas y más recientemente, imágenes obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados. Estas últimas tienen una alta resolución espacial (en el orden de cms) con periodos muy frecuentes de revisita (horas a días), lo que permite hacer seguimiento puntual de los procesos que ocurren en la costa

incluyendo el efecto de perturbaciones como tormentas y huracanes. La ventaja de la metodología utilizada en este estudio radica en que puede ser empleada con imágenes de distinta resolución espectral y espacial, siempre y cuando el error no sea mayor al cambio detectado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros por el préstamo de sus instalaciones para la realización de este proyecto. Así mismo mostramos nuestra sincera gratitud a Gabriela Medellín-Mayoral, por el tiempo que nos brindó para el mejor entendimiento de la dinámica costera, y a Alejandro Astorga-Moar por su apoyo en la programación.

REFERENCIAS

- [1] L. J. Moore, "Shoreline mapping techniques," *J. Coast. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 111–124, 2000.
- [2] X. Li and M. C. J. Damen, "Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the Pearl River Estuary, China," *J. Mar. Syst.*, vol. 82, pp. S54–S61, Aug. 2010.
- [3] B. Graizbord, R. P. Grayeb, and V. M. Mondragón, "Diagnóstico actual de la zona costera del Golfo de México," in *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México*, 2009, p. 484.
- [4] K. Callaghan, J. Engelbrecht, and J. Kemp, "The Use of Landsat and Aerial Photography for the Assessment of Coastal Erosion and Erosion Susceptibility in False Bay, South Africa," vol. 4, no. 2, pp. 65–79, 2015.
- [5] A. García de Fuentes, M. Xool, J. I. Euán, A. Munguía, and M. D. Cervera, *La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico*. 2011.
- [6] K. Di, R. Ma, J. Wang, and R. Li, "Coastal Mapping and Change Detection Using High-Resolution IKONOS Satellite Imagery," *Engineering*, vol. 130, pp. 343–346, 2003.
- [7] J. Ojeda Zújar, M. D. P. Díaz Cuevas, A. Prieto Campos, and J. I. Álvarez Francoso, "Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza," *Investig. Geográficas*, vol. 60, pp. 37–52, 2013.
- [8] R. Gens, "Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 31, no. 7, pp. 1819–1836, 2010.
- [9] M. Bouchahma, W. Yan, and M. Ouassar, "Island Coastline Change Detection Based on Image Processing and Remote Sensing," *Comput. Inf. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 27–36, 2012.
- [10] A. Cuevas-Jiménez and J. Euán-Ávila, "Morfodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán," *Ciencias Mar.*, vol. 35, no. 3, pp. 307–320, 2009.
- [11] P. Espadas-Sánchez, E. T. Mendoza-Ponce, and E. Ojeda-Casillas, "Coastline dynamics in a dissipative beach (Sisal, Yucatan)," in *3rd Young Coastal Scientist and Engineers Conference - Americas*, 2016.

- [12] M. A. Lira-Pantoja, A. Torres-Freyermuth, C. M. Appendini, D. Fernández, P. Salles, E. T. Mendoza, J. López, and A. Pedrozo-Acuña, "Chronic Beach Erosion Induced By Coastal Structures in Chelem, Yucatán," *Coast. Eng.*, pp. 1-10, 2012.
- [13] P. E. Reyes-Cabañas, "Dimensionamiento de un sistema de bypass de arena en el puerto de Sisal, Yucatán," Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [14] Appendini, "Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula," *J. Coast. Res.*, pp. 1404-1417, 2012.
- [15] A. Cuevas Jiménez, J. I. Euán Ávila, M. M. Villatoro Lacouture, and R. Silva Casarín, "Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast," *Coast. Manag.*, vol. 44, no. 4, 2016.
- [16] J. I. Gonzalez, "Predicción de Mareas de México." 2011.
- [17] C. Padwick, P. Scientist, M. Deskevich, F. Pacifici, and S. Smallwood, "WorldView-2 pan-sharpening," in *Asprs 2010*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 26-30.
- [18] A. P. Ruiz-Beltrán and R. Rioja-Nieto, "Multi-sensor Data Fusion for Remote Sensing of Coastal Change Detection," in *3rd Young Coastal Scientist and Engineers Conference - Americas*, 2016.
- [19] H. Liu and K. C. Jezek, "Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 5, pp. 937-958, 2004.
- [20] G. P. Petropoulos, D. P. Kalivas, H. M. Griffiths, and P. P. Dimou, "Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 35, pp. 217-228, Mar. 2015.
- [21] R. E. Thieler, E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi, and A. Ergul, "The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change." 2009.

CICLONES TROPICALES Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

**Christian M. Appendini^{1,2,3}, Brenda Olivares López⁴,
Citlaly Cauich Poot⁴, Rafael Meza-Padilla^{1,2}**

¹ *Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Yucatán 97356, México*

² *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, DF 04510, México*

³ *Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera*

⁴ *Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México, C.P. 56230*

RESUMEN

Los ciclones tropicales son una amenaza presente cada año en México y la creciente densidad poblacional, la modificación a la zona costera y el desarrollo de infraestructura incrementa la vulnerabilidad de esta zona ante ciclones tropicales. El cambio climático global modifica la incidencia de estos fenómenos meteorológicos extremos y como consecuencia se observa un posible aumento del riesgo de daños por ciclones tropicales en México. En particular la Península de Yucatán es la zona del país que más ha sufrido el embate de huracanes de categoría mayor, con lo cual en este trabajo se analiza el efecto del cambio climático sobre el clima futuro de ciclones tropicales que inciden sobre la península. El estudio se basa en ciclones tropicales sintéticos generados a partir de la física de estos eventos con la ayuda de modelos atmosféricos (re-análisis y Modelos de Circulación General). Se presenta una evaluación de los eventos sintéticos en base a su reproducción de los eventos históricos, así como la evaluación de los Modelos de Circulación General para representar adecuadamente el clima actual de ciclones tropicales. Se seleccionaron los eventos sintéticos generados a partir del modelo del Max Plank Institute MPI-ESM-MR para evaluar los cambios esperados en el clima de ciclones tropicales bajo el escenario de cambio climático de RCP 8.5. El estudio demuestra que la Península de Yucatán será más susceptible a recibir el embate de ciclones tropicales en el clima futuro, lo cual aunado con el aumento de población/ infraestructura y un inadecuado Ordenamiento Territorial en la zona costera, llevará a un aumento del riesgo ante ciclones tropicales. Así, es imprescindible planear el desarrollo costero considerando estos factores, a fin de aumentar la resiliencia ante un clima cambiante.

Palabras clave: Ciclones tropicales, Huracanes, Cambio climático, Vulnerabilidad, Peligro, Yucatán

INTRODUCCIÓN

Los eventos hidro-meteorológicos que generan mayores pérdidas económicas y humanas en regiones tropicales son los ciclones tropicales. Por su ubicación geográfica, México es vulnerable a eventos generados tanto en el Pacífico Nororiental como en el Atlántico Norte, lo cual ha sucedido de manera simultánea en 2013 con los ciclones tropicales Ingrid y Manuel¹. Si bien una de las zonas de mayor actividad mundial de ciclones tropicales se ubica al sur de la Península de Baja California, la Península de Yucatán es la que ha sufrido la entrada a tierra de los eventos más intensos². La repercusión económica de los ciclones tropicales en la Península de Yucatán ha sido considerable, además de los impactos sociales y ambientales. Por ejemplo, el huracán Wilma (2005) generó pérdidas en ingresos por el sector turismo en un estimado de 1,000 millones de dólares, además de un gasto de 50 millones de dólares para la regeneración de playas³.

Si se considera la exposición de México, en particular la Península de Yucatán, ante ciclones tropicales y la ineficiente aplicación de los planes de Ordenamiento Territorial ante el crecimiento demográfico en las zonas costeras, existe un aumento considerable de la vulnerabilidad costera. Lo anterior considerando que la climatología de ciclones tropicales se mantendrá constante y que solo por factores antropogénicos se esperaría un aumento en el riesgo de pérdidas económicas, humanas y daños ambientales. Sin embargo, no es posible afirmar que dicha climatología se mantendrá constante debido al incremento paulatino de gases de efecto invernadero en las últimas décadas⁴, que impacta en la temperatura del océano y los patrones de circulación global, y por ende la ciclogénesis y el desarrollo de los ciclones tropicales.

Existen varios estudios que analizan el efecto del calentamiento global sobre los ciclones tropicales, que si bien no detectan un incremento en el número anual de eventos, sí identifican un incremento en la frecuencia y/o intensidad de los eventos de categoría mayor⁵⁻⁸. Debido a la exposición de la Península de Yucatán a eventos de categoría mayor y al aumento en la vulnerabilidad de la zona, dichas conclusiones indican la posibilidad de un aumento considerable del riesgo de pérdidas económicas y de vidas humanas. De esta manera, es importante realizar una evaluación del efecto que puede tener el calentamiento global sobre la incidencia de ciclones tropicales en México. Si bien este compendio se enfoca sobre la localidad de Sisal, la información que se pudiera generar en relación a ciclones tropicales presentaría una alta incertidumbre por la baja frecuencia de eventos en la costa noroeste de Yucatán. Por lo tanto, este trabajo se enfoca sobre la Península de Yucatán, lo cual permite dar un panorama general de los posibles cambios en el clima de ciclones tropicales por efecto del cambio climático.

MÉTODO

El uso de eventos históricos para caracterizar ciclones tropicales presenta dos desventajas en este trabajo. Por un lado, no es posible caracterizar un clima futuro con base a eventos históricos; por otro lado, existe un número muy limitado de eventos históricos para hacer una caracterización climatológica robusta. El número de eventos históricos es incluso más limitado si se considera que la información de éstos es confiable solamente a partir del uso de información satelital, es decir, a partir de los años setentas. Tomando así solo en cuenta el periodo de 1970 a 2010, en México solamente han entrado 171

eventos, de los cuales 51 se han presentado en la vertiente del Golfo de México y Caribe mexicano, y solamente 23 en la Península de Yucatán. De esta manera, es necesario utilizar otro tipo de información para caracterizar del clima de ciclones tropicales, tanto en el clima actual como futuro.

Si bien los Modelos de Circulación General (MCG) pueden ser utilizados para caracterizar el clima futuro de ciclones tropicales, estos modelos también presentan desventajas. En primer lugar, al igual que en los re-análisis atmosféricos, los MCG subestiman las velocidades de vientos máximas⁹⁻¹¹; en segundo lugar, la actividad de ciclones tropicales es subestimada¹² y por tanto no se cuenta con un número suficiente de eventos para realizar estadísticas robustas, al igual que en el caso de eventos históricos. De esta manera, Emanuel *et al.*¹³ desarrollan una metodología para la generación de ciclones tropicales sintéticos y Emanuel *et al.*¹⁴ la expanden para generar eventos bajo escenarios de cambio climático. Con la generación de ciclones tropicales sintéticos, es posible contar con una gran cantidad de eventos que permitan realizar estadísticas robustas de ciclones tropicales. Dichos eventos han sido utilizados de manera exitosa para caracterizar ciclones tropicales en zonas específicas¹³, periodos de retorno de intensidad de viento¹⁵, marea de tormenta asociada a ciclones tropicales¹⁶⁻¹⁸, estimación de periodos de retorno de oleaje¹⁹, para el desarrollo de sistemas de pronóstico²⁰, así como la estimación del efecto del cambio climático sobre el clima de ciclones tropicales^{5,14}, mareas de tormenta²¹ y oleaje²².

Para poder realizar estadísticas robustas de ciclones tropicales, tanto para el clima actual como el clima futuro, en este trabajo se utilizan eventos sintéticos siguiendo la metodología

propuesta por Emanuel *et al.*^{13,14}. La generación de eventos sintéticos se basa en un modelo de advección y series temporales de intensidad del viento, con lo cual los ciclones tropicales sintéticos que siguen la distribución mensual, varianza y covarianza de los datos diarios obtenidos del re-análisis del NCEP/NCAR²³ para el clima actual, y de los datos de MCG. Para generar los eventos, se siembran de manera aleatoria vórtices con núcleos cálidos y picos de velocidad de viento de 25 nudos, los cuales pueden disiparse o mantenerse y convertirse en ciclón tropical sintético hasta su disipación. De esta manera, los eventos sintéticos están conformados por información de trayectorias e intensidad asociada a cada punto durante la vida del ciclón tropical.

En este trabajo, se utilizaron los MCG del Coupled Model Intercomparison Project Fase 5 (CMIP5) tanto para el clima actual (para evaluar la precisión de los modelos) como bajo el escenario Trayectorias de Concentración Representativas 8.5 (RCP 8.5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) basado en el trabajo de Moss *et al.*²⁴. La razón por la cual no se utilizaron otros escenarios de menor RCP se debe a que al día de hoy, las mediciones de gases de efecto invernadero siguen la tendencia de las proyecciones del RCP 8.5²⁵, con lo cual no es de esperarse que en un futuro existan menores emisiones. Los eventos sintéticos derivados de los MCG utilizaron la información de los siguientes modelos para su generación: 1) National Oceanic and Atmospheric Administration / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA/GFDL) Climate Model 3 (CM3)²⁶, denominado como GFDL en este trabajo; 2) UK Met Office Hadley Global Environmental Model 2 – Earth System (HADGEM2-ES)²⁷, denominado HADGEM; 3) Institut Pierre Simon Laplace CM5A-LR²⁸,

denominado IPSL; 4) Center for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Model for Interdisciplinary Research on Climate 5 (MIROC5)²⁹, denominado MIROC; y 5) Max Plank Institute MPI-ESM-MR³⁰, denominado MPI. Los eventos sintéticos generados con el clima actual, tanto aquellos con base al re-análisis del National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP) como aquellos con base a los MCG, utilizaron el periodo entre 1980 y 2010, mientras que los eventos del clima futuro utilizaron el periodo de 2010 a 2100. Para mayor información sobre los eventos sintéticos se pueden consultar los trabajos de Emanuel^{5,31} y Emanuel *et al.*^{13,14}.

Para poder determinar el efecto del cambio climático sobre los ciclones tropicales en la zona de estudio, es necesario utilizar las proyecciones de ciclones tropicales sintéticos derivados de los MCG. Sin embargo, dichos modelos presentan sesgos que pueden afectar la generación y desplazamiento de los eventos sintéticos. De esta manera, es necesario evaluar los eventos

sintéticos generados por los MCG en comparación con los eventos generados con el re-análisis NCEP. Asimismo, los eventos generados con base al NCEP, deben ser contrastados con los eventos históricos. Si bien dicha comparación no es posible a nivel regional debido a la poca información histórica, es posible realizar una comparación a nivel cuenca o a nivel país, considerando ambas zonas de ciclogénesis (i.e. Pacífico Nororiental y Atlántico Norte). A continuación se presenta la caracterización del clima actual y climas futuros con base a los eventos sintéticos derivados de los modelos descritos anteriormente. El periodo comprendido para los eventos del clima actual es de 1980 al 2010, y para el clima futuro es del 2010 al 2100. La tabla 1 muestra el número de eventos utilizados por base de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Evaluación de eventos sintéticos para el clima actual

Si bien los eventos sintéticos se basan en la física de los ciclones tropicales, surge la duda de si éstos representan correctamente las estadísticas

Tabla 1. Número de eventos históricos y sintéticos por base de datos, utilizados en este estudio.

Periodo/ Modelo	Eventos en Pacífico Nororiental y Atlántico Norte		Eventos sobre la Península de Yucatán	
	Clima Actual	Clima Futuro	Clima Actual	Clima Futuro
HURDAT	826		32	
NCEP	2040		204	
GFDL	5270	5700	252	367
IPSL	5270	5700	223	266
HADGEM	5270	5640	49	38
MIROC	5270	5700	143	210
MPI	5270	5740	945	727

climatológicas de ciclones tropicales. Debido a la poca información de eventos históricos, no es posible corroborar la precisión de eventos sintéticos para representar el clima de ciclones tropicales en una zona en particular. Sin embargo, a nivel de cuenca sí existe una mayor información de eventos históricos, con lo cual se esperaría que los eventos sintéticos generados con base al re-análisis NCEP presenten estadísticas similares a los eventos históricos. De esta manera, se presenta una comparación entre los eventos históricos y los eventos sintéticos derivados del NCEP.

Por otro lado, los MCG no incluyen asimilación de datos como ocurre en los re-análisis atmosféricos (en este caso NCEP), con lo cual los MCG pueden presentar sesgos que serán

reflejados en los eventos sintéticos generados a partir de dichos modelos. De esta manera, se presentan las estadísticas de los eventos obtenidos a partir de los MCG a fin de contrastarlos con los derivados del NCEP y poder observar sesgos de los MCG. Esta evaluación es necesaria a fin de no obtener conclusiones erróneas al evaluar el clima de ciclones tropicales bajo calentamiento global, ya que las tendencias pueden deberse al sesgo de los MCG y no al efecto del cambio climático.

Uno de los factores determinantes de la climatología de ciclones tropicales es la zona de ciclogénesis. En la Figura 1 se presentan las localidades de ciclogénesis tanto para los eventos históricos (HURDAT) como de los eventos

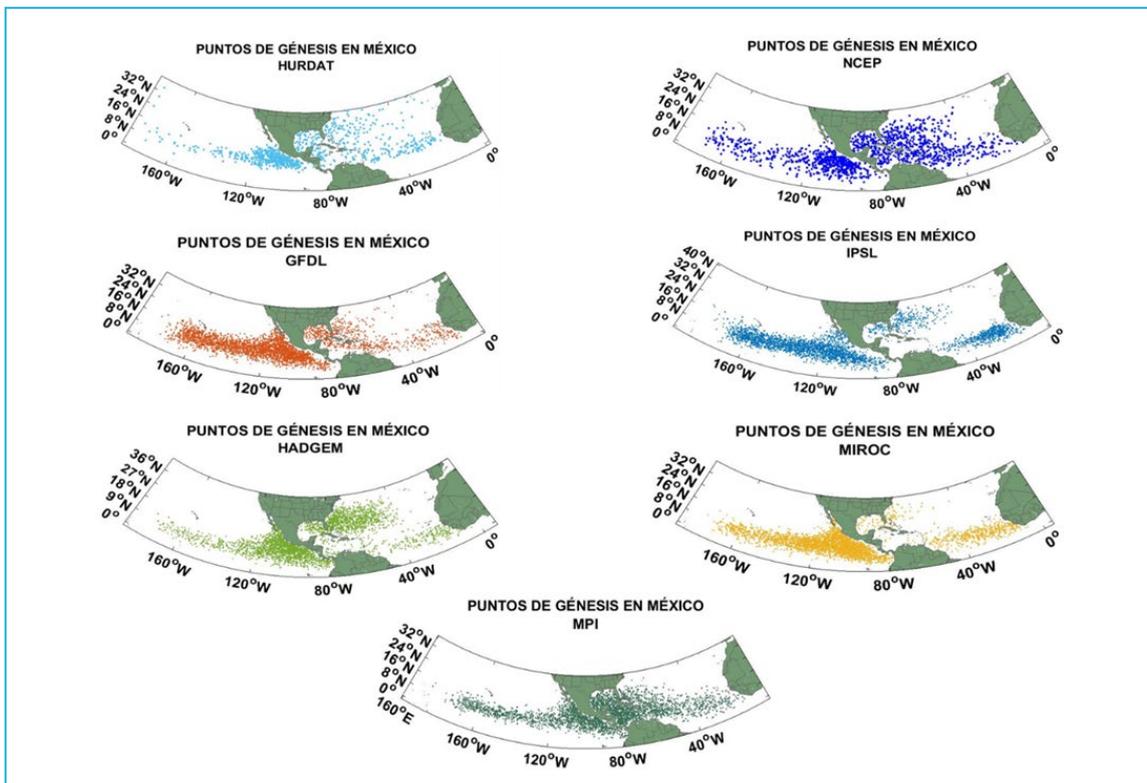


Figura 1. Puntos de ciclogénesis en el Pacífico Nororiental y Atlántico Norte obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos.

sintéticos. Si bien solamente existen 826 eventos históricos, en comparación con más de 2000 eventos sintéticos, se puede observar que las zonas de ciclogénesis del HURDAT son similares al NCEP. En cuanto a los MCG, que son más de 5000 eventos por base de datos, se observa que existen diferencias significativas al comparar con el NCEP. Debido al interés de este trabajo,

se describirán estas diferencias solamente para los eventos generados en la zona del Atlántico Norte. Tanto el modelo IPSL como el MIROC concentran las zonas de ciclogénesis en el noroeste del Atlántico, con casi ningún evento generado en el Mar Caribe (MC) y muy pocos en el Golfo de México (GoM), siendo aún menor en el caso del IPSL. Por otro lado los modelos GFDL y HADGEM presentan una mayor distribución de las zonas de ciclogénesis, sin embargo el HADGEM presenta una mayor concentración en la zona de Florida y hacia el norte, y el GFDL subestima en la zona sur del GoM y el MC. Por otro lado, el MPI sí presenta una distribución similar al NCEP, en particular en el GoM y MC que es donde se originan la mayoría de los eventos que inciden en México y la Península de Yucatán.

En la figura 2 se muestra la densidad de ciclones tropicales con base a sus trayectorias. Al igual que en las zonas de ciclogénesis, se puede observar que el NCEP reproduce correctamente los eventos históricos, aunque con una mayor densidad ya que el número de eventos es mayor. Por otro lado, nuevamente el modelo MPI representa mejor los eventos del NCEP, lo cual es de esperarse puesto que las zonas de génesis son importantes para el desplazamiento de los eventos.

En la figura 3 se presentan los histogramas de vientos máximos

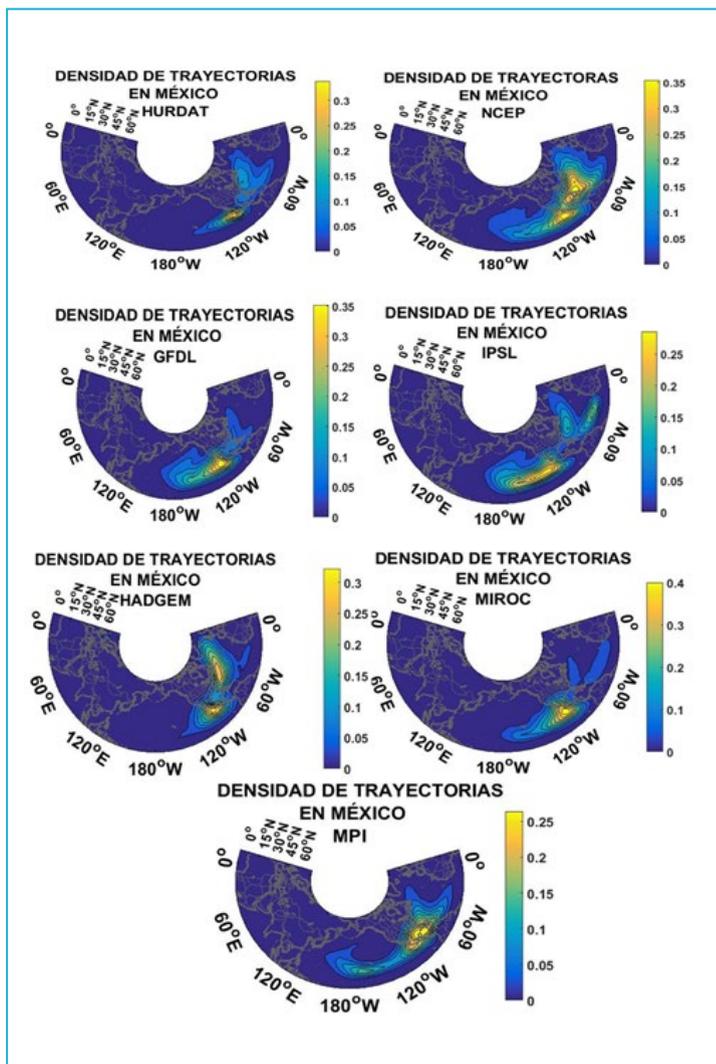


Figura 2. Densidad de trayectorias de ciclones tropicales en el Pacífico Nororiental y Atlántico Norte obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos.

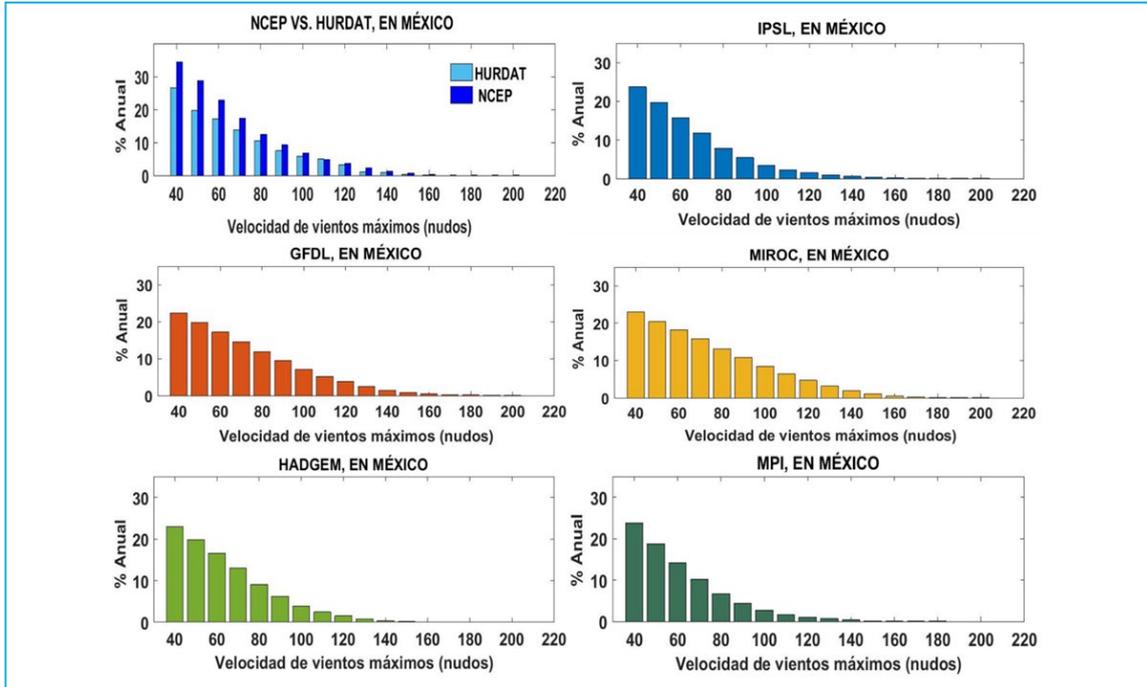


Figura 3. Histogramas de intensidad de viento obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos presentes en el Pacífico Nororiental y el Atlántico Norte.

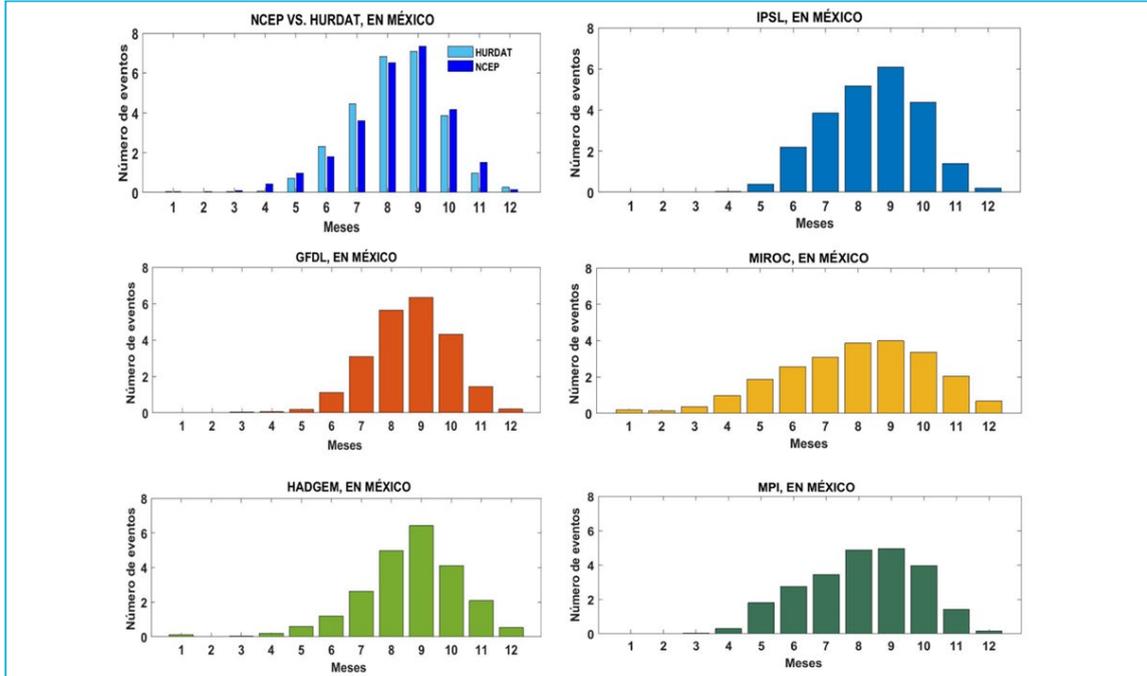


Figura 4. Histogramas de mes de ocurrencia de ciclones tropicales obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos presentes en el Pacífico Nororiental y el Atlántico Norte.

obtenidos por los eventos históricos y sintéticos. Se puede observar que el NCEP reproduce adecuadamente los eventos históricos, sin embargo, todos los MCG subestiman las velocidades máximas menos intensas. Considerando que los eventos menos intensos representan menos riesgo para la zona de entrada a tierra, entonces dicha subestimación no es tan relevante. Por otro lado, los modelos GFDL y MIROC sobrestiman las velocidades máximas a partir de 90 nudos (167 km/h).

En relación al mes en que se presentan los eventos, la figura 4 muestra la distribución de eventos, donde el NCEP representa

correctamente los eventos históricos. En cuanto a los MCG, todos los modelos presentan adecuadamente la relación de ocurrencia entre meses (i.e mayor ocurrencia en septiembre), sin embargo, el MIROC no tiene una buena representación de la distribución y el HADGEM subestima en la temporada de invierno. Por otro lado, el modelo GFDL presenta la distribución más parecida al NCEP, seguido de IPSL y el MPI.

De lo anterior, se puede concluir que los eventos sintéticos reproducen adecuadamente los eventos históricos, con lo cual pueden ser utilizados para evaluar el clima de ciclones tropicales. Esto es particularmente relevante para

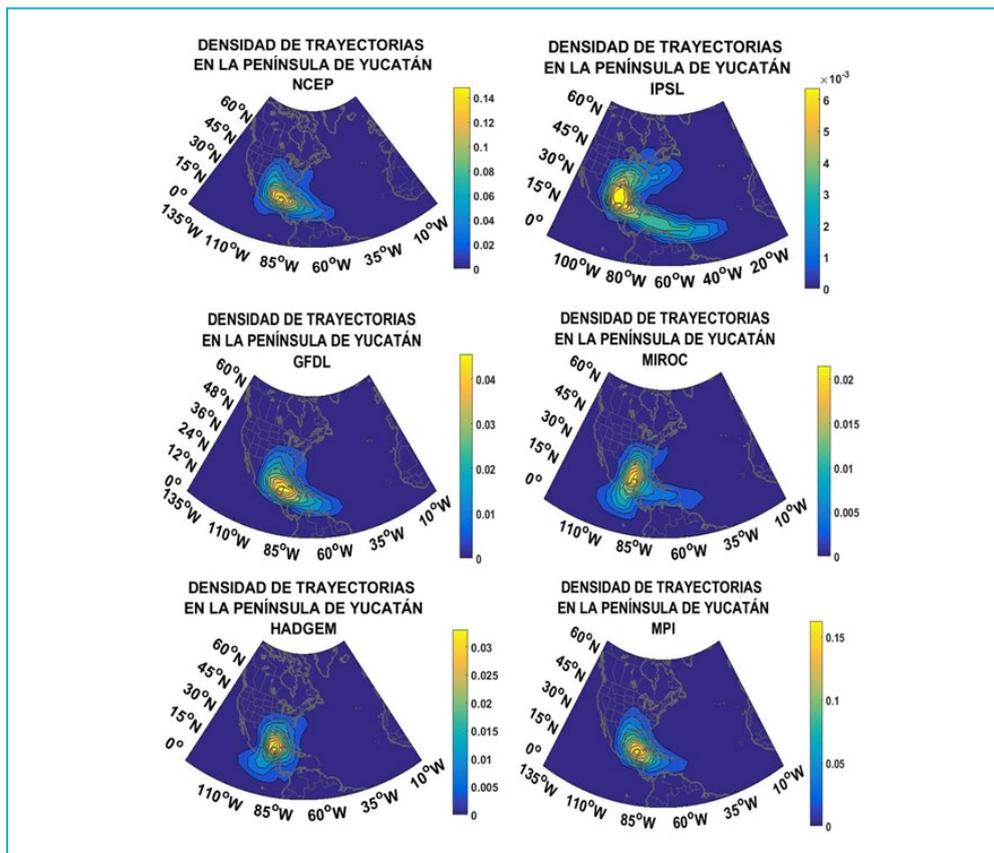


Figura 5. Densidad de trayectorias de ciclones tropicales que afectan la Península de Yucatán, obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos.

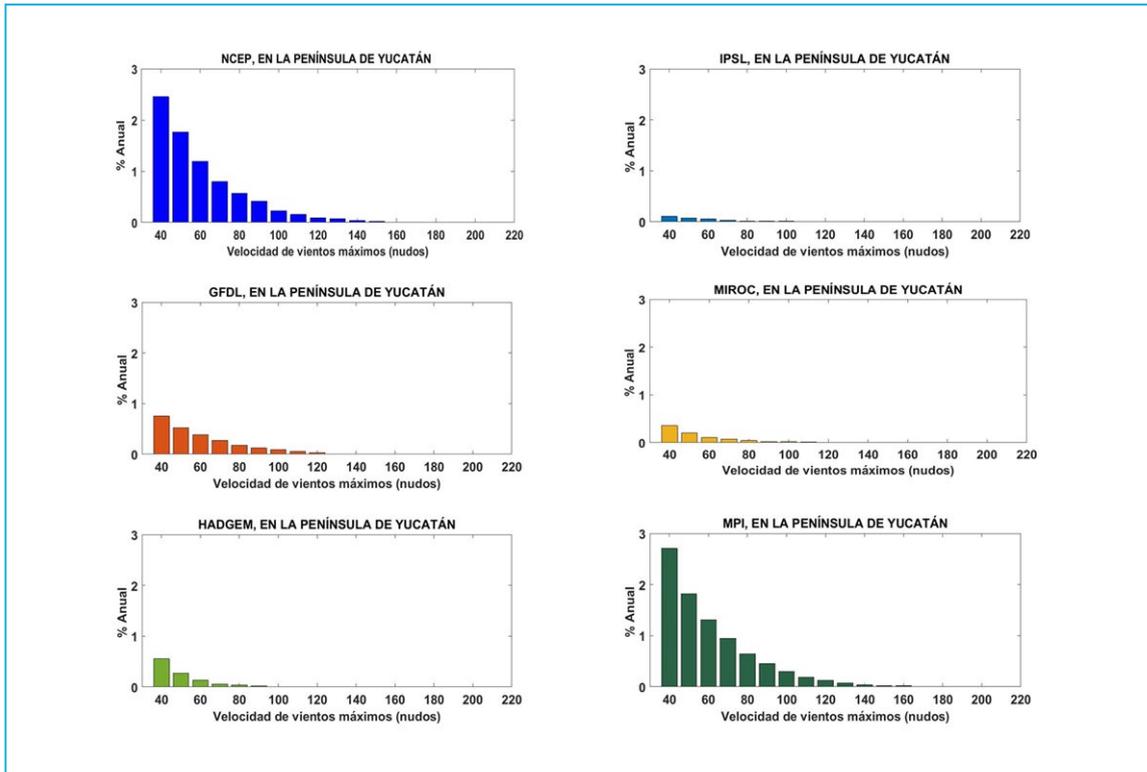


Figura 6. Histogramas de intensidad de vientos máxima de ciclones tropicales que afectan la Península de Yucatán, obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos.

evaluar zonas específicas donde los eventos históricos no son suficientes, como podría ser el caso de la Península de Yucatán. Por otro lado, los MCG no siempre reproducen adecuadamente los eventos generados por el NCEP. En particular el modelo IPSL tiene una muy buena reproducción de las zonas de génesis y las trayectorias, con lo cual es el modelo adecuado para evaluar el efecto del calentamiento global sobre ciclones tropicales en la zona de estudio.

Para evaluar los MCG en la Península de Yucatán, se pueden comparar los eventos sintéticos del clima actual obtenidos con los MCG, buscando una representación similar al NCEP. En relación a las trayectorias de los eventos sintéticos (figura 5) el modelo MPI es el que mejor

representa al NCEP, al igual que la distribución de vientos máximos (figura 6) y la distribución de ocurrencias mensuales (figura 7). De lo anterior se puede concluir que el modelo MPI es el que tiene la mejor representación del clima actual de ciclones tropicales para la Península de Yucatán y por lo tanto es el modelo que presenta menor sesgo y por tanto menor incertidumbre.

Evaluación del efecto del calentamiento global sobre ciclones tropicales en la Península de Yucatán

Con base al análisis anterior, los eventos sintéticos derivados de los MCG no siempre tienen una buena representación del clima actual de ciclones tropicales, tomando como base los eventos

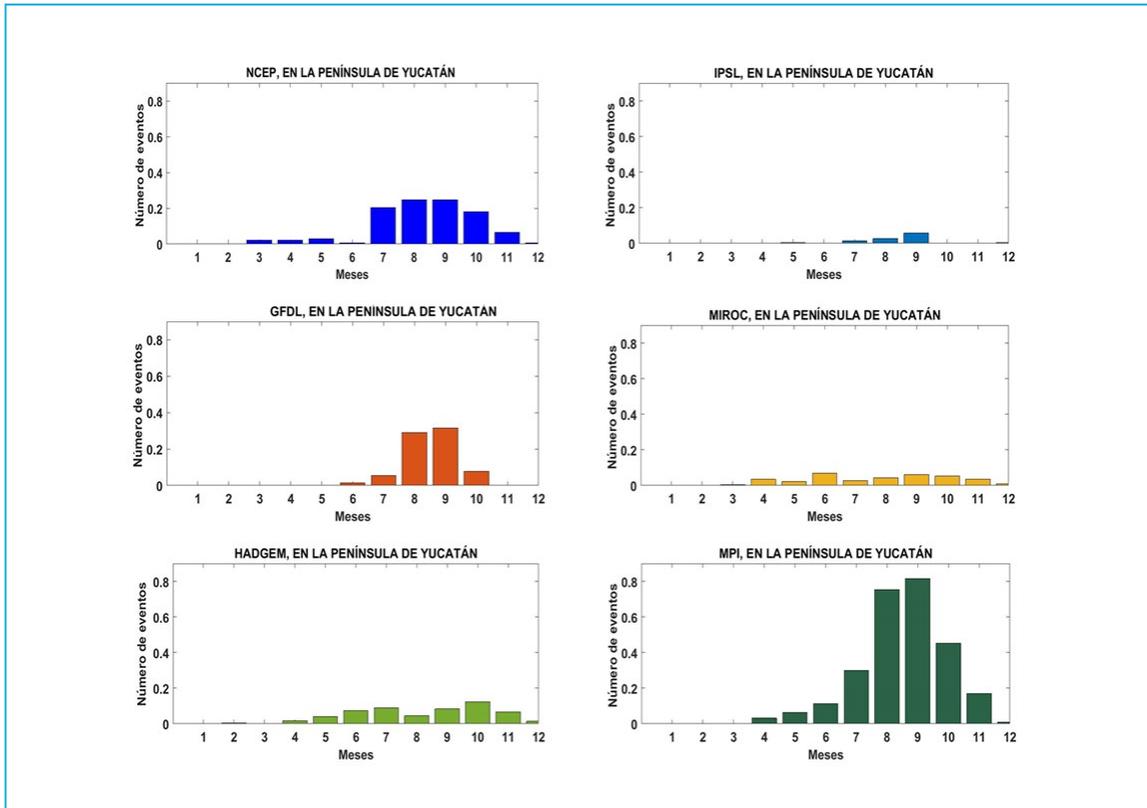


Figura 7. Histogramas del mes de ocurrencia de ciclones tropicales que afectan la Península de Yucatan, obtenidos a partir de eventos históricos y sintéticos.

del NCEP. Sin embargo, el modelo MPI presenta una buena reproducción del clima de ciclones tropicales, tanto para el Golfo de México y Mar Caribe, como para la Península de Yucatán. Con lo cual se seleccionó este modelo para caracterizar el efecto del calentamiento global sobre el clima de ciclones tropicales en la Península de Yucatán.

En la figura 8 se muestra la densidad de génesis de los eventos que inciden sobre la Península de Yucatán, así como la densidad de dichos eventos con base a sus trayectorias, en ambos casos tanto para el clima actual como para el clima futuro. En relación a la zona de génesis, se puede observar que en el clima actual

se presenta la mayor densidad de génesis en el Mar Caribe oeste, frente a las costas de Quintana Roo y Belice, mientras que para el clima futuro hay un desplazamiento de las zonas de génesis hacia la parte noreste de la Península de Yucatán y la costa norte de Yucatán. A pesar de que la densidad de las trayectorias se muestra relativamente similar en el clima actual y futuro, se puede concluir con base a las zonas de génesis que la Península de Yucatán estará más expuesta a ciclones tropicales bajo el escenario de RCP 8.5.

La figura 9 muestra el histograma de vientos máximos y de mes de ocurrencia para los eventos que inciden en la Península de Yucatán, para el clima actual y futuro. Se puede observar

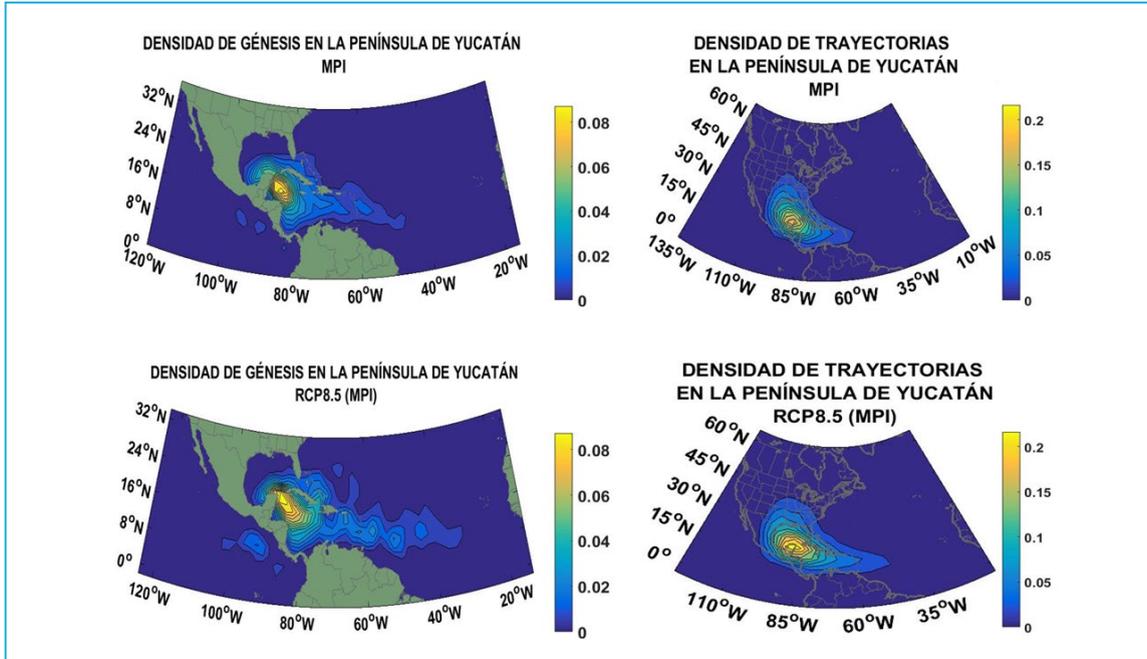


Figura 8. Densidad de génesis (izquierda) y densidad de trayectorias (derecha) para el clima actual (arriba) y el clima futuro (abajo) con base al modelo MPI.

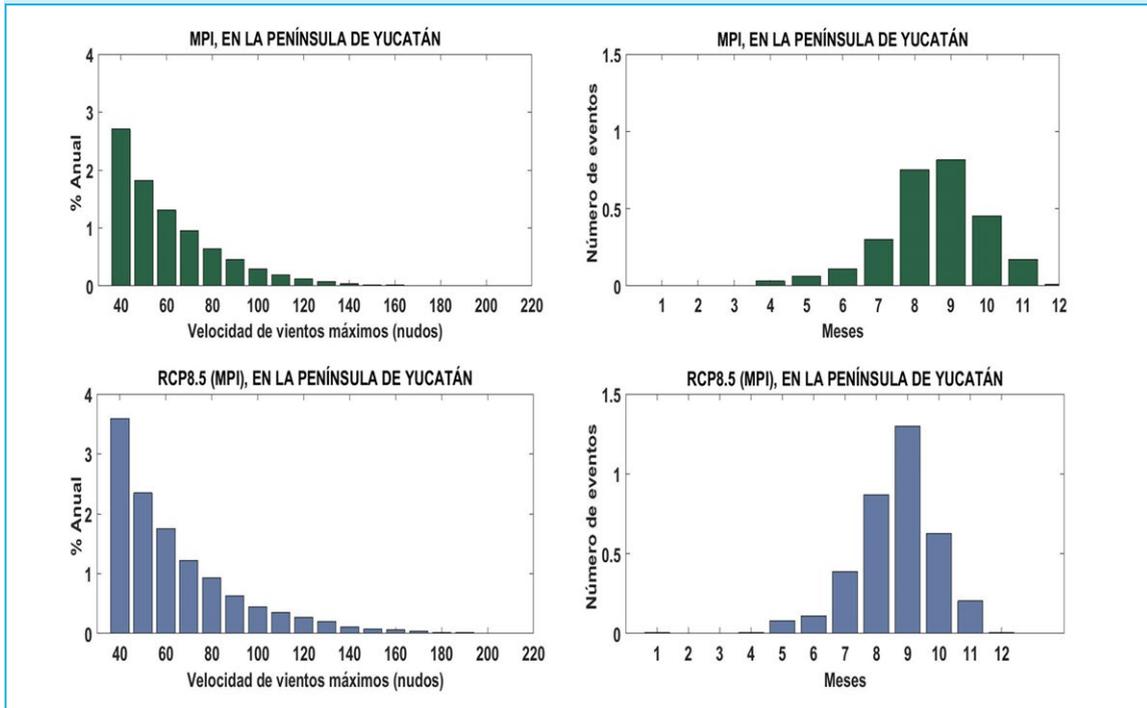


Figura 9. Histogramas de intensidad de viento máxima (izquierda) y del mes de ocurrencia de ciclones tropicales (derecha) para el clima actual (arriba) y el clima futuro (abajo), con base al modelo MPI.

que en el clima futuro se presentan una mayor cantidad de eventos y en particular se presenta un mayor número de eventos de categorías mayores (> 96 nudos), lo cual hace a la Península de Yucatán más vulnerable a ciclones tropicales. Por otro lado, el mes de ocurrencia de ciclones tropicales se mantiene relativamente similar, sin embargo, en el clima futuro la ocurrencia de eventos incrementa en septiembre y se reducen al principio y fin de la temporada de huracanes.

Los resultados anteriores, muestran que bajo el escenario de calentamiento global RCP 8.5, la Península de Yucatán está más propensa a la incidencia de ciclones tropicales, y en particular a eventos de categoría mayor.

CONCLUSIONES

Para evaluar el efecto del calentamiento global sobre los ciclones tropicales que inciden sobre la Península de Yucatán, se utilizaron eventos sintéticos generados con base a la física de ciclones tropicales. Los eventos sintéticos generados a partir del re-análisis NCEP fueron contrastados con eventos históricos a nivel cuenca (Pacífico Nororiental y Atlántico Norte), para validar su uso. Igualmente se evaluaron los eventos sintéticos generados con base a distintos MCG, al ser contrastados con los del NCEP a nivel cuenca con todos los eventos, y a nivel regional solo con los eventos que inciden sobre la Península de Yucatán. Con base a dicha evaluación se seleccionó el modelo MPI como el que mejor representa la climatología de ciclones tropicales para el clima actual, y por lo tanto como el modelo que presenta menos sesgo al ser utilizado para evaluar el clima futuro. Si bien hay una gran incertidumbre en los trabajos de predicciones de eventos por el efecto de cambio climático, en este trabajo se muestra que el MCG MPI reduce

al menos la incertidumbre al representar adecuadamente la climatología del clima actual. Considerando así al MCG MPI para la evaluación del clima futuro se obtiene que bajo el escenario RCP 8.5 la Península de Yucatán es más susceptible a ciclones tropicales y en particular a huracanes de categorías mayores.

El aumento del peligro de ciclones tropicales en el clima futuro, se suma al incremento de la vulnerabilidad de la zona costera de la Península de Yucatán por factores antropogénicos, en particular por la aplicación ineficiente de los planes de Ordenamiento Territorial, aunado al crecimiento poblacional y de infraestructura en la franja costera. Por otro lado, el cambio climático conlleva un aumento del nivel del mar, por tanto las zonas costeras son más susceptibles a sufrir daños por mareas de tormenta y oleaje asociado a ciclones tropicales. Considerando lo anterior, este trabajo es un llamado a comenzar una mejor planeación del desarrollo en la zona costera, a fin de reducir el riesgo costero en un escenario de aumento del peligro por vientos, marea de tormenta y oleaje asociado a ciclones tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor Kerry A. Emanuel del Massachusetts Institute of Technology por facilitar los eventos sintéticos utilizados en este trabajo. Asimismo agradecen el apoyo proporcionado por el Proyecto 4340/5358 del Instituto de Ingeniería, así como al Laboratorio Nacional de Resiliencia.

REFERENCIAS

1. Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A. & Domínguez-Mora, R. The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather* 69, 295–302 (2014).
2. Farfán, L. M., D'Sa, E. J., Liu, K. & Rivera-Monroy, V. H. Tropical Cyclone Impacts on Coastal Regions: the Case of the Yucatán and the Baja California Peninsulas, Mexico. *Estuaries and Coasts* 37, 1388–1402 (2014).
3. Silva-Casarin, R. *et al.* Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *CLEAN - Soil, Air, Water* 40, 911–919 (2012).
4. IPCC. *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014). doi:10.1017/CBO9781107415324
5. Emanuel, K. A. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 12219–24 (2013).
6. Kang, N.-Y. & Elsner, J. B. Trade-off between intensity and frequency of global tropical cyclones. *Nat. Clim. Chang.* 5, (2015).
7. Knutson, T. R. *et al.* Tropical cyclones and climate change. *Nat. Geosci.* 3, 157–163 (2010).
8. Elsner, J. B., Kossin, J. P. & Jagger, T. H. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature* 455, 92–95 (2008).
9. Emanuel, K. Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES Reanalysis, 1908–1958. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2, (2010).
10. Hill, K. A. & Lackmann, G. M. The impact of future climate change on TC intensity and structure: A downscaling approach. *J. Clim.* 24, 4644–4661 (2011).
11. Appendini, C. M. *et al.* Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Appl. Ocean Res.* 39, 20–30 (2013).
12. Camargo, S. J. Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *J. Clim.* 26, 9880–9902 (2013).
13. Emanuel, K., Ravela, S., Vivant, E. & Risi, C. A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 87, 299–314 (2006).
14. Emanuel, K., Sundararajan, R. & Williams, J. Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 89, 347–367 (2008).
15. Emanuel, K. & Jagger, T. On Estimating Hurricane Return Periods. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 837–844 (2010).
16. Aerts, J. C. J. H., Lin, N., Botzen, W. J. W., Emanuel, K. & de Moel, H. Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City. *Risk Anal.* (2013). doi:10.1111/risa.12008
17. Lin, N., Emanuel, K. a., Smith, J. a. & Vanmarcke, E. Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *J. Geophys. Res.* 115, D18121 (2010).
18. Meza-Padilla, R., Appendini, C. M., Pedrozo-Acuña, A. & González-Villarreal, F. Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Pánuco, México. *RIBAGUA - Rev. Iberoam. del Agua* 2, 61–70 (2015).
19. Meza-Padilla, R., Appendini, C. M. & Pedrozo-Acuña, A. Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dyn.* 65, 1199–1211 (2015).
20. Appendini, C. M., Rosengaus-Moshinsky, M., Meza-Padilla, R. & Camacho, V. Operational hazard assessment of waves and storm surges from tropical cyclones in Mexico. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98, En prensa (2017).
21. Lin, N., Emanuel, K., Oppenheimer, M., Vanmarcke, E. & Sciences, P. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2, 462–467 (2012).
22. Appendini, C. M. *et al.* On the role of climate change on wind waves generated by tropical cyclones in the Gulf of Mexico. *Coast. Eng. J.*
23. Kalnay, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 437–471 (1996).
24. Moss, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756 (2010).
25. Fuss, S. *et al.* Betting on negative emissions. *Nat. Publ. Gr.* 4, 850–853 (2014).
26. Griffies, S. M. *et al.* The GFDL CM3 coupled climate model: Characteristics of the ocean and sea ice simulations. *J. Clim.* 24, 3520–3544 (2011).

27. Jones, C. D. *et al.* The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci. Model Dev.* 4, 543–570 (2011).

28. Dufresne, J. L. *et al.* Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Clim. Dyn.* 40, 2123–2165 (2013).

29. Watanabe, M. *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Clim.* 23, 6312–6335 (2010).

30. Giorgetta, M. A. *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 5, 572–597 (2013).

31. Emanuel, K. Effect of upper-ocean evolution on projected trends in tropical cyclone activity. *J. Clim.* 28, 8165–8170 (2015).



SECCIÓN 2

MONITOREO AMBIENTAL DE LARGO PLAZO, HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA RESILIENCIA DE SISTEMAS COSTEROS

Xavier Chiappa-Carrara⁽¹⁾, Cecilia Enriquez⁽²⁾, Ismael Mariño-Tapia⁽³⁾, Maribel Badillo⁽¹⁾, Alfredo Gallardo⁽⁴⁾, Carlos Yañez Arenas⁽⁴⁾, Etzaguery Marin-Coria⁽⁵⁾, Leticia Arena⁽⁶⁾, Patricia Guadarrama⁽¹⁾, Korinthya López-Aguilar⁽⁷⁾, Santiago Capella⁽⁷⁾

(1) Laboratorio de Ecología de Zonas Costeras, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, UNAM

(2) Laboratorio de Oceanografía y Procesos Costeros, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, UNAM

(3) Departamento de Recursos del Mar, CINVESTAV-Mérida

(4) Laboratorio de Conservación de la Biodiversidad, Facultad de Ciencias, UNAM

(5) Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

(6) Laboratorio de Ecogenómica, Facultad de Ciencias, UNAM

(7) Laboratorio de Isótopos Estables, Facultad de Química, UNAM

RESUMEN

Ante cualquier escenario de cambio, los sistemas resilientes tienen la capacidad de restablecer la estructura y funcionamiento característicos de su estado inicial. Gracias a un programa de monitoreo de la ictiofauna que habita en una laguna costera situada en la costa norte de Yucatán, se obtuvieron series de tiempo con la resolución suficiente para mostrar que el sistema es capaz de recuperar la estructura de los ensambles de peces presentes antes de un evento de marea roja que se presentó en el mes de julio de 2008. En este trabajo se analizaron las variaciones en la composición específica mensual del ensamble de especies ícticas presentes en las cercanías de la boca de conexión de la laguna con el mar en el periodo comprendido entre abril de 2008 y marzo de 2009. Se construyeron las series temporales de los índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de la variación en la distinción taxonómica (Λ^+) de manera mensual. Dichas series permitieron distinguir taxonómicamente al ensamble de especies que se presentó durante el evento de marea roja, cuya composición difiere del que se presenta en la laguna el resto del año. Este ejemplo constituye una evidencia de la resiliencia de los ecosistemas costeros y de la capacidad que tienen para tolerar los disturbios ambientales que ocurren en la plataforma continental. Dado que la laguna de la Carbonera juega un papel importante para minimizar algunos impactos ecológicos negativos, como son las mortalidades masivas, que

provocan los eventos de marea roja sobre la ictiofauna del litoral yucateco, se propone que sea considerada como una zona núcleo de la Reserva de Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán.

Los programas de monitoreo ambiental de largo plazo permiten comprender la manera en la que los ecosistemas cambian con el tiempo. Por ende, obtener series de tiempo de las variables relevantes para conocer las tendencias que siguen los componentes de interés de un sistema forma parte del conjunto de estrategias que permiten identificar los límites de su resiliencia, estabilidad, o cambios de estado. Estos límites ocurren en un amplio intervalo de frecuencias y amplitudes. Por ejemplo, cuando las amplitudes son grandes, las variaciones de ciertos parámetros causadas por agentes externos pueden generar cambios

drásticos en el sistema, aún si su frecuencia es pequeña. La capacidad del sistema de restablecer la estructura y funcionamiento característicos del estado inicial se denomina resiliencia. La estabilidad, en cambio, es la capacidad de un sistema de permanecer “razonablemente igual a sí mismo” cuando ocurren forzamientos con amplitudes chicas a pesar de que sucedan con frecuencias altas (Margalef, 1968). Un cambio de estado se identificaría, en una serie de tiempo, como un comportamiento escalonado en el que no se recuperan los valores de la serie correspondientes al estado anterior. Por lo tanto, no ocurren oscilaciones.

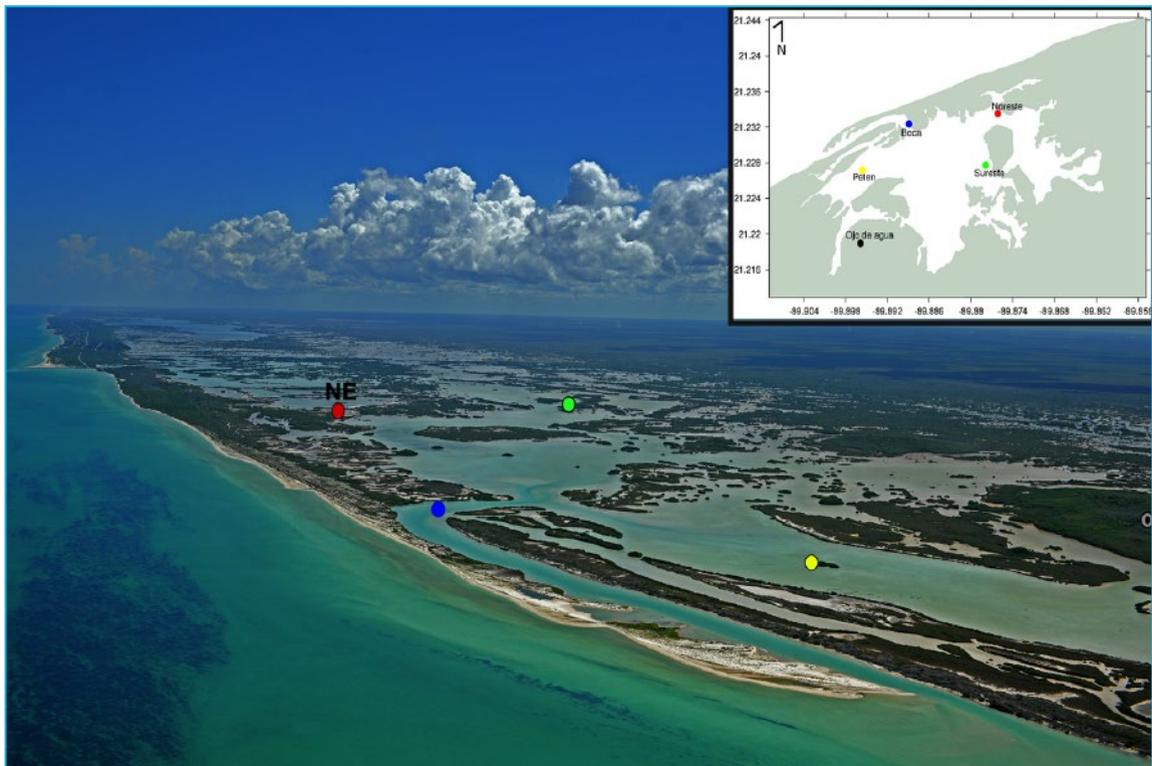


Figura 1. Laguna La Carbonera. Se muestran los sitios de mediciones continuas de temperatura, salinidad y nivel de agua con CTDs.

Los grupos de trabajo de Ecología de Zonas Costeras, de Oceanografía y Procesos Costeros y de Química, adscritos a la Unidad Académica de la UNAM en Yucatán y al CINVESTAV-Mérida, han estudiado con un enfoque multianual y multidisciplinario la laguna de la Carbonera, que forma parte del sistema de humedales costeros presente en la costa noroccidental de Yucatán. Esta laguna se encuentra conectada de forma permanente al mar por una estrecha boca que se formó con el paso del huracán Gilberto en 1988. La laguna tiene una longitud de ≈ 4.1 km en la sección paralela a la línea de costa y de ≈ 3.5 km en la parte más ancha, perpendicular a la costa (Figura 1). Es un cuerpo de agua somero, con profundidades que oscilan entre 0.1 y 1.5 m por lo que es altamente influenciado por el clima atmosférico local. La temperatura de la columna de agua tiene una amplitud de variación anual de $\approx 5-8$ °C, con valores mínimos de $\approx 18-20$ °C entre diciembre y febrero y los máximos de $\approx 28-35$ °C, entre junio y octubre (Bonilla-Gómez *et al.* 2013, Marin-Coria & Enriquez 2016). En cuanto a la salinidad, Jerónimo *et al.* (2012) encontraron que el sistema presenta una alta variabilidad estacional, con valores mínimos promedio de ≈ 20 observados en la época de lluvias y máximos situados en ≈ 40 que ocurren en la época cálida y seca. Más recientemente se ha observado que las variaciones de salinidad en este sistema ocurren tanto espacialmente como temporalmente: por un lado existe la presencia de agua dulce con salinidad menor a 5 en los sitios de descarga de agua subterránea, que no presentan variaciones estacionales de salinidad pero que tienen incrementos súbitos de sal en momentos eventuales de intrusión de agua de la laguna hacia el acuífero. El resto de la laguna está altamente influenciado por los intercambios de calor y de

agua con la atmósfera y con el mar; dependiendo de cada localidad, las variaciones temporales de salinidad son distintas entre sí, con valores promedio entre 20 y 37 en la región central y marina y entre 40 y 80 en la región oriental de la laguna (Marin-Coria & Enriquez 2016). El régimen hidrológico está determinado por el aporte de agua marina y, en menor grado, por las variaciones estacionales en el flujo de los afloramientos de agua subterránea, la precipitación y las escorrentías provenientes de la sabana yucateca y del manglar que bordean al sistema. Se han descrito procesos de mezcla entre el agua dulce y el agua de mar en el subsuelo que, en forma de cuña salina, tienen una influencia notable tierra adentro (Carbajal 2009).

De acuerdo con Jerónimo *et al.* (2012), esta laguna se puede dividir en cuatro zonas con características hidrológicas distintivas: la zona cercana a la boca con mayor influencia marina; la zona de mezcla al oeste de la boca, donde se establece un gradiente halino producto del encuentro del agua dulce de origen subterráneo con la marina que ingresa por la boca; la zona de dominio de agua dulce hacia el sur, influenciada por el aporte permanente de agua del acuífero que emana por un ojo de agua localizado en un petén; y la zona al este de la boca, controlada por las mareas, en la que predominan condiciones hiperhalinas debido a la elevada evaporación. Estas características permiten la existencia de una gran variedad de micro-hábitats y estructuras ambientales en las que proliferan los estadios larvales y juveniles de especies de peces dulcea-cuícolas, estuarinos típicos de estos estuarios tropicales, así como exponentes del componente marino (Vega-Cendejas 2004; Vega-Cendejas & Hernández de Santillana 2004; Arceo-Carranza & Vega-Cendejas 2009).

El programa de monitoreo de largo plazo de la ictiofauna que habita en las distintas porciones de esta laguna, los estudios de la hidrodinámica e hidroquímica, han permitido describir el funcionamiento lagunar. El diseño de este programa permitió obtener la resolución temporal suficiente para evaluar la capacidad del sistema para recuperar la estructura de los ensambles de peces presentes antes, durante y después de un evento de marea roja que se presentó en el mes de julio de 2008, caracterizado por Enriquez *et al.* (2010). Este ejemplo constituye una evidencia de la resiliencia del sistema y su capacidad para tolerar fuertes disturbios ambientales que se generan en la plataforma continental, como el que se describe a continuación.

En el borde oriental de la plataforma continental yucateca durante la primavera y el verano afloran pulsos de la Masa de Agua Subsuperficial del Caribe (CSUW, por sus siglas en inglés) (Cochrane 1966; Ruiz-Rentería 1979; Merino 1992, 1997; Sahl *et al.* 1997; Reyes-Mendoza *et al.* 2015). Estas aguas son de baja temperatura (los límites máximos se sitúan entre $\approx 22-26$ °C), alto contenido de nutrientes y se encuentran entre los 150 y 250 m de profundidad en el mar Caribe (Merino 1997). Al emerger por el margen continental, las corrientes superficiales locales mueven la masa de agua de la surgencia hacia el oeste, la cual se deposita sobre la somera plataforma continental. Al ser considerablemente más densa que el agua de la plataforma (≈ 10 °C menos), se genera una columna estratificada con dos capas divididas por una fuerte termoclina (Figura 2). Por ello, el agua de surgencia rara vez llega hasta la superficie y se dispersa por el fondo en la zona eufótica bañando gran parte de la plataforma de Yucatán (desde Cabo Catoche, hacia el O-NO), alcanzando en ocasiones las

zonas costeras del oeste de Yucatán (Enriquez *et al.* 2013). Gracias a los eventos de surgencia aumentan las concentraciones de nutrientes que favorecen los altos niveles de producción biológica observados en la región de Cabo Catoche.

Ciertas condiciones hidrodinámicas (Enriquez *et al.* 2010; Reyes-Mendoza *et al.* 2016), geoquímicas (Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006) y biológicas (O'Carroll 1987) que ocurren en las cercanías de Cabo Catoche favorecen florecimientos masivos de algas unicelulares, conocidos como mareas rojas, cuyos efectos se han documentado hasta las costas de la Reserva de la Biosfera de Celestún. En el litoral de Yucatán, por lo descrito anteriormente, es natural la posibilidad de que se generen eventos de marea roja durante la primavera y verano. Se sabe que estos eventos ocurrían ocasionalmente cada 5 a 7 años. Sin embargo, como en todo el mundo, el desarrollo de estos fenómenos se ha incrementado y, actualmente, es común que se presenten uno o varios eventos cada año. Se han reconocido tres grandes eventos de marea roja que ocurrieron en Yucatán en 2001, 2003 y 2008 (Arcos-Serrano & Matías-Ramírez 2003; Enriquez *et al.* 2010) y que han sido atribuidos directa o indirectamente a las actividades humanas que provocan la eutrofización de las aguas costeras (Hallegraeff 1992; Pitcher & Calder 2000; Aranda-Cirerol *et al.* 2010). Durante estos florecimientos se ha reportado la presencia de especies como *Nitzschia longissima* y *Cylindrotheca closterium*, cuyas abundancias se incrementan varios órdenes de magnitud en relación con los valores que se observan en condiciones normales. Si bien estas diatomeas no son tóxicas, provocan la mortandad de la fauna marina debido a la disminución de las concentraciones de oxígeno disuelto, que llegan a

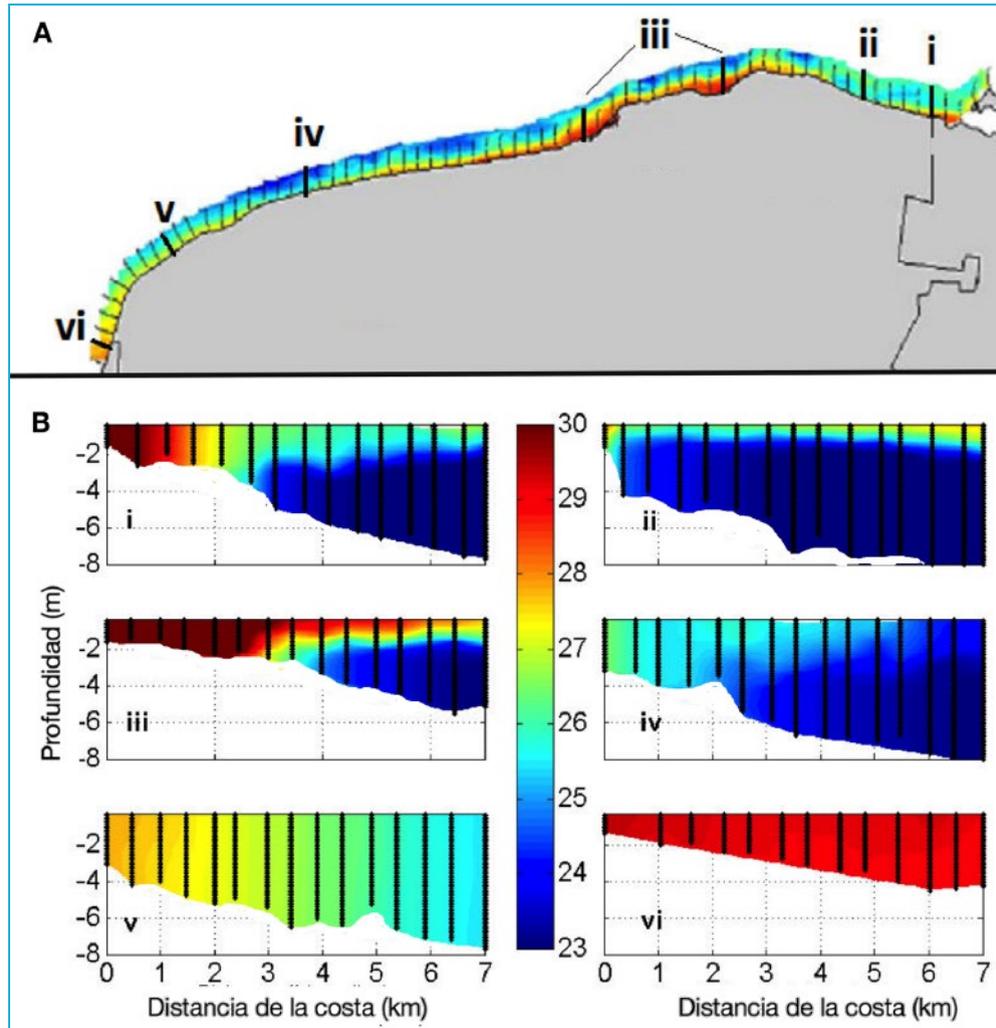


Figura 2. (A) Distribución de la temperatura superficial del mar durante julio del 2006 a lo largo de la costa de Yucatán. (B) Transectos de temperatura desde la costa hasta 10 km mar adentro correspondientes a los sitios indicados en el mapa.

niveles $\leq 1 \text{ mg.l}^{-1}$, como producto de la oxidación de grandes cantidades de materia orgánica que se degrada una vez que las algas mueren (Arcos-Serrano & Matías-Ramírez 2003). Asimismo, se ha reportado la presencia de *Pseudo-nitzschia delicatissima* y de dinoflagelados como *Karenia brevis*, *Gymnodinium catenatum* y *Heterosigma akashiwo*, que son especies conocidas por su potencial tóxico (Troccoli-Ghinaglia et al. 2004).

Si bien la geología kárstica de la Península de Yucatán limita la presencia de ríos superficiales, favorece en cambio la generación de fracturas y galerías a través de las cuales fluye uno de los acuíferos más importantes del país. En la región norte del litoral de la península se ha reconocido la presencia de importantes descargas submarinas de agua subterránea que emanan a través de fuentes tanto puntuales como difusas

(Herrera-Silveira *et al.* 2004 ; Valle-Levinson *et al.* 2011; Vera-Manrique *et al.* 2012). La mezcla genera una masa de agua reconocible por sus características físicas de temperatura, salinidad y altas concentraciones de nutrientes, que se propaga sobre la plataforma de Yucatán hasta el golfo de México.

La laguna de la Carbonera es una de varias lagunas costeras que se establecen detrás de una isla de barrera discontinua a lo largo de la costa norte de la Península de Yucatán que se encuentran rodeadas de vastas extensiones de manglares costeros. En estas lagunas someras, ocurren cambios drásticos en las condiciones hidrográficas en distintas escalas espaciales y temporales. Los efectos negativos que esta inestabilidad del ambiente podría tener sobre la biota se compensan, ya sea a nivel individual o poblacional, por el uso nictémero o estacional que hacen de estos hábitats varias especies para las cuales estas zonas tienen un gran valor, puesto que constituyen lugares propicios para la alimentación, el crecimiento o la reproducción. Además, las lagunas costeras sirven como sitios en los que varias especies se refugian cuando ocurren condiciones adversas en el mar costero adyacente, como cambios abruptos en temperatura, salinidad, o cuando disminuye la concentración de oxígeno disuelto (Hanekom *et al.* 1989; Whitfield 1995; Collard & Lugo-Fernández 1999; Ward *et al.* 2001). Dentro de este conjunto de situaciones adversas se encuentra la proliferación de algas nocivas y, en este capítulo, se muestra la capacidad de resiliencia de la laguna de la Carbonera.

Ecoutin *et al.* (2005) señalan que la extensión de la influencia marina en una laguna costera o estuario está relacionada con el tamaño de la boca y la duración de la conexión entre estos ambientes, misma que determina la

composición de especies. El intercambio entre las lagunas y el mar, aunado a las características de las descargas de agua del acuífero de la zona de Yucatán, crea una dinámica compleja en las propiedades termohalinas de los sistemas y esto tiene implicaciones en la estructura de las comunidades biológicas presentes (Wolanski 1992; Chiappa-Carrara *et al.* 2003; Jerónimo *et al.* 2012). Asimismo, existe una correspondencia estadística entre las características hidrológicas y la distribución de la materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar que puede ser asociada tanto a las fuentes de origen como a los procesos de transporte (Camarena-Fernández 2011).

Para mostrar que el carácter permanente de la boca de conexión con el mar juega un papel fundamental para que este sistema funcione como hábitat crítico y, en ciertas circunstancias, organismos que no se encuentran asociados con las condiciones estuarinas que predominan en este sistema encuentren protección ante las condiciones adversas que provocan las mareas rojas, se analizó el material biológico que proviene de los muestreos periódicos que se han realizado desde el año 2007 a la fecha. La capacidad de resiliencia ecológica del sistema, se resalta al analizar las variaciones en la composición específica mensual del ensamble de especies ícticas presentes en las cercanías de la boca de conexión de la laguna con el mar, en el periodo comprendido entre abril de 2008 y marzo de 2009. Los ejemplares de referencia están depositados en la Colección Ictiológica Regional de la UNAM, registrada con la clave YUC-PEC-239-01-11 ante la Semarnat (Gallardo-Torres *et al.* 2016). Además, este esfuerzo ha permitido generar inventarios detallados de la biodiversidad de algunos grupos taxonómicos presentes en la costa

norte de Yucatán (Badillo-Alemán *et al.* 2014; Gallardo-Torres *et al.* 2014).

La variación temporal de la riqueza de especies (S) se estudió calculando los coeficientes de Sørensen para obtener los valores de similitud con base en las presencias y ausencias de las especies ícticas registradas a lo largo de la serie de tiempo (Figura 3). Para comparar estadísticamente esta serie temporal se obtuvieron los índices mensuales de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la distinción taxonómica (Λ^+). A partir de las propiedades estadísticas de los valores de Δ^+ y Λ^+ mostradas por Clarke y Warwick (1998) fue posible calcular los promedios, varianzas y los intervalos de confianza ($IC_{95\%}$) de las estimaciones.

La progresión temporal de la serie, descrita detalladamente por Chiappa-Carrara *et al.* (2012), muestra que existen conjuntos de especies de peces que pueden ser definidos como

ensambles, característicos del cuerpo lagunar. Algunos están formados por especies que residen de forma permanente en el sistema y otros por aquellas especies cuya presencia ocurre en distintos momentos del año en concordancia con las principales épocas climáticas reconocidas en la región. En general, los valores de los índices Δ^+ y Λ^+ se encontraron dentro de los límites del intervalo de confianza ($IC_{95\%}$), mostrando así la regularidad en la composición de dichos ensambles (Figura 4). La excepción corresponde al muestreo de julio de 2008, durante el cual los valores obtenidos se encontraron por arriba de los límites de confianza calculados para la serie. Por lo tanto, los valores de Δ^+ y Λ^+ permiten distinguir taxonómicamente un nuevo ensamble de especies que se presentó durante el evento de marea roja, cuya composición difiere del que se presenta en la laguna el resto del año.

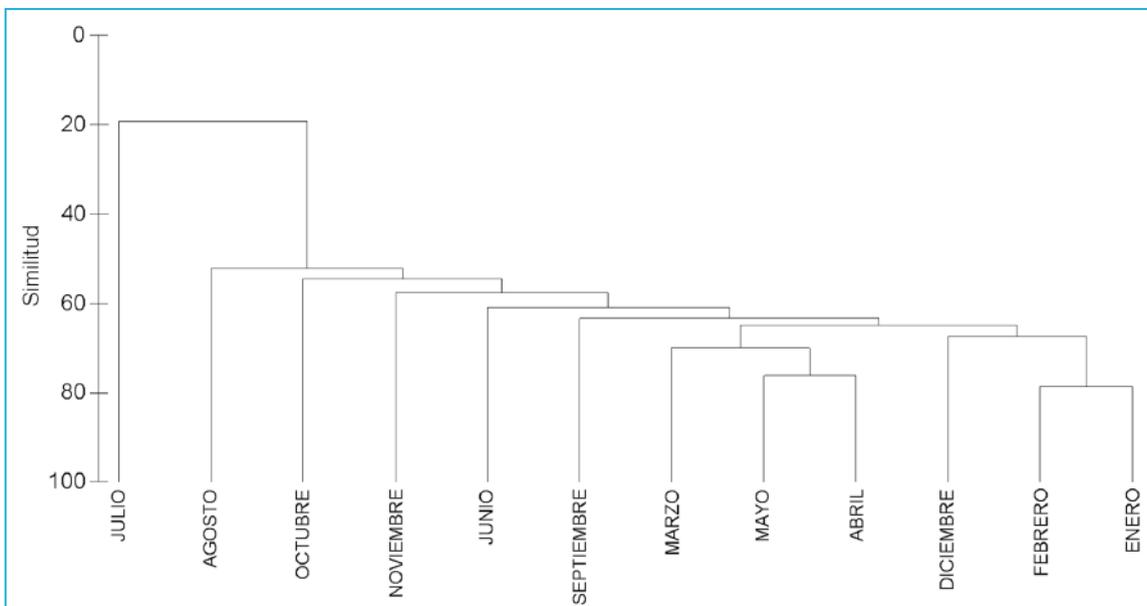


Figura 3. Valores del índice de similitud de Sørensen calculados a partir de la matriz taxonómica de presencia/ausencia mensual de las especies de peces capturadas en la laguna de la Carbonera, Yucatán.

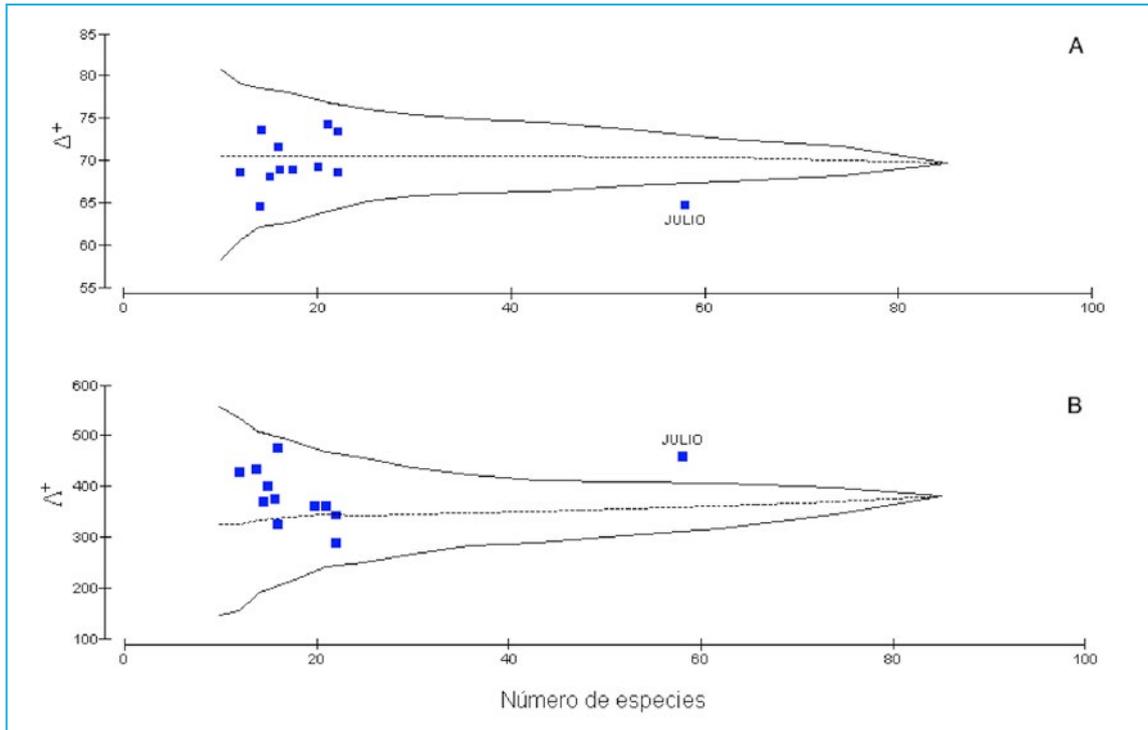


Figura 4. (A) Índice de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y (B) variación en la distinción taxonómica (Λ^+) de las especies de peces capturadas en la laguna de la Carbonera, Yucatán. Las líneas (--) denotan los intervalos de confianza ($IC_{95\%}$) de las estimaciones.

El incremento en la riqueza de especies modificó la estructura y las funciones ecológicas del ensamble que suele encontrarse en aguas cercanas a la boca de conexión del sistema lagunar con el mar. En esta región del sistema lagunar, la salinidad y la temperatura no difieren significativamente de las condiciones que se presentan en la franja costera por lo que no existen restricciones fisiológicas para que las especies típicamente marinas puedan ocupar este hábitat. Sin embargo, durante el muestreo de julio 2008, se registró la presencia de un gran número de especies reconocidas como “arrecifales”. Es importante considerar que las formaciones rocosas más cercanas al área de estudio se encuentran a decenas de kilómetros del sistema lagunar de

la Carbonera (Jordán-Dahlgren & Rodríguez-Martínez 2003). Si bien el papel de los estuarios como hábitats en los que organismos estuarinos encuentran protección ante las condiciones adversas que provocan los florecimientos de algas tóxicas o nocivas ha sido descrito por Lamberth *et al.* (2010), nuestros resultados indican que la habilidad para encontrar refugio en un ambiente estuarino no se limita a las especies “estuarino-dependientes”.

Las observaciones sobre la distribución horizontal de los peces capturados en julio de 2008 permiten suponer que el ensamble formado por las especies residentes de la laguna (como *F. polymus*, *F. persimilis*, *S. timucu*, *M. colei* y *E. harengulus*), que son indicadoras del ambiente de

mezcla y tienen capacidades osmorreguladoras para distribuirse a lo largo de todo el gradiente, fue desplazado hacia la parte interna del sistema, zona en la que se presentan valores de salinidad más bajos que aquellos observados en la franja litoral marina, debidos a las condiciones de mezcla con el agua dulce proveniente de los manantiales presentes en la laguna.

Una vez que el evento de marea roja terminó, se restablecieron las condiciones típicas del ambiente costero y, a partir del mes de agosto, tanto el número y la composición de especies, así como las características del ensamble (S , Δ^+ y Λ^+) de los peces presentes en la boca de la laguna de la Carbonera, no presentaron diferencias significativas con respecto a los valores típicos, que caracterizan al sistema la mayor parte del año (Figuras 3 y 4).

La posición geográfica y la variedad de hábitats que posee el ambiente lagunar de la Carbonera hacen de éste un sitio que puede ser utilizado como refugio por un gran número de especies de la ictiofauna que habita en el litoral norte de la Península de Yucatán ante escenarios adversos que ocurren en el ambiente marino. La progresión temporal de los índices usados para describir la composición faunística de los peces que habitan el cuerpo lagunar permite inferir la capacidad de resiliencia del sistema. Es importante señalar que la resolución necesaria para registrar los cambios de estado del sistema se debe al programa de monitoreo ambiental de largo plazo que se ha implementado en el Laboratorio de Ecología de Zonas Costeras. Este programa ha mostrado ser una herramienta indispensable para evaluar las fluctuaciones de las funciones ecológicas del sistema ante perturbaciones ambientales como la derivada de las condiciones impuestas por el evento de marea roja.

La laguna de la Carbonera forma parte de la Reserva de Ciénagas y Manglares de Yucatán, cuyo decreto de creación se publicó en el Diario Oficial del Estado de Yucatán (2010) con el objetivo de proteger el ecosistema costero, dominado por extensiones de manglares en buen estado de conservación. El sistema se caracteriza por tener valores elevados de producción biológica que sostiene a una gran cantidad de consumidores enlazados por cadenas alimentarias complejas. Además de ser una zona de protección, crecimiento y desarrollo de peces, crustáceos y moluscos, reptiles, anfibios y pequeños mamíferos, esta laguna es utilizada como zona de alimentación y reproducción de aves migratorias y residentes. El éxito de anidación de algunas de estas especies, particularmente de aquellas que se alimentan de peces, está relacionado con la hidrología y con la disponibilidad de las presas, pues de estos factores depende el éxito de forrajeo (Frederick *et al.* 2009). Por lo tanto, la resiliencia del sistema para mantener la composición y abundancia de los ensambles de peces tiene repercusiones en otros componentes de las tramas tróficas.

Los resultados de algunos trabajos recientes (De Dios Arcos 2014) y otros en curso permiten inferir que las capturas que realizan los adultos de aves como *Phalacrocorax brasilianus*, *Egretta rufescens*, *Cochlearius cochlearius*, *Ardea alba* y *Platalea ajaja* para alimentar a sus crías es selectiva con respecto a las especies ícticas que depredan y, en algunos casos, al sexo de los individuos consumidos para maximizar la calidad del alimento y así obtener los componentes alimentarios que satisfacen los requerimientos calóricos y nutricionales tanto de padres como de crías.

Considerando la información que se ha generado a través del programa de monitoreo, es

posible decir que el plan de manejo de la Reserva de Ciénagas y Manglares de Yucatán debe incluir a la laguna de la Carbonera como una zona núcleo que probó jugar un papel importante para minimizar algunos impactos ecológicos negativos, como son las mortalidades masivas que provocan los eventos de marea roja sobre la fauna del litoral yucateco. Además alberga a poblaciones de varias especies endémicas características de estos ecosistemas costeros y aporta individuos a los stocks pesqueros de la región.

REFERENCIAS

- Álvarez-Góngora C, Herrera-Silveira JA (2006) Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Mar. Pollut. Bull.* 52: 48-60.
- Aranda-Cirerol N, Comín F, Herrera-Silveira J (2010) Nitrogen and phosphorus budgets for the Yucatán littoral: An approach for groundwater management. *Environ. Monit. Assess.* 172: 493-505.
- Arceo-Carranza D, Vega-Cendejas ME (2009) Spatial and temporal characterization of fish assemblages in a tropical coastal system influenced by freshwater inputs: northwestern Yucatan Peninsula. *Rev. Biol. Trop.* 57: 89-103.
- Arcos-Serrano ME, Matías-Ramírez LG (2003) Informe técnico del fenómeno de marea roja correspondiente a la visita realizada al estado de Yucatán del 12 al 14 de agosto de 2003. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), Informe Técnico núm. DI/RQ-RH-08102003. 18 pp.
- Badillo-Alemán M, López F, Gallardo-Torres A, Chiappa-Carrara X (2014) Catálogo de Aves de la Costa Norte de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, 174 p. ISBN 978-607-9060-14-5
- Bonilla-Gómez JL, Badillo M, López K, Gallardo A, Galindo C, Arceo D, Chiappa-Carrara X (2013) Environmental influences on the abundance of dominant fishes in a very shallow tropical coastal lagoon in Northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *Marine Science Research and Development* 3(1): 2-12
<http://dx.doi.org/10.4172/2155-9910.1000118>
- Camarena Fernández M (2011) Estudio de la variación espacio-temporal de la composición de la materia orgánica, por medio de la especiación de esteroides en la Bocana en la Costa Norte de Yucatán. Tesis de maestría, UNAM
- Carbajal N (2009) Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
- Chiappa-Carrara X, Sanvicente-Añorve L, Monreal-Gómez A, Salas de León D (2003) Ichthyoplankton distribution as an indicator of hydrodynamic conditions of a lagoon system in the Mexican Caribbean. *Journal of Plankton Research.* 25: 687-696.

- Chiappa-Carrara X, Gallardo A, Galindo De Santiago C, Loera-Pérez J, Rioja-Nieto R, Badillo M. (2012) Refugios estuarinos: cambios en la estructura de la comunidad de peces en la laguna de la Boca de la Carbonera durante un evento de marea roja. En Sánchez AJ, Chiappa-Carrara X, Brito Pérez R (eds) Recursos Acuáticos Costeros del Sureste. CONCIYTEY - UNAM, 1106 p. ISBN 978-607-9060-08-4
- Clarke KR, Warwick RM (1998) A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology* 35: 523-531.
- Cochrane JD (1966) The Yucatan current, upwelling off Northeastern Yucatan, and currents and waters of Western Equatorial Atlantic. *Oceanography of the Gulf of Mexico*. Progress Report TAMU Ref. no. 66-23T, pp. 14-32.
- Collard SB, Lugo-Fernández A (1999) Coastal upwelling and mass mortalities of fishes and invertebrates in the Northeastern Gulf of Mexico during spring and summer 1998. OCS Study MMS 99-0049. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA, USA, 20 pp. <http://www.gomr.mms.gov/PI/PDFImages/ESPIS/3/3207.pdf>
- De Dios Arcos C (2014) Ecología trófica de un gremio de aves acuáticas durante la temporada de reproducción en la costa de Yucatán. Tesis de maestría, UNAM
- Ecoutin JC, Jean-Marc RE, Simier M, Albaret JJ (2005). Spatial versus temporal patterns in fish assemblages of a tropical estuarine coastal lake: The Ebrie Lagoon (Ivory Coast). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 623-635.
- Enriquez C, Mariño-Tapia IJ, Herrera-Silveira JA (2010) Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research* 30: 127-137.
- Enriquez C, Mariño-Tapia I, Jerónimo G, Capurro-Filigrasso L (2013) Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*. 69: 101-109 <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>.
- Frederick P, Gawlik DE, Ogden JC, Cook MI, Lusk M (2009) The White Ibis and Wood Stork as indicators for restoration of the Everglades ecosystem. *Ecological Indicators* 9S: S83-S95.
- Gallardo-Torres A, Badillo-Alemán M, Rivera Félix V, Rubio Molina J, Galindo De Santiago C, Loera-Pérez J, García-Galano T, Chiappa-Carrara X (2014) Catálogo de Peces de la Costa Norte de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México - CONCIYTEY, Segunda Edición, 265 p. ISBN 978-607-9060-15-2
- Gallardo-Torres A, Badillo-Alemán M, Gutiérrez-Oliva H, Chiappa-Carrara X (2016) La colección ictiológica regional de referencia (CIRR) de la UMDI-Sisal. En Del Moral-Flores LF, Ramírez-Villalobos AJ, Martínez-Pérez JA, González-Acosta AF (eds). Colecciones Ictiológicas de Latinoamérica. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México & Sociedad Mexicana de Ictiología, México, pp 430-442. ISBN 978-607-02-8066-5
- Hallegraef GM (1992) Harmful algal blooms in the Australian region. *Marine Pollution Bulletin* 25: 186-190.
- Hanekom N, Hutchings L, Joubert PA, Van der Byl PCN (1989) Sea temperature variations in the Tsitsikamma Coastal National Park, South Africa, with notes on the effect of cold conditions on some fish populations. *South African Journal of Marine Science* 8: 145-153.
- Herrera-Silveira JA, Comin FA, Aranda-Cirerol N, Troccoli L, Capurro L (2004) Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean and Coastal Management* 47: 625-639.
- Jerónimo G, Gómez-Valdés J, Badillo M, López-Aguilar K, Galindo De Santiago C, Gallardo A, Loera-Pérez, Arroyo-Pedraza L, Chiappa-Carrara X (2012) Variación estacional de temperatura y salinidad en la Boca de la Carbonera, Yucatán, 2009-2010. En Sánchez AJ, Chiappa-Carrara X, Brito Pérez R (eds) Recursos Acuáticos Costeros del Sureste. CONCIYTEY - UNAM, 1106 p. ISBN 978-607-9060-08-4
- Jordán-Dahlgren E, Rodríguez-Martínez RE (2003) The Atlantic Coral Reefs of México. In: Cortés J (ed) *Latin American Coral Reefs*. pp. 131-158, Elsevier.
- Lamberth SJ, Branch GM, Clark BM (2010) Estuarine refugia and fish responses to a large anoxic, hydrogen sulphide, "black tide" event in the adjacent marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86: 203-215.
- Margalef R (1968) *Perspectives in Ecological Theory*. Univ. of Chicago Press, Illinois
- Marín-Coria E, Enriquez C (2016). Variaciones de temperatura y salinidad en el sistema lagunar La Carbonera, Yucatán, México. *Revista digital E-BIOS*. 4, año 6 núm. 11. ISSN: 2007-5782
- Merino M (1992) Afloramiento en la plataforma de Yucatán. Estructura y fertilización. Tesis doctoral, UNAM.

- Merino M (1997) Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* 13: 101-121.
- O'Carroll K (1987) Bacteria-red tide link. *Marine Pollution Bulletin* 18: 148.
- Pitcher GC, Calder D (2000) Harmful algal blooms of the southern Benguela current: a review and appraisal of monitoring from 1989 to 1997. *South African Journal of Marine Science* 22: 255-271.
- Reyes-Mendoza, O., Mariño-Tapia, I., Herrera-Silveira, J., Ruiz-Martínez, G., Enriquez, C., Largier, J.L. The Effects of Wind on Upwelling off Cabo Catoche (2016) *Journal of Coastal Research*, 32 (3), pp. 638-650. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-15-00043.1
- Ruiz-Renteria F (1979) Upwelling North of the Yucatan Peninsula. Tesis de maestría, Texas A&M University.
- Sahl LE, Wiesenburg DA, Merrell WJ, (1997) Interactions of mesoscale features with Texas shelf and slope waters. *Continental Shelf Research* 17: 117-136.
- Troccoli-Ghinaglia L, Herrera-Silveira JA, Comín FA (2004) Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatan, Mexico. *Hydrobiologia* 519: 85-102.
- Valle-Levinson A, Marino-Tapia I, Enriquez C, Waterhouse AF (2011) Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnology and Oceanography* 56: 1213-1224.
- Vega-Cendejas ME (2004) Ictiofauna de la Reserva de la Biosfera Celestún, Yucatán: una contribución al conocimiento de su biodiversidad. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología* 75: 193-206.
- Vega-Cendejas ME, Hernández de Santillana M (2004) Fish community structure and dynamics in a coastal hypersaline lagoon: Rio Lagartos, Yucatan, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60: 285-299.
- Vera-Manrique, I., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., 2012. Effects of drought and subtidal sea level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. *Marine and Freshwater Research* (MF11270).
- Ward TM, Hoedt F, McLeay L, Dimmlich WF, Kinloch M, Jackson G, McGarvey R, Rogers PJ, Jones K (2001) Effects of the 1995 and 1998 mass mortality events on the spawning biomass of sardine, *Sardinops sagax*, in South Australian waters. *ICES Journal of Marine Science* 58: 865-875.
- Whitfield AK (1995) Mass mortalities of fish in South African estuaries. *Southern African Journal of Aquatic Sciences* 21: 29-34.
- Wolanski E (1992) Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal waters. *Hydrobiologia* 247: 141-16.

DINÁMICA TEMPORAL DE LOS PAISAJES SUBLITORALES DE SISAL, YUCATÁN

Joaquín Rodrigo Garza Pérez^{1,2*}, Julia Naranjo
García¹, Dominique Pamela Orvañanos Donis¹

¹ Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos (PIESACOM), UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM

² Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC)

* Correspondencia: rgarza@ciencias.unam.mx

RESUMEN

Se caracterizaron y monitorearon a través de tres temporadas climáticas (secas, lluvias y Nortes), seis paisajes submarinos en el litoral de Sisal, Yucatán. Las caracterizaciones se llevaron a cabo siguiendo un diseño muestral generado a partir de una clasificación no supervisada de una imagen de satélite Landsat ETM+ y un modelo batimétrico digital del área de estudio. Las técnicas usadas para la caracterización de las comunidades bentónicas y de peces asociadas a cada paisaje fueron la de videotransectos y la de censos visuales. En general se encontraron diferencias significativas entre las coberturas bentónicas de las temporadas secas y lluvias con respecto a la temporada de Nortes. Se definió un gradiente temporal de incremento en número de especies de peces y su biomasa asociada desde la temporada de Nortes, seguida por la de secas y terminando con el mayor número de especies y biomasa en la temporada de lluvias. Los seis paisajes submarinos definidos en el litoral de Sisal son constantes durante las tres temporadas climáticas y su distribución espacial se plasmó en un mapa temático generado a partir de una clasificación supervisada de una imagen de satélite Landsat ETM+ procesada con corrección atmosférica y remoción del efecto de la columna de agua. Se encontró una alta homogeneidad entre el tipo y la proporción de cobertura de los seis paisajes definidos, representando un gradiente continuo desde los fondos arenosos con escasa cobertura algal hasta los fondos rocosos con coberturas perennes de corales y octocorales. El análisis de asociación de las especies de peces con las coberturas y tipos de sustrato por medio de un Análisis de Redundancia, reveló una baja selectividad de las especies a los tipos de cobertura y de sustrato, siendo más importante la complejidad de hábitat. En este caso, en la zona litoral de Sisal, las macroalgas juegan el papel más importante para el incremento en la complejidad del hábitat, y quienes tienen una dinámica fluctuante definida por las condiciones ambientales asociadas a cada temporada climática.

Palabras clave: Ciclones tropicales, Huracanes, Cambio climático, Vulnerabilidad, Peligro, Yucatán

INTRODUCCIÓN

El manejo de los ecosistemas costeros constituye una de las grandes preocupaciones internacionales. Las zonas litorales son particularmente frágiles ya que son explotadas sin contar con el conocimiento de los factores biológicos y ambientales que determinan la función del ecosistema y el estado de sus recursos. La conservación y el manejo coherente de un ecosistema deben estar basados en el conocimiento de sus recursos y de su funcionamiento. Esto permite, por una parte, evaluar las potencialidades económicas reales ofrecidas por el medio natural y, por otra parte, establecer las bases para planificar un desarrollo controlado en áreas adyacentes a los ecosistemas.

La ecología del paisaje, a diferencia de la ecología tradicional, reconoce la heterogeneidad espacial de los ecosistemas, considerando en su análisis tres aspectos: la estructura, la función y el cambio de los dos anteriores a través del tiempo (Urban et al 1987, Turner y Gadner 1991). En base a esta perspectiva jerárquica, se han realizado estudios acerca de la relación entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos a lo ancho de la escala espacial y temporal. La gran mayoría de estos estudios se enfocan en ambientes terrestres, pero recientemente se han incorporado estos conceptos en algunos estudios de zonas costeras, debido principalmente a su enfoque integral (Costanza et al. 1990).

El concepto de analizar la estructura-función de las comunidades de peces y sus asociaciones al hábitat proporciona información valiosa para entender la dinámica de los ecosistemas marinos. Esta pregunta ha sido abordada desde varios enfoques, como la aproximación de "Fourth Corner" de Legendre et al. (1997), la cual parametriza el comportamiento de la asociación de ensamblajes

de peces y las características del hábitat. Otra aproximación por Arias-González et al. (2006), relaciona la biomasa y la estructura trófica de los ensamblajes de peces al hábitat y define los principales indicadores que regulan la distribución de los gremios de peces en un sistema arrecifal.

La información científicamente validada de la zona costera y litoral de Yucatán tiene las características de ser escasa, de distribución focalizada en algunas zonas y generalmente asociada a recursos económicamente importantes. Estos estudios han sido generados en su mayoría por CONAPESCA. Un ejemplo del tipo de información con la que se cuenta en la zona es el sistema de ordenamiento costero POETCY (2007). Este programa de ordenamiento ecológico fue instaurado precisamente para tratar de resarcir la deficiencia en la información ambiental del estado, tratando de incorporar toda la información disponible de diversas fuentes como institutos de investigación, universidades y secretarías estatales. Toda esta información recopilada es valiosa, pero al carecer de un objetivo común, es inconexa y de utilidad limitada para objetivos de manejo.

Al respecto, los componentes esenciales para el entendimiento y adecuada gestión de los recursos naturales se obtienen respondiendo a las preguntas ¿Qué hay? ¿En dónde hay? ¿Cuanto hay? Y ¿Por qué está ahí? Una herramienta de fácil uso y comprensión por parte de científicos, administradores, tomadores de decisiones y el público en general son los mapas, ya que se basan en el lenguaje universal de las imágenes y pueden ser producidos de acuerdo a las necesidades específicas de cada usuario.

Aquí, se retoma la pregunta de las asociaciones de comunidades de peces a su hábitat pero se incorporan nuevos componentes a la respuesta, que son la definición espacial de los

hábitats y sus características a través de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y la predicción espacial de la biomasa y diversidad de especies de peces, a la misma resolución y abarcando toda el área de estudio.

OBJETIVO GENERAL

Definir la estructura-función de las comunidades de peces asociadas a paisajes marinos del litoral de Sisal y caracterizarla de una manera espacialmente explícita a través de las temporadas climáticas del año.

Objetivos Particulares

- Definir los diferentes paisajes marinos detectables a través de imágenes de satélite de resolución media-alta (píxeles de 28x28m o 30mx30m).

- Caracterizar la composición temporal de las comunidades bentónicas asociadas a cada paisaje marino definido.

- Caracterizar la composición temporal de las comunidades de peces asociadas a cada paisaje marino definido.

- Analizar las asociaciones de la comunidad de especies a nivel de gremios tróficos y especies con los componentes bentónicos de cada paisaje marino y su cambio a través de las diferentes temporadas climáticas del año.

- Generar mapas predictivos de biodiversidad, cobertura, biomasa y densidad de los componentes bióticos y abióticos de los paisajes marinos.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés en el litoral de Sisal, se extiende de 46 km a lo largo de la costa norte del estado

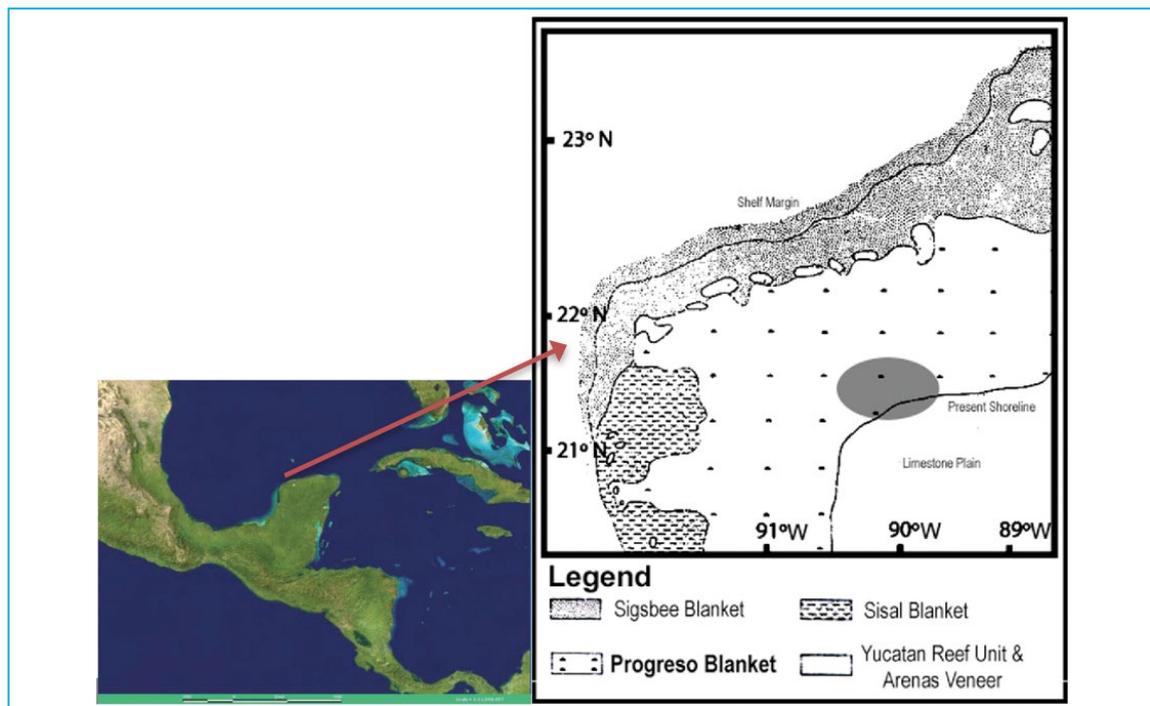


Figura 1. Área de estudio, representada sobre el mapa de ambientes sedimentarios de la Península de Yucatán, modificado de Logan (1969).

de Yucatán y abarca un área aproximada de 1,240 km² (Figura 1). Forma parte de la unidad sedimentaria conocida como tapete Progreso, definido por Logan (1969) como una capa de sedimentos marinos (arena de tamaño medio a fino) que va desde algunos centímetros hasta algunos metros de ancho (en la parte somera de la plataforma), compuesta principalmente por fragmentos angulares y subangulares de pelecípodos, gasterópodos, foraminíferos (principalmente *Peneroplie* y *Miliolidae*), placas de *Halimeda* y fragmentos de algas coralinas. Con un contenido de limo y arcilla menor al 5%.

Las condiciones climáticas predominantes en el sureste del Golfo de México se han definido en tres temporadas climáticas: la temporada seca (marzo a mayo) con temperaturas en el rango de 36° a 38°C (y con registros en los últimos años de hasta 45°C) con una elevada tasa de evaporación y precipitaciones mínimas (0 a 30mm), referida en adelante como "secas". La temporada lluviosa de junio a octubre con precipitaciones de hasta 125mm en promedio para el mes de septiembre (lluvias) y una temporada caracterizada por fuertes vientos provenientes del norte con el consiguiente aumento en el oleaje y turbidez del agua, bajas temperaturas y escasa precipitación (noviembre a febrero), Nortes (Fuentes-Yaco *et al.* 2001, Tunnell, 1988).

MÉTODOS

Diseño Muestral

Se realizó un procedimiento de clasificación no supervisada (9 clases) a una imagen multiespectral Landsat 7 ETM+ del año 2000 del área de estudio, utilizando el software ENVI v.4.2 (ITT). La imagen clasificada resultante se utilizó como base para un diseño muestral estratificado al azar. Las estaciones seleccionadas en cada estrato se incorporaron en una capa vectorial de

información geográfica y por requerimientos logísticos de trabajo en campo y tiempo de transporte se eliminaron las estaciones fuera de un radio de 40 km del Puerto de Sisal. A continuación se establecieron rutas de navegación con las 90 estaciones finales, cubriendo un patrón radial, que permitió la optimización de tiempo de lancha y combustible. Estas rutas de navegación se siguieron durante las tres temporadas climáticas del año para cumplir con la evaluación temporal de los paisajes.

Definición de Paisajes Bentónicos y caracterización de comunidades bentónicas asociadas

Método de Video-Transectos para caracterización de comunidades bentónicas sésiles

Por medio de un GPS se navegó hacia cada estación seleccionada en el diseño muestral, con equipo SCUBA se realizaron inmersiones y se desplegó un transecto de 50 m. Con una cámara submarina (Sony HDR-HC9 en un housing Light & Motion Stingray HD) se filmaba una toma perpendicular al substrato (50x06m).

Cada videotransecto se analizó siguiendo la propuesta de Garza Pérez (2012) que consiste en efectuar 40 pausas espaciadas regularmente a lo largo de la filmación de cada transecto, identificando el substrato o tipo de cobertura bajo 13 puntos repartidos sistemáticamente sobre cada toma. La identificación del substrato y de su cobertura se basó en las categorías de grupos taxonómicos y morfológicos propuestas por Garza-Pérez (2012).

Análisis Estadístico para definición de paisajes

Las tendencias de las coberturas por estaciones a través de las temporadas se exploraron por medio de un análisis de escalamiento multidimensional

(MDS, Clarke y Warwick 2001, PRIMER 6, Primer LTD.), utilizando las bases de datos de porcentaje de cobertura. Por medio de un análisis de similitud (ANOSIM; Clarke y Green, 1988) se definió la diferencia en coberturas entre temporadas. Este análisis utiliza una matriz de similitud (Bray-Curtis), y es un análogo del análisis de varianza (ANOVA), dado que ambas pruebas parten de la hipótesis nula que no hay diferencias entre los grupos o muestras especificados. Posteriormente se aplicó un análisis SIMPER (Clarke y Warwick, 2001), que definió los tipos de cobertura que representan la mayor variabilidad y similitud entre temporadas y determinó la contribución de las coberturas a la similitud de los paisajes en cada temporada climática. Estos análisis fueron seguidos por un análisis aglomerativo jerárquico por temporada por medio del cual se definieron los paisajes constantes en las tres temporadas. Finalmente se realizó un análisis MDS para representar la fluctuación de las coberturas de cada paisaje a través de las temporadas.

Caracterización de comunidades de peces Método de censos visuales para caracterización de comunidades de peces

La caracterización de las comunidades de peces se llevó a cabo a través de censos visuales de peces, siguiendo una modificación al método propuesto por Nuñez-Lara *et al.* (2005); en este caso se hizo un transecto de 50 x 2 m (100m²) sobre el mismo transecto en donde se filmó el video. Durante los censos se registraron las observaciones del número de individuos por especie y sus tallas respectivas.

Análisis de la comunidad de peces

A partir de los datos de campo se generaron bases de datos con especies de peces, número de

individuos por especie y sus tallas siguiendo una escala de 10 categorías con intervalos de talla de 10 cm, desde 0-10cm, hasta 90-100cm y una categoría de >101cm. Estas bases de datos fueron utilizadas posteriormente para calcular la biomasa por especie por transecto, expresada en gramos por metro cuadrado utilizando la siguiente fórmula:

Biomasa por individuo

$$W = aL^b,$$

En donde W es el peso (gramos), L es la longitud (cm), y a y b son parámetros estimados regresiones lineales de datos de peso-longitud transformados logarítmicamente.

Las constantes a y b se obtuvieron de los registros de FishBase (www.fishbase.org) y, en algunos casos en los que no existían registros para la especie, se tomaron constantes de especies similares, del mismo género y de la misma área geográfica. Se sumaron los cálculos de cada clase de talla por especie para obtener la biomasa por especie por transecto y se dividió entre 100 para obtener la biomasa por especie por metro cuadrado.

Las bases de datos originales también se utilizaron para calcular los valores del índice de diversidad de Shannon y de Equidad de Pielou, para cada transecto, con las siguientes fórmulas:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \log p_i$$

En donde, H'= índice de diversidad de Shannon S= Número de especies Pi= proporción del total de la muestra que corresponde a la especie i

Equidad o Igualdad:

$$J = H / H_{max}$$

En donde, J= Equidad o Igualdad (gama de 0 a 1). H= Diversidad de especies observada. Hmax = diversidad de especies máxima = log²S.

Análisis de relación de las comunidades de peces con los paisajes submarinos

Para explorar la relación de las comunidades de peces con los paisajes submarinos se realizaron dos tipos de análisis con las bases de datos de peces por paisajes por temporada. Un análisis MDS se utilizó para asociar las biomazas totales y riqueza de especies por paisajes por temporadas y un análisis de correspondencia canónica -CCA- (terBraak 1994, CANOCO v.4.0, Biometris) para explorar las asociaciones de especies a los tipos de sustrato, también por temporadas.

Generación de modelos batimétricos digitales

Se realizaron barridos con una ecosonda (Garmin GPSMAP 76) siguiendo las rutas de navegación

establecidas en el diseño muestral e incorporando nuevas rutas. A partir de estos barridos se obtuvieron bases de datos georreferidas de profundidad. Las bases de datos de profundidad se utilizaron para generar modelos batimétricos a través de técnicas de geoestadística (kriging) y para derivar la profundidad a través de un modelo predictivo sobre una imagen de satélite, utilizando la técnica de GRASP (Análisis de Regresión Generalizada y Predicción Espacial, Lehmann *et al.* 2002).

Mapeo de Paisajes por medio de clasificación supervisada

Utilizando el esquema de clasificación de los paisajes submarinos definidos por el análisis

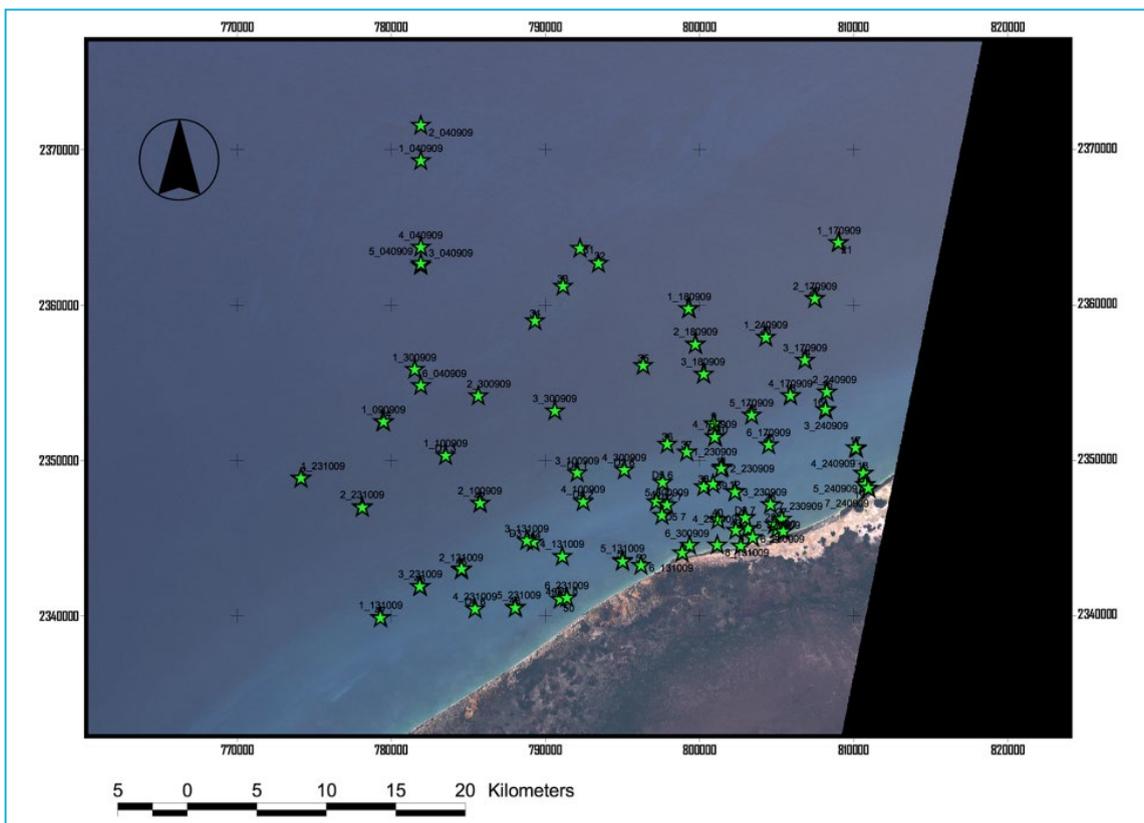


Figura 2. Localización de las estaciones de muestreo en el litoral de Sisal.

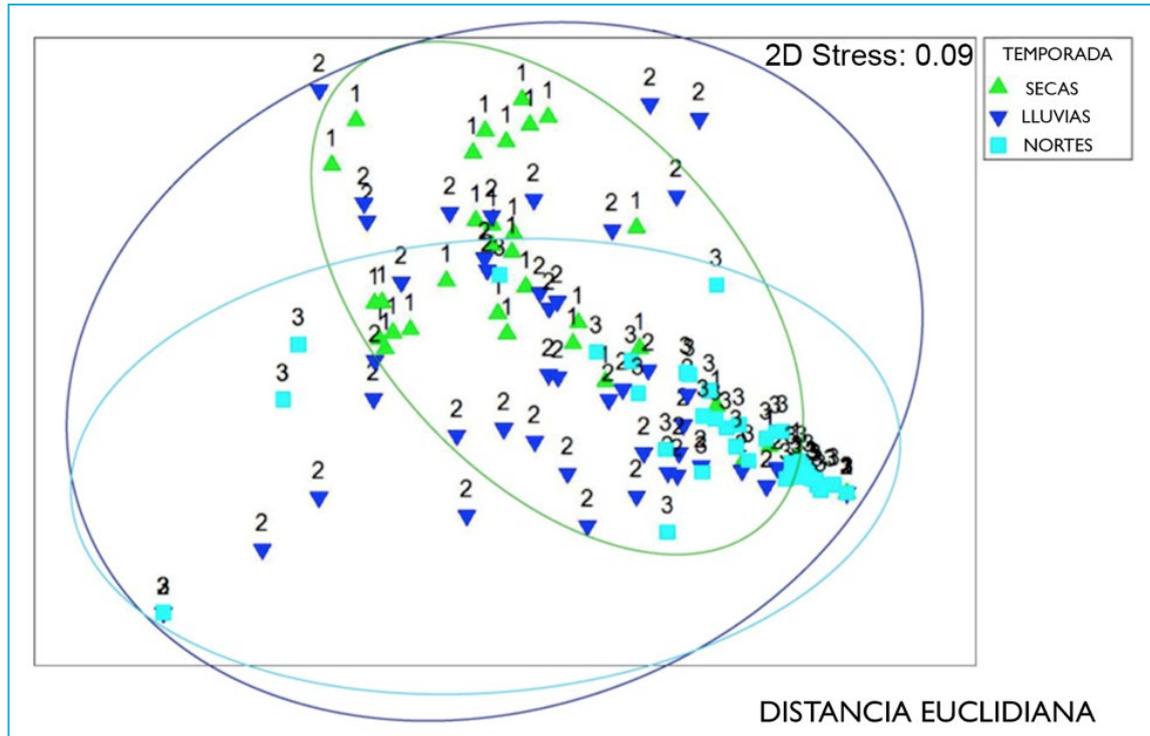


Figura 3. Diagrama del análisis MDS para las coberturas bentónicas entre temporadas climáticas.

jerárquico aglomerativo, se crearon semillas para definir las firmas espectrales de cada paisaje, utilizando las estaciones asociadas a cada paisaje. Posteriormente se aplicó una clasificación supervisada (ENVI v.4.7, ITT) por la regla de decisión de máxima verosimilitud.

Predicción Espacial

Se utilizó la técnica de GRASP (Lehmann 2002, Garza *et al.* 2003) para la generación de mapas predictivos de componentes bióticos. Esta técnica se basa en la utilización de modelos aditivos generalizados (GAMs, Hastie & Tibshirani 1990, Yee & Mitchell 1991) para modelar la relación entre variables predictivas en forma de superficies continuas (bandas de imágenes de satélite y mapas batimétricos) y variables de respuesta en forma de puntos discretos. Cada píxel de los

mapas predictivos posee un dato de valor de la variable de respuesta (en la unidad asociada a esa variable como profundidad, porcentaje de cobertura, biomasa por metro cuadrado, riqueza específica, diversidad de Shannon, etc.)

RESULTADOS

Se obtuvo un diseño muestral de 90 estaciones en un área de 1,240 km², que fueron asignadas a 9 rutas de navegación. Las estaciones fueron monitoreadas con videotransectos y censos de peces a través de las temporadas climáticas del año de secas, lluvias y Nortes (figura 2). A partir de los videotransectos obtenidos en cada estación, se obtuvieron tanto el tipo de sustrato predominante, como los porcentajes de coberturas de organismos sésiles bentónicos, por temporada. Esta base de datos se analizó mediante un análisis MDS para

Tabla 1. Análisis de similitud de una vía (ANOSIM) para las coberturas bentónicas entre temporadas climáticas.

GRUPOS	R Estadístico	Nivel de Significancia (%)	Diferencia Significativa	Permutaciones posibles	Permutaciones en este análisis	Número Observado (\geq)
Secas/Lluvias	0.068	1	No	Muy Grande	999	9
Secas/Nortes	0.423	0.1	Si	Muy Grande	999	0
Lluvias/Nortes	0.152	0.1	Si	Muy Grande	999	0

establecer los patrones temporales de coberturas bentónicas entre las temporadas (figura 3).

Posteriormente esta misma base de datos se analizó por medio de las pruebas de ANOSIM y SIMPER. La prueba de ANOSIM encontró diferencias significativas entre las coberturas de la temporada de Nortes con las coberturas de las temporadas de secas y lluvias, sin diferencias significativas entre estas últimas (tabla 1).

La prueba de SIMPER por una parte definió las variables (tipos de cobertura bentónica en porcentaje) que otorgan la similitud (por la métrica del índice de similitud de Bray-Curtis) entre estaciones de cada temporada (tabla 2). Para la temporada de secas la variable de cobertura bentónica que otorgó más similitud fue la de Algas Rojas con un 48%, para las temporadas de lluvias y de Nortes la cobertura que otorgó la mayor similitud fue la de Arena con un 62% y un 92% respectivamente.

Por otra parte la prueba de SIMPER definió las variables que causan diferencias entre las tres temporadas (tabla 3). La variable más importante fue Arena con

porcentajes de contribución a la diferencia entre estaciones de 33.20% a 42.28%. Entre la temporada de secas y lluvias el porcentaje de disimilitud fue de 61.31%, entre secas y Nortes de 67.13% y entre lluvias y Nortes de 55.69%.

Utilizando los valores de porcentaje de coberturas bentónicas y de tipo de sustrato de cada estación por temporada, se hicieron tres análisis aglomerativos jerárquicos (figura 4), uno

Tabla 2. El análisis SIMPER utilizando una matriz de similitud de Bray-Curtis, definió las variables que contribuyen a la similitud en cada temporada.

SECAS		
Porcentaje de Similitud = 47.64		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Algas Rojas	48.41	48.41
Arena	20.89	69.30
Algas Fil/Par	13.71	83.01
LLUVIAS		
Porcentaje de Similitud = 41.11		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Arena	62.36	62.36
Algas Verdes	16.14	78.50
Algas Rojas	14.31	92.81
NORTES		
Porcentaje de Similitud = 61.60		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Arena	92.76	92.76

Tabla 3. El análisis SIMPER utilizando una matriz de similaridad de Bray-Curtis, definió las variables que contribuyen a la disimilaridad entre temporadas.

SECAS y LLUVIAS		
Porcentaje de Disimilaridad = 61.31		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Arena	33.20	33.20
Algas Rojas	24.66	57.86
Algas Fil/Par	14.70	72.56
Algas Verdes	12.20	84.76
Sedimento	8.73	93.49
SECAS y NORTES		
Porcentaje de Disimilaridad = 67.13		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Arena	42.28	42.28
Algas Rojas	22.59	64.86
Algas Fil/Par	12.50	77.36
Sedimento	10.12	87.48
Algas Verdes	8.55	96.03
LLUVIAS y NORTES		
Porcentaje de Disimilaridad = 55.69		
Cobertura Bentónica	Contribución (%)	% AC
Arena	42.06	42.06
Algas Rojas	17.91	59.96
Algas Verdes	12.91	72.88
Sedimento	12.79	85.67
Algas Fil/Par	6.78	92.45

para cada temporada climática, y se obtuvo un esquema de clasificación de 6 clases constantes a través de las tres temporadas climáticas:

Paisaje 1. Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de algas rojas con un promedio de 42.93% (secas), 10.07% (lluvias) y 4.52%

(Nortes), con una proporción menor de cobertura promedio de algas verdes con 10.58% (secas), 12.9% (lluvias) y 3.26% (Nortes). Estas coberturas están asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 5.45% en secas, a 63.72% en lluvias y a 85.97% en Nortes (figura 5a, Material Adicional Tabla 1).

Paisaje 2. Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de la asociación de algas pardas y filamentosas con un promedio de 23.22% (secas), 22.12% (lluvias) y 11.92% (Nortes), con una proporción menor de cobertura de algas verdes con 6.01% (secas), 1.73% (lluvias) y 2.12% (Nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 31.68% en secas, a 24.33% en lluvias y 81.73% en Nortes (figura 5b, Material Adicional tabla 2).

Paisaje 3. Arenal.

El paisaje 3 está comprendido por extensos arenales sin cobertura algal (figura 5c).

Paisaje 4. Algas verdes sobre arena.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de algas verdes con un promedio de 4.81% (secas), 40.98% (lluvias) y 12.65% (Nortes). Estas algas se encuentran asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 31.68% en secas, a 24.33% en lluvias y 81.73% en Nortes (figura 5d, material adicional tabla 3).

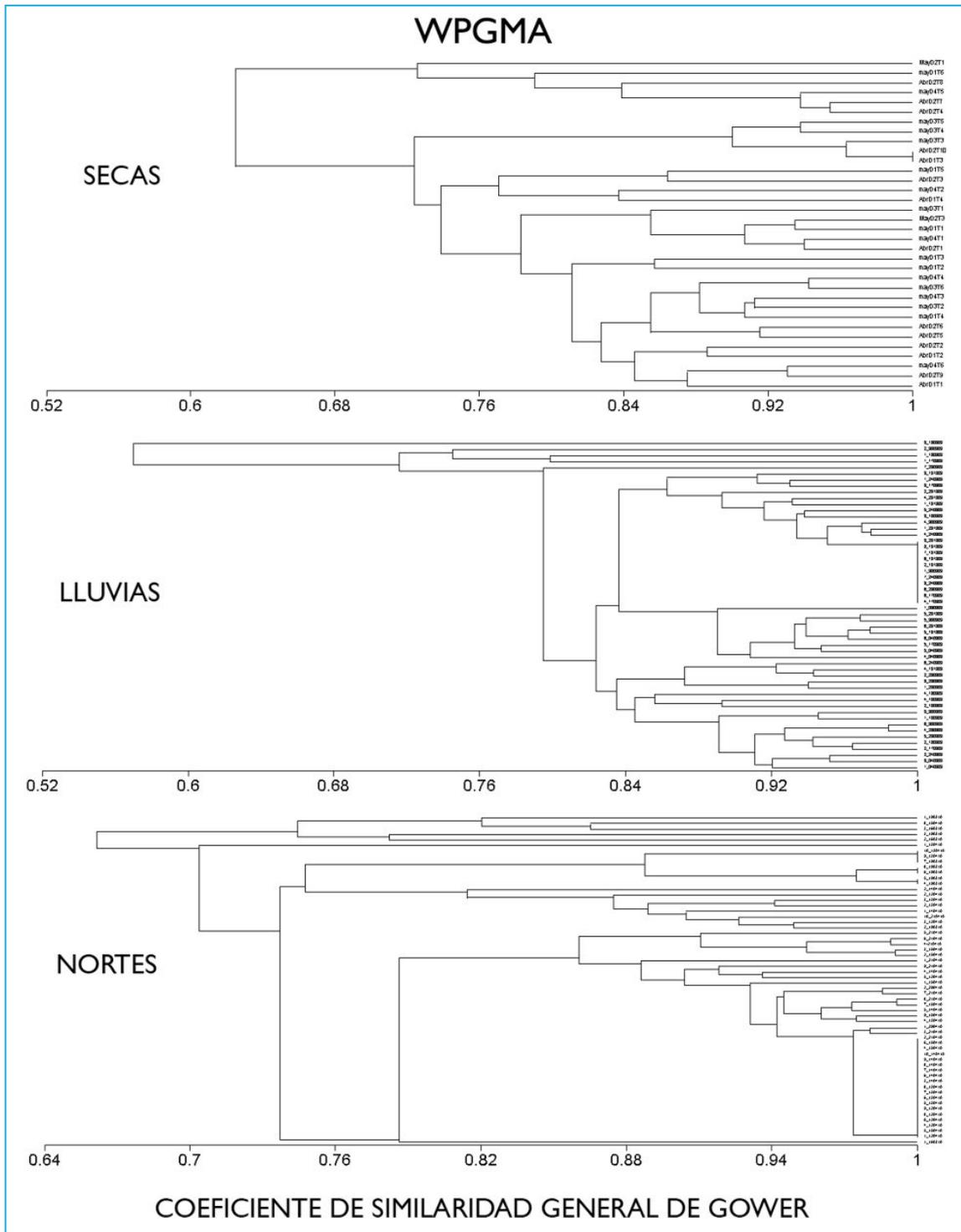


Figura 4. Análisis aglomerativos jerárquicos de las estaciones por temporadas de secas, lluvias y Nortes.

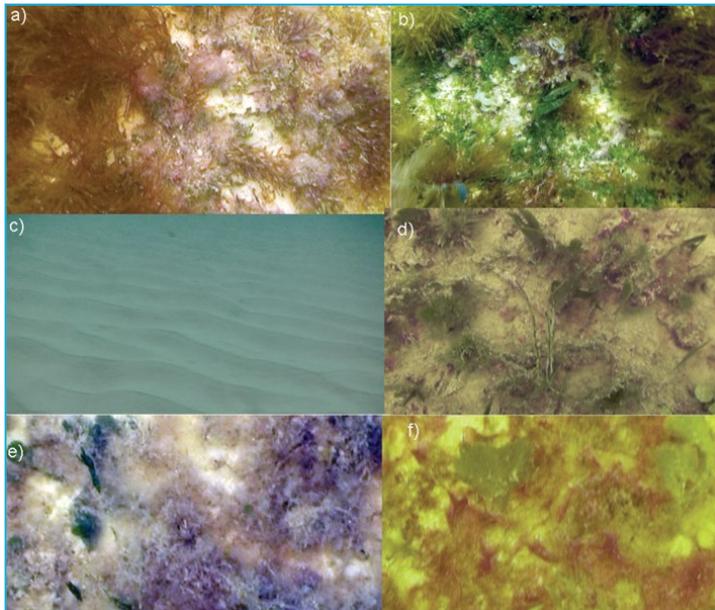


Figura 5. Vista representativa de los paisajes con detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato. a) Paisaje 1, Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena, b) Paisaje 2, Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena, c) Paisaje 3, Arenal, d) Paisaje 4, Algas verdes sobre arena, e) Paisaje 5, Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento fino, f) Paisaje 6, Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

Paisaje 5. Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento fino.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de algas rojas con un promedio de 39.92% (secas), 37.92% (Lluvias) y 27.56% (Nortes), con una proporción menor de cobertura de algas verdes con 28.88% (secas), 13.24% (Lluvias) y 4.72% (Nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato lodo, que fluctúa de 24.71% en secas, a 18.54% en Lluvias y 34.73% en Nortes (figura 5e, material adicional tabla 4).

Paisaje 6. Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de la asociación de algas Pardas y Filamentosas con un promedio de 14.81% (secas), 11.01% (Lluvias) y 36.35% (Nortes), con

una proporción menor de cobertura de algas verdes con 34.62% (secas), 13.24% (Lluvias) y 2.69% (Nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 15% en secas, 24.49% en Lluvias y 49.04% en Nortes (figura 5f, material adicional tabla 5).

Una vez definidos los paisajes constantes entre temporadas se analizó la similitud y las diferencias (SIMPER) entre los paisajes en cada temporada utilizando las bases de datos de coberturas por estaciones asociadas a cada paisaje. Este análisis definió las variables más importantes que contribuyen a la disimilaridad entre los paisajes y entre las temporadas (material adicional tabla 6).

Por medio de un análisis MDS

se exploraron las tendencias de similitud de las coberturas de los paisajes entre las tres temporadas (figura 6). Utilizando todas las variables de sustrato y cobertura se representaron la evolución de cada uno de los seis paisajes a través de las tres temporadas climáticas. El estrés del diagrama MDS es de 0.05 lo cual indica un ajuste muy bueno en la representación de cada uno de los paisajes en las tres temporadas.

Para el análisis de las comunidades de peces se obtuvieron las biomásas por especie por estación, y tomando las estaciones asociadas a cada paisaje se obtuvieron los valores de biomasa promedio por paisaje, así como la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon y el valor de equidad (figura 7 a,b,c). Para la temporada de secas la riqueza total de especies

observada fue de 25, para la temporada de lluvias fue de 36 y para la de Nortes fue de 21; este comportamiento es similar al de los valores totales de biomasa por temporada.

La relación de las comunidades de peces con su ambiente se abordó con un análisis de redundancia (RDA), en el cual se utilizaron los valores de biomasa total por especie y los valores de cobertura bentónica y substratos por paisaje. Este análisis se realizó con los datos respectivos para cada temporada (figura 8 y Material Adicional Figuras A1–A3). En los diagramas de dispersión (triplots) se pueden observar las diferentes especies de peces observadas y su relación a los tipos de fondos, y la magnitud de la importancia de la

asociación. También se denota la posición de los diferentes paisajes en relación a las coberturas bentónicas y la importancia de la asociación de las especies de peces a los paisajes.

El mapa batimétrico se generó a utilizando la técnica de predicción espacial GRASP, con las bandas 1, 2 y 3 de una imagen de satélite Landsat ETM+ como variables predictivas y los registros de profundidad (x,y,z) como variable de respuesta. Se obtuvo un mapa predictivo de batimetría (Figura 9) a la misma resolución espacial de la imagen de satélite (30 x 30m /pixel), la ventaja de este producto es la posibilidad de expandir la predicción a un área mayor que la de los muestreos y, al estar basada en las bandas de

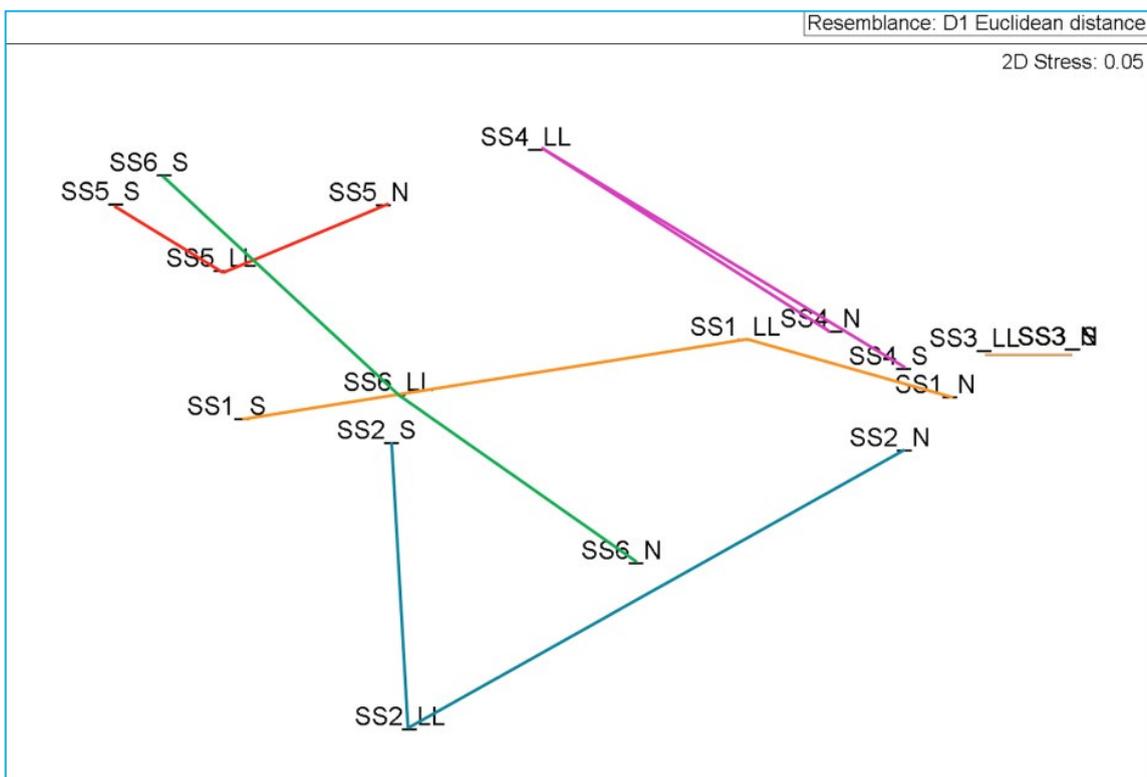


Figura 6. Diagrama MDS que representa la evolución de las coberturas de los seis paisajes (SS1, SS2, etc), en las tres temporadas (SSx_S -secas- SSx_LL -lluvias- y SSx_N -Nortes-). En el diagrama, la evolución los paisajes a través de las distintas temporadas se denota por líneas de colores.

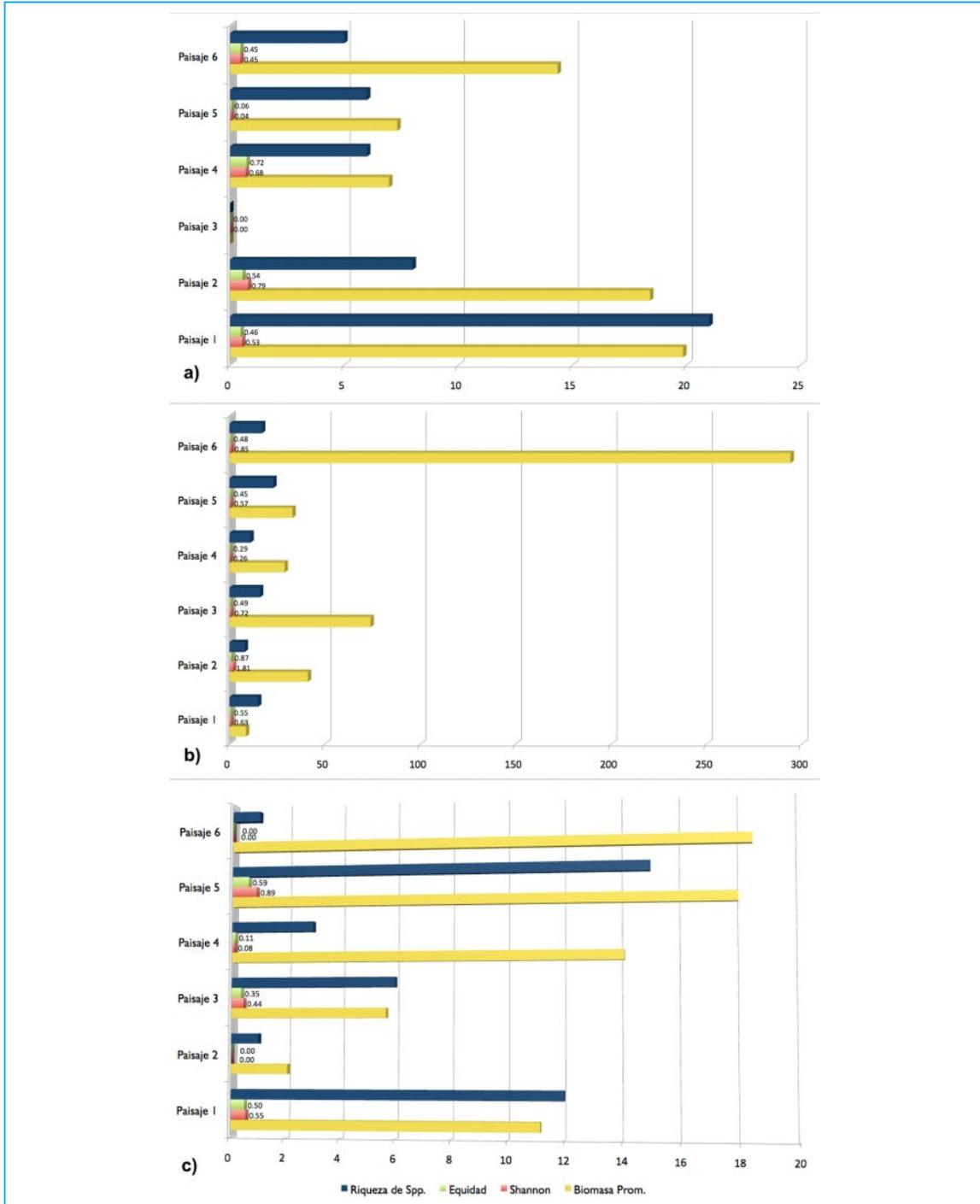


Figura 7. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de secas. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de lluvias. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de Nortes.

la imagen satelital se mantienen los patrones espaciales del fondo. Una de las desventajas es la incertidumbre en la predicción producida por la turbidez del agua.

Utilizando la misma imagen satelital Landsat 7 ETM+ del año 2000 se realizó una clasificación supervisada utilizando las estaciones de campo como semillas para definir las firmas espectrales de cada uno de los seis paisajes para definir las firmas espectrales de cada uno de los seis paisajes y se obtuvo un mapa temático a una resolución espacial de 30 x 30m /píxel (figura 10).

DISCUSIÓN

El análisis MDS de las coberturas bentónicas de cada estación en cada temporada, estableció una ligera separación entre temporadas; este resultado se confirmó a través del análisis ANOSIM que estableció la existencia de diferencias significativas entre las temporadas de lluvias y secas con la temporada de Nortes. El análisis SIMPER posterior entre temporadas estableció que la variable constante que proporciona similitud es el sustrato arena, y la disimilitud está dada por la cobertura de algas rojas y filamentosas/pardas.

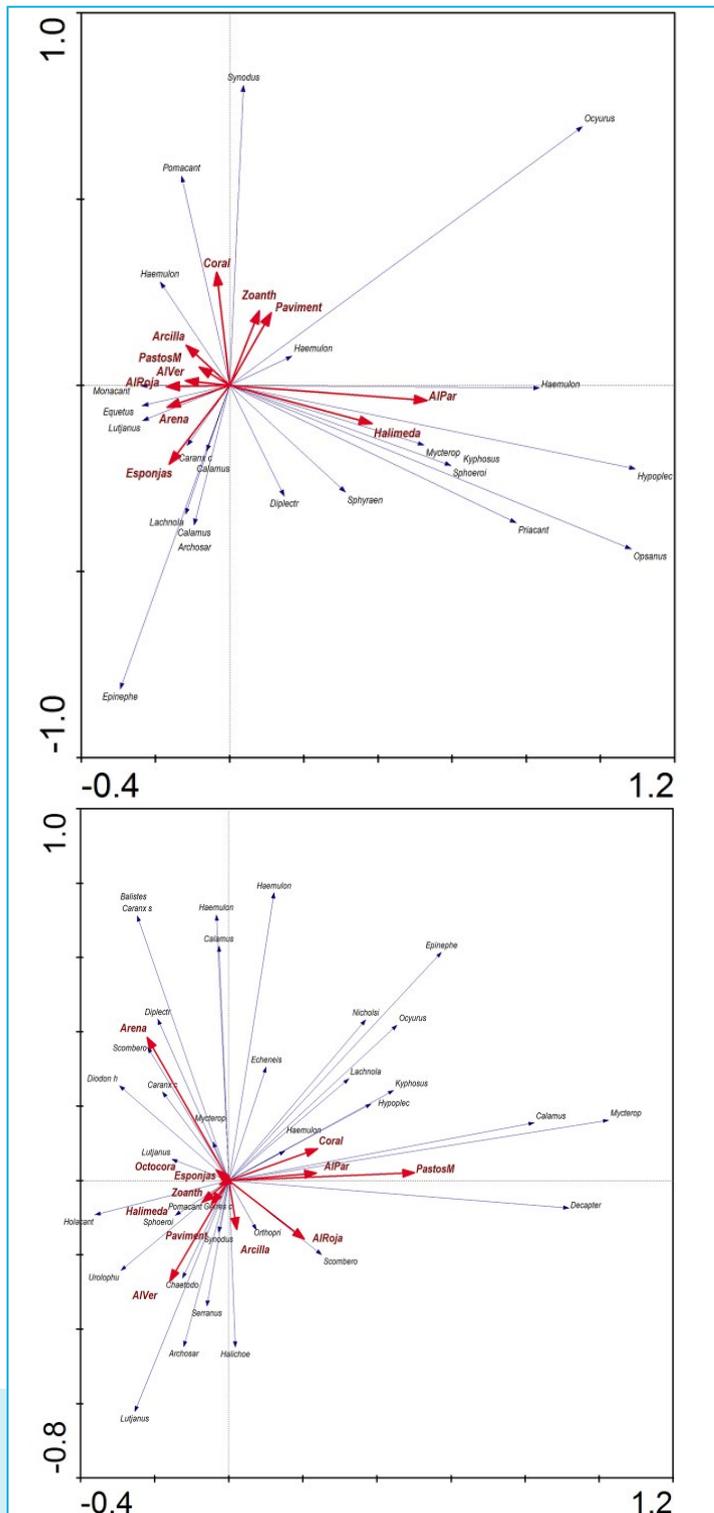


Figura 8. Biplots generados en el análisis RDA para relacionar las especies de peces a las variables ambientales (coberturas y tipos de fondo).

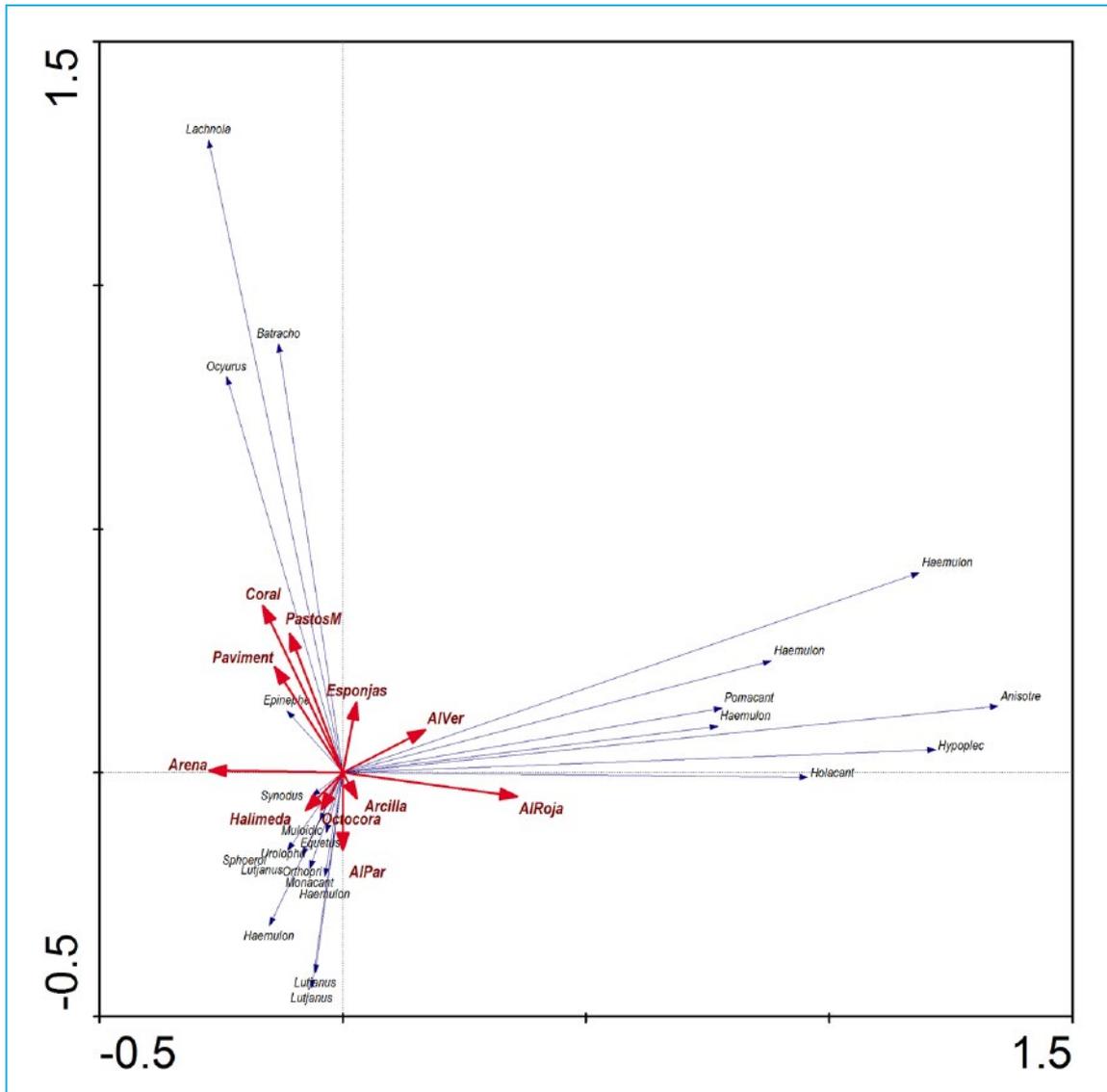


Figura 8. Biplots generados en el análisis RDA para relacionar las especies de peces a las variables ambientales (coberturas y tipos de fondo).

En el análisis temporal de cada uno de los 6 paisajes definidos a través del análisis aglomerativo, se puede observar la similitud de los paisajes, que en términos generales, en cada temporada está por encima del 0.7. Lo que denota la relativa homogeneidad del fondo marino en la plataforma frente a Sisal. Posteriormente en

el análisis de trayectorias de cambio temporal de cada paisaje (MDS), se puede observar que el substrato arenoso es predominante a través del tiempo (el paisaje 3 de Arena, es el que menos cambia a través del año), con algunas zonas con presencia de sedimento fino (arcilla), y las diferencias entre paisajes y temporadas están

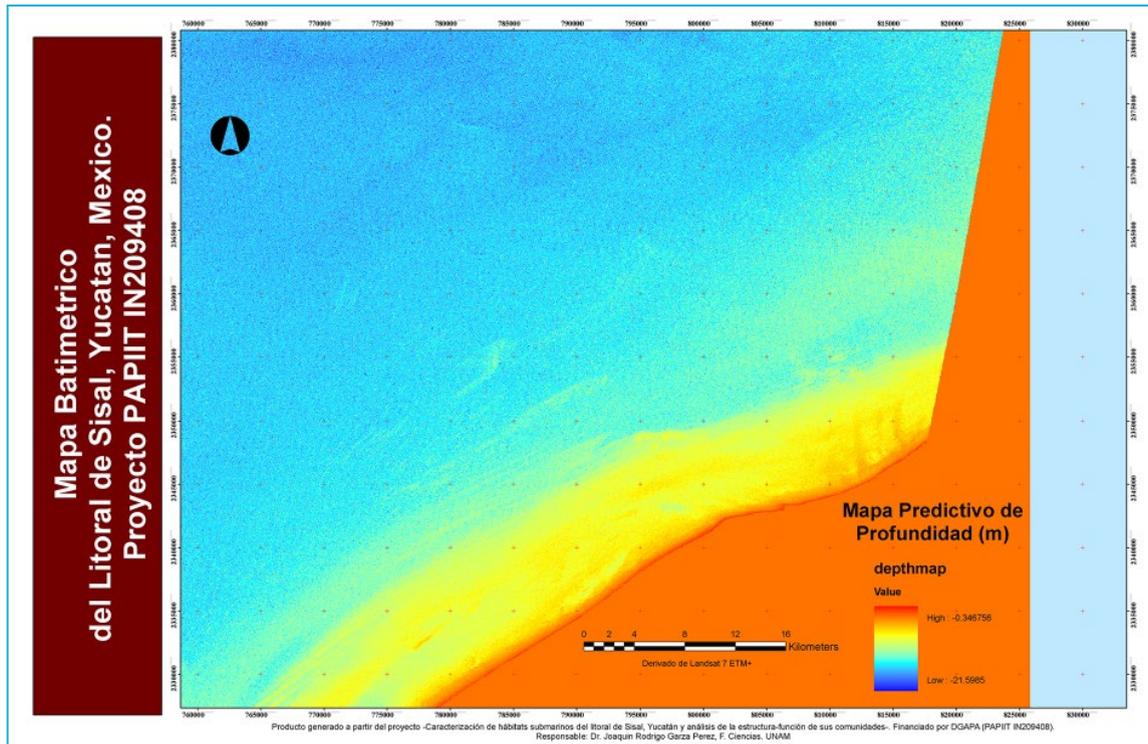


Figura 9. Mapa predictivo de profundidad del litoral de Sisal Yucatán, generado por medio de GRASP, con una resolución espacial de 30 x 30 m /pixel.

dadas principalmente por el tipo y la cantidad (cobertura) de algas, pero éstas fluctúan a través de las temporadas, siguiendo el patrón del nivel de irradiación solar y energía del oleaje. Durante secas, cuando la energía del oleaje es mínima y la irradiación solar es máxima, se expanden las coberturas algales, principalmente las algas pardas/filamentosas y se comienzan a desarrollar los doseles (algas rojas). Durante la época de lluvias los doseles se hacen más densos, por influencia de la surgencia de la corriente del Caribe. Y durante la época de Nortes, cuando comienza a disminuir la cantidad de irradiación solar y aumenta la energía del oleaje, los doseles de algas rojas y pardas/filamentosas, pobremente fijados al substrato arenoso, son removidos y una parte se descompone en el agua y otra

parte llega a las playas de la región. Esta energía del oleaje crea en la temporada de Nortes un gran desierto de arena, en donde los únicos organismos bentónicos que permanecen son aquellos que tienen buen anclaje, como las algas calcáreas articuladas (Gen. Halimeda), corales, octocorales y esponjas, que se asocian a fondos duros (rojas, pavimento calcáreo) y con poca cobertura de arena. Esta relativa homogeneidad paisajística corresponde a lo descrito por Logan (1969) cuando establece la extensión espacial del tapete Progreso. Aunque a pequeña escala, como se ve en los análisis, sí existen diferencias locales que definen la dinámica temporal de las coberturas en base a la presencia o ausencia de porciones de pavimento calcáreo que tiene la función ecológica de substrato

favorable al asentamiento y anclaje de organismos bentónicos.

Las comunidades de peces, por su parte mantienen patrones similares a través de las tres temporadas asociadas en general a las mismas variables de cobertura y tipos de fondo, y las fluctuaciones temporales en biomasa corresponden a las fluctuaciones observadas en otros estudios de peces asociados al bentos (Randall 1967, Roberts 1991, Pérez *et al.* 1996), aunque en este caso las biomásas promedio registradas en cada paisaje, son extremadamente bajas (10g/100m² para la temporada de secas, 77g/100m² para lluvias y 13g/100m² en Nortes). Estas biomásas tan bajas se relacionan a factores ecológicos como la ausencia de refugios

y estructura tridimensional en el fondo, que impide la acumulación de biomasa de peces y otras especies. Y se relacionan a factores asociados a la mortalidad y la extracción, la primera por el evento de marea roja masiva en el litoral yucateco, el año previo (2007), y a la sobreexplotación pesquera del litoral por parte de la flota ribereña y los pescadores deportivos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En vista de los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, se emiten las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuros estudios en el área.

Los productos batimétricos generados por este proyecto constituyen una base de

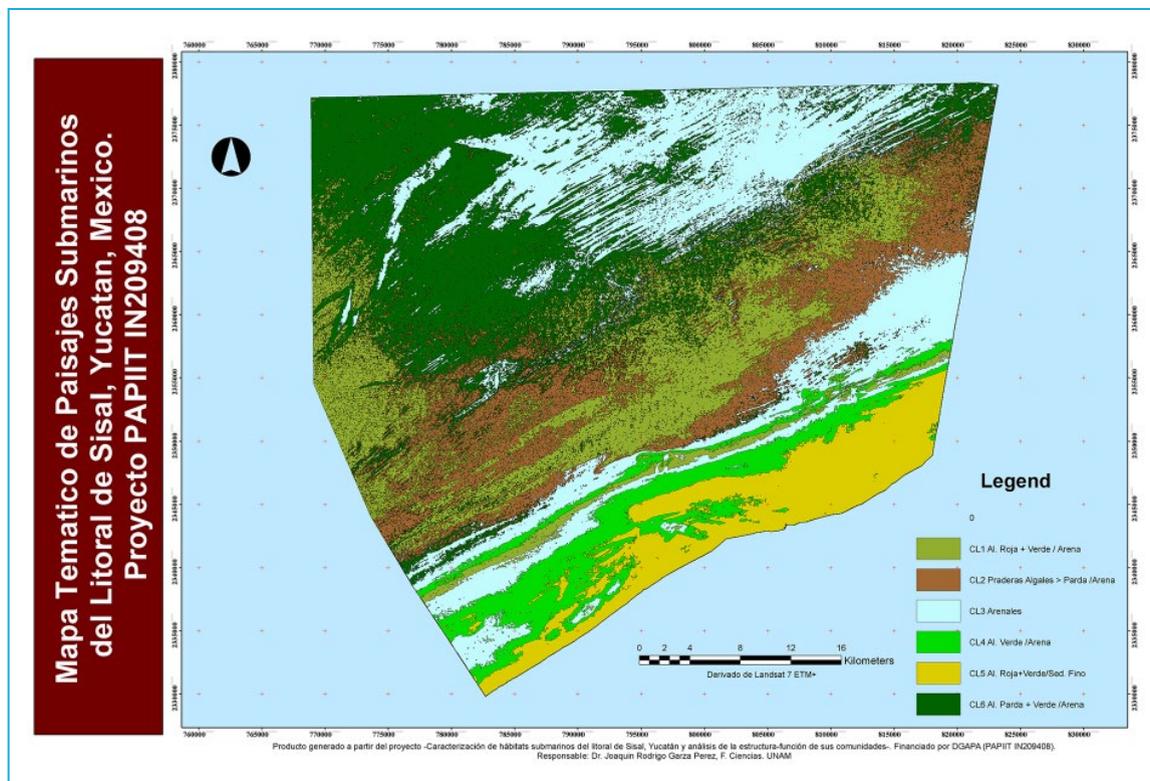


Figura 10. Mapa temático de los paisajes submarinos de Sisal, derivado de la clasificación supervisada de una imagen Landsat ETM+ con una resolución de 30 x 30 m/píxel.

información muy valiosa y usados en conjunto con el mapa temático de paisajes submarinos, se pueden plantear con más objetividad diseños de muestreo con intereses específicos.

La variable más importante a la que se asociaron tanto biomasa como riqueza de especies de peces es la complejidad del hábitat. En la zona litoral de Sisal, con su fondo marino de origen sedimentario, de topografía homogénea y suave pendiente esta complejidad está dada por la cobertura de algas que fluctúa de temporada a temporada climática y está completamente asociada a las condiciones ambientales de esas temporadas, tales como irradiación solar, temperatura, nubosidad, velocidad del viento, velocidad de corrientes marinas, intensidad de oleaje, el *upwelling* de la corriente del caribe sobre la plataforma de Yucatán, etc.

Para un estudio de las comunidades de peces más completo y con mayor precisión se recomienda el empleo de técnicas de captura, con apoyo de la comunidad de pescadores local, tomando en cuenta eficacias de los diferentes artes de pesca y el área de captura. Esto dará mejores estimaciones de biomasa, capacidad de carga del sistema, riqueza de especies y sobre todo de volúmenes de captura de las especies económicamente importantes.

Se recomienda enfocar este tipo de esfuerzos principalmente en las zonas pesqueras asociadas a las estructuras de carbonatos presentes en el litoral de Sisal, conocidas como “Bajas de Sisal,” que son las que funcionan como concentradoras de diversidad y biomasa durante todo el año.

Se desestima la utilización sistemática de imágenes satelitales, ya que se ha comprobado que las imágenes más útiles se obtienen durante la época de secas y que los patrones espaciales de distribución de los paisajes submarinos

permanecen constantes a lo largo del año y han sido constantes en al menos las últimas dos décadas. Por tanto una imagen clara y sin olas durante un período anual debe ser suficiente para cualquier objetivo de mapeo de fondos y/o predicción espacial.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el financiamiento del proyecto IN209408 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT). A UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias por todo el apoyo logístico y administrativo para la ejecución de este proyecto.

Al técnico M.C. Enrique Puerto Novelo por su apoyo para actividades de campo, logística y procesamiento de bases de datos.

Al Earth Resources Observation Center (EROS) del United States Geological Survey (USGS) por el servicio de acceso a imágenes LANDSAT de archivo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Arias-González JE, Done TJ, Page CA, Cheal A, Kininmonth S & Garza-Pérez JR. 2006. Towards a reefscape ecology: Relating biomass and trophic structure of fish assemblages to habitat at Davies Reef, Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 320:29-41.

Clarke KR, RH Green. 1988. Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. *Maine Ecology* .46: 213-226.

Clarke, K. R. & R. M. Warwick. 2001. Change in marine communities. An approach to statistical analysis and interpretation. Primer-E Ltd. Plymouth Marine Laboratory.

Costanza R, Sklar FH, White ML. 1990. Modeling coastal landscape dynamics. *BioScience* 40: 91- 107

Fuentes-Yaco CD, AS de Leon, MA Monreal-Gomez, F Vera-Herrera. 2001. Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: the Palizada River in the southern Gulf of Mexico. *Marine and Freshwater Research*, (52): 735-744 pp.

Garza Pérez JR. 2004. Información y Manejo para la Protección de la Biodiversidad de la Barrera Arrecifal de México: Evaluación de variables, Modelación Espacial del Hábitat y SIG. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN, unidad Mérida.

Garza-Pérez JR, Lehmann A, & JE Arias-González. 2004. Spatial Prediction of Coral Reef Habitats: Integrating Ecology with Spatial Modeling and Remote Sensing. *Marine Ecology Progress Series* 269:141-152.

Garza-Pérez J.R. (2012) "Evaluación de Comunidades Bentónicas Arrecifales: Guía de Campo y Laboratorio." PIESACOM, UNAM. http://realreefs.sisal.unam.mx/wp-content/uploads/PageContent/Descargas/Manuales/PIESACOM_Gu%C3%ADa_Benthos_PE100910.pdf

Hastie T, Tibishirani R (1990) Generalized additive models. Chapman Hall, London

Legendre P, Galzin R & ML Harmelin-Vivien. 1997 Relating behavior to habitat: Solutions to the fourth-corner problem. *Ecology* 78 (2) 547-562

Lehmann A, Overton JMC, Leathwick JR (2002) GRASP: Generalized Regression Analysis and Spatial Predictions. *Ecological Modelling*, 157: 189-207

Logan W. 1969. Carbonate sediments and Reefs, Yucatán Shelf, Mexico. George Banta company, INC. Menasha, Wisconsin.36-41pp.

Núñez-Lara E, Arias-González JE, Legendre P (2005) Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: Testing models using a multi-scale survey design. *J Exp Mar Biol* 15 Ecol 324: 157-169. 16

Pérez, H., Galván, F. y Abitia, L. A. 1996. Variaciones temporales y espaciales en la estructura de la comunidad de peces de arrecifales rocosos del suroeste del golfo de California, México. *Ciencias Marinas*. 22(3): 273-294.

Randall, J. E. 1967. Food habits of reef fishes of the west Indies. *Studies in Tropical Oceanography*. Estados Unidos de América: Institute of Marine Sciences, University of Miami.

Robertson, D. R. 1991. The role of adult biology in the timing of spawning of tropical reef fishes. The ecology of fishes on coral reefs. USA. Academic Press.

ter Braak, C. J. F., and P. Smilauer. 1998. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (version 4). Microcomputer Power (Ithaca, NY USA) 352 pp.

Tunnell JR. Jr. 1988. Regional comparison of southwestern Gulf of Mexico to Caribbean Sea coral reefs. *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, (3):303-308pp.

Turner MG, Gardner RH, 1991. Quantitative methods in landscape ecology: an introduction. *Ecological Studies*, 82: 3-14

Turner MG, RH Gardner, RV O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. Springer Ed. New York, E.U.A.

Urban DL, O'Neill RV, Shugart, HH Jr. 1987. Landscape Ecology. *BioScience*, 37 (2) 119-127. Yee TW, Mitchell ND (1991) Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* 2: 587-602

MATERIAL ADICIONAL

<http://redoctober.sisal.unam.mx/PIESACOM/LANRESCSISAL>

ASOCIACIÓN DE ESPECIES ÍCTICAS A FONDOS MARINOS EN SITIOS DE PESCA RECREATIVA-DEPORTIVA FRENTE A SISAL, YUCATÁN

Vidal Hernández Laura, Rodrigo Garza Pérez, Xavier Chiappa Carrara, Daniel Arceo Carranza

RESUMEN

La pesca recreativa es una práctica que se ha popularizado en las últimas décadas en el estado de Yucatán, y Sisal es uno de los sitios importantes para esta práctica por la abundancia de estructuras submarinas, conocidas como Bajas de Sisal. Este manuscrito presenta un análisis sobre la diversidad y abundancia de peces asociados a coberturas bentónicas y tipos de fondo en seis sitios de pesca recreativa en estas bajas; con el fin de establecer bases para la conservación y el manejo adecuado de sus recursos pesqueros, especialmente de especies comerciales y deportivas clave. Se analizan dos temporadas climáticas (secas y lluvias) en 2015-2016, con muestreos mediante video transectos y censos visuales estacionarios. Los resultados muestran cierta homogeneidad en las asociaciones ícticas entre sitios y entre temporadas climáticas (sin diferencias significativas); sin embargo, algunas especies parecen mostrar preferencias con algunos elementos bentónicos. Se identificaron 33 especies de peces y solo 12 de ellas poseen importancia para la pesca comercial o recreativa. La mayoría de ellos en etapas juveniles. Los resultados de este estudio no indican la necesidad de estrategias de control pesquero diferenciado ente sitios, más bien apuntan a la necesidad de diseñar medidas de control de esfuerzo de la unidad en su conjunto. Es necesario identificar temporadas de presencia de organismos reproductores para las especies con importancia extractiva, como el boquinete, el abadejo, la barracuda, el coronado y los meros; y tal vez con ello podría pensarse en una medida de control temporal para la pesca en estos sitios.

Palabras claves: asociaciones ícticas, pesca recreativa, Bajas de Sisal.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras someras, prácticamente de todo el mundo, están sujetas a una amplia gama

de usos que gradualmente incorporan nuevas actividades emergentes asociadas a la recreación y el turismo. Por tanto, la presión extractiva

y de impacto a las comunidades ícticas de los sitios identificados por los pescadores como “ricas en peces” actualmente suman el efecto de la pesca comercial con la de pesca recreativa, en rápido incremento, y poco se sabe de cómo estas nuevas actividades pueden estar impactando ecológicamente los ecosistemas acuáticos en los que se realizan.

La pesca recreativa es definida como aquella realizada sobre animales acuáticos (principalmente peces) cuya captura no constituye el principal recurso para cubrir necesidades nutricionales mínimas de un individuo y generalmente no es vendida o comerciada en mercados domésticos, negros o exportada (FAO 2008). Cuando ésta se realiza con intención de participar en torneos se denomina pesca deportiva. La pesca recreativa es realizada en diversas zonas costeras y marinas del mundo y su beneficio no incluye sólo proveer de una oportunidad de esparcimiento estimulante para residentes y turistas, sino que genera una gran cantidad de ingresos y empleos a los prestadores de servicios, vendedores de equipo y autoridades locales (The Gulf of Mexico Alliance 2008, Fedler y Hayes 2008, Southwick Associates *et al.* 2008). Sin embargo, experiencias en costas del mundo muestran que esta actividad con creciente importancia (Ihde *et al.* 2011) involucra un gran número de usuarios y consecuentemente altos niveles de esfuerzo pesquero (Cowx 2002; Pitcher y Hollingworth 2002), incluso similares a los ocasionados por pesca comercial (Coleman *et al.* 2004, Cooke y Cowx 2006). Por lo que, en ausencia de adecuadas medidas de control, la pesca deportivo-recreativa también conlleva una serie de impactos biológicos en las especies explotadas y ecológicos a los ecosistemas acuáticos en los que se realiza (McPhee *et al.* 2002;

Coleman *et al.* 2004; Cooke y Cowx 2004, 2006; Lewin *et al.* 2006).

La ausencia de inventarios, evaluaciones de stocks, información sistemática pesquera o del estado de las zonas de captura no solo pone a las poblaciones extraídas por la pesca recreativa en un grado incierto de vulnerabilidad ante el incremento de la mortalidad por pesca, sino que dificulta el diseño de medidas precautorias para su adecuado manejo y conservación (FAO 1995, 1997). Ante ello, una alternativa indirecta para evidenciar el estado de impacto o deterioro ambiental en un sitio es realizar caracterizaciones de comunidades faunísticas y estimar algunas métricas, como los índices de diversidad taxonómica que evalúan riqueza de especies. Asumiendo que los sitios de baja distinción taxonómica promedio (Δ^+) o alta variación en la distinción taxonómica presentan mayores “impactos” en el ambiente (Warwick y Clarke 1995).

En la costa yucateca, la pesca recreativa-deportiva es considerada una actividad en franco crecimiento. En los últimos seis años, el número de tiendas de artículos pesqueros para esta actividad se ha sextuplicado en la ciudad de Mérida (actualmente existen 13), mientras que el número de yates atracados en las marinas de Yucalpetén y la cobertura de las mismas se ha duplicado desde el 2005 (para el 2015 se podían contar 1233 yates atracados en 7.88 ha de marinas). Entre los puertos más importantes para atracar embarcaciones recreativas en Yucatán destacan Yucalpetén (Progreso), San Felipe y Sisal.

Aunque actualmente Sisal no cuenta con marinas recreativas, desde sus playas se realizan al menos 10 torneos de pesca recreativa al año. Torneos llamados “de convivencia” donde empresas privadas organizan eventos de competencia para sus empleados con fines de

distracción y convivencia. Además, prácticamente todos los fines de semana del año, excepto los días con cierres de puerto, desde Sisal salen pescadores recreativos que rentan lanchas locales para pasar el día pescando en aguas someras. Los sitios de pesca más visitados por pescadores recreativos están a profundidades menores a 20 m, destacando los sitios al norte de Sisal, también llamados “Bajas de Sisal”. Estos sitios someros y cercanos a la costa, concentran diversidad y biomasa íctica durante el año (Garza 2010) y por ello son los preferidos tanto por pescadores comerciales en busca de especies “de escama” como por prestadores de servicios de pesca recreativa, para pescar usando línea o cordel y caña en diversas modalidades de pesca (trolleo, jigging, casting, pesca a media agua (anclado y al garete), pesca de fondo (anclado y al garete) y arpón).

Estudios previos (Garza 2010) describen los hábitats submarinos del litoral de Sisal desde el punto de vista de sus comunidades ícticas. En ellos se identificó que el número de especies y su biomasa asociada aumenta significativamente entre las temporadas de secas y lluvias y que la complejidad de hábitat es crucial en la selectividad de sitios entre las especies de peces. Además el autor reporta que existe alta homogeneidad entre el tipo y la proporción de cobertura en los seis paisajes submarinos constantes definidos durante el año y; finalmente, recomienda enfocar los esfuerzos de caracterización en aquellas zonas pesqueras asociadas a estructuras carbonatadas conocidas como “Bajas de Sisal” por las razones arriba expuestas.

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la diversidad íctica de los sitios preferentes de pesca deportiva y recreativa para favorecer el diseño de un esquema potencial

de monitoreo regular y, posteriormente, la elaboración de medidas precautorias para su conservación y manejo adecuado. Esta información será de utilidad a autoridades ambientales y de manejo pesquero locales y federales interesados en establecer medidas de control de impacto extractivo y de autoridades del sector turismo estatal con interés de promover la actividad de pesca recreativa-deportiva en la costa de Sisal.

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar asociaciones entre comunidades bentónicas y comunidades ícticas en sitios preferentes de pesca recreativo-deportiva frente a Sisal para explorar su potencial desarrollo y establecer bases para su conservación y manejo adecuado.

Objetivos particulares

1. Caracterizar la composición espacial y temporal de comunidades bentónicas.
2. Caracterizar la composición espacial y temporal de comunidades ícticas en dos temporadas climáticas del año (lluvias y secas).
3. Identificar las especies de peces con importancia comercial o para la pesca recreativa y estimar su talla.
4. Analizar las asociaciones entre comunidades bentónicas y comunidades ícticas en cada sitio preferente.
5. Determinar la diversidad íctica y las especies dominantes para cada uno de los sitios y temporadas climáticas.

METODOLOGÍA

Diseño muestral

Los sitios seleccionados para el análisis fueron aquellos más frecuentemente visitados o preferentes en las “Bajas de Sisal” según una batería

Tabla 1. Características de los sitios monitoreados en las Bajas de Sisal.

Sitio	Distancia a Sisal (km)	Profundidad promedio(m)	Visibilidad Lluvias (m)	Visibilidad Secas (m)	T °C Lluvias *	T °C Secas *
Arévalo 1 (A1)	21.39	15.8	5	5	21.1	25
Arévalo 2 (A2)	21.9	16.1	5	5	22	25
Arévalo 3 (A3)	22.2	16.1	5	5	22	25
Caracol 1 (Car1)	22.5	12.8	5	7	25	26.1
Caracol 2 (Car2)	19.2	13.1	3	7	25	26.1
Corona (Cor)	21.4	10.7	7	9	26	25

*Temperaturas medidas con una computadora de buceo Cressi Leonardo. Visibilidad estimada por buzos experimentados.

de coordenadas proporcionada por pescadores recreativos y prestadores de servicios de pesca recreativa de la localidad. Todos los sitios se encuentran entre los 19 y los 22 km de distancia desde el puerto de Sisal y sus características se muestran en la Tabla 1.

La colecta de datos se realizó en dos temporadas climáticas identificadas para el sureste del Golfo de México (Herrera-Silveira *et al.* 1995): la temporada de secas (febrero a mayo) con temperaturas del aire de 36-38 ° C y precipitaciones mínimas (0-30 mm), y la temporada de lluvias (junio a octubre) con precipitaciones de hasta 125 mm en promedio (para el mes de septiembre). La temporada de Nortes (noviembre a enero) se excluyó del monitoreo por razones logísticas (alto riesgo para la navegación). Los muestreos se realizaron entre las 9:00 y las 14:00 hr.

Se navegó hasta los sitios de interés, siguiendo las coordenadas proporcionadas por los pescadores, utilizando unidades manuales de GPS. Al llegar a las coordenadas, se arrojó un cabo con lastre en un extremo y una boya en el otro para señalar el punto exacto de descenso. Se descendió utilizando equipo SCUBA por el cabo hasta el fondo y se realizó una exploración visual

rápida para localizar elementos donde los peces se congregan (rocas, pozas, cordilleras, estructuras coralinas o vegetación). Se estimó el rumbo magnético de tal elemento hacia su localización. Se fijó un transecto de 30 m de longitud (con una cinta métrica de PVC) al cabo de descenso y se nadó en dirección del elemento seleccionado soltando toda la cinta y siguiendo el rumbo con ayuda de un compás sumergible.

Al final de la cinta se registró la hora de llegada y estimó la visibilidad. A partir del primer avistamiento de peces, se permaneció en el punto referido por un intervalo de ocho minutos, tiempo durante el cual se realizó un censo visual estacionario para evaluación cuantitativa de comunidades de arrecifes de coral de acuerdo con Bohnsack y Bannerot (1986). Ésta consiste en registrar todos los individuos de peces a nivel de especie y estimar sus tallas dentro un cilindro imaginario, orientado entre el fondo y la superficie, de radio igual a la visibilidad en el sitio de muestreo (5 m de radio en promedio). Si se avistaba más de un individuo de la misma especie o un cardumen se registraba la talla menor, talla mayor y el número de individuos. Se registró el tiempo total de permanencia en el punto. Al

Tabla 2. Grandes grupos taxonómicos, géneros y especies de organismos de cobertura bentónica y sedimentos identificados por Garza (2010) en la costa frente a Sisal.

Grupo principal	Grupo taxonómico	Género o especie
Coral pétreo	Coral incrustante	<i>Siderea siderea</i> , <i>Siderastrea radians</i> , <i>Solenastrea hyades</i> , <i>Stephanocoenia mechelinni</i> , <i>Solenastrea bournoni</i>
Octocoral	Octocoral ramoso	<i>Pseudoplexaura spp.</i> , <i>Plexaurella nutans</i> , <i>Pterogorgia citrina</i>
Esponjas y tunicados	Esponja incrustante, esponja semiesférica y tunicados	<i>Cynachyra spp.</i>
Algas	Algas pardas	<i>Padina jamaicensis</i> , <i>Lobophora variegata</i> , <i>Dictyota ciliolata</i> , <i>Dictyota spp.</i> , <i>Sargassum fluitans</i> , <i>Sargassum platycarpum cervicornis</i> , <i>Dictyoperis jamaicensis</i>
	Algas verdes	<i>Penicillus pyriformis</i> , <i>Caulerpa sertularioides</i> , <i>Caulerpa serrulata</i> , <i>Neomeris annulata</i> , <i>Avrainvillea asarifolia</i> , <i>Udotea cyathiformi</i> , <i>Rhipocephalus phonix</i> , <i>Acetabularia calyculus</i> , <i>Bryopsis plumosa</i> , <i>Caulerpa mexicana</i> , <i>Caulerpa prolifera</i> , <i>Avrainvillea longicaulis</i>
	Algas calcáreas/ articuladas verdes	<i>Halimeda monile</i> , <i>Halimeda incrassata</i> , <i>Halimeda tuna</i> , <i>Halimeda discoidea</i>
	Algas rojas	<i>Halymenia duchassaingii</i> , <i>Bostrychia tenella</i> , <i>Wrightiella blodgettii</i> , <i>Digenia simplex</i> , <i>Lauencia papillosa</i> , <i>Acanthophora spicifera</i> , <i>Bryothamnion triquetrum</i> , <i>Gracilaria curtissiae</i> , <i>Eucheuma isiforme</i>
Tipos de fondo	Arcilla o arena fina	Arena arcillosa suelta
	Arena gruesa	Sedimento grueso de carbonatos
	Pedacería	Pedazos pequeños de roca y coral
	Fondo duro	Laja o roca

final del transecto se realizaron tomas panorámicas de 360° con la cámara submarina de video (COOLPIX AW130 Nikon) para tener un registro en apoyo a la identificación de las especies de peces.

Posteriormente, con ayuda de la cinta métrica se registró la cobertura del fondo (vivo o no vivo) en el intersección de cada metro usando una

simplificación de las categorías identificadas por Garza (2010, 2012) (Tabla 2). En lo posible se realizó un video transecto con la cámara submarina usando la cinta como referencia, aproximadamente a un metro de distancia del fondo en forma perpendicular.

Este procedimiento se repitió al llegar al punto de inicio pero con rumbo recíproco (+180°) o

perpendicular ($\pm 90^\circ$) con respecto al primer rumbo seleccionado, considerando las características del sitio de muestreo. Si era más conveniente, se buscó un nuevo elemento de referencia.

Análisis para caracterizar la composición temporal de comunidades bentónicas

Las tendencias de coberturas entre los sitios y entre las estaciones se exploraron empleando un análisis de escalamiento multidimensional (MDS), utilizando los datos de porcentaje de cobertura. La diferencia en coberturas entre sitios y temporadas se probó mediante un análisis de similitud (ANOSIM) empleando la similitud de Bray Curtis (Clarke y Green 1988). Estos análisis se realizaron con el programa PRIMER V6 (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research) (Clarke y Warwick 2001).

Análisis para caracterizar la composición temporal de comunidades ícticas en dos temporadas climáticas del año (lluvias y secas)

La obtención de datos se realizó empleando la técnica de censo visual estacionario para evaluación cuantitativa de comunidades de arrecifes de coral (Bohnsack y Bannerot 1986) dentro de un cilindro de aprox. 1177m^3 (altura promedio 15 m). Se registró el número de individuos por especie y sus rangos de tallas (mínimas y máximas) respectivas a cada uno de los extremos del transecto de 60 metros.

Posteriormente se calculó la biomasa por especie y por transecto (ambos cilindros del mismo transecto) expresada en gramos utilizando la fórmula:

Biomasa por individuo

$$W = a L^b$$

Donde W es el peso en gramos,

L es la longitud en cm

a y b son los parámetros de la relación peso longitud estimados por regresiones lineales y transformados logarítmicamente, que se obtuvieron de la base de datos en línea Fishbase www.fishbase.org (Froese y Pauly 2006). Cuando la especie no presentaba registros de estos parámetros en la base de datos, se utilizaron los parámetros de especies similares dentro del mismo género y en la misma área geográfica (Península de Yucatán, Golfo de México, Florida o el Caribe).

Los datos de registro de peces se utilizaron para calcular los valores del índice de diversidad de Shannon (H') y de Equidad de Pielou (J) por transecto, empleando las siguientes fórmulas:

Índice de Shannon:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i)(\log_2 P_i)$$

H' = índice de diversidad

S = número de especies

P_i = Abundancia relativa de la especie i

Índice de Equidad o igualdad

$$J = H' / H_{\max}$$

Donde:

J = Equidad o igualdad (rango de 0 a 1)

H = Diversidad de especies observada

H_{\max} = diversidad de especies máxima = $\log_2 S$

Para identificar las especies de peces con importancia comercial o para la pesca recreativa y estimar su talla se emplearon los estadísticos oficiales de producción pesquera de CONAPESCA (años 2014, 2015) y los reglamentos de los torneos locales (años 2014, 2015) para saber qué especies son preferentemente capturadas y/o vendidas. También de tales especies, se comparó cuáles fueron las tallas observadas y las tallas

a las cuales se ha registrado que tal especie alcanzó la madurez (Lm). Estos últimos datos se obtuvieron de FishBase.

Para obtener las asociaciones entre comunidades bentónicas y comunidades ícticas en cada sitio se realizó con un Análisis de Redundancia (RDA) con los datos de biomasa total de especies identificadas por transecto transformada por la raíz cuadrada y las variables ambientales (cobertura bentónica y tipos de fondo) empleando el programa CANOCO 4.5 .

Para determinar la diversidad íctica y las especies dominantes para cada uno de los sitios y temporadas climáticas, se calcularon los índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la distinción taxonómica (Λ^+) de acuerdo con Warwick y Clarke (1995). Estos índices consideran las distancias filogenéticas entre las especies y su cálculo se basa en matrices de presencia/ausencia; son independientes del tamaño de muestra, no están sesgados y están relacionados con la diversidad funcional y el impacto ambiental (Clarke y Warwick, 1998; Rogers *et al.*, 1999; Warwick y Light, 2002).

El índice de distinción taxonómica promedio (Δ^+) evalúa la riqueza de especies y las distancias taxonómicas entre cada par de especies utilizando un árbol de clasificación Linneano en cuya construcción, a cada nivel jerárquico de la clasificación se le asigna un valor entre 0 y 100 unidades, dependiendo del número de niveles involucrados en el análisis que permite ponderar la distancia entre la especie *i* y el nodo taxonómico común con la especie *j*.

Para comparar estadísticamente los sitios y las observaciones temporales (S = secas; LL = lluvias) se calcularon los índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la

distinción taxonómica (Λ^+), utilizando las siguientes expresiones (Clarke & Warwick 2001):

$$\Delta^+ = \left(\sum \sum_{i < j} \omega_{ij} \right) / [S(S-1)/2]$$

y

$$\Lambda^+ = \left[\sum \sum_{i < j} (\omega_{ij} - \Delta^+)^2 \right] / [S(S-1)/2]$$

Donde S es el número de especies presentes. La doble sumatoria se realiza sobre la serie $\{i = 1; j = 1, S; \dots, S\}$, de tal manera que $i < j$ y ω_{ij} es un término que pondera la distancia entre la especie *i* y el nodo taxonómico común con la especie *j*. A partir de las propiedades estadísticas de los valores de Δ^+ y Λ^+ mostradas por Clarke y Warwick (1998), es posible calcular los promedios, varianzas y los intervalos de confianza (IC_{95%}) de las estimaciones.

Las propiedades estadísticas de Δ^+ permiten comparar los valores de distinción taxonómica observados y su intervalo de variación esperado. Se realizan permutaciones al azar sobre el rango esperado de la media distinción taxonómica (Δ^+) y los valores obtenidos se comparan con los valores observados en cada muestreo. Se considera que los valores fuera de los límites de confianza del 95% salen significativamente de las expectativas.

RESULTADOS

Se realizó un monitoreo de 6 sitios dentro de "Las bajas de Sisal" en dos temporadas climáticas de los años 2015 y 2016: secas y lluvias. Se emplearon videotransectos de 60 m para el registro de coberturas bentónicas y sustrato predominante, y censos visuales estacionarios de peces.

1. Los análisis MDS para establecer patrones temporales de cobertura bentónica, muestran una agrupación de las estaciones conocidas

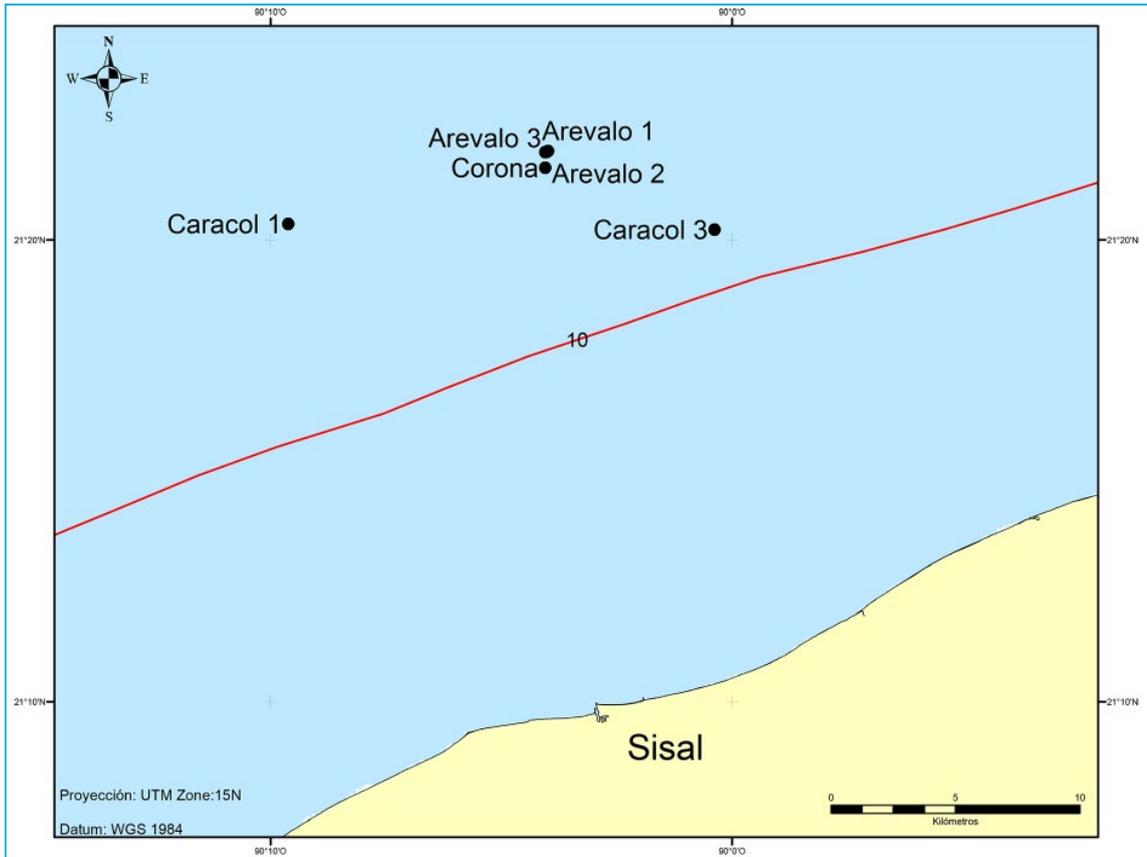


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en la costa de Sisal. Se muestra la isóbata de 10 m.

como Arévalo en temporada de lluvias (20% de similitud), las cuales presentaron la diversidad más baja, la cual fue influenciada por la alta dominancia de algunos cardúmenes, ya que son las especies que tuvieron la mayor abundancia de peces. No se muestra un patrón bien definido para los demás sitios. Las pruebas del análisis de similitud (ANOSIM) no arrojaron diferencias

significativas entre sitios ni entre temporadas climáticas. Tabla 3.

La Figura 2 muestra las coberturas bentónicas promedio en los sitios analizados y en ambas temporadas climáticas (II-lluvias, s-secas).

2. Se identificaron 33 especies de peces pertenecientes a 17 familias. En la tabla 4 se muestran las especies encontradas en los sitios estudiados en cada temporada climática.

3. Se identificaron en los sitios de muestreo once especies de interés comercial o deportivo-recreativo. La tabla 6 muestra los nombres comunes y científicos, las tallas observadas y el valor de longitud de primera madurez (Lm) reportado en Fishbase, así como la proporción de

Tabla 3. Estadístico de prueba R y nivel de significancia (n.s) resultante del Análisis de similitud (ANOSIM) entre los factores sitio y temporada climática.

Factor	R Global	n.s.
Sitio	0.01	0.423
Temporada climática	0.106	0.171

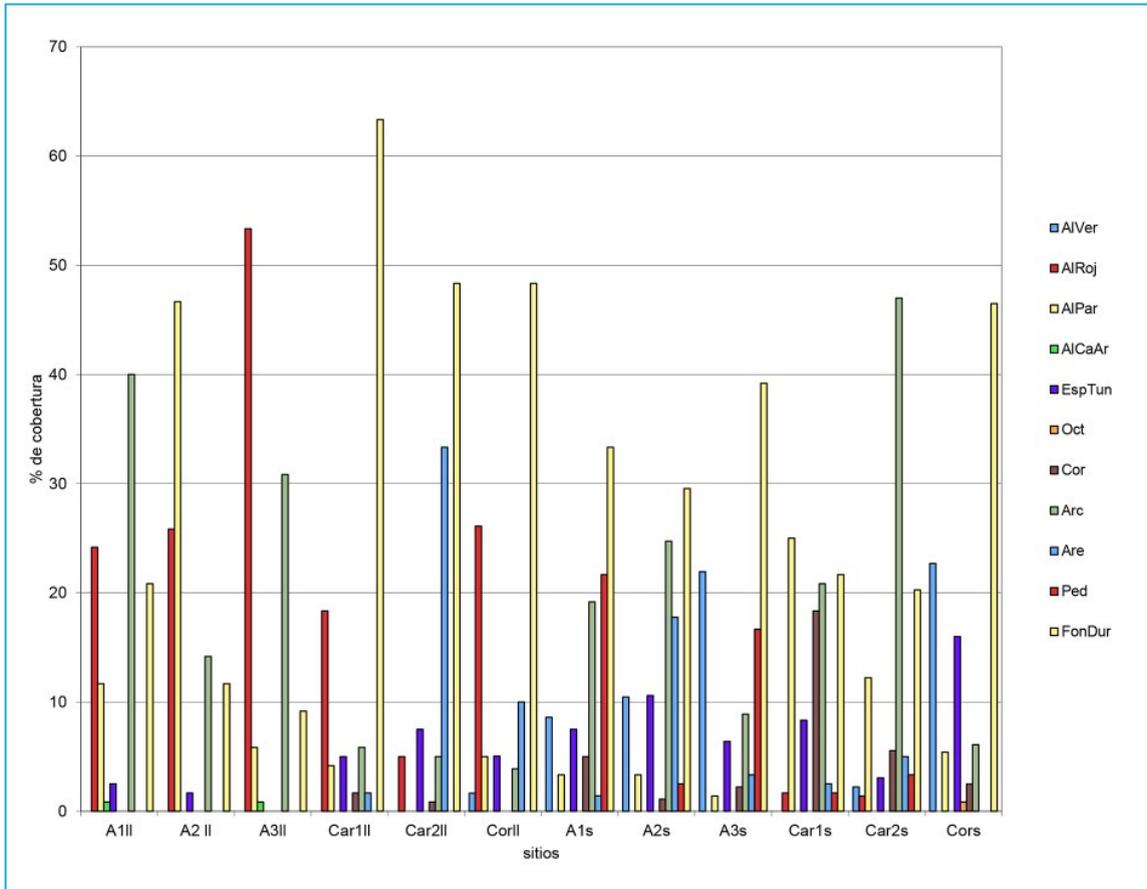


Figura 2. Coberturas bentónicas promedio en los sitios analizados y en ambas temporadas climáticas (II-lluvias, s-secas).

ejemplares observados con tallas menores o mayores a 1m.

4. La relación entre los peces y su ambiente fue abordada desde varios ángulos, el primero fue tratar de establecer diferencias entre temporadas y entre sitios de las comunidades bentónicas y de peces. Los análisis de similitud (ANOSIM) establecieron la ausencia de diferencias significativas entre sitios y entre temporadas tanto para comunidades de peces como para comunidades bentónicas. Bajo esta relativa homogeneidad de las comunidades, se aplicó un análisis de redundancia (RDA, Fig 3) para establecer la asociación de las diferentes especies a

las variables ambientales. En la tabla 7 se presentan los valores de los ejes de ordenación, en donde el primer y segundo eje de las variables ambientales son los que explican mejor la variación de las especies de peces (en más del 56%, con 0.401 y 0.165 respectivamente), que a su vez representan el 50 y el 21% de la explicación de la especies con el ambiente.

El diagrama de ordenación establece en ambos ejes algunas diferencias ambientales, presentes en estos sitios relativamente homogéneos, en los cuales predominan algunas características de tipo de fondo y de coberturas: a) fondos duros con doseles de macroalgas rojas y

Tabla 4. Listado de especies registradas en las Bajas de Sisal, se muestran datos de presencia (1) por sitios de muestreo y temporada climática.

Familia	Especie	Lluvias						Secas					
		A1	A2	A3	Carl	Car2	Cor	A1	A2	A3	Carl	Car2	Cor
Acanthuridae	<i>Acanthurus bahianus</i>												
	<i>Acanthurus chirurgus</i>					1	1						
Belonidae	<i>Strongylura notata</i>												1
Carangidae	<i>Carangoides bartholomaei</i>					1							
	<i>Caranx latus</i>			1				1					
	<i>Caranx ruber</i>					1							
	<i>Seriola dumerili</i>										1		
Chaetodontidae	<i>Chaetodon ocellatus</i>				1	1	1			1	1	1	1
Dasyatidae	<i>Dasyatis americana</i>			1				1			1		
Ephippidae	<i>Chaetodipterus faber</i>				1								
Haemulidae	<i>Anisotremus virginicus</i>		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>Haemulon aurolineatum</i>			1	1	1					1	1	1
	<i>Haemulon plumieri</i>			1									
Kyphosidae	<i>Kyphosus sectatrix</i>							1	1		1		1
Labridae	<i>Halichoeres bivittatus</i>		1		1	1	1					1	1
	<i>Lachnolaimus maximus</i>					1							
Lutjanidae	<i>Lutjanus synagris</i>		1			1		1	1	1			1
	<i>Ocyurus chrysurus</i>				1								
Pomacanthidae	<i>Holacanthus bermudensis</i>				1			1					1
	<i>Pomacanthus paru</i>		1	1		1	1		1		1	1	1
	<i>Pomacanthus arcuatus</i>												1
Pomacentridae	<i>damisela NI</i>			1						1		1	1
Scaridae	<i>Sparisoma chrysopterygum</i>						1						
Sciaenidae	<i>Equetus lanceolatus</i>		1	1		1		1	1		1		1
Serranidae	<i>Diplectrum formosum</i>			1	1						1		
	<i>Epinephelus morio</i>			1									
	<i>Epinephelus striatus</i>			1									
	<i>Hypoplectrus ecosur</i>						1						
	<i>Mycteroperca bonaci</i>		1										
	<i>Mycteroperca microlepis</i>					1			1	1		1	1
Sparidae	<i>Calamus bajonado</i>							1			1	1	
Sphyraenidae	<i>Sphyraena barracuda</i>							1				1	

Tabla 5. Parámetros comunitarios en las asociaciones de peces en los sitios preferentes de las bajas de Sisal en dos temporadas climáticas lluvias (ll), y secas (s).

Sitios	S	N	Índice de Equidad J'	Índice de diversidad H'(log 2)
A 1 ll	6	1142	0,1144	0,2049
A 2 ll	7	2119	0,1299	0,2528
A 3 ll	10	285	0,6587	1,517
Car 1 ll	12	361	0,934	2,321
Car 2 ll	8	204	0,8919	1,855
Cor ll	7	255	0,9331	1,816
A 1 s	5	54	0,7657	1,232
A 2 s	8	27	0,7287	1,515
A 3 s	7	152	0,6127	1,192
Car 1 s	11	416	0,5151	1,235
Car 2 s	8	128	0,6579	1,368

Tabla 7. Eigenvalores de los ejes representados en el diagrama de RDA, con porcentaje asociado de contribución a la varianza y valores de correlación entre las especies y las variables ambientales.

Ejes	1	2	3	4	Varianza
Eigenvalores	0.401	0.165	0.081	0.051	1.000
Correlaciones Spp-Ambiente	0.976	0.997	0.995	0.808	
% de Varianza acumulada	10	285	0,6587	1,517	
De Spp	40.1	56.6	64.7	69.8	
De relación Spp-Ambiente	49.9	70.5	80.6	87.0	
Suma de todos los eigenvalores		1.000	0,9331	1,816	
Suma de todos los eigenvalores canonicos		0.803	0,7657	1,232	
A 2 s	8	27	0,7287	1,515	
A 3 s	7	152	0,6127	1,192	
Car 1 s	11	416	0,5151	1,235	
Car 2 s	8	128	0,6579	1,368	

importancia comercial como *Epinephelus morio* y *Lachnolaimus maximus*.

5. Los resultados de diversidad íctica y las especies dominantes empleando los Índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la distinción taxonómica (Λ^+) en las especies

por sitio y temporada climática se muestran en la Tabla 8.

Los valores de distinción taxonómica reflejan la diversidad filogenética y no la riqueza de especies, por lo que reflejan la diversidad funcional del ensamble de especies, que se mantiene

Tabla 8. Índices de distinción taxonómica promedio (Δ^+) y de variación en la distinción taxonómica (Λ^+) en las especies de peces observadas (S- número de especies).

	S	Δ^+	Λ^+	Δ^+ (sig %)	Λ^+ (sig %)
LL-A1	6	62.38	0	100	62.3
LL-A2	10	67.9	345.21	50.6	21.1
LL-A3	8	61.05	47.6	100	54.2
LL-Carl	12	60.69	59.97	59.3	28.3
LL-Car2	7	62.38	0	97.9	39.1
LL-Cor	8	60.49	96.02	62.1	97.3
S-A1	7	73.13	288.83	7.9	41.4
S-A2	5	62.38	0	100	90.4
S-A3	7	71.36	389.57	26.4	13
S-Carl	8	59.17	138.62	30.4	84
S-Car2	11	60.07	95.61	33.9	85.9
S-Cor	12	61.6	184.45	91	84.4

temporada de secas, se encuentran por debajo de los límites de confianza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los fondos rocosos frente a Sisal son, junto con Madagascar y Serpiente, parte de un complejo arrecifal rocoso llamado Arrecifes de Sisal poco estudiado, descritos por Zarco-Perelló *et al.* (2013). Las Bajas de Sisal son visitados por más de 1300 pescadores en una flota comercial de 448 embarcaciones del Puerto de Sisal para la pesca de escama y pulpo (CONAPESCA); y su cercanía a la costa también los hace atractivos a diversos pescadores recreativos, de número desconocido, que en viajes de un día practican la pesca en superficie, media agua y de fondo. Este estudio analizó la diversidad y abundancia de peces asociados a coberturas bentónicas y fondos de algunos de estos sitios con el fin de identificar posibles evidencias de impacto derivado de la extracción pesquera.

Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre los sitios en cuanto a la composición de especies, ni que su abundancia varía entre temporadas climáticas. Esto es tal vez, debido a la cercanía entre sitios, no mayor a 5 km. Esto concuerda con las observaciones previas en el área de estudio (Garza, 2010), acerca de la homogeneidad tanto de los paisajes, como de las comunidades de peces. Los sitios de pesca analizados en términos generales son similares, aunque podrían existir diferencias en la disponibilidad de refugio (no evaluada en este estudio) que pudieran estar definiendo las ligeras variaciones (aunque no significativas) detectadas en la composición de las comunidades; sin embargo, algunos detalles entre sitios, al margen de la significancia estadística, sí pudieron resaltarse de este estudio:

a) Respecto a los parámetros comunitarios, el sitio Caracol 1 en la temporada de lluvias presentó la mayor diversidad, la mayor equidad y el número más alto de especies. Mientras que el sitio menos diverso y de menor equidad es el Arévalo 1 en la temporada de lluvias. Estas características (baja distinción taxonómica promedio (Δ^+) o alta variación en la distinción taxonómica), suelen asociarse con “impactos” en el ambiente. Esto nos daría un indicio de deterioro en tales sitios.

b) Arévalo 1 y Arévalo 2 son sitios importantes para *H. aurolineatum*, ya que se registraron cardúmenes de organismos juveniles de esta especie y por consiguiente son los que presentaron la mayor abundancia.

c) La mayoría de los pocos especímenes de las especies de interés comercial o deportivo que fueron registrados, como el boquinete, el abadejo, la barracuda, el coronado y los meros, eran organismos juveniles, es decir, por debajo de Lm (Tabla 6). Será por tanto, necesario investigar si esto se debe a que los sitios son hábitats de peces juveniles en las temporadas climáticas monitoreadas o al hecho de que los sitios presentan evidencias de sobrepesca. Actualmente no hay mecanismos oficiales en el Estado para monitorear las tallas de los ejemplares capturados por pescadores recreativos, pero el registro de tallas de especímenes durante los torneos de pesca recreativa en el Puerto de Sisal indica una alta proporción de juveniles de algunas especies (meros) (observaciones realizadas por L. Vidal). Es probable que en estos sitios se esté presentando una sobrepesca por crecimiento, ya que se estarían capturando reclutas antes de haber alcanzado la talla necesaria para reproducirse. Así mismo, será necesario identificar temporadas de presencia de organismos reproductores en las Bajas de

Sisal; dada la creciente demanda de pescadores recreativos en estos sitios buscando ejemplares de trofeo y la creciente pesca de adultos por la pesca comercial, también podría esperarse una posible sobrepesca por reclutamiento. Para ambos casos de sobrepesca, una medida de control temporal (veda) para la pesca en estos sitios, la implementación de un refugio pesquero o la implementación de controles de captura-liberación para la pesca de ejemplares juveniles por ambos tipos de pescadores podrían ser adecuadas. Sin embargo, la dificultad de la aplicación y ejecución rigurosa del control sobre la pesca durante una veda, limita la efectividad de este tipo de medidas de manejo pesquero, y una alternativa (controvertida) para un manejo más controlado de la actividad podría ser la disminución del esfuerzo pesquero tanto comercial como deportivo.

d) Este estudio apunta a nuevas preguntas de investigación como son: ¿Es la aparente homogeneidad de comunidades icticas en los sitios muestreados en las Bajas de Sisal resultado del similar esfuerzo pesquero comercial y recreativo? ¿Es necesaria una caracterización topográfica de los sitios para explicar con mayor claridad la presencia diferenciada de algunas especies de peces y de sus tallas? ¿Están las comunidades icticas de las bajas de Sisal particularmente impactadas por las pesquerías comerciales y recreativas en relación con otros sitios de pesca cercanos al puerto pesquero?

Finalmente, los resultados de este estudio no indican la necesidad de estrategias de control de extracción diferenciado entre sitios, más bien apuntan a la necesidad de diseñar medidas de control de esfuerzo pesquero de la unidad Las Bajas de Sisal en su conjunto. Sobre todo durante la presencia de organismos reproductores y casi reproductores; temporadas que serían

necesarias determinar para las especies con importancia extractiva. Con ello podría pensarse en una medida de control temporal o espacial para la pesca en estos sitios y la implementación de práctica de captura-liberación de organismos juveniles. Este escenario de manejo pesquero tentativo en pequeña escala espacial podría contribuir al esclarecimiento del conflicto sobre el impacto de la pesca recreativa y comercial en los juveniles de mero en las inmediaciones de Sisal, contribuir al diseño de medidas de ordenamiento de la pesca recreativa (como lo propone el Plan de Manejo pesquero de mero (*E. morio*) y especies asociadas en la Península de Yucatán 2014_11_25) y crear una estrategia de conservación de la diversidad ictica de la zona que contribuya a aumentar la resiliencia de las comunidades pesqueras ante las variaciones de precio de productos pesqueros de demanda internacional (como el pulpo, la langosta y el pepino de mar), principal sustento de su economía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este manuscrito agradecen al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) Convocatoria 2015, financiamiento bajo el cual se realizó el proyecto TA200115 La pesca deportivo-recreativa como una actividad emergente en el estado de Yucatán: caracterización y diagnóstico para su manejo (clave IA302115).

REFERENCIAS

- Bohnsack J.A. y S.P. Bannerot. 1986. A stationary visual census technique for quantitatively assessing community structure of coral reef fishes. NOAA Technical Report NMFS 41
- Clarke, K.R. y R.H. Green. 1988. Statistical design and analysis for a biological effects study. Mar. Ecol. Prog. Ser. 46.213-226

- Clarke KR y RM Warwick. 1998. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology* 35:523-531.
- Clarke KR y RM Warwick. 2001. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series* 216:265-278.
- Coleman, F. C., W. F. Figueira, J. S. Ueland, y L. B. Crowder. 2004. The impact of United States recreational fisheries on marine fish populations. *Science*, 305: 1958-1960
- Cooke, S.J. y I.G., Cowx. 2004. The role of recreational fishing in global fish crises. *Bioscience* 54, 857-859
- Cooke, S.J. y I.G. Cowx. 2006. Contrasting recreational and commercial fishing: searching for common issues to promote unified conservation of fisheries resources and aquatic environments. *Biol. Conserv.* 128, 93-108.
- Cowx, I. G. Recreational Fishing. 2002. In: *Handbook of Fish Biology and Fisheries Band 2* (Hart, P., and J. Reynolds, Eds.). London: Blackwell Science pp. 367-390
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations 1995. Código de Conducta para la Pesca Responsable. Naciones Unidas. En: <http://www.fao.org/fishery/code/es>
- FAO. 1997. Fisheries Management. FAO Fishery Resources Division and Fishery Policy and Planning Division. Technical guidelines for responsible fisheries. No. 4. Rome, FAO. 82 p.
- FAO 2008. Code of practice for Recreational Fisheries. European Inland Fisheries Advisory Commission (EIFAC) 54 p. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/i0363e/i0363e00.htm>
- Fedler A y C. Hayes. 2008. Economic Impact for Recreational Fishing for bonefish, permit and tarpon in Belize for 2007. Bonefish and tarpon Trust. Disponible en: <https://www.bonefishtarpontrust.org/terms-of-use/research-reports.html>
- Froese, R. y Pauly, D. Editors. 2016. FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org. version (06/2016).
- Garza-Pérez, J.R. 2010 "Caracterización de hábitats submarinos del litoral de Sisal, Yucatán y análisis de la estructura-función de sus comunidades." Reporte Técnico DGAPA-PAPIIT, UNAM, 53 pag.
- Garza-Pérez J.R. 2012 "Evaluación de Comunidades Bentónicas Arrecifales: Guía de Campo y Laboratorio." PIESACOM, UNAM http://realreefs.sisal.unam.mx/wp-content/uploads/PageContent/Descargas/Manuales/PIESACOM_Gu%C3%ADa_Benthos_PE100910.pdf
- Gulf of Mexico Alliance NOAA. 2008. The Gulf of Mexico at a Glance. En: <http://stateofthecoast.noaa.gov/gulfreport.html>
- Herrera-Silveira J, Ramírez J. y RD Sánchez. 1995. Lagunas costeras de Yucatán. *Avance y Pespectiva*, 14:219-230
- Ihde, T.F., Wilberg, M.J., Loewensteiner, D.A., Secor, D.H., Miller, T.J., 2011. The increasing importance of marine recreational fishing in the US: challenges for management. *Fish. Res.* 108, 268-276.
- Lewin, W.C., Arlinghaus, R., Mehner, T., 2006. Documented and potential biological impacts of recreational fishing Insights for management and conservation. *Rev. Fish. Sci.* 14, 305-367.
- McPhee, D. P., D. Leadbitter, and G. A. Skilleter. 2002. Swallowing the Bait: Is Recreational fishing in Australia ecologically Sustainable? *Pac. Conserv. Biol.*, 8: 40-51.
- Pitcher, T.J., Hollingworth, C.E., 2002. Fishing for fun: where's the catch? In: Pitcher, T.J., Hollingworth, C.s. (Eds.), *Recreational Fisheries: Ecological, Economic, and Social Evaluation*. Blackwell Science, Oxford, pp. 1-16.
- Rogers, S. I., Clarke, K. R., and Reynolds, J. D. 1999. The taxonomic distinctness of coastal bottom-dwelling fish communities of the North-east Atlantic. *Journal of Animal Ecology*, 68: 769-782.
- Southwick Associates, Inc. Nelson Resources Consulting, Inc. and FIRMUS Consulting. 2008. The Economic contributions of angles to the Los Cabos economy. The Billfish Foundation. 121 p. Disponible en: <http://www.igfa.org/images/uploads/files/TBF%20Cabo%20Economics%20Report-%20English.pdf>
- Warwick R.M. y K.R. Clarke. 1995. New Biodiversity measure reveals a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Mar.Ecol.Prog.Ser.* Vol 129:301-305
- Warwick, R.M. and J. Light 2002 Death assemblages of molluscs on St Martin's Flats, Isles of Scilly: a surrogate for regional biodiversity? *Biodiversity and Conservation*. 11:99-112.
- Zarco-Perelló, S, M. Mascaró, R. Garza-Pérez y N. Simoes. 2013. *Hidrobiológica*, 23(1):28-41



SECCIÓN 3

CONTAMINACIÓN HISTÓRICA POR HIDROCARBUROS EN EL PUERTO DE SISAL, YUCATÁN

Noreña-Barroso, Elsa; Iturria-Dawn Raquel Aidé;
Árcega-Cabrera, Flor

RESUMEN

Las zonas costeras tienen características que las hacen vulnerables a procesos de contaminación derivados de las actividades antrópicas que en ellas se realizan o en áreas cercanas. Los hidrocarburos son contaminantes orgánicos persistentes que representan un problema ambiental para las zonas costeras debido a sus numerosas fuentes y propiedades tóxicas que afectan a los organismos y producen cambios estructurales en los ecosistemas. No obstante, se tiene muy poca información disponible sobre la presencia de hidrocarburos en los principales puertos pesqueros de Yucatán, entre ellos el Puerto de Abrigo de Sisal (PAS), que tiene un programa periódico de dragado y el material extraído es utilizado para el relleno de playas a lo largo de la costa, sin que hasta el momento se haya determinado si pudiera ser un residuo peligroso. Por lo tanto, en septiembre de 2009, se recolectaron 6 núcleos sedimentarios para estudiar la historia de contaminación por hidrocarburos, determinándose los niveles de hidrocarburos alifáticos (alcanos C7 a C40) y de los 16 hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs) prioritarios para la EPA en el PAS. Se detectaron alifáticos entre el intervalo de carbonos C15 a C34 en las seis estaciones, presentando concentraciones totales de 0.8 a 12.3 µg/g, comparables con los valores reportados para otros sistemas costeros del Golfo de México y el Caribe. Los HAPs presentaron bajas concentraciones totales de 3.6 a 86.1 ng/g, con aportes de HAPs petrogénicos y pirogénicos, con niveles inferiores a los reportados en otras zonas costeras cercanas. Con los resultados obtenidos y de acuerdo a los niveles críticos establecidos por la NOAA, el Puerto de Abrigo de Sisal presenta niveles bajos de contaminación. Este estudio puede ser útil para justificar futuras investigaciones, programas de monitoreo, acciones de mitigación, etc., que permitan un desarrollo sustentable en la zona costera del estado de Yucatán.

Palabras claves: Contaminación, Hidrocarburos, HAPs, Sisal, Sedimentos.

INTRODUCCIÓN

Los ambientes costeros son especialmente susceptibles a los procesos de contaminación, ya que son sistemas energéticamente abiertos y altamente subsidiados por los ambientes adyacentes (terrestres, marinos y atmosféricos), con ciclos biogeoquímicos complejos, una alta productividad potencial y un gran número de usos desde el punto de vista humano (Føyn, 1969; Toledo, 1996). Por esta razón, las zonas costeras son las más afectadas por problemas de descargas de contaminantes, siendo las lagunas costeras y los estuarios los sistemas que sufren más alteraciones.

De la amplia gama de sustancias que entran a los sistemas costeros, los hidrocarburos destacan por su presencia a nivel mundial y por sus propiedades tóxicas. Este grupo de compuestos se clasifica dentro de los contaminantes orgánicos persistentes (COPs, por sus siglas en inglés); es decir, son sustancias lipofílicas, semivolátiles y resistentes a la degradación, que se bioacumulan y se biomagnifican a través de la red trófica, transportándose fácilmente en la atmósfera (INE 2004; USEPA, 2004).

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por átomos de hidrógeno y carbono. Se clasifican según su estructura química en alifáticos y aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos o n-alcenos son compuestos cuyos átomos de C e H se unen entre sí por medio de enlaces simples C-C, formando cadenas lineales y se les denomina hidrocarburos de cadena abierta o acíclicos (Calva, 1997; Chappín y Summerlin, 1998). Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs) están representados por una mezcla compleja constituida por compuestos de 2 o más anillos aromáticos fusionados que pueden presentar un arreglo lineal, angular y de racimo

(Boitsov *et al.*, 2009); como ejemplo se pueden mencionar compuestos conformados por dos anillos aromáticos como el naftaleno, anillos insaturados como el acenaftileno, de tres anillos como el fenantreno y el antraceno, y aquellos con más de tres anillos como el pireno, el fluo-ranteno, el criseno, entre otros (GESAMP, 1989).

Los hidrocarburos en el ambiente costero pueden provenir de diversas fuentes (UNEP/IOC/IAEA, 1991):

- Descargas de petróleo de manera natural o a través de actividades humanas.
- Liberación de hidrocarburos como resultado de la combustión parcial de combustible como gas, carbón, petróleo y madera; para transporte, calefacción y generación de electricidad.
- Formación de hidrocarburos a partir de incendios forestales y que son transportados al ambiente acuático por procesos aéreos y pluviales.
- Biosíntesis de ciertos compuestos por organismos marinos o terrestres.
- Transformaciones de diagénesis temprana que tienen como resultado la formación de hidrocarburos a partir de compuestos naturales biosintetizados que no son hidrocarburos.

Los hidrocarburos tienden a adsorberse a las partículas suspendidas y a depositarse en los sedimentos (Santschi *et al.*, 2001). Los sedimentos funcionan como reservorios de materia y energía en el ambiente acuático por lo que tienen un papel importante en los ciclos biogeoquímicos. Las columnas sedimentarias (núcleos) pueden ser utilizadas para estimar la historia y el alcance de la contaminación en estuarios y áreas costeras (Valette-Silver, 1993). Estos núcleos de sedimento permiten llevar a cabo la reconstrucción histórica de descargas de contaminantes a la zona costera, debido a la estratificación que



Figura 1. Estaciones de muestreo (E1-E6) en el Puerto de Abrigo de Sisal (PAS) en donde fueron colectados los núcleos sedimentarios para la determinación de hidrocarburos.

presentan con respecto al tiempo. La reconstrucción histórica de los contaminantes químicos antropogénicos es una herramienta que ha demostrado ser importante para mejorar las estrategias de manejo y conservación de las zonas costeras (Santschi *et al.*, 2001).

La información disponible en relación a contaminación por hidrocarburos en la zona costera de Yucatán es escasa, por lo que generar datos de concentración de estos compuestos en los sedimentos puede ser muy útil para la toma de decisiones, futuras investigaciones, programas de monitoreo, acciones de mitigación, etc., que permitan un desarrollo sustentable en dicha área. Más específicamente, además de su valor como asentamiento humano con vocación pesquera y turística, Sisal es una zona importante desde el punto de vista ecológico porque su franja costera brinda refugio a numerosas especies de flora y fauna bajo alguna categoría de protección, como por ejemplo las tortugas marinas y varias especies de aves residentes y migratorias. Además, el Puerto de Abrigo de Sisal tiene un programa de dragado aproximadamente cada dos años, en

el que el material recolectado es utilizado para el relleno de playas a lo largo de la costa, sin que hasta el momento se haya determinado si existe un riesgo por la acumulación y redistribución de contaminantes tóxicos.

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la contaminación histórica por hidrocarburos en el Puerto de Abrigo de Sisal (PAS), empleando núcleos sedimentarios para analizar la concentración de hidrocarburos alifáticos y de hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs) en cada sección de la columna sedimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El puerto de Sisal se localiza en el litoral noroeste del Estado de Yucatán entre las coordenadas 21°36' y 21°32' de latitud N y 87°32' y 90°25' de longitud O, en la región marítima del Golfo de México y pertenece al municipio de Hunucmá. Este puerto se encuentra a 63 km al noroeste de Mérida y a 25 km de Hunucmá, colindando al sur y al oeste con la Reserva Estatal de "El Palmar" y al noreste con el puerto de Chuburná.

De acuerdo con datos del INEGI (2010), Sisal cuenta con 1837 habitantes (940 hombres y 897 mujeres). En este puerto las actividades económicas de importancia son la pesca marina y la cacería de patos. Información proporcionada por la capitanía de puerto indica que la actividad pesquera se realiza con aproximadamente 468 embarcaciones de fibra de vidrio (escameras menores), que tienen al menos 17 pies de eslora y que cuentan con motores de 12 y 75 hp.

El refugio pesquero tiene un acceso protegido por escolleras: la oriente tiene una longitud de 271 m y la poniente de 218 m. Las áreas de agua están integradas por un canal de navegación de 30 m de plantilla y 3.6 m de profundidad, con una dársena interior incluyendo tres zonas de fondeaderos. Dispone de una longitud de atraque total de 490 m distribuidos en tres muelles, uno marginal y dos en peine. No presenta áreas de tierra asociadas formalmente a la actividad portuaria (Fig. 1).

En la entrada al puerto, como consecuencia del transporte litoral, se forman bajos que requieren de dragados de mantenimiento periódicos, por lo que el PAS cuenta con una historia de dragados que se remonta a 1987, con un registro aproximado de 13 dragados hasta la fecha en que se realizó este estudio. La Secretaría de Obras Públicas del gobierno del Estado de Yucatán se encarga del mantenimiento y conservación del canal de acceso y de la dársena del refugio pesquero. El material dragado es utilizado para el relleno de playas a lo largo de la costa, sin que hasta la fecha se haya determinado si contiene residuos peligrosos y cuáles son. Es una zona donde los tiempos de residencia de los compuestos presentes pueden estar determinados por las mareas, las corrientes superficiales inducidas por los vientos y también por eventos meteorológicos (Iturria-Dawn, 2012).

Colecta de las muestras

Se colectaron seis núcleos sedimentarios dentro del PAS (Fig. 1) en septiembre de 2009. Las coordenadas de las estaciones de muestreo se presentan en la Tabla 1. Se emplearon tubos de PVC de 1 m de altura y 8 cm de diámetro con los extremos sellados para la obtención de los sedimentos en cada estación de muestreo. Los núcleos colectados fueron debidamente etiquetados y almacenados en un ultracongelador a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior análisis.

Las muestras congeladas se enviaron al Laboratorio de Geoquímica Aplicada y Sedimentación del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, donde los núcleos sedimentarios fueron fraccionados, liofilizados y se determinó el contenido de carbono orgánico total (COT) y nitrógeno orgánico total (NT) en cada muestra. Los núcleos sedimentarios fueron fraccionados de tal manera que se obtuvieron los siguientes estratos: 0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm y 20-30 cm. Posteriormente, las muestras liofilizadas fueron enviadas de regreso al Laboratorio de Ciencias Ambientales Costeras de la Unidad de Química-Sisal de la Facultad de Química de la UNAM para realizar el análisis de hidrocarburos.

Análisis de hidrocarburos

La determinación del contenido de hidrocarburos en los sedimentos colectados se

Tabla 1. Ubicación de los sitios de muestreo en los que fueron colectados los núcleos sedimentarios en el Puerto de Abrigo de Sisal (PAS).

Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	Estación 6
N 21°09.701"	N 21°09.558"	N 21°09.533"	N 21°09.565"	N 21°09.656"	N 21°09.749"
W 90°02.680"	W 90°02.794"	W 90°02.909"	W 90°02.899"	W 90°02.918"	W 90°02.942"

realizó mediante una modificación del método CARIPOL/IOCARIBE (UNEP/IOC/IAEA, 1991), de acuerdo a los procedimientos reportados por Álvarez y Sáenz (2005) y Noreña-Barroso *et al.* (2007). Para el análisis de cada muestra, se pesaron 10 g de sedimento liofilizado y tamizado (a través de un tamiz de 500 μm). El protocolo utilizado consistió en los siguientes pasos: 1) Extracción en soxhlet durante 12 horas con diclorometano; 2) Saponificación del extracto con hidróxido de potasio en metanol al 20% (w/v) para obtener la fracción no saponificable; 3) Separación por cromatografía en columna con alúmina activada y elución secuencial con disolventes orgánicos para obtener una fracción de alifáticos (eluyendo con hexano) y una fracción de aromáticos (eluyendo con hexano y diclorometano); 4) Identificación y cuantificación de hidrocarburos por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM). Se empleó una mezcla de HAPs deuterados (naftaleno-d8, fenantreno-d10 y criseno d-12) como estándares surrogados y se analizaron blancos de reactivos y blancos fortificados para garantizar la calidad del procedimiento analítico.

Las fracciones obtenidas fueron identificadas y cuantificadas por CG-EM, empleando un cromatógrafo de gases 6850 marca Agilent y un detector de masas 5975B de la misma marca, con un muestreador automático 7683B Series. El equipo contaba con una columna capilar marca Zebron modelo ZB-5 (con 30 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno y 0.25 μm de grosor de película), empleando helio como gas acarreador.

Las condiciones cromatográficas para el análisis de los hidrocarburos alifáticos fueron, para el horno una temperatura inicial de 60 °C con una rampa de 6 °C /min hasta alcanzar una

temperatura final de 300 °C durante 35 min, con un tiempo de corrida de 75 min. Se realizaron inyecciones en modo split-less (0.5 min), con una temperatura del inyector de 280 °C. El análisis de masas se realizó por ionización por impacto electrónico en modo SCAN con una energía de 70 eV, con un intervalo de barrido de 50 a 600 m/z., con un tiempo de adquisición de 1.37 ciclos/seg. Los alifáticos fueron identificados de acuerdo a su tiempo de retención, empleando como estándar analítico una mezcla de alcanos (C7-C40 Saturated Alkanes Standard, 49452-U Supelco).

Las condiciones cromatográficas para el análisis de HAPs fueron, para el horno una temperatura inicial de 60 °C con una rampa de 6 °C/min hasta alcanzar una temperatura final de 290 °C durante 12 min, con un tiempo de corrida de 50 min. Se realizaron inyecciones en modo split-less (1 min), con una temperatura del inyector de 280° C. El análisis de masas se realizó por ionización por impacto electrónico en modo SIM (monitoreo selectivo de iones) con una energía de 70 eV, con un tiempo de adquisición de 4.53 ciclos/seg. Los HAPs se identificaron de acuerdo a su tiempo de retención y a la presencia de su ion molecular, empleando un estándar analítico conteniendo los compuestos individuales que se presentan en la Tabla 2 (PAH Calibration Mix, 47940-U Supelco).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de hidrocarburos alifáticos

Se determinó la concentración individual de cada uno de los alcanos desde el C7 al C40 y en la Tabla 3 se presenta la concentración promedio de alifáticos totales encontrados en cada sitio de muestreo; por otro lado, en la Figura 2 se presentan gráficas de la variación en el contenido

Tabla 2. Lista de HAPs individuales analizados en este estudio.

Compuesto	Tiempo Retención (min)	Ion Molecular	Num. Anillos
Naftaleno	10.630	128	2
Acenaftileno	16.561	152	3
Acenafteno	17.298	154	3
Fluoreno	19.296	166	3
Fenantreno	23.021	178	3
Antraceno	23.201	178	3
Fluoranteno	27.767	202	4
Pireno	28.606	202	4
Benzo(a)antraceno	33.468	228	4
Criseno	33.627	228	4
Benzo(b)fluoranteno	37.523	252	5
Benzo(k)fluoranteno	37.620	252	5
Benzo(a)pireno	38.607	252	5
Perileno	38.911	252	5
Indeno(1,2,3-cd)pireno	43.256	276	6
Dibenzo(a,h)antraceno	43.444	278	5
Benzo(g,h,i)perileno	44.497	276	6

de alifáticos totales en el sedimento con relación a la profundidad.

Se puede observar que la estación 4 presenta la más alta concentración de alifáticos con una media \pm una desviación estándar de 9.7 ± 2.0 $\mu\text{g/g}$ en sedimentos y un mínimo y máximo de

6.1 y 12.3 $\mu\text{g/g}$, respectivamente; los niveles más altos pueden deberse a la ubicación que tiene dicha estación en el PAS, ya que es una zona de acumulación de sedimentos y desechos sólidos, por la dinámica del transporte del sedimento y posiblemente por la influencia de corrientes

Tabla 3. Concentración de alifáticos totales ($\mu\text{g/g}$ peso seco) en los sedimentos del PAS por sitio de muestreo.

Estación	Media	Desv. Est.	Mínimo (profund)	Máximo (profund)
E1	3.2	0.8	2.4 (20 cm)	4.3 (4 cm)
E2	1.4	0.2	1.2 (4 cm)	1.6 (2 cm)
E3	3.3	0.9	2.2 (10 cm)	4.6 (20 cm)
E4	9.7	2.0	6.1 (15 cm)	12.3 (4 cm)
E5	2.5	1.0	1.6 (15 cm)	4.5 (2 cm)
E6	2.9	2.3	0.8 (6 cm)	6.1 (2 cm)

Desv. Est.=desviación estándar; profund=profundidad

y/o mareas en la zona. En contraste, la estación 2 presenta las concentraciones más bajas en comparación con el resto de las estaciones, presentando un intervalo de 1.2 a 1.6 $\mu\text{g/g}$; este resultado podría parecer sorprendente ya que en esta estación es donde existe mayor actividad portuaria; sin embargo, esta misma actividad puede estar favoreciendo la re-suspensión del sedimento y su transporte hacia otras zonas del PAS.

En cuanto a los niveles con respecto a la profundidad, puede observarse que en general, los máximos de concentración de alifáticos se presentan en los estratos más someros de los núcleos sedimentarios (2 y 4 cm); con excepción

de la tendencia que se presenta en la estación 3 (en donde la concentración máxima se detectó a 20 cm de profundidad), sitio de muestreo conocido como Fosa de Cocodrilos Sisal y que se encuentra separado del resto de la zona de estudio por un puente natural (Fig. 1), situación que podría explicar dicho comportamiento. En las estaciones 1, 2, 3 y 5 se presenta poca variación del contenido de alifáticos a lo largo del núcleo sedimentario; en las estaciones 4 y 6 hay cambios más pronunciados con concentraciones más altas en los sedimentos superficiales.

Los valores de alifáticos encontrados en este estudio son similares o menores a los valores

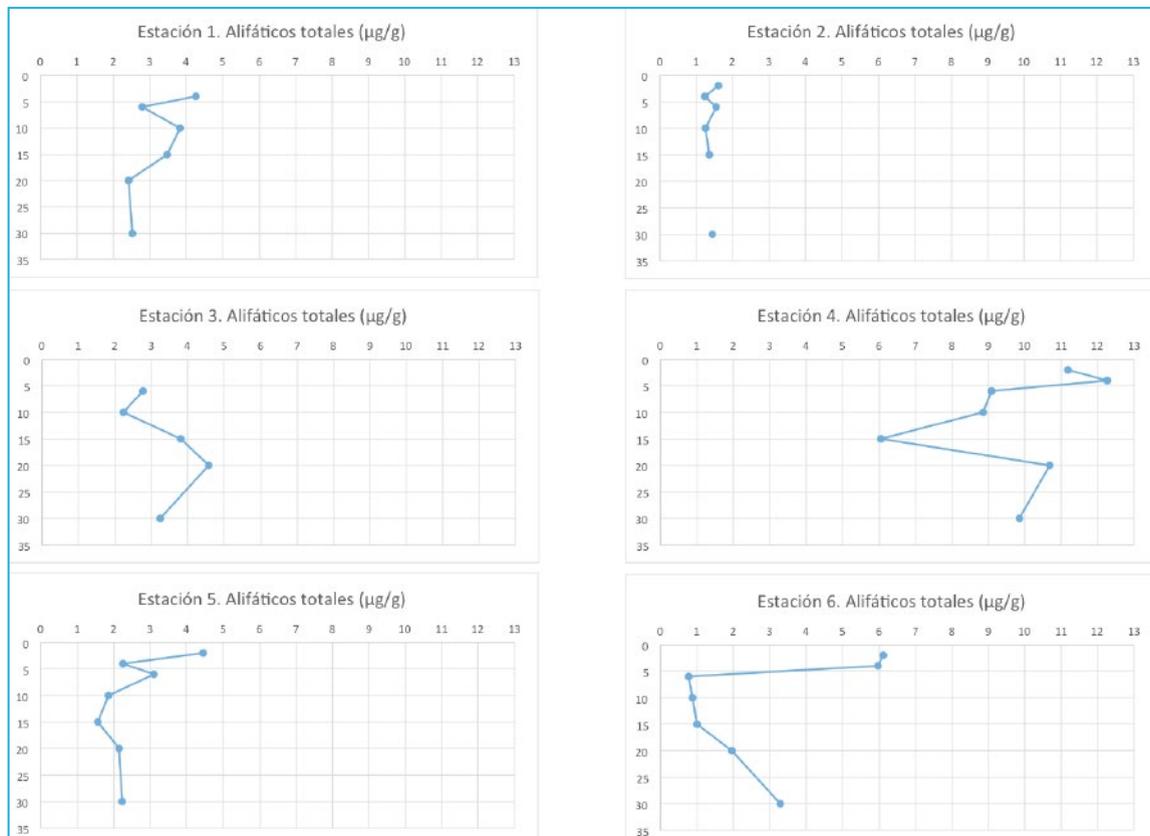


Figura 2. Concentración de alifáticos totales (eje horizontal) en relación a la profundidad en cm (eje vertical) en cada una de las estaciones de muestreo.

CONTAMINACIÓN HISTÓRICA POR HIDROCARBUROS EN EL PUERTO DE SISAL, YUCATÁN

Tabla 4. Máximos, mínimos, medias y desviaciones estándar de las concentraciones de los HAPs individuales, expresados en ng/g peso seco.

HAPs	Estación 1				Estación 2				Estación 3			
	MIN	MAX	MEDIA	DS	MIN	MAX	MEDIA	DS	MIN	MAX	MEDIA	DS
Ac	0.00	0.00	0.00	0.00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ace	0.06	0.06	0.06	0.00	0.04	0.05	0.043	0.00	n.d	n.d	n.d	n.d
Fluo	0.10	0.18	0.14	0.04	0.07	0.11	0.088	0.03	n.d	n.d	n.d	n.d
Fen	0.26	13.49	5.51	5.05	0.53	3.29	1.475	0.97	1.21	12.32	4.929	4.61
Ant	0.14	1.70	0.82	0.70	0.11	0.79	0.367	0.24	0.15	1.48	0.670	0.55
Fluoran	1.20	3.51	2.15	0.81	0.43	1.62	0.867	0.40	0.86	3.30	1.714	0.98
Pir	1.43	4.82	2.89	1.16	0.24	1.82	0.969	0.51	0.80	3.31	1.693	1.00
B(a)Ant	1.47	1.47	1.47	0.00	0.25	4.95	2.599	3.32	4.95	4.95	4.952	0.00
Cris	1.38	2.05	1.68	0.28	0.07	1.05	0.598	0.37	0.33	3.67	1.670	1.29
B(b)Fluoran	0.57	0.57	0.57	0.00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
B(k)Fluoran	0.13	0.59	0.37	0.23	0.04	0.39	0.203	0.12	n.d	n.d	n.d	n.d
B(a)Pir	0.27	2.07	1.11	0.68	0.02	0.86	0.364	0.37	n.d	n.d	n.d	n.d
Per	1.61	2.71	2.21	0.33	1.33	4.78	2.797	1.26	0.64	2.08	1.232	0.54
Ind(1,2,3-cd)Pir	0.12	0.19	0.15	0.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Db(a,h)Ant	0.10	0.17	0.13	0.03	0.12	0.12	0.121	0.00	0.09	0.10	0.098	0.01
B(g,h,i)Per	0.21	4.01	2.45	1.39	0.53	3.76	1.742	1.26	0.01	0.21	0.074	0.07
HAPs Totales	7.44	33.55	18.69	10.05	6.39	19.28	9.96	4.38	5.18	22.26	12.86	7.57
HAPs	Estación 4				Estación 5				Estación 6			
	MIN	MAX	MEDIA	DS	MIN	MAX	MEDIA	DS	MIN	MAX	MEDIA	DS
Ac	0.01	0.21	0.074	0.07	n.d	n.d	n.d	n.d	0.00	0.04	0.017	0.01
Ace	0.05	0.16	0.092	0.05	n.d	n.d	n.d	n.d	0.04	0.11	0.071	0.03
Fluo	0.13	0.33	0.203	0.09	0.09	0.09	0.088	n.d	0.06	0.71	0.247	0.23
Fen	1.45	8.32	4.827	2.77	0.26	4.70	0.996	1.64	1.72	12.27	4.753	3.51
Ant	0.48	1.61	1.032	0.46	0.05	1.04	0.223	0.36	0.33	2.16	0.776	0.64
Fluoran	2.78	5.12	3.893	1.00	0.22	11.57	2.014	4.21	1.43	4.74	2.183	1.16
Pir	3.95	7.31	5.411	1.39	0.40	10.50	1.963	3.77	1.65	7.75	2.918	2.19
B(a)Ant	2.10	10.19	4.011	3.11	6.33	6.33	6.325	0.00	0.33	2.93	1.040	1.09
Cris	2.98	6.30	4.853	1.14	0.30	7.77	3.030	4.12	1.00	4.52	2.083	1.20
B(b)Fluoran	n.d	n.d	n.d	n.d	0.05	0.20	0.135	0.06	0.92	3.97	2.196	1.23
B(k)Fluoran	0.61	2.59	1.402	0.74	2.77	2.77	2.769	0.00	0.19	0.19	0.187	0.00
B(a)Pir	1.54	5.08	2.722	1.13	0.04	7.16	1.606	3.11	0.33	2.45	1.139	0.89
Per	2.45	5.06	3.683	0.92	0.66	3.11	1.109	0.89	1.12	34.70	6.769	12.41
Ind(1,2,3-cd)Pir	0.16	0.24	0.203	0.06	0.26	0.62	0.456	0.13	0.32	2.30	1.398	0.69
Db(a,h)Ant	1.79	2.88	2.529	0.43	0.12	0.41	0.218	0.10	0.23	1.21	0.646	0.37
B(g,h,i)Per	2.72	12.17	9.422	3.32	0.48	9.63	2.310	3.25	2.03	9.98	3.982	2.80
HAPs Totales	31.66	56.99	42.78	9.62	3.57	65.08	13.06	22.95	14.77	86.06	28.96	25.44

Ac=Acenaftileno, Ace=Acenafteno, Fluo=Fluoranteno, Fen=Fenantreno, Ant=Antraceno, Fluoran=Fluoranteno, Pir=Pireno, B(a)ant=Benzo(a) antraceno, Cris=Criseno, B(b)fluoran=Benzo(b)fluoranteno, B(k)fluoran=Benzo(k)fluoranteno, B(a)pir=Benzo(a)pireno, Per=Perileno, Ind(1,2,3-cd)pir=Indeno(1,2,3-cd)pireno, Db(a,h)ant=Dibenzo(a,h)antraceno y B(g,h,i)per=Benzo(g,h,i)perileno. n.d=no detectado.

reportados para sedimentos en otras zonas costeras de la Península de Yucatán y zonas cercanas. Por ejemplo, Valenzuela-Sanchez *et al.* (2005), reportan una concentración máxima de alifáticos de 6.8 µg/g para sedimentos de Chelem y Progreso (zona con mucha actividad marítima, pesquera y turística) durante un muestreo realizado en época de lluvias. Noreña-Barroso *et al.* (1998) reportan una concentración mediana de alifáticos de 3.74 µg/g en sedimentos de la Bahía de Chetumal, con niveles máximos de 18.49 µg/g en sitios influenciados por dragados recientes. De Jesús-Navarrete (1993) reporta concentraciones de 0.8-22.6 µg/g de alifáticos en sedimentos de la Sonda de Campeche, zona claramente afectada por actividades petroleras.

Concentraciones de hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs)

Se determinó la concentración de los 16 HAPs individuales considerados por la EPA como prioritarios por sus propiedades tóxicas y por su amplia distribución en el ambiente. Asimismo, se determinó la concentración de perileno para la posibilidad de evaluar el origen de los HAPs presentes en la columna sedimentaria. En la Tabla 4 se presentan los valores promedio y la dispersión de los HAPs individuales y la sumatoria de los mismos (HAPs totales) en cada estación de muestreo, así como los valores mínimos y máximos detectados. En la Figura 3 se presenta la variación del contenido de HAPs totales en los sedimentos con respecto a la profundidad.

Las medias de HAPs totales presentan un comportamiento similar al observado en los valores promedio de hidrocarburos alifáticos totales, presentándose los niveles más altos en la estación 4 con una media (\pm una desviación estándar) de 42.8 ± 9.6 ng/g, mientras que la

media más baja se detectó en la estación 2, con 9.9 ± 4.4 ng/g. Los valores máximos más altos se detectaron en las estaciones con mayor dinámica en la zona de estudio, las estaciones 4, 5 y 6, con concentraciones de 56.9, 65.1 y 86.1 ng/g, respectivamente. Esta similitud en las tendencias no es sorprendente, ya que el aporte de los dos tipos de hidrocarburos a los sistemas acuáticos muchas veces está asociado. En contraste con lo observado para los alifáticos, los niveles de HAPs en los estratos más someros (2 y 4 cm) son generalmente más bajos que las concentraciones detectadas en la zona intermedia o más profunda de la columna sedimentaria. La variación de las concentraciones y del tipo de HAPs encontrados en los núcleos sedimentarios, puede relacionarse con diversos factores de la zona de estudio, entre ellos la degradación microbiana, la variación de re-suspensión y re-depositación en los sedimentos, intemperismo y la mezcla vertical por procesos biológicos y físicos, entre otros. (Arias *et al.*, 2010).

Con respecto a los compuestos individuales, se observa que los HAPs más ligeros (con 2 anillos bencénicos) no están presentes o se encuentran en concentraciones muy bajas en el núcleo sedimentario, lo cual puede deberse a que los HAPs de menor peso molecular presentan mayor solubilidad en agua y además pueden volatilizarse más fácilmente, procesos que pueden disminuir su concentración en la columna sedimentaria. En contraste, el fenantreno y el antraceno (HAPs de 3 anillos) se presentan de forma constante dentro del área de estudio, lo cual puede estar asociado con las actividades portuarias que se llevan al cabo en el PAS, ya que dichos hidrocarburos son producto de emisiones por combustión y/o derrames (accidentales o no) de aceites (Page *et al.*, 1999);

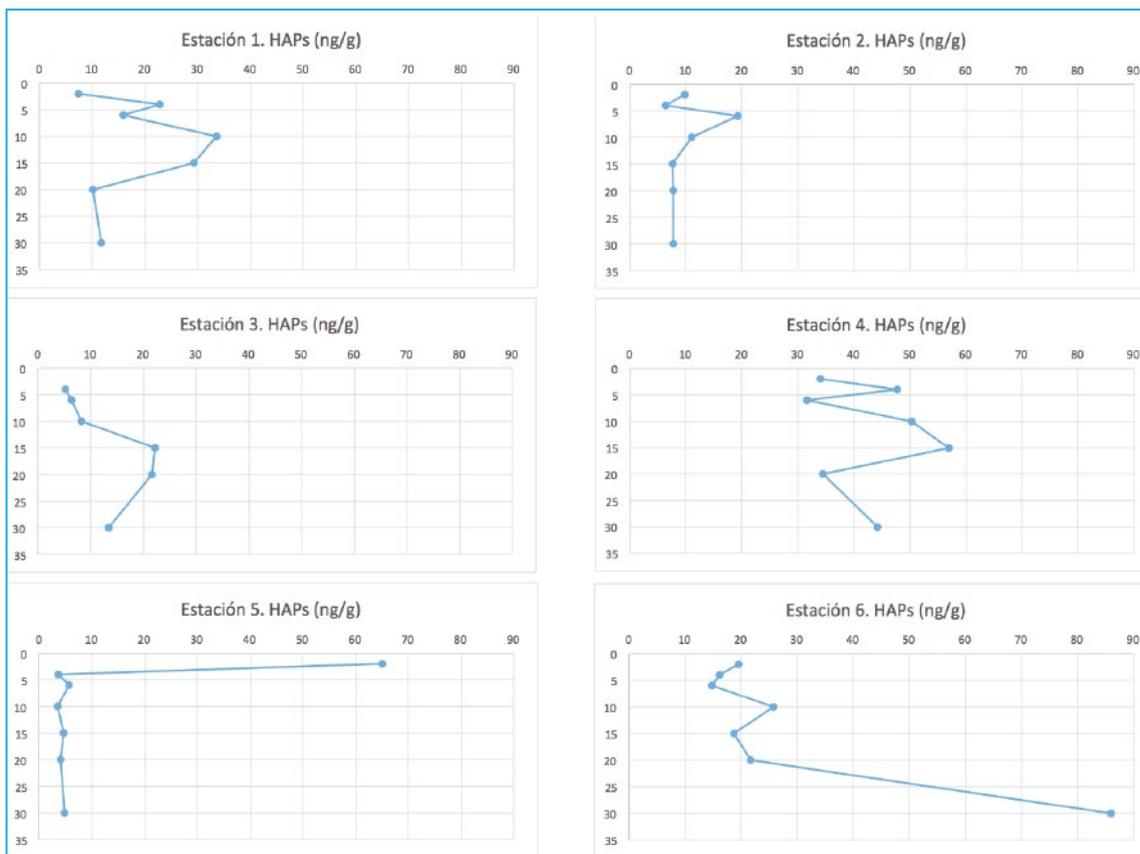


Figura 3. Concentración de HAPs totales (eje horizontal) en relación a la profundidad en cm (eje vertical) en cada una de las estaciones de muestreo.

observándose un incremento de las concentraciones contra la profundidad en el estrato de 2 a 10 cm. Los HAPs de peso molecular intermedio (4 anillos) fluoranteno, pireno, criseno y benzo(a)antraceno, fueron detectados también en todos los núcleos sedimentarios colectados y se consideran contaminantes de origen pirogénico, los tres primeros emitidos durante la combustión de madera o materia orgánica y el benzo(a)antraceno por combustión de derivados del petróleo (Nishigima *et al.*, 2001)

En cuanto a los HAPs de alto peso molecular, el benzo(k)fluoranteno y el benzo(a)pireno fueron detectados en 5 estaciones de muestreo

(excepto la estación 3) y el benzo(g,h,i) perileno se presentó en todas las estaciones. Estos hidrocarburos están asociados con fuentes pirogénicas y por su elevado peso molecular, no son solubles en agua, son poco volátiles y más persistentes, por lo que son compuestos que se acumulan en los sedimentos a lo largo del tiempo.

La NOAA establece guías que proponen una clasificación de valores para HAPs individuales en sedimentos marinos (Tabla 5), de acuerdo a los posibles efectos sobre la biota (Buchman, 1999). De acuerdo a los datos de la Tabla 5, los niveles de HAPs encontrados en el PAS tienen

Tabla 5. Valores críticos (ng/g) propuestos por la NOAA para sedimentos.

HAPs	TEL	ERL	ERM	PEL	AET
Naftaleno	-	-	-	-	-
Acenaftileno	5	44	640	128	71 E
Acenafteno	6	16	500	88	130 E
Fluoreno	21	19	540	144	120 E
Antraceno	46	85	1100	245	280 E
Fenantreno	-	-	-	-	-
Fluoranteno	113	600	5100	1494	1300 E
Pireno	153	665	2600	1398	2400 E
Benzo[a]antraceno	74	261	1600	693	960 E
Criseno	108	384	2800	846	950 E
Benzo[b]fluoranteno	-	-	-	-	1800 E I
Benzo[k]fluoranteno	-	-	-	-	1800 E I
Benzo[a]pireno	88	430	1600	763	1100 E
Dibenzo[ah]antraceno	6	63	0260	135	230 OM
Indeno[1,2,3cd]pireno	-	-	-	-	600 M
Benzo[g,h,i]perileno	-	-	-	-	670 M
Benzo(g,h,i)perileno	44.497	276	6		

TEL.- Efecto en el nivel del umbral (amenaza no potencial); ERL.- Intervalo efecto bajo; ERM.- Intervalo efecto medio (concentración media); PEL.- Niveles probables de efectos; AET.- Efectos aparentes en el umbral. E: Larvas de equinodermos; O: Larvas de ostras; M: Bioensayo Microtox y I: Impacto en comunidades faunísticas.

un efecto en el nivel del umbral (amenaza no potencial) o se encuentran en el intervalo de efecto bajo.

Por otro lado, a diferencia de lo observado con los alifáticos, los niveles de HAPs totales encontrados en los sedimentos del PAS son menores a los reportados para otras zonas costeras del Golfo de México y el Caribe. Valenzuela-Sánchez *et al.* (2005) reportan niveles máximos de HAPs de 55.3 µg/g para sedimentos de Chelem y Progreso, es decir, alrededor de tres órdenes de magnitud por arriba de las concentraciones más altas detectadas en el PAS; los valores encontrados en Chelem-Progreso son similares a los

reportados por De Jesús-Navarrete (1993) para sedimentos de la Sonda de Campeche (34.7 a 79.6 µg/g), ambas zonas con una fuerte influencia de aportes de derivados del petróleo. Sin embargo, los niveles de HAPs encontrados en este estudio son similares a los encontrados en la Bahía de Chetumal con valores en un intervalo de 0.03 a 0.97 µg/g (Noreña-Barroso *et al.*, 2007).

Yuan *et al.* (2001) clasifican el nivel de contaminación de acuerdo al contenido de HAPs totales en sedimentos con base en los siguientes valores: a) Nivel bajo de 0 a 100 ng/g, b) nivel moderado de 100 a 1000 ng/g, c) nivel alto de

1000 a 10000 ng/g y d) nivel muy alto >10000 ng/g. Este criterio confirma que la contaminación asociada a la presencia de HAPs en el PAS es baja en todos los sitios de muestreo considerados en este trabajo.

Finalmente, con el objetivo de identificar un probable impacto de las actividades portuarias a través de la generación de HAPs, en la Tabla 6 se presenta una comparación de las concentraciones de HAPs totales de los estratos superiores (2-4 cm) contra las de los estratos inferiores (20-30 cm).

Como puede observarse, las concentraciones totales de HAPs en los estratos superiores del núcleo, es decir las concentraciones “actuales” o “recientes” en E1, E2, E4 y E5 son mayores que las encontradas en los estratos inferiores consideradas como “antiguas” o previas a la creación del PAS, lo que indica un probable impacto por entrada de hidrocarburos en el sistema. Como ya se mencionó anteriormente, la estación 3 se considera un sitio libre de actividades portuarias directas (tráfico de lanchas), ya que está separada del resto de la zona de estudio, por lo que presenta un comportamiento diferente al observado en general en los sitios muestreados.

CONCLUSIONES

El Puerto Sisal, como muchas otras zonas costeras, presenta asentamientos humanos, actividad marítima, pesquera y turística, que contribuyen al deterioro del ambiente costero y marino. Esto

se refleja en la presencia de hidrocarburos en el Puerto de Abrigo (PAS) a lo largo de la columna sedimentaria.

Las mayores concentraciones de hidrocarburos, tanto alifáticos como aromáticos, se detectaron en la estación 4, ubicada en el área del PAS adyacente al puente natural que separa la Fosa de los Cocodrilos de Sisal; mientras que los niveles más bajos fueron registrados en la estación 2, una estación interna cercana al punto donde se concentran las actividades pesqueras del sitio.

Los niveles de hidrocarburos alifáticos son comparables con los reportados para otras zonas de la Península de Yucatán; mientras que las concentraciones de HAPs en general están por debajo de los valores que se han detectado en otras zonas costeras del estado. Los hidrocarburos aromáticos presentes en el PAS se relacionan en general con combustión incompleta de madera, materia orgánica y derivados del petróleo, con poca presencia de compuestos de bajo peso molecular. También se encuentran compuestos asociados con el derrame de combustibles.

El análisis de la contaminación histórica mostró que el PAS tiene un nivel de contaminación bajo y no representa un peligro en términos de efectos sobre los organismos; sin embargo, el nivel de contaminación actual presente en los estratos superficiales es mayor que los niveles detectados en los estratos profundos, lo que indica un impacto en el sistema por los hidrocarburos asociados con actividades antrópicas.

Tabla 6. Comparación histórica de las concentraciones de HAPs totales (ng/g) en el PAS.

Prof (cm)	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2-4	25.970	11.262	8.919	73.132	64.823	32.894
20-30	9.637	2.987	12.764	39.550	3.879	51.354

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Nuestro reconocimiento y agradecimiento al Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (PAIP 5000-9146) de la Facultad de Química de la UNAM por otorgar financiamiento para la realización de este estudio. Agradecemos al Dr. Luis Walter Daesslé del Laboratorio de Geoquímica Aplicada y Sedimentación del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, por su apoyo para fraccionar los núcleos sedimentarios y por realizar la determinación de COT y NT en los sedimentos. También nuestro agradecimiento al M. en C. Joel Loera Pérez por el apoyo brindado en la colecta de los núcleos sedimentarios.

REFERENCIAS

- Álvarez, L.T.; Sáenz, M.R. 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos de la Bahía de Chetumal. p. 299-310. In: A.V. Botello; J. Rendón-von Osten; G. Gold-Bouchot; C. Agraz-Hernández (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2ª. Ed. Universidad Autónoma de Campeche, UNAM, INE. 696 p.
- Boitsov, S., Jensen, H., Klungsøyr, J. 2009. Natural background and anthropogenic inputs of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in sediments of South-Western Barents Sea. Marine Environmental Research 68: 236-245.
- Buchman, M. F., 1999. NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA HAZMAT Report 99-1, Seattle WA, Coastal Protection and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Calva, L. G. B., 1997. Hidrocarburos fósiles en lagunas costeras. ContactoS, 3ra. Época, 21:16-22.
- Chappin R. G, y Summerlin L. R., 1988. Química. Publicaciones Cultural, México.
- De Jesús-Navarrete, A, 1993. Concentración de hidrocarburos totales en los sedimentos de la Sonda de Campeche, México. Caribbean Journal of Science, Vol. 29, No. 1-2, 99-105.
- Føyn, E. 1969. Waste disposal and pollution in coastal lagoons. En: Lagunas Costreas, Un Simposio. A. Ayala y F.B. Phleger (eds). Universidad Nacional Autónoma de México. 281-290 pp.
- GESAMP, 1989. (IMO/FAO/Unesco/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), long-term consequences of low-level marine contamination: An analytical approach. Rep. Std. GESAMP, 46: 56 p.
- Gschwend, P. A., Hites, R. A., 1981. Fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northern United States. Geochim. Cosmochim. Acta 45, 2359-2367.
- INE, 2004. Identificación de las capacidades y necesidades de investigación en México en materia de contaminantes orgánicos persistentes (COPs). Informe Final. Instituto Nacional de Ecología. México. www.ine.gob.mx. 38 p.
- INEGI. 2010. Senso de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática..

- Iturria-Dawn, R.A. 2012. Contaminación histórica por hidrocarburos en el Puerto de Abrigo de Sisal, Yucatán. Tesis para obtener el grado de Lic. en Manejo Sustentable de Zonas Costeras. Fac. de Ciencias, UNAM.
- Nishigima, F. N.; R. R. Weber; M. C. Bicego. 2001. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in sediments of Santos and Cananéia, SP, Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 42(11): 1.064-1.072.
- Noreña-Barroso E.; Zapata-Pérez O.; Ceja-Moreno V.; Gold-Bouchot G., 1998. Hydrocarbon and Organochlorine residue concentrations in sediments from bay of Chetumal, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 61:80-87.
- Noreña-Barroso, E.; G. Gold-Bouchot; V. Ceja-Moreno. 2007. Temporal Variation of Persistent Organic Pollutant (POP) Residue Concentrations in Sediments from the Bay of Chetumal, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 79: 141-146.
- Page, D. S.; P. D. Boehm; G. S. Douglas; A. E. Bences; W. A. Burns; P. J. Mankiewicz. 1999. Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments record past human activity: A case study in Prince William Sound, Alaska. *Marine Pollution Bulletin.* 38(4): 247-260.
- Readman, J.; Fillman, G.; Tolosa, I.; Bartocci, J.; Villeneuve, J. P.; Catinni, C. 2002. Petroleum and PAH contamination of the Black Sea. *Mar Pollut. Bull.* 44(1): 48-62.
- Santschi P. H.; Presley B. J.; Wade T. L.; Garcia-Romero B.; Baskaran M. 2001. Historical contamination of PAHs, PCB's, DDT's, and heavy metals in Mississippi River Delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediment cores. *Marine Environmental Research*, 52: 51-79.
- Toledo, O.A. 1996. Marco Conceptual: Caracterización Ambiental del Golfo de México. *In: Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.* A.V. Botello; J.L. Rojas; J.A. Benitez; D. Zárate (eds). Universidad Autónoma de Campeche. Campeche, México. 1-24 pp.
- UNEP/IOC/IAEA, 1991. Determination of petroleum hydrocarbons in sediments. Reference Methods for Marine Pollution Studies. No. 20, United Nations Environment Programme. 96 p.
- USEPA, 2004. <http://www.envirohealthaction.org/toxics/pollution>.
- Valenzuela-Sánchez, I.S.; G. Gold-Bouchot; V. Ceja-Moreno. 2005. Hidrocarburos en agua y sedimentos de la laguna de Chelem y Puerto Progreso, Yucatán, México. p. 311-328. *In: A.V. Botello; J. Rendón-von Osten; G. Gold-Bouchot; C. Agraz-Hernández (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2ª. Ed. Universidad Autónoma de Campeche, UNAM, INE. 696 p.*
- Valette-Silver, N. J. 1993. The use of sediment cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments. *Estuaries* 16, 577-588.

RESILIENCIA, CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y DESECHOS EN SISAL: UNA ECUACIÓN SIN RESOLVER

U. Urrea^{1*}, G. Alcalá^{2*}

¹*Maestra en Estudios Urbanos, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales (CEDUA)-El Colegio de México (COLMEX)*

ID ORCID: 0000-0001-8229-1734

²*Profesor Titular "C" en propiedad, Tiempo Completo, Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudios sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD)-Instituto Politécnico Nacional (IPN)*

ulsiau@yahoo.com.mx y gra2008@me.com

RESUMEN

El presente trabajo se centra en estudiar la relación que existe entre el crecimiento poblacional en Sisal a partir de 1847 a la fecha y, el empleo de los desechos como insumos en el relleno de la ciénega –“embutido”– para obtener terrenos que se utilizan para auto-construir viviendas sobre ellos o para hacer pequeñas plantaciones y cría de animales domésticos para el autoconsumo. Por lo tanto, el relleno o “embutido” -cuya práctica se mantiene desde la época prehispánica hasta nuestros días- obedece a una lógica de sobrevivencia. El único cambio, sustantivo es que, mientras en el pasado (no remoto) el relleno se hacía con materiales naturales de desecho (truncos, palos, piedras), actualmente los materiales utilizados para rellenar son plásticos, botellas y baterías.

Partiendo del concepto de resiliencia y tomando como objeto de estudio a la práctica del relleno de la ciénega, la población de Sisal se ha adaptado al cambio en los insumos, no así en el cambio de la práctica de embutido, por lo cual, actualmente hay un peligro latente en materia de contaminación ambiental y de salud pública, sin que este se reconozca claramente por los habitantes del puerto.

Finalmente, se plantean algunas notas con respecto al concepto de resiliencia y su alcance para explicar y ofrecer alguna solución al problema planteado: a) diferenciar la definición de resiliencia empleada en un contexto científico de la noción de resiliencia empleado en el contexto de la acción social, que para efectos de este trabajo se entenderá como *adaptación a los cambios*; b) acotar ¿resiliencia a qué?, ¿entendida como la adaptación a los cambios de forma diferente a como se llevaban a cabo las prácticas socioculturales previas a un evento específico o al desarrollo de aquéllas, previas al evento específico, con adecuaciones que la población local acepte, asimile y ponga en acción?, y; c) a partir de lo anterior, ¿es posible idear una estrategia por medio de la cual se le muestren a la población las consecuencias dañinas que acarrea la práctica del relleno, buscando con ello disminuirla y/o cambiar los insumos empleados en ésta y, eventualmente, eliminar la práctica con un cambio en los

estilos constructivos de vivienda y producción de alimentos?, de ser eso posible: ¿qué acogida tendría en el conjunto de la localidad?

Palabras claves: Resiliencia, Comunidad pesquera, Basura, México.

INTRODUCCIÓN

En Sisal, existen muchas y variadas prácticas de vida cotidiana que son desarrolladas por sus habitantes (Urrea, 2012: 68-79). Una de esas prácticas es el relleno al humedal aledaño a la localidad como forma de hacerse de terrenos donde puedan construir vivienda, criar animales y plantar alimentos (Urrea, 2012: 75-79). En conjunto, estas actividades han permitido que la población habite en la franja costera (Alcalá, 2016; Morán Angulo, 2011: 261-262) y no se haya desplazado tierra adentro, aun cuando desde la década de 1980 se agotaron las tierras donde podrían construirse viviendas (Urrea, 2012: 50; DOGEY, 2007: 44).

Si bien el relleno de humedales y/o su desecación son prácticas que datan desde la época prehispánica en Yucatán (Andrews et. al., 1990: 46), que se continuaron en la Colonia y el México de la segunda mitad del Siglo XIX (Canto Mayén, 2014: 13) y, actualmente, se emplea se sigue practicando a través del uso de la basura como insumo principal, que, por su composición química, frecuencia de uso y estilo constructivo del relleno ha dado como resultado la contaminación del ambiente, así como daños a la salud en la población. Ambos casos son demostrables con evidencia indirecta como son los testimonios de los habitantes sobre la disminución del stock pesquero del camarón en el humedal (Urrea, 2016), casos de plumbismo en aves (Urrea, 2012: 101) o acumulación de basura en la Reserva Estatal “El Palmar” por el lavado de los terrenos rellenados en eventos meteorológicos

extremos, como tormentas tropicales y huracanes (Urrea, 2012: 157-160).

El daño al medio ambiente y la salud humana se exacerban debido a la evolución demográfica en la localidad, el desconocimiento de los habitantes sobre la contaminación ocasionada por la basura al efectuarse el relleno y la falta en la capacidad de acción de las autoridades en materia de residuos. En contraste, los efectos percibidos por los pescadores son del orden de lo positivo, pues la cantidad de actividades de la vida cotidiana que pueden llevar a cabo, especialmente las relacionadas con la sobrevivencia y la economía subterránea son muchas más de las que podrían efectuar sin los terrenos rellenados. Lo anterior es muestra de lo compleja que es la cultura local de la basura en Sisal.

Es aquí donde es sustantivo hacer una diferenciación entre el término de *resiliencia*, entendido como la “capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido” (Real Academia Española [RAE]), el cual es ampliamente empleado en las ciencias naturales, especialmente la ecología, para hacer referencia a la capacidad de un ecosistema para regresar de forma autónoma a su estado original después de una perturbación y el concepto de *adaptación a los cambios*, que en este trabajo se propone, complementemente al de resiliencia, entendido como las adecuaciones a las prácticas de vida que las poblaciones llevan a cabo para transformar su entorno y que éstas, aunadas a los cambios naturales, pueden

tornarse perjudiciales y por ello, readecuar las prácticas de vida para en lo posible, disminuir o eliminar el daño que se haya causado. Ambas nociones, consideramos, deben trabajarse de manera conjunta, ya que por el grado de colonización que la especie humana tiene en el planeta Tierra, es muy difícil que un ecosistema se mantenga inalterado, por lo cual, si se buscan prevenir, mitigar o erradicar daños a éstos, debe estar presente el factor humano.

El presente trabajo no pretende ser fatalista, pero sí busca enfatizar la existencia de consecuencias graves para el medio ambiente y la salud humana a raíz del relleno del humedal con basura. El trabajo también explora los retos que imponen los terrenos rellenados en la administración de la zona costera.

Por último, el listado de posibles contaminantes en los espacios de análisis únicamente se refiere a lo registrado *in situ*, es decir, no considera los contaminantes acarreados por los aportes de agua epicontinental de las zonas ganaderas, agrícolas o basureros al aire libre, lo cual no exime que ésta, sumadas a las presentes en Sisal, tengan un efecto en la dinámica de los ecosistemas costeros y por ende en la salud humana.

ÁREA DE ESTUDIO

El Puerto de Sisal se localiza en la latitud 21°09'N, longitud 90°01'W y a un metro sobre el nivel del mar. Es una comisaría del municipio de Hunucmá en Yucatán. Colinda al norte con el Golfo de México; al sur con la ciénega, el Ejido Sisal, el Ejido de Hunucmá y la cabecera municipal de Hunucmá; al este con el Puerto de Chuburná y al oeste con la Reserva Estatal "El Palmar". Sisal es una localidad que tiene como principal actividad económica a la pesca artesanal. Sin embargo, sus habitantes desempeñan

otras actividades económicas entre las que se encuentran la caza de patos silvestres en invierno, los ingresos derivados de las temporadas vacacionales como Semana Santa y verano, así como las divisas que reciben algunos habitantes de sus parientes que laboran en los Estados Unidos de América

En la Gráfica 1 se puede apreciar la evolución de la población de la actual comisaría de Sisal, ubicada en el municipio de Hunucmá. Dado el interés de mostrar el desarrollo de las prácticas cotidianas relacionadas a la basura en Sisal, se consideró pertinente mostrar la evolución demográfica desde 1847 hasta 2010. Nótese que en el año 1869 Sisal contaba con 3959 habitantes, población más alta de la localidad en el periodo analizado, con respecto al desplome de población que se registra en 1885, trece años después de que la Aduana Marítima pasara al recién fundado Puerto Progreso (Canto Mayén, 2014: 4). El auge de Sisal como principal puerto de altura de Yucatán, entre 1807 y 1871, se reflejó en la magnitud de su población, a tal punto que ésta llegó a alcanzar la cifra de 3959 habitantes para 1869, justo en la etapa de mayor importancia política y comercial del puerto y, luego del traslado de la Aduana fuera de Sisal, la población del puerto se desplomó dramáticamente (Canto Mayén, 2014: 11). Estos cambios significativos del poblamiento de Sisal se debieron a la actividad comercial de Mérida, la cual, convirtió al puerto antedicho en la entrada y salida de mercancías y materias primas hacia los mercados exteriores a finales de la Colonia y su apogeo durante gran parte del siglo XIX (Canto Mayén, 2014: 1).

En la gráfica también se observa que hay un incremento significativo en el periodo de 1960-1970, el cual constó del 98% con respecto a

la década anterior y de 67% para la década de 1970-1980. En adelante el crecimiento es menor que proporcional (Encuesta Nacional a Hogares Rurales de México I (ENHRUM I), 2002:7). Actualmente, Sisal es la única localidad costera del municipio de Hunucmá y representa el 5.97% de la población total de éste.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo de 2011 a 2012. Para la ejecución del mismo fue preciso llevar a cabo cuatro actividades. Primero, se identificaron actores clave en la localidad mediante la observación participante. Una vez identificados los actores clave se hicieron entrevistas a profundidad a 34 personas (Mauss, 1974: 10-87), las cuales se desempeñaban como servidores públicos, comerciantes, pescadores, cazadores, prestadores de servicios turísticos, ejidatarios, amas de casa,

académicos, extranjeros residentes de verano y un asesor de proyectos. La muestra seleccionada fue representativa cualitativa de tipo no exhaustiva, esto es, la muestra es pequeña ya que el instrumento para la obtención de la información es de tipo exhaustivo.

Después se definieron los diez espacios físicos de estudio: casa, área urbana (tiraderos al aire libre, playa, vecindario, ciénega colindante al área urbana) y los lugares de trabajo (ejido, mar, ciénega colindante a la Reserva Estatal “El Palmar”, Reserva Estatal “El Palmar” y puerto de abrigo).

También se efectuó una búsqueda exhaustiva del marco normativo en materia de residuos y administración de la zona costera vigentes para México y representativo a los tres órdenes de gobierno, lo anterior, con el fin de entender las implicaciones legales del relleno de la ciénega.



Gráfica 1. Los datos de población corresponden a las siguientes fuentes: 1847, 1862, 1867, 1869, 1885, 1900, 1910 y 1921 (Canto Mayén, 2014: 12), 1930 a 1950, 1970 y 2000 (ENHRUM I, 2002:7), 1960 (SI y C, 1963:40), 1980 (INEGI, 1989:8), 1990 (INEGI, 1991:60) y 2010 (INEGI, 2011: tabuladores del cuestionario ampliado 21/09/2011). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Finalmente, el análisis de los datos obtenidos en el trabajo de campo permitió construir un listado de materiales empleados para rellenar el humedal y un diagrama explicativo del proceso (metodología extensa en Urrea, 2012: 21-23).

Finalmente, y como nota aclaratoria, las palabras con entrecomillado doble son denominaciones locales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materiales empleados para rellenar el humedal y la descripción del proceso de rellenado

La palabra “embutir” es empleada por los pobladores de Sisal para denominar la acción por la cual se rellena, compacta y nivela el terreno ganado a la ciénega. Para el presente trabajo

se utilizará la palabra relleno como sinónimo de “embutido”.

El relleno es de carácter progresivo y es común a todos los terrenos colindantes con la ciénega. El relleno actual de la ciénega tiene a la basura como el material más importante de construcción. Autores como SEDUMA (Ficha técnica Reserva Estatal “El Palmar”: 2), CINVESTAV-AMEP (1992, 39), y Yaax Beh, (2005, 44), Cortinas de Nava (2006, 126-128), DOGEY (2007, 12) y CINVESTAV (2010, 52-53) han reportado el relleno de las ciénegas en Yucatán con basura. Es tal la importancia que tiene la basura en el relleno de la ciénega que pueden suscitarse conflictos en torno a la posesión y uso de la misma. Para que la basura pueda

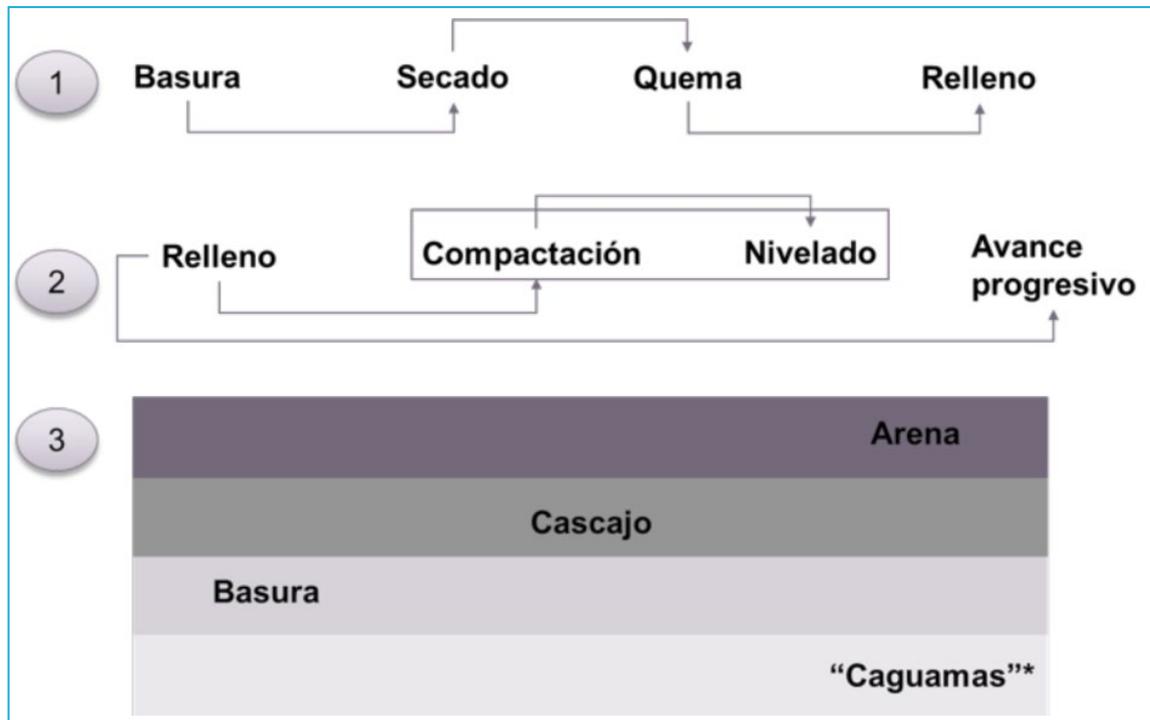


Figura 1. Explicación esquemática del proceso de relleno del humedal: 1) preparación de la basura previo al relleno; 2) procedimiento del relleno, se puede posponer la compactación y nivelado si se busca un avance progresivo; 3) estructura del relleno, puede sufrir variaciones con capas de basura intermedias a las de cascajo y arena. Los envases de “caguamas” sólo fueron reportadas por un informante. (Elaboración propia con base en el trabajo de campo).

Tabla 1. Material de construcción empleado en el relleno de la ciénega.

Tipo	Ejemplos
“Orgánicos”	Ramas, hojarasca, restos de palmas de coco, cocos secos, restos de comida (esqueletos de pescado, conchas de moluscos, restos de frutas, etcétera), estiércol animales de traspatio, lodos de sedimentación de fosas sépticas.
Minerales	Arena (proveniente de los dragados del puerto de abrigo, obras al interior de la localidad o traída de la playa), cascajo de construcción, tierra, piedras, pedazos de metales y/o fierros viejos, cerámicos.
Sanitarios	Papel higiénico, pañales, toallas sanitarias.
“Inorgánicos”	Vidrio, plásticos, basura quemada (la cual puede mezclar materiales de las categorías “orgánicos”, sanitarios e “inorgánicos”), láminas de cartón, papel, cartón.
Residuos Peligrosos	Baterías para automóvil, lámina de asbesto, lámparas ahorradoras, latas de insecticidas.
Otros	Muebles viejos (mesas, refrigeradores)

ser empleada en el relleno es preciso darle un tratamiento previo, el cual consiste en dejarla secar a la intemperie. Posteriormente se quema en la orilla de la ciénega y finalmente es vertida a ésta. Esta basura quemada sirve como sustrato primario para las posteriores etapas de construcción, pues es un material a la vez pegajoso e impermeable. También se ocupa como pegamento entre los estratos intermedios del relleno. La segunda etapa del relleno consiste en arrojar cascajo, piedras o muebles viejos grandes como material de soporte para finalmente, colocar arena y conchas como materiales de aplanado y nivelado (ver Figura 1).

A la par de la construcción, se promueve la plantación de árboles grandes que no sean manglares y estacas de madera para la estabilización del terreno. Un relleno se considera bien hecho cuando no hay espacios vacíos entre los materiales que lo conforman y su avance es progresivo y continuo. Un relleno que sea progresivo y continuo asegura la compactación efectiva de

los terrenos, evitando los procesos de erosión de los terrenos y anegación del agua ocasionados por la dinámica lagunar. Estas situaciones han llevado a los habitantes colindantes a la ciénega a rellenar, en promedio, un metro lineal al año. La componente de nivelación del terreno puede ser relegada indefinidamente, ya que se necesita arena y conchas de caracol para que se efectúe, por lo cual el esfuerzo se vuelca al relleno sistemático y progresivo. El éxito del relleno depende de la cooperación que haya entre los vecinos. En la Tabla 1 se muestra un listado detallado de los materiales empleados para el relleno de la ciénega.

Consecuencias de rellenar el humedal

Salud humana y medio ambiente

Una vez que han quedado descritos los materiales y la técnica constructiva para el relleno de los terrenos, se puede hacer una reflexión sobre las consecuencias que éstos tienen sobre la salud humana y el medio ambiente. En el presente

estudio se mencionan posibles efectos y no consecuencias consumadas, pues el análisis efectuado es asociativo entre los materiales de construcción y las sustancias contaminantes intrínsecas a cada uno de ellos o que en interacción con otras

sustancias o el medio ambiente se consideran contaminantes. Este análisis asociativo se basa en lo reportado por Newman (1998: 8-12) y se resume en la Tabla 2. El complemento lógico a este estudio sería llevar a cabo ensayos clínicos

Tabla 2. Listado de residuos encontrados y posibles contaminantes presentes en los espacios de análisis.

Espacios físico-sociales ↓	Residuos ↓	Orgánicos								Inorgánicos								Organometales					
		CFCs	AO	I	D	PAHs	PCBs	CRP	CDO	EN	Al	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Se	Zn	Tin (Sn)	Pb	Hg
Mar	Acumuladores, pilas, focos ahorradores, botellas y bolsas plásticas, bujías, redes, líneas, anzuelos, plomadas, restos de pesca, heces fecales																						
Ciénega a) Área urbana	Ver Tabla 1. Material de construcción empleado en el relleno de la ciénega																						
Ciénega b) Reserva "El Palmar"	Envases PET, colillas de cigarro, envolturas plásticas y metálicas, cartuchos y perdigones de escopeta, envases de vidrio																						
Puerto de Abrigo	Aceite quemado, bujías, gasolina, fibra de vidrio, solventes, pintura, restos de pesca, botellas y envolturas plásticas, latas, envolturas metálicas, redes, líneas, anzuelos, plomadas, heces fecales																						
Reserva "El Palmar"	Envases de vidrio, bolsas y botellas plásticas, sandalias, envolturas metálicas, latas																						
Área Urbana	Pañales desechables, envolturas plásticas y metálicas, latas, cartuchos de escopeta, heces fecales, restos de comida, papeles, cartón, periódico, restos de poda de palmeras																						
Casa	Residuos orgánicos, envolturas plásticas y metálicas, botellas PET, pañales y toallas desechables, envases de vidrio, poda de palmas, restos de comida, papeles, cartón																						
Ejido Sisal	Restos de automóviles, bolsas plásticas y botellas PET, latas, envases de vidrio, periódico, restos de podas, cerámicos para la construcción de energía eléctrica, cables, muebles y madera vieja																						
Playa	Pañales desechables, restos de comida, envases de vidrio, heces fecales, envolturas plásticas y metálicas, bolsas plásticas, cordeles																						
Tiraderos a cielo abierto	Todo lo anterior									^a													

Los contaminantes se tomaron de Newman (1998: 8-12). CFCs Clorofluorocarbonos; AO Alquenos Organoclorados; I Insecticidas; D Dioxinas; PAHs Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares; PCBs Bifenilos policlorados; CRP Componentes Relacionados con el Petróleo; CDO Compuestos Demandantes de Oxígeno; EN Especies del Nitrógeno (nitratos y nitritos); Al Aluminio; As Arsénico; Cd Cadmio; Cr Cromo; Cu Cobre; Pb Plomo; Hg Mercurio; Ni Níquel; Se Selenio; Zn Zinc; Tin (Sn) Trimetil tin estaño (TMT) y Trietil tin estaño (TET). Se mencionan posibles contaminantes ya que éstos se encuentran presentes y/o se asocian a los residuos observados en todos los espacios de análisis.
^aSe encuentran presentes en los tiraderos aledaños a cuerpos de agua.

en la población para monitorear e identificar, si fuese el caso, envenenamientos, así como ensayos químicos para la identificación de la fuente y concentración de los contaminantes aquí enumerados. En todo caso, en el estudio de Meza Cuellar (2013: 118) se expresa la percepción de la población de Sisal en relación al aumento de los casos de cáncer a partir del año 2003 debido a la contaminación del acuífero del cual se abastece la localidad.

Lo anterior cobra sentido al saber que sólo el 5.9% de las mujeres entrevistadas por Meza Cuellar (2013: 117) consideran a los manglares como “importantes”, y ponen mayor interés en los incendios ocurridos en la localidad, especialmente los derivados de la quema de la basura. Dicho sea de paso, son las mujeres las que juegan un papel decisivo en el relleno del humedal y lo anterior contrasta con la percepción que las propias mujeres tienen de vivir en la franja de casa colindantes con la ciénega, ya que comentan se sienten expuestas a las inundaciones por lluvias, enfermedades gastrointestinales y al dengue (Meza Cuellar, 2013: 118).

En general, la población de Sisal considera que el cambio climático y la contaminación son los factores que más afectan a la ciénega (Meza Cuellar, 2013: 121).

Una percepción generalizada sobre las mareas rojas en Sisal es que la contaminación es uno de los factores que propicia a aquélla, y que esta contaminación es causada tanto en la localidad, como tierra dentro. Esta misma contaminación provoca una baja en la visitación turística del puerto (Meza Cuellar, 2013: 118).

Vulnerabilidad diferenciada y líderes de opinión

Según el trabajo de Meza Cuellar (2013: 114) hay algunas consideraciones con respecto a la

vulnerabilidad diferenciada presente en la población de Sisal, asociada a eventos climáticos y que muy bien se pueden extrapolar al relleno de la ciénega. La primera consideración es el factor económico, el cual, es el que más contribuye a las condiciones de vulnerabilidad social, debido a la dependencia que hay en la localidad a la actividad pesquera y su alto grado de fragilidad asociada a factores externos, como es el mercado de venta de los productos y las condiciones ambientales a las que se encuentra sujeta la actividad. Esta situación ya la señalaba Canto Mayén (2014: 3) cuando menciona que “pese al paulatino aumento del comercio marítimo por Sisal, la principal actividad de este surgidero fue, a lo largo de la colonia, la pesca y salazón del pescado”.

En materia de género, Meza Cuellar (2013: 119) explica que las mujeres en Sisal no desarrollan ningún papel en la gestión ni conciencia del riesgo, salvo las decisiones en el hogar. También menciona que la capacidad para hacerse de información referente a los riesgos es menor en mujeres que en hombres. Los hombres manifiestan ventaja sobre las mujeres para gestionar y desarrollar labores en la toma de decisiones frente emergencias en la comunidad, y nuevas opciones productivas. Las mujeres, en contraste, se perciben a sí mismas como discriminadas por el hecho de no ser valoradas por la comunidad, a pesar de ser piezas clave en la administración de recursos en el hogar. Esto manifiesta las desigualdades locales establecidas por la comunidad entre hombres y mujeres, entendidas también como relaciones de poder. En general, este bajo grado de apoderamiento (Venier, 1997) funciona como un obstáculo para la participación social diferenciada por género.

Finalmente, pero no menos importante, es el papel que juegan los líderes de opinión en la localidad: el sacerdote de la iglesia católica, el comisario municipal y el comisario ejidal. Ellos son actores clave en los temas ambientales de la localidad, ya que su opinión es importante para Sisal por su poder de convocatoria, capacidad organizativa y empatía con la comunidad (Méndez Álvarez, 2016: 55).

Administración de la zona costera

Considerando lo enunciado arriba, se pueden identificar cinco consideraciones para la administración de la zona costera.

Primero, se encuentra la generación de Terrenos Ganados al Mar (TGM) (Art. 125°, Ley General de Bienes Nacionales (LGBN), 2004) de forma artificial, mediante rellenos deliberados, lo cual conlleva a una nueva delimitación de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) (Art. 119°, LGBN y Art. 4°, Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar (RUAZOFEMAT), 1991) y en este caso, a una acción penal en contra de las personas que llevan a cabo el relleno por no cumplir con los procedimientos previstos para el desarrollo de rellenos deliberados (Iturriaga, 2004: 1041).

La siguiente consideración es que no existe un instrumento de ordenación local del territorio o de planeación urbana que permita ubicar las áreas de desarrollo inmobiliario y equipamiento en reservas territoriales diferenciables de las áreas de conservación (Urrea, 2012:25-28).

Una consideración más tiene que ver con las autoridades municipales de Hunucmá, quienes efectúan el cobro del impuesto predial sobre los TGM sin haber sido desincorporados aquéllos

por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Mientras los TGM no se desincorporen, ésta situación crea incertidumbre jurídica para los habitantes de Sisal sobre la legal posesión del terreno rellenado e indefensión ante las autoridades en sus tres órdenes de gobierno (Urrea, 2012: 78; Urrea 2015: 63).

Finalmente, debido a la colindancia de Sisal con la Reserva Estatal “El Palmar” se debería retomar el proyecto de “Reglamento de acopio, transporte [,] procesamiento y manejo de residuos sólidos para la Comisaría de Sisal, municipio de Hunucmá, Yucatán” (Campos, 2002) que, en conjunto con lo establecido por la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGP y GIR) (2003) y su Reglamento (2006), la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) (1988) y su Reglamento en materia de Impacto Ambiental (2000) y en materia de Áreas Naturales Protegidas (2000), se puedan tomar acciones de prevención y mitigación de la contaminación histórica y presente en el humedal.

Hasta el momento ninguna de las acciones arriba mencionadas se ha llevado a cabo. Lo anterior se explica por la complejidad que guarda el caso. Si se emprendiesen las acciones penales en contra de la población que rellena la ciénega, alrededor de un tercio del poblado iría a la cárcel y, para poder emprender una acción legal, se tendría que redelimitar la ZOFEMAT y con ello establecer la porción que ocupan los TGM. Una vez hecho lo anterior, la SEMARNAT debería decidir si los TGM serían parte del patrimonio nacional o se desincorporarían a favor de sus creadores, situación donde sería incierto el proceder penal de la premisa primera. En consecuencia, habría una certidumbre jurídica para los pobladores de Sisal en torno al cobro de derechos por

uso, goce, aprovechamiento y explotación de la ZOFEMAT, se hayan o no desincorporado los TGM. En caso de no desincorporarse, se podrían cobrar derechos por el uso de éstos por parte de la SEMARNAT -más el cobro de derechos de ZOFEMAT-; en caso de desincorporarse, el municipio podría cobrar, de forma legal, el impuesto predial asociado a éstos y la SEMARNAT los derechos por uso de ZOFEMAT. Finalmente, y en aras de que cesaran los rellenos, se tendría que plantear una estrategia de expansión habitacional, industrial y de servicios del poblado que tome en cuenta al Ejido Sisal como único territorio en el cual la población podría establecerse de forma legal, con la consecuencia de estar alejada de la franja costera y las implicaciones que esto conlleva en el desarrollo de la actividad pesquera; se debe considerar la colindancia con la Reserva Estatal “El Palmar” y los ordenamientos que existen en materia de Áreas Naturales Protegidas. Para todo lo anterior, el poblado precisaría de un instrumento de ordenación del territorio local, el cual previera la población permanente y pendular, los riesgos por acción de eventos naturales y antropogénicos *ex situ* e *in situ*, la regulación de las actividades turísticas e industriales que se llevan a cabo en el puerto, las temporalidades de desarrollo de dichas actividades e incorporar la variable cambio climático. Sin duda, este escenario impone grandes retos para la población local y residentes temporales, las autoridades y la comunidad académica de la UNAM.

CONCLUSIONES

En conjunto, el relleno de la ciénega y la inacción de las autoridades en materia de residuos han provocado una crisis ambiental y sanitaria latente y poco percibida por los pobladores, que

a escala local podría tornarse severa en poco tiempo debido a factores como la contaminación de los afloramientos de agua dulce que abastecen al poblado, los riesgos a la salud humana por el consumo de alimentos contaminados, ya sean pescados en la ciénega, ya sean plantados en los terrenos rellenados, la disminución del *stock* pesquero del camarón. No hay que dejar de lado que el relleno del humedal es la consecuencia de un problema territorial (Meza Cuellar, 2013: 11), el cual tiene su origen en el empobrecimiento de segmentos importantes de la población, utilización de sistemas de construcción de vivienda y de infraestructura que no respeta parámetros de seguridad, incumplimiento de normas institucionales y defectuosos sistemas de control y organizacionales” (Meza Cuellar, 2013: 119). Esta pobreza material en el puerto ha sido constante desde los años veinte del siglo XIX (Canto Mayén, 2014: 9).

Sólo visibilizando los efectos nocivos que tiene rellenar el humedal con basura y reforzado con cambios en los estilos constructivos de las viviendas, por ejemplo, a palafitos y la acción de las autoridades para gestionar los residuos de manera adecuada, pueden ser, en conjunto, una alternativa para que en Sisal se evite una crisis ambiental y sanitaria que se ha gestado desde la mitad del siglo pasado. La contaminación, como los efectos del cambio climático, son cambios paulatinos que apenas son perceptibles por la sociedad y afecta a las poblaciones de forma incremental y no es hasta alcanzar un punto de inflexión que trasciende a desastre (Meza Cuellar, 2013: 10).

Con base en lo anterior se puede entender el círculo vicioso de problemas en la localidad: el deterioro ambiental acarrea efectos nocivos en la actividad pesquera que a su vez tiene relación con el estilo constructivo de los hogares y con

ello la ubicación de las viviendas. Gracias a evidenciar el relleno de la ciénega, como caso paradigmático de la cultura local de la basura en Sisal, que nos permite reforzar la idea donde adaptación a los cambios y resiliencia son conceptos complementarios. El primero nos permite mostrar cómo la población local transforma su medio ambiente circundante, el cual, está en constante cambio de forma natural y, que por acción humana, adiciona e incrementa la intensidad de los cambios naturales. El concepto de resiliencia nos permite entender que un sistema alterado puede retornar a su estado original o de nuevo equilibrio ocurrido un evento extremo. Si se conjunta el estudio de ambos, es posible que al llevarlos a la esfera de toma de decisiones y resolución de conflictos socioambientales, las poblaciones humanas, en este caso la población de Sisal, primero, interiorice en su esquema de referencias los daños que hay en su entorno natural y con base en esto, modifique sus conductas para aminorar –deseablemente frenar– los daños al medio ambiente y con ello a la salud humana. Esta explicación deja fuera los daños causados por fuentes externas a la localidad, como ya se mencionó las aportaciones de agua epicontinental, es un paso necesario para afrontar los cambios que ya se gestan y que no tardarán en ser percibidos por la población, ya sea por las acciones *in situ*, ya sea por variables macro, como puede ser el cambio climático.

Las siguientes interrogantes a resolver son ¿cuáles son los cambios en el ecosistema costero a raíz del relleno?, y ¿cómo afecta este cambio en el ecosistema a la población? Si bien en este trabajo se han hecho algunas hipótesis al respecto, se carece de la información necesaria para poder responder dichas preguntas, especialmente lo referente a los efectos en la salud y las

consecuencias sociales a mediano y largo plazo. En materia ambiental, Meza Cuellar (2013: 116) explica que los ecosistemas más degradados en la localidad son el manglar, el mar y la duna. Quizá los esfuerzos de estudio y conservación deban enfocarse a la investigación minuciosa de dichos ecosistemas.

Finalmente, hay que rescatar la existencia de gran cantidad de literatura gris que existe y que considera a Sisal como objeto de estudio. El esfuerzo ahora, es poder sistematizar esta información y poder encontrar las conexiones que hay entre los diversos estudios para atender los problemas que se han detectado en Sisal. Este libro es un primer esfuerzo.

REFERENCIAS

- Alcalá, G. 2016. El impacto del cambio de corrientes litorales en la actividad pesquera de Puerto Chiapas (antes Puerto Madero), Chiapas. Memorias en extenso del VII Simposio Internacional del Carbono en México (en prensa). Programa Mexicano del Carbono. México.
- Álvarez Méndez, D. 2016. Análisis de la participación comunitaria en el ámbito ambiental. El caso de Sisal, Yucatán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Sisal, Yucatán. 109 p.
- Andrews, A., Vail, G. 1990. Cronología de sitios prehispánicos costeros de la Península de Yucatán y Belice. Boletín de la Escuela de Ciencias Antropológicas. 18: 104 y 105. 18-95.
- Campos, J., 2002. Reglamento de acopio, transporte procesamiento y manejo de residuos sólidos para la Comisaría de Sisal, municipio de Hunucmá, Yucatán. Comisaría Municipal de Sisal. México, Yucatán, Sisal. 24 p.
- Canto Mayén, E. Sisal: comercio y vida cotidiana (1806–1871). En García Sandoval, I., Pérez Domínguez, M y Ronzón León, J. 2014. *Puertos y comercio en el Golfo de México (siglo XIX)*. Colección Venablo. Morbo. México. D. F. 180 p.
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV). 2010. Influencia del agua y alimentos en la salud y bienestar de la población en Sisal. Informe de la práctica de campo Sisal 2010. Maestría en Ciencias en la especialidad de Ecología Humana-CINVESTAV Mérida. Yucatán, Mérida. 64 p.
- CINVESTAV-AMEP, Fraga, J. (Coord. y Ed.). 1992. El proceso de emigración hacia la Costa de Yucatán. Estudio de cuatro puertos del litoral Yucateco. CINVESTAV Unidad Mérida-Asociación Mexicana de Estudios de Población A. C. (AMEP)-Fondo de las Naciones Unidas para Actividades de Población (UNFPA). México, Mérida. 101 p.
- Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán. Número 31829. Viernes 8 de abril de 2011. Mérida. Yucatán. 62 p.
- El Colegio de México-Centro de Estudios Económicos. 2002. Encuesta Nacional a Hogares Rurales de México (ENHRUM I). Sisal, Yucatán, Región Sur-Sureste. México. 14 p.
- INEGI. 1983. X Censo General de Población y Vivienda 1980. Estado de Yucatán Volumen I, Tomo 31. México, D. F., p 34.
- INEGI. 1989. X Censo General de Población y Vivienda 1980. Estado de Yucatán, Integración Territorial Tomo 31. México, Aguascalientes, p. 8.
- INEGI. 2001. XII Censo General de Población y Vivienda 2000. Estado de Yucatán, Tabuladores Básicos Tomo 1. México, Aguascalientes, p. 191.
- INEGI. 2011. XIII Censo General de Población y Vivienda 2010. Cuestionario ampliado. Estado de Yucatán. Tabuladores de población del cuestionario ampliado (elaborados el 21/09/2011). Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=27303&s=est> (visitada 12/06/2016).
- INEGla. 1991. XI Censo General de Población y Vivienda 1990. Estado de Yucatán, Resultados Definitivos, Tabuladores Básicos Tomo 1. México, Aguascalientes, p. 41.
- INEGlb. 1991. XI Censo General de Población y Vivienda 1990. Estado de Yucatán, Resultados Definitivos, Integración Territorial. México, Aguascalientes, p. 60.
- Ley General de Bienes Nacionales, Publicada en el DOF 20/05/2004, última reforma publicada 07/06/2013.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Publicada en el DOF 28/01/1988, última reforma publicada 09/01/2015
- Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Publicada en el DOF 08/10/2003, última reforma publicada 22/05/2015.
- Mauss, M. 1974. Introducción a la etnografía Colección Fundamentos: 13 etnografía. Madrid: Istmo. Madrid. 388 p.
- Meza Cuellar, N. 2013. Diagnóstico de vulnerabilidad social frente a impactos de cambio climático en puerto Sisal, Yucatán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Sisal, Yucatán. 140 p.
- Morán Angulo, R.E. 2011. Entre cuerdas, cimbras y chinchorros: la dimensión humana de la pesca ribereña costera en Mazatlán, Sinaloa, México. 253-286. En Alcalá, G. Pescadores de América Latina y el Caribe: espacio, población, producción y política Volumen I. Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación-Sisal (UMDI-Sisal), Facultad de Ciencias, UNAM. D. F. 376 p.
- Newman, M. C. 1998. Fundamentals of ecotoxicology. Ann Arbor. Estados Unidos de América, Chelsea-Michigan. 402 p.

RAE, "resiliencia", <http://dle.rae.es/?id=WA5onlw>

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Impacto Ambiental, Publicado en el DOF 30/05/2000, última reforma publicada 31/10/2014.

Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas, Publicado en el DOF 30/11/2000, última reforma publicada 21/05/2014.

Reglamento de la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Publicada en el DOF 30/11/2006.

Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar, Publicado en el DOF 21/08/1991

Rodríguez Losa, S. 1977. La Población de los Municipios del Estado de Yucatán: 1900-1970. Ediciones del Gobierno del Estado. Mérida. 8 ff.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA). Ficha técnica Reserva Estatal "El Palmar". SEDUMA. México, Mérida. 22 p.

Secretaría de Industria y Comercio (SI y C). 1963. VIII Censo General de Población 1960. Estado de Yucatán. México, D. F., p. 25, 40.

SI y C. 1971. IX Censo General de Población 1970. Estado de Yucatán. México, D. F., p. 3.

Urrea Mariño, U. 2012. Prácticas de vida cotidiana asociadas a la basura, los residuos y los desechos en la localidad costera de Sisal, Yucatán: propuesta de modelo de manejo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Sisal, Yucatán. 194 p.

Urrea Mariño, U. 2015. Privatización de la zona costera mexicana y el desarrollo de la actividad turística: el caso del municipio de Solidaridad, Quintana Roo. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México, México, D. F. 184 p.

Urrea Mariño, U. 2016. El impacto que tiene la basura en el desarrollo de la actividad pesquera en Sisal, Yucatán. Memorias en extenso del VII Simposio Internacional del Carbono en México (en prensa). Programa Mexicano del Carbono. México.

Venier, M. E. 1997. ¿Por qué "apoderar"? Debate Feminista. 1:4, pp 335-340.

Yaax Beh. 2005. Saneamiento ambiental y manejo de residuos sólidos en cuatro comunidades del Corredor Biológico Costa Norte de Yucatán. 2º Informe. México, Mérida. 102 p.



SECCIÓN 4

DIVERSIDAD DE BACTERIAS DEL GÉNERO *STREPTOMYCES* EN SEDIMENTOS COSTEROS DE LA LAGUNA LA CARBONERA Y EL PUERTO DE CHELEM EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN Y SU POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO

Parera-Valadez, Yessica¹, Yam-Puc Alejandro¹,
Borges-Argáez Rocio², Cáceres-Farfán Mirbella²,
López-Aguilar Korynthia¹, Prieto-Davó, Alejandra¹

¹UNAM - Unidad Sisal- Facultad de Química. Puerto de Abrigo s/n, C.P. 97356, Sisal, Yucatán, México

²CICY - Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, Yucatán, México

RESUMEN

En años recientes, la industria farmacéutica ha reconocido la importancia de explorar la diversidad de las comunidades microbianas marinas debido a la exitosa obtención de productos naturales con estructuras químicas novedosas a partir de grupos específicos de bacterias. Por ejemplo, los actinomicetos, quienes representan el grupo más prolífico en cuanto a la producción de metabolitos secundarios con bioactividad antibacteriana, herbicida, antiparasitaria y pesticida. En especial, destacan los miembros del género *Streptomyces* puesto que de ellos se han logrado obtener más del 80% de compuestos antibacteriales descritos y caracterizados hasta el día de hoy. La investigación aquí descrita tuvo como objetivo identificar y evaluar la bioactividad de las especies cultivables de *Streptomyces* que se encuentran asociadas a los sedimentos marinos de la zona costera de la península. En este estudio, se identificaron dos localidades con una alta abundancia de actinomicetos del género *Streptomyces*: Chelem y La Carbonera. Para identificar las cepas que pudiesen presentar características estrictamente marinas, se llevaron a cabo estudios de dependencia al agua de mar para crecimiento como un indicador de su adaptación al medio marino. La zona de Chelem presentó el mayor número de cepas dependientes de agua de mar. Por otra parte, los estudios de filogenia realizados utilizando secuencias parciales del gen rRNA 16S probaron que las cepas se encuentran relacionadas con especies productoras de metabolitos secundarios, lo cual es alentador para futuros estudios en la búsqueda de estructuras químicas novedosas a partir de estos microorganismos. Como prueba de ello, dicha característica sirvió de base para la selección de cepas con posible actividad antibacteriana, lo cual derivó en resultados positivos de cinco cepas sometidas. A partir de la cepa NCA004 se logró

el aislamiento del metabolito 1, el cual fue identificado por cromatografía como resistomicina, un compuesto conocido que es derivado de quinona y presenta actividad bactericida y vasoconstrictora.

Los sedimentos costeros de la Península de Yucatán han demostrado ser una fuente prometedora de microorganismos con potencial bioactivo por lo que es importante continuar con la investigación de estos microorganismos y así conocer más acerca de su ecología y de la estructura de sus comunidades. Más aún, es indispensable estudiar el efecto de distintas presiones antropogénicas sobre la diversidad bacteriana y evaluar si dichas presiones ejercen un cambio radical sobre la estructura de la comunidad de actinomicetos presentes en los sedimentos de la costa yucateca.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la diversidad microbiana siempre se ha considerado atractivo e importante debido a la gran capacidad que poseen los microorganismos de adaptarse a distintos ambientes, en especial las bacterias. Estos organismos procariontes son capaces de degradar y producir una cantidad inimaginable de compuestos químicos, los cuales son útiles en un sinnúmero de actividades económicas (Madigan *et al.*, 2003); así mismo, la vida en el planeta depende de procesos en los cuales los principales intermediarios son agentes microbianos (Kouridaki *et al.*, 2010). Es por esto que, conocer la composición de la comunidad microbiana, su distribución en el ambiente y los factores que alteran dicha composición poseen ventajas tanto para su explotación como para la conservación de la biósfera misma.

En años recientes, la industria farmacéutica ha reconocido la importancia de explorar la diversidad de las comunidades microbianas, en especial el estudio de bacterias marinas ha cobrado fuerza debido a la exitosa obtención de productos naturales con estructuras químicas novedosas que además poseen actividad biológica (Jensen *et al.*, 2005b; Manivasagan *et al.*, 2013). Debido a su capacidad de adaptación, estas bacterias tienen una presencia cosmopolita en el océano y representan una gran diversidad de especies disponible para estudio (Bull *et al.*,

2005). Además, esta misma capacidad de adaptación permite, en algunos casos, cultivarlas en condiciones de laboratorio y obtener grandes volúmenes de biomasa (Madigan *et al.*, 2003).

La diversidad de bacterias que habitan el océano es mucho mayor a la de cualquier otro ecosistema (Committee on the Ocean's Role in Human Health, 1999), sin embargo, solamente se ha logrado caracterizar menos del 1% de su totalidad (Tiwary y Gupta, 2012). Recordemos que solamente entre el 1-10% de las bacterias que se observan en un microscopio son cultivables, por lo que existe un extenso porcentaje "incultivable" que aún falta cubrir para estudiar a fondo el potencial metabólico de toda una comunidad (Bull, 2004). A pesar de ello, este pequeño porcentaje (1%) ha sido suficiente para demostrar su importancia en varias ramas de la biotecnología. En específico, los actinomicetos, con el género *Streptomyces*, son las bacterias más prolíferas en cuanto a la producción de metabolitos secundarios con bioactividad antibacteriana, herbicida, antiparasitaria y pesticida, además de poseer enzimas útiles en tratamientos de biorremediación. (Chandrakant *et al.*, 2011; Deepa *et al.*, 2013). Debido a la capacidad de producción de dichos compuestos bioactivos los miembros del género *Streptomyces* representan el grupo de bacterias más prolífico para la industria farmacéutica produciendo más del

80% de compuestos antibacteriales descritos y caracterizados hasta el día de hoy (Bérdy, 2005; Jensen *et al.*, 2005b; Bull y Stach, 2007).

La presencia de actinomicetos en sedimentos marinos ha sido bien documentada y se ha observado que conforman una parte metabólicamente activa de la población microbiana endémica del sedimento. (Weyland, 1969; Moran *et al.*, 1995). Los sedimentos marinos componen 2/3 partes del área de la superficie de la Tierra y representan un extenso hábitat gracias al área y volumen que abarcan (Teske, 2013). En ellos es posible encontrar de 2000 a 3000 especies bacterianas por muestra de sedimento (Hong *et al.*, 2006), número muy conservador que revela la gran riqueza y diversidad existente. Dentro de esta gran diversidad se encuentra la Clase Actinobacteria (comúnmente conocidos como actinomicetos), cuyo papel ecológico es el de degradación de materia orgánica (Manivasagan *et al.*, 2013).

El primer reporte que documenta la presencia de actinomicetos en sedimentos marinos fue elaborado por Weyland en 1969, en el cual se documenta la distribución de estos organismos procariontes en el Mar del Norte y en el océano Atlántico; inclusive desde aquellos comienzos, el mismo autor sugiere que los actinomicetos marinos son una fuente importante de productos naturales con propiedades y estructuras diferentes a las reportadas en el medio terrestre.

De acuerdo con estudios de identificación y diversidad, los actinomicetos son bacterias dominantes en los sedimentos marinos (Gulve y Deshmukh, 2011). Karthik y colaboradores (2010), mencionan que, hasta el momento, se han reportado 83 especies cultivables de actinomicetos de hábitats marinos, las cuales pertenecen a 28 géneros distintos, siendo los *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Nocardia* y

Rhodococcus los más comúnmente reportados, aunque no todos ellos con representantes estrictamente marinos (Weyland, 1969; Goodfellow y Haynes, 1984; Pisano *et al.*, 1989; Colquhoun *et al.*, 1998; Kokare *et al.*, 2004).

El desarrollo de nuevas técnicas moleculares ha permitido el estudio de poblaciones no cultivables y ha coadyuvado a la descripción de nuevas especies marinas, incluidos miembros de los géneros *Dietzia*, *Rhodococcus*, *Streptomyces*, *Salinispora*, *Marinophilus*, *Solwaraspora*, *Salinibacterium*, *Aeromicrobium*, *Williamsia* y *Verrucosipora*, entre otros (Magarvey *et al.*, 2004; Bull *et al.*, 2005; Jensen *et al.*, 2005b; Mincer *et al.*, 2005). Cabe destacar que el género *Salinispora* es el primero en considerarse estrictamente marino debido a su requerimiento de sodio para el crecimiento. Fue descubierto por Mincer y colaboradores en el 2002 y descrito por Maldonado y colaboradores en el 2005 y de él se han obtenido diversos compuestos incluyendo el compuesto anticancerígeno salinosporamide A (Fehling *et al.*, 2003), que se encuentra en fase II de estudios clínicos de la Food and Drug Administration (FDA, USA). Otros ejemplos importantes son los géneros *Micromonospora*, *Actinomadura*, *Streptoverticillium*, *Actinoplanes*, *Nocardia*, *Saccharopolyspora* y *Streptosporangium*, los cuales han sido considerados los más prolíficos en cuanto a producción de compuestos antimicrobianos (Manivasagan *et al.*, 2013).

A pesar de que nuestro país cuenta con 11,122 km de litoral, la diversidad de actinomicetos marinos que encontramos en nuestros océanos ha sido muy poco estudiada (Maldonado *et al.*, 2009; Torres-Beltrán *et al.*, 2012; Becerril-Espinosa *et al.*, 2013). La Península de Yucatán constituye una región del país que se caracteriza por su riqueza y diversidad de especies (Arias y Montiel, 2010),

su variedad de ecosistemas y un amplio litoral. Sin embargo, la zona costera de la península es un área poco estudiada en cuanto al potencial biotecnológico de las comunidades de actinomicetos en los sedimentos de sus costas, por lo que se trata de un lugar ideal para la búsqueda de nuevos actinomicetos de origen marino.

En este contexto, se ha realizado una investigación para identificar a las especies cultivables de actinomicetos que se encuentran asociados a los sedimentos marinos de la zona costera de la península y evaluar la extensión y novedad de su diversidad. Dentro de este estudio, se identificaron dos localidades con una alta abundancia de actinomicetos del género *Streptomyces*: Chelem y La Carbonera, la primera con indicios de adaptación de las cepas aisladas a condiciones marinas y, la segunda, con características de ser una población de *Streptomyces* que se encuentra en proceso de adaptación a estas condiciones. Para conocer más acerca de las características ambientales de los sedimentos costeros en los cuales habita este género de bacterias, se llevaron a cabo estudios de la composición de carbón y nitrógeno orgánico total. Esta información puede ser útil para enfocar los futuros esfuerzos de colecta en las zonas que presenten características prometedoras para el aislamiento de cepas novedosas.

MARCO TEÓRICO

Los actinomicetos marinos son considerados como una fuente importante de compuestos con actividad biológica gracias al exitoso aislamiento de compuestos con nuevas estructuras químicas y con propiedades diferentes e inusuales con respecto a sus congéneres terrestres (Jensen *et al.*, 2005a). La búsqueda de dichas bacterias se ha llevado a cabo en diversos ambientes y se han desarrollado numerosas técnicas con la finalidad

de obtener y cultivar especies nuevas y poco comunes (Hames y Uzel, 2012).

Los actinomicetos son un grupo de bacterias aeróbicas Gram + con alto contenido de guanina y citosina dentro de su ADN; su clasificación taxonómica las coloca dentro de la clase Actinobacteria (Stackebrandt *et al.*, 1994) y el orden Actinomycetales (Buchanan, 1917), de este último se deriva el nombre común de “actinomicetos”. Dicho orden posee, hasta el día de hoy, alrededor de 46 familias y 310 géneros descritos de acuerdo con el portal List of Prokaryotic names with standing in nomenclature (Euzéby, 1997). Una de sus características principales es la formación de micelio aéreo ramificado, similar al de los hongos, que les permite la colonización de sustratos lejos de su centro de crecimiento (Torres-Beltrán *et al.*, 2012). Además, producen esporas asexuales con ciclos de vida muy complejos (Prescott, 2002; Manivasagan *et al.*, 2013). Son generalmente saprófitas (Goodfellow y Williams, 1983) y se pueden encontrar en diversos ambientes y presentar fenotipos variados (Manivasagan *et al.*, 2013). Su papel ecológico dentro de los ecosistemas incluye: la remineralización y reciclaje de nutrientes (Sirivasan *et al.*, 1991), una fuente de alimento de niveles tróficos superiores y, la formación de humus mediante la descomposición de materia orgánica recalcitrante como queratinas, ligninas y quitinas (Goodfellow y Williams 1983; McCarthy y Williams, 1992). En el medio marino su importancia radica en la participación en ciclos biogeoquímicos ya que son degradadores de materia orgánica y aportan nutrientes indispensables para sustentar la productividad primaria a lo largo de la columna de agua (Kouridaki *et al.*, 2010).

La característica más peculiar de los actinomicetos en términos de estudios para el

descubrimiento de productos naturales es su gran capacidad de producción de metabolitos secundarios. De hecho, son considerados como el grupo más prolífico en cuanto a producción de compuestos con actividad biológica en comparación con otros taxa bacterianos (Tiwari y Gupta, 2012). Destaca el género *Streptomyces*, puesto que cerca del 80% de todos los metabolitos bioactivos reportados de actinomicetos provienen de él, así como tres cuartas partes de la producción total de antibióticos utilizados comercialmente hasta ahora (Jensen *et al.*, 2005a). Se cree que la expresión genética del metabolismo secundario se dispara por ciertos factores ambientales como lo son la competencia, la escasez de alimentos, la protección del organismo hospedero, o bien, la comunicación entre células (Challis y Hopwood, 2003; Keller y Surette, 2006). Estas funciones parecen ser de gran importancia para estos microorganismos ya que, por ejemplo, aproximadamente un 6% del genoma de *Streptomyces avermitilis* se compone por grupos de genes involucrados en el metabolismo secundario (Omura *et al.*, 2001). Más aún, se cree que la transferencia lateral de genes involucrados en el metabolismo secundario ha coadyuvado a la exitosa adaptación de los actinomicetos a distintos ambientes (Jensen *et al.*, 2007).

En años recientes, la investigación de los actinomicetos asociados a sedimentos marinos en las costas mexicanas se ha desarrollado notablemente. En el 2007, Martín y colaboradores, mediante el uso de distintos medios de cultivo, confirmaron la presencia de los géneros *Salinispora* y *Marinispora*, así como la dominancia de miembros del género *Streptomyces*, siendo uno de ellos el responsable de la producción de los compuestos citotóxicos denominados marmicina A y B.

Uno de los trabajos más completos realizados con muestras de sedimento, tanto del

Golfo de México como del Mar de Cortés, fue el realizado por Maldonado y colaboradores en 2009. En dicho trabajo se probaron 17 medios de cultivo diferentes y se obtuvieron alrededor de 300 cepas de distintos géneros incluyendo: *Actinomadura*, *Dietzia*, *Gordonia*, *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Rhodococcus*, *Saccharomonospora*, *Saccharopolyspora*, *Salinispora*, *Streptomyces*, "*Solwaraspora*" y *Verrucosipora*, con lo que aumentó notablemente el número de géneros reportados en costas de nuestro país.

Los trabajos más recientes fueron realizados con muestras del Pacífico y del Golfo de California, específicamente en Bahía de Todos Santos, Bahía Concepción y Bahía de los Ángeles, Baja California. Para el primer sitio reportado se documentó el cultivo de los géneros *Streptomyces*, *Micromonospora* y *Nocardia*, mientras que para los sitios restantes se obtuvo además el género *Salinispora*. En estos estudios se demostró la actividad antibacteriana y citotóxica de los extractos de cepas cultivadas (Becerril *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2012).

En 2013, Becerril y colaboradores complementaron el estudio de la diversidad en el Golfo de California con muestras de sedimentos obtenidas en San Felipe, Baja California y en la Bahía de Loreto, Baja California Sur. En este estudio se lograron cultivar cepas pertenecientes a ocho géneros: *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Salinispora*, *Verrucosipora*, *Actinomadura*, *Saccharomonospora*, *Streptomyces* y *Nocardiopsis*. Más aún, algunas de las cepas del género *Streptomyces* podrían representar nuevas especies (Becerril *et al.*, 2013).

Es claro que las costas y los mares de México albergan una gran diversidad de actinomicetos y es por ello que se debe continuar con los estudios de bioprospección en localidades poco exploradas e implementar nuevas técnicas de

aislamiento y cultivo para explotar ampliamente el potencial biotecnológico que poseen. Para que estas técnicas tengan éxito, es necesario conocer las características ambientales que favorecen la presencia y/o abundancia de *Streptomyces* en los sedimentos marinos. Por ejemplo, se sabe que la abundancia relativa de este género disminuye al explorar sedimentos lejanos a la costa (Prieto-Davó, *et al.*, 2008), sin embargo, no se conocen las condiciones ambientales de los sedimentos costeros donde la abundancia de miembros marinos de este género es alta.

Nutrientes en sedimento: C y N

Una manera con la que se pretende generar información relacionada con las condiciones ambientales que afectan la diversidad de *Streptomyces* presentes en sedimentos costeros, es la descripción del medio en donde habitan mediante la observación y registro de las condiciones ambientales que ejercen presión sobre sus poblaciones. Los sedimentos son ambientes relativamente estables, conformados por partículas provenientes de la erosión de rocas, restos de organismos o compuestos precipitados químicamente (Tarbuck y Lutgens, 2005), lo que los convierte en ambientes ricos en minerales y en el mayor reservorio de materia orgánica del planeta (Calva y Torres, 2000). A diferencia de los suelos terrestres, los sedimentos se encuentran completamente cubiertos por una columna de agua, ya sea el océano, un río o cualquier cuerpo de agua. Los microorganismos bentónicos consumen el oxígeno al degradar la materia orgánica, una vez agotado el oxígeno, los sedimentos no perturbados de las capas inferiores permanecen en un ambiente anóxico (Nealson, 1997). En las zonas costeras, aproximadamente el 50% del carbono orgánico que se precipita en los sedimentos proviene de la

productividad primaria, mientras que la otra mitad se deriva de restos de organismos mayores, aportes terrígenos, y excreciones extracelulares de eucariotas (Kordel *et al.*, 1997). Por otro lado, el nitrógeno orgánico presente en los sedimentos puede provenir, al igual que el carbono orgánico, de aportes terrígenos, de material vegetal o fitoplancton y de varios procesos bacterianos que se encargan de transformar el nitrógeno inorgánico a formas asimilables para otros organismos (Escobar *et al.*, 2009). Uno de estos mecanismos es la fijación del nitrógeno, la cual consiste en la reducción enzimática del N_2 a NH_3 , NH_4^+ para formar compuestos orgánicos nitrogenados y que es llevado a cabo principalmente por cianobacterias. Más aún, el nitrógeno sufre una regeneración mediante procesos de hidrólisis y desaminación, con lo que se genera nitrógeno amoniacal que se reincorpora como nutriente a la columna de agua (Nealson, 1997).

Interacción sedimento-bacteria

El sedimento marino es pues, el mayor reservorio de materia orgánica disponible en el Planeta y, a diferencia de la columna de agua, es un ambiente relativamente estable. Sin embargo, también posee presiones para los microorganismos que allí habitan, como por ejemplo, la concentración de nutrientes, puesto que no es estática y muchas veces se ve influenciada por el tipo y tamaño de sedimento dominante. Cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, mayor será la presencia de nutrientes debido a que las moléculas se adsorben más fácilmente a granos finos (Doyle y Sparks, 1979). Existen estudios en los que se ha propuesto que el alto contenido de materia orgánica de estos sedimentos finos se encuentra relacionado con la abundancia de bacterias debido a que la materia orgánica adsorbida sirve

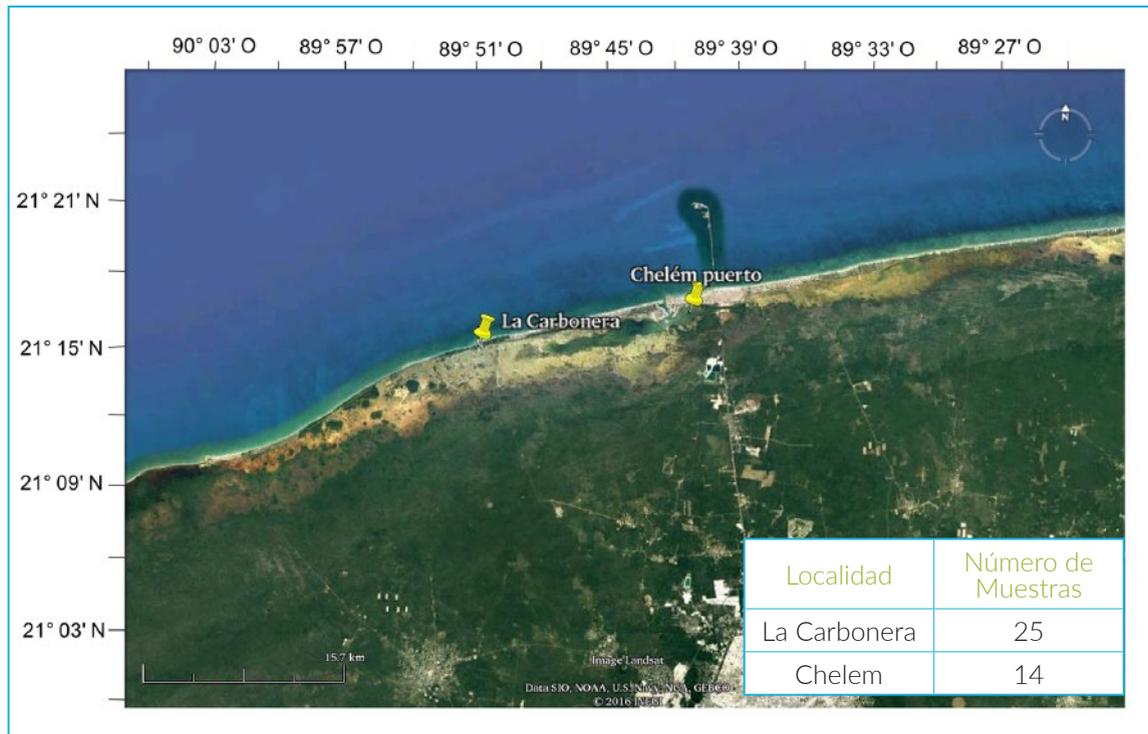


Figura 1. Mapa del área de estudio.

como alimento (Ruble y Dornseif, 1978). Más aún, el tamaño de las partículas del sedimento también es un factor determinante en la abundancia de las poblaciones bacterianas debido a que entre menor tamaño de grano, mayor superficie de colonización (Cammen, 1982).

En lo referente a actinomicetos marinos, Bredholt y colaboradores (2007), realizaron un estudio con sedimentos provenientes del fiordo Trondheim, Noruega, a partir del cual concluyeron que, efectivamente, los valores más altos de materia orgánica (COT y NOT) se asociaron con los sedimentos más finos, aunque no existía relación alguna con la diversidad y cantidad de cepas cultivadas. Sin embargo, el porcentaje de carbono orgánico sí se vio relacionado directamente con la bioactividad de las cepas, es decir, la muestra con mayor contenido de carbono fue la que presentó

las cepas con mejor bioactividad (Bredholt, *et al.*, 2007). Este tipo de estudios ayudan a entender si los gradientes ambientales influyen directamente las poblaciones bacterianas en los sedimentos, como lo propuso Dale desde 1974.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

La Península de Yucatán y la plataforma adyacente están conformadas por una gigantesca placa de roca caliza con un área aproximada de 350, 000 Km² (Weidie, 1985). Los sedimentos de esta zona se caracterizan por ser ricos en carbonatos, compuestos principalmente de oolitos, fragmentos de esqueletos, pellets, clastos carbonatados y barro carbonatado o micrita, siendo éste último el menos dominante (Balsam y Paine, 2003). Las áreas de muestreo poseen

un régimen micromareal de baja energía y arenas blancas, además de localizarse dentro de una red cavernosa muy compleja conocida como “El anillo de cenotes” (Hildebrant *et al.*, 1991; Pope *et al.*, 1991; Aranda-Cicerol *et al.*, 2006).

Muestras

Se realizaron muestreos de enero de 2012 a marzo de 2013 alrededor de la zona costera de la Península de Yucatán. Las localidades muestreadas que se presentan en este trabajo corresponden a La Carbonera y Chelem (Figura 1). Las muestras de sedimento se obtuvieron en un intervalo de profundidad de entre 0 y 2 m. La colecta de las muestras fue realizada mediante buceo-scuba, removiendo la capa superficial de sedimento (2 cm) mediante una espátula para posteriormente tomar la muestra de sedimento deslizando una bolsa whirlpack estéril.

Análisis de nutrientes presentes en sedimento

La determinación de nitrógeno total y carbono orgánico total se realizó mediante un analizador elemental (Costech elemental combustion system mod: ECS 4010). Primero, las muestras de sedimento se secaron mediante liofilización en un liofilizador LABCONCO Benchtop Freezone de 2.5 L, posteriormente se maceraron y se tamizaron con la finalidad de obtener granos más finos. Para la obtención del COT fue necesario llevar a cabo un pretratamiento con 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) 1M en vasos de precipitado a peso constante. Los valores obtenidos se procesaron mediante hojas de cálculo en el software Microsoft Office Excel.

Prueba de crecimiento en agua destilada

Para conocer el grado de adaptación que tienen al agua de mar, las cepas previamente identificadas

como miembros del género *Streptomyces* fueron sometidas a la prueba de crecimiento en agua destilada. Para ello se reactivó a cada cepa criogenizada en una placa con medio de cultivo A1; una vez observado el crecimiento, la cepa fue sembrada nuevamente en dos placas, una con medio A1 preparado con agua de mar y otra con el mismo medio de cultivo pero sustituyendo el agua de mar por agua destilada. Las placas se dejaron incubar a 28 °C durante 96 hrs o hasta detectar el crecimiento.

Obtención de cepas y métodos moleculares

Para la obtención de cepas se procesaron 5 g de sedimento que fueron secados en cajas de Petri semi-cerradas bajo una campana de flujo laminar. Una vez secos, se tomó un poco de sedimento con una esponja circular, la cual fue “estampada” en forma circular a lo largo de las cajas Petri con la finalidad de disminuir la cantidad de sedimento en cada presión de la esponja sobre la caja, a manera de dilución. Los medios de cultivo utilizados se prepararon con agar marino y 2 g Peptona, 10 g Almidón y 4 g extracto de levadura en 1 L de agua de mar (medio A1), y además se adicionaron 10 mg/mL (concentración final) de ciclohexamida (antifúngico) y uno de los antibióticos: rifampicina 5 mg/mL (concentración final) o gentamicina 10 mg/mL (concentración final) para evitar el crecimiento de bacterias Gram -. Las placas se dejaron incubar por una semana a una temperatura de 28° C.

Una vez observado crecimiento, las cepas fueron analizadas bajo un microscopio estereoscópico y seleccionadas con base en su morfología colonial; aquellas colonias con una apariencia “aterciopelada”, con formas plegadas y filamentos ramificados con o sin hifa aérea, fueron consideradas como actinomicetos de

acuerdo a lo sugerido en la literatura (Jensen *et al.*, 1991; Prieto-Davó *et al.*, 2013). Las colonias seleccionadas fueron aisladas en medio de cultivo A1 utilizando el método de siembra en estría. Para la confirmación del grupo Gram, se realizó la prueba de Hidróxido de Potasio (KOH) para identificar cepas Gram + (Powers, 1995). Dicho método consiste en colocar una pequeña porción de la colonia bacteriana sobre un portaobjetos, posteriormente se le añade una gota de KOH al 3% con el objetivo de observar un efecto en la viscosidad de la cepa, debido a las características de la membrana celular, las bacterias Gram + tienden a diluirse, mientras que las Gram - forman una capa viscosa fácilmente detectable (Powers, 1995). Una vez sembrada y purificada, la cepa fue cultivada nuevamente en medio líquido para la obtención de biomasa. Finalmente las cepas fueron criogenizadas a -80°C en glicerol al 20% para su preservación.

El ADN de las cepas se extrajo por el método de lisis *in situ* y adsorción en sílice descrito por Rojas *et al.*, (2008). La presencia de ADN fue evaluada mediante electroforesis en geles de agarosa al 1% teñidos con Gel Red.

La amplificación del gen del ADNr 16S se realizó mediante Reacción de Cadena de la Polimerasa (PCR) utilizando los oligonucleótidos FC27 (5' TACGGCTACCTTGTTACGACTT 3') y RC1492 (5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') de acuerdo con la metodología propuesta por Mincer *et al.* (2002). Los productos de PCR también fueron analizados mediante electroforesis en geles de agarosa. Dichos productos fueron enviados a la empresa Macrogen (Corea) para su purificación y posterior secuenciación. Una vez obtenidas las secuencias del gen ADNr 16S se visualizaron mediante el software Geneious 7.1.2 para determinar su calidad y cotejarlas

en las bases de datos especializadas en 16S EZtaxon y SILVA.

Para la construcción del árbol filogenético se utilizó el programa MEGA 6.0 (Tamura *et al.*, 2013) usando el algoritmo del análisis de Neighbor-Joining con 1000 repeticiones Bootstrap y el modelo de corrección Tamura-Nei. El árbol obtenido se modificó mediante el software InkScape para claridad en las etiquetas de cada cepa.

Actividad antimicrobiana de los extractos derivados de *Streptomyces marinus* y aislamiento de un compuesto activo

Las cepas NCA002, NCA004, NCA005, NCA006, NCA008 y NCA012 se incubaron de 10-12 días a 27°C . Cada cepa cultivada fue centrifugada a 5000 rpm por 30 minutos para separar a las células libres del sobrenadante, el cual fue extraído dos veces con 600 mL de acetato de etilo. A la fase orgánica se le añadió sulfato de sodio anhidro y fue filtrada. El solvente fue evaporado a presión reducida para obtener el extracto crudo de acetato de etilo de cada cepa. Por otro lado el pellet de cada cepa fue lavado con agua destilada y fue extraído dos veces con 500 mL de acetona. La acetona fue eliminada por evaporación a presión reducida obteniéndose el extracto crudo de acetona.

Cromatografía en capa delgada

Los análisis por TLC se realizaron usando placas de aluminio impregnadas con sílica gel (60F254) de la marca Merck (0.2 mm de espesor); las placas se examinaron primero bajo luz UV (λ 254 and 366) y los distintos componentes en los cromatogramas se revelaron sumergiendo las placas en una solución de ácido fosfomolibdico 820 g) y sulfato cérico (2.5 g) en 500 mL de ácido

sulfúrico (5%), seguido de un secado y calentamiento suave. Los metabolitos presentes en los extractos de acetato de etilo se visualizaron en la TLC eluyendo con diclorometano/metanol 95:5 y los extractos de acetona se eluyeron con diclorometano:metanol 6:1.

Aislamiento de resistomicina

Una muestra de 200 mg del extracto de acetato de etilo del actinomiceto NCA004 fue purificada por cromatografía en columna por gravedad (2.5 cm de diámetro y 20 cm de altura) usando una mezcla de Hx/CHCl₃/AcOEt/MeOH 7:3:2:1 obteniéndose 5 fracciones principales (A-E). La fracción C mostró por TLC ser un metabolito puro (2 mg) como un aceite amarillo soluble en CHCl₃ y con un R_f 0.63 en Hx/AcOEt 95:5 y se identificó como resistomicina por cromatografía de líquidos en columna C18 fase reversa acoplado a espectrometría de masas bajo las siguientes condiciones: 10-100% acetonitrilo en agua con 0.1% de ácido fórmico durante 10 min y posteriormente acetonitrilo 100% por 3 min adicionales.

Actividad antimicrobiana de los extractos

La actividad antimicrobiana se determinó usando como modelos las bacterias patógenas *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* por el método de bioautografía (Rahalison *et al.*, 1991). Todos los extractos se evaluaron depositando 0.5 mg (5%) sobre las placas de TLC. Después de eluir cada placa se depositó sobre un soporte de medio TSA y se le agregó 10 mL de TSA conteniendo 1 x 10⁶ ufc/mL de bacteria y se incubó a 37 °C por 24 h. Los extractos de acetato de etilo fueron eluidos usando una mezcla de diclorometano/metanol 6:4 y los extractos de acetona fueron eluidos usando diclorometano/metanol 6:4. Las zonas de inhibición

de los compuestos separados fueron visualizadas mediante la actividad de la deshidrogenasa usando 1 mg/mL de la sal de tetrazolio [Bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol, MTT]. Sobre la placa TLC las bacterias metabólicamente activas convierten el MTT en formazán. Como control positivo se utilizó 1 µL de amicacina (0.1 mg/mL) y como control negativo se utilizó 5 µL de CH₂Cl₂/MeOH 1:1. Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nutrientes presentes en los sedimentos: COT y NT

En la Tabla 1 se observan los valores de nutrientes obtenidos por localidad expresados en porcentaje (COT y NT). La localidad con el valor más alto de NT fue Chelem. Para la muestra en la que no fue posible determinar el contenido de nutrientes se utilizaron las siglas PDL (Por Debajo del Límite de Detección).

Tabla 1. Valor promedio del porcentaje de nutrientes presentes por localidad (PDL=por debajo del límite de detección, *Materia orgánica total).

Localidad	COT (%)	NT (%)
Chelem	3.21	0.754
La Carbonera	PDL	0.539

La Carbonera como Chelem se encuentran en regiones hidroquímicamente similares, diferenciándose en el nivel de impacto antropogénico, puesto que Chelem está sujeta al mayor número de descargas de aguas residuales de toda la costa de Yucatán (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2009).

Algunos trabajos han reportado que la presencia de distintas fuentes de nitrógeno favorecen el crecimiento de cepas productoras de

compuestos con actividad antibiótica, como lo es *Streptomyces* (Özcan *et al.*, 2013). Así mismo, los actinomicetos son considerados como microorganismos involucrados en el reciclamiento de la materia orgánica en los sedimentos. Aunque la localidad de Chelem muestra un mayor contenido de NT y también de *Streptomyces*, en este estudio la riqueza de todos los actinomicetos no estuvo relacionada con ninguno de los nutrientes evaluados (%COT y %NT) (datos no incluidos).

Dependencia al agua de mar

Para identificar las cepas de *Streptomyces* que pudiesen presentar características estrictamente marinas, se llevaron a cabo estudios de dependencia al agua de mar para crecimiento. Con ello se pretende resaltar a las cepas que muestren adaptaciones al medio marino y por ende tengan una mayor probabilidad de representar nuevas especies.

La zona de Chelem presentó el mayor número de cepas dependientes de agua de mar para su crecimiento, lo cual fue considerado como un indicador de su adaptación al medio marino. Por lo tanto, las cepas pertenecientes a este sitio

fueron seleccionadas para los estudios de actividad biológica.

Por otro lado, el requerimiento de agua de mar para crecimiento muestra indicios de un proceso interesante en La Carbonera. Las cepas de *Streptomyces* que se aislaron de esta localidad dejan ver una transición de metabolismos de un ambiente terrestre hacia uno marino. Es decir, cinco de las 15 cepas aisladas crecen perfectamente en ambos medios, siete de ellas tienen poco crecimiento al perder el agua de mar y, tres dependen de la presencia de agua de mar para su crecimiento (Figura 2). Este comportamiento podría estar relacionado con el hecho de que La Carbonera es un estuario “joven” creado como resultado del huracán Gilberto en 1988 (Palacios-Sánchez y Vega-Cendejas, 2010) y las cepas que aquí se encuentran se han ido adaptando poco a poco a las nuevas condiciones; a diferencia de lo que se observa en Chelem donde, todas excepto una cepa, necesitan de agua de mar para crecer.

Los resultados obtenidos pueden dirigirse hacia estudios de ecología microbiana en los que se investigue a fondo el efecto de una transición de ambiente terrestre a marino sobre el metabolismo de *Streptomyces* como indicador de la resiliencia de una comunidad microbiana a los cambios que ocurren en los sistemas costeros. Este tipo de observaciones son las que nos permiten dirigir los estudios de diversidad y aislamiento de actinomicetos a futuro ya que, depende del objetivo de estudio (e.g. descubrimiento de productos naturales o ecología microbiana), es posible escoger la localidad correcta para alcanzarlo.

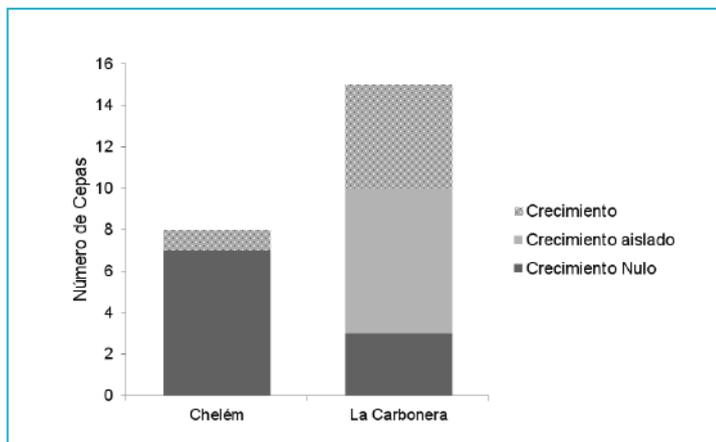


Figura 2. Cepas pertenecientes al género *Streptomyces* que presentaron total o parcial dependencia al agua de mar para su crecimiento después de un periodo de 96 horas de incubación.



Figura 3. Árbol filogenético obtenido a partir de 23 cepas conformadas por secuencias parciales (540 pb) del gen ADNr 16S. Se utilizó el método de Neighbor-Joining con Bootstrap de 1000 repeticiones y se muestran los nodos con valores > 50. Se presentan el número de colección y número de acceso GenBank de cada cepa. Los nombres en cursivas representan las cepas tipo (EzTaxon) más cercanas a las secuencias utilizadas con su número de acceso correspondiente. El círculo señala que dicha cepa no presentó crecimiento en medio de cultivo preparado con agua destilada, mientras que la referencia CA y CH representan los sitios de muestreo La Carbonera y Chelem respectivamente. *Bacillus* sp. fue utilizada para dar raíz al árbol.

Diversidad filogenética de los *Streptomyces* cultivados a partir de sedimentos costeros de la Península de Yucatán

Gracias al esfuerzo de equipos de investigación que han ido modificando las técnicas moleculares, tratamientos de muestras y medios

de cultivo, hoy día se sabe que la presencia de actinomicetos en los ecosistemas marinos es más común de lo que nos imaginamos (Jensen y Lauro 2008). Para la Península de Yucatán, este trabajo representa el primer registro de actinobacterias en sedimentos marinos y un punto de

partida para futuros trabajos ecológicos y de bioprospección.

A partir de muestreos realizados en dos localidades de la zona costera de Yucatán, se obtuvieron un total de 23 cepas de actinomicetos pertenecientes al género *Streptomyces*, género previamente reportado en aguas mexicanas (Golfo de México y Golfo de California) (Martin *et al.*, 2007; Maldonado *et al.*, 2009; Becerril-Espinosa *et al.*, 2012; Torres-Blutrán *et al.*, 2012, Becerril-Espinosa *et al.*, 2013).

Al igual que en otros trabajos en sedimentos costeros, el género *Streptomyces* domina significativamente las localidades de Chelem y La Carbonera, confirmando que este género es el más común dentro de ambientes marinos costeros (Kokare *et al.*, 2004; Duncan *et al.*, 2014). Este dominio de zonas costeras es real ya que, aunque podría pensarse que el medio de cultivo selecciona a favor de los *Streptomyces*, se ha reportado ampliamente que la predominancia del género se pierde al alejarse de la costa, incluso utilizando el mismo medio de cultivo (Jensen *et al.*, 1991; Prieto-Davó *et al.*, 2008).

La figura 3 muestra la relación filogenética que comprueba la posición taxonómica de las 23 cepas de *Streptomyces* obtenidas durante este estudio de bioprospección. Si bien los porcentajes de similitud con respecto a las bases de datos consultadas (SILVA y EZtaxon) que se utilizaron como criterio determinante de la novedad de las cepas aisladas son mayores a 98%, no se descarta la posibilidad de que alguna cepa represente una nueva especie y/o produzca un compuesto novedoso ya que éste es un valor

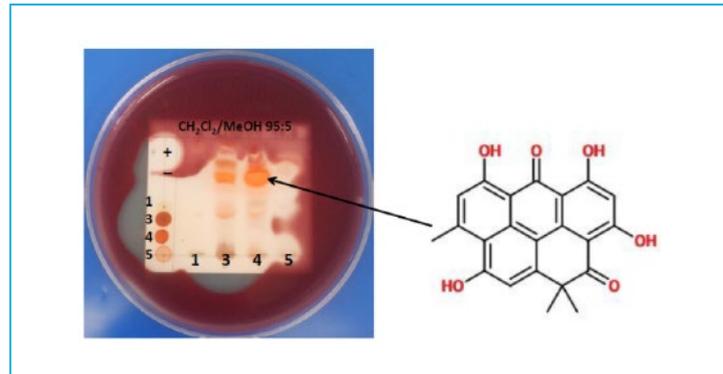


Figura 4. Detección de actividad antibacteriana mediante ensayo de bioautografía con extracto de acetato de etilo al 5%, cromatograma perteneciente a la cepa NCA004 contra *Staphylococcus aureus*, el compuesto de color amarillo corresponde a la molécula con actividad antibiótica conocido como resistomicina.

conservador que se seleccionó para no sobreestimar la abundancia de cepas nuevas. Sin embargo, el requerimiento de agua de mar para crecimiento en cepas de *Streptomyces* aisladas de la zona costera de la Península de Yucatán es un rasgo común y taxonómicamente distribuido a lo largo la mayoría de los clados formados por los representantes aislados de este género (Figura 2, círculo negro). El principal clado se encuentra formado por 12 cepas, seis de las cuales requieren agua de mar para su crecimiento. A pesar de que estas cepas comparten más del 98% de la secuencia del gen 16S ribosomal con el de *Streptomyces variabilis* (la cual fue aislada de suelos y ha sido reportada como productora del antibiótico variapeptina, (Nakagawa, *et al.*, 1990), este requerimiento las convierte en candidatas a estudios químicos posteriores ya que la mayoría de ellas presentó actividad antibacteriana y, el hecho de requerir agua de mar, indica diferencias metabólicas con su contraparte terrestre; por lo tanto, existe una mayor probabilidad de que los metabolitos secundarios que produzcan sean novedosos.

Tabla 2. Actividad antibacteriana detectada mediante el método de bioautografía.

Extracto	Actividad Antibacteriana	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Pseudomona aeruginosa</i>
AcOEt NCA002	+++	+++
Acetona NCA002	+	+
AcOEt NCA004	+++	+++
Acetona NCA004	+++	++
AcOEt NCA005	+++	+++
Acetona NCA005	+++	+++
AcOEt NCA006	+++	++
Acetona NCA006	+	-
AcOEt NCA008	+++	+++
Acetona NCA008	+++	+++
AcOEt NCA012	+	+
Acetona NCA012	++	+

+++ = actividad prominente, ++ = actividad moderada, + = actividad débil, - = actividad nula.

Actividad antimicrobiana de los extractos derivados de actinomicetos marinos y aislamiento de un compuesto activo

El ensayo de bioautografía realizado a las seis cepas de *Streptomyces* obtenidas de Chelem contra los patógenos *Staphylococcus aureus* y *Pseudomona aeruginosa* reveló que los extractos elaborados con acetato de etilo mostraron los mejores resultados en cuanto a actividad antibiótica. Cinco de las seis cepas sometidas al ensayo demostraron resultados positivos y, la cepa NCA004 fue considerada como la más interesante y seleccionada para fraccionamiento de extractos debido a la coloración de sus compuestos (Figura 4).

La técnica de bioautografía permite evaluar el extracto responsable de la actividad biológica a una concentración conocida observando un área de inhibición de crecimiento microbiano a simple

vista (Iskan *et al.*, 2005; Márquez *et al.*, 2003). Este método es simple y rápido ya que combina la separación de un extracto en cromatografía en capa delgada con la detección de actividad antimicrobiana. Con él es posible observar la actividad antimicrobiana de una mezcla de compuestos y dirige directamente al aislamiento de los que resulten activos (Colorado *et al.*, 2007). Los resultados de la actividad antimicrobiana se encuentran resumidos en la Tabla 2.

El extracto de acetato de etilo de la cepa NCA004 fue sucesivamente purificado usando cromatografía en columna por gravedad y fue eluido con una mezcla de Hx/CHCl₃/AcOEt/MeOH 7:3:2:1. Dicha elución resultó en el aislamiento del metabolito 1, el cual fue identificado por cromatografía de líquidos acoplado a espectrometría de masas (LC-MS) como resisomicina, un derivado de quinona con actividad

bactericida y vasoconstrictora (Kock *et al.*, 2005). La identificación fue confirmada mediante el perfil por detector ultravioleta y por espectrometría de masas utilizando al pico padre de m/z 376 para determinar una fórmula molecular de $C_{22}H_{16}O_6$, e indicando la presencia de quince sitios de insaturación en la estructura.

En los últimos años se han descrito especies de actinomicetos estrictamente marinas, es decir, que requieren del ión sodio para su crecimiento (Maldonado *et al.*, 2005a). Estas especies marinas han resultado ser una fuente prometedora de compuestos bioactivos (Fehling *et al.*, 2003, Fenical *et al.*, 2009). Existen diversos trabajos que documentan que, tanto el crecimiento óptimo como el incremento de actividad antibiótica de las cepas de actinomicetos ocurren en medios de cultivo elaborados con agua de mar, o bien, adicionados con NaCl en concentraciones que varían de 0.5% a 3% (Tian *et al.*, 2012; Rashad *et al.*, 2015). Por ejemplo, el aislamiento del compuesto marinopirrol B a partir de una cepa marina de *Streptomyces* con requisitos de agua de mar para su crecimiento (Hughes *et al.*, 2008). El presente estudio aportó nueve cepas de *Streptomyces* que requieren de agua de mar para su crecimiento, a pesar de su similitud con cepas de origen terrestre, seis de ellas han demostrado actividad antibacteriana y un compuesto activo ha sido aislado. Nuestro objetivo es explorar la gama de compuestos bioactivos encontrados en estas nueve cepas con el fin de encontrar nuevos productos naturales marinos.

CONCLUSIONES

Los sedimentos costeros de la Península de Yucatán han demostrado ser una fuente prometedora de microorganismos con potencial bioactivo. Por lo tanto, es importante continuar con la

investigación de estos microorganismos y así conocer más acerca de su ecología y de la estructura de sus comunidades. Más aún, es indispensable estudiar el efecto de distintas presiones antropogénicas sobre la diversidad bacteriana y evaluar si dichas presiones ejercen un cambio radical sobre la estructura de la comunidad de actinomicetos presentes en los sedimentos de la costa yucateca. El presente trabajo cumplió con el objetivo de conocer la identidad de la parte cultivable de *Streptomyces* de la zona costera de Yucatán y de evaluar la influencia de los nutrientes en la abundancia y/o diversidad de las cepas aisladas. Por otra parte, las pruebas de dependencia al agua de mar nos demuestran que, en efecto, existen comunidades perfectamente adaptadas al medio marino incapaces de sobrevivir sin las concentraciones de sal presentes en su hábitat natural. Estas cepas resultaron a su vez activas en los primeros bioensayos realizados para detectar actividad antimicrobiana. Más aún, a pesar de que el porcentaje de similitud de estas cepas con cepas terrestres previamente descritas es mayor al 98 %, este valor límite se considera como conservador ya que la secuencia del gen 16S ribosomal no tiene la resolución evolutiva suficiente para diferenciar entre especies. Por lo tanto, no se debe descartar la posibilidad de que estemos frente a nuevas especies de actinomicetos marinos productoras de metabolitos secundarios con actividad biológica.

Las cepas de *Streptomyces* aisladas de la zona de La Carbonera indican un efecto directo de la apertura de una laguna costera hacia el mar sobre el metabolismo de las bacterias que habitan en sus sedimentos, aunque es necesario diseñar un experimento con el objetivo específico de comprobar esta hipótesis. Sin embargo, gracias a estos resultados se abre la posibilidad

de estudiar el efecto de las adaptaciones al agua de mar sobre el metabolismo secundario de los actinomicetos de zonas costeras. Es decir, determinar si la capacidad de resiliencia de los microorganismos de sedimentos marinos tiene, efectivamente, un efecto directo sobre el potencial biotecnológico de las cepas.

AGRADECIMIENTOS

DGAPA, UNAM: proyecto PAPIIT (TA200212-2) "Evaluación biológica y filogenética de medios ambientes costeros como fuente de nuevos productos naturales marinos", el cual fue realizado en el Laboratorio de Bioprospección Marina de la Unidad Académica Sisal. CONACYT: Beca de maestría YPV y posdoctorado AYP. Al laboratorio CMBB (Center for Marine Biotechnology and Biomedicine) del Instituto Oceanográfico de Scripps, La Jolla CA, por los análisis realizados en HPLC para la identificación del compuesto activo.

REFERENCIAS

Aranda-Cicerol, N., Herrera-Silveira, J., Comín, F. 2006. Nutrient water quality in tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, México. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 68:445-454.

Arias, L. y S. Montiel. 2008. La cacería tradicional en el Mayab contemporáneo: una mirada desde la ecología humana. *Avance y Perspectiva*, 1(1):21-27.

Avramidis, P. Bekiari, V., Kontopoulos, N. y N. Kokidis. 2013. Shallow coastal lagoon sediment characteristics and water physicochemical parameters -Myrtari Lagoon, Mediterranean Sea, Western Greece. *Fresenius environmental bulletin*, 22(5): 1628-1635.

Balsam, W. y J. Beeson. 2003. Sea-floor sediment distribution in the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research I*, 50: 1421.-1444.

Becerril-Espinosa, A., Guerra-Rivas, G., Ayala-Sánchez, N. e I. Soria-Mercado. 2012. Antitumor activity of Actinobacteria isolated in marine sediments from Todos

Santos Bay, Baja California, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47: 317-325.

Becerril-Espinosa, A., Freel, K., Jensen, P.R. e I. Soria-Mercado. 2013. Marine Actinobacteria from the Gulf of California: diversity, abundance and secondary metabolite biosynthetic potential. *Antonie van Leeuwenhoek*, 103: 809-819.

Bérdy, J. 2005. Bioactive microbial metabolites. *The journal of antibiotics*, 58(1): 1-26.

Bredholt, H., Fjaervik, E., Johnsen, G. y S. Zotchev. 2007. Actinomycetes from Sediments in the Trondheim Fjord, Norway: Diversity and Biological Activity. *Marine Drugs*, 6(1):12-24.

Bull, A. 2004. Microbial diversity and bioprospecting. Ed. ASM Press, E.U.A., 249 pp.

Bull, A. Stach, J., Ward, A. y M. Goodfellow. 2005. Marine actinobacteria: perspectives, challenges, future directions. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 87: 65-79.

Bull, A. y J. Stach. 2007. Marine actinobacteria: new opportunities for natural product search and discovery. *Trends in Microbiology*, 15:491-499.

Calva, L. y R. Torres. 2000. Distribución de carbohidratos, carbono y nitrógeno orgánico en sedimentos de tres lagunas del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 10(2): 101-114.

Cammen, L. 1982. Effect of particle size on organic content and microbial abundance within four marine sediments. *Marine Ecology Progress Series*, 9: 273-280.

Challis, G. y D. Hoopwood. 2003. Synergy and contingency as driving forces for the evolution of multiple secondary metabolite production by *Streptomyces* species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100: 14555-14561.

Chandrakant, S. y R. Shwetha. 2011. Role of Microbial Enzymes in the Bioremediation of Pollutants: A Review. *Enzyme Research*, Vol. 2011.

Colorado J.; Galeano E. y A. Martínez. 2007. Desarrollo de la bioautografía directa como método de referencia para evaluar la actividad antimicrobiana de la gentamicina contra *Escherichia coli*. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 14 (1), 67-71

Colquhoun J., Mexson J., Goodfellow M., Ward A., Horikoshi K. y A. Bull. 1998. Novel rhodococci and other mycolateactinomycetes from the deep sea. *Antonie van Leeuwenhoek*, 74: 27-40.

- Committee on the Ocean's Role in Human Health. 1999. From Monsoons to Microbes. National Academies Press, Washington DC.
- Deepa, S., Kanimozhi, K. y A. Pannerselvam. 2013. 16 rDNA Phylogenetic Analysis of Actinomycetes Isolated from Marine Environment Associated with Antimicrobial Activities. *Hygeia Journal for Drugs and Medicines*, 5(2): 43-50.
- Doyle L. y T. Sparks. 1979. Sediments of the Mississippi, Alabama, and Florida (MAFLA) continental shelf. *Journal of Sementary Petrology*, 50: 0905-0916.
- Duncan, K., Haltli, B., Gill, K. y R. Kerr. 2014. Bioprospecting from marine sediments of New Brunswick, Canada: Exploring the relationship between total bacterial diversity and actinobacteria diversity. *Marine drugs*, 12:899-925.
- Escobar, E. y F. García. 2009. Distribution of total organic carbon and total nitrogen in deep-sea sediments from the southwestern Gulf of México. *Boletín de la Sociedad Geológica Marina*, 61: 73-86.
- Euzéby, J. 1997. List of t of prokaryotic names with standing in nomenclature. Recuperado de: <http://www.bacterio.net/index.html>
- Fehling, R., Buchanan, G., Mincer, T., Kauffman, C., Jensen, P. y W. Fenical. 2003. *Salinosporamide A*: a highly cytotoxic proteasome inhibitor from a novel microbial source, a marine bacterium of the new genus *Salinospora*. *Angewandte Chemie International Edition*, 42: 355-357.
- Fenical, W., Jensen, P., Palladino, M., Lam, K., Lloyd, G. y B. Potts. 2009. Discovery and development of the anticancer agent salinosporamide A (NPI-0052). *Bioorganic y Medicinal Chemistry*, 17: 2175-2180.
- Goodfellow, M. y S. Williams. 1983. Ecology of actinomycetes. *Annual Review of Microbiology*, 37:189-216
- Goodfellow, M. y J. Haynes. 1984. Actinomycetes in marine sediments. En *Biological, Biochemical, and Biomedical Aspects of Actinomycetes*, Ortiz L., Bojalil, L. y Yakoleff, V. (Eds). Academic Press, E.U.A. 453-472 p.
- Gulve, R., Deshmuk, A. y Sonajirao, K. 2012. Antimicrobial activity of the marine actinomycetes. *International Multidisciplinary Research Journal*, 2(3): 12-22.
- Hames, E. y A. Uzel. 2012. Isolation strategies of marine-derived actinomycetes from sponge and sediment samples. *Journal of Microbiological Methods*, 88: 342-347.
- Herrera-Silveira, J. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotrópicos*, 19(2): 94--108.
- Herrera-Silveira, J. y S. Morales-Ojeda. 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, 59: 72-86.
- Hildebrand, A, Penfield, G., Kring, D., Pilkington, M., Camargo, Z., Jacobsen, S. y W. Boynton. 1991. Chicxulub crater: a possible cretaceous/tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology* 19, 867-871.
- Hughes, C., Prieto-Davó, A., Jensen, P. y W. Fenical. 2008. The marnopyrroles, antibiotics of an unprecedented structure class from a marine *Streptomyces* sp. *Journal of Organic Chemistry*, 10: 629-631.
- Iscan, G.; Kirimer, N.; Kürkcüoglu, M. y F. Demirci. 2005. Antimicrobial screening of *Mentha piperita* essential oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (14), 3943-3946.
- Jensen, P., Dwight, R. y W. Fenical. 1991. Distribution of actinomycetes in near-shore tropical marine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 57: 1102-1108.
- Jensen, P., Mincer, T., Williams, P. y W. Fenical. 2005a. Marine actinomycete diversity and natural product discovery. *Antonie Leeuwenhoek* 87:43-48.
- Jensen, P., Gontang, E., Mafnas, C., Micer, T. y W. Fenical. 2005b. Culturable marine actinomycete diversity from tropical Pacific Ocean sediments. *Applied Environmental Microbiology*, 71:1039-1048.
- Jensen, P., Williams, P., Oh, D., Zeigler, L. y W. Fenical. 2007. Species-specific secondary metabolite production in marine actinomycetes of the genus *Salinispora*. *Applied and environmental microbiology*, 73(4): 1146-52.
- Jensen, P. y F. Lauro. 2008. An assessment of actinobacterial diversity in the marine environment. *Antonie van Leeuwenhoek*, 94: 51-62.
- Karthik, L., Kumar, G. y K. Bhaskara-Rao. 2010. Diversity of marine actinomycetes from Nicobar marine sediments. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 2(1): 199-203.

- Keller, L. y Surette, M. 2006. Communication in bacteria: an ecological and evolutionary perspective. *Nature Reviews: Microbiology*, 4: 249-258.
- Kock, I. Maskey, R., Farooq-Bianani, M., Helmke, E. y H. Laatsch. 2005. 1-hydroxy-1-norresistomycin and resistoflavin methyl ether: new antibiotics from marine derived Streptomycetes. *The Journal of Antibiotics*, 58, 530-534.
- Kokare, C., Mahadik, S., Kadam, S. y B. Chopade. 2004. Isolation of bioactive marine actinomycetes from sediments isolated from Goa and Maharashtra coastlines (west coast of India). *Indian Journal of Marine Sciences*, 33: 248-256.
- Kordel, W., Dasssenakis, M., Lintelmann, J., Padberg, S., 1997, The importance of natural and organic material for environmental processes in water and soils, Technical report, International Union of Pure and Applied Chemistry, *Pure and Applied Chemistry*, 69, 1571-1600.
- Kouridaki, I., Polymenakou, P., Tselepidis, A., Mandalakis, M. y S. Kenneth. 2010. Phylogenetic diversity of sediment bacteria from the deep Northeastern Pacific Ocean: Mediterranean Sea. *International Microbiology*, 13: 143-150.
- Madigan, M., Martinko, J., y J. Parker. 2003. *Brock: Biología de los Microorganismos* (10a ed). Pearson Education, Madrid. 1096pp.
- Magarvey, N., Keller, J., Bernan, V., Dworkin, M. y D. Sherman. 2004. Isolation and characterization of novel marine-derived actinomycete taxa rich in bioactive metabolites. *Applied and Environmental Microbiology*, 70: 7520-7529.
- Maldonado, L., Fenical, W., Jensen, P., Kauffman, C., Mincer, T., Ward, A., Bull, A. y M. Goodfellow. 2005a. *Salinispora arenicola* gen. nov., sp. nov. and *Salinisporatropica* sp. nov., obligate marine actinomycetes belonging to the family *Micromonosporaceae* *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55: 1759-1766.
- Maldonado, L., Stach, J., Pathom-aree, W., Ward, A., Bull, A. y M. Goodfellow. 2005b. Diversity of cultivable actinobacteria in geographically widespread marine sediments. *Antonie van Leeuwenhoek*, 87: 11-18.
- Maldonado, L., Fragoso, D., Pérez, A., Rosellón, J. y E. Quintana. 2009. Actinobacterial diversity from marine sediments collected in México. *Antonie van Leeuwenhoek*, 95: 111-120.
- Manivasagan, P., Venkatesan, J. y S. Kwon. 2013. Introduction to Marine Actinobacteria. En: Kwon, S. (Ed), *Marine Microbiology: Bioactive Compounds and Biotechnological Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH y Co. E.U.A. 1-19 p.
- Márquez, B.; Cárdenas, A.; Morales, C. y M. Verde Star. 2003. Identificación de compuestos de *Melia azedarach*, *Sygium aromaticum* y *Cinnamomum zeylanicum* con efecto inhibitorio sobre bacterias y hongos. *Ciencia UANL*, 6 (3), 333-338.
- Martin, G., Tan, L., Jensen, P., Dimayuga, R., Fairchild, C., Reventos, C. y W. Fenical. 2007. Marmycins A and B, Cytotoxic Pentacyclic C-Glycosides from a Marine Sediment-Derived Actinomycete Related to the Genus *Streptomyces*. *Journal of Natural Products*. 70(9): 1406-1409.
- McCarthy A. y S. Williams. 1992. Actinomycetes as agents of biodegradation in the environment: a review. *Gene*, 115:189-192.
- Mincer, T., Jensen, P., Kauffman, C. y W. Fenical. 2002. Widespread and persistent populations of a major new marine actinomycete taxon in ocean sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 68: 5005-5011.
- Mincer, T., Fenical, W. y P. Jensen. 2005. Culture-dependent and culture-independent diversity within the obligate marine actinomycete genus *Salinispora*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71: 7019-7028.
- Moran, M., Rutherford, L. y R. Hodson. 1995. Evidence for indigenous *Streptomyces* populations in a marine environment determined with a 16S rRNA probe. *Applied and environmental microbiology*, 61(10): 3695-700.
- Nakagawa, M., Hayakawa, Y., Adachi, K. y H. Seto. 1990. A new depsipeptide antibiotic, variapeptin. *Agricultural and biological chemistry*, 54(3): 791-4.
- Nealson, K. 1997. Sediment bacteria: Who's there, What are they doing, and What's new? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 25: 403-434.
- Omura, S., Ikeda, H., Ishikawa, H., Hanamoto, A., Takasashi, C., Shinose, M., Takasashi, Y., Horikawa, H., Nakazawa, H., Osone, T., Kikuchi, H., Shiba, T., Sakaki, Y. y M. Hattori. 2001. Genome sequence of an industrial microorganism *Streptomyces avermitilis*: deducing the ability of producing secondary metabolites. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98: 12215-12220.

- Ózcan, K., Aksoy, S., Kalkan, O., Uzel, A., Hames, E. y E. Bedir. 2013. Diversity and antibiotic-producing potential of cultivable marine-derived actinomycetes from coastal sediments of Turkey. *Journal of Soils and Sediments*, 13: 1493-1501.
- Palacios-Sánchez, S. y M. Vega-Cendejas. 2010. Cambios alimenticios en tres especies de Spherooides (Tetraodontiformes:Tetraodontidae) posterior al huracán Isidoro en Bocana de la Carbonera, Sureste del Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 58: 1223-35.
- Pisano M., Sommer M. y L. Braccaccio. 1989. Isolation of bioactive actinomycetes from marine sediments using rifampicin. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 31: 609-612.
- Pope, K., Ocampo, A. y C. Duller. 1991. Mexican site for K/T impact crater? *Nature* 351, 105.
- Power, E. 1995. Efficacy of the Ryu non-staining KOH technique for rapidly determining gram reactions of foodborne and waterborne bacteria and yeasts. *Applied Environmental Microbiology*, 61: 3756-3758.
- Prescott, L. 2002. *Microbiology*. 5a Ed. McGraw-Hill, E.U.A. 1026 pp.
- Prieto-Davó, A., Fenical, W. y P. Jensen. 2008. Comparative actinomycete diversity in marine sediments. *Aquatic Microbial Ecology*, 52: 1-11.
- Prieto-Davó, A., Villarreal-Gómez, L., Forscher-Dancause, S., Bull, A., Stach, J., Smith, D., Rowley, D. y P. Jensen. 2013. Targeted search for actinomycetes from nearshore and deep-sea marine sediments. *FEMS: Microbial Ecology*, 1-9.
- Rahalison, L., Hamburger, M., Hostettman, K., Monod, M. y E. Frenk. 1991. A bioautographic agar overlay method for the detection of antifungal compounds from higher plants. *Phytochemical Analysis*, 2, 199-203.
- Rashad, F., Fathy, H., El-Zayat, A. y A. Elghonaimy. 2015. Isolation and characterization of multifunctional *Streptomyces* species with antimicrobial, nematocidal and phytohormone activities from marine environments in Egypt. *Microbiological Research*, 175: 34-47.
- Rojas R., Narváez J., Zamudio M. y E. Mena. 2008. A Simple Silica-based Method for Metagenomic DNA Extraction from Soil and Sediments. *Molecular Biotechnology*. 40:13-17.
- Rublee, P. y A. Dornseiff. 1978. Direct counts of bacteria on the sediments of a North Carolina salt marsh. *Estuaries*, 1: 188-191.
- Sirivasan, M., Laxman, R. y M. Desphande. 1991. Physiology and nutrition aspects of Actinomycetes – An overview. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 7:171-184.
- Stackebrandt, E. y B. Goebel. 1994. Taxonomic Note: A Place for DNA-DNA Reassociation and 16S rRNA Sequence Analysis in the Present Species Definition in Bacteriology. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 44(4): 846-849.
- Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipski, A. y S. Kumar. 2013. MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, 30: 2725-2729.
- Tarbut, E. y F. Lutgens. 2005. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*. Pearson-Prentice Hall, 8ª ed. España, 578 pp.
- Teske, A. 2013. Marine Deep Sediment Microbial Communities. En: Rosenberg, E., DeLong, E., Lory, E. y F. Thompson. *The Prokaryotes Prokaryotic Communities and Ecophysiology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Tian, X., Long, L., Wang, F., Xu, F., Li, J., Zhang, J., Zhang, C., Zhang, S. y W. Li. 2012. *Streptomyces nanhaiensis* sp. nov., a marine streptomycete isolated from a deep-sea sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62(4): 864-868.
- Tiwari, K. y R. Gupta. 2012. rare actinomycetes: a potential storehouse for novel antibiotics. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(2): 108-132.
- Torres-Beltrán, M., Cardoso-Martínez, F., Millán-Aguñaga, N., Becerril-Espinosa, A. e I.E. Soria-Mercado. 2012. Evaluation of the Gulf of California as a potential source of bioactive marine actinobacteria. *Ciencias Marinas*, 38(4): 609-624.
- Weidie, A. 1985. Geology of Yucatan platform, en: W. C. Ward, A. E. Weidie, and W. Back (eds.), *Geology and Hydrology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*, New Orleans Geological Society, New Orleans, pp. 1-19. of
- Weyland, H. 1969. Actinomycetes in North Sea and Atlantic Ocean sediments. *Nature*, 23: 858.

SENSIBILIDAD A LAS OSCILACIONES TÉRMICAS DE LAS ESPECIES DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA Y PESQUERA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN ANTE ESCENARIOS DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Nelly Tremblay^{1,2}, Maite Mascaró^{2,3}, Fernando Díaz⁴,
Claudia Caamal-Monsreal^{2,3}, Adolfo Sánchez^{2,3},
Cristina Pascual^{2,3}, Carlos Rosas^{2,3}

¹Programa de becas posdoctorales en la UNAM

²Unidad Multidisciplinaria de Docencia Investigación, Facultad de Ciencias de la UNAM, Puerto de abrigo
s/n Sisal, Yucatán

³Laboratorio de Resiliencia Costera (LANRESC-CONACYT)

⁴Departamento de Biotecnología, Centro Investigación y Educación Superior de Ensenada

Correspondencia: CR: crv@ciencias.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo de revisión se presentan los resultados obtenidos en los últimos cinco años de trabajos realizados con el fin de conocer la resiliencia a las oscilaciones térmicas de dos especies de crustáceos, tres de moluscos y dos de peces marinos de importancia ecológica y pesquera para la Península de Yucatán (PY). La especie más estudiada ha sido el pulpo *Octopus maya* ya que por dominarse la tecnología para su cultivo, ha sido posible estudiar todas las fases de su ciclo de vida (embriones, juveniles tempranos, pre-adultos y adultos). Para el resto de las especies se han estudiado sus formas juveniles (*Centropomus undecimalis* y *Ocyurus chrysurus*) y adultas (*Libinia dubia*; *Callinectes similis*; *Callinectes sapidus*, *Melongena corona bispinosa*; *Strombus pugilis*). De entre todas estas especies, las más resilientes a las oscilaciones térmicas, incluyendo aquellas probables asociadas al calentamiento global (+3°C), resultaron ser las dos especies de peces (*C. undecimalis* y *O. chrysurus*) y el caracol *M. corona bispinosa*. Tomando en cuenta este nicho térmico, se espera que las dos especies de cangrejos (*C. similis* y *L. dubia*), el caracol Nólón (*S. pugilis*) y el pulpo *O. maya* preferirán ambientes más frescos, posiblemente asociados a la zona este de la PY donde la surgencia estacional de verano limita el incremento de la temperatura por arriba de los 26°C. La sensibilidad térmica de las especies debería ser utilizada para establecer su resiliencia y las estrategias de manejo ante el eventual incremento de la temperatura en el Golfo de México, poniendo especial atención a la zona oeste de la PY (plataforma continental adyacente al estado de Campeche).

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los reportes del El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC; 1), la temperatura de los océanos tropicales del mundo se ha incrementado de aproximadamente 1°C (0.65 – 1.02°C), más notables en el hemisferio norte en donde la cantidad de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado. Esos efectos han sido registrados entre los 0 y 75m de profundidad postulándose que, a diferencia de otros incrementos de temperatura en el pasado geológico del planeta, los incrementos registrados en los últimos 100 años han sido provocados por las

actividades humanas (1). Aunque la mayoría de las especies tropicales marinas están bien adaptadas para tolerar temperaturas relativamente altas, los estudios sobre su fisiología térmica indican que muchas se encuentran en ambientes cercanos a sus límites térmicos (2). Esto es debido a que durante los procesos de adaptación a los ambientes tropicales, si bien las especies ocuparon nichos en donde las temperaturas altas favorecieron su desempeño, quedaron atrapadas entre su intolerancia a las bajas temperaturas y los límites máximos que son adecuados para la vida en el mar (40°C; Fig. 1). Por esa razón se ha considerado que las especies tropicales son

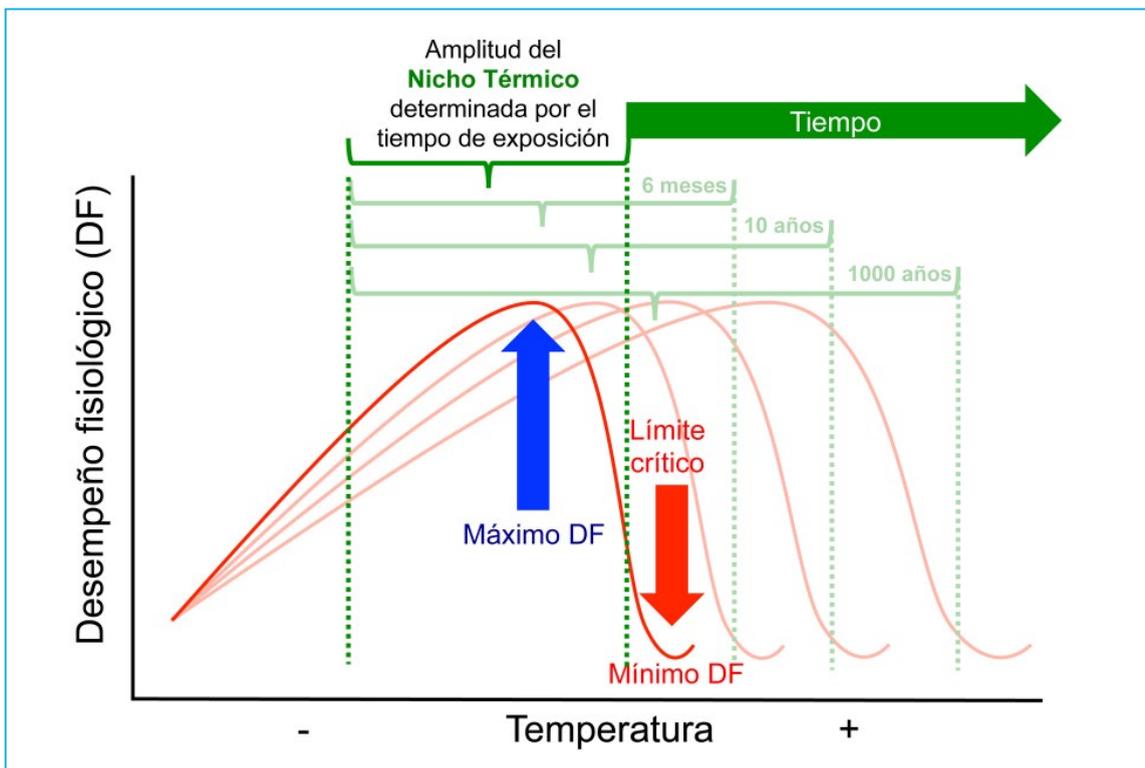


Figura 1. Modelo conceptual que describe la relación del desempeño fisiológico y la temperatura en organismos ectotermos marinos. En este modelo se postula que los organismos tropicales se han adaptado para expresar el máximo desempeño fisiológico en temperaturas cercanas a los límites del nicho térmico. Esos límites a su vez están determinados por el tiempo de exposición, el cual puede tener varias escalas, incluidas las diarias, las estacionales o las de orden geológico. Figura modificada de su versión original publicada (10).

especialmente sensibles al calentamiento global (3-10). Décadas de observaciones serían necesarias para evaluar las consecuencias que derivan de los diferentes escenarios establecidos por el IPCC. Sin embargo, la cuenta atrás ya ha comenzado y pocos son los estudios que desglosan una larga serie de tiempo de indicadores biológicos, fisiológicos o moleculares. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar modelos de predicciones que integran las respuestas fisiológicas y moleculares de las principales especies claves del ecosistema marino con las anomalías del clima, por ejemplo las ocasionadas por los eventos El Niño / La Niña.

De entre el grupo de cefalópodos, los pulpos tuvieron su origen hace aproximadamente 100 millones de años durante el Cretácico. Los estudios geológicos efectuados con sedimentos de esa era geológica indican que la temperatura de los océanos era entre 6 y 14°C mayor que la actual, lo que favoreció la radiación adaptativa de una gran cantidad de especies marinas entre las cuales se encontraban los pulpos (11). Gracias a eso, los cefalópodos (con un estimado de más de 1000 especies) y en particular los pulpos, se diversificaron ampliamente ocupando nichos en todos los océanos del planeta incluyendo los polares (12, 13). Hacia finales del cretácico y durante el surgimiento de Centro América y la Península de Yucatán, hace aproximadamente 5 millones de años, la separación de los océanos Atlántico y Pacífico favoreció otro episodio de radiación adaptativa entre los invertebrados marinos, entre los cuales se encontraban los pulpos. Ese proceso geológico además, permitió la formación de las corrientes oceanográficas tal y como las conocemos ahora favoreciendo la formación de ecosistemas bien diferenciados con especies distintas en ambos océanos. Los

estudios genéticos llevados a cabo demostraron que existen especies de pulpos filogenéticamente cercanas en los océanos Atlántico y Pacífico, las cuales tienen su origen en un ancestro común cercano a la especie cosmopolita *Octopus vulgaris* (14, 15).

Favorecido por esa radiación adaptativa surge *O. maya* como una especie endémica de la PY, atrapada en las áreas de origen calcáreo de la península: entre las zonas arrecifales del mar Caribe y las zonas con sedimentos terrígenos que impulsan los grandes ríos del Sur del Golfo de México (16, 17). La plataforma continental adyacente a la PY adquirió características oceanográficas peculiares, como la de la presencia de una surgencia estacional de verano la cual, al aportar aguas frías del canal de Yucatán, regula la temperatura del fondo en un amplio sector de la costa, desde Cabo Catoche y hasta las costas frente al puerto de Sisal (18-21) (Fig. 2).

Evidencias recientes demuestran que esta dinámica oceanográfica provoca patrones distintos en la distribución de los pulpos a lo largo de la plataforma, lo que sugiere que *O. maya* y otras especies, como las jaibas del género *Callinectes* (*C. sapidus* y *C. similis*) entre otras, han acoplado su ciclo de vida a las variaciones de temperatura que ofrecen las condiciones oceanográficas de la PY (23, 24). Estudios llevados a cabo en nuestro laboratorio en los últimos cinco años indican que los patrones de distribución de varias de esas especies podrían ser consecuencia de la adaptación a la temperatura, lo cual obliga, en el contexto del calentamiento global, al estudio de sus adaptaciones con el fin de establecer los límites de tolerancia, coadyuvando así a modelar los patrones de distribución en escenarios térmicos futuros. Esto adquiere especial relevancia cuando las especies estudiadas tienen

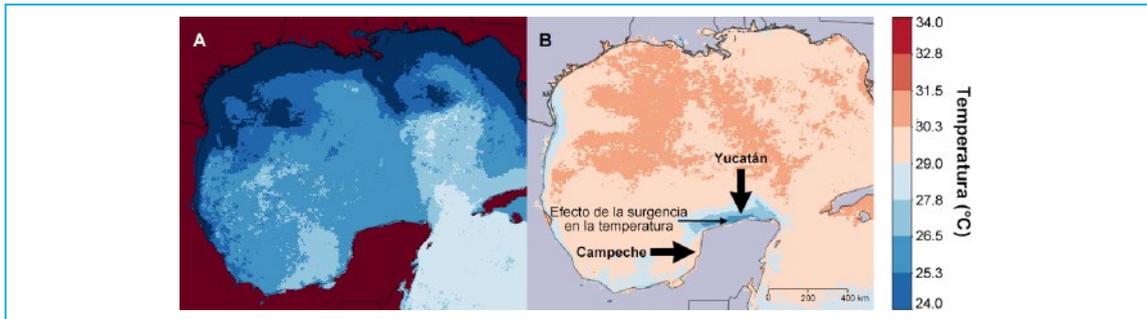


Figura 2. Efecto de la surgencia estacional de verano sobre la temperatura de la zona costera de la Península de Yucatán. A) Invierno sin surgencia (Diciembre 2015) y antes de que los efectos de los vientos del norte provoquen el enfriamiento de la zona costera; B) Verano (Agosto 2016). Nótese la franja azul que indica una menor temperatura frente a las costas del Estado de Yucatán respecto de las temperaturas que se observan en el estado de Campeche. Las visualizaciones mensuales promedio de la temperatura superficial del mar (°C) provienen de las imágenes de resolución moderada espectro radiómetro (MODIS) de Global Aqua Nivel 3 (11 μm infrarrojo térmico; resolución espacial 4 km) (22).

importancia pesquera. En ese contexto, el pulpo *O. maya* ha sido considerada la especie central de las investigaciones hasta ahora realizadas. Hasta la fecha, diversos aspectos de su biología térmica en prácticamente todas las fases de su ciclo de vida fueron examinadas. En las especies de peces, crustáceos y moluscos, los estudios se han aplicado principalmente a sus formas juveniles y adultas, ya que la mayoría de éstas han sido obtenidas directamente de las poblaciones silvestres.

Siendo este un trabajo de revisión, nos remitiremos únicamente a los métodos generales utilizados para obtener los resultados sobre la biología térmica de las distintas fases del ciclo de vida de las especies hasta ahora estudiadas. Los detalles de los procedimientos desarrollados para obtener esos resultados serán únicamente referidos a la literatura publicada hasta la fecha. Así, el trabajo tendrá dos grandes secciones. La primera en la que se mostrarán los resultados obtenidos por especie, y la segunda en donde se integrarán los resultados obtenidos en una serie de hipótesis en las que se mostrarán las posibles consecuencias del calentamiento acorde a los

límites hasta ahora establecidos del nicho térmico de las especies estudiadas.

MÉTODOS GENERALES

Animales

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en embriones, juveniles tempranos, pre-adultos y adultos (machos y hembras) de *O. maya*. Los adultos de esta especie fueron obtenidos de las poblaciones silvestres con el fin de obtener el desove. Las hembras y machos así como los embriones, juveniles y pre adultos fueron todos cultivados en condiciones de laboratorio siguiendo los procedimientos previamente establecidos (25).

Los adultos de las jaibas *C. similis* y *C. sapidus*, del cangrejo *Libinia dubia* (maxquill), de los moluscos *Melongena corona bispinosa* (chivita) y *Strombus pugilis* (Nolón) fueron obtenidos directamente de las poblaciones silvestres que habitan la plataforma continental adyacente a la PY, con la excepción de los ejemplares de chivita que fueron colectados en la zona conocida como "La Bocana". Los juveniles de las especies de peces *Ocyurus chrysurus* (pargo canané) y

Centropomus undecimalis (robalo blanco) fueron obtenidos de los sistemas de cultivo con los que cuenta la UMDI-Fc-UNAM en Sisal, siguiendo los protocolos de cultivo previamente establecidos (26).

Aclimatación

Todos los experimentos se realizaron con agua de mar natural obtenida de un pozo de playa. Los sólidos en el agua se sedimentan en reservorios de 200 mil L de capacidad en donde los ácidos orgánicos son liberados a la atmósfera. Posteriormente es enviada a tanques reservorio en donde es tratada con ozono y luego filtrada al pasarla a través de una bolsa-filtro de 500 μm . El agua, una vez filtrada es mantenida en reservorios desde donde es re-circulada a los sistemas experimentales. El control de la temperatura se lleva a cabo utilizando sistemas de recirculación acoplados a un intercambiador de calor que cuenta con un sistema de enfriamiento y un calentador de titanio. En general, cada sistema de recirculación cuenta con 3 tanques de 60L, cada uno con organismos experimentales. El agua de este sistema es recambiada parcialmente en una proporción diaria que oscila entre el 5 y el 10% del volumen total, dependiendo de cada experimento. Los sistemas de control de temperatura, en general, cuentan con una variación de entre 0.3 y 0.5°C, respecto de la temperatura promedio establecida en el experimento. Como una regla general, a excepción de los embriones, se ha considerado que un periodo de aclimatación de 15 a 21 días es suficiente para que los organismos respondan a la condición térmica experimental. Sin embargo, hay experimentos en los que se ha requerido que los animales permanezcan por más tiempo con el fin de evaluar no solo los efectos de la

temperatura en la tolerancia térmica, sino también en el crecimiento.

La ventana térmica

La ventana térmica de todas las especies fue establecida a partir de la determinación de la temperatura crítica (TC) tanto máxima como mínima (27, 28). Las TC mínima y máxima se obtienen al exponer a los organismos aclimatados a un cambio gradual de la temperatura usualmente aplicado a una tasa de 1°C/min (29). La preferencia (P) se obtuvo a partir de un gradiente en el que los animales pudieron elegir una temperatura dentro de un intervalo de 11 a 40°C. El tiempo de permanencia de los organismos en el gradiente se estandarizó a 1h, tiempo durante el cual es posible observar la preferencia sin que se pierdan los atributos fisiológicos desplegados durante el proceso de aclimatación (30-35). La zona de tolerancia o "Pejus" (36) corresponde a la zona térmica en la que los organismos entran en un estado fisiológico conocido como aclimatación en protección (cuando los mecanismos del sistema antioxidante y del metabolismo anaerobio son activados con el fin de eliminar el exceso de radicales libres y de abastecer las demandas de energía celular, respectivamente).

RESULTADOS

Ventana térmica del pulpo *Octopus maya*

Como era posible esperar, la ventana térmica de *O. maya* cambió con la edad de los organismos (Fig. 3). Caamal-Monsreal *et al.*, (37) observó que los embriones se desarrollan bien a 18°C. Sin embargo, el tiempo para la eclosión a esa temperatura (80 d) resultó ser mayor que el tiempo de sobrevivencia de las hembras durante el cuidado parental de los huevos (60 a 70d), lo que implicaría que, a esa temperatura los embriones,

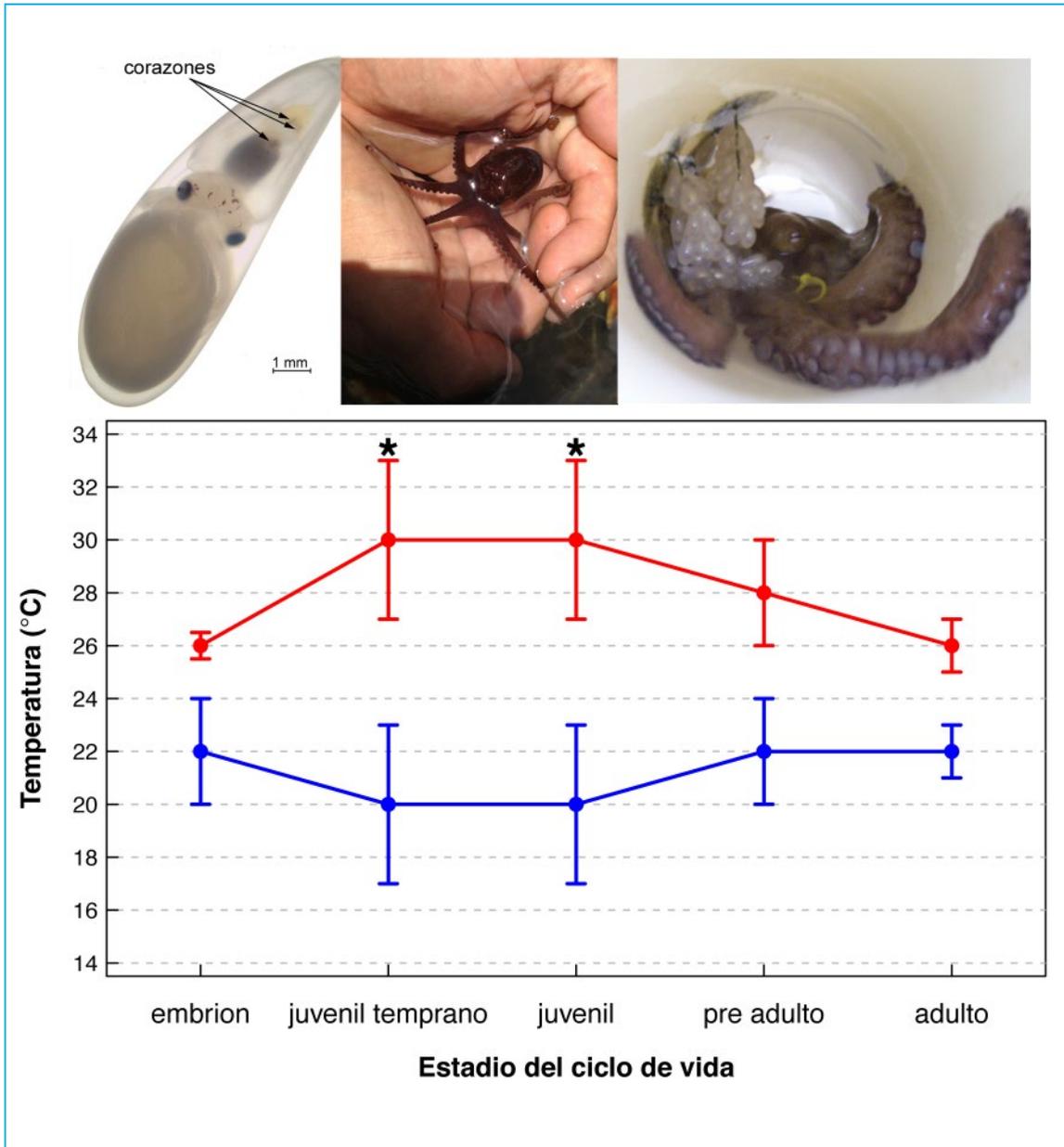


Figura 3. Ventana térmica de *Octopus maya* a lo largo de su ciclo de vida. Valores promedio + DE. Las temperaturas experimentales a las que se expusieron los embriones (37), los juveniles, pre adultos (38, 39) y adultos (40, 41) fueron: 18, 22, 26 y 30°C. En los embriones el punto azul indica la menor temperatura en la que los embriones se desarrollan en un tiempo menor en el que sobreviviría una hembra durante el cuidado parental. En los juveniles los puntos azules y los intervalos de variación indican la temperatura promedio menor preferida cuando fueron aclimatados a 18°C y donde el crecimiento fue similar al obtenido en los animales aclimatados a 22 y 26°C. En los pre adultos y adultos los puntos azules corresponden con la temperatura en la cual las hembras desovan. Los puntos negros fueron establecidos con el mismo criterio, aunque en los dos grupos de juveniles la temperatura de 30°C indica, que si bien es preferida por pulpos aclimatados a 30°C, el crecimiento es máximo en pulpos mantenidos en esa condición por un periodo máximo de 30 d.

próximos a la eclosión quedaran expuestos a la depredación debido a la ausencia de la hembra. Por esa razón se determinó que una temperatura de 22°C sería el límite inferior para la incubación de los huevos, ya que a esa temperatura la eclosión ocurrió alrededor de los 50 d.

Los juveniles tempranos (entre 0.1 y 2 g de peso vivo) así como los juveniles mayores a 5 g de peso mostraron intervalos óptimos que oscilan entre los 16 y los 32°C, con valores promedio de 20 a 30°C (Fig. 3). El intervalo óptimo de estos organismos dependió de la temperatura de aclimatación, i.e. los animales aclimatados a 18°C presentaron valores de preferencia térmica menores que los animales aclimatados a 30°C (Fig. 3). Es interesante hacer notar que los juveniles de *O. maya* mostraron las mayores tasas de crecimiento a 30°C cuando fueron expuestos a esa condición por 30d. Resultados recientes obtenidos en nuestro laboratorio indican que tiempos mayores de 30d son perjudiciales para estos organismos, reduciendo el crecimiento.

La madurez sexual y el desove en *O. maya* ocurren cuando las hembras son mantenidas por debajo de los 27°C. Cuando se han mantenido hembras en temperaturas superiores, el desove es inhibido hasta que la temperatura se reduce por debajo de ese umbral (41). Sin embargo se ha observado que cuando las hembras han experimentado estrés térmico durante la última fase de la madurez sexual, producen menos huevos fecundados, los embriones y los juveniles recién eclosionados son más pequeños, presentan tasas de crecimiento bajas y tasas metabólicas del doble de los animales provenientes de hembras no estresadas (40). Todas estas respuestas sugieren que existen factores epigenéticos que son transferidos a los embriones y que afectan el desempeño de los juveniles. Tomando en cuenta

lo anterior se ha establecido que el intervalo de la ventana térmica de los pre adultos y adultos de *O. maya* se encuentra en un intervalo de entre los 22 y los 26°C. Este rango de temperatura promueve desoves mayores a 1000 huevos/hembra, un desarrollo embrionario entre 40 y 50d y una tasa de eclosión del 90% con pesos alrededor de los 100 mg. Esas características se han considerado como adecuadas para esta especie (25, 42, 43).

Ventana térmica de crustáceos, gasterópodos y peces

La tolerancia térmica de los adultos de la jaiba *Callinectes similis* presentaron un intervalo de 10.4 a 41.5°C, poniendo en evidencia una tolerancia mayor a las temperaturas altas que a las temperaturas bajas (Fig. 4A; 44). Así mismo, los adultos de *C. similis* prefirieron un intervalo de temperaturas de 22 a 24°C (Fig. 4A; 44), lo que indica que esta especie tiene un nicho térmico estrecho. Resultados preliminares acerca de *C. sapidus* indican un intervalo térmico similar a *C. similis*, pero con un nicho más amplio y una mayor preferencia hacía las temperaturas cálidas, de 25 a 34°C. De manera similar, la temperatura preferida del cangrejo *Libinia dubia* fue estrecha y en el mismo rango de temperatura, de 23 a 24.6°C (Fig. 4B; 44). La tolerancia térmica de *L. dubia* fue igualmente parecida a *C. similis*, con un intervalo de 9.4 a 41.5°C, con más afinidad para las altas temperaturas, pero con intervalos de respuestas más amplios en ambas temperatura crítica (TCmin y TCmax; Fig. 4B; 44).

En los dos gasterópodos adultos estudiados, se encontró un nicho térmico considerablemente ancho. *Melongena corona bispinosa* (chivita) escogió un intervalo de temperaturas de 19 a 29°C (10°C; Fig. 4C; 44) y *Strombus pugilis* de

18 a 26°C (8°C; Fig. 4D; 44). Estos nichos más amplios son posiblemente asociados con el hábitat estuarino e intermareal donde se encuentran. La tolerancia térmica de *M. corona bispinosa* es ligeramente mejor en las temperaturas altas (7.6 a 42.1°C, Fig. 4C; 44), mientras *S. pugilis* sostiene un mejor desempeño fisiológico en un rango más extenso de temperaturas bajas (4.6 a 37.7°C; Fig. 4D; 44). La zona costera adyacente al estado de Yucatán, donde la surgencia estacional regula las temperaturas de verano, podría entonces favorecer la presencia de esta especie.

Los juveniles del pargo amarillo *Ocyurus chrysurus* prefirieron un intervalo de temperaturas estrecho de 24.6 a 26.6°C, con un intervalo de tolerancia térmica de 12 a 38.7°C (Fig. 4E; 44). A diferencia de las especies mencionadas, tiene intervalos de tolerancia similares para temperaturas bajas y altas (12.6 y 12.1°C, respectivamente; Fig. 4E; 44). Los juveniles del robalo blanco *Centropomus undecimalis* presentaron un intervalo de 11 a 42°C de tolerancia térmica (Fig. 4F; 44). Su rango de temperatura de preferencia, de 28.5 a 29.3°C, fue el más caliente y estrecho de todas las especies estudiadas (Fig. 4F; 44). Su preferencia termal más cálida ocasiona un intervalo de tolerancia más restringido para soportar temperaturas más elevadas (Fig. 4F; 44). Sin embargo, la TC_{max} de 42°C fue el valor más elevado registrado para todas las especies, resaltando su afinidad para las aguas con temperaturas relativamente altas como las que se presentan en la plataforma continental adyacente al estado de Campeche (44).

DISCUSIÓN

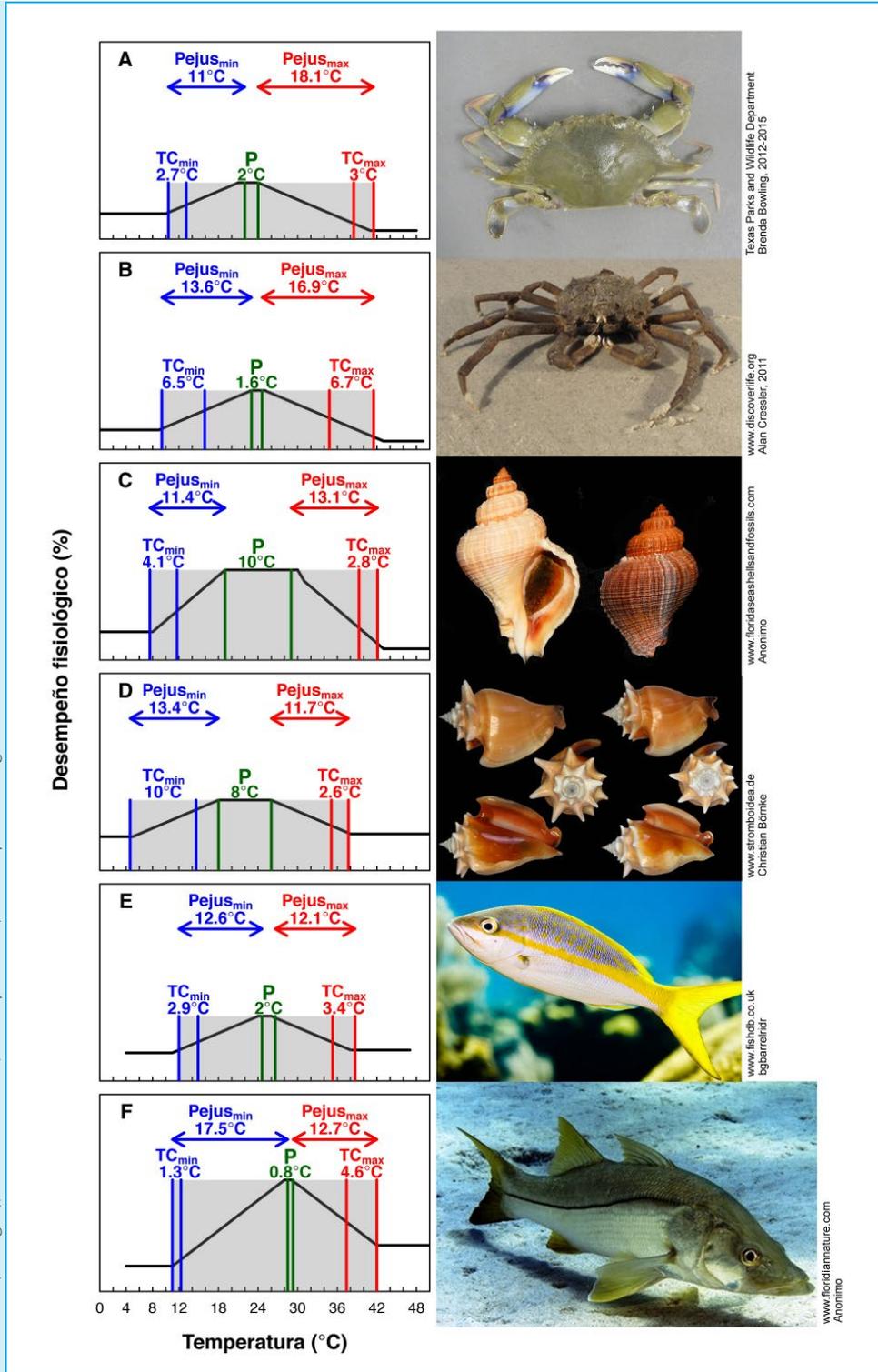
El cambio climático afecta a los bienes y servicios provistos por los ecosistemas marinos (seguridad alimentaria, economía y cultura tradicional),

así como la gestión de ello para lograr un aprovechamiento sostenible, principalmente los niveles tróficos inferiores, como los moluscos y crustáceos aquí presentados. Dado que estos organismos influyen el flujo vertical de carbón activo y pasivo, su adaptación o resiliencia a los cambios ambientales son claves para modelar los ciclos biogeoquímicos en los océanos. Los cambios en su distribución, la desincronización de sus eventos biológicos y modificaciones de historias de vida son los principales problemas que generan retos para un aprovechamiento adecuado de los océanos.

Las propiedades oceanográfico-térmica de la plataforma continental adyacente a la PY son un factor forzante de las variaciones espacio temporales de la estructura de tallas y edades del pulpo *O. maya*. A la condición térmica de cada estadio de desarrollo, se suman las variaciones espacio temporales de la abundancia de las presas (jaibas) y depredadores (robalo). La magnitud y temporalidad de la participación de las especies de presas y depredadores en la distribución espacio temporal de los pulpos es también determinada por la sensibilidad térmica de cada especie a lo largo de su ciclo de vida. En ese contexto, los robalos, en todas sus fases del ciclo de vida, preferirán las temperaturas que se encuentran en el extremo superior de las temperaturas que ofrece la PY, mientras que las especies de jaibas preferirán los extremos inferiores (*C. similis*) y superiores (*C. sapidus*) garantizando así la disponibilidad de presas para la población de pulpos a lo largo de todo el año.

Basados en los datos de la preferencia termal de las especies estudiadas, se ilustró el rango estacional de la temperatura superficial del mar y los posibles efectos que estas tendrían al incrementarse de 3°C (Fig. 5). Debido a que es

Figura 4. Intervalo de tolerancia (área gris) y desempeño fisiológico de adultos de (A) *Callinectes similis*, (B) *Libinia dubia*, (C) *Melongena corona bispinosa*, (D) *Strombus pugilis*, y juveniles (E) *Ocyurus chrysurus* y (F) *Centropomus undecimalis* (44). El nicho térmico (P) ha sido identificado a partir del intervalo de preferencia obtenido cuando los animales fueron expuestos a un gradiente de temperatura horizontal. El intervalo de transición entre los límites térmicos y la temperatura letal (Pejus) fue identificado a partir de la diferencia entre el valor máximo de temperatura preferida (promedio + DE) y el máximo obtenido de la temperatura crítica máxima (TCmax) y el valor mínimo de temperatura preferida (promedio - DE) y el mínimo obtenido de la temperatura crítica mínima (TCmin). Fuera del intervalo de tolerancia (área gris), de ambos lados, la temperatura fue letal para los organismos.



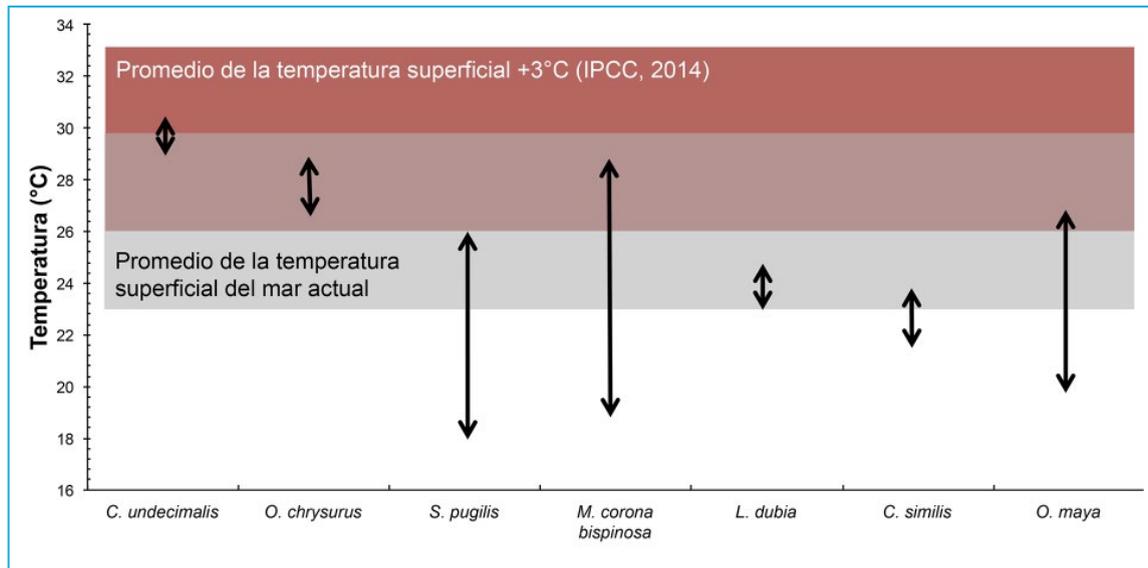


Figura 5. Preferencias térmicas de algunas especies claves de la plataforma de Yucatán, frente a la costa de Campeche, confrontadas a las oscilaciones temporales (área gris) de la temperatura superficial del mar y a su elevación de 3°C (proyección del IPCC 2014).

altamente probable que la surgencia estacional de verano no sea alterada en la región Este de la plataforma continental adyacente a la PY, las proyecciones han sido establecidas para la región Oriental, donde la influencia de la surgencia es inexistente, i.e. Campeche (18-21).

De entre todas estas especies, las más resilientes a las oscilaciones térmicas, incluyendo aquellas probables asociadas al calentamiento global (+3°C), resultaron ser las dos especies de peces (*C. undecimalis* y *O. chrysurus*) y el caracol *M. corona bispinosa* (Fig. 5). En ese escenario la población de robalo, actualmente restringida a las áreas más calientes de la PY podría incursionar hacia otras zonas ejerciendo una mayor presión sobre la población de pulpo y otros componentes del ecosistema del cual se alimenta. Dos especies de cangrejo quedarían fuera del intervalo térmico de la PY (*L. dubia* y *C. similis*) junto con el caracol Nolón (*S. pugilis*), mientras que la resiliencia de *O. maya* quedaría sujeta a

la disminución estacional de la temperatura. Una forma de visualizar los posibles efectos de una elevación de la temperatura en la PY como consecuencia del calentamiento es a través del análisis de los posibles efectos que han tenido las oscilaciones térmicas provocadas por el fenómeno del niño (Fig. 6). Al utilizar los datos disponibles de pesca y temperatura se pudo observar que existe una relación inversa entre un aumento de la temperatura y los volúmenes capturados de pulpo en las costas de Campeche, mientras que en las costas del estado de Yucatán la producción pesquera aumentó con ese mismo incremento de la temperatura (Fig. 6).

Esta relación sugiere la hipótesis de que ante un calentamiento del océano los pulpos podrían desplazarse a zonas con temperaturas más bajas en búsqueda de las condiciones propicias para la maduración sexual y el desarrollo embrionario. Para comprobarse esta hipótesis sería necesario realizar un análisis pesquero que asocie

la producción de pulpo con las oscilaciones de temperatura que ocurren en su zona de distribución y establecer así, si las oscilaciones térmicas provocan la movilización de pulpos a lo largo de la plataforma continental. Por el momento, comparando la maduración reproductiva entre una zona de surgencia (Rio Lagartos y Dzilam de Bravo), una zona de transición (Progreso y

individuos de la zona de surgencia fueron funcionalmente maduros durante todo el año (45). Ya que Sisal se encuentra en la zona de transición de la surgencia, la reducción del reclutamiento y el posible aumento de la mortalidad natural por depredación (robaló) tendrían un efecto en los volúmenes de captura y por ende en la economía pesquera de la región.

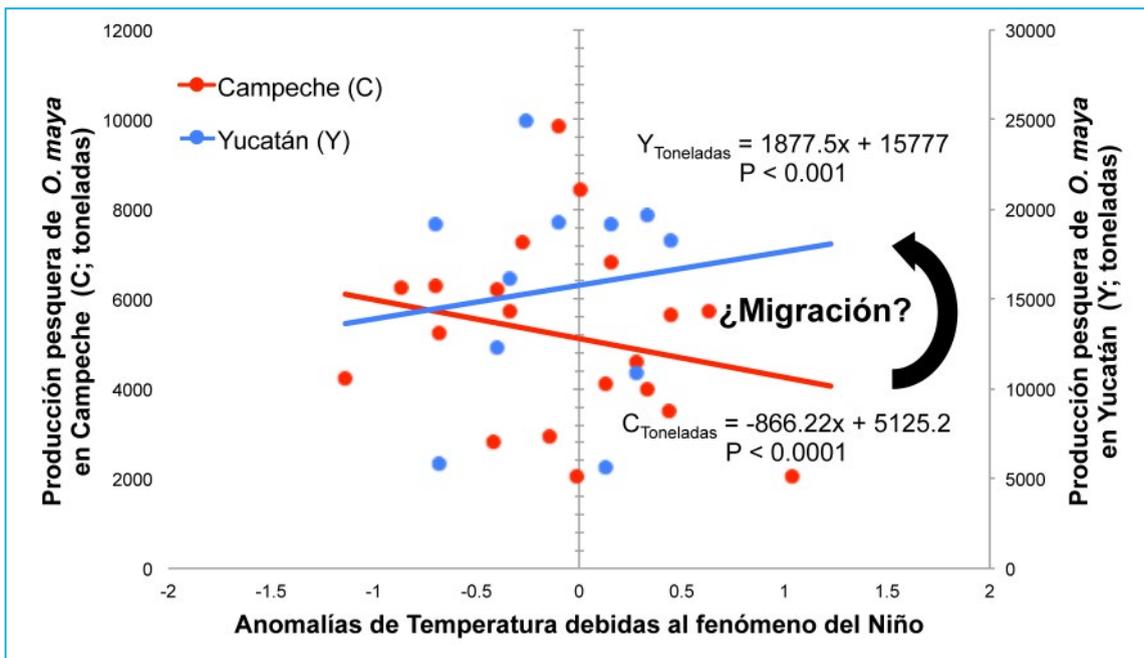


Figura 6. Relación entre la producción pesquera de los estados de Campeche (puntos rojos) y Yucatán (puntos azules) y las oscilaciones de temperatura producidas por el fenómeno de El Niño. Si un aumento de la temperatura de más de 1°C produce una migración de la población pesquera es posible predecir que un aumento en 2°C en la Plataforma de Yucatán y una reducción de los efectos de la surgencia estacional asociados al calentamiento global provocarán una migración de la población pesquera con efectos en la economía de la región. Figura modificada de su versión original (44). Datos de pesquerías oficiales de CONAPESCA (http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona_anuario_estadistico_de_pesca).

Celestún) y una zona sin el efecto de la surgencia (Campeche, Seybaplaya y Champotón), se ha observado que la maduración funcional de las hembras y machos ocurrió principalmente durante la estación de Nortes en todas las zonas, cuando la temperatura de la superficie del mar oscila alrededor de los 25°C (45). Soportando la hipótesis postulada anteriormente, solo los

Frente a Sisal, *C. sapidus* registra su máxima captura durante la época de secas, mientras *C. similis* la exhibe en la época de Nortes (46). En base a su ventana térmica, *C. similis* podría preferir ambientes relativamente más fríos. Entonces, ante un escenario de calentamiento, es altamente probable que esta especie se movilice hacia otras zonas con ambientes térmicos más

favorables; en cambio *C. sapidus* sería favorecida y podría llegar a tener una cobertura espacio temporal completa en la PY. Sin embargo, como las dos especies tuvieron una captura mínima en época de lluvias (46), la surgencia o alguna condición que conlleva esta característica oceanográfica podría ser desfavorable para ambas. Entonces, para el pulpo *O. maya*, la presencia de presas está garantizada más que la mitad del año, en el periodo que más lo necesita para llevar a cabo su madurez y reproducción.

Al combinar los experimentos controlados de laboratorio con la variabilidad natural encontrada a lo largo de un ciclo anual (estacional), hemos avanzado en el conocimiento de los límites térmicos de varias especies claves del ecosistema marino de la PY a diferentes estadios de vida. Actualmente, el uso de indicadores de estrés oxidativo (bioquímicos y moleculares) como línea base en nuestro laboratorio permitirá detectar como los efectos del calentamiento global afectan las capacidades fisiológicas de las especies cuando entran en la fase « pejus » de su tolerancia térmica, mínima o máxima. Con esta información, será posible definir si el estrés térmico ocasionado genera una deuda fisiológica que terminará por la muerte del animal, o si el animal compensa la demanda energética asociada a ello, es decir si el animal es resiliente a este estrés. Estos indicadores fisiológicos serán integrados a modelos de predicciones del cambio climático de la región junto con la abundancia y distribución proveniente de la investigación pesquera e idealmente de muestreos independientes de la pesca.

REFERENCIAS

1. IPCC, "Climate Change 2014: Synthesis Report," Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Geneva, Switzerland, 2014).
2. C. Vinagre *et al.*, Vulnerability to climate warming and acclimation capacity of tropical and temperate coastal organisms. *Ecological indicators* in press: doi: 10.1016/j.ecolind.2015.11.010, (2016).
3. T. Norin, T. D. Clark, measurement and relevance of maximum metabolic rate in fish. *Journal of Fish Biology*. 88, 122-151 (2016).
4. D. Madeira, P. R. Costa, C. Vinagre, M. Diniz, When warming hits harder: survival, cellular stress and thermal limits of *Sparus aurata* larvae under global change. *Mar. Biol.* 163, 91- 105 (2016).
5. C. Madeira, D. Madeira, M. S. Diniz, H. N. Cabral, C. Vinagre, Thermal acclimation in clownfish: An integrated biomarker response and multi-tissue experimental approach. *Ecological Indicators* 71, 280-292 (2016).
6. S. Lefevre, Are global warming and ocean acidification conspiring against marine ectotherms? A meta-analysis of the respiratory effects of elevated temperature, high CO₂ and their interaction. *Conservation Physiology* 4, (2016).
7. J. F. Gillooly, E. L. Charnov, G. B. West, V. M. Savage, J. H. Brown, Effect of size and temperature on developmental time. *Nature* 417, 70-73 (2002).
8. M. J. Angilletta, P. H. Niewiarowski, C. A. Navas, The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal Thermal Biology* 27, 249-268 (2002).
9. J. F. Gillooly, J. H. Brown, G. B. West, V. M. Savage, E. L. Charnov, Effects of size and temperature on metabolic rate. *Science* 293, 2248-2251 (2001).
10. H. O. Pörtner, Integrating climate-related stressor effects on marine organisms: unifying principles linking molecule to ecosystem-level changes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 470, 273-290 (2012).
11. A. Lukeneder, M. Harzhauser, S. Müllegger, W. Piller, Ontogeny and habitat change in Mesozoic cephalopods revealed by stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$). *Earth and Planetary Science Letters* 296 103- 114 (2010).
12. A. L. Allcock *et al.*, Cryptic speciation and the circumpolarity debate: A case study on endemic Southern Ocean octopuses using the COI barcode

- of life. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58, 242-249 (2011).
13. J. M. Strugnell *et al.*, The southern Ocean: Sorce and sink? *Deep sea Research II* 58, 196-204 (2011).
 14. O. Juárez, C. Rosas, L. Arena, Phylogenetic relationships of *Octopus maya* revealed by mtDNA sequences. *Ciencias Marinas* 38, 563-575 (2012).
 15. O. Juárez, C. Rosas, L. Arena, Heterologous microsatellites reveal moderate genetic structure in the *Octopus maya* population. *Fish.Res.* 106, 209-213 (2010).
 16. G. L. Voss, M. J. Solis Ramirez, *Octopus maya*, a new species from the Bay of Campeche, Mexico. *Bull.Mar Sci.* 16 615-625 (1966).
 17. M. Solis, Aspectos biológicos del pulpo *Octopus maya* Voss y Solis. *Contribuciones de Investigación Pesquera*, Instituto Nacional de la Pesca 7, 1-38 (1998).
 18. J. Zavala-Hidalgo, A. Gallegos-García, B. Martínez-López, S. L. Morey, J. J. O'Brien, Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics* 56, 333-338 (2006).
 19. J. Zavala-Hidalgo, S. L. Morey, J. J. O'Brien, Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research* 108, 1-19 (2003).
 20. C. Enriquez, I. J. Mariño-Tapia, G. Jerónimo, L. Capurro-Filigrasso, Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research* 69, 101-109 (2013).
 21. C. Enriquez, I. J. Mariño-Tapia, J. A. Herrera-Silveira, Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research* 30, 127-137 (2010).
 22. Sistema de datos en línea Giovanni (desarrollado y mantenido por la NASA GES DISC), <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
 23. M. A. Gamboa-Alvarez, J. A. López-Rocha, G. R. Poot-López, Spatial analysis of the abundance and catchability of the red octopus *Octopus maya* (Voss and Solis-Ramírez, 1966) on the continental shelf of the Yucatán peninsula, México. *J. Shellfish. Res.* 34, 481-492 (2015).
 24. J. A. Celis-Sánchez, A. J. Estrella-Canto, G. R. Poot-López, C. González-Salas, J. A. López-Rocha, Seasonal abundance of crustaceans associated with artisanal fishery of blue crab (*Callinectes sapidus*) in Sisal, Yucatan, Mexico. *Rev. Mar. Cost.* 6, 75-89 (2014).
 25. C. Rosas, P. Gallardo, M. Mascaró, C. Caamal-Monsreal, C. Pascual, in *Cephalopod Culture*, J. Iglesias, *et al.*, Eds. (Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014), chap. 20, pp. 383-396.
 26. L. Ibarra-Castro *et al.*, GnRH-induced spawning with natural fertilization and pilot-scale juvenile mass production of common snook, *Centropomus undecimalis* (Bloch, 1792). *Aquaculture* 319, 479-483 (2011).
 27. W. J. Lutterschmidt, V. H. Hutchinson, The critical thermal maximum: history and critique. *Can. J. Zool.* 75, 1561-1574 (1997).
 28. G. E. Hutchinson, Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symp. . Quant. Biol.* 22, 415-427 (1957).
 29. J. S. Terblanche *et al.*, Ecologically relevant measures of tolerance to potentially lethal temperatures. *The Journal of Experimental Biology* 214, 3713-3725 (2011).
 30. W. W. Reynolds, M. E. Casterlin, Behavioral Thermoregulation and the "Final Preferendum" Paradigm. *Amer. Zool.* 19, 211-224 (1979).
 31. A. D. Re, F. Díaz, E. Sierra, J. Rodríguez, Effect of salinity and temperature on thermal tolerance of Brown shrimp *Farfantepenaeus aztecus* (Ives) (Crustacea, Penaeidae). *J. Therm. Biol.* 30, 618-622. (2005).
 32. F. Díaz *et al.*, Thermal preference and tolerance of green abalone *Haliotis fulgens* (Philippi, 1845) and pink abalone *Haliotis corrugata* (Gray, 1828). *Aquaculture Research* 37, 877-884 (2006).
 33. A. D. Re, F. Díaz, G. Valdez, Effect of salinity on the thermoregulatory behavior of juvenile blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* Stimpson. *J. Therm. Biol.* 31, 506-513 (2006).
 34. J. P. Cumillaf *et al.*, Thermoregulatory behaviour, respiratory metabolism and blood metabolites of the sub-polar-temperate estuarine crab *Hemigrapsus crenulatus* (Crustacea: Decapoda: Varunidae). *Biology Open* 5, 220-228 (2016).
 35. J. R. Brett, Energetic responses of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Am. Zool.* 11, 99-113 (1971).
 36. H. O. Pörtner, Oxygen- and capacity-limitation

of thermal tolerance: a matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems. *The Journal of Experimental Biology* 213, 881-893 (2010).

37. C. Caamal-Monsreal *et al.*, Effects of temperature on embryo development and metabolism of *O. maya*. *Aquaculture* 451, 156-162 (2016).

38. J. Noyola *et al.*, Effect of temperature on energetic balance and fatty acid composition of early juveniles of *Octopus maya*. *Journal Experimental Marine Biology and Ecology* 445, 156-165 (2013).

39. J. Noyola *et al.*, Thermal preference, tolerance and metabolic rate of early juveniles of *Octopus maya* exposed to different acclimation temperatures. *Journal of Thermal Biology* 38 14-19 (2013).

40. O. Juárez *et al.*, Effect of maternal temperature stress before spawning over the energetic balance of *Octopus maya* juveniles exposed to a gradual temperature changes. *Journal Experimental Marine Biology and Ecology* 474, 39-45 (2016).

41. O. Juárez *et al.*, Is temperature conditioning *Octopus maya* fitness? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 467, 71-76 (2015).

42. C. Caamal-Monsreal *et al.*, Effects of maternal diet on reproductive performance of *O. maya* and its consequences on biochemical characteristics of the yolk, morphology of embryos and hatchlings quality. *Aquaculture* doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.01.020, (2015).

43. J. F. Tercero-Iglesias *et al.*, Effects of parental diets supplemented with different lipid sources on *Octopus maya* embryo and hatching quality. *Aquaculture* 448, 234-242 (2015).

44. J. Noyola *et al.*, Thermal biology of prey (*Melongena corona bispinosa*, *Strombus pugilis*, *Callinectes similis*, *Libinia dubia*) and predators (*Ocyurus chrysurus*, *Centropomus undecimalis*) of *Octopus maya* from the Yucatán Península. *J. Therm. Biol.* 53, 151-161 (2015).

45. L. E. Ángeles-González *et al.*, Temperature modulates spatial-temporal variability of the functional reproductive maturation of *Octopus maya*. *J. Mollus. Stud.* (en revisión).

46. J. A. Celis-Sánchez *et al.*, Abundancia estacional de crustáceos asociados a la captura artesanal de jaiba azul (*Callinectes sapidus*) en Sisal, Yucatán, México. *Rev. Mar. Cost.* 6, 1-15 (2014).



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera



www.lanresc.mx



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera