

Caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, México

Geomorphological and hydroclimatological characterization of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Mexico

Ojilve Ramón Medrano-Pérez^{1*}, Reynaldo Payano-Almánzar², Leonardo Noriel López-Jiménez³

¹Cátedra CONACYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS). Calle Centenario Instituto Juárez S/N, Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. E-mail: ojilve.medrano@ccgs.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-1136>

²Departamento de Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos/ INRHED SpA. Av. Nueva Providencia 1881, Of. 1620, C.P. 7500520, Providencia, Santiago, Chile. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-6084>

³Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS). Calle Centenario Instituto Juárez S/N, Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. <https://orcid.org/0000-0002-9284-7991>

*Autor de correspondencia

Resumen

En este artículo se muestra la caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. Para ello, se generó una base de datos digital con las principales características de la reserva (hidrología, climatología, hidrogeología y otros aspectos clave). Los resultados muestran un sistema con poca capacidad de drenaje, influenciado por la tipología de las arcillas y una morfología alargada que refleja un largo tiempo de concentración. El desafío inmediato es la insuficiente infraestructura de datos espaciotemporales para comprender los procesos climatológicos y geológicos de esta área natural. Por tanto, esta contribución debe impactar la toma de decisiones dentro del espacio natural con base en la mejor información científica disponible.

Palabras clave: Hidrología Mexicana; Área Natural Protegida; Tabasco; sistema de apoyo a decisión.

Abstract

In this article, the geomorphological and hydro climatological characterization of the Pantanos Centla Biosphere Reserve, Tabasco, Mexico, is shown. To that end, a digital database was generated with the reserve's main characteristics (hydrology, climatology, hydrogeology, and other key aspects). The results show a system with little drainage capacity, influenced by the clay typology and an elongated morphology reflecting a long concentration time. The immediate challenge is the insufficient space-time data infrastructure which helps understand this natural area's climatological and geological processes. Therefore, this contribution should impact decision-making within the natural area, based on the best available scientific information.

Keywords: Mexican hydrology; Protected Natural Area; Tabasco; decision support system.

Recibido: 21 de febrero de 2020

Aceptado: 12 de febrero de 2021

Publicado: 17 de marzo de 2021

Como citar: Medrano-Pérez, O. R., Payano-Almánzar, R., & López-Jiménez, L. N. (2021). Caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, México. *Acta Universitaria* 31, e2846. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2021.2846>

Introducción

Las áreas naturales protegidas (ANP) en México son uno de los principales instrumentos para conservar la biodiversidad y los servicios ambientales que estas proveen (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2014). En particular, las 182 ANP de carácter federal administradas por la Conanp abarcan una extensión de 90 839 520 ha, siendo una de estas ANP la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla (RBPC). La RBPC se ubica en el sureste de México y fue creada mediante decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de agosto de 1992 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 1992). Esta reserva es considerada como uno de los humedales más importantes de Mesoamérica por la relevancia de sus comunidades de plantas hidrófitas (Novelo-Retana, 2006), y se encuentra reconocida internacionalmente como sitio Ramsar, NAWCA (*North American Wetlands Conservation Act*) y por el MAB (*Man and the Biosphere*) Programme (Barba-Macías *et al.*, 2018).

La RBPC representa el 12.3% de la superficie total del estado de Tabasco y 11% de los humedales a nivel nacional. Asimismo, esta ANP contiene el 12% de la vegetación acuática y subacuática del país y se caracteriza por suelos muy productivos, riqueza de especies, depósitos deltaicos y hábitat de manglares como componentes primarios de la región hidrológica Grijalva-Usumacinta (Mendelssohn *et al.*, 2017). Además, comprende una de las zonas con mayor diversidad biológica del país, albergando una gran variedad de especies vegetales y animales. En tal sentido, sobre la base de esta riqueza natural, se producen bienes y servicios para el disfrute y beneficio socioambiental (Barba-Macías *et al.*, 2006; Barba-Macías *et al.*, 2014; Barba-Macías *et al.*, 2018; Mata-Zayas *et al.*, 2017).

En la superficie de la RBPC coexiste la propiedad nacional, federal, privada y ejidal, donde se tienen diversas localidades, las poblaciones asentadas están dedicadas a actividades económicas como la agricultura, la pesca y la ganadería (Barba-Macías *et al.*, 2006; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2000). En adición a ello, se tiene presente la industria petrolera en distintos campos de petróleo y gas en el área (Barba-Macías *et al.*, 2018). En tal sentido, producto de las distintas actividades económicas presentes, este espacio natural protegido ha sufrido diversas modificaciones que presionan constantemente la RBPC y a sus servicios ambientales (Barba-Macías *et al.*, 2014; Barba-Macías *et al.*, 2015; Barba-Macías *et al.*, 2018; De la Rosa-Velázquez *et al.*, 2017; Guerra-Martínez & Ochoa-Gaona, 2006, 2008; Puc-Carrasco *et al.*, 2016).

En cuanto a investigación, cabe reconocer que los esfuerzos en materia de investigación científica en esta zona han estado enfocados principalmente en las alteraciones provocadas por las actividades antropogénicas (Barba-Macías *et al.*, 2014, 2017, 2018), la distribución y la clasificación de los humedales (Barba-Macías *et al.*, 2006), la abundancia relativa de especies como el manatí (Puc-Carrasco *et al.*, 2016) y la evaluación espacio temporal de la vegetación y uso del suelo (Guerra-Martínez & Ochoa-Gaona, 2006). Además, incluyen esfuerzos en materia de erosión y vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño (Núñez *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016), intrusión salina y pérdida de conectividad hidrológica en el Golfo de México (Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019). Por tanto, en términos generales, las investigaciones en las ANP han estado enfocadas a los temas de inventarios biológicos, servicios ecosistémicos, amenazas y evaluaciones de los impactos antropogénicos (Fueyo-Mac Donald & Pliego-Moreno, 2015; Ortega-Rubio *et al.*, 2015), pero no así en enfoques que describan las características geológicas y climáticas de las ANP.

En tal sentido, el conocimiento de la hidroclimatología y geomorfología es clave para la toma de decisión en temas de planeación territorial, protección civil, infraestructura y políticas públicas (Álvarez-Soberano & Medrano-Pérez, 2020; Bocco & Palacio-Prieto, 2014; INECC, 2004; Ramos *et al.*, 2016). No obstante, la hidroclimatología y geomorfología no han sido parte de las recomendaciones de investigación específicas en las ANP (Ortega-Rubio *et al.*, 2015). Desde esa perspectiva, el presente estudio se enfocó en

caracterizar la geomorfología e hidroclimatología de la RBPC, con la finalidad de sentar las bases para generar un sistema de apoyo a la decisión que favorezca el establecimiento, actualización y fortalecimiento de políticas de manejo y conservación de esta área protegida. Sobre esta base, la presente investigación busca favorecer no solo la investigación en estos temas, sino también contribuir a la toma de decisión de los actores en torno a las amenazas que presenta la RBPC identificadas en este manuscrito.

Materiales y métodos

Localización y descripción de la zona de estudio

La RBPC se localiza al noreste del estado de Tabasco entre las coordenadas geográficas 17° 57' 53" -18°39'03" N y 92° 06' 39" -92°47'58" O, con una superficie de 302 706 ha. La mayor parte se localiza en el municipio de Centla, seguido de Jonuta y en menor proporción Macuspana, Tabasco; además, parte de su superficie se localiza dentro del estado de Campeche, México (INECC, 2000). Contiene dos zonas núcleo y una zona de amortiguamiento (figura 1).

En la reserva predominan los suelos Histosoles y Gleysoles con presencia de materia orgánica y capacidad de retención de humedad (Palma-López *et al.*, 2017). La reserva se localiza en la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur y en la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños (Barba-Macías *et al.*, 2014). En términos geológicos, se caracteriza por tres paisajes geomorfológicos: las planicies palustres, las de cordones de playa y la fluvial activa, viéndose influenciada por los depósitos aluviales y palustres de origen sedimentario del sistema fluvial Usumacinta-Grijalva (INECC, 2000; Jiménez-Ramírez, 2013).

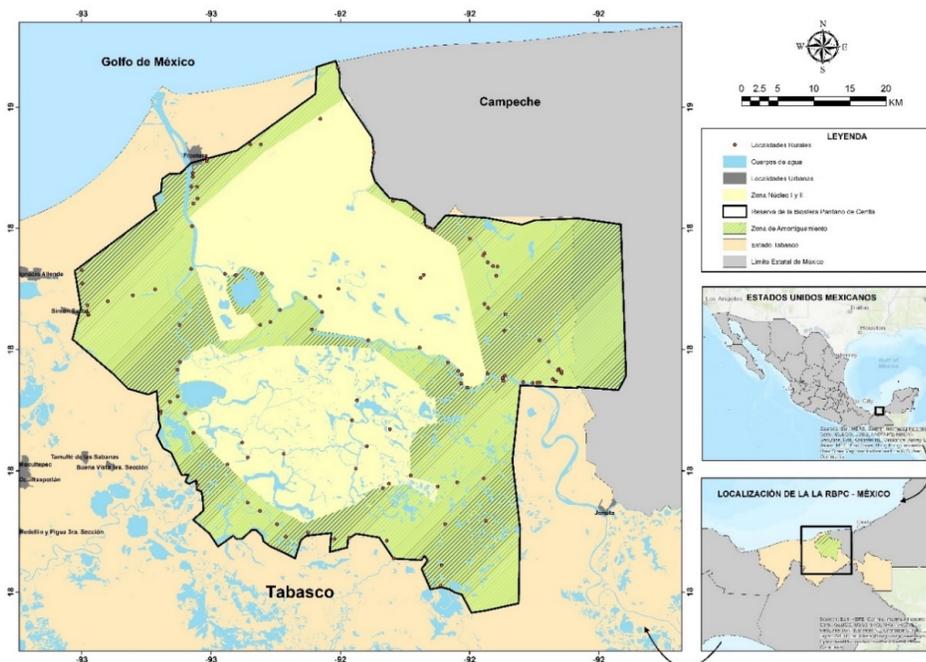


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

El clima predominante en la RBPC es el cálido húmedo en el centro y sur y el cálido subhúmedo en el norte (García & Conabio, 1998). Debido a la escasa elevación, y por la deficiencia de drenaje de sus suelos, la ANP está conformada por un sistema hídrico complejo sujeto a inundación temporal o permanente (Jiménez-Ramírez, 2013), donde los ríos más importantes con influencia en la reserva son el Grijalva y el Usumacinta por sus volúmenes anuales de 27 013 y 55 832 millones de metros cúbicos (Mm³), respectivamente.

La vegetación predominante son las comunidades hidrófitas e importantes especies faunísticas en alguna categoría de riesgo (por ejemplo, la especie *Nelumbo lutea* (Willd.) Pers., reportada en Ochoa-Gaona *et al.* [2018]), de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010). La biodiversidad aporta servicios ambientales: abastecimiento de agua, regulación de contingencias, manejo del agua, alimentación y comercialización (Cruz-Cruz, 2008; Mata-Zayas *et al.*, 2017).

En la RBPC se asientan 112 localidades con una población total de 24 536 habitantes, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), dedicadas fundamentalmente a la agricultura de subsistencia, la ganadería y la pesca, basando su economía en la extracción de recursos naturales (Barba-Macías *et al.*, 2014, 2017).

En adición a estas actividades antropogénicas, desde el año 1951, en la zona se ha tenido la presencia de la industria petrolera (Barba-Macías *et al.*, 2018). De acuerdo con la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH, 2019), en la RBPC se localizan 233 pozos, de los cuales la mayoría son exploratorios y solo 23 se encuentran en producción de gas natural. Adicionalmente, existen 652 000 m de ductos, de los cuales la mitad se encuentran en operación y destinados al transporte de gas.

Metodología

La metodología seguida ha estado basada en cuatro etapas principales (figura 2):

- 1) Recopilación de información, que consistió en la recopilación de documentos, artículos técnicos/científicos en distintas bases de datos, información cartografía, datos hidrológicos, información institucional nacional e internacional relacionada a la RBPC en portales de geoinformación de la Conabio (CONABIO, 2020), la Conagua, la Conanp, el INEGI y la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

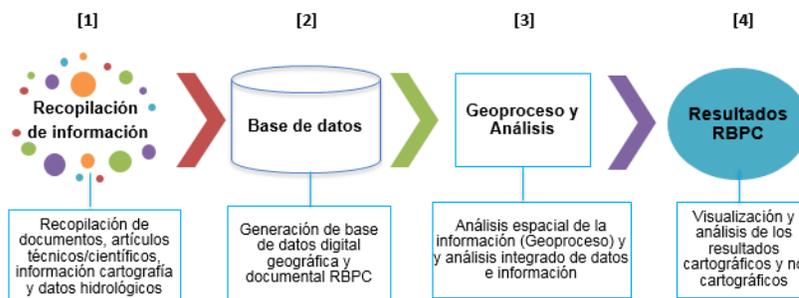


Figura 2. Flujograma metodológico para el desarrollo del trabajo.

- 2) Base de datos: se generó una base de datos digital con la información geográfica y documental recopilada. La base de datos cartográfica se ha elaborado y georreferenciado en el sistema de

proyección UTM WGS84 huso 15N con la información disponible de ámbitos claves como geología, usos de suelo, pendientes, degradación de suelo, precipitación y otros.

- 3) Geoprocesos y análisis, que consistió en el análisis espacial de la información organizada en la base de datos y en un análisis integrado de datos hidrológicos y documentos de interés de la RBPC. Por ejemplo, se calcularon los parámetros geomorfológicos de la zona mediante fórmulas matemáticas (tabla 1) y la utilización del modelo digital de terreno (MDT) de la misión topográfica *Shuttle Radar* (SRTM, por sus siglas en inglés) de la NASA con una resolución espacial de 30 x 30m, el cual se encuentra disponible en el portal de datos *EarthExplorer* del *U.S. Geological Survey* (USGS) (SRTM, 2019). Además, se utilizaron los MDT con resolución de 15 x 15 m de Tabasco y Campeche disponibles del INEGI (INEGI, 2013). Dichos MDT fueron geoprocesados usando herramientas de integración espacial en los sistemas de información geográfica (SIG) y el manejo de algoritmos *Hydrology - Watershed delimitation* disponibles en el *software* ArcGIS. También se realizó el procesamiento de datos y tratamiento de la información hidroclimatológica e hidrométrica disponible en la base de datos del Clicom y el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) de la Conagua (2020) para la reserva y su área de influencia, respectivamente. En este sentido, se analizaron los datos de precipitaciones y temperaturas de la estación meteorológica Tres Brazos, así como los datos de caudales superficiales de las estaciones hidrométricas Macuspana, Boca del Cerro y Salto de Agua por ser las estaciones vigentes más cercanas y con registro de datos más representativos de la zona de estudio.

Tabla 1. Expresiones matemáticas de los parámetros geomorfológicos*.

Parámetros de forma	
Índice de compacidad (Gravelius)	$Kc = \frac{(.282)(P)}{\sqrt{A}}$
Factor de forma	$Ff = \frac{A}{L^2}$
Coefficiente de circularidad de Miller	$Cc = 4\pi \frac{A}{p^2}$
Parámetros de relieve	
Pendiente media de la cuenca	$S = 100 * \frac{(\sum Li) (H)}{A}$
Altitud media de la cuenca	$Hm = \frac{(\sum Hi . Si)}{A}$
Pendiente media del cauce principal	$Sm = \frac{Hmáx - Hmín}{Lc}$
Parámetros relativos a la red drenaje	
Tiempo de concentración (Tc)	Kirpich: $Tc = 0.06626 * \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0.385}$
	California Culvert Practice: $Tc = \left(\frac{0.87L^3}{H}\right)^{0.385}$
	Giandotti: $Tc = 60 \left(\frac{AA^{0.5} + 1.5L}{0.8Hm^{0.5}}\right)$
	Normas Españolas: $Tc = 18L^{0.76} / S^{0.19}$
Coefficiente de Masividad	$Cm = \frac{Hm}{A}$

*Nota. Tc = Tiempo de concentración (min); Pc = Perímetro de la cuenca (km); L = Longitud del cauce (km); S = Pendiente (m/m); A = Área de la cuenca en km²; Hm = Diferencia de nivel (m) entre la cota media de la cuenca y la salida (m); H = Diferencia de nivel entre cotas extremas de la cuenca (m).

- 4) Resultados RBPC, los cuales permitieron visualizar los resultados cartográficos y no cartográficos obtenidos en la etapa anterior. Así mismo, se realizaron ajustes gráficos con cruce de información con la finalidad de obtener una nueva visión más integrada de los procesos naturales y antrópicos de la RBPC.

Resultados y Discusión

Determinación de los parámetros geomorfológicos de la zona

Se ha realizado una caracterización geomorfológica de la zona o polígono (RBPC) que comprende un área de 3026.89 km², la cual posee un sistema hidráulico con poca capacidad de drenaje, como ha sido identificado y analizado por Conagua (2012). Esto se debe a la combinación de factores hidrológicos (altas precipitaciones, caudales y niveles freáticos someros) y aquellos geomorfológicos identificados en la tabla 2, principalmente una baja altitud media (1.36 m. s. n. m.) con zonas que tienen -1 m. s. n. m. y 0 m. s. n. m. en toda la Reserva, una pendiente media muy baja de 0.32% (<1%) con mal drenaje, un alto tiempo de concentración (39.67 horas) y un desnivel altitudinal relativamente bajo (16 m).

Para el caso del factor de forma, el valor de 0.55, el coeficiente de compacidad, y el coeficiente de circularidad, indican una morfología alargada donde el tiempo de recorrido es más largo, lo que contribuye a que los picos de crecidas sean menos aparatosos durante eventos de crecidas. En este sentido, cabe señalar que las variables calculadas para determinar la forma de la subcuenca muestran claramente una forma alargada de esta.

Tabla 2. Parámetros geomorfológicos de la RBPC.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES			Zona RBPC
Parámetro	Unidad	Símbolo	Valor
Perímetro	km	P	277.72
Área	km ²	A	3026.89
Longitud cauce principal	km	LCP	63.90
Desnivel altitudinal	m	DA	16.00
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DEL RELIEVE			
Cota máxima	m. s. n. m.	Cmax	30.00
Cota mínima	m. s. n. m.	Cmin	-14.00
Altitud media	m. s. n. m.	Am	1.36
Pendiente promedio de la zona	%	Smed	0.32
Altitud máxima del cauce	m. s. n. m.	Amaxc	15.00
Altitud mínima del cauce	m. s. n. m.	Aminc	-3.00
Altitud media del cauce	m. s. n. m.	Amedc	1.23
Pendiente promedio del cauce	%	Sc	0.61

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJES				
	California Culvert Practice	Horas	Tc	39.67
Tiempo de concentración	Kirpich	Horas	Tc	11.58
	Giandotti	Horas	Tc	100.75
	Norma Española	Horas	Tc	21.11
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA RESERVA				
	Longitud de la zona	km	D	74.00
	Factor de forma	m/m	FF	0.55--> Alargada
	Coefficiente de compacidad	m/m	Kc	1.41--> De oval redonda a oval oblonga
	Coefficiente de circularidad (redondez)	m/m	CC	1.42--> Alargada

Adicionalmente, características propias de la RBPC, como una baja elevación y una tipología de suelos compuesta por materia orgánica y arcilla (Jiménez-Ramírez, 2013; Palma-López *et al.*, 2017), condicionan una zona con drenaje deficiente, un sistema hídrico complejo e inundación temporal o permanente según la época del año. No obstante, la RBPC cuenta con 110 cuerpos de agua que cubren el 44% de la superficie de la reserva (Barba-Macias *et al.*, 2018; Sánchez *et al.*, 2015). Consecuentemente, al tratarse de una llanura de inundación, la reserva está condicionada por el régimen hidrológico y los pulsos de inundación de los ríos Usumacinta y Grijalva, principalmente (Barba-Macias *et al.*, 2018). Los cauces se caracterizan por ser sinuosos con patrones meándricos, siendo claves para el abastecimiento de agua, la pesca y la biodiversidad (Conagua, 2012).

En este contexto, los cambios morfológicos y adaptaciones continuas como consecuencia de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas han estado presentes históricamente en toda la planicie tabasqueña (Zapata *et al.*, 2011), de ahí que se requieran estudios adicionales para determinar el alcance que estas y otras alteraciones puedan tener en la RBPC. No obstante, estudios recientes han reportado impactos de la infraestructura de presas del río Grijalva en la dinámica hidrológica de la RBPC (Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019) y efectos adversos del incremento del nivel del mar en la costa tabasqueña, como la salinidad y la erosión (Núñez *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016).

Generación de base de datos cartográfica y documental

A partir de información geográfica disponible se ha generado una base de datos cartográfica en el sistema de proyección UTM WGS84 huso 15N con mapas claves, como: MDT, pendientes, geología, isoyetas de precipitación, usos de suelos, degradación de suelos y tipos. Además, se generó una base de datos con artículos, libros y datos de estaciones meteorológicas (precipitación y temperatura) para el análisis de esta investigación.

Por lo tanto, como se muestra en la figura 3, la RBPC presenta elevaciones y pendientes propias de la planicie tabasqueña, con altitud y pendiente promedio de 1.36 m. s. n. m. y 0.32%, respectivamente (figura 3a y 3b), donde en zonas de manglares y otros lugares de la Reserva existen alturas por debajo de -1.0 m. s. n. m. En cuanto a la geología, esta se encuentra influenciada por el drenaje del sistema fluvial Usumacinta-

Grijalva, caracterizándose por depósitos aluviales y palustres de edad cuaternaria de origen sedimentario y unidades litológicas de aluvial, lacustre, litoral, palustre, arenisca, caliza y lutita (INECC, 2000) (figura 3c). La precipitación en la zona registra valores entre 1500 mm/año a 2500 mm/año (figura 3d). En lo relativo a la tipología de suelos, se tiene predominantemente Histosoles y Gleysoles con alta composición de materia orgánica y arcilla, con alta capacidad de retención de humedad. Asimismo, la degradación de los suelos en la reserva se atribuye a las actividades agrícolas, sobrepastoreo y la urbanización como causas predominantes (figura 3e). Los usos de suelos presentes se agrupan en manglares, comunidades hidrófitas, pastizal, selvas inundables, áreas urbanas y actividades agrícolas (figura 3f).

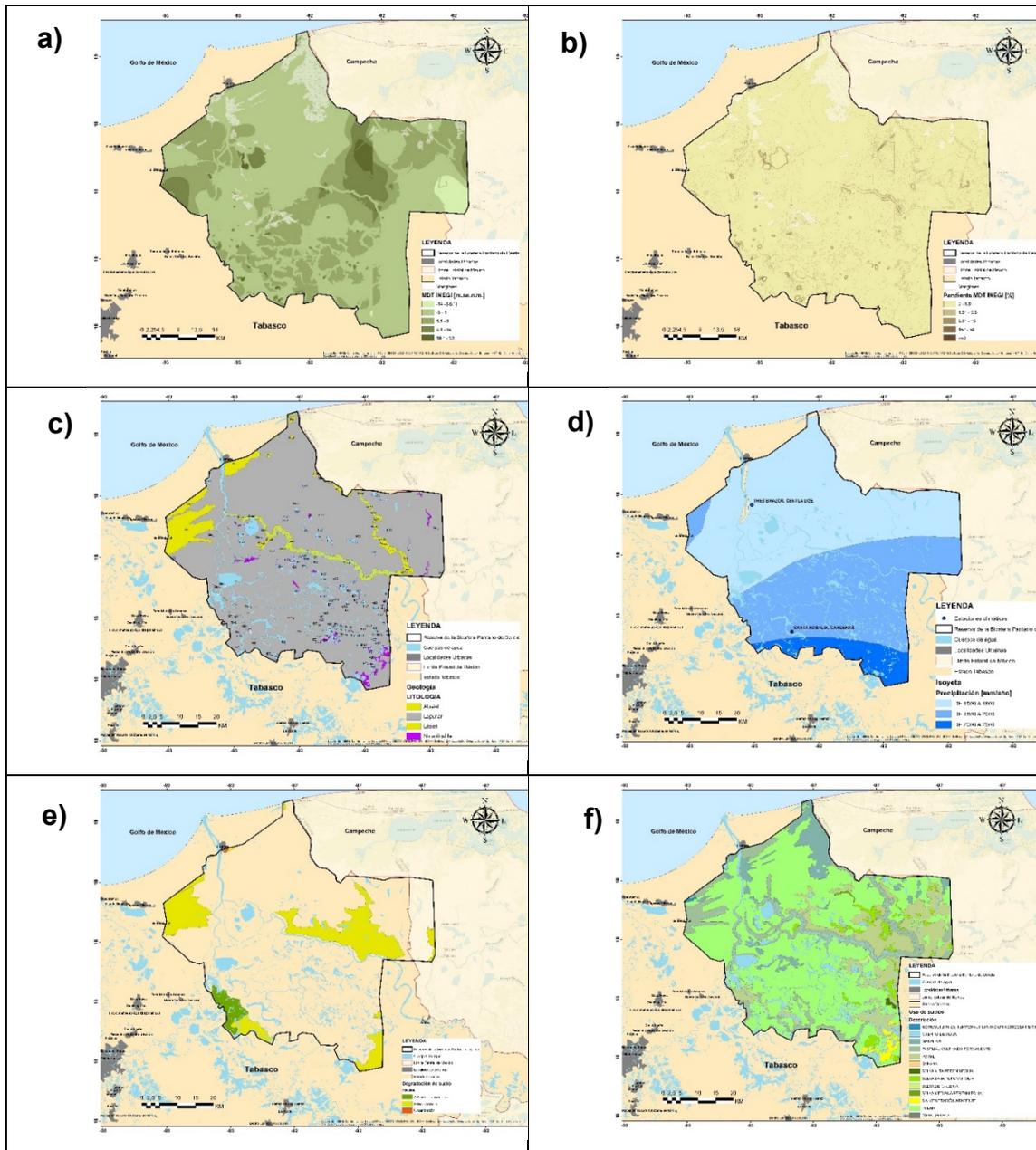


Figura 3. Base de datos cartográfica de la RBPC. a) Modelo digital de terreno; b) Mapa de pendientes; c) Mapa de geología; d) Mapa de isoyetas de precipitación; e) Mapa de degradación de suelos y tipos; f) Mapa de usos de suelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de información espacial de Conabio, Conagua, Conanp, NASA e INEGI.

Hidroclimatología

Respecto a la climatología, la información es muy escasa. En la zona solo existe una estación meteorológica vigente con información: Estación Tres Brazos (coordenadas: 19.6° O, 18.4° N) con mediciones de precipitación y temperatura desde 1948 hasta 2016 (figura 4, 5 y 6). Según los datos de dicha estación, la precipitación media ronda los 1638 mm/año (139.8 mm/mensual), concentrándose entre mayo-octubre, siendo el mes de octubre el mes más lluvioso y abril el más seco. Además, la temperatura media anual alcanza los 26.5 °C, donde las mínimas se registran en entre los meses de diciembre a febrero (siendo enero el mes más frío con temperaturas por debajo de los 18 °C) y la máxima se presenta en el mes de mayo con temperaturas sobre los 33 °C.

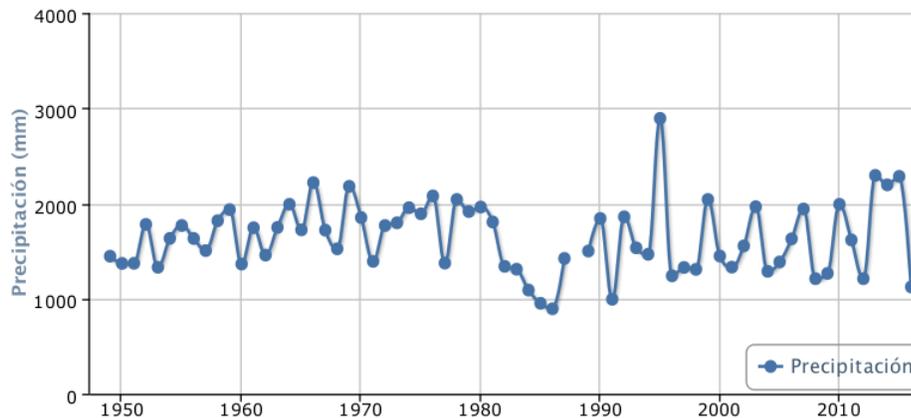


Figura 4. Precipitación media anual en Tres Brazos (1948-2016).

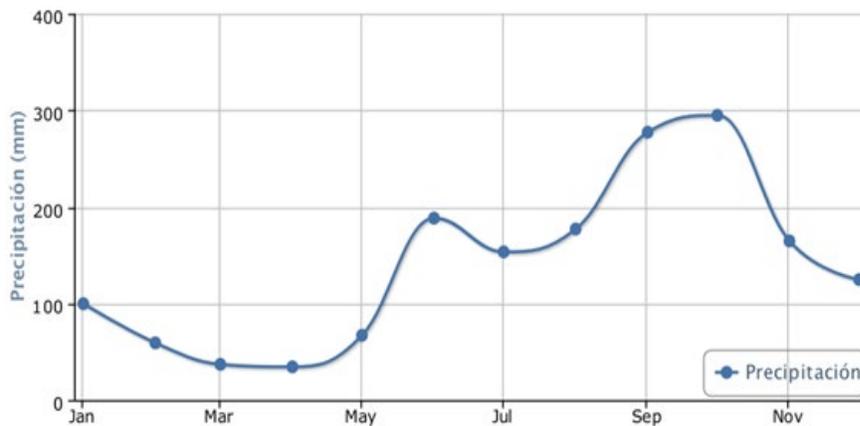


Figura 5. Precipitación media mensual en Tres Brazos (1948-2016).

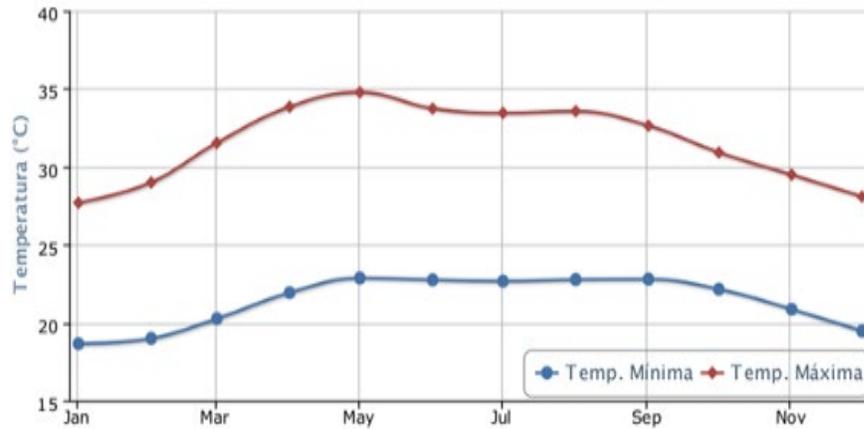


Figura 6. Temperatura mínima y máxima mensual en Tres Brazos (1948-2016).

En cuanto a la hidrometría, también existe muy poca información, siendo esta una situación característica para regiones ubicadas en el trópico (Duncan *et al.*, 2006). Según el Bandas de la Conagua (2020), existe una red de 24 estaciones de hidrométricas para el monitoreo de caudales del principal sistema hidráulico de la reserva: el río Usumacinta y sus afluentes (Palizada, San Pedro y San Pablo). Sin embargo, se ha notado que la mayoría de las estaciones presentan grandes vacíos de información en la base de datos Bandas.

De acuerdo con el estudio de Conagua (2012), los ríos más importantes de la Reserva son el Grijalva, con un volumen anual de 27 013 Mm³, y el Usumacinta, con un volumen anual de 55 832 Mm³, que lo convierte en el más caudaloso de México. En este último se encuentran las estaciones hidrométricas: Macuspana (1956-2014), Boca del Cerro (1949-2014), Salto de Agua y San Pedro con disponibilidad de datos de caudales y niveles de agua. De estas, la estación Macuspana (figura 7) es la más cercana a la zona de estudio y cuenta con un registro de datos de caudales, niveles de agua y volumen de sedimentos en el río Usumacinta desde 1957 hasta 2014, pero con un vacío de información de 20 años (período 1987-2006). De acuerdo con los datos de dicha estación, el caudal promedio anual registrado es de 138.95 m³/segundos, mientras que en otras estaciones cercanas se han registrado caudales medios de 210.15 m³/segundos (Salto de Agua) y 1916.47 m³/segundos (Boca del Cerro).

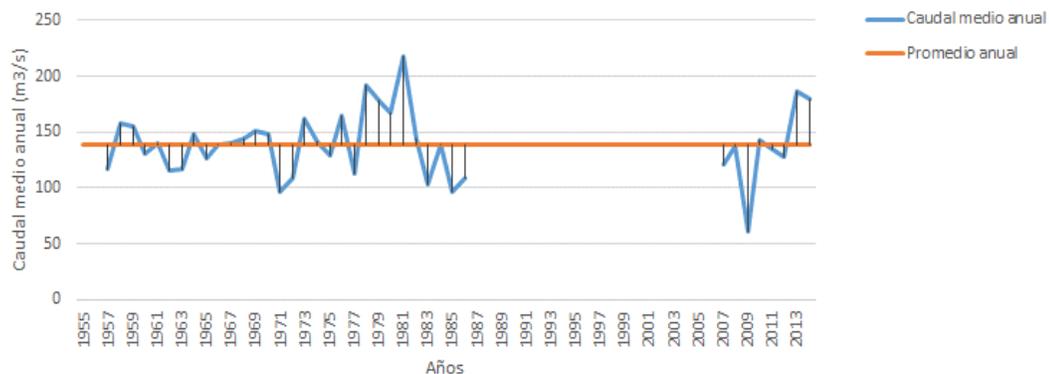


Figura 7. Caudal medio anual de la Estación Macuspana (1957-2014).

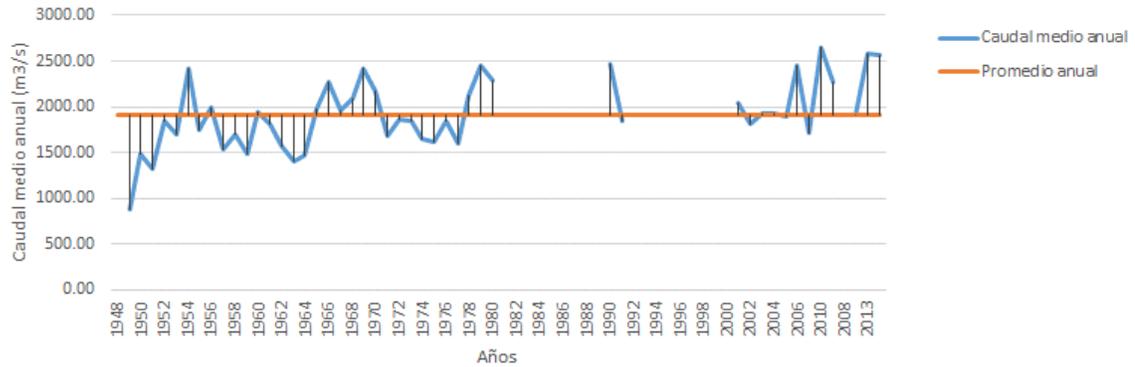


Figura 8. Caudal medio anual de la Estación Boca del Cerro (1948-2014).

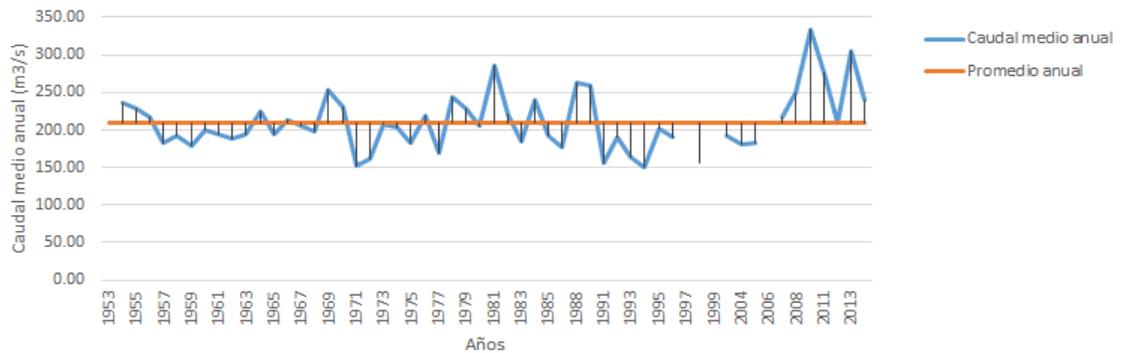


Figura 9. Caudal medio anual de la Estación Salto de Agua (1953-2014).

La configuración hidrológica de la RBPC, con la influencia principal de los ríos Usumacinta y Grijalva, es drenada por distributarios del río Usumacinta como: Palizada, San Pedrito, San Pedro y San Pablo; así como los ríos el Bitzal, el Naranjos y Palomillal, que drenan hacia el río Grijalva (Conagua, 2012). Por ello, la RBPC es considerada por Guerra-Martínez & Ochoa-Gaona (2006) como la red hidrológica más compleja de pantanos, canales, ríos y zonas de inundación de Mesoamérica, de ahí que sea un reto disponer de información hidrológica e hidrométrica completa y de calidad en la reserva. Consecuentemente, si bien se tienen estaciones hidrométricas e hidroclimatológicas en la zona de acción de la RBPC, el monitoreo hidrométrico de los ríos con influencia en la reserva debe robustecerse para disponer de un registro eficiente de los caudales que drenan este ecosistema. Adicionalmente, esta infraestructura se complementaría con las estaciones hidroclimatológicas y piezométricas para una adecuada gestión de este pulmón de la biodiversidad y la reserva de carbono de la región.

Cabe mencionar que la política de agua impulsada en el sureste (infraestructuras) ha producido efectos adversos en la RBPC, por ejemplo, los impactos del complejo de presas de la cuenca del río Grijalva en la dinámica hidrológica de la reserva señalados por Alcérrecas-Huerta *et al.* (2019). Sumado a ello, De la Rosa-Velázquez *et al.* (2017) han reportado importantes perturbaciones al régimen hídrico y alteraciones de los patrones de inundación natural como consecuencia de la construcción de infraestructuras (terraplenes, presas, canales, dragado y ensanchamiento del cauce del río) dentro y fuera de la reserva,

produciendo pérdidas en la vegetación ribereña y cambios en los pulsos de inundación natural de los humedales. Además, frente al aumento de actividades antrópicas, Herrera-Silveira *et al.* (2019) han reportado impactos similares en el área de la reserva.

Adicionalmente, a pesar de que la disponibilidad de agua del sureste es alta, en contraste con las regiones norte y centro del país (Conagua, 2018), la realidad es que se encuentra sometida a presiones antrópicas, como la urbanización, la agricultura, la deforestación y la extracción petrolera, algunas de ellas ya identificadas en distintos estudios (Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; Palomeque *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2015), que amenazan y degradan los ecosistemas presentes en la cuenca baja de los ríos Grijalva y Usumacinta. No obstante, históricamente en la planicie tabasqueña se han reportado procesos intensivos y distintas transformaciones socioambientales que han impactado su territorio severamente (Tudela, 1989; Uribe, 2021), y la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla no es la excepción, dado que la problemática socioambiental en esta área, reportada por Barba-Macias (2014, 2018), presenta síntomas alarmantes. Sin embargo, cabe señalar que Gallardo-Cruz *et al.* (2019) han reportado recientemente que el municipio de Centla es la zona de la cuenca baja del río Usumacinta con menor pérdida de cobertura arbórea durante el periodo 2000 y 2012. Asimismo, representó el municipio con menor registro de conversión de hectáreas tanto de pastizal como de humedal a plantaciones para este periodo.

Sumado a las actividades antrópicas, los fenómenos naturales, como huracanes e inundaciones, se muestran entre los principales impulsores del intenso deterioro de la vegetación nativa dentro de esta reserva en las últimas dos décadas (De la Rosa-Velázquez *et al.*, 2017). En esa línea, la RBPC, al encontrarse en el litoral tabasqueño, se encuentra expuesta a los efectos adversos del cambio climático que, para esta zona, se espera impacten gravemente como consecuencia del incremento del nivel del mar (Núñez *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016). Igualmente, el sureste de México se encuentra altamente expuesto a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (Andrade-Velázquez & Medrano-Pérez, 2020; Valdés-Manzanilla, 2016, 2018).

En tal sentido, factores como pérdida en la estacionalidad hidrológica por el sistema de presa del río Grijalva, la intrusión salina y la erosión costera han sido identificados como variables de impacto en la RBPC (Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019; Núñez *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016). Cabe precisar el dinamismo del retroceso de la costa reportado por Núñez *et al.* (2016) en la zona del delta Grijalva-Usumacinta, debido al efecto conjunto de la entrada de sedimentos, procesos geológicos internos y corrientes marinas, así como por la presencia en la zona de actividades antrópicas, principalmente, la extracción de hidrocarburos (subsistencia). Herrera-Silveira *et al.* (2019) han realizado un diagnóstico similar sobre la problemática socioambiental en la reserva, donde importantes áreas de humedales se han perdido debido a procesos de hundimiento natural que ocurren en el delta Grijalva-Usumacinta.

En este contexto, las perturbaciones y deterioro ambiental que afectan la RBPC se enmarcan en las afectaciones del esquema de desarrollo impulsado en los humedales costeros y las áreas de influencia, no solo de México, sino también del mundo. En este sentido, de acuerdo con Mojica *et al.* (2018), los humedales costeros demandan la construcción de una gobernanza adaptativa, resiliente y participativa que armonice la dinámica ecológica con los intereses económicos predominantes como base para una adecuada conservación y protección de los espacios naturales frente a los efectos adversos del cambio climático. Es un reto tener en cuenta en la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla (RBPC).

Relevancia y alcance de los resultados obtenidos

En primer término, los resultados obtenidos representan un punto de partida para el conocimiento y comprensión de la hidroclimatología y geomorfología de la RBPC, siendo ambos aspectos fundamentales para la toma de decisión en ámbitos como la planificación del territorio, la protección civil, el desarrollo de infraestructuras y la implementación de políticas públicas. En adición a ello, los estudios geomorfológicos permiten abordar la falta de información en una región para comprender las formas, procesos y dinámicas de un sistema para diversas aplicaciones en esos ámbitos (Mora *et al.*, 2016).

En tal sentido, siendo la hidrología una variable clave en los estudios geomorfológicos (Álvarez-Soberano & Medrano-Pérez, 2020), la generación de información en torno a la morfodinámica e hidrología son esenciales para la toma de decisión y conservación de las ANP. Adicionalmente, ambos estudios resultan vitales para la implementación de medidas de adaptación al cambio climático de esta ANP, ya que es necesario contar con información climática para el desarrollo de un sistema de alerta temprana y para la creación de ordenamientos territoriales como estrategia regional, por mencionar algunos (Conanp & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2019). Por tanto, este estudio se presenta como un primer acercamiento en esa dirección.

Dado que los programas de manejo de las ANP son los instrumentos que marcan las estrategias para alcanzar los objetivos de conservación, es de suma importancia incluir líneas de trabajo que abarquen aspectos sobre la medición de variables relevantes para la conservación de la biodiversidad. Debido a ello, se ha propuesto que para la toma de decisiones en tiempo real exista un sistema de información dinámico (Conanp, 2014), y en ese sentido, para la RBPC sería de utilidad incluir variables climatológicas e hidrométricas. Consecuentemente, se pueden crear redes de monitoreo que incluyan aspectos climatológicos, hidrométricos, piezométricos y de calidad del agua, las cuales incluyan la participación de la población local. Dichas redes deben ir acompañadas con un plan de monitoreo que incluya campañas periódicas de aforo, medición de niveles estáticos, batimetría y levantamiento aerofotogramétricos dentro de la reserva.

Ahora bien, en el marco de los resultados obtenidos, se considera relevante que, junto a esta infraestructura de monitoreo, también se construya un sistema de apoyo a la decisión (SAD) como herramienta de apoyo para los tomadores de decisión en la RBPC. Este esquema SAD debe considerar, entre otros aspectos, las variables hidroclimatológicas y geomorfológicas, como la precipitación, temperatura, caudales, uso del suelo, geología y parámetros de calidad de agua. Este tipo de esquemas responden a problemas complejos relacionados con los usos del suelo y los recursos hídricos, y para los cuales se tienen que crear indicadores claves para entender las dinámicas a las que están sometidas los territorios o zonas específicas (Payano *et al.*, 2017). En tal sentido, los resultados obtenidos en la presente caracterización de la RBPC pueden servir de base para el diseño y construcción de un SAD que coadyuve a la gestión y la conservación de esta ANP. Desde esta perspectiva, se propone el esquema base mostrado en la figura 10 para su discusión, diseño y potencial aplicación directa en la RBPC.

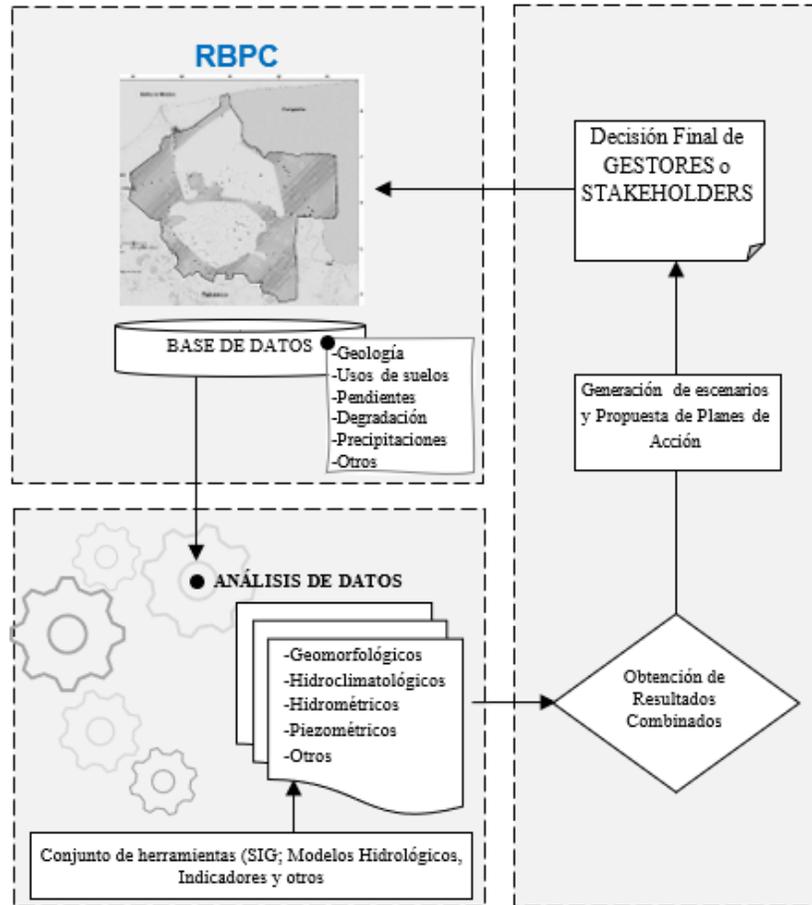


Figura 10. Esquema conceptual simplificado del SAD propuesto para la RBPC.

El esquema general del SAD-RBPC mostrado en la figura 10 parte de una base de datos cartográfica y documental con la capacidad de ser gestionada desde un SIG modificado, modelo hidrológico (por ejemplo, *WEAP: Water Evaluation And Planning System* o Sistema de Evaluación y Planificación del Agua), indicadores (que relacionen los datos geomorfológicas, hidroclimatológicos, hidrométricos, etc.) u otro sistema de gestión que permita la relación de objetos (*Object-Relational*), datos (*Relational Database*) y documentos a través de hojas de cálculos o vinculaciones tecnológicas. Con dicho procesamiento de datos e información se podrán obtener resultados combinados que permitirán generar distintos escenarios de modelación y realizar propuestas de planes de acción a corto, mediano y largo plazo sobre el futuro de la RBPC. Finalmente, los escenarios y planes de acción serán claves para la toma de decisión de los gestores o *stakeholders* sobre la gestión integrada de la Reserva.

Conclusiones

La RBPC posee un comportamiento morfodinámico e hidrológico que puede ser resumido en las siguientes conclusiones mostradas a continuación:

- Un sistema hidráulico con poca capacidad de drenaje, influenciado significativamente por la tipología arcillosa de los suelos de esa zona

- b) La baja pendiente y elevación son factores que igualmente condicionan la respuesta hidráulica-hidrológica de la zona, estando fundamentalmente vinculada a la variabilidad del régimen hidrológico de los cauces activos (ríos Grijalva, Usumacinta, San Pedro y San Pablo, Bitzal y Palizada).
- c) La forma alargada refleja el largo tiempo de recorrido y la capacidad de respuesta a los picos decrecidas para que estos sean menos pronunciados.
- d) El alto tiempo de concentración (39.67 horas) caracteriza una planicie de inundación con drenaje deficiente.
- e) En la zona se encuentra el río Usumacinta que tiene un volumen anual de 55 832 Mm³ (el más caudaloso de México) y que, junto al Grijalva, alimentan hídricamente la RBPC.
- f) Información espaciotemporal insuficiente de los datos hidrometeorológicos de precipitaciones, temperatura y caudales de la Reserva que permita entender el sistema hidrológico e hidráulico de la zona.

De acuerdo al análisis de los datos de la Estación Tres Brazos, la precipitación media anual de la zona ronda los 1638 mm (139.8 mm/mes), la cual se concentra entre los meses de mayo y octubre, siendo el mes de octubre el mes más lluvioso y abril el más seco. Mientras que la temperatura media anual alcanza los 26.5 °C, con máximas sobre los 30 °C y mínimas que pueden llegar bajo los 18 °C.

Asimismo, se presenta como impostergable contar con una red de monitoreo operativa en tiempo y espacio que permita generar datos e información en tiempo real con la tecnología adecuada en cada lugar estratégico de la reserva, es decir, un sistema de medición autónomo, que incorpore e integre estaciones hidrométricas, hidrológicas y piezométricas, junto a la medición de la calidad del agua, dando paso a los procesos de gestión y toma de decisiones en la reserva. Junto a ello, frente a las amenazas por las actividades antrópicas, es necesario impulsar una actualización participativa (academia, sociedad, gobierno) del programa de manejo existente que favorezca la toma de decisiones en esta ANP.

Desde esta perspectiva, tomando como base los resultados de este trabajo, se considera necesario, para un mayor detalle de la superficie y conocimiento geohidrológico de la RBPC, la obtención de un modelo digital del terreno (MDT) a partir de datos LIDAR (*Light Detection And Ranging*) que genere mediciones exactas y una muestra densa de la superficie de la reserva. En adición a ello, se propone para investigación futura el diseño de un sistema SAD para la gestión eficiente de la RBPC. Ante ello, y las amenazas que prevalecen en RBPC, el crecimiento y desarrollo en esta zona deben ir de la mano de una gestión sustentable y equitativa que promueva el bienestar social y la conservación. Por lo tanto, este trabajo es una contribución en esa dirección.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A. C. (CCGS) por las facilidades durante la realización de esta investigación. Además de expresar su agradecimiento a los revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones en la mejora de esta investigación. ORMP también desea agradecer al programa Cátedra CONACYT y al proyecto Cátedras-CCGS no. 963 "Hacia un manejo sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica".

Conflictos de intereses

Los autores desean declarar que no tienen ningún conflicto de interés.

Referencias

- Alcérreca-Huerta, J. C., Callejas-Jiménez, M. E., Carrillo, L., & Castillo, M. M. (2019). Dam implications on salt-water intrusion and land use within a tropical estuarine environment of the Gulf of Mexico. *Science of The Total Environment*, 652, 1102-1112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.288>
- Álvarez-Soberano, A., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Caracterización geomorfológica de la subcuenca río Mezcalapa, región hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30) en sureste de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 80(2020), 32-44. doi: <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020803002>
- Andrade-Velázquez, M., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Revista Bio Ciencias*, 7, (2020), 1-22. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>
- Barba-Macías, E., Mendoza-Carranza, M., Trinidad-Ocaña, C., Juárez-Flores, J., & Martínez, M. L. (2017). *Contrastes en el manejo del cangrejo azul y el pez diablo: Perspectiva de los pobladores de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco*. ECOSUR.
- Barba-Macías, E., Mesa-Jurado, M. A., Espinoza-Tenorio, A., & Ortega-Argueta, A. (2018). Biodiversity conservation in the Pantanos de Centla Biosphere Reserve: Ecological and socioeconomic threats. In A. Ortega-Rubio (Ed.), *Mexican Natural Resources Management and Biodiversity Conservation: Recent Case Studies* (pp. 455-477). Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90584-6_20
- Barba-Macías, E., Rangel-Mendoza, J., & Ramos-Reyes, R. (2006). Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica. *Universidad y Ciencia*, 22(2), 101-110. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15422201>
- Barba-Macías, E., Valadez, F., Pinkus, M. A., & Pinkus, M. J. (2014). Revisión de la problemática socioambiental de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 50-57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67431160006>
- Barba-Macías, E., Valadez-Cruz, F., Pinkus-Rendón, M., Pinkus-Rendón, M. J., & Juárez-Flores, J. (2015). Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla: Aspectos socioambientales prioritarios. En A. O. Rubio, M. J. Pinkus & I. C. Espitia (Eds.), *Las áreas naturales protegidas y la investigación científica en México* (pp. 395-410). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C., Universidad Autónoma de Yucatán y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Bocco, G., & Palacio-Prieto, J. L. (2014). La contribución de la investigación geomorfológica en la cuestión ambiental en México. *Investigaciones Geográficas*, (83), 6-27. doi: <https://doi.org/10.14350/riig.34421>
- Climate Computer Project (Clicom). (2020). *Datos climáticos diarios*. <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). (2019). *Portal de información técnica*. <https://hidrocarburos.gob.mx/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2014). *Estrategia hacia 2040, una orientación para la conservación de las áreas naturales protegidas de México*. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/estrategia-2040-una-orientacion-para-la-conservacion-de-las-areas-naturales-protegidas-de-mexico>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Conanp-PNUD). (2019). *Resumen Ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático del Complejo de las ANP Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla - Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos*. <https://www.conanp.gob.mx/cambioclimatico/PACC-Centla-LagunaTerminos.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2012). *Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT) – Acciones Complementarias 2012*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/plan-hidrico-integral-de-tabasco-phit-acciones-complementarias-2012>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2018). *Atlas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM_2018.pdf

- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2020). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales* (Bandas). ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2020). *Portal de geoinformación 2020. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/#:~:text=Geoinformaci%C3%B3n%2C%20es%20un%20portal%20de,c%C3%B3digo%20abierto%20\(open%20source\)](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/#:~:text=Geoinformaci%C3%B3n%2C%20es%20un%20portal%20de,c%C3%B3digo%20abierto%20(open%20source))
- Cruz-Cruz, J. L. (2008). *Problemática del manejo de los recursos principales de extracción y recolección de los pobladores residentes en la Reserva de la Biosfera "Pantanos de Centla"* (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- De la Rosa-Velázquez, M. I., Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M. Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R., & Espejel, I. (2017). Development stressors are stronger than protected area management: A case of the Pantanos de Centla biosphere reserve, Mexico. *Land Use Policy*, 67, 340–351. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.009>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (06 de agosto de 1992). *DECRETO por el que se declara como área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la zona conocida como Pantanos de Centla, con una superficie de 302,706-62-50 hectáreas, ubicadas en los Municipios de Centla, Jonuta y Macuspana, Tabasco*. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4680287&fecha=06/08/1992
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (30 de diciembre de 2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. *Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Duncan, J., Ramírez-Marcial, N., & Levy, S. I. (2006). Correlations between precipitation patterns in southern Mexico and the el Niño sea surface temperature index. *Interciencia*, 31(2), 80-86. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000200002&lng=es&tlng=en
- Fueyo-Mac Donald, L., & Pliego-Moreno V. (2015). Requerimientos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas a los investigadores de México para el adecuado manejo de las Áreas Naturales Protegidas. En A. Ortega-Rubio, M. J. Pinkus-Rendón & I. C. Espitia-Moreno (Eds.), *Las Áreas Naturales Protegidas y la Investigación Científica en México* (pp. 537-570). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. Universidad Autónoma de Yucatán y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gallardo-Cruz, A., Fernández-Montes de Oca, A., & Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2), 82-99. doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>
- García, E., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (1998). *Conjunto de datos vectoriales Clima. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_htpccache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Guerra-Martínez, V., & Ochoa-Gaona, S. (2006). Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones geográficas*, (59), 7-25. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112006000100002&lng=es&tlng=es
- Guerra-Martínez, V., & Ochoa-Gaona, S. (2008). Evaluación del programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla en Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 24(2), 135-146. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792008000200006&lng=es&tlng=es
- Herrera-Silveira, J. A., Lara-Domínguez, A. L., Yáñez-Arancibia, A., Morales, S., Hernández, C. T., & Kemp, G. P. (2019). Ecosystem functioning and sustainable management in coastal systems with high freshwater input in the southern Gulf of Mexico and Yucatan Peninsula. *Coasts and Estuaries*, 377–397. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814003-1.00022-8>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2000). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. <http://www.paot.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN30.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro, México. Estudio contratado a: José De Jesús Alfonso Fuentes Junco*. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/morfometria_pico_tancitaro.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). (CEM 3.0)*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Jiménez-Ramírez, R. (2013). *Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfoedológico* (Tesis de Maestría en Ciencias). Colegio de Postgraduados.
- Mata-Zayas, E. E., Gama, L., Vázquez-Navarrete, C., Díaz-López, H., Figueroa-Maheng, J. M., & Rincón-Ramírez, J. (2017). Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos en la zona de influencia costera de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, ante la elevación de nivel medio del mar, asociada al cambio climático. En A. V. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez & J. L. Rojas-Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático* (pp. 192-230). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma de Campeche.
- Mendelsohn, I. A., Byrnes, M. R., Kneib, R. T., & Vittor, B. A. (2017). Coastal Habitats of the Gulf of Mexico. In C. H. Ward (Ed.), *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon oil spill: Volume 1: Water Quality, Sediments, Sediment Contaminants, Oil and Gas Seeps, Coastal Habitats, Offshore Plankton and Benthos, and Shellfish* (pp. 359-640). Springer New York. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_6
- Mojica, J. M., Barrasa, S., & Espinoza, A. (2018). Policies in coastal wetlands: Key challenges. *Environmental Science & Policy*, 88, 72-82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.016>
- Mora, L., Bonifaz, R., & López-Martínez, R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 377-394. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222016000300377&script=sci_arttext
- Novelo-Retana, A. (2006). *Plantas acuáticas de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Espacios Naturales y Desarrollo Sustentable.
- Núñez, J. C., Ramos, R., Barba, E., Espinoza, A., & Gama, L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geográficas*, (91), 70-85. doi: <https://dx.doi.org/10.14350/ig.50172>
- Ochoa-Gaona, S., Ramos-Ventura, L. J., Moreno-Sandoval, F., Jiménez-Pérez, N. C., Haas-Ek, M. A., & Muñiz-Delgado, L. E. (2018). Diversidad de flora acuática y ribereña en la cuenca del río Usumacinta, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 89, 3-44. doi: <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2395>
- Ortega-Rubio, A., Jiménez-Sierra, C., Jiménez-Badillo, L., Pinkus-Rendón, M. J., Arriola-Padilla, V. J., Sosa-Ramírez, J., Valadez-Cruz, F., Rodríguez-Quiroz, G., Barba-Macías, E., Espitia-Moreno, C., Cortés-Calva, P., Solís-Cámara, A. B., Iñiguez-Dávalos, L. L., González-Ocampo, H. A., & Pinkus-Rendón, M. A. (2015). Prioridades de investigación para las Áreas Naturales Protegidas de México. En A. Ortega, M. Pinkus & I. Espitia (Eds.), *Las áreas naturales protegidas y la investigación científica en México* (pp. 493-512). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C., Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Palma-López, D. J., Jiménez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi, F., & Palma-Cancino, D. Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agro Productividad*, 10(12), 29-35. <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/33>
- Palomeque, M. A., Galindo, A., Sánchez, A. J., & Escalona, M. J. (2017). Pérdida de humedales y vegetación por urbanización en la cuenca del río Grijalva, México. *Investigaciones Geográficas*, (68), 151-172. doi: <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.09>
- Payano, R., Pascual-Aguilar, J. A., & Bustamante, I. (2017). Criterios para la incorporación de la información sobre usos del suelo en un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones sobre Patrimonio Hidráulico. En J. A. Pascual-Aguilar, J. Sanz & I. de Bustamante (Eds.), *Nuevas perspectivas de la Geomática aplicadas al estudio de los paisajes y el patrimonio hidráulico* (pp. 1-21). Centro para el Conocimiento del Paisaje, CIVILSCAPE e Instituto IMDEA Agua.
- Puc-Carrasco, G., Olivera-Gómez, L. D., Arriaga-Hernández, S., & Jiménez-Domínguez, D. (2016). Relative abundance of Antillean manatees in the Pantanos de Centla Biosphere Reserve in the coastal plain of Tabasco, Mexico. *Ciencias Marinas*, 42(4), 261-270. doi: <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v42i4.2678>
- Ramos, R., Zavala-Cruz, J., Gama, L. M., Pech, D., & Ortiz, M. A. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581-598. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222016000300581&lng=es&tlng=es

- Sánchez, A. J., Salcedo, M. A., Florido, R., Mendoza, J. D., Ruiz-Carrera, V., & Álvarez-Pliego, N. (2015). Ciclos de inundación y conservación de servicios ambientales en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *ContactoS*, 97, 5-14. <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/revista/97/pdfs/inundacion.pdf>
- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). (2019). *Earthdata*. <https://earthdata.nasa.gov/>
- Tudela, F. (1989). *La modernización forzada del trópico: El caso de tabasco, proyecto integrado del golfo*. Colegio de México.
- Uribe, R. (09 de enero de 2021). *La destrucción del trópico*. La Jornada. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/01/09/politica/ojarasca-la-destruccion-del-tropico/>
- Valdés-Manzanilla, A. (2016). Historical floods in Tabasco and Chiapas during sixteenth–twentieth centuries. *Natural Hazards*, 80, 1563-1577. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2039-5>
- Valdés-Manzanilla, A. (2018). Effect of climatic oscillations on flood occurrence on Papaloapan River, México, during the 1550--2000 period. *Natural Hazards*, 94, 167–180. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3379-8>
- Zapata, R., Urzúa, M., Hernández, R., Rodríguez, A., Leal, J., Montiel, M., O'Farrill, J. P., Rivas, J. C., Baraqui, J., Menocal, E., & Camazón, D. (2011). Tabasco: Características e impacto socioeconómico de las lluvias extremas de 2008. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/26048/1/S2011020_es.pdf