



Caracterización de las componentes del balance hídrico en sistemas lagunares

Characterization of water balance components in lagoon systems

Sara Geraldine Ortiz Cruz ¹ ✉, Mario Alberto Hernández Hernández ²

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México; Circuito de la Investigación Científica 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México.

² Instituto de Geofísica, Departamento de Recursos Naturales, Universidad Nacional Autónoma de México; Circuito de la Investigación Científica 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México.

Resumen

Los sistemas lagunares suelen tener una amplia variabilidad dinámica dependiendo de las épocas de estiaje, nortes y monzón tropical. El presente trabajo propone identificar y caracterizar al sistema lagunar Chaschoc-Sejá desde una perspectiva hidrogeológica para aproximarse a su gestión sostenible mediante el manejo de herramientas de hidrometría, meteorología y percepción remota. Los resultados sugieren que, por año hidrológico, se presenta un patrón similar y congruente entre periodos estacionales y superficies de inundación, a su vez, un balance hídrico negativo en 7 de 12 meses. El análisis del balance hídrico permitió evaluar la dinámica estacional y, a largo plazo, del funcionamiento hídrico del sistema.

Palabras clave: IDW, método Thornthwaite, SMN, SWOT, sistema lagunar

Abstract

Lagoon systems usually have a wide dynamic variability depending on the dry seasons, northern seasons and tropical monsoon. This paper aims to characterize the Chaschoc-Sejá lagoon system's hydrogeology for sustainable management using hydrometry, meteorology, and remote sensing. The results suggest that, by hydrological year, there is a similar and congruent pattern between seasonal periods and flood surfaces, in turn, a negative water balance in 7 out of 12 months. The analysis of the water balance made it possible to evaluate the seasonal and, in the long term, dynamics of the system's water functioning.

Keywords: IDW, lagoon system, SMN, SWOT, Thornthwaite method

Introducción

Los sistemas lagunares son ecosistemas acuáticos que desempeñan un papel crucial en la biodiversidad y en los procesos ecológicos, en ellos, los parámetros fisicoquímicos están íntimamente relacionados con la temporada de nortes (lluvias) y de estiaje, así como regímenes de clima, aportes fluviales de ríos y escurrimientos que en ellos desembocan (IMIPAS, 2013). Para identificar su dinámica y caracterizarlos desde una perspectiva hidrogeológica, se utilizan herramientas y productos satelitales tales como los generados por la misión Surface Water and Ocean Topography (SWOT), el cual fue puesto en órbita el 16 de diciembre de 2022 desde la base de la Fuerza Espacial de EUA en Vandenberg, California. Al considerarse que un mejor entendimiento y monitoreo de los procesos hidrológicos es necesario (Fu *et al.*, 2012), consiste en el primer satélite desarrollado para realizar el primer estudio global de aguas superficiales y continentales de la Tierra, al recopilar mediciones detalladas de cómo los

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 4 de mayo de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

Sara Geraldine Ortiz Cruz

gesortc18@gmail.com

Como citar

Ortiz Cruz SG, Hernández Hernández MA (2026). Caracterización de las componentes del balance hídrico en sistemas lagunares. *Ciencia Nicolaita* 97:234-241. doi:10.35830/cn.vi97.967

cuerpos de agua oceánicas y continentales cambian con el tiempo. Para realizar dicho análisis, la misión satelital es capaz de registrar parámetros como: elevación, pendiente, ancho, área, altura de la superficie de cuerpos de agua en la superficie terrestre y el océano, entre otras. Inspecciona al menos un 90% de la Tierra, estudiando lagos, ríos, embalses y océanos una vez cada 21 días a una resolución espacial de 15 km, mejorando modelos de circulación oceánica y predicciones meteorológicas y climáticas, así como para ayudar en la gestión de agua del mundo (JPL, 2018). A su

vez y con el fin de complementar, rectificar y establecer las bases para realizar estudios integrales de los sistemas lagunares que deriven en la obtención de un balance hídrico del sistema respecto otros, se consultaron bases de datos climáticos nacionales e internacionales, como Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas (CHELSA), respectivamente. CHELSA es un conjunto de datos climáticos globales reducidos, a muy alta resolución, basados en datos de reanálisis global, alojados por el Instituto Federal Suizo de investigación Forestal, de la Nieve y del Paisaje (CHELSA Climate, 2025). El SMN es un organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país (SMN, 2025).

El Sistema lagunar Chaschoc-Sejá (SLCS) se encuentra en la subcuenca Usumacinta de la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH30) en el sureste de México (Castillo-Cruz y Medrano-Pérez, 2014), es un ecosistema acuático perenne considerado como humedal delimitado por entradas y salidas de cuerpos de agua comunicados al Río Usumacinta y cuerpos de agua conectados hidrológicamente, así como rasgos o barreras físicas que limitan la conexión superficial (Mendoza-Palacios, 2015), abarcando 23,921 ha. Presenta una variación intra-anual en caudal que fluctúa entre flujo bajo y alto de 746 a 4485 m³/s (Cruz-Ramírez, 2019), una temperatura mínima y máxima

de 15 y 42 °C, respectivamente y una precipitación media anual de 2,679 mm con valores máximos de inundación en septiembre, octubre y noviembre. Asimismo, Mendoza-Palacios (2015) reportó un balance hídrico negativo en ocho de doce meses, siendo positivo en agosto, octubre y noviembre de 2013 y mayo de 2014. Se estima que para finales del siglo XXI la precipitación anual de la zona no presentará cambios en ningún horizonte de tiempo o escenario, pero la temperatura experimentará un aumento de 1.7 a 2.6 °C (Aceves Navarro, 2017).

Materiales y métodos

La metodología empleada consta de cuatro puntos clave y se describe en el diagrama de flujo de la **Figura 1**.

Zona de estudio

El Sistema Lagunar Chaschoc-Sejá se localiza en una superficie de inundación activa bordeada por el río Usumacinta desde el sur hasta el noroeste (Mendoza-Palacios, 2015), abarca una superficie de 239.21 km² y se ubica en los municipios de Emiliano Zapata (en mayor proporción) y Balancán, Tabasco. Geográficamente se localiza entre los 17°42'55.20" y 17°57'30.50" latitud Norte (1959102.1013 y 1986138.2488 UTM, Z15) y 91°47'33.42" y 91°36'51.57" longitud Oeste (628028.0526 y 646737.1488 UTM, Z15).

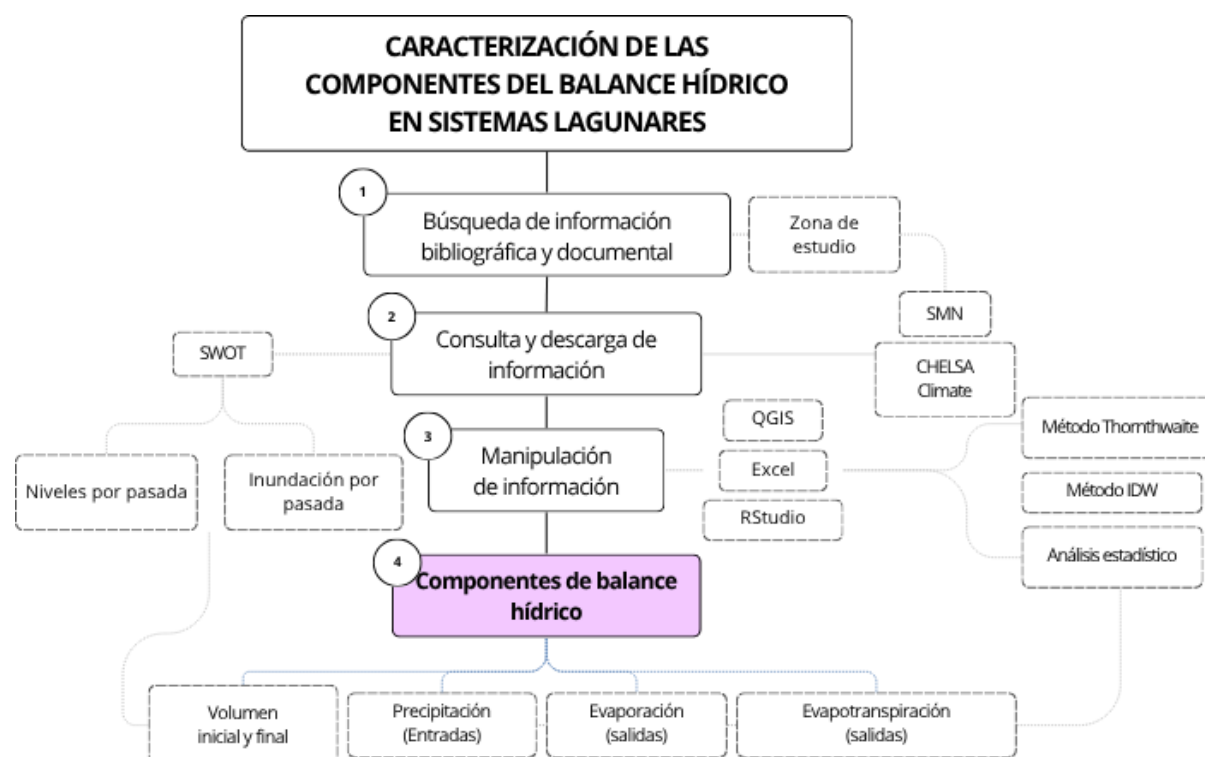


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

Las principales lagunas de interés (**Figura 2**) dentro del sistema lagunar son: laguna Chaschoc (3.89 km², localizada al sur) y laguna Sejá (2.59 km², localizada al centro) conectada a la laguna Chaschoc. La superficie total de cuerpos de agua es de 6.48 km², proporcional al 4.34% de la superficie total del Sistema Lagunar (INEGI, 2023).

Percepción remota

Para definir la evolución de los cambios en la superficie inundada del SLCS, de 250×250 m² de superficie de masa de agua cartografiada por pasada (cada 21 días) de la misión satelital Surface Water Ocean Topography (SWOT, 2018), mediante el uso del software QGIS se extrajeron y manipularon datos en formato vectorial de la clasificación generada. Se extrajo información de variables de interés como área total (AT, en km²) y elevación de la superficie del agua (WSE, en m).

Con el objetivo de obtener un valor de la superficie inundada más puntual (asociado a los polígonos definidos por INEGI como lagunas perennes en la zona), los polígonos de inundación generados por SWOT se acotaron a la geoforma de las lagunas de INEGI, incluyendo una zona buffer (hasta la cual se consideró podría fluctuar el nivel

del agua). Al haber más de un polígono por geoforma, se disolvieron las formas, se recalcularon áreas y se generaron centroides, mientras que las WSE se promediaron para asignarlas como elevación media del espejo del agua en la ubicación de los centroides. Con el apoyo de un Modelo Digital de Elevación (DEM) se obtuvieron las elevaciones del terreno (fondo de las lagunas), que al restarlas de la WSE dan una diferencia de elevaciones que, para fines de cálculo de volúmenes de las lagunas, es considerada como la profundidad media del cuerpo de agua:

$$P = WSE - E_T \quad (1)$$

la elevación del terreno (E_T) se da en metros para obtener una profundidad (P) en las mismas unidades.

Una vez obtenido el valor de la profundidad, se estima el volumen de agua contenido en la geoforma, multiplicándola por el área extraída y se visualiza su pérdida y/o ganancia a través del tiempo.

$$V = A_T \cdot P \quad (2)$$

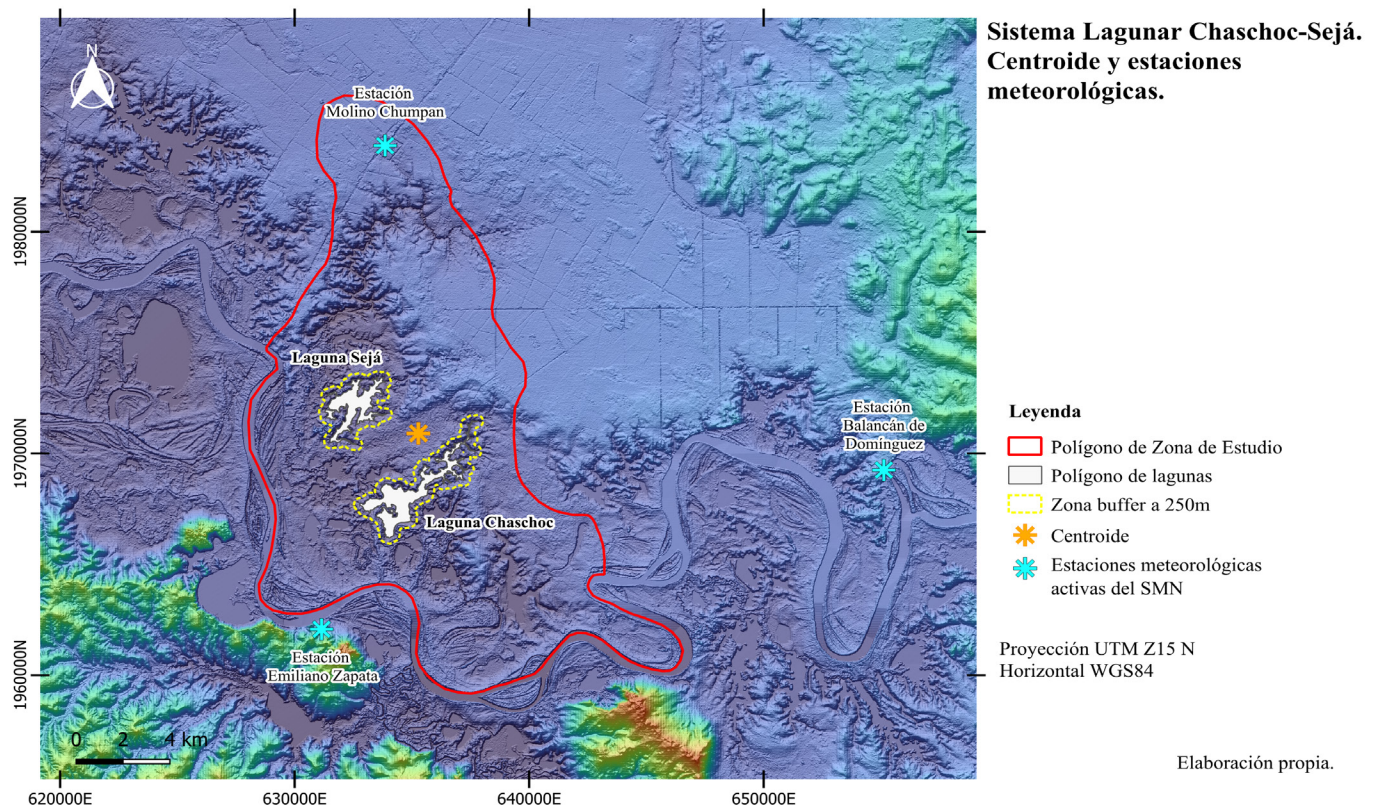


Figura 2. Zona de estudio: Sistema lagunar Chaschoc-Sejá, centroide y estaciones meteorológicas.

el área total (A_T) se expresa en metros cuadrados para obtener un volumen (V) en metros cúbicos.

Análisis de variables climáticas

Para el análisis, cálculo y traslado de variables climáticas, se extrajeron los valores medios mensuales de variables como precipitación (Pr), evaporación (Ev) y temperatura media (Tm) de diferentes estaciones climatológicas activas del Portal de Información Estadística Climatológica del SMN para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. Para un primer análisis del comportamiento de las variables a través del tiempo se revisó la consistencia y homogeneidad de las series históricas; de esta forma, a través del Método Thornthwaite, se calculó la evapotranspiración de la zona de estudio:

$$ETP = 16ka \left(\frac{10t}{I} \right)^\alpha \quad (3)$$

donde ka es una constante de ajuste respecto latitud obtenida de tablas, t la temperatura media mensual, I un índice de calor anual obtenido de la sumatoria de los índices de calor mensuales (i) y α una constante de calor.

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (4)$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (5)$$

$$\alpha = 6.75 \times 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \cdot I^2 + 0.017925 \cdot I + 0.49239 \quad (6)$$

Se estableció un centroide dentro la zona de estudio, al cual, a través de la fórmula de distancias euclidianas al cuadrado (IDW) se trasladaron los datos de las variables de las estaciones para estimar sus medias mensuales:

$$X = \frac{X_1 \frac{1}{d_{01}^2} + X_2 \frac{1}{d_{02}^2} + \dots + X_n \frac{1}{d_{0n}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_0^2}} \quad (7)$$

X representa el dato de la variable a rellenar, X_n el valor de la variable a trasladar de la estación n , $1/d_{0n}^2$ la distancia euclidiana inversa al cuadrado de la estación n .

A su vez, para complementar los datos de tierra de Pr y Tm , se extrajeron los datos históricos de la base de datos de CHELSA Climate, 2025 para los mismos años (2000, 2005, 2010, 2015 y 2020) los cuales fueron recortados a la zona de estudio en formato ráster en el software QGIS, se realizó una normalización para los datos de precipitación y una conversión de K a $^{\circ}C$ para los de temperatura, finalmente, se sometieron a un análisis estadístico básico que rectificó su consistencia con los datos observacionales de la zona.

$$Pr = \frac{Pr}{100} \quad (8)$$

$$Tm(^{\circ}C) = \frac{K}{10} - 273.15 \quad (9)$$

Balance hídrico

La fórmula de balance hídrico utilizada se fundamenta en el principio de conservación de masa, estableciendo que el cambio de volumen en el almacenamiento (ΔV_{alm}) de un sistema se obtiene de la diferencia entre el volumen de agua que entra V_E y sale V_S en un tiempo determinado (Campos Aranda, 1988). De esta forma tenemos que:

$$V_E - V_S = \Delta V_{alm} \quad (10)$$

Al sustituir las variables consideradas Pr , Ev y ETP nuestra fórmula final quedó como:

$$Pr - (Ev + ETP) = \Delta V_{alm} \quad (11)$$

Resultados

Percepción remota

El procesamiento de los productos extraídos de SWOT evidenciaron el cambio en la superficie de inundación que experimenta el SLCS a través del tiempo, así como entre lagunas dentro de los años hidrológicos establecidos (julio-junio).

Se hace visible que los periodos estacionales y superficies de inundación entre un año hidrológico y otro pueden presentar o no la misma tendencia de inundación (**Figura 3 y 4**). En temporada de nortes, la laguna Chaschoc presenta la misma superficie de inundación (2.3 km^2), mientras que en la laguna Sejá incrementa un 140% (1.4

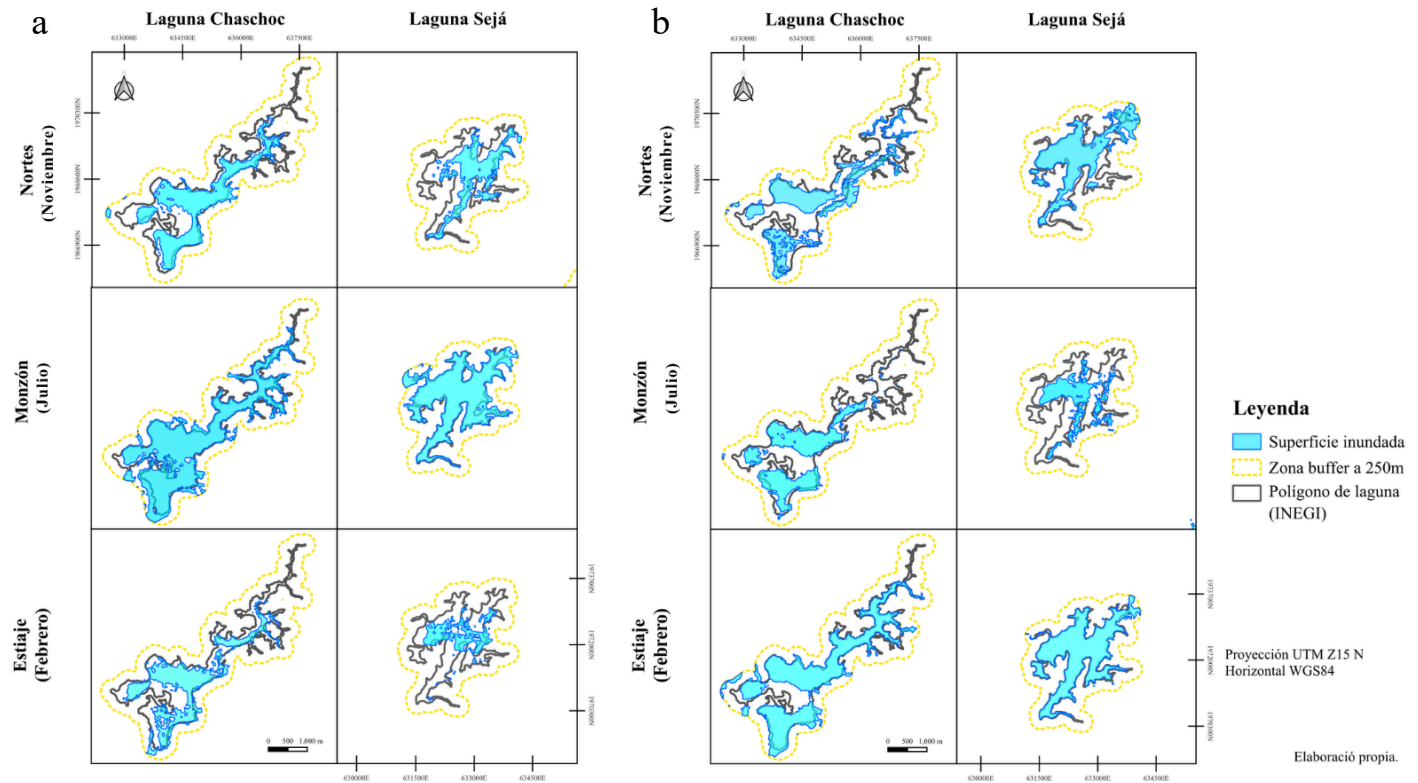


Figura 3. Comparación entre lagunas en temporada de nortes, monzón y estiaje. **a)** Periodos estacionales del año hidrológico 1 (julio 2023- junio 2024). **b)** Periodos estacionales del año hidrológico 2 (julio 2024- junio 2025).

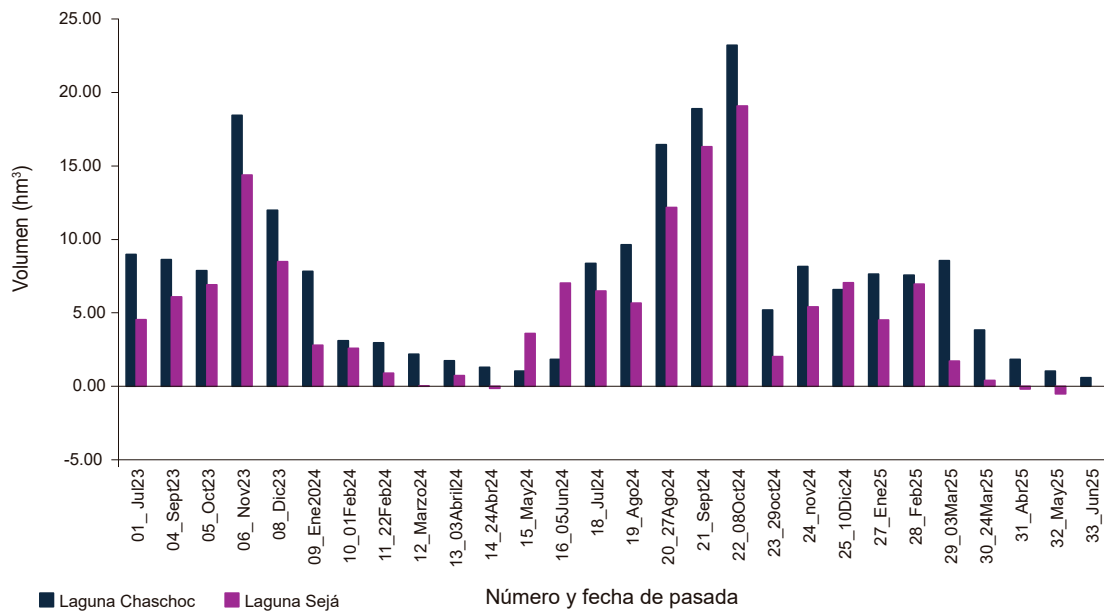


Figura 4. Volumen de agua de las Lagunas Chaschoc y Sejá en un periodo de monitoreo de julio de 2023 a junio de 2025.

km² a 2 km²), en temporada de estiaje incrementa (2 km² a 3.5 km²) un 150% en la laguna Chaschoc y un 350% (0.75 km² a 2.65 km²) en la laguna Sejá y en monzón disminuye un 50% (4.3 km² a 2 km²) en la laguna Chaschoc y un 60% (2.7 km² a 1 km²) en la laguna Sejá.

Las variables área total y profundidad presenta una misma tendencia y comportamiento de incremento (octubre-noviembre) y decremento (abril-mayo) en las mismas temporadas del año (**Figura 5**).

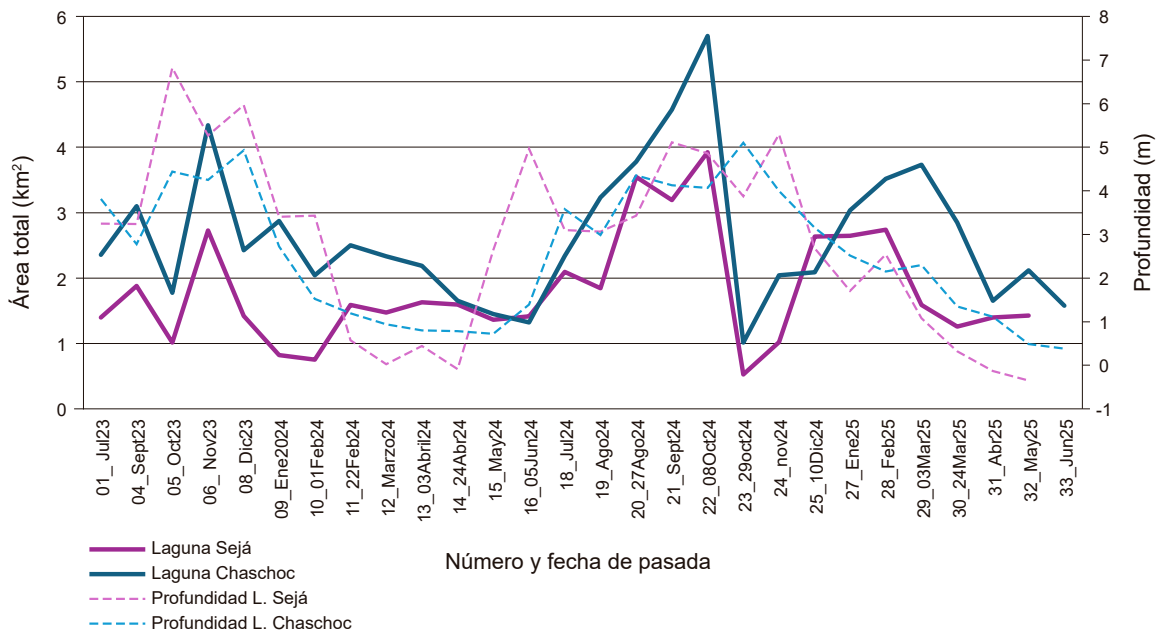


Figura 5. Visualización de concordancia entre área total y profundidades registradas de las lagunas Chaschoc y Sejá, en el periodo de julio 2023 a junio 2025.

Análisis de variables climáticas

Se obtuvieron los promedios de las variables extraídas de tres estaciones del SMN para visualizar consistencia y congruencia las unas con otras, así como de la ETP calculada y los datos trasladados al centroide.

Los datos de *Pr* extraídos de CHELSA Climate presentan concordancia respecto los datos del SMN, la estación de Molino Chumpan es la única que mayormente difiere de los valores dados por el pixel asociado. Respecto a *Tm*, los valores difieren de 0.5 a 1.5 °C (Tabla 1).

Balance hidrológico

Se estableció un modelo para la obtención de los componentes del balance hidrológico que señala entradas (precipitación) y salidas (evaporación y evapotranspiración).

Los años 2000, 2005 y 2010 presentan un balance negativo en 8 de 12 meses, mientras que los años 2015 y 2020 un balance negativo en 7 de 12 meses (Tabla 2).

Discusión

Los periodos estacionales (nortes, estiaje y monzón) no han presentado cambios abruptos a través del tiempo, su

periodicidad se manifiesta bajo las mismas tendencias climáticas de crecimiento y decaimiento, emparejándose, a su vez, con la disponibilidad de agua dentro de los cuerpos estudiados. A su vez, repositorios de datos como CHELSA Climate que deberían de presentar una alta similitud en sus variables respecto los del SMN debido a que se alimenta de dichas bases, no logran empatarlas debido a: 1) una sobreestimación de variables ocasionada por la sobrealimentación de diversos productos satelitales que experimenta y 2) un déficit cuantitativo y cualitativo en los datos de origen local que la alimentan, pese a ello, Tsiftsis *et al.* (2024), consideran que sus predicciones climáticas actuales son aceptables y no sobreestima valores, respecto otras bases. El rango de variación se hace notorio al manejar datos de un año o mes en particular (originando una correlación muy baja), pero de cuantos más se disponga, existe una compensación que hace que los valores se empaten considerablemente (la correlación se podría aproximar a 1).

La extracción de variables de productos satelitales como SWOT permiten una comparación entre periodos actuales e históricos de información ya que representan el conjunto de estos al hacer visible y resaltar los diferentes periodos estacionales que se pueden llegar a considerar

Tabla 1. Comparación de datos de precipitación y temperatura, CHELSA Climate vs SMN.

	Balancán de Domínguez	Pixel 476	Emiliano Zapata	Pixel 645	Molino Chumpan	Pixel 4	Centroide	Pixel 398
Pr (mm)	153.86	156.02	163.05	158.94	119.8	156.10	152.9	156.24
T (°C)	27.2	27.7	27.2	27.7	26.3	27.8	26.2	27.7

Tabla 2. Balance hídrico mensual (mm) obtenido para los años seleccionados a través de la fórmula establecida.

Mes/Año	2000	2005	2010	2015	2020
Ene	-95.06	-124.00	-108.58	-13.41	-102.72
Feb	-104.07	-142.65	-126.05	-122.00	-100.90
Mar	-154.60	-143.73	-139.59	-87.19	-133.79
Abr	-164.53	-145.37	-105.96	-111.96	-153.02
May	-10.22	-114.00	-40.31	-129.60	16.71
Jun	113.45	395.35	77.88	238.04	204.90
Jul	-93.38	202.33	141.35	-102.72	-90.26
Ago	21.58	325.75	216.42	216.11	186.97
Sep	219.70	259.32	184.51	165.37	105.86
Oct	161.72	-9.76	-24.17	37.37	239.10
Nov	-26.22	-52.17	-22.25	44.40	-0.39
Dic	-74.79	-62.49	-103.63	-90.40	-81.27

dentro de un estudio hidrológico, por su parte, facilitan el desarrollo de balances hidrológicos al dar valores puntuales que derivan en la estimación y establecimiento de sus componentes. En este caso, SWOT recalcó las similitudes en el modelo de balance hídrico aquí desarrollado, con el llevado a cabo por Mendoza-Palacios en 2015, al representar visualmente los meses de mayor entrada (octubre y noviembre) y salida (mayo).

Conclusiones

Se determinó una dinámica mensual de balance hídrico en 5 años seleccionados para la zona de estudio y los cambios en superficies inundadas y volúmenes. De esta forma, a partir de los datos estadísticos, numéricamente se obtiene un balance hídrico negativo en 8 (años 2000, 2005 y 2010) y 7 (años 2015 y 2020) meses de 12. De los cuales, en los cinco años, agosto y septiembre son positivos y los meses de diciembre a abril, negativos. En correspondencia con SWOT, visualmente se aprecia que el mes de septiembre mantiene un balance positivo y los meses de diciembre, febrero y abril un balance negativo en ambas lagunas. A su vez, podemos apreciar un balance negativo en 8 de 12 meses en la laguna Chaschoc y positivo en 8 de 12 meses en la laguna Sejá para el año hidrológico 1 (julio 2023 – junio 2024), respecto al año hidrológico 2 (julio 2024 – junio 2025) ambas lagunas presentan un balance positivo en 7 de 12 meses.

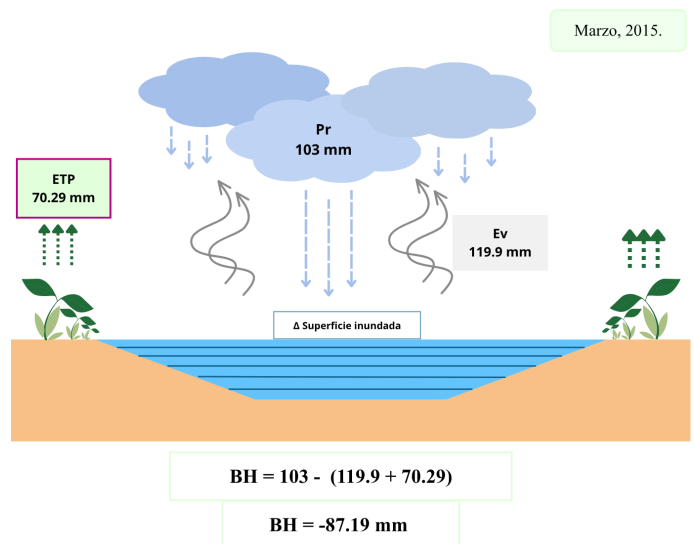


Figura 6. Representación visual de los elementos del balance hídrico de la Laguna Chaschoc para el mes de marzo del año 2015.

Agradecimientos

Al proyecto PAPIIT IV200324 (UNAM), denominado “Efectos históricos y recientes de los procesos atmosféricos, ambientales y sociales y algunos escenarios futuros en un socioecosistema lagunar tropical en el sureste de México”; al Programa de Apoyo de becas para titulación del Instituto de Geofísica, UNAM.

Referencias

- Aceves Navarro LA, Rivera Hernández B, Arrieta Rivera A, Juárez López JF, Méndez Adorno JM, Ramos Álvarez C (2017). Tendencias de cambio climático en los municipios de Tabasco que integran la subcuenca Usumacinta. Soares D, García A (eds.), *La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*. Jiutepec, Morelos (Coord. Editorial: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México), pp. 77-96.
- Campos Aranda D (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Editorial Universitaria Potosina. Tercera reimpresión.
- Castillo-Cruz ZG, Medrano-Pérez OR (2023). Análisis geomorfológico de las subcuencas Usumacinta y Grijalva en el sureste de México. *Acta universitaria* 33:1-20. doi:10.15174/au.2023.3684.
- Cruz-Ramírez A (2019). Funcionamiento ambiental de humedales fluviales tropicales: condiciones de nivel del agua e influencia en factores fisicoquímicos del agua: Tesis de Doctorado, División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, p. 88. Incluye tres mapas y un artículo.

Chelsa Climate (2025). CHELSA. Free climate data at high resolution, <https://chelsa-climate.org/>, [consultado el 24 de febrero de 2025].

Fu L-L, Alsdorf D, Morrow R, Rodriguez E, Mognard N (2012). SWOT: The surface water and ocean topography mission. Wide-Swath altimetric measurement of water elevation on Earth. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California. https://swot.jpl.nasa.gov/system/documents/files/2179_SWOT_MSD_final-3-26-12.pdf

Instituto Mexicano de investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (IMIPAS) (2013). “Acuicultura”, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/308076/05sistema_lagunar_cpm.pdf, [consultado el 20 de julio de 2025].

Jet Propulsion Laboratory (JPL) (2018). Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT) Project. Science Requirements Document, https://swot.jpl.nasa.gov/system/documents/files/2176_2176_D-61923_

SRD_Rev_B_20181113.pdf

Mendoza-Palacios J (2015). Caracterización hidrodinámica y morfométrica del sistema lagunar del humedal Chaschoc, FOMIX Tabasco, Villahermosa, Tabasco.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2025). SMN. Funciones y objetivos, <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/funciones-y-objetivos>, [consultado el 08 de octubre de 2024].

Surface Water Ocean Topography (SWOT) (2018). SWOT Level 2 Lake Single-Pass Vector Data Product, Version C. Ver. C. PO.DAAC, CA, USA. doi:[10.5067/SWOT-LAKESP-2.0](https://doi.org/10.5067/SWOT-LAKESP-2.0)

Tsiftsis S, Štípková Z, Rejmánek M *et al.* (2024). Predictions of species distributions based only on models estimating future climate change are not reliable. *Sci Rep* 14:25778. doi:[10.1038/s41598-024-76524-5](https://doi.org/10.1038/s41598-024-76524-5)