



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Materia total particulada y clorofila “a” a lo largo del  
río Usumacinta, México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Regina Ramírez García

TUTOR

Javier Alcocer Durand



Ciudad Universitaria, CD. MX.

2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de datos de jurado

1. Datos del alumno  
Ramírez  
García  
Regina  
+52 5617642424  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
312281887
2. Datos del tutor  
Doctor  
Javier  
Alcocer  
Durand
3. Datos del sinodal 1  
Doctora  
Margarita  
Caballero  
Miranda
4. Datos del sinodal 2  
Doctora  
Blanca Lucia  
Prado  
Pano
5. Datos del sinodal 3  
Doctora  
Ana Cecilia  
Espinosa  
García
6. Datos del sinodal 4  
Doctor  
Luis Alberto  
Oseguera  
Pérez
7. Datos del trabajo escrito  
Materia total particulada y clorofila "a" a lo largo del río Usumacinta, México  
44 pp.  
2022



ESTE ES UN RECORDATORIO DE LO TRANSITADO.  
RÍO USUMACINTA, CHIAPAS, MÉXICO.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por ser mi segundo hogar. Por abrirme las puertas del conocimiento y de la autocrítica. Gracias a todas las personas maravillosas que me acompañaron dentro de esta institución y por formar a la mujer y científica que soy ahora.

A los proyectos “*Fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas para la gestión territorial sustentable de la Cuenca del río Usumacinta y su Zona Marina de Influencia (CRUZMI), así como su adaptación ante el cambio climático*” (FORDECYT-CONACYT 273646), “*Flujos de carbono, nutrientes y sedimentos en un sistema lóxico tropical*” (PAPIITIN216818) y “*Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México*” (PINCC 2020-2021) por el apoyo financiero para la realización de esta investigación. A la Fundación Natura y Ecosistemas Mexicanos AC que apoyaron logísticamente durante la estancia en la Estación Biológica Chajul.

Al Dr. Javier Alcocer, por su gran labor de profesor, por su infinita paciencia y sus palabras de aliento. De no ser por su motivación, habría sido mil veces más difícil.

Al Dr. Luis A. Oseguera, Dra. Daniela Cortés, Dr. Jorge Ramírez y M. en C. Julio Díaz quienes colaboraron en el trabajo de campo, recolección de muestras y procesamiento de datos.

Al M. en C. Daniel Cuevas quién, además de colaborar con el trabajo de campo, recolección de muestras y procesamiento de datos, también se tomó el tiempo para leer y compartir sus opiniones para mejorar este trabajo. Gracias por tu tiempo y atención.

A todas y todos mis profesores de Ciencias de la Tierra, porque ser docente es uno de los trabajos más humanos. Son sembradores de sueños, ilusiones, sonrisas y aprendizaje. Gracias por creer en mí, por verme crecer y por guiarme en el viaje al corazón de la Tierra.

## **Agradecimientos personales**

A mí misma, por concluir este proceso que me ha enseñado muchísimo, sé que me queda un largo camino, pero sigo aprendiendo, sigo creciendo y sembrando.

A mi madre Erika guía y compañera de vida. Por enseñarme a andar, por ser un ejemplo de mujer guerrera que lucha en contra de la tempestad. Admiro y honro tu gran corazón y valentía. Gracias por tus esfuerzos, por tu confianza, por tu paciencia, por tu amor infinito. También gracias por enseñarme a admirar la naturaleza. Este logro es tan tuyo como mío. Y seguiremos cosechando más. Te amo por quién eres y todo lo que representas.

A mi hermano Emil, por ser esa chispa que ilumina mi vida. Por enseñarme el significado de la amistad, complicidad, la confianza y el amor. Te amo por hacer la vida más bella y divertida. Sabes que siempre tendrás una compañera de aventuras.

A mi padre Alfonso por enseñarme la paciencia, la confianza, por su amor y escucha, por enseñarme el gusto por el conocimiento. Gracias por tu sabiduría y tu calma. Te amo.

A mi padre Esteban por su apoyo incondicional, por sus consejos sabios, la escucha, las buenas risas y las deliciosas recetas de comida que prepara.

A mi esposo Shervin, por acompañarme en este proceso, por creer en mí, y por recordarme todos los días que mis logros son producto de mi esfuerzo y dedicación. Te admiro y me siento afortunada de compartir contigo este y muchos logros, te amo cielo.

A mis abuelas y maestras Alicia, Socorro y María Marcela. Por ser mis ancestras, por darme el amor más tierno y gentil. Por sus abrazos cálidos, su sabiduría, consejos y refranes tiernos.

A mi querida amiga Dapfne por crecer conmigo en las andanzas de Ciencias de la Tierra y en la vida, por darme su tierno cariño, por escucharme y enseñarme a ver el mundo como tú lo ves. Te amo infinitamente y te admiro siempre.

A mi querida profesora y amiga María Toledo, por ser una mujer increíble y una gran guía en mi formación como científica. Gracias por creer en mí, me llenas de inspiración.

A mis amigas y amigos Emilio, Monse, Nina, Jeny, Dreia, Toño, Chaz, Mata, Axel, Brandon y Silva por escucharme, por acompañarme en las aventuras más locas y divertidas, por confiar en mí, por pasar juntos los momentos más luminosos y oscuros de nuestro crecimiento. Les amo siempre por hacer la vida más liviana.

A Hugo y a su familia por su apoyo en esta etapa de mi vida.

A mis amigas de la Colectiva Cihuatl Atekakini, que han sido todas y cada una parte fundamental de mi formación como mujer y científica. Gracias infinitas por crear una red de confianza y una resistencia llena de amor, ternura, comprensión y fuerza. Las redes de mujeres salvan vidas, y si las mujeres se levantan la Tierra permanece.

**¡NUNCA MÁS UNA CIENCIA SIN NOSOTRAS!**

## Contenido

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Abstract</b>	<b>9</b>
<b>Introducción</b>	<b>10</b>
I. Materia total particulada	11
II. Clorofila “a”	12
<b>Antecedentes</b>	<b>13</b>
<b>Justificación</b>	<b>13</b>
<b>Objetivo general</b>	<b>14</b>
Metas	<b>14</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>14</b>
<b>Área de estudio</b>	<b>15</b>
I. Hidrología e hidrografía	15
II. Climatología	18
III. Litología	20
IV. Tipos de vegetación y uso de suelo	22
<b>Materiales y Métodos</b>	<b>24</b>
I. Trabajo de laboratorio previo a las visitas de campo	25
II. Trabajo de campo	25
III. Trabajo de laboratorio	26
<b>Resultados</b>	<b>28</b>
I. Parámetros fisicoquímicos	28
II. Concentración de MTP	29
III. Concentración de Clor-a	31
<b>Discusión</b>	<b>33</b>
I. Materia total particulada	33
II. Clorofila “a”	34
<b>Conclusiones</b>	<b>36</b>
<b>Referencias</b>	<b>37</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Cuenca del río Usumacinta, México (Tomado de Soria, 2020).	<b>17</b>
<b>Figura 2.</b> Subcuencas principales del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).	<b>18</b>
<b>Figura 3.</b> Variación del caudal medio diario (1948-2014) y de la precipitación media mensual (1950-2000) del río Usumacinta medidos en la estación Boca del Cerro (Modificado por Soria, 2020 de CNA, 2019)	<b>20</b>
<b>Figura 4.</b> Fig. 4. Mapa geológico de la cuenca del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).	<b>21</b>
<b>Figura 5.</b> Mapa de vegetación y uso de suelo de la cuenca del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).	<b>23</b>
<b>Figura 6.</b> Estaciones de muestreo en la cuenca del río Usumacinta (Tomado de Soria, 2020).	
<b>Figura 7.</b> Concentración de MTP promedio y desviación estándar a lo largo del río Usumacinta durante TL y TS.	<b>30</b>
<b>Figura 8.</b> Correlación positiva entre MTP y turbidez en el río Usumacinta en TL. Cuenca media (gris oscuro); cuenca baja (gris claro).	<b>30</b>
<b>Figura 9.</b> Comparación de las concentraciones de MTP entre TL y TS en el río Usumacinta.	<b>31</b>
<b>Figura 10.</b> Comparación de las concentraciones de MTP entre cuenca baja y cuenca media en el río Usumacinta.	<b>31</b>
<b>Figura 11.</b> Concentración de Clor-a promedio y desviación estándar a lo largo del río Usumacinta en la TL y TS.	<b>32</b>
<b>Figura 12.</b> Comparación de las concentraciones de Clor-a entre TL y TS en el río Usumacinta.	<b>33</b>
<b>Figura 13.</b> Comparación de las concentraciones de Clor-a entre la cuenca media y baja en el río Usumacinta.	<b>33</b>



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros fisicoquímicos medidos en las estaciones de muestreo durante TL y TS en el río Usumacinta.	<b>28</b>
<b>Tabla 2.</b> Concentración de MTP medida en las estaciones de muestreo durante TL y de TS en el río Usumacinta.	<b>29</b>
<b>Tabla 3.</b> Concentración de Clor-a medida durante TL y TS en el río Usumacinta.	<b>32</b>

## Resumen

El río Usumacinta es el mayor sistema fluvial en la región suroeste del país; es una región prioritaria por sus recursos hidrológicos y su alta biodiversidad. Transporta alrededor de  $2,678 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de agua. El 58% de su cuenca está en Guatemala y el 42% restante en México, lo que representa el 4.7% ( $91,345 \text{ km}^2$ ) del total del territorio mexicano. El objetivo del presente estudio es evaluar la concentración de la materia total particulada (MTP) y de clorofila "a" (Clor-a) a lo largo de la cuenca del río Usumacinta en dos temporadas hidrológicas contrastantes. Se tomaron muestras durante la temporada de lluvias (TL, octubre de 2017) y secas (TS, mayo de 2018). Las concentraciones de la MTP fueron mayores en la TL con un valor de  $71.1 \pm 30.9 \text{ mg L}^{-1}$  que varió entre 6.8 y  $131 \text{ mg L}^{-1}$ . Durante la TS, la MTP varió entre 2.3 y  $42.8 \text{ mg L}^{-1}$  con un valor promedio total de  $16.1 \pm 10.5 \text{ mg L}^{-1}$ . Se obtuvieron diferencias significativas de la MTP entre TL y TS ( $W = 6192$ ,  $p < 0.05$ ). Se encontró una correlación positiva con la turbidez ( $\rho = 0.82$ ,  $p < 0.05$ ) durante TL. No se encontró una correlación entre MTP y Clor-a. Se obtuvo una mayor concentración de Clor-a en la TS. Durante esta época la concentración varió entre 0 y  $20.34 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  y el valor promedio más alto se registró en la cuenca baja con  $7 \pm 4.2 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ . Para la TL se encontraron valores que variaron entre 0.1 y  $4.8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ , y se registró un valor promedio de  $1.1 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  para la cuenca media, aumentando hacia la cuenca baja con  $3.6 \pm 0.5 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ . Hubo diferencias significativas de Clor-a entre TL y TS ( $W = 5820.5$ ,  $p < 0.05$ ) y diferencias entre cuenca media y baja ( $W = 1265$ ,  $p < 0.05$ ). Se encontró una correlación positiva durante la TL de la Clor-a con la temperatura ( $\rho = 0.84$ ,  $p < 0.05$ ) y una correlación negativa con la concentración de oxígeno disuelto (OD) y pH ( $\rho = -0.72$ ,  $p < 0.05$ ;  $\rho = -0.71$ ,  $p < 0.05$ ). La mayor concentración de Clor-a en la TS puede explicarse por la disminución del caudal que aumenta los tiempos de retención, así como por la disminución de la turbidez, condiciones que favorecieron el desarrollo de las algas planctónicas.

## Abstract

The Usumacinta River is the largest river system in the country's southwestern region; it is a priority region for its hydrological resources and high biodiversity. It transports about  $2,678 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Fifty-eight percent of its watershed is in Guatemala and the remaining 42% in Mexico, representing 4.7% ( $91,345 \text{ km}^2$ ) of the total Mexican territory. The objective of this study is to evaluate the concentration of Total Particulate Matter (TPM) and Chlorophyll "a" (Chlor-a) along the Usumacinta River basin in two contrasting hydrological seasons. Samples were taken during the rainy (TL, October 2017) and dry (TS, May 2018) seasons. MTP concentrations were higher in TL with a value of  $71.1 \pm 30.9 \text{ mg L}^{-1}$  that ranged between 6.8 and  $131 \text{ mg L}^{-1}$ . During TS, MTP ranged between 2.3 and  $42.8 \text{ mg L}^{-1}$  with an overall average value of  $16.1 \pm 10.5 \text{ mg L}^{-1}$ . Significant differences in MTP were obtained between TL and TS ( $W = 6192$ ,  $p < 0.05$ ). A positive correlation was found with turbidity ( $\rho = 0.82$ ,  $p < 0.05$ ) during TL. No correlation was found between MTP and Chlor-a. A higher concentration of Chlor-a was obtained at TS. During this time, the concentration varied between 0 and  $20.34 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ; the highest average value was recorded in the lower basin with  $7 \pm 4.2 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ . For TL, values were found to vary between 0.1 and  $4.8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ , and an average value of  $1.1 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  was recorded for the middle basin, increasing towards the lower basin with  $3.6 \pm 0.5 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ . There were significant differences in Chlor-a between TL and TS ( $W = 5820.5$ ,  $p < 0.05$ ) and differences between middle and lower basin ( $W = 1265$ ,  $p < 0.05$ ). A positive correlation was found during TL of Chlor-a with temperature ( $\rho = 0.84$ ,  $p < 0.05$ ) and a negative correlation with the dissolved oxygen concentration (DO) and pH ( $\rho = -0.72$ ,  $p < 0.05$ ;  $\rho = -0.71$ ,  $p < 0.05$ ). The higher concentration of Chlor-a in the TS can be explained by the decrease in flow rate that increases retention times, as well as by the decrease in turbidity. These conditions favored the development of planktonic algae.

## Introducción

Las aguas epicontinentales son los cuerpos acuáticos que se encuentran sobre la superficie de los continentes y cubren menos del 2% de la superficie planetaria (Wetzel, 2001). Existen dos tipos con base en el tiempo de residencia del agua: los sistemas lénticos, como lagos y presas, con tiempos de residencia largos, y los sistemas lóticos, como ríos y arroyos, con tiempos de residencia cortos (Alcocer, 2007; Likens, 2009). Los sistemas lóticos transportan aproximadamente el 0.006% del agua total de la Tierra que contiene sustancias disueltas y materiales particulados que reflejan la estrecha conexión entre el río y su cuenca de drenaje (Likens, 2009).

En México, el 27% del territorio nacional tiene cerca de 320 cuencas de drenaje que cubren un área aproximada de 530,310 km<sup>2</sup>. Sin embargo, sólo 34 se consideran cuencas de drenaje principales con base en el volumen de agua que transportan. Algunas de ellas desembocan en tres grandes vertientes (Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe), así como las cuencas de drenaje endorreicas que no drenan al mar (SEDESOL, 1993). Por la vertiente del Golfo de México y Mar Caribe descarga el 58.1% del volumen de los ríos mexicanos que se consideran maduros; es decir, que son ríos más largos, de menor velocidad debido a una menor pendiente, con estaciones de lluvias prolongadas y gran transporte de agua (SEDESOL, 1993; INEGI, 1995).

El río Usumacinta, claro ejemplo de un río maduro, se considera el sistema fluvial más importante de México ya que transporta alrededor de 2,678 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Benke y Cushing, 2009; Muñoz-Salinas y Castillo, 2015). Los ríos con carga masiva de sedimentos y flujo cumplen un papel fundamental en el transporte de materiales desde los ambientes terrestres hasta los océanos. Durante este recorrido, el flujo presenta variaciones considerables en la descarga y concentración de los materiales transportados que reflejan la composición, el clima y la cubierta vegetal de la cuenca de drenaje por lo que las mediciones longitudinales y estacionales del material transportado en varios puntos de la cuenca son de gran importancia (Ward et al., 2017; Wetzel, 2001; Allan y Castillo, 2007).

## I. Materia total particulada

La materia orgánica e inorgánica en los cuerpos de agua se puede encontrar de forma tanto particulada como disuelta. La diferencia entre el material particulado y el disuelto es de índole metodológico y aplica en el criterio de la apertura de poro del filtro que se utiliza para el análisis de las muestras (Karl et al., 1991). El criterio más aceptado es el que define la materia particulada (MP) como la compuesta por partículas con diámetro igual o mayor a  $0.45 \mu\text{m}$ , mientras que la materia disuelta (MD) es toda la materia capaz de atravesar los filtros con esa apertura de poro (Cole, 1994). Al material total particulado (MTP) también se le conoce como seston, el cual se divide en su fracción orgánica (bioseston o plancton) e inorgánica (tripton) (Lenz, 1997; Margalef, 1983; Cole, 1994).

La MTP, en particular el tripton, modifica las propiedades ópticas de los cuerpos de agua y es un indicador visual de la profundidad de la capa fótica o eufótica ( $Z_{\text{EU}} = 1\%$  de la radiación fotosintéticamente activa en superficie ó SPAR) que se regula a través de la disponibilidad de radiación lumínica y, por lo tanto, de la producción primaria de un ecosistema, lo cual es indispensable para comprender la base de la red trófica (Wetzel, 2001).

La velocidad de la corriente varía espacialmente de forma considerable dentro de la sección transversal y vertical de una corriente debido a la fricción con el fondo, así como temporalmente (estacionalmente) (Allan y Castillo, 2007). La relación entre la velocidad de la corriente, la profundidad, la estructura física y distribución de los sedimentos, determinan las características físicas en términos de la estructura horizontal del sistema y el transporte de material particulado y disuelto en éste (Roldán y Ramírez, 2008). El caudal (Q) es el volumen total de agua que pasa en un punto dado del río por unidad de tiempo (Galizia y Matsumura, 2012). El volumen de la descarga del río es una característica de suma importancia para determinar la carga de materiales transportados por el río.

Debido a las variaciones en la escorrentía que afecta a las corrientes, existe una contribución importante de material alóctono, esto es, proveniente de la cuenca de drenaje. La materia inorgánica se produce por la erosión de la cuenca; la materia orgánica alóctona proviene de ramas, hojas, frutos, restos de vegetación e insectos, entre otros. Por otro lado, la producción de materia orgánica autóctona ocurre en

tramos del río donde la disponibilidad de luz y de nutrientes es mayor. Las macrófitas y el perifiton juegan un papel importante en la producción primaria de los ríos y dan por resultado la carga orgánica autóctona (Galizia y Matsumura, 2012; Gessner, 1997).

## II. Clorofila “a”

El fitoplancton es un grupo ubicuo de organismos fotosintéticos responsables de la mayoría de la fotosíntesis en los ecosistemas acuáticos que tienen acceso a la luz solar. En los ríos se encuentran algas suspendidas en la columna de agua formando parte del plancton (potamoplancton), así como en el bentos formando parte del perifiton. Estos organismos son la base de la red trófica y están en la interfase entre el medio fisicoquímico y la comunidad biológica (Lamberti, 1996). Además, la fotosíntesis proporciona oxígeno para los organismos aeróbicos del ecosistema y el carbono que fijan proporciona alimento para los herbívoros. En muchos hábitats lóticos, la contribución de la fotosíntesis de las algas al carbono orgánico de la red alimentaria es considerable (Steinman, 1996).

De acuerdo con diversos autores, la biomasa de los productores primarios se puede obtener a través de una aproximación de la concentración de clorofila “a” (Clor-a) (Neal et al., 2006; Calijuri et al., 2008; Ouffoué et al., 2013). Se han hecho estudios sobre la relación entre la concentración de Clor-a y la disponibilidad de luz, temperatura del agua e interacciones bióticas (Neal et al., 2006; Bowes et al., 2012), así como de las condiciones hidráulicas tales como el área de captación, caudal y los tiempos de residencia que podrían explicar de forma más adecuada la distribución del fitoplancton en los ríos (Koch et al., 2004; Hardenbicker et al., 2014).

El río Usumacinta constituye la cuenca de mayor extensión y desarrollo hidrológico en México (March y Castro, 2006). Se encuentra en una de las zonas más importantes (Frontera Sur, Grijalva-Usumacinta) consideradas por la CNA (2011b) como reservas potenciales de agua en México, con prioridad de conservación. Sin embargo y a pesar de ser una de las cuencas más importantes del territorio mexicano, el conocimiento limnológico que se tiene sobre éste es sumamente escaso, lo que limita ampliamente su aprovechamiento y conservación.

## **Antecedentes**

El Usumacinta es uno de los ríos más importantes del país por el volumen de agua y materiales que conduce desde que nace en Guatemala y llega a México a través de las montañas más altas del sur de Chiapas, para luego pasar por Tabasco y desembocar en el sur del Golfo de México. En el caso del río Usumacinta se infiere que el transporte de materiales debe ser importante, aunque no existen estudios al respecto. El desconocimiento general de este importante sistema lótico justificó el desarrollo del proyecto FORDECYT/CONACYT 273646 *“Fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas para la gestión territorial sustentable de la cuenca del río Usumacinta y su zona marina de influencia (CRUZMI)”* y posteriormente, *“Flujos de carbono, nutrientes y sedimentos en un sistema lótico tropical”* (PAPIITIN216818) y *“Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México”* (PINCC 2020-2021), de los cuales forma parte la presente investigación.

## **Justificación**

La investigación sobre las estimaciones globales de los flujos de material fluvial e información sobre latitudes tropicales es limitada. Con frecuencia, el río Amazonas se ha utilizado como modelo para los ríos tropicales y durante la última década ha habido un aumento en la disponibilidad de datos de otros sistemas tropicales en América Latina y otras regiones tropicales del planeta (Geeraert et al., 2018).

Como se mencionó, el Usumacinta es uno de los ríos más importantes de México, sin embargo, sus características limnológicas son prácticamente desconocidas. Por este motivo es de fundamental importancia hacer una caracterización limnológica, ya que esta información será la referencia para otros estudios limnológicos que se pretendan realizar. Es obligado contar con una apropiada caracterización que garantice identificar adecuadamente la problemática e impulsores de cambio en este ecosistema ya que, a partir de este diagnóstico base, se pueden planear otros estudios pertinentes con la finalidad de ampliar y fortalecer el conocimiento científico para desarrollar y

mantener el uso sustentable de los recursos naturales dentro de la cuenca, así como minimizar los potenciales efectos asociados al cambio climático.

### **Objetivo general**

- Evaluar la concentración de MTP y Clor-a, así como la variación espacial a lo largo del río Usumacinta en dos temporadas hidrológicas contrastantes (lluvias y secas).

### **Metas**

- Medir la profundidad, temperatura, concentración de oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica y turbidez a lo largo del río Usumacinta en época de lluvias y de secas.
- Evaluar la concentración de MTP a lo largo del río Usumacinta en dos épocas hidrológicamente contrastantes (lluvias y de secas).
- Evaluar la concentración de Clor-a a lo largo a lo largo del río Usumacinta en dos épocas hidrológicamente contrastantes (lluvias y de secas).

### **Hipótesis**

- La concentración de MTP será mayor en la temporada de lluvias debido al arrastre de materiales de la cuenca de drenaje, en particular de la cuenca media con mayor pendiente, así como por el aumento de caudal.
- La concentración de Clor-a será mayor en la época de secas en particular de la cuenca baja debido a que el caudal del río disminuye, y que en conjunto con una mayor penetración de luz (menor turbulencia, menor turbidez) permitirán el desarrollo del fitoplancton.



## Área de estudio

La cuenca del río Usumacinta es la de mayor extensión y desarrollo hidrológico en México; se localiza en el sureste de la República Mexicana y administrativamente forma parte de la Región Hidrológica No. 30 (RH 30) Grijalva-Usumacinta que abarca el 5.7% del territorio nacional y descarga la mayor cantidad de agua en México (Múñoz-Salinas y Castillo, 2015). Constituye el sistema fluvial más importante del país y el décimo de América del Norte con un área de drenaje de  $\sim 112,550 \text{ km}^2$  y una descarga hacia el Golfo de México de  $2,678 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Benke y Cushing, 2009; Muñoz-Salinas y Castillo, 2015) que puede llegar a transportar desde  $4,700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta  $7,500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en los eventos de inundaciones extremas (Yáñez-Arancibia et al., 2009). Esta Región Hidrológica se conforma por el río Usumacinta, que drena al oeste de Chiapas y sirve como frontera internacional entre México y Guatemala, así como por el río Grijalva, que tiene una longitud de  $\sim 640 \text{ km}$  y drena hasta el margen oriental de Oaxaca y Veracruz. Estos dos sistemas se unen cerca de Frontera, Tabasco, 24 km antes de la desembocadura del Golfo de México, y descargan al mar en conjunto un volumen medio anual que oscila entre los  $120 \text{ km}^3$  y  $147 \text{ km}^3$  (Yáñez-Arancibia et al., 2009; Rosales, 2012).

### I. Hidrología e hidrografía

La cuenca del río Usumacinta se ubica entre  $14^\circ 53' 42'' \text{ N}$  y  $18^\circ 08' 6'' \text{ N}$  de latitud y ( $92^\circ 44' 52'' \text{ O}$  y  $89^\circ 08' 06'' \text{ O}$ ) de longitud. La cuenca tiene una superficie aproximada de  $77,743.6 \text{ km}^2$  lo equivalente a todo el estado de Chiapas quedando el 58% en territorio guatemalteco, 42% en México y el 0.01% en Belice. La cuenca se forma en las partes altas de la Sierra de los Cuchumatanes y alcanza altitudes hasta de  $3,800 \text{ m s.n.m.}$  y  $2,600 \text{ m s.n.m.}$  en los altos de Chiapas, con una altitud media de  $200 \text{ m s.n.m.}$  (Soares y García, 2017). Se conforma por una extraordinaria red fluvial que tiene una longitud de  $1,123 \text{ km}$  siendo el río más largo de Mesoamérica y el sexto más largo de Latinoamérica. Se divide según sus características físicas (relieve, hidrología y altitud) en tres zonas: cuenca alta (30%), cuenca media (48.5%) y cuenca baja (21,5%) (Soria, 2020; Saavedra et al., 2015). Una porción elevada de la cuenca alta y una pequeña

porción de la cuenca media se encuentran en Guatemala (Fig. 1), mientras que otra parte de la cuenca media y la cuenca baja son exclusivamente mexicanas, por lo que aquí se reciben los impactos acumulados que ocurren a lo largo de todo el río.



Fig. 1. Cuenca del río Usumacinta, México. (Tomado de Soria, 2020).

El río Usumacinta se conforma por el escurrimiento de las subcuencas de los ríos Chixoy-Salinas (13,643 km<sup>2</sup>), La Pasión (11,795 km<sup>2</sup>), Lacantún (19,980 km<sup>2</sup>), San Pedro (13,964 km<sup>2</sup>) y del sistema lagunar y de pantanos del sistema Usumacinta (17,710 km<sup>2</sup>). Se considera que el origen del río Usumacinta proviene de la cuenca alta del río Chixoy que se forma en las partes altas de la sierra Madre de Guatemala en las

montañas de la Chamá y los Cuchumatanes, en la región de Totonicapan en el norte-centro del altiplano guatemalteco; posteriormente, éste se une con el río La Pasión que proviene de la región del Petén, en la Sierra de Santa Cruz, y, a unos cuantos kilómetros se crea la unión por el noreste con el río Lacantún, que fluye desde Los Altos de Chiapas y funge como el límite transfronterizo entre México y Guatemala a lo largo de 337 km. El río fluye aguas abajo, donde escurre por la cuenca media hasta el Cañón de Boca del Cerro, abandonando su carácter fronterizo con Guatemala, donde converge con la subcuenca del río San Pedro, que nace en el Petén Guatemalteco, y en conjunto forman la cuenca receptora del gran sistema Usumacinta (Fig. 2). En esta zona, el río presenta una bifurcación de menor caudal hacia el río Palizada, que drena en la Laguna de Términos (Campeche) y, otra derivación hacia el noreste en el río San Pedro-San Pablo; el cauce principal continúa su recorrido donde en confluencia con el río Grijalva antes del poblado de Frontera en la zona de Tres Brazos desembocan en el Golfo de México. La cuenca baja discurre con un caudal de  $5,200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por la región fisiográfica denominada Planicie del Golfo de México (Saavedra et al., 2015; Soria 2020) que es la llanura palustre más extensa de Mesoamérica, donde se encuentra la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC), uno de los humedales más extensos e importantes en el Golfo de México, después del delta del río Mississippi (Carabias et al., 2000; Muñoz-Salinas et al., 2016) que incluye ríos con una gran sinuosidad donde es común la formación de meandros, numerosas lagunas salobres y otros humedales y zonas inundadas.

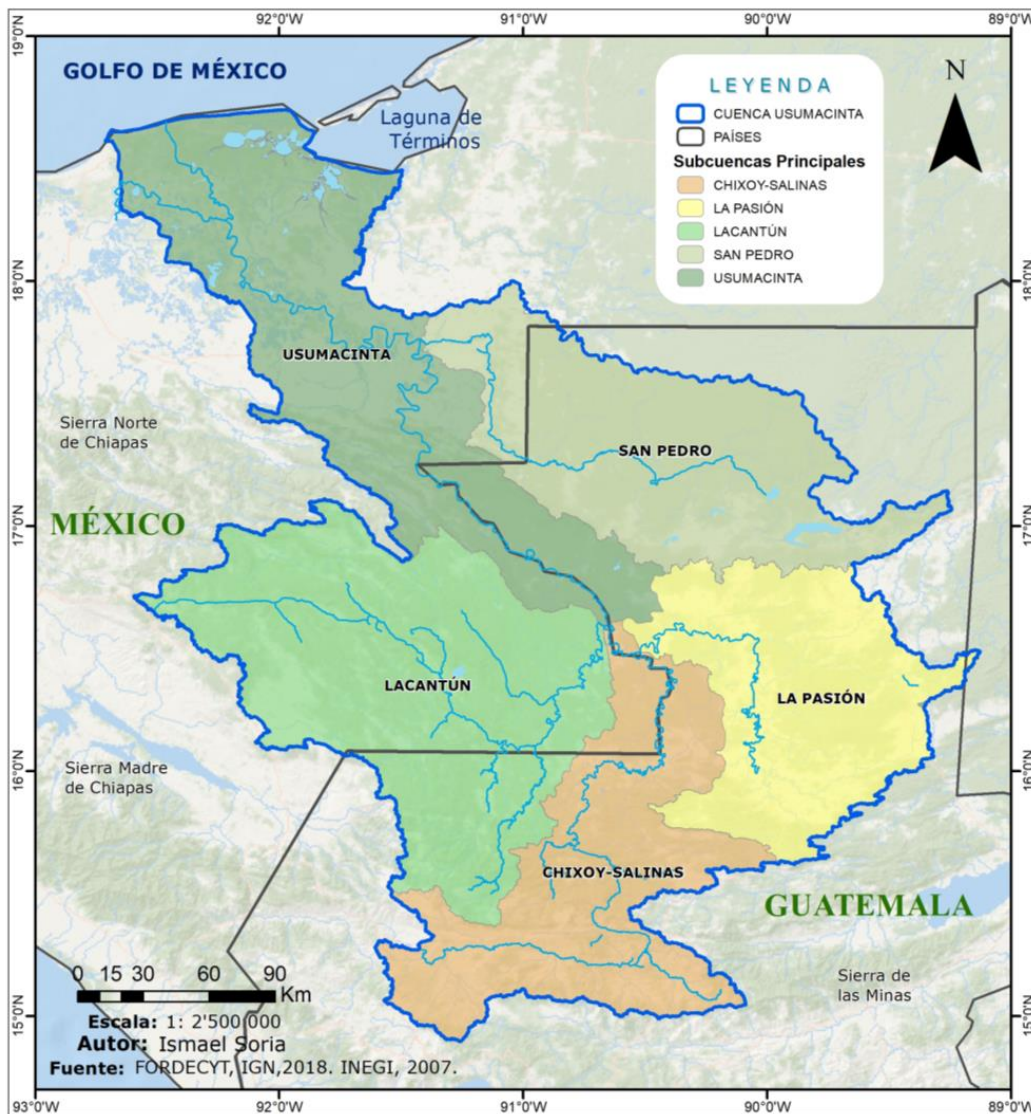


Fig. 2. Subcuencas principales del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).

## II. Climatología

La cuenca del Usumacinta posee un clima húmedo tropical con precipitaciones anuales promedio de 1,500 en el estado de Chiapas a 2,500 mm en algunas regiones del estado de Tabasco; en la parte de la cuenca alta en Guatemala llegan hasta los 5,000 mm año<sup>-1</sup>, los cuales coinciden con una de las regiones con más altos niveles de precipitación de México y de toda Mesoamérica (Benke y Cushing, 2009; Cotler, 2010; Muñoz et al., 2011). Sin embargo, el clima a lo largo de la cuenca no es uniforme, presenta una temperatura anual promedio de 23 °C que oscila entre 8 ° y 12 °C en los

Altos Cuchumatanes hasta 26 ° y 30 °C en la cuenca baja (Benke y Cushing, 2009). El clima presenta una estación lluviosa durante los meses de verano y una temporada relativamente seca en invierno, éstas se asocian con la variabilidad climática natural de los vientos alisios y de la posición latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Magaña et al., 2003; Soares y García, 2017).

La ZCIT y los vientos alisios generan una fuerte temporada de precipitaciones entre junio-noviembre con un máximo en septiembre (Fig. 3) (Grotsky y Carton, 2003; Muñoz-Salinas et al., 2016). Los vientos alisios aportan el 80% de la precipitación anual durante el verano a través de ondas tropicales del este, depresiones, tormentas y ciclones que llegan desde el sur y el sureste a través del Mar Caribe, Golfo de México y en raras ocasiones del Océano Pacífico (Magaña et al., 2003). Las intensas lluvias de tipo convectiva-orográfica producidas durante esta época, generan un rápido incremento en las descargas de agua del río Usumacinta, causando inundaciones en las tierras bajas; en los meses de julio y agosto existe una disminución en la precipitación que se conoce como canícula y que genera la separación de la precipitación en dos máximos (junio y septiembre) (Fig.3) (Magaña et al., 2003). La temporada de secas presenta bajas precipitaciones (mínimo en abril) debido a la migración al sur de la ZCIT, sin embargo, los frentes fríos afectan a esta región durante el invierno que aportan del 10 al 15% de la lluvia en la región, a estos eventos se les conoce como “nortes” (Carabias et al., 2000).

Según medidas de datos históricos de aforo entre 1948 y 2014 en la estación hidrométrica Boca del Cerro (Tabasco, código 30019), que drena un área de 47,697 km<sup>2</sup>, es decir el 60% de la cuenca que corresponde hasta el 80% del caudal del río Usumacinta (CNA, 2019), se estima que el caudal promedio anual es de 1,934 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (619-4,076 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Esta estación funge como referencia para reportar el caudal histórico de la cuenca a nivel regional (CONAGUA, 2011; INEGI, 2018) y global (Benke y Cushing, 2009; Meybeck y Ragu, 2012).

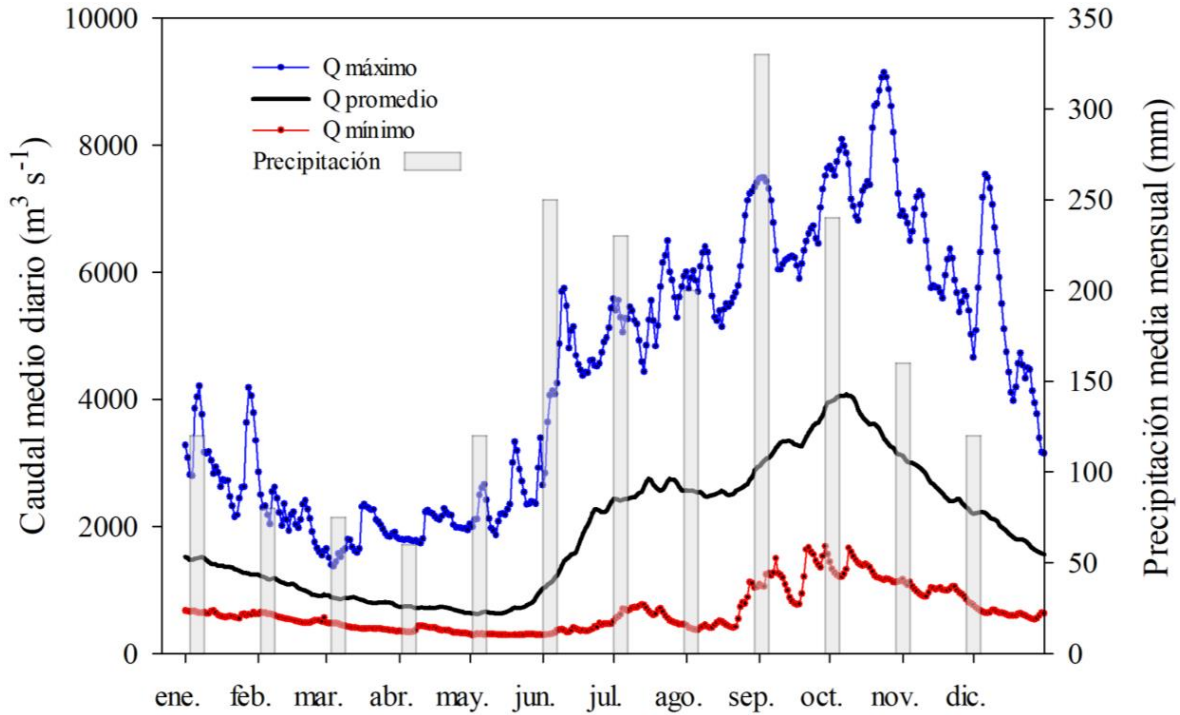


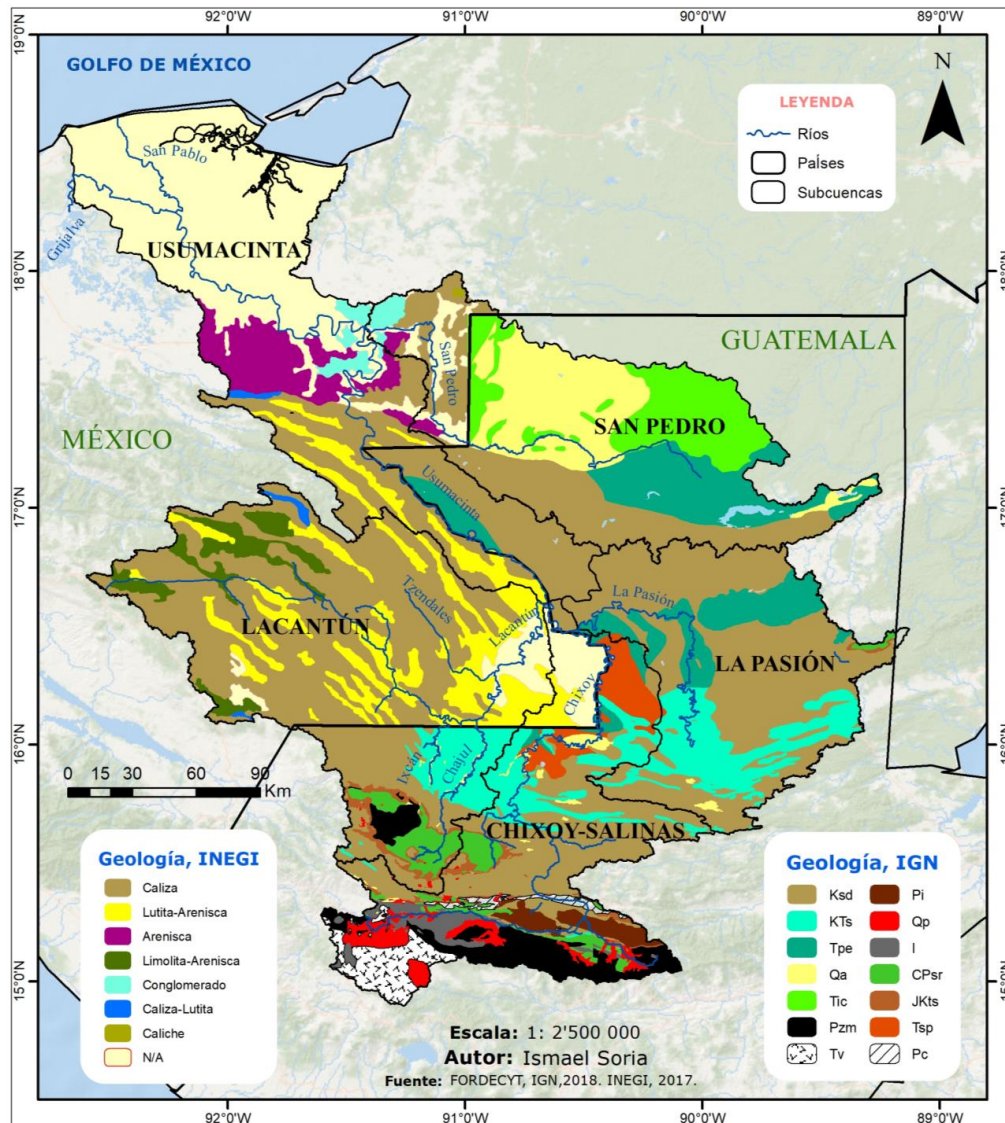
Fig. 3. Variación del caudal medio diario (1948-2014) y de la precipitación media mensual (1950-2000) del río Usumacinta medidos en la estación Boca del Cerro (Modificado por Soria, 2020 de CNA, 2019)

### III. Litología

Según datos del INEGI (2018) y del IGN (2018) en el análisis de información cartográfica, mencionan que los carbonatos del Cretácico cubren aproximadamente el 43% del área de la cuenca, por lo que la geomorfología kárstica define en gran parte la dinámica acuática.

La cuenca alta está integrada por la zona montañosa de la Sierra de los Cuchumatanes (Guatemala), la Sierra Madre de Chiapas y los Altos de Chiapas. La Sierra de los Cuchumatanes se compone por calizas y dolomías del Cretácico, la Sierra Madre por dioritas y granitos del Paleozoico y los Altos de Chiapas por carbonatos marinos y continentales del Mesozoico con algunos depósitos volcánicos del Cenozoico (Muñoz-Salinas et al., 2016; Marshall, 2007). Por otro lado, la cuenca media se conforma mayoritariamente por rocas sedimentarias marinas que presentan estructuras y formaciones particulares bajo la siguiente secuencia: calizas del Cretácico Superior, calizas, lutitas y areniscas del Terciario y conglomerados del Plioceno-Pleistoceno. La

zona de la planicie costera es un área de bajo relieve que contiene la zona de humedales y pantanos que se constituye por rocas sedimentarias del Cenozoico de origen aluvial y lacustre, que se depositaron por continuas transgresiones y regresiones marinas (Saavedra et al., 2015) (Fig.4).



Nota: Ksd = Carbonatos del Cretácico, KTs = Sedimentos clásticos marinos del Cretácico-Terciario, Tpe = Sedimentos marinos del Terciario, Qa = Rocas volcánicas del Cuaternario, Tic = Yeso y Marga del Terciario; Pzm = Rocas metamórficas Paleozoicas; Tv = Rocas volcánicas sin dividir del Terciario; Pi = Rocas ígneas del Jurásico-Cretácico; Qp = Cenizas volcánicas del Cuaternario; I = Rocas Intrusivas del Paleozoico y Mesozoico; CPsr = Rocas sedimentarias del Carbonífero y Pérmico; JKts = Formación Todos Santos del Jurásico-Cretácico; Tsp = Depósitos Continentales del Terciario; Pc = Carbonatos del Pérmico.

Fig. 4. Mapa geológico de la cuenca del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).

#### IV. Tipos de vegetación y uso de suelo

A lo largo de la cuenca del río Usumacinta existe una gran diversidad de tipos de vegetación debida a la particularidad de paisajes topográficos y la complejidad de la red hidrológica. El cambio de uso de suelo asociado a la deforestación para el uso extensivo de la agricultura (cultivos de cafetales y palma africana) y de pastizales para uso ganadero intensivo, son factores que rigen y regulan la dinámica de la cobertura vegetal en toda la cuenca (Soares y García, 2017). A pesar de que entre México y Guatemala existen múltiples variaciones en la vegetación, así como entre los estados de la República Mexicana, domina el uso subsistente de la agricultura de roza-tumba y quema, que utiliza cantidades exorbitantes de pesticidas y agroquímicos (INEGI, 2018). Soria (2020) realizó un análisis cartográfico (Fig. 5) donde se observa que el 45% de la cuenca tiene una cobertura vegetal de bosque (23,578 km<sup>2</sup>) y de selva (11,221 km<sup>2</sup>), el 36% de pastizal (14,099 km<sup>2</sup>) y agricultura (13,527 km<sup>2</sup>), y el 19% restante corresponde a cuerpos de agua (5,318 km<sup>2</sup>), matorral (4,621 km<sup>2</sup>), vegetación hidrófila (4,313 km<sup>2</sup>) y otras cubiertas (456 km<sup>2</sup>).



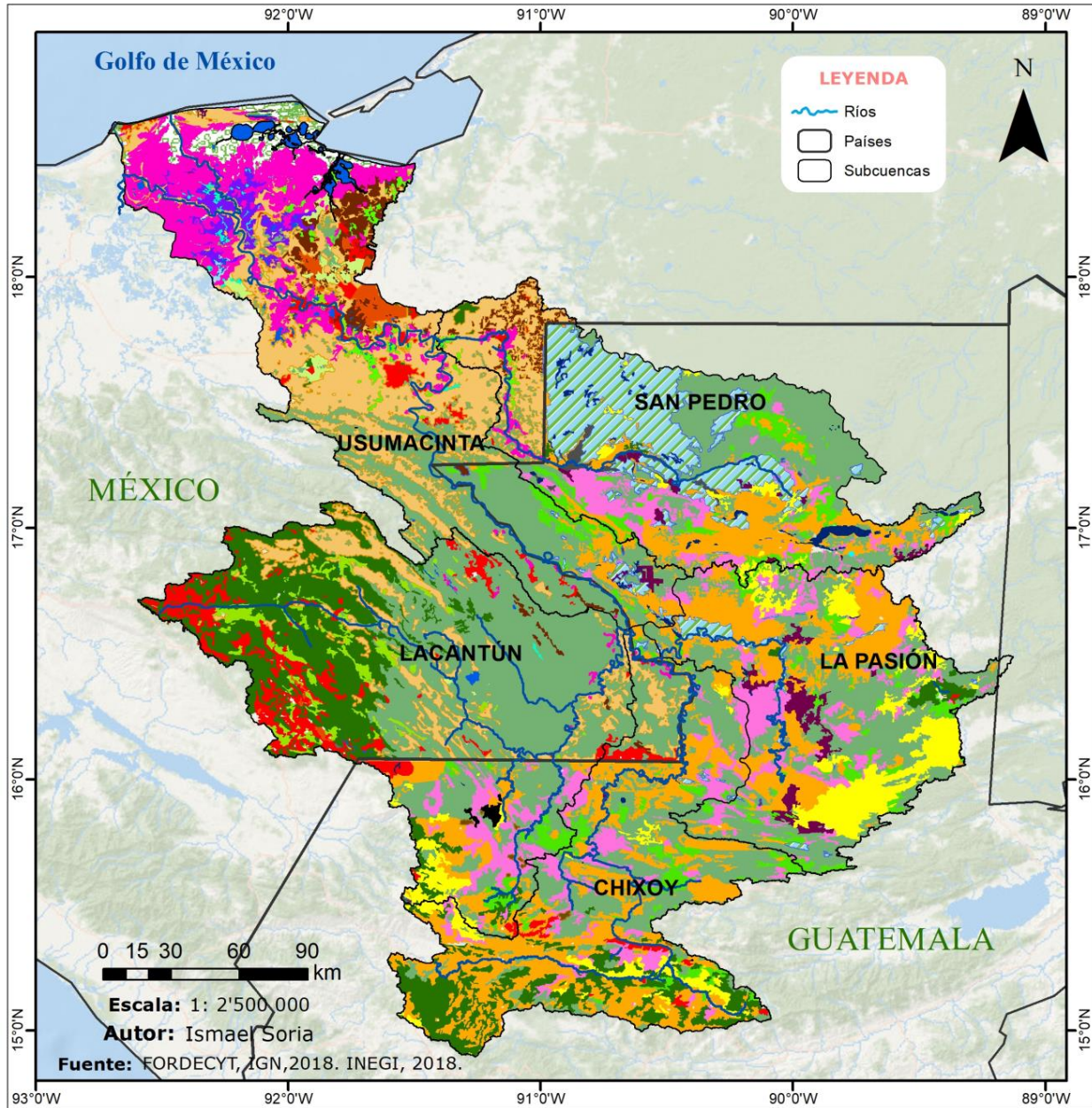


Fig. 5. Mapa de vegetación y uso de suelo de la cuenca del río Usumacinta. (Tomado de Soria, 2020).

## Materiales y Métodos

Para la obtención de las muestras para los análisis de la concentración de MTP y Clor-a se realizaron dos campañas de campo en épocas hidrológicas contrastantes. La primera salida se llevó a cabo en octubre de 2017 en temporada de lluvias (TL), la segunda salida fue en abril de 2018 en temporada de secas (TS). En cada visita de campo se tomaron muestras en 18 estaciones, todas ubicadas en la porción mexicana del río Usumacinta en la cuenca media (M) y baja (B), donde se establecieron claves de M1 a M13 y B1 a B5, respectivamente (Fig. 6).

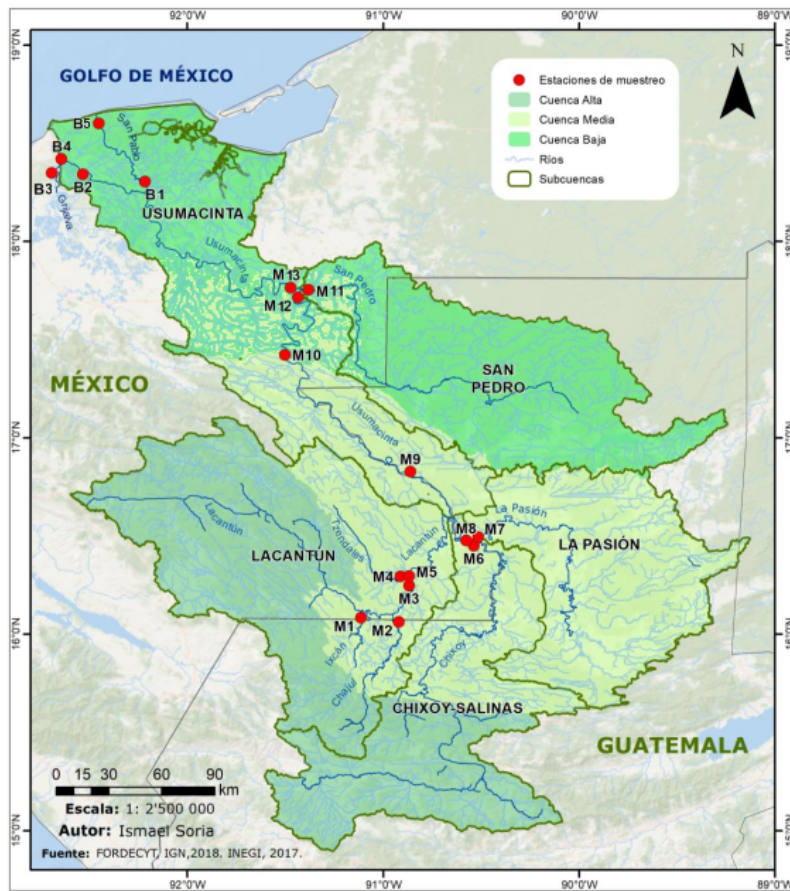


Fig. 6. Estaciones de muestreo en la cuenca del río Usumacinta (Tomado de Soria, 2020).

## I. Trabajo de laboratorio previo a las visitas de campo

Para las muestras de MTP se utilizaron filtros Whatman® tipo GF/F de 47 mm de diámetro (0.7  $\mu\text{m}$  de apertura nominal de poro) que fueron combustionados a 500°C por cuatro horas en una mufla marca Thermolyne modelo 48000 con el fin de eliminar cualquier residuo presente. Los filtros calcinados se transfirieron a un desecador en donde se dejaron hasta alcanzar la temperatura ambiente. Una vez fríos, se pesaron en una balanza analítica marca Sartorius® modelo CP 124 (denominado “peso inicial”) y se envolvieron en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros. Así se almacenaron en un desecador hasta el momento de filtración en campo (Karl et al., 1991).

En el caso de la medición de la concentración de la Clor-a se recortaron filtros Whatman® tipo GF/F (0.7  $\mu\text{m}$  de apertura nominal de poro) para ser utilizados en equipos de 13 mm de diámetro. Una vez recortados se almacenaron hasta el proceso de filtración en campo.

## II. Trabajo de campo

En cada estación se estableció un transecto transversal en el que primero se determinó un perfil batimétrico con una Ecosonda Garmin GPSMAP 526S. En cada transecto se establecieron tres perfiles: uno al centro de la corriente y dos a 1/3 de ambas orillas, donde se midieron *in situ* variables fisicoquímicas (temperatura, concentración de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y turbidez) con ayuda de una sonda multiparamétrica de calidad del agua marca Hydrolab® modelo DS5 acoplado a un sistema de captura y almacenamiento de información marca Hydrolab® modelo SVR4. Asimismo, se midieron la profundidad del disco de Secchi y la velocidad de la corriente con un flujómetro Swoffer 3000.

Para la obtención de las concentraciones de MTP y de Clor-a, se utilizaron muestras de agua obtenidas con una botella horizontal tipo Van Dorn la cual se sumergió a una profundidad de 1/3 de la profundidad máxima en cada sitio de muestreo. Este procedimiento se siguió en cada uno de los tres puntos por estación y el agua se almacenó en envases previamente enjuagados con agua del sitio.

Las muestras para el análisis de MTP se filtraron primero a través de una malla de 100 µm para eliminar al zooplancton de mayor tamaño (“swimmers”) que pudiera alterar la evaluación de las muestras (Lee et al., 1988; Karl, 1991). Posteriormente, la MTP se cuantificó por triplicado (más un blanco) mediante gravimetría. La filtración se realizó con ayuda de una bomba de vacío, sin exceder las 0.3 atm de presión para evitar la pérdida de material, en equipos de filtración analíticos Millipore® de vidrio Pyrex con soporte de vidrio sinterizado. El volumen de muestra que se filtró fue de entre 250 y 500 ml dependiendo de la turbidez.

Para la obtención de la concentración de la Clor-a se filtraron tres sub-muestras por punto para cada estación con ayuda de equipos de filtración analíticos Millipore® con soporte para filtros Whatman® tipo GF/F de 13 mm de diámetro. La filtración se llevó a cabo con ayuda de una bomba de vacío. En este proceso se filtró un volumen que osciló entre los 20 y 80 ml dependiendo de su turbidez. Los filtros se almacenaron y etiquetaron en papel dentro de un frasco con sílica-gel y se mantuvieron en frío y oscuridad hasta su análisis posterior (Karl et al., 1991).

### III. Trabajo de laboratorio

Las muestras de MTP se pesaron con ayuda de una balanza analítica marca Sartorius® modelo CP 124 (denominado como “peso final”) para obtener la diferencia de pesos y conocer su peso total a través de la siguiente ecuación:

$$MTP = \frac{[(Peso\ final - Peso\ inicial) - Blanco] * 1,000}{Volumen\ filtrado}$$

Donde:

$$MTP = mg\ L^{-1}$$

Para medir la concentración de Clor-a se colocaron los filtros en un tubo de ensayo al cual se le adicionaron 5 ml de acetona al 90% como solvente de extracción. Posteriormente se procedió a moler los filtros con ayuda de un macerador de tejidos. Seguido a esto, se le adicionaron otros 5 ml de acetona al 90% para enjuagar el pestillo y trasladado a tubos de centrifuga de 15 ml previamente etiquetados y cubiertos con

cinta de aislar negra. Estos tubos fueron almacenados en oscuridad total y en refrigeración a 4 °C por un lapso de entre 20 y 22 horas para obtener la extracción.

Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas a 17,000 r.p.m. durante 15 minutos. Enseguida se decantó el sobrenadante y se tomó la lectura de la fluorescencia de la muestra con ayuda de un fluorómetro Turner Designs modelo 10-AU previamente calibrado (Arar y Collins, 1997). Algunas muestras fueron diluidas con acetona para poder ser medidas dentro del intervalo de detección del equipo calibrado para alta precisión en un intervalo de concentración baja. Una vez obtenida la señal del fluorómetro, se utiliza el algoritmo de la siguiente ecuación, establecido en el método 445.0 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (Arar y Collins, 1997).

$$C_{S, u} = \frac{C_{E, u}(\text{Volumen extraído (L)} (FD))}{\text{Volumen muestreado (L)}}$$

Donde:

$C_{S, u}$  = Concentración de Clor-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en toda la muestra de agua,

$C_{E, u}$  = Concentración de Clor-a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) no corregida en la solución extraída y analizada,

Volumen extraído = Volumen (L) de la extracción preparado antes de ser diluida,

FD = Factor de dilución,

Volumen muestreado = Volumen (L) de toda la muestra de agua.

Por último, se calcularon las diferencias estadísticas de las concentraciones de MTP y Clor-a entre temporadas (TL y TS), así como entre cuenca media y baja a través de la prueba de Wilcoxon con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05. La relación entre los fisicoquímicos y las concentraciones de MTP y Clor-a, así como la relación entre MTP y Clor-a se midieron a través del coeficiente de correlación de Spearman con un  $\alpha = 0.05$ . Estos cálculos se realizaron con ayuda del Software R versión 3.6.3.

## Resultados

### I. Parámetros fisicoquímicos

La mayor profundidad que se registró fue de  $5.68 \pm 5.01$  m durante la TL disminuyendo en la TS con  $4.80 \pm 4.95$  m. La temperatura fue más elevada durante la TS con  $28.24 \pm 0.84$  °C aumentando de la cuenca media a la cuenca baja, mientras que en la TL la temperatura fue menor con  $25.21 \pm 1.68$  °C y de la misma forma aumentando de la cuenca media hacia la cuenca baja. Para el caso del oxígeno disuelto, la concentración fue mayor en la TS con  $7.60 \pm 1.71$  mg L<sup>-1</sup>, con respecto a la TL con  $5.17 \pm 2.26$  mg L<sup>-1</sup>; para ambas temporadas se presentó una disminución de la cuenca media a la cuenca baja. La conductividad eléctrica ( $K_{25}$ ) es la capacidad de transportar energía eléctrica a través de iones disueltos en el agua, ésta fue mayor durante la TS con  $8,845.56 \pm 15,612.45$  μS/cm en comparación con la de TL con  $356.60 \pm 73.03$  μS/cm; en la TS la  $K_{25}$  fue aumentando desde la cuenca media hasta alcanzar valores mayores en la cuenca baja, en particular fue mayor en la cuenca baja debido a la presencia de una cuña salina que se forma durante la TS. Durante la TL la  $K_{25}$  se mantuvo estable a lo largo del río (Tabla 1). Para el caso de la turbidez ocurre el proceso contrario, es decir, que para la temporada de lluvias fue mayor con  $51.30 \pm 26.90$  UNT debido al arrastre de material durante esta época.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos medidos en las estaciones de muestreo durante TL y TS en el río Usumacinta.

		Z max (m)		Temp (°C)		OD (mg L <sup>-1</sup> )		pH		K <sub>25</sub> (μS cm <sup>-1</sup> )		Turb (UNT)	
		TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS
<b>Media</b>	<b>x</b>	5.97	4.29	24.53	28.13	5.90	8.43	7.71	7.94	356.01	723.67	51.73	46.55
	<b>σ</b>	5.35	5.45	1.33	0.79	1.99	0.74	0.23	0.13	83.58	165.32	29.50	30.91
<b>Baja</b>	<b>x</b>	4.79	5.60	27.28	28.41	2.99	6.33	7.49	7.85	358.40	21,416.38	50.01	42.18
	<b>σ</b>	3.68	3.94	0.55	0.88	1.48	1.98	0.16	0.18	18.98	19,026.23	16.83	49.06
<b>Total</b>	<b>x</b>	5.68	4.80	25.21	28.24	5.17	7.60	7.66	7.91	356.60	8,845.56	51.30	44.83
	<b>σ</b>	5.01	4.95	1.68	0.84	2.26	1.71	0.23	0.16	73.02	15,612.45	26.90	31.66

x: promedio;  $\sigma$ : desviación estándar; Z max: profundidad máxima; Temp: temperatura; OD: concentración de oxígeno disuelto;  $K_{25}$ : conductividad eléctrica; Turb: turbidez.

## II. Concentración de MTP

Se encontraron concentraciones mayores durante la TL con un valor promedio de  $71.1 \pm 30.9 \text{ mg L}^{-1}$  que varió entre 6.8 y  $131 \text{ mg L}^{-1}$  (Fig. 6). Durante la TS, varió entre 2.3 y  $42.8 \text{ mg L}^{-1}$  con un valor promedio total de  $16.1 \pm 10.5 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabla 2).

Se obtuvieron diferencias significativas entre TL y TS ( $W = 6192$ ,  $p < 0.05$ ; Fig. 8). No se encontraron diferencias en las concentraciones entre cuencas ( $W = 2783$ ,  $p > 0.05$ ; Fig. 9). Se encontró una correlación positiva con la turbidez durante TL ( $\rho = 0.82$ ,  $p < 0.05$ ). No se encontró una correlación significativa para ninguna de las dos temporadas con Clor-a ( $\rho = -0.16$ ,  $p > 0.05$  para TL;  $\rho = 0.024$ ,  $p > 0.05$  para TS).

Tabla 2. Concentración de MTP medida en las estaciones de muestreo durante TL y de TS en el río Usumacinta.

		Materia total particulada ( $\text{mg L}^{-1}$ )	
		TL	TS
<b>Media</b>	<b>x</b>	70.6	18.5
	<b><math>\sigma</math></b>	35.6	11.2
<b>Baja</b>	<b>x</b>	72.3	10
	<b><math>\sigma</math></b>	17	4.7
<b>Total</b>	<b>x</b>	71.1	16.1
	<b><math>\sigma</math></b>	30.9	10.5

x: promedio;  $\sigma$ : desviación estándar.

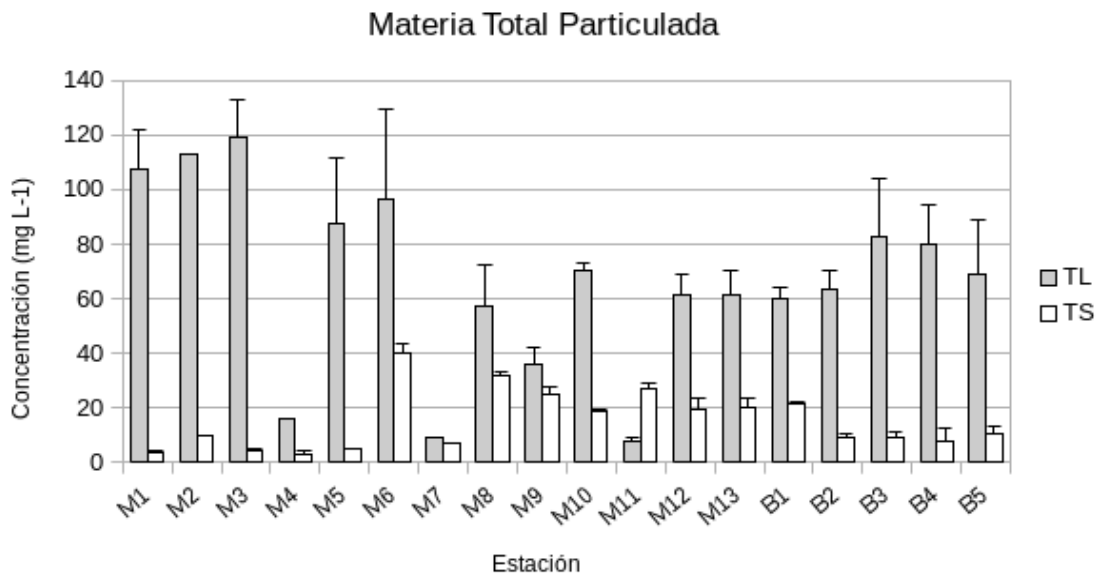


Fig. 7. Concentración de MTP promedio y desviación estándar a lo largo del río Usumacinta durante TL y TS.

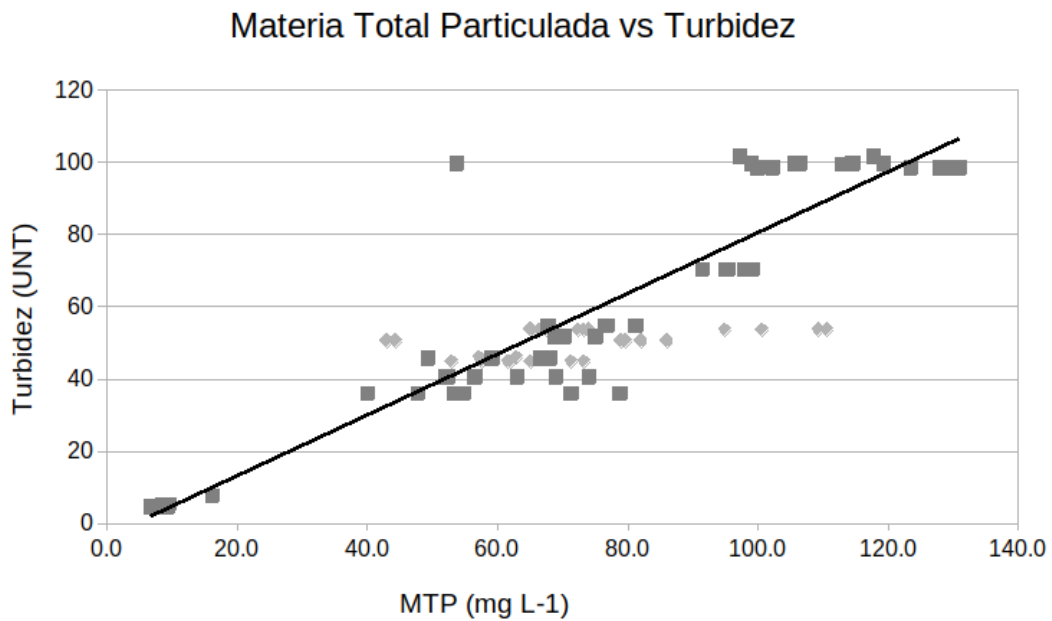


Fig. 8. Correlación positiva entre MTP y turbidez en el río Usumacinta en TL. Cuenca media (gris oscuro); cuenca baja (gris claro).



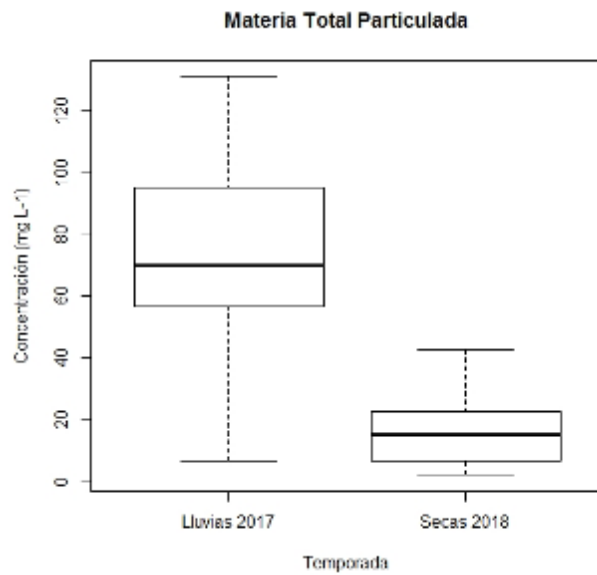


Fig. 9. Comparación de las concentraciones de MTP entre TL y TS en el río Usumacinta.

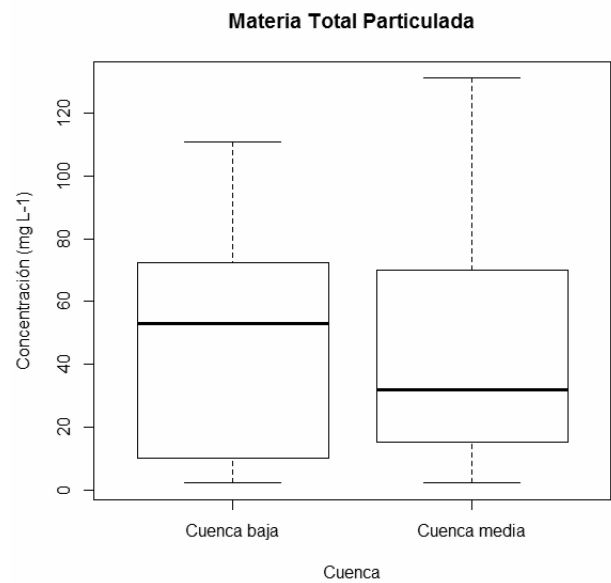


Fig. 10. Comparación de las concentraciones de MTP entre cuenca baja y cuenca media en el río Usumacinta.

### III. Concentración de Clor-a

La concentración de Clor-a fue menor en la TL en comparación con la TS. La tendencia general durante ambas temporadas fue un aumento de las concentraciones de Clor-a desde la cuenca media hacia la cuenca baja del río. Los valores de la concentración de Clor-a en la TL variaron entre 0.1 y 4.8  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Fig. 8). Durante esta época se registró un valor de  $1.1 \pm 0.8 \mu\text{g L}^{-1}$  para la cuenca media aumentando hacia la cuenca baja con  $3.6 \pm 0.5 \mu\text{g L}^{-1}$  (Tabla 3).

La concentración de Clor-a en la TS varió entre 0 y 20.34  $\mu\text{g L}^{-1}$ . El valor promedio más alto se registró en la cuenca baja con  $7 \pm 4.2 \mu\text{g L}^{-1}$  (Tabla 3). Se presentaron diferencias significativas en las concentraciones entre la TL y TS ( $W = 5820.5$ ,  $p < 0.05$ ; Fig. 11) y también entre la cuenca baja y la cuenca media (Fig. 12). Se encontró una correlación positiva con la temperatura ( $\rho = 0.84$ ,  $p < 0.05$ ) y una correlación negativa con la concentración del oxígeno disuelto ( $\rho = -0.72$ ,  $p < 0.05$ ) y con el pH ( $\rho = -0.71$ ,  $p < 0.05$ ) durante la TL. En la TS se encontró una correlación negativa con la

concentración del oxígeno disuelto ( $\rho = -0.61$ ,  $p < 0.05$ ) y una correlación negativa con la conductividad ( $\rho = 0.61$ ,  $p < 0.05$ ).

Tabla 3. Concentración de Clor-a medida durante TL y TS en el río Usumacinta.

		Clorofila "a" ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	
		TL	TS
<b>Media</b>	<b>x</b>	1.1	2.1
	<b><math>\sigma</math></b>	0.8	1.7
<b>Baja</b>	<b>x</b>	3.6	7
	<b><math>\sigma</math></b>	0.5	4.2
<b>Total</b>	<b>x</b>	1.4	3.6
	<b><math>\sigma</math></b>	0.1	3.5

x: promedio;  $\sigma$ : desviación estándar.

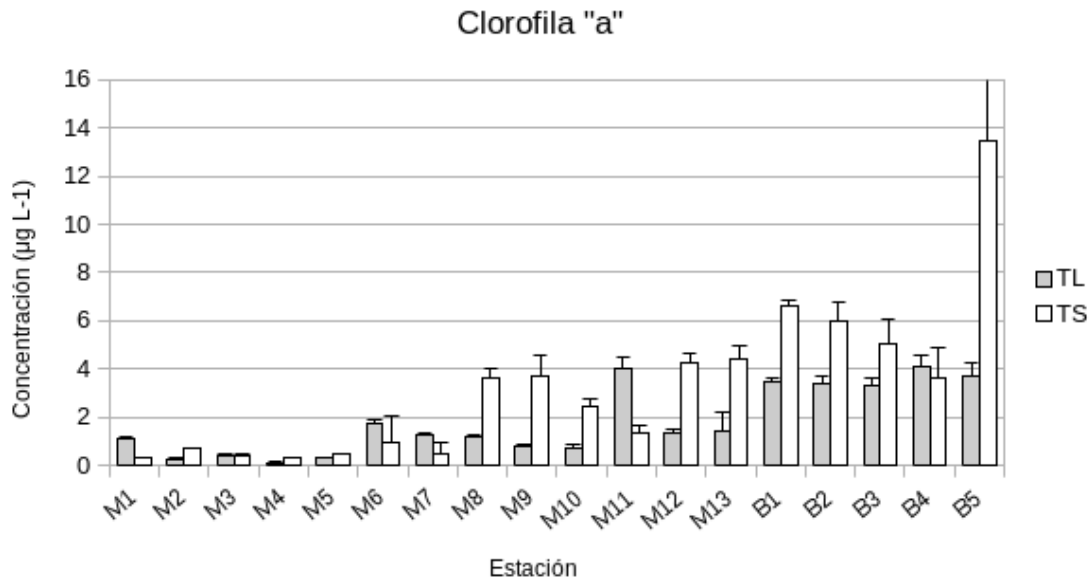


Fig. 11. Concentración de Clor-a promedio y desviación estándar a lo largo del río Usumacinta en la TL y TS.

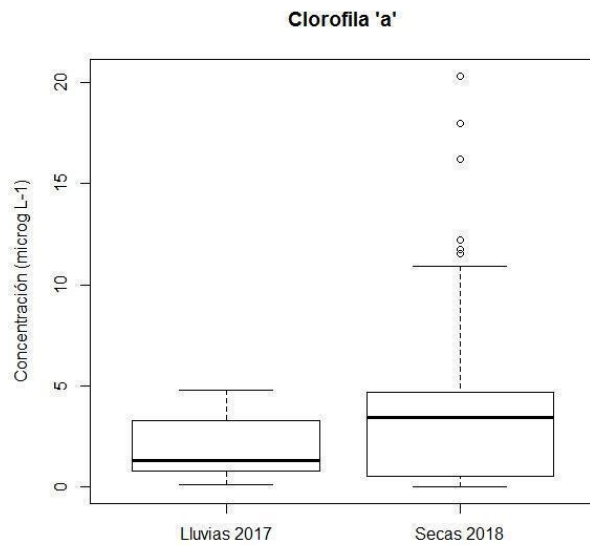


Fig. 12. Comparación de las concentraciones de Clor-a entre TL y TS en el río Usumacinta.

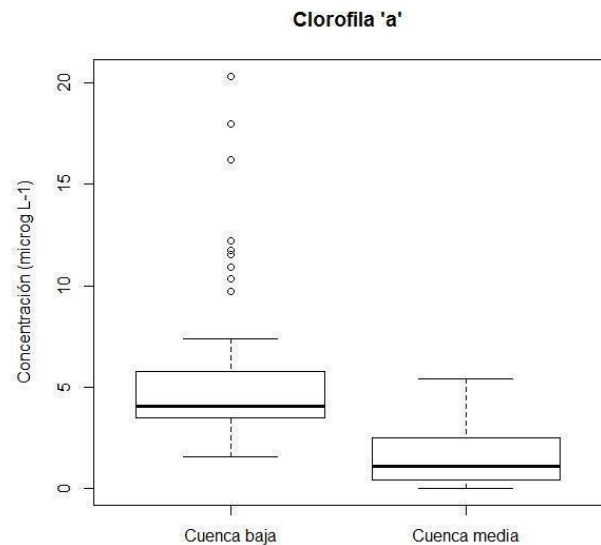


Fig. 13. Comparación de las concentraciones de Clor-a entre la cuenca media y baja en el río Usumacinta.

## Discusión

### I. Materia total particulada

Los valores registrados en la presente investigación son más bajos en comparación con el promedio global estimado en  $500 \text{ mg L}^{-1}$  para ecosistemas fluviales (Milliman y Farnsworth, 2011). Los resultados indican un aumento en los valores de las concentraciones de MTP durante la TL en comparación con la TS. De manera general, el transporte de sedimentos fluviales depende de varios factores como el tipo y uso de suelo (cobertura vegetal) la topografía, la precipitación y las diversas actividades antrópicas en la cuenca de drenaje. La capacidad de transporte de materiales en suspensión del lecho del río se asocia a una función de potencia en relación con la estacionalidad de la descarga del río (McKee et al., 2004; Meade, 1996). Las descargas más altas implican un aumento en la turbulencia y la velocidad del agua, lo que implica una mayor capacidad de transporte del material en suspensión (Dudgeon, 2008; Hillebrand, 2018). Este aumento de la descarga se asocia con frecuencia a la

erosión del suelo y a la entrada de sedimentos finos por eventos de precipitación y escorrentía en la cuenca del río. Esto concuerda con la correlación positiva entre la turbidez y la MTP durante la temporada de lluvias (Fig. 6).

Las lluvias iniciales de la TL producen el movimiento de las capas superficiales del suelo y los sedimentos, a medida que la descarga sigue aumentando, las concentraciones relativas de MTP disminuyen, como se observa en los picos de concentración máxima y de descarga en otros ríos (p. ej., Hillebrand et al., 2018; Tamooh et al., 2014). Sin embargo, en el río Usumacinta no hay una correlación entre la descarga y la concentración de MTP, por lo que no siempre están sincronizadas (Oseguera et al., 2018).

Como se observa en la Fig. 6, hay una disminución en la concentración de MTP hacia la cuenca baja, que muestra similitud con los valores reportados por Oseguera et al. (2018) donde se menciona que la concentración de MTP en el río Usumacinta disminuye longitudinalmente en dirección de la desembocadura. En otros ríos como el de Tana en Kenia, existe una fuerte estacionalidad en los valores de concentración que varían por varios órdenes de magnitud ( $24 - 9,386 \text{ mg L}^{-1}$ ), donde se muestra una clara tendencia a la disminución de la materia en suspensión de aguas arriba a aguas abajo, siendo más pronunciada durante las condiciones de alta descarga (Tamooh et al., 2014).

## II. Clorofila “a”

En diferentes estudios de ríos tropicales se reportan valores similares a los encontrados en el río Usumacinta. Por ejemplo, en el río Almada en Brasil se encontró una variación de  $< 0.5$  a  $17 \mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  (Santana et al., 2016) y de  $1.4$  a  $12 \mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  en los ríos subtropicales de la cuenca del Iguapé, Brasil (Calijuri et al., 2008). Sin embargo, en otros ríos tropicales se encontraron valores mayores como  $6.7 \pm 10.05 \mu\text{g Clor-a L}^{-1}$  ( $0.47$  a  $66 \mu\text{g Clor-a L}^{-1}$ ) en la cuenca del río Poxim, Brasil (Oliveira et al., 2013) o bien  $14.6 \text{ mg Clor-a L}^{-1}$  ( $7.6$  a  $27.1 \text{ mg Clor-a L}^{-1}$ ) en el río Boubo, Costa de Marfil (Ouffoué et al., 2013).

En el río Usumacinta se observó durante ambas temporadas un aumento en la concentración de Clor-a desde la cuenca media hacia la cuenca baja (Fig. 10), al igual

que lo reportado en los ríos Almada, Poxim y Boubou (Oliveira et al., 2013; Ouffoué et al., 2013; Santana et al., 2016). Aunque no se observó en el río Usumacinta, estos autores atribuyen esta tendencia a la presencia de macrófitas en la cuenca alta, que limitan el desarrollo del fitoplancton. Para el caso del Usumacinta, la tendencia de aumento podría deberse al cambio en la pendiente y por lo tanto, de la velocidad del caudal, así como el cambio en el uso de suelo a lo largo de la cuenca. Por otro lado, las diferencias estacionales en los demás ríos mostraron una mayor concentración de Clor-a en la temporada de lluvias (Oliveira et al., 2013; Ouffoué et al., 2013; Santana et al., 2016), caso contrario a lo que se reportó para el río Usumacinta (Cuevas et al., 2018).

Para el caso de los ríos subtropicales de la cuenca de Iguapé en Brasil, no se encontraron relaciones consistentes entre la concentración de fósforo y la Clor-a, apuntando que otros factores como la ausencia de luz y el corto tiempo de residencia pueden restringir el desarrollo de algas (Calijuri et al., 2008). En este sentido, la mayor concentración de Clor-a que se observó en el río Usumacinta durante la TS, se puede atribuir a los bajos caudales que asimismo reducen la turbidez. En general, las bajas descargas incrementan los tiempos de retención del agua, lo cual potencia las condiciones de crecimiento del fitoplancton en los ríos (Reynolds y Descy, 1996).

Las condiciones ambientales tales como la turbidez y la turbulencia son dos factores que varían en el tiempo y pueden restringir la cantidad de luz que afecta de forma adversa el desarrollo del fitoplancton (Hilton et al., 2006; Smith, 2009). Es por eso por lo que la mayor disponibilidad de luz se relaciona con la TS ya que al disminuir el caudal, disminuye el transporte de sólidos suspendidos asociados a la turbulencia y por tanto la turbidez que favorece el desarrollo del fitoplancton y el aumento en la concentración de Clor-a.

Durante la TS, el aumento en las concentraciones de Clor-a reflejan un aumento en la turbidez biogénica en algunas secciones del río, sin embargo, estos valores no alcanzaron los mismos que en la TL, durante la cual los sólidos suspendidos asociados a la turbulencia aumentan en tal cantidad que restringen la cantidad de luz. En general, las condiciones de luz más favorables durante la TS podrían ayudar a explicar las mayores concentraciones de Clor-a en el río Usumacinta.

Para el caso del río Poxim, se encontraron correlaciones bajas entre las concentraciones de Clor-a y de oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y los sólidos suspendidos totales (Oliveira et al., 2013). En el río Usumacinta, se encontró una correlación positiva con la temperatura y la conductividad eléctrica, sin embargo, ésta no es consistente.

Para el caso del río Támesis en Inglaterra, reportan que sólo en flujos bajos las concentraciones de Clor-a se correlacionan de manera positiva con el área de captación y el caudal (Neal et al., 2006); así mismo, las concentraciones de Clor-a fueron de 2 a 9 veces mayores gracias al aumento en la actividad biológica de algas planctónicas durante la temporada de menor flujo, debido a que durante caudales bajos hay poca re-suspensión de algas bentónicas (Neal et al., 2006). Mientras que en el río Usumacinta, de manera muy similar, las concentraciones mayores se presentaron durante la temporada seca, pero a lo largo del río las concentraciones fueron mayores en la cuenca baja, donde los caudales y el área de captación son mayores (Cuevas et al., 2018).

### **Conclusiones**

- La concentración de MTP es mayor en la temporada de lluvias debido a que se arrastra material de la cuenca de drenaje y el caudal del río aumenta. Sin embargo, no se presentó correlación alguna entre la concentración y el flujo, ya que, al parecer, no están sincronizadas.
- La concentración de MTP permanece constante a lo largo del cauce del río, sin embargo, hay una ligera disminución hacia la cuenca baja.
- La mayor concentración de Clor-a en la TS puede explicarse por la disminución del caudal que aumenta los tiempos de retención, así como por la disminución de la turbidez, condiciones que favorecen el desarrollo de las algas planctónicas.
- La concentración de Clor-a tiene una tendencia de aumento hacia la cuenca baja en ambas temporadas donde los flujos son menores.

## Referencias

- Alcocer, J. (2007). El agua epicontinental de México. *Revista Ciencia*, 58(3), 26–35.  
[https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/58\\_3/PDF/05-548.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/58_3/PDF/05-548.pdf)
- Allan, D. J., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters* (2nd ed.). Springer.
- Arar, E. J., & Collins, G. B. (1997). *Method 445.0*. In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency.
- Benke, A. C., & Cushing, C. E. (2009). *Rivers of North America (English Edition)* (1.<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- Bouillon, S., Yambélé, A., Spencer, R. G. M., Gillikin, D. P., Hernes, P. J., Six, J., Merckx, R., & Borges, A. V. (2012). Organic matter sources, fluxes and greenhouse gas exchange in the Oubangui River (Congo River basin). *Biogeosciences*, 9(6), 2045–2062. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2045-2012>
- Bowes, M., Gozzard, E., Johnson, A., Scarlett, P., Roberts, C., Read, D., Armstrong, L., Harman, S., & Wickham, H. (2012). Spatial and temporal changes in chlorophyll-a concentrations in the River Thames basin, UK: Are phosphorus concentrations beginning to limit phytoplankton biomass? *Science of The Total Environment*, 426, 45–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.056>
- Calijuri, M. C., Cunha, D. G. F., Queiroz, L. A., Moccellini, J., & Miwa, A. C. P. (2008). Nutrients and chlorophyll-a concentrations in tropical rivers of Ribeira de Iguape Basin, S P, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 20(2), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.056>
- Carabias, J., Provencio, E., Gutiérrez, D., Gómez, M., & López, A. (2000). *Programa de manejo Reserva de la Biosfera Montes Azules, México* (1.<sup>a</sup> ed.). Instituto Nacional de Ecología.

- CNA. (2011a). Estadísticas del agua en México. *Situación de los recursos hídricos*. (pp. 17–35). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CNA. (2011b). *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CNA. (2018). *Atlas del agua en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CNA. (2019). *Index of/Bandas/Bases\_Datos\_Bandas*. CONAGUA. [ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases\\_Datos\\_Bandas](ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas)
- Cole, G. A. (1994). *Textbook of Limnology* (5.<sup>a</sup> ed.). Waveland Pr Inc.
- Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. (1.<sup>a</sup> ed.). Pluralia.
- Coyne, A., Seyler, P., Etcheber, H., Meybeck, M., & Orange, D. (2005). Spatial and seasonal dynamics of total suspended sediment and organic carbon species in the Congo River. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), n/a. <https://doi.org/10.1029/2004gb002335>
- Cuevas, D., Cortés, G. D., Oseguera, L. A., & Alcocer, J. (2018). Variación de la biomasa fitoplanctónica a lo largo del río Usumacinta durante temporadas hidrológicas contrastantes. En F. Paz, A. Velázquez, & M. Rojo (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018* (pp. 412–418). Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora.
- Dudgeon, D. (2008). *Tropical Stream Ecology (Aquatic Ecology) (English Edition)* (1.<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- Galizia, T. J., & Matsumura, T. T. (2012). *Limnology* (1.<sup>a</sup> ed.). CRC Press.
- Geeraert, N., Omengo, F. O., Tamoo, F., Marwick, T. R., Borges, A. V., Govers, G., & Bouillon, S. (2018). Seasonal and inter-annual variations in carbon fluxes in a tropical river system (Tana River, Kenya). *Aquatic Sciences*, 80(2). <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0573-4>



- Gessner, M., & Chauvet, E. (1997). Growth and production of aquatic hyphomycetes in decomposing leaf litter. *Limnology and Oceanography*, 42(3), 496–505. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.3.0496>
- Grodsky, S. A., & Carton, J. A. (2003). The Intertropical Convergence Zone in the South Atlantic and the Equatorial Cold Tongue. *Journal of Climate*, 16(4), 723–733. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C0723:TICZIT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C0723:TICZIT%3E2.0.CO;2)
- Hardenbicker, P., Rolinski, S., Weitere, M., & Fischer, H. (2014). Contrasting long-term trends and shifts in phytoplankton dynamics in two large rivers. *International Review of Hydrobiology*, 99(4), 287–299. <https://doi.org/10.1002/iroh.201301680>
- Hillebrand, G., Hardenbicker, P., Fischer, H., Otto, W., & Vollmer, S. (2018). Dynamics of total suspended matter and phytoplankton loads in the river Elbe. *Journal of Soils and Sediments*, 18(10), 3104–3113. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1943-1>
- IGN. (2018). *Instituto Geográfico Nacional*. Instituto Geográfico Nacional. <http://www.ign.gob.gt/>
- Karl, D. M., Dore, J. E., Hebel, D. V., & Winn, C. (1991). Procedures for Particulate Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Total Mass Analyses used in the Us-JGOFS Hawaii Ocean Time-Series Program. *Marine Particles: Analysis and Characterization*, 71–77. <https://doi.org/10.1029/gm063p0071>
- Koch, R. W., Guelda, D. L., & Bukaveckas, P. A. (2004). Phytoplankton growth in the Ohio, Cumberland and Tennessee Rivers, USA: inter-site differences in light and nutrient limitation. *Aquatic Ecology*, 38(1), 17–26. <https://doi.org/10.1023/b:aeco.0000021082.42784.03>
- Lamberti, G. A. (1996). Role of Periphyton in Benthic Food Webs. En J. R. Stevenson, M. L. Bothwell, R. L. Lowe, & J. H. Thorp (Eds.), *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystem (Aquatic Ecology) (English Edition)* (pp. 533–572). Academic Press.

- Lee, C., Wakeham, S., & Hedges, J. (1988). The Measurement of Oceanic Particle Flux—Are «Swimmers» a Problem? *Oceanography*, 1(2), 34–36. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1988.06>
- Lenz, J. (1977). Seston and Its Main Components. *Ecological Studies*, 37–60. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-66791-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-66791-6_5)
- Likens, G. E., & Tockner, K. (Eds.). (2009). Inland Waters. En *Encyclopedia of Inland Waters (English Edition)* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 1–5). Academic Press.
- Lowe, R. L., & La Liberte, G. D. (2007). Benthic Stream Algae: Distribution and Structure. En R. F. Hauer & G. A. Lamberti (Eds.), *Methods in Stream Ecology* (2nd ed., pp. 330–332). Academic Press.
- Lowe, R. L., & Pan, Y. (1996). Benthic algal communities and biological monitors. En J. R. Stevenson, M. L. Bothwell, R. L. Lowe, & J. H. Thorp (Eds.), *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystem (Aquatic Ecology) (English Edition)* (pp. 705–739). Academic Press.
- Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on Precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842304>
- March, M. I., & Castro, M. (2006). *La Cuenca del río Usumacinta: Perfil y Perspectivas para su Conservación y Desarrollo Sustentable*. [https://www.researchgate.net/publication/249994146\\_La\\_Cuenca\\_del\\_Usumacinta\\_Perfil\\_y\\_perspectivas\\_para\\_su\\_conservacion\\_y\\_desarrollo\\_sustentable](https://www.researchgate.net/publication/249994146_La_Cuenca_del_Usumacinta_Perfil_y_perspectivas_para_su_conservacion_y_desarrollo_sustentable)
- Margalef, R. (1983). *Limnología (Spanish Edition)*. Omega.
- McKee, B., Aller, R., Allison, M., Bianchi, T., & Kineke, G. (2004). Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: benthic boundary layer and seabed processes. *Continental Shelf Research*, 24(7–8), 899–926. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.02.009>
- Meade, R. H. (1996). River-Sediment Inputs to Major Deltas. *Coastal Systems and Continental Margins*, 2(1), 63–85. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8719-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8719-8_4)

- Meybeck, M., & Ragu, A. (2012). PANGEA. Data Publisher for Earth & Environmental Science. *GEMS-GLORI world river discharge database*. Published. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.804574>
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2011). *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511781247>
- Muñoz, F., Salgado, J. H., Rocchiccioli, H. M., Shrraddnnand, S., Güitrón De Los Reyes, A., & Lobato, R. (2011). Hidrología Superficial en la Cuenca del Río Grijalva: Calibración del modelo hidrológico de capacidad de infiltración variable (VIC). *Aqua-LAC*, 3(1), 68–80. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2011-v3-1-09>
- Muñoz-Salinas, E., & Castillo, M. (2015). Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena*, 127, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.007>
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Sanderson, D., Kinnaird, T., & Cruz-Zaragoza, E. (2016). Using three different approaches of OSL for the study of young fluvial sediments at the coastal plain of the Usumacinta-Grijalva River Basin, southern Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 823–834. <https://doi.org/10.1002/esp.3880>
- Neal, C., Hilton, J., Wade, A. J., Neal, M., & Wickham, H. (2006). Chlorophyll-a in the rivers of eastern England. *Science of The Total Environment*, 365(1–3), 84–104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.039>
- Nooren, K., Hoek, W. Z., Winkels, T., Huizinga, A., van der Plicht, H., van Dam, R. L., van Heteren, S., van Bergen, M. J., Prins, M. A., Reimann, T., Wallinga, J., Cohen, K. M., Minderhoud, P., & Middelkoop, H. (2017). The Usumacinta–Grijalva beach-ridge plain in southern Mexico: a high-resolution archive of river discharge and precipitation. *Earth Surface Dynamics*, 5(3), 529–556. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-529-2017>
- Oseguera, L. A., Alcocer, J., Cuevas, D., & Cortés, G. D. (2018). Suspended Sediments Content Along the Usumacinta River, the Mexican Tropics. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34, 196–198.

- Ouffoué, K. S., Salla, M., Kicho, D. Y., Soro, D., DA, K. P., & Tonzibo, Z. F. (2013). Water Quality Assessment of the Coastal Tropical River'Sboubo (Côte d'Ivoire): Physico-Chemical and Biological Aspects. *Journal of Environment Pollution and Human Health*, 1(2), 9–15. <https://doi.org/10.12691/jephh-1-2-1>
- Reynolds, C. S. (2000). Hydroecology of river plankton: the role of variability in channel flow. *Hydrological Processes*, 14(16–17), 3119–3132. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/)
- Roldan, P. G., & Ramírez, J. R. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. (2.<sup>a</sup> ed.). Universidad de Antioquia.
- Rosales, E. R. (2012). Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta. *FORDECYT-CONACYT-CENTROGEO*, 105. [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/01/metodologia\\_y\\_estimacion\\_del\\_balance\\_hidrico\\_cuenca\\_usumacinta.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/01/metodologia_y_estimacion_del_balance_hidrico_cuenca_usumacinta.pdf)
- Saavedra, A. G., López, D. M., & Castellanos, L. A. (2015). Descripción del medio físico de la cuenca media del río Usumacinta en México. En J. Carabias, J. de la Maza, & R. Cadena (Eds.), *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona. 25 años de actividades y experiencias., México, natura y ecosistemas mexicanos* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 19–34). Redacta. <http://www.bibliotecanatura.org/conservacion-y-desarrollo-sustentable-en-la-selva-lacandona/>
- SEDESOL. (1993). *Informe de la situación actual general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1991–1992*. INECOL.
- Soares, D., & García, A. (2017). *La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático* (1.<sup>a</sup> ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Soria-Reinoso, I. F. (2020). *Flujo de Carbono en un Sistema Lótico Tropical Mexicano: caso de estudio Cuenca del río Usumacinta*. TESIUNAM. [http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB\\_UNAM/TES01000801410](http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000801410)
- Steinman, A. D. (1996). Effects of grazers on freshwater benthic algae. En J. R. Stevenson, M. L. Bothwell, R. L. Lowe, & J. H. Thorp (Eds.), *Algal*

- Ecology: Freshwater Benthic Ecosystem (Aquatic Ecology) (English Edition)* (pp. 341–373). Academic Press.
- Stevenson, R. J., & Smol, J. P. (2003). Use of algae in environmental assessments. En J. D. Wehr, R. G. Sheath, P. J. Kociolek, & J. H. Thorp (Eds.), *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification* (pp. 775–804). Academic Press.
- Tamooh, F., Meysman, F. J. R., Borges, A. V., Marwick, T. R., van den Meersche, K., Dehairs, F., Merckx, R., & Bouillon, S. (2014). Sediment and carbon fluxes along a longitudinal gradient in the lower Tana River (Kenya). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(7), 1340–1353. <https://doi.org/10.1002/2013jg002358>
- The Ramsar Convention. (2014). *Ramsar sites information services*. [https://rsis.ramsar.org/es/risearch/?language=esyf\[0\]=regionCountry\\_es\\_ss%3AGuatemalaypagetab=1](https://rsis.ramsar.org/es/risearch/?language=esyf[0]=regionCountry_es_ss%3AGuatemalaypagetab=1)
- Ward, N. D., Bianchi, T. S., Medeiros, P. M., Seidel, M., Richey, J. E., Keil, R. G., & Sawakuchi, H. O. (2017). Where Carbon Goes When Water Flows: Carbon Cycling across the Aquatic Continuum. *Frontiers in Marine Science*, 4, 1–27. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00007>
- West, R. C., Psutsky, N. P., & Thom, B. G. (1976). *The Tabasco lowlands of southeastern Mexico*. Louisiana State University Press. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000058045>
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., & Currie-Alder, B. (2009). Functioning of the Grijalva-Usumacinta River Delta, Mexico: Challenges for Coastal Management. *Ocean Yearbook Online*, 23(1), 473–501. <https://doi.org/10.1163/22116001-90000205>