

# Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre

Una Guía para Tomadores de Decisiones

**Evelia Rivera-Arriaga, Isaac Azuz-Adeath,  
Omar D. Cervantes Rosas, Alejandro Espinoza-Tenorio,  
Rodolfo Silva Casarín, Alfredo Ortega-Rubio,  
Alfonso V. Botello y Beatriz E. Vega Serratos**

*Editores*





---

# Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre

Una Guía para Tomadores de Decisiones

Evelia Rivera-Arriaga, Isaac Azuz-Adeath,  
Omar D. Cervantes Rosas, Alejandro Espinoza-Tenorio,  
Rodolfo Silva Casarín, Alfredo Ortega-Rubio,  
Alfonso V. Botello y Beatriz E. Vega-Serratos

*Editores*

---



Rivera-Arriaga, E., I. Azuz-Adeath, O. D. Cervantes Rosas, A. Espinoza-Tenorio, R. Silva Casarín, A. Ortega-Rubio, A. V. Botello y B. E. Vega-Serratos (eds.), 2020. Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre. Una Guía para Tomadores de Decisiones. Universidad Autónoma de Campeche, RICOMAR. 894 p.

© Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX)  
Universidad Autónoma de Campeche

Red Internacional de Costas y Mares (RICOMAR)

ISBN 978-607-8444-58-8

doi 10.26359/epomex.0120

# Contenido

## Directorio de participantes

---

### PARTE 1. GOBERNANZA ADAPTATIVA

- 1. Diseño de la gobernanza costera** 3  
*E. Rivera-Arriaga y L. E. Vidal Hernández*
- 2. Análisis y evaluación gubernamental de mares y costas en México: hacia una evaluación integral** 27  
*M. García Chavarría, G. Enríquez y E. Rivera-Arriaga*
- 3. Formación educativa para los gestores en la solución de problemas en las áreas costeras de México. Entre la formación en programas de licenciatura y los programas de posgrado o especialidad** 47  
*L. Vidal-Hernández, P. Guadarrama, M. C. Arredondo-García, I. Espejel, E. Rivera-Arriaga y M. Mascaró*
- 4. Resiliencia costera: elementos para su instrumentación** 71  
*A. V. Balderas Cordero, J. I. Euan Avila y C. León*
- 5. Gobernanza ambiental ante el cambio climático: municipios costeros de México** 93  
*G. Seingier, I. Espejel y O. Jiménez-Orocio*

- 6. Elementos para la gobernanza del agua ante la vulnerabilidad a la sequía y el cambio climático: cuencas hidrológicas con destino turístico de Baja California Sur** 117  
*G. Seingier, J. C. Graciano, O. Jiménez-Orocio, M. Hallack e I. Espejel*
- 7. Adaptabilidad y transformaciones en el lago de Chapala. Retos para la gobernanza y el manejo de los cuerpos de agua epicontinentales** 139  
*C. Pedroza Gutiérrez y A. Sandoval Moreno*
- 8. Frente a la variabilidad del clima: riesgo y vulnerabilidad en las zonas costeras** 155  
*M. Andrade-Velázquez*
- 9. Análisis comparado de los impactos económicos y sociales ante el cambio climático en municipios costeros del noreste del golfo de México** 169  
*R. Tovar Cabañas, R. C. Vargas Castilleja, J. C. Rolón Aguilar y J. Treviño Trujillo*
- 10. Playas recreativas de México: vulnerabilidad y gestión** 193  
*J. A. Arreola Lizárraga, G. García Morales, C. Esmeralda León López y A. Ortega Rubio*
- 11. Situación jurídica para el manejo de los ecosistemas arrecifales de México** 221  
*J. Santander-Monsalvo, M. Villada-Canela, M. L. Bello-Sánchez y L. Ortiz-Lozano*
- 12. Energía limpia y uso del suelo en las costas mexicanas: escenarios y costo de oportunidad** 255  
*C. Vázquez-González, P. Moreno-Casasola y O. Jiménez Orocio*
- 13. Las energías renovables en las costas** 277  
*E. Mendoza, P. Flores, J. Hernández-Fontes, G. Rivera, A. Félix y M. Escudero*

- 14. Evaluación del impacto social de los proyectos de generación de energía eléctrica: propuesta metodológica para la construcción de los índices de la línea base** 293  
*C. Vázquez-González y F. F. Bonilla Fernández*
- 15. Costos ambientales y económicos no internalizados por la generación de energía eléctrica limpia: servicios ecosistémicos vs condicionantes ambientales** 315  
*C. Vázquez-González, C. Martínez González, J. González Mora y J. D. Tadeo Vara*
- 16. Las dunas costeras y ZOFEMAT: un vínculo necesario para fortalecer la gestión de las costas** 331  
*O. Cervantes, U. Urrea-Mariño, A. López-Urban, S. Cortina-Segovia, Y. Ventura Díaz y E. Quiroz Villanueva*
- 17. Experiencias sobre la gestión sustentable de las costas y playas de isla Cozumel, México** 355  
*O. Frausto Martínez*
- 18. Plásticos y basura en las zonas costeras y los océanos** 375  
*A. V. Botello, S. Villanueva F. y D. León N.*
- 19. Análisis de vulnerabilidad y gestión de riesgo por inundación en áreas de cuencas** 395  
*V. Escamilla-Rivera, U. Castro Campos y G. J. Villalobos Zapata*
- 20. Impacto socioambiental de la erosión costera. El caso de Chiapas** 413  
*V. Castro-Castro*
- 21. Panarquía: propuesta de análisis de la dinámica costera de Tabasco ante el cambio global** 427  
*L. Gama Campillo, M. E. Macías-Valadez, C. J. Pacheco-Figueroa, R. A. Collado-Torres, E. Mata-Zayas, H. M. Díaz-López, J. D. Valdez Leal, S. Arriaga Weiss y L. J. Rangel-Ruíz*

- 22.** Vulnerabilidad y riesgo socioambiental en localidades del Área Natural Protegida Laguna de Términos, Campeche, México 449  
*M. Frutos C., E. Solano Palacios, R. Martínez B., e I. G. Escobar*
- 23.** La Agencia Mexicana de Mares y Costas: estrategia para el desarrollo socioeconómico de los mares y costas mexicanas 475  
*J. R. Lara Lara*
- 24.** Reducción del riesgo por desastres: breve descripción del FOPREDEN y el FONDEN en el contexto del modelo FMPEIR y de la gobernanza 495  
*C. Vázquez-González*
- .....

## **PARTE 2. GOBERNANZA AMBIENTAL**

- 25.** La variabilidad climática en las zonas costeras 507  
*I. Azuz-Adeath*
- 26.** Ecosistemas costeros complejos 517  
*I. Azuz-Adeath, L. Rodríguez-Cardózo y H. Alonso-Peinado*
- 27.** Ecosistemas marinos complejos 531  
*I. Azuz-Adeath, L. Rodríguez-Cardózo y H. Alonso-Peinado*
- 28.** Importancia del monitoreo costero para la construcción de la resiliencia 543  
*A. Ruiz de Alegría-Arzaburu y G. Medellín*

- 29. Anomalías climáticas futuras en una cuenca hidrológica costera del Golfo de México: impacto de escenarios de cambio climático** 563  
*R. C. Vargas Castilleja, J. C. Rolón Aguilar, J. Treviño Trujillo y R. Tobías Jaramillo*
- 30. Cambio temporal en los sedimentos de las playas del sur del estado de Campeche: una herramienta para la toma de decisiones** 581  
*R. Canul, E. Mendoza, G. Posada, G. Santos Martínez y F. E. Puc Cutz*
- 31. Evaluación de inundación costera debido al incremento del nivel del mar en Ensenada, Baja California, México** 597  
*V. Fernández y R. Canul*
- 32. Humedales costeros de agua dulce y bases para su gobernanza** 617  
*P. Moreno-Casasola, L. Aguirre-Franco, A. Campos C., C.O. Carral-Murrieta, E. Cejudo, R.M. González-Marín, M. González Nochebuena, M.E. Hernández, D. Infante-Mata, A. Lazos Ruíz, H. López-Rosas, R. Monroy I., I. Neri Flores, L.A. Peralta-Peláez, K. Rodríguez-Medina, L. Sánchez-Higuieredo, E.A. Sánchez-García, O. Sánchez-Luna, C. Vázquez-González y J. Vázquez-Benavides*
- 33. Restauración ecológica de manglares de México** 649  
*J. A. Herrera-Silveira, C. Teutli-Hernández, P. A. Gómez Ruiz y F. Comín*
- 34. Almacenes de carbono en los manglares de Centla, Tabasco, asociado a gradientes ambientales y grado de conservación** 675  
*C.M. Agraz Hernández, C. A. Chan Keb, J. Chavez Barrera, A.C Ruiz Fernandez, J.M. Labougle, J. Reyes Castellanos, K. P. Conde Medina, F. Escamilla Escamilla, L. Ángulo Padilla, S.J. Guzmán y J. Osti Sáenz*
- 35. Biomarcadores: una herramienta para medir y predecir los efectos del cambio climático sobre los peces y su aplicación en la toma de decisiones** 699  
*R. Dzul-Caamal*

- 36.** Pautas para la conservación y manejo de impactos ambientales en pastos marinos 717  
*J. A. Herrera-Silveira, S. M. Morales-Ojeda, J. E. Mendoza-Martínez, J. Ramírez-Ramírez y T. Cota Lucero*
- 37.** El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable 743  
*A. Uribe-Martínez, A. Guzmán-Ramírez, F. Arreguín-Sánchez y E. Cuevas*
- 38.** Evaluaciones de impacto ambiental y su coincidencia con hábitats de tortugas marinas en la península de Yucatán, México 769  
*E. Cuevas, C. Díaz-Aguilar, M. Andrade Hernández y J. J. Guerra-Santos*
- 39.** El papel de los Programas de Acción para la Conservación de Especies (PACE) en el manejo y restauración de especies y ecosistemas del sureste de México 801  
*P. A. Gómez-Ruíz, S. Laffon-Leal, A. Delgado-Estrella y E. Cuevas*
- 40.** Pesquerías y variabilidad ambiental vs gobernanza, algunas reflexiones 827  
*J. Ramos Miranda, L. A. Ayala Pérez, Y. Torres Rojas, F. Gómez Criollo y D. Flores Hernández*
- 41.** Situación actual de conservación y manejo de meros y pargos en el sureste del golfo de México y mar Caribe Mexicano 855  
*A. Aguilar-Perera*
- 42.** La necesidad en México de generar un marco regulatorio para el uso de aditivos probióticos en la acuicultura costera 879  
*M. C. Monroy Dosta y J. A. Ramírez Torrez*

# Prólogo

Los mares son elementos fundamentales del sistema climático de la Tierra. Sus capacidades para conducir y almacenar calor, para capturar, liberar y retener dióxido de carbono y otros gases, su papel en la regulación planetaria del ciclo hidrológico y de los flujos biogeoquímicos, junto con la superficie del planeta que ocupan y los procesos que acoplan con la atmósfera, son solo algunas de las características que más utilizamos para describir su influencia planetaria.

Sin embargo, las costas y los mares tienen muchas otras dimensiones y escalas de análisis. Contienen la mayor diversidad en especies y en ecosistemas, en minerales y en precursores de compuestos químicos. En las zonas marinas se realizan una inmensa variedad de actividades humanas de relevancia socioeconómica. Dos tercios de la población mundial viven en un radio de 60 km de los litorales. Las costas y los mares han sido fuente de alimentos, de trabajo, de disfrute y no pocas veces de esperanza frente a muy diversos problemas de la humanidad. Hace unas pocas décadas, nos enteramos de que cantidades masivas de desechos que se han vertido en los mares, provenientes de actividades industriales y domésticas, están alterando gravemente las condiciones para la vida en sus ecosistemas.

Para México, que tiene bajo su control más de tres millones de kilómetros cuadrados de superficie marítima, sus mares y costas siguen siendo el elefante en la cocina de la política pública territorial, ambiental, socioeconómica, administrativa, científica y cultural.

Es por ello que la publicación de *Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la incertidumbre. Una guía para tomadores de decisiones*, reviste mucho interés. A lo largo de 894 páginas presentadas en dos partes, 141 autores de 52 instituciones y 16 estados de la república presentan estudios, reflexiones, dan opiniones y recomendaciones sobre diversos aspectos de lo que llaman en la *Parte 1 Gobernanza Adaptativa* y en la *Parte 2 Gobernanza Ambiental*. La literatura científica, técnica y académica sobre los ecosistemas marinos y costeros (y en menor medida los de aguas continentales) no es escasa en México. Se han dado también en diferentes momentos de la vida nacional, propuestas e intentos para clasificar, regular, ordenar y conciliar la actuación pública y privada en las zonas costeras y marinas de nuestro país. Ha habido avances, sin duda, pero no logramos aún tener la continuidad, la coordinación y la coherencia, ni geográficas ni temporales, entre los diferentes sectores, órdenes de gobierno y ordenamientos legales, que permitan manejar adecuadamente esta riqueza nacional.

La publicación, editada por la Universidad Autónoma de Campeche y por la Red Internacional de Costas y Mares (RICOMAR), fue coordinada por un experimentado grupo de investigadores del Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX).

Es una obra extensa y heterogénea en cuanto a temáticas y alcances. Los 42 trabajos o capítulos que presentan cubren revisiones de experiencias internacionales en gobernanza, estudios de erosión costera, meteorología y educación, desde gestoría costera hasta posgrado. Se expone también la problemática de los humedales epicontinentales, problemas socio-ecológicos y se analizan instrumentos de política para la conservación, manejo y restauración de especies y ecosistemas marinos. Tocaban también temas de introducción de energías limpias en zonas costeras, de pesquerías y acuicultura y temas actuales como el sargazo y los plásticos en costas y mares, resaltando la falta de información específica en este tema sobre los mares mexicanos. También se abordan escenarios e impactos del cambio climático y distintas posibilidades de adaptación.

Una especie de denominador común es la presentación de lecciones aprendidas y recomendaciones en términos de manejo y organización socio-ambiental. Aunque algunos de los instrumentos de política que mencionan no necesariamente están vigentes, los análisis y las reflexiones permiten aprovechar las experiencias.

Estamos, pues, ante un gran esfuerzo de la comunidad académica por dar un paso más hacia la atención y manejo integral de nuestras zonas costeras y marinas, destacando que la gobernanza, en un ambiente climática y socialmente cambiante, solo será posible mediante una amplia participación de los diversos actores involucrados, la armonización de instrumentos de política pública, la creación de capacidades y las sinergias virtuosas entre muy distintas actividades productivas.

En un momento de la vida de nuestro país en el que la ciudadanía de la política ambiental es una necesidad, en el que es imperativo poner en funcionamiento los mejores conocimientos científicos y tradicionales, sociales, privados y gubernamentales, para superar la grave situación de deterioro ambiental y generar oportunidades de cambio, este libro sobre Gobernanza y Manejo de Costas y Mares puede inspirar el diseño conjunto de diversas acciones que nos ayuden a avanzar en una coordinación de más largo plazo.

*Dra. María Amparo Martínez Arroyo*  
Directora General del Instituto Nacional  
de Ecología y Cambio Climático

---

# Importancia del monitoreo costero para la construcción de la resiliencia

*A. Ruiz de Alegría-Arzaburu y G. Medellín*

---

## Resumen

Las costas están en constante cambio en respuesta a la acción del oleaje, mareas, viento y corrientes responsables del transporte de sedimentos. La franja costera adopta distintas morfologías a lo largo del tiempo (escalas de segundos a décadas) en respuesta a las variaciones de esos forzamientos. La mayor parte de la población mundial reside en esta franja, y es muy relevante estudiar su estabilidad debido a que está siendo continuamente modificada a través de construcciones marítimas y terrestres que perturban su dinámica natural. Existe una necesidad inminente de entender el equilibrio dinámico de las costas y determinar su capacidad de resiliencia ante modificaciones naturales y antropogénicas. Para ello, se requiere de programas de monitoreo continuo que permitan entender los cambios morfológicos, y por tanto, su capacidad de resiliencia a diferentes escalas. En México, los grupos de investigación en morfodinámica costera de la UABC y la UNAM han realizado el esfuerzo de medir de

forma continua los cambios morfológicos de las costas del noroeste de Baja California y de la península de Yucatán. Los datos colectados comprenden mediciones morfológicas (topografías y batimetrías), hidrodinámicas (oleaje y corrientes), meteorológicas y sedimentarias concurrentes, obtenidas de forma directa en campo o a través del uso de sensores remotos. El objetivo de estos grupos de investigación es generar información para comprender los cambios morfodinámicos y validar modelos numéricos que sirvan como herramientas para evaluar los impactos de perturbaciones futuras en la franja costera. Los resultados de los programas de monitoreo son indispensables para la toma de decisiones encaminada a la construcción de costas resilientes.

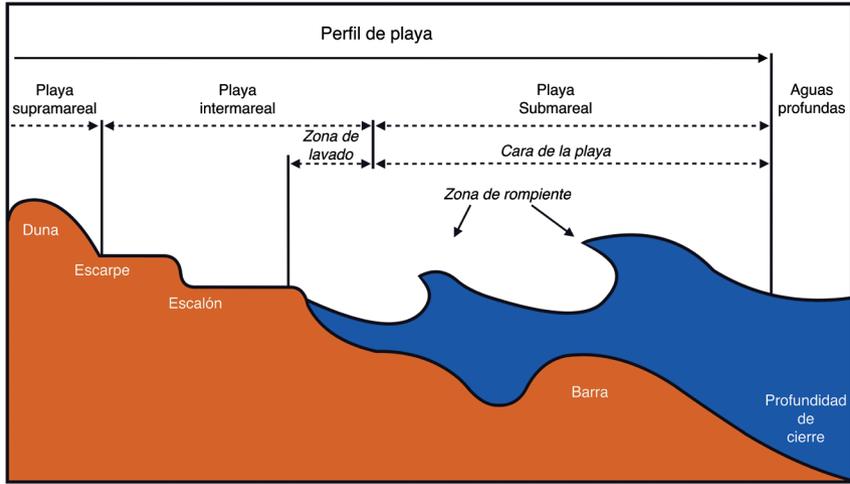
**Palabras clave:** costas; playas; resiliencia; mediciones; erosión; recuperación; cambio climático; equilibrio dinámico.

## Introducción

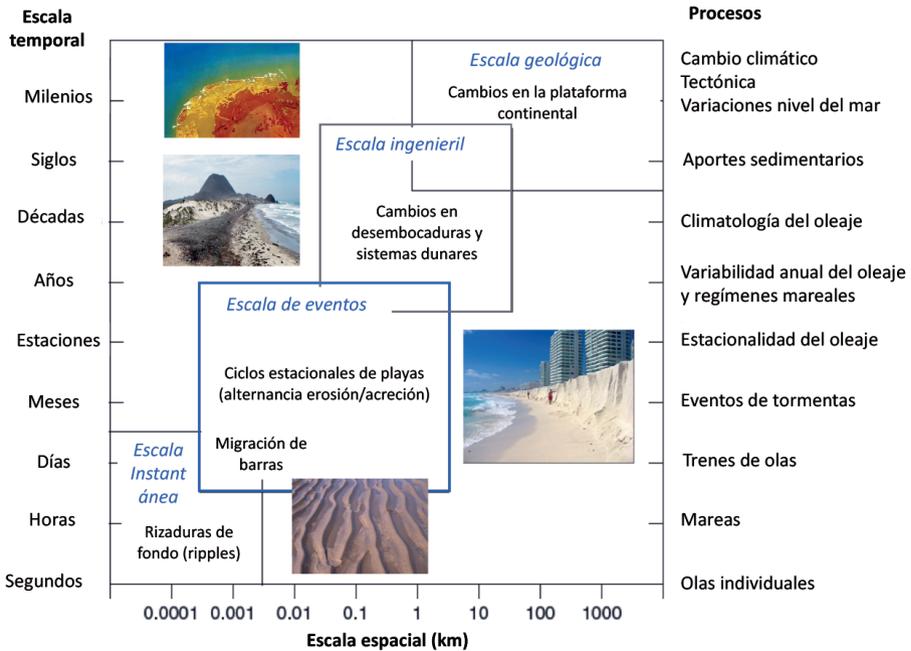
Las playas arenosas comprenden alrededor del 40 % de las costas del mundo (Bird, 1996), y éstas son depósitos sedimentarios que abarcan desde las dunas o pie de acantilados hasta una profundidad a partir de la cual no existe un transporte significativo de sedimentos (denominada profundidad de cierre) y ubicada normalmente a 8–10 m de profundidad (figura 1). Las playas presentan variaciones morfológicas constantes en respuesta al movimiento de arena asociado a diferentes forzamientos (oleaje, mareas, viento) que cambian con el tiempo (Ranasinghe, 2016). Por tanto, su estudio es complejo, ya que depende de la interacción entre la hidrodinámica y la morfología, es decir, el viento, el oleaje y la marea generan corrientes transportan sedimento y por lo tanto modifican la morfología del fondo marino. Sin embargo, cuando la morfología del lecho marino cambia, el oleaje y las corrientes se modifican. Por lo tanto, a finales de los años 1970 surgió el concepto de morfodinámica, que se refiere a la interacción mutua entre los forzamientos hidrodinámicos (viento, oleaje, corrientes,

marea) y la morfología de la playa, que dan lugar al transporte de sedimentos (Wright y Thom, 1977). Este concepto trata de explicar que la forma de las costas arenosas cambia debido a que la dirección y magnitud del transporte del sedimento varía con el tiempo. Los procesos eólicos también juegan un papel importante en el transporte de sedimentos, por tanto, es relevante también considerar el efecto de vientos locales (*i.e.* brisas intensas) y de meso-escala (*e.g.* “Santa Ana, Nortes, Tehuanos”) en la generación de corrientes y, consecuentemente, en la modificación de la morfología de las playas.

Los cambios morfológicos que uno observa a lo largo y a través de las costas varían en función de la escala de tiempo (figura 2). Por ello, para entender la estabilidad morfológica de las costas es importante elegir una escala temporal adecuada. Si uno se fija en el cambio morfológico de las playas durante el lapso de segundos a unas pocas horas (a corto plazo), se dará cuenta de que el cambio morfológico es pequeño (escala vertical de centímetros). La rotura del olea-



**Figura 1.** Terminología de un perfil de playa, que abarca desde la duna o acantilado (sección supramareal) hasta la profundidad de cierre (sección submareal). Adaptado del Shore Protection Manual (1984).



**Figura 2.** Escalas temporales y espaciales que afectan la evolución morfológica de las costas. Adaptado de Cowell y Thom (1994)

je es responsable de poner gran cantidad de arena en suspensión, la que es transportada por las corrientes a través y a lo largo de la pendiente de la cara de la playa. Sin embargo, la erosión o acreción vertical de arena está asociada al gradiente en el transporte, por lo que puede no ser perceptible en escalas de tiempo cortas. La mayor variabilidad morfológica ocurre a escala de eventos de tormentas (horas a días) y a escala estacional (meses). En dichos periodos de tiempo, los cambios morfológicos verticales pueden ser de uno a varios metros, debido al desacoplamiento de la hidrodinámica con el perfil de playa, que debe ajustarse a una nueva condición de equilibrio. Las tormentas normalmente generan una erosión muy notable en la playa semi-seca (sección intermareal y supramareal), y la arena erosionada es transportada mar adentro a través de las intensas corrientes transversales, y a veces, la arena es también distribuida a lo largo de la costa a través de la corriente litoral. La pérdida de arena durante las tormentas se puede ver reflejada en la presencia de un escarpe (temporal o permanente) en la sección intermareal o más arriba, en la supramareal. Dicha pérdida volumétrica de arena suele implicar un retroceso en la línea de costa hacia tierra, por tanto, una disminución del ancho de playa. Es de destacar que estos cambios morfológicos pueden acelerarse debido a la alteración de la dinámica natural asociada a la construcción de infraestructura costera (*e.g.* puertos, marinas, espigones) o la remoción de la duna.

La respuesta morfológica estacional de las playas cambia en función de las características sedimentarias, de pendiente de playa, oleaje (periodo, altura de ola y dirección) y régimen de vientos (intensidad y dirección). En general, durante periodos de alta energía de oleaje las playas se erosionan, y

su recuperación ocurre cuando la energía del oleaje disminuye. Las playas del noroeste de Baja California suelen recuperar la arena perdida durante el invierno, cuando la energía del oleaje incidente disminuye, que ocurre a finales de primavera y durante el verano (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2017). En estas playas la arena erosionada durante las tormentas se aleja de la orilla formando una barra submareal, y su recuperación ocurre cuando la energía del oleaje baja y favorece el transporte de arena hacia tierra. Como resultado de la recuperación, se suelen formar bermas, que son montículos de arena ubicados en la sección intermareal superior, además, aumenta el ancho de playa (avance de la línea de costa hacia el mar). En las costas de la península de Yucatán, los patrones de erosión y recuperación son diferentes a los observados en Baja California, ya que ocurren en diferentes estaciones del año. Durante temporada de tormentas (otoño-invierno) se acumula sedimento en la berma y la barra submareal migra hacia la costa, mientras que durante la temporada de brisas (primavera-verano) la barra migra hacia fuera de la costa. Esto demuestra que es sumamente importante realizar estos estudios en diferentes playas mexicanas para entender su respuesta morfológica ante diferentes condiciones de oleaje, mareas, viento y corrientes. De esta forma, se podría llegar a clasificar las costas mexicanas en función de su respuesta morfodinámica bajo diferentes escenarios hidrodinámicos.

Dado que la morfología de la playa está en continuo movimiento en respuesta al oleaje incidente, se dice que una playa se encuentra en un estado de equilibrio dinámico cuando es capaz de recuperar el volumen de arena (y forma de perfil) perdido durante periodos de alta energía (*i.e.* even-

tos de tormentas). Así, se dice que las costas son resilientes cuando son capaces de mantener un equilibrio dinámico a largo plazo (escala de años a décadas), por tanto, son costas que a pesar de sostener variaciones morfológicas de alta magnitud (*i.e.* mucha erosión en invierno) recuperan la arena perdida durante el periodo de baja energía de oleaje, consecuentemente, el cambio anual neto es cercano a cero.

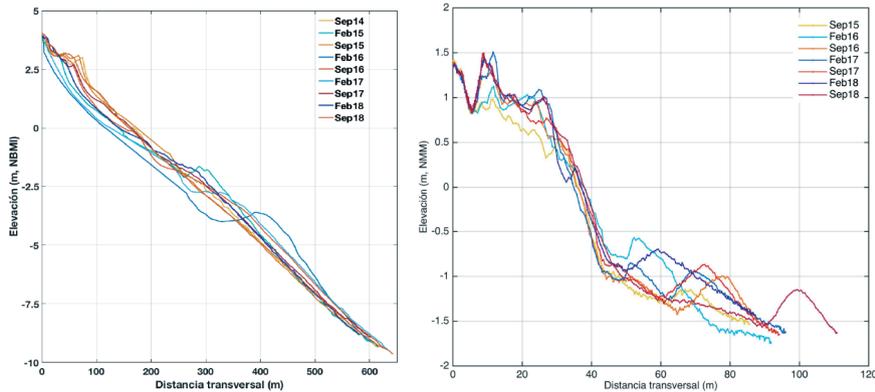
Los oceanógrafos físicos e ingenieros de costas han enfocado sus esfuerzos en generar costas estables. Sin embargo, algunas de las soluciones no son funcionales a largo plazo por lo que existe la necesidad de identificar procedimientos que permitan construir sistemas resilientes, asegurando que mantengan su funcionalidad. Para entender si las costas son resilientes y que, por lo tanto, se encuentre en un equilibrio dinámico a largo plazo es necesario realizar planes de monitoreo continuos. Es decir, es necesario, al menos, tomar mediciones mensuales en un período largo que permitan evaluar el nivel de estabilidad de las playas a escalas de tormentas, estaciones, años, y décadas. Considerando que es imposible medir todas las playas mexicanas, una estrategia consiste en implementar pla-

nes de monitoreo continuo en diferentes ambientes para la calibración de modelos numéricos que puedan ser utilizados en otras regiones del país con características similares. Para implementar medidas de mitigación en zonas críticas es necesario un buen entendimiento de los procesos antes de proponer el uso de una medida blanda (*i.e.* regeneración de playa) o rígida (*i.e.* instalación de una estructura). Una toma de decisión acertada requiere saber, por ejemplo, el volumen de arena mínimo para que la playa alcance su estabilidad, el tipo de tamaño de grano de arena, y la forma del perfil de playa de equilibrio (intermareal y submareal), entre otros parámetros. Una toma de decisiones no informada resulta en la afectación de zonas aledañas y acciones de mitigación no exitosas. En este Capítulo se definirán las pautas a seguir para construir costas resilientes, se explicará a detalle la problemática y los indicadores necesarios para llevar a cabo un monitoreo adecuado. Por último, se mostrarán dos casos de estudio relacionados con programas de monitoreo que se están desarrollando en las penínsulas de Yucatán y Baja California, y finalizaremos con unas recomendaciones para los tomadores de decisiones.

## Antecedentes

México posee más de 11 000 km de costa sin incluir las islas, y a lo largo de su litoral existe una alta variedad de playas expuestas al oleaje del océano Pacífico y Atlántico ([www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)). Las playas arenosas presentan diferentes rasgos morfológicos que se pueden utilizar como indicadores o *proxies* para inferir su estado de erosión o acreción a lo largo del tiempo. Si

uno visita regularmente una playa natural se da cuenta de que ésta cambia su forma con el paso de las estaciones del año (figura 3). Por ejemplo, en playas con cambios estacionales muy marcados se suele observar la presencia de escarpes en la parte intermareal durante condiciones de alta energía de oleaje, por tanto, el escarpe puede ser un indicador de condición erosiva. El se-



**Figura 3.** Variabilidad estacional de un perfil de playa: (panel izquierdo) en Playa Hermosa (Ensenada, B.C.; TB01). Los colores cálidos muestran los perfiles de verano (septiembre; presencia de berma) y los fríos los de invierno (febrero; presencia de barra submareal). Nótese que el cambio percibido en febrero 2016 es el asociado con la anomalía climática de El Niño 2015-2016. (panel derecho) en la playa de Sisal (P07), al final del verano la barra submareal se ubica más lejos de la costa (colores cálidos), mientras que durante el invierno la barra migra hacia la costa (colores fríos).

dimento erosionado se transporta hacia el mar, y se deposita en forma de barra en la parte submareal cercana. Por el contrario, al visitar la misma playa durante condiciones de baja energía de oleaje se dará cuenta de que la condición es de acreción, es decir, la playa intermareal contiene mucha arena, y a menudo se forma un montículo de arena conocido como berma. Durante este periodo de acreción, la barra de arena submareal suele migrar hacia tierra, y a veces incluso desaparece por completo debido a su completo acoplamiento con la línea de costa. Por tanto, a través de la identificación de rasgos morfológicos como la duna, el escarpe, la barra submareal, y la berma se puede inferir la condición erosiva o de acreción de la playa en el tiempo.

Las líneas de costa pueden ser utilizadas para definir la estabilidad de las playas si son medidas de forma continua durante un largo periodo de tiempo (Boak y Turner, 2005). La realidad es que una línea de costa por sí sola no provee toda la información necesaria para entender el equilibrio diná-

mico de playa, dado que la playa se caracteriza por su superficie tridimensional que varía continuamente en el tiempo. Muchas veces hace falta realizar correlaciones entre los volúmenes de playa y las posiciones de las líneas de costa para poder interpretar el significado físico del avance o retroceso de la línea. Por ello, es preferible tomar mediciones tridimensionales, es decir, medir perfiles topográficos y batimétricos de forma periódica (*i.e.* mensualmente, trimestralmente) y continua (durante varios años a décadas). Estas mediciones permiten obtener información cuantitativa de los cambios morfológicos de la playa, es decir, calcular su geometría (anchura, altura, pendiente), el volumen de arena que contiene y sus rasgos morfológicos (*i.e.* barra, berma, escarpe, duna).

A pesar de que la mejor forma de cuantificar los cambios morfológicos es a través de mediciones topográficas y batimétricas, la adquisición de estos datos es normalmente costoso y, por ello, difícil de realizar de forma periódica. Actualmente existen

técnicas de percepción remota para obtener información morfodinámica de las playas, con los cuales se pueden ubicar rasgos morfológicos e inferir su estado de acreción o erosión. Los sistemas fijos de video-cámaras han resultado ser muy eficaces en la colección de imágenes continuas durante las horas de luz, y a través de una rigurosa validación con mediciones de campo pueden ofrecer información muy útil para los tomadores de decisiones (Holman y Stanley, 2007).

En muchas costas alrededor del mundo se realizan programas de monitoreo de playas que combinan tanto mediciones directas de campo como sistemas de monitoreo remotos. Por un lado, instalan sistemas de video-monitoreo continuo y por otro lado toman mediciones morfológicas estacionales que permiten validar la información de las cámaras y cuantificar el volumen de arena. Además, para interpretar el cambio morfológico es necesario realizar mediciones de oleaje y mareas a través de instrumentos *in situ*. Las mediciones de oleaje y marea pueden complementarse con datos sintéticos de re-análisis de modelos numéricos o mediciones de altimetría disponibles en portales de internet (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>).

Los programas de monitoreo continuo multi-decadales son escasos alrededor del mundo (Turner *et al.*, 2016). Algunos ejemplos de este tipo de programas se han desarrollado en la playa de Narrabeen en Australia, con mediciones de 1976-fecha

(Turner *et al.*, 2016), Duck en Carolina del Norte, Estados Unidos (Lippman y Holman, 1990; Larson y Kraus, 1994), Holanda (Wijnberg *et al.*, 1995) y Hasaki, Japón de 1987 a la fecha (Kuriyama *et al.*, 2008). A pesar de la importancia de este tipo de información para implementar políticas de manejo, en México no existe ninguna institución dedicada al monitoreo de las playas de manera sistemática, y los esfuerzos de monitoreo se han limitado a sitios específicos en torno a proyectos (de investigación o servicios) de corta duración.

Algunos de los programas de monitoreo más largos en México (reportados en la bibliografía) son la playa de Rosarito en Baja California (Lizárraga-Arciniega *et al.*, 2003, 2007), Cancún y Puerto Morelos en Quintana Roo (Silva-Casarín *et al.*, 2006; Mariño Tapia *et al.*, 2008; González-Leija *et al.*, 2013; Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2012, 2013) y Progreso en Yucatán (Medellín *et al.*, 2015). Con la idea de poder apoyar en las decisiones políticas de manejo costero, más recientemente se han implementado programas de monitoreo de alta resolución espacial y temporal en Baja California (2012- a la fecha) por parte de la Universidad Autónoma de Baja California (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2017) y en Yucatán (2015- a la fecha) a través de la Universidad Nacional Autónoma de México. Estos programas tienen como objetivo entender la variabilidad de la playa a escalas de días, meses y años.

## Pautas para construir costas resilientes

Para estudiar la estabilidad de las costas es necesario un monitoreo de indicadores que permitan cuantificar su resistencia (capacidad de soportar un disturbio) y resiliencia (capacidad de recuperarse después de una perturbación) con respecto a la funcionalidad del sistema. Una de las funciones principales de las playas es la de brindar protección a la costa durante eventos extremos, sin embargo, la capacidad de la costa para resistir y recuperarse del impacto de los distintos estresores depende de su morfología. Por lo tanto, todo programa de monitoreo debe considerar la medición georreferenciada de sus características principales. Entre los indicadores principales se encuentran el ancho de la playa y la presencia/ausencia de barras de arena y dunas, las cuales representan una fuente de almacenamiento de arena que incrementa su capacidad de disipar la energía del oleaje durante tormentas (Parlagreco *et al.*, 2019) y de recuperación posterior a ellas. Idealmente es importante cuantificar el volumen de arena de la playa emergida, el volumen de arena en las barras de arena y dunas, y la presencia de vegetación dunar dado el papel que juegan en la estabilización de la duna (Silva-Casarín *et al.*, 2016).

Para la medición de estos indicadores se pueden utilizar mediciones topográficas y batimétricas con sistemas de geoposicionamiento diferencial y ecosondas, el uso de imágenes de satélite, imágenes de sistemas de video monitoreo (Lippmann y Holman, 1990), fotogrametría a partir de vuelos de vehículos aéreos no tripulados georreferenciados (Harley *et al.*, 2015), o idealmente la combinación de dos o más de ellas. Las mediciones de los indicadores principales de la respuesta de la playa deben correlacionarse

con los forzamientos naturales que caracterizan el clima marítimo. La correlación de los indicadores morfológicos con las series temporales de los forzamientos principales como la altura, dirección y periodo del oleaje, el nivel del mar, y el transporte de sedimentos debido al oleaje, permite identificar la importancia relativa de cada uno de los forzamientos en los cambios observados en la morfología de la playa.

Para determinar las trayectorias de los indicadores claves, las series temporales de las mediciones pueden ser analizadas de manera estadística para, por ejemplo, aislar la variabilidad interanual y estacional. Una de las técnicas más populares es a través de funciones empíricas ortogonales (Aubrey *et al.*, 1980; Harley *et al.*, 2011). Dicho método nos permite obtener los principales modos de variabilidad espacial de los indicadores de la morfología de la playa y su evolución temporal. La evolución temporal del modo principal de variación nos indica la trayectoria de dichos indicadores en función de las escalas de forzamiento. La trayectoria de los indicadores nos puede dar información sobre su resiliencia, la cual puede ser: cíclica, equilibrio dinámico, o meta equilibrio dinámico en función de las perturbaciones a las que está sujeta (Piégay *et al.*, 2018). Estudios recientes han demostrado que la evolución temporal del principal modo de variabilidad de la línea de costa es capaz de predecir el tiempo de recuperación de la misma ante una perturbación (Medellín *et al.*, 2018) o su trayectoria hacia un equilibrio dinámico. Por otro lado, para identificar valores umbrales es necesario integrar los indicadores claves en índices de resiliencia que permitan determinar si la resiliencia se mantiene,

disminuye o se incrementa a lo largo del tiempo. Medellín *et al.* (2018) proponen índices de resiliencia y resistencia, basados en los estudios de ecología desarrollados por Orwin y Wardle (2004), para el estudio de perturbaciones inducidas por estructuras temporales en la posición de la línea de costa. Para poder definir estrategias que permitan mejorar la resiliencia es necesario contar con mediciones de los indicadores

claves, desarrollar índices de resiliencia que incorporen los indicadores claves (línea de costa, dunas y barras de arena), y utilizar modelos numéricos que permitan modelar diferentes escenarios para estudiar la sensibilidad a los diferentes forzamientos. Este tipo de estudios permite priorizar las acciones para incrementar la resiliencia de la costa en un sitio específico.

## Problemática y sectores afectados

En México existen numerosos problemas derivados de un manejo no sustentable de la costa. El desarrollo de infraestructura costera, como puertos y vías de comunicación, frecuentemente produce efectos negativos en la costa ya que evita que la playa alcance un nuevo equilibrio dinámico cuando se establece dentro de la zona de su dinámica natural. Asimismo, puede afectar el patrón de transporte de sedimentos o reducir su capacidad de disipación del oleaje durante eventos extremos debidos a la remoción de la vegetación y la duna. Este tipo de problemas se agrava con la implementación de medidas de mitigación locales que no consideran la dinámica de la celda litoral. Lo anterior hace evidente la falta de lineamientos claros que obliguen a realizar estudios de la dinámica en el corto y largo plazo previos a la construcción de infraestructura en la costa. Aunado a ello, existen regiones donde, ante la falta de respuesta por parte de las autoridades, se construyen obras costeras ilegales que trasladan el problema a zonas que no estaban afectadas. La degradación de la costa implica una menor capacidad para adaptarse a

cualquier perturbación natural o antropogénica (Bird, 1996).

Uno de los sectores más afectados es el turístico, ya que la playa es el principal atractivo de la costa. El deterioro de la costa tiene un alto impacto económico en zonas turísticas. Uno de los fenómenos naturales que ha causado mayor afectación en la costa de México en años recientes, ha sido el huracán Wilma en 2005, el más intenso registrado en el Atlántico (WMO, 2006). Las pérdidas económicas se calculan en 18 773 millones de pesos para Yucatán y Quintana Roo, principalmente concentradas en el sector turístico de Quintana Roo (17 188 millones de pesos) según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (<https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones>). Este huracán ocasionó en Cancún pérdidas de aproximadamente 7 millones de m<sup>3</sup> de arena en la playa debido a la urbanización de la costa que incrementó la rigidez de la isla de barrera (Silva-Casarín *et al.*, 2012). En el largo plazo la erosión de playas representa una pérdida del territorio nacional cuyo impacto económico es invaluable.

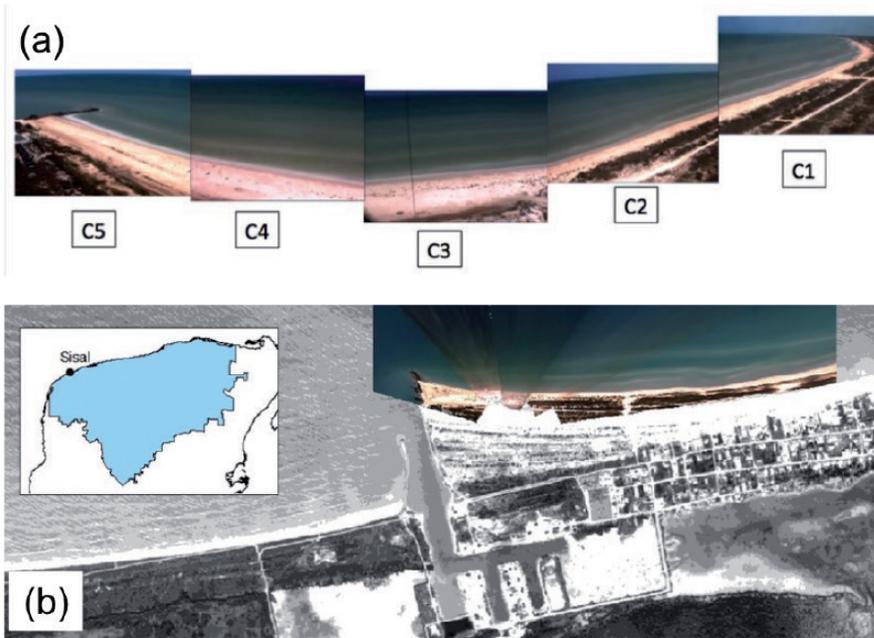
## Indicadores para monitorear la resiliencia costera

Las costas arenosas dejan de ser resilientes es debido a que pierden su equilibrio dinámico, consecuentemente, entran en una fase de erosión crónica. Existen varios indicadores morfológicos que pueden informar cuándo las playas inician una fase de erosión continua. El indicador más utilizado y sencillo de interpretar es la posición de la línea de costa. Cuando se define un punto de referencia fijo en la parte alta de la playa, la distancia entre este punto fijo y la línea de costa elegida (*i.e.* coordenada cuando la elevación es 0 m referido al nivel de bajamar media inferior) da lugar a un valor de ancho de playa. Normalmente cuando la playa se hace cada vez más estrecha es debido a que se está perdiendo volumen y, por tanto, se está erosionando. Consecuentemente, una serie de tiempo de ancho de playa puede ayudar a entender si la playa está entrando en una fase de pérdida de anchura y, por tanto, de erosión continua y pérdida de equilibrio dinámico. En esa situación los tomadores de decisiones deberían de definir una solución para estabilizar la playa.

Otro indicador para monitorear la estabilidad de las playas es el volumen de arena que contiene la misma. Integrando los perfiles transversales colectados durante mediciones topográficas se obtienen áreas, y multiplicando estas áreas por distancias representativas de cada perfil se obtienen volúmenes. El monitoreo continuo de las playas permite definir el volumen de equilibrio de éstas, es decir, la cantidad de arena que debe de contener para asegurar que está estable. La ventaja de medir volúmenes es que en el caso de que la playa entre en un proceso de erosión crónica, se puede saber exactamente la cantidad de sedimento

que hace falta añadir, e incluso la ubicación exacta. Este conocimiento es esencial a la hora de realizar regeneraciones artificiales de playas en costas no resilientes. Pero para conocer el valor de volumen de equilibrio es necesario monitorear las playas por al menos unos pocos años, y así poder calcular los volúmenes durante las diferentes estaciones del año, y la variabilidad del tamaño de grano.

Como se ha mencionado, existen diferentes métodos para obtener la información de estos indicadores. La forma más efectiva de conocer el volumen de arena y posición de la línea de costa es mediante mediciones topográficas con un sistema de geoposicionamiento (GPS) diferencial. A pesar de ser un trabajo bastante intenso, con realizarlo cada tres o cuatro meses se podría obtener información bastante útil como para poder definir los valores volumétricos de anchura de playa en su estado de equilibrio. Un método alternativo de extraer líneas de costa de forma continua es utilizando sistemas de video-monitoreo fijos (figura 4), y a través de esas imágenes adquirir valores de anchura de playa. La única desventaja de estos sistemas es que se requiere de personal altamente cualificado para realizar el procesamiento de las imágenes para extraer la información necesaria. Por eso muchas veces es más eficiente la realización de topografías y el procesamiento de las topografías, que requiere de conocimiento más básico que el análisis de imágenes. En México existen pocos sitios que cuenten con este tipo de sistemas de video-monitoreo, uno de los cuales se encuentra en la playa de Sisal (Yucatán), cuyas imágenes se pueden consultar en (<http://tepeu.sisal.unam.mx/video-sisal/images.jsp>; <http://ocse.mx/>).



**Figura 4.** (a) Imágenes oblicuas tomadas por las cinco cámaras que componen el sistema de video-monitoreo en Sisal, Yucatán, e (b) imagen rectificadas de la sección de la playa de Sisal (en color) obtenida a partir de las cinco imágenes oblicuas (tomada y modificada de Mendoza *et al.* (2017).

La información relevante que se quiere obtener es saber si una vez que la playa pierde el equilibrio, es capaz de volver a él. Muchas veces, por presión socioeconómica, no se permite que las playas recuperen su equilibrio de forma natural posterior a eventos de gran erosión generados por tormentas o huracanes. Un ejemplo interesante es el caso del paso del huracán Wilma (octubre de 2005) por la playa de Cancún (Mariño Tapia *et al.*, 2008). El huracán erosionó gravemente la playa y la arena erosionada fue depositada en forma de barra a unos pocos metros de profundidad. Unas semanas después se observó el inicio de una recuperación natural de la playa, sin embargo, las autoridades locales optaron por regenerar la playa de forma artificial, impidiendo su recuperación natural. Para que la playa recupere el 100 % de la arena perdi-

da durante un evento de alta energía como son las tormentas o los huracanes hace falta tiempo. Por ejemplo, la playa municipal de Ensenada (Baja California) tardó tres veranos en recuperarse completamente después de la incidencia de varias tormentas intensas durante El Niño 2015-2016 (Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018).

A través del monitoreo continuo del ancho de playa y volúmenes de arena cada tres meses durante cinco años, por ejemplo, se puede adquirir el conocimiento básico necesario para poder tomar decisiones de gestión más acertadas en esa playa y sus alrededores. Debido a la gran variabilidad de ambientes costeros de México, sería necesario elegir playas estratégicas para ser monitoreadas, incluyendo localidades del norte y sur de las costas del Pacífico, golfo de California, Caribe y golfo de México. Se

podría proponer la instalación de sistemas de video-monitoreo costero con un medidor de oleaje y corrientes para conocer las condiciones forzantes de los cambios de

erosión y recuperación de las playas, además de proponer la realización de topografías cada tres o cuatro meses.

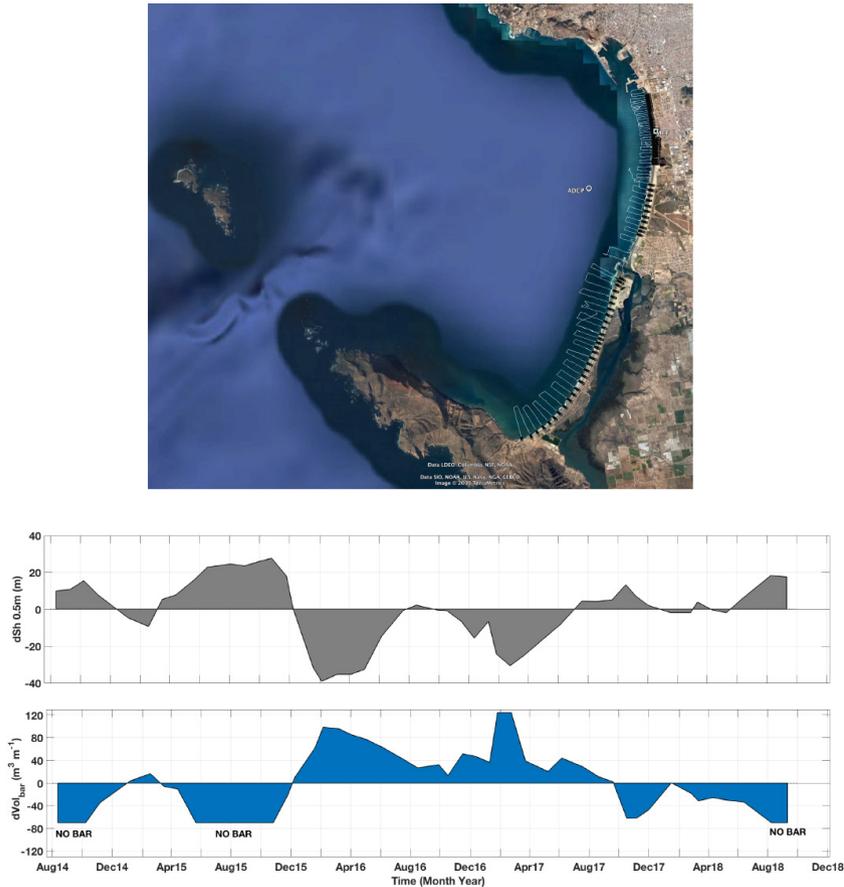
## **Lecciones aprendidas: casos de estudio de Baja California y Yucatán**

Desde hace varias décadas los grupos de investigación mexicanos en oceanografía e ingeniería de costas han estado realizando un gran esfuerzo por coleccionar mediciones continuas de cambios morfológicos en playas de diferentes puntos del país. El Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) en Ensenada fue probablemente un grupo pionero que emprendió el monitoreo topográfico estacional de playas del noroeste de Baja California en 1971 (Lizárraga-Arciniega, 1976), aunque fue hasta 1997 cuando se inició el monitoreo continuo de la playa de Rosarito, que duró hasta 2005 (Lizárraga-Arciniega *et al.*, 2003, 2007). Actualmente, grupos de morfodinámica costera del II-UNAM (Unidad Académica Sisal) y del IO-UABC realizan mediciones mensuales de alta resolución espacial tanto en la sección semi-seca (topografías) como en la submareal (batimetrías). La finalidad de ambos grupos es calcular balances sedimentarios para entender la resiliencia de las costas del norte de Yucatán y Baja California ante el impacto de eventos extremos (*i.e.* tormentas, huracanes). Estos ambientes costeros están sujetos a una dinámica costera completamente diferente.

### **Monitoreo de las playas de nw de Baja California**

A finales de 2012, el grupo de investigación en morfodinámica costera del IO-UABC ([www.mordics.org](http://www.mordics.org)) emprendió un monitoreo topográfico bimensual de playa Hermosa (Ensenada, B.C.), y a partir de 2014 se iniciaron además mediciones batimétricas mensuales. El objetivo es calcular balances sedimentarios y entender la profundidad en la que se acumula el sedimento después del impacto de oleaje de alta energía (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2017). En 2015 se decidió medir mensualmente topografías y batimetrías a lo largo de toda la franja arenosa (alrededor de 15 km) de bahía Todos Santos (Ensenada, B.C.) (figura 5) y de la playa de La Misión (figura 6) ubicada a unos 30 km al norte de Ensenada. Además de las mediciones morfológicas, se mide el oleaje y las corrientes a 20 m de profundidad, con varios perfiladores acústicos de corrientes tipo Doppler (ADCP), se coleccionan datos meteorológicos y se realizan vuelos regulares con drones para ubicar la presencia de corrientes de retorno (figura 6).

Las mediciones recabadas durante estos años son de extrema utilidad para entender si la playa es capaz de recuperarse después del impacto de tormentas. Durante el periodo de mediciones se capturó el impacto

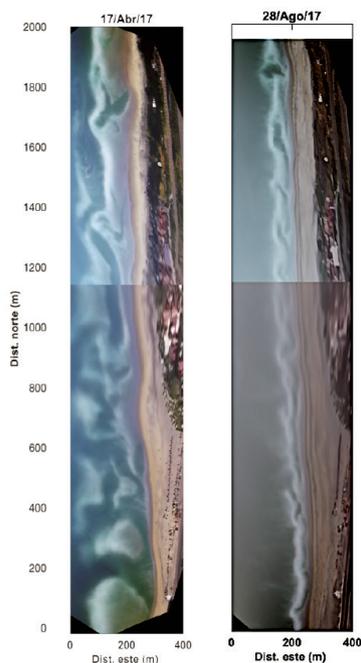


**Figura 5.** Vista aérea de los perfiles topográficos (líneas negras) y batimétricos (líneas blancas) del plan de monitoreo de las playas arenosas de Bahía Todos Santos (arriba). Variabilidad temporal de la línea de costa promedio para Playa Hermosa, y el volumen de arena contenido en la barra submareal de agosto 2014 a septiembre 2018 (abajo; modificado de Vidal-Ruiz y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2019).

del invierno muy energético asociado a la anomalía climática de El Niño 2015-2016 (Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018). Durante ese invierno la playa perdió alrededor de 65 m de ancho de playa, y esa arena erosionada se transportó hacia la playa submareal formando una barra que llegó a acumular alrededor de  $150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$  de arena (figura 5). Los resultados muestran que a finales del verano de 2018 la playa fue capaz de recuperar la posición de la línea de costa medida en septiembre del 2014. En

la primavera del 2018, la arena contenida en la barra submareal fue disminuyendo, a medida que la playa intermareal se fue ensanchando (figura 5). La ventaja de medir un perfil de playa cada 50 m a lo largo de la misma es que se puede determinar si existen zonas de mayor erosión o acumulación, e incluso, zonas de total estabilidad.

Las mediciones recabadas en la playa de La Misión muestran que es muy dinámica, y que presenta corrientes de retorno la mayor parte del año (figura 6). Con el fin



**Figura 6.** Vista aérea de la playa La Misión con perfiles topográficos (líneas negras) y batimétricos (líneas amarillas) colectados durante una campaña. Las imágenes de la derecha son productos obtenidos con el dron (imágenes promediadas durante 17min) para abril y agosto 2017 (izquierda y derecha).

de entender la variabilidad espaciotemporal de las corrientes de retorno, a principios del 2017 se emprendió un monitoreo semanal-bisemanal de los 2 km de playa a través de videos colectados con un dron. Las imágenes analizadas (georreferenciadas y orto-rectificadas) ofrecen información cuantitativa muy útil para determinar tanto la posición y geometría de las corrientes como la posición instantánea de la línea de costa, posición y forma de las barras submareales y anchura de la zona de rompientes. Con esta información se pueden validar modelos numéricos que sirvan como herramientas para predecir la ubicación de las corrientes de retorno a futuro, información relevante desde el punto de vista de seguridad en playas.

## Monitoreo de las playas del nw de Yucatán

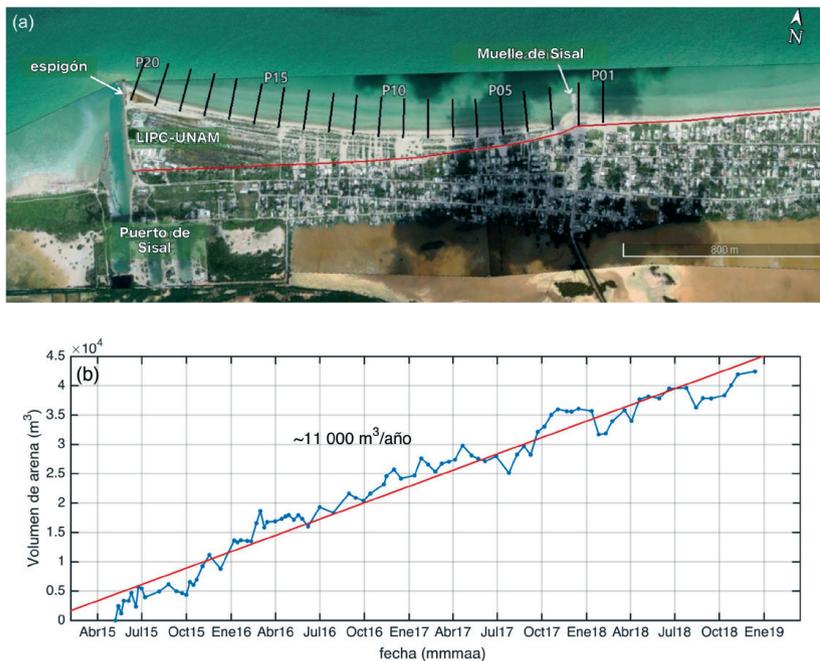
La costa norte de la península de Yucatán se caracteriza por la presencia de brisas marinas intensas, que inducen un importante transporte de sedimento a lo largo de la costa en dirección de este a oeste. Por tanto, esta costa es altamente sensible a la presencia de estructuras costeras (*i.e.* escolleras, espigones, muelles), las cuales generan frecuentemente problemas de erosión.

Con el fin de conocer la dinámica estacional e interanual de estas playas, se inició en el año 2015 un programa de monitoreo en la playa de Sisal, Yucatán con frecuencia semanal durante el primer año y quincenal a partir del segundo año (<http://ocse.mx/>). Además, se han realizado monitoreos de si-

tios con erosión crítica en otros puntos de la costa, para evaluar la eficiencia de algunas medidas de mitigación de los tomadores de decisiones, que no siempre han sido exitosas. Finalmente, se han realizado experimentos intensivos para evaluar la resistencia y resiliencia de la playa ante la presencia de estructuras costeras con dimensiones similares a las utilizadas por los dueños de los predios en la primera línea de playa. Los datos colectados durante este periodo nos han permitido entender la dinámica de la playa ante la presencia de estructuras permanentes, como el espigón aldeaño al canal de acceso al puerto de abrigo de Sisal. Las mediciones de más de 100 campañas de campo realizadas durante más de 4 años han permitido la obtención de indicadores

del equilibrio dinámico de la playa, tales como posición de la línea de costa, cambios en el volumen de la playa emergida, posición de la berma, y posición de la barra de arena sumergida, entre otros (Medellín y Torres-Freyermuth, 2019).

Los resultados volumétricos de la playa emergida (desde la duna hasta la línea de bajamar) a lo largo de los casi 2 km de playa de Sisal muestran un incremento sostenido (11 mil  $m^3/año$ ) durante todo el periodo de medición (figura 7b), que es debido al sedimento retenido por el espigón del puerto de abrigo. Además, el avance de la línea de costa es de  $\sim 300$  m en los últimos 30 años en la zona más cercana al espigón (figura 7a). Esta información es de suma utilidad para diseñar sistemas de trasvase o bypass

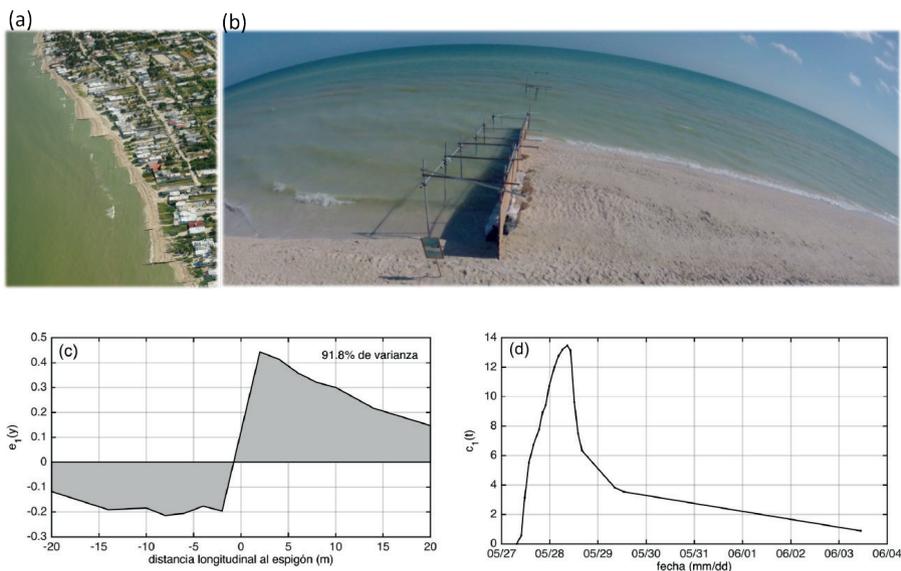


**Figura 7.** (a) Imagen aérea de la playa de Sisal en 2015 mostrando el espigón del puerto de Sisal, la línea de costa previa a la construcción del puerto en 1984 (línea roja), y los transectos de medición de perfiles de playa (líneas negras, P1-P20), (b) Serie temporal de cambio de volumen de arena de la playa emergida (desde la duna hasta el nivel de bajamar) a partir de mayo 2015. Las mediciones se muestran en azul y en rojo el ajuste lineal.

de arena, necesarios para compensar la erosión de las playas ubicadas corriente abajo de las estructuras.

La erosión originada a partir de la construcción de los puertos de abrigo a principios de los años 1980, se ha ido acrecentando debido a la construcción de infraestructura sobre la duna costera, modificando la morfología de la playa y restringiendo las fluctuaciones naturales de la misma. Esto ha originado, desde hace varios años, la instalación de estructuras costeras por parte de los propietarios de viviendas de la primera línea de playa, la mayoría de las veces agravando el problema de erosión. Con el objetivo de evaluar la resistencia y resiliencia de la playa ante la presencia de estas estructuras, se realizó un

experimento colocando un espigón temporal de dimensiones similares a las utilizadas en la región (figura 8a) (Medellín *et al.*, 2018). De esta forma se evaluó la poca resistencia que ofrece la playa ante la colocación de una estructura de esas características (figura 8b) y, lo altamente resiliente que resultó ser la playa una vez eliminada la estructura. La estructura retuvo más de  $70 \text{ m}^3$  en 24 horas, alterando la línea de costa, generando acreción corriente arriba y erosión corriente abajo, como se indica en el modo principal de variación (figura 8c), el cual fue máximo justo antes de retirar la estructura (05/29), volviendo progresivamente a su estado inicial seis días después (en 06/03; figura 8d).



**Figura 8.** (a) Franja de la costa norte de Yucatán mostrando las estructuras costeras colocadas por propietarios de predios, (b) Imagen de la estructura experimental un día después de su instalación en la playa de Sisal y justo antes de su remoción, (c) modo principal de variabilidad espacial de la línea de costa asociado a la presencia de la estructura en la playa, (d) evolución temporal del modo principal.

## Lecciones aprendidas

Algunas de las lecciones aprendidas a partir del monitoreo de estas playas son:

- Es necesario medir de forma continua (de preferencia cada mes). Es la única forma de poder entender los cambios volumétricos y de línea de costa con detalle, y poder así proponer opciones adecuadas de manejo costero.
- Hace falta coleccionar mediciones de alta calidad. Se necesitan datos de alta resolución espaciotemporal para poder realizar el diseño óptimo de regeneraciones de playas o sistemas de bypass (traslado de arena de un lado a otro de estructuras). Solo así se podrá garantizar la esta-

bilidad de las costas, y consecuentemente, su equilibrio dinámico y resiliencia.

- Se necesita monitorear las intervenciones costeras (*i.e.* modificación o instalación de nuevas estructuras, regeneraciones artificiales, bypass, entre otras). Un monitoreo continuo permite evaluar su desempeño como medida de mitigación y sus posibles efectos en playas aledañas.
- Se recomienda validar modelos numéricos que sirvan como herramientas para simular la respuesta de las playas a las medidas de mitigación propuestas (*i.e.* estructura, regeneración artificial) antes de su instalación en campo.

## Recomendaciones para tomadores de decisiones

Con el fin de asegurar la estabilidad de las costas mexicanas a largo plazo, se recomiendan las siguientes acciones:

- Desarrollo e implementación de programas de monitoreo sencillos, cuyos indicadores puedan ser obtenidos a partir de mediciones directas o sistemas de percepción remota.
- Adoptar índices de resiliencia que se puedan calcular a partir de los resultados del monitoreo. Es importante que la resiliencia de la playa sea evaluada de acuerdo con su funcionalidad y no a la capacidad de recuperación a su estado anterior a la perturbación.
- Exigir que cualquier proyecto que modifique la dinámica en la costa cuente con estudios de los impactos en la morfología de la playa en el corto y largo plazo, y que contemple un programa de monitoreo que permita evaluar su desempeño durante al menos un año posterior a su ejecución.
- Involucrar a la comunidad costera y usuarios de la zona costera en el monitoreo e interpretación de los resultados de manera que contribuyan a construir costas resilientes a través de la conservación de los ecosistemas.

## Literatura citada

- Aubrey, D. G., D.L. Inman, y C.D. Winant, 1980. The statistical prediction of beach changes in southern California, *J. Geophys. Res.*, 85(C6): 3264-3276, doi:10.1029/JC085iC06p03264.
- Bird, E.C.F., 1996. Coastal erosion and rising sea level. p. 87-103. In: Millimann J.D., Haq B.U. (Eds.). *Sea level rise and coastal subsidence*, Kluwer academic, Dordrecht, the Netherlands.
- Boak, E. H., y I.L. Turner, 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21 (4): 688-703.
- Cowell, P.J., y B.G. Thom, 1994. Morphodynamics of coastal evolution. p. 33-86. In: Carter R.W.G., Woodroffe C.D. (Eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- González-Leija, M.B., I. Mariño-Tapia, R. Silva, C. Enríquez, E. Mendoza, E. Escalante-Mancera, F. Ruiz-Rentería, y E. Uc-Sánchez, 2013. Morphodynamic evolution and sediment transport processes of Cancún Beach. *Journal of Coastal Research* 29(5): 1146-1157.
- Harley, M. D., I.L. Turner, A.D. Short, y R. Ranasinghe, 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia, *J. Geophys. Res.*, 116: F04033, doi:10.1029/2011JF001989.
- Harley, M.D., I.L. Turner, A.D. Short, M.A. Bracs, M.S. Phillips, J.A. Simmons, y K.D. Splinter, 2015. Four decades of coastal monitoring at Narrabeen-Collaroy Beach: the past, present and future of this unique dataset. *Australasian Coasts and Ports Conference 2015*, pp. 1-6.
- Holman, R.A., y J. Stanley, 2007. The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54: 477-491.
- Kuriyama Y., Y. Ito, S. Yanagishima, 2008. Medium-term variations of bar properties and their linkages with environmental factors at Hasaki, Japan. *Marine Geology* 248: 1-10.
- Larson M., y N.C. Kraus, 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Marine Geology*, 117: 75-94.
- Lippmann T. C., y R.A. Holman, 1990. The spatial and temporal variability of sandbar morphology. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 95:11575-11590.
- Lizárraga-Arciniega, J.R., 1976. Variaciones estacionales de la playa de Bahía de Todos los Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 3 (1): 30-50.
- Lizárraga-Arciniega, R., A. Chee-Barragán, E. Gil-Silva, T. Mendoza-Ponce, y A. Martínez-Díaz de León, 2003. Effect of El Niño on the subaerial beach Playas de Rosarito, B.C., Mexico. *Geofísica internacional*, 42: 419-428.
- Lizárraga-Arciniega, R., A. Martínez-Díaz de León, O. Delgado-González, C.R. Torres, y L.A. Galindo-Bect, 2007. Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playas relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 33(3): 259-269.
- Mariño Tapia, I., R. Silva, C. Enriquez Ortiz, E. Mendoza Baldwin, R. Escalante Mancera, y F. Ruiz Rentería, 2008. Extreme conditions induced by hurricane Wilma in intermediate water depth at Puerto Morelos, Quintana Roo, Mexico. *Coastal Engineering Conference*. DOI: 10.1142/9789814277426\_0048.
- Medellín, G., y A. Torres-Freyermuth, 2019. Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417, 106013.
- Medellín, G., I. Mariño-Tapia, Y 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): 1149-1458.
- Medellín, G., A. Torres-Freyermuth, G.R. Tomasicchio, A. Francone, P.A. Tereszkievicz, L. Lusito, L. Palemón-Arcos, y J. López, 2018. Field and numerical study of resistance and resilience on a sea breeze dominated beach in Yucatan (Mexico), *Water*, 10(12): 1806.
- Mendoza, E.T., E. Ojeda, A.D. Gracia-Barrera, y P.I. Espadas, 2017. Estación de video monitorización y caracterización inter-annual de la playa de Sisal. *Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán*. LANRESC, Yucatán, México. Editores: Garza-Pérez, J.R. & Ize-Lema, I.A.R.
- Orwin, K.H., y D.A. Wardle, 2004. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biol. Biochem.*, 36: 1907-1912.

- Parlagreco, L., L. Melito, S. Devoti, E. Perugini, L. Soldini, G. Zitti, y M. Brocchini, 2019. Monitoring for Coastal Resilience: Preliminary Data from Five Italian Sandy Beaches. *Sensors*, 19: 1854.
- Piégay, H., A. Chabot, y Y.E. Le Lay, 2018. Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system theory. *Geomorphology*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018>.
- Ranasinghe, R., 2016. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160: 320-332.
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, R. Silva, y A. Pedrozo-Acuña, 2012. Post-nourishment beach scarp morphodynamics. *Journal of Coastal Research*, SI, 65: 576-581. DOI: 10.2112/SI65-098.1.
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, C. Enríquez, R. Silva, y M. González-Leija, 2013. The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology* 198, 69-83.
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., J.A. Vidal-Ruiz, H. García-Nava, y A. Romero-Arteaga, 2017. Seasonal morphodynamics of the subaerial and subtidal sections of an intermediate and mesotidal beach. *Geomorphology*, 295: 383-392.
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., y J.A. Vidal-Ruiz, 2018. Beach recovery capabilities after El Niño 2015-2016 at Ensenada Beach, Northern Baja California. *Ocean Dynamics*, 68: 749-759.
- Shore Protection Manual, 1984. Department of The Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Silva-Casarin, R., I. Mariño-Tapia, C. Enríquez-Ortíz, E. Mendoza-Baldwin, E. Escalante-Mancera, y F. Ruiz-Rentería, F2006. Monitoring shoreline changes at Cancun Beach, Mexico: effects of hurricane Wilma. *Coastal Engineering Conference*, doi: [10.1142/9789812709554\\_0294](https://doi.org/10.1142/9789812709554_0294).
- Silva-Casarin, R., G.R. Martinez, I. Mariño-Tapia, G. Posada Vanegas, E. Mendoza Baldwin, y E.E. Mancera, 2012. Manmade Vulnerability of the Cancun Beach System: The Case of Hurricane Wilma. *Clean Soil Air Water*, 40: 911-919. doi:10.1002/clen.201100677
- Silva, R., M.L. Martínez, I. Odériz, E. Mendoza, y R.A. Feagin, 2016. Response of vegetated dune-beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering* 109: 53-62.
- Turner I.L., M.D. Harley, A.D. Short, J.A. Simmons, M.A. Bracs, M.S. Phillips, y K.D. Splinter, 2016. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Scientific Data* 3, 160024.
- Turner I.L., Harley M.D., Drummond C.D., 2016b. UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114: 19-24.
- Vidal-Ruiz, J.A., y A. Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2019. Shoreline variability related to sandbar morphometrics on a single-barred beach in NW Baja California. Coastal Sediments Conference, Saint Peterburg, Florida.
- Wijnberg K. M., y H.J. Terwindt J., 1995. Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis. *Marine Geology*, 126: 301-330.
- WMO, 2006, WMO statement on the status of the global climate in 2005. Report WMONo 998, World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- Wright, L.D., y B.G. Thom, 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*, 1: 412-459.

