

Monitoreo de las condiciones ecológicas y la vegetación nativa en la región litoral del Lago Atitlán Guatemala usando sensores remotos

Jorge Garcia-Polo¹, Stewart A.W. Diemont², Michelle Catalán³, Miguel Ávila⁴

¹Centro de Estudios Atitlán-UVG, jgarciap@uvg.edu.gt / State University of New York College of Environmental Science and Forestry, jgarci16@syr.edu

²State University of New York College of Environmental Science and Forestry, sdiemont@esf.edu

³Grupo Consultor TopoSIG, Guatemala, mishkacatalan@yahoo.com.mx

⁴Grupo Consultor TopoSIG, Guatemala, ingmiguelavila@gmail.com

Comité de Tuleros de Santiago Atitlán, Sololá, Guatemala.

RESUMEN: La vegetación litoral como el tul (nombre local para ambas *Typha domingensis* y *Schoenoplectus californicus*) del Lago Atitlán es conocida por brindar diversos servicios ecosistémicos incluyendo la remoción de nutrientes y contaminantes y la oxigenación del agua. Es un hábitat para la fauna, sitio de anidación de aves y de oviposición para peces y caracoles. La vegetación provee servicios culturales en forma de materiales para artesanías y adornos ceremoniales. Para comunidades humanas, la mayoría de los cuales son indígenas Maya, les dan sentido de pertenencia, identidad y provee belleza escénica que dan al paisaje. A pesar de estos numerosos beneficios, se ha reportado la degradación y pérdida de los tulares. Utilizamos sensores remotos Sentinel-2 y fotografías de Google Earth de 2018 para medir la vegetación litoral en cuatro municipios. En 2020 con sobrevuelos de dron se fotografió parte de la comunidad de Santiago Atitlán para mostrar la relación entre la cobertura del tul y potenciales estresores de la condición ecológica: 1) cobertura de *Hydrilla verticillata*, una macrófita exótica y 2) fluctuaciones severas del nivel del lago. Encontramos las pequeñas áreas de tul hicieron que Sentinel-2 fuera menos útil para la clasificación e identificación del tul que los otros dos métodos. La mayor cobertura se registró en Santiago Atitlán con 81% de *S. californicus*, 98% de *T. domingensis* y 90% de *H. verticillata* de la zona de estudio. Una disminución de *S. californicus* del 19% de 2018 a 2020 fue estimada. La dinámica del nivel del lago junto con la cobertura de *H. verticillata* parecen influir en los patrones de distribución, haciendo que los parches de tul cambien de forma, presentando una dinámica irregular en el cambio del tipo de ecosistema. El manejo tradicional local del tul es relevante para la conservación y restauración del litoral.

PALABRAS CLAVE: Humedales, drones, Sentinel-2, Concepto pulso de inundación, conocimiento ecológico tradicional.

Monitoring ecological conditions and native vegetation in the littoral region of Lake Atitlan Guatemala using remote sensing

ABSTRACT: Littoral vegetation such as tul (local language for both *Typha domingensis* and *Schoenoplectus californicus*) of Lake Atitlán is known to provide diverse ecosystem services including removal of nutrients and pollutants, and water oxygenation. It is a habitat for fauna, a nesting site for birds and an oviposition site for fish and snails. The vegetation provides cultural services in the form of materials for handicrafts and ceremonial ornaments. For human communities, most of whom are Indigenous Maya, they bring a sense of place, personal identity and provide scenic beauty. Despite these numerous benefits, degradation and loss of the tulares has been reported. We used remote sensing Sentinel-2 and Google Earth photographs from 2018 to measure the littoral vegetation in four municipalities. In 2020, drone flights photographed part of the community of Santiago Atitlan to show the relationship between the tul coverage and potential ecological condition stressors: 1) coverage of *Hydrilla verticillata*, a non-native macrophyte and 2) severe lake level fluctuations. We found that the small areas of tul made Sentinel-2 less useful for tul classification and identification than the other two methods. The highest vegetation coverage was registered in Santiago Atitlán with 81% of *S. californicus*, 98% of *T. domingensis* and 90% of *H. verticillata* from the study area. A decrease of *S. californicus* of 19% from 2018 to 2020 was estimated. Both lake level dynamics and *H. verticillata* coverage appeared to influence distribution patterns, causing tul patches to change shape and creating irregular dynamics in change of ecosystem type. The local traditional management of tul is relevant for littoral conservation and restoration.

KEYWORDS: Wetlands, Drones, Sentinel-2, Flood pulse concept, traditional ecological knowledge.

Introducción

El Lago Atitlán tiene una larga historia de cultura Maya y de uso tradicional de recursos naturales. Dentro de estos recursos, los humedales litorales llamados tulares, forman un ecosistema importante como sitio de oviposición de peces, anidación de aves acuáticas y la reducción de la erosión y eutrofización (Russi et al., 2012). El conocimiento ecológico tradicional comunicado a lo largo del tiempo entre generaciones resulta en buenas prácticas de manejo de los recursos naturales (Falkowski et al., 2015; Martin et al., 2010). En el Lago Atitlán, el conocimiento ecológico tradicional incluye prácticas como la pesca artesanal y el uso tradicional del tul, *Typha domingensis* Pers. y *Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják. El tul ha sido importante para los habitantes de la orilla del Lago Atitlán que lo utilizan para la elaboración de productos tradicionales y artesanías como esteras para dormir, llamados petates o pop en Maya (Ivic de Monterros & Azurdia Bravo, 2008; LaBastille, 1974). La pérdida de humedales en el Lago Atitlán afectó de manera negativa el sustento de poblaciones locales en la orilla del lago (López, 1990). Agencias gubernamentales y no gubernamentales hicieron iniciativas de restauración de estos humedales en el área a través de la siembra del tul, pero en muchos casos las plantas se murieron y las plantaciones han fallado (AMSCLAE, 2015). La abundancia de los humedales con estas plantas está disminuyendo en el lago. Por tanto, es necesaria la aplicación de la teoría ecológica y sus herramientas para la restauración de los ecosistemas (Palmer et al., 2016).

El Lago Atitlán ha atraído durante mucho tiempo la atención de científicos de muchas disciplinas, el estudio de los humedales litorales y las comunidades de macrófitas acuáticas no son la excepción. Juday (1915) realizó estudios limnológicos del lago, identificando los géneros de plantas acuáticas cercanas a las desembocaduras de arroyos, que consisten en formas tales como *Typha*, *Scirpus*, *Potamogeton* y *Chara*. Posteriormente LaBastille (1974) mientras estudiaba el pato poc (*Podilymbus gigas* Griscom) también midió la vegetación del litoral, como hábitat principal del pato poc. Un total de 25.7 km de longitud de vegetación acuática emergente (de los 105 km de longitud total de la orilla del lago), estuvo dominado por cuatro especies: *Scirpus californicus* (C.A. Mey.) Steud. (= *Schoenoplectus californicus*), *Typha domingensis* Pers., *Phragmites* sp. y *Phragmites communis* Trin.. Las dos primeras son llamadas localmente tul, se reportaron como importantes para los habitantes que las usaban para elaborar esteras para dormir y sillas pequeñas (LaBastille, 1974).

Dix y colaboradores (2003) reportaron las macrófitas acuáticas del Lago Atitlán, agrupadas en tres categorías como flotantes, emergentes y sumergidas. Mencionaron la importancia de la vegetación acuática tanto para la biodiversidad como para las personas, especialmente el tul (*S. californicus* y *T. domingensis*) para petates y también para embarcaciones pequeñas en el pasado. Se reporta un mapa de distribución de tul y concluyen en el potencial efecto de la sobreexplotación del tul en el lago.

Ivic de Monterroso y Azurdia Bravo (2008) reportaron antecedentes del uso del tul en el pasado y datos del cultivo y procesamiento del tul en la época contemporánea, con resultados de entrevistas realizadas hace 13 años, principalmente en San Juan La Laguna. A pesar de su importancia ecológica, económica y cultural, el desarrollo y urbanización a orillas del lago ha limitado el acceso para el cultivo y manejo tradicional del tul (Skinner, 2009).

Carpenter (2009) publicó resultados de estudios moleculares para confirmar las especies y variedades del género *Schoenoplectus* en las Américas. Confirmó que la especie de la familia Cyperaceae que domina en el litoral del Lago Atitlán corresponde a *Schoenoplectus californicus* y que las muestras analizadas de San Pedro y San Juan La Laguna pertenecen a la variedad *S. californicus* var. *californicus*. Estudios posteriores se enfocaron en procesos ecológicos, como la fijación de nitrógeno con un estudio de caso del Lago Atitlán (Rejmánková, Sirová, et al., 2018), mediciones en diferentes especies de macrófitas (*S. californicus*, *H. verticillata*, *Eichornia crassipes*, *Ceratophyllum demersum* y *Potamogeton illinoensis*) como emisión de gases (CO₂ y CH₄), biomasa vegetal, macroinvertebrados, razones C:N:P en tejido vegetal (Rejmánková, Sullivan, et al., 2018), y el análisis de isótopos N y C en 9 macrófitas, peces e invertebrados (Villavicencio, 2020). Rejmankova, Sullivan y colaboradores (2018) explicaron cómo el incremento en el nivel del lago modificó de un tular a una playa cubierta por *H. verticillata* en San Juan La Laguna, y cómo cada macrófita tiene procesos ecológicos diferentes en los litorales del Lago Atitlán. Los estudios ecológicos nos guían sobre la vulnerabilidad que tienen los ecosistemas del litoral del lago.

Los sensores remotos han sido utilizados en Guatemala para el monitoreo de la cobertura forestal (Castellanos et al., 2011). En el Lago Atitlán los grandes florecimientos de cianobacterias ocurridos en el 2009 fueron capturados por sensores remotos, que permitieron registrar el crecimiento exponencial que alcanzó a cubrir el 40% de la superficie del lago (Rejmánková et al., 2011). Para generar la serie temporal de la cobertura de cianobacterias de octubre a diciembre de 2009 se utilizaron imágenes satelitales de Landsat, EO-1 (ALI & Hyperion) y ASTER y luego en 2011 el florecimiento en la superficie del lago se identificó con las bandas visibles y cercana al infrarrojo (VNIR) del sensor ASTER (SERVIR, 2011b). SERVIR (2015) analizaron imágenes Landsat 8 (Operational Land Imager- OLI) del 8 y 20 de agosto de 2015 y estimaron las concentraciones de clorofila a en la superficie del lago utilizando un algoritmo desarrollado interinstitucionalmente y calibrado con datos de campo (Flores-Anderson et al., 2020). Otro aporte de los sensores remotos consistió el uso de imágenes Landsat para medir los cambios en el área superficial del Lago Atitlán con datos de 1986 a 2011, lo que demuestra la variabilidad del lago y como las grandes tormentas (e.g.: tormenta Mitch y Agatha) influyen en el aumento del lago (SERVIR, 2011a). Flores-Anderson et al. (2020) sugieren la importancia de aplicar y calibrar los sensores

operacionales como Landsat y Sentinel-2. El uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (VANT's) tienen también mucho potencial para el monitoreo forestal en Guatemala, pero no se han definido metodologías sistemáticas (Cifuentes y Catalán, 2019). En áreas protegidas se ha implementado el uso de VANT's para el monitoreo y vigilancia (CONAP, 2014), así como para el monitoreo de la cobertura humedales como los manglares de la costa del Pacífico (Avila, 2018). Sin embargo, no se ha reportado la utilización de VANT's para el monitoreo de humedales litorales de los cuerpos de agua continentales del país.

Por lo tanto, el propósito de este estudio fue de utilizar sensores remotos Sentinel-2 y fotografías de Google Earth para medir la vegetación litoral en el año 2018 en cuatro municipios a orillas del Lago Atilán. Además, se documentó la relación entre la cobertura del tul y estresores de la condición ecológica del litoral: 1) cobertura de *H. verticillata*, una macrófita exótica y 2) fluctuaciones del nivel del lago, utilizando Sentinel-2 y sobrevuelos de VANT's en Santiago Atilán en febrero de 2020. Debido a las restricciones de locomoción por la pandemia de COVID-19 no fue posible continuar con los sobrevuelos de VANT's en toda el área de estudio.

Materiales y métodos

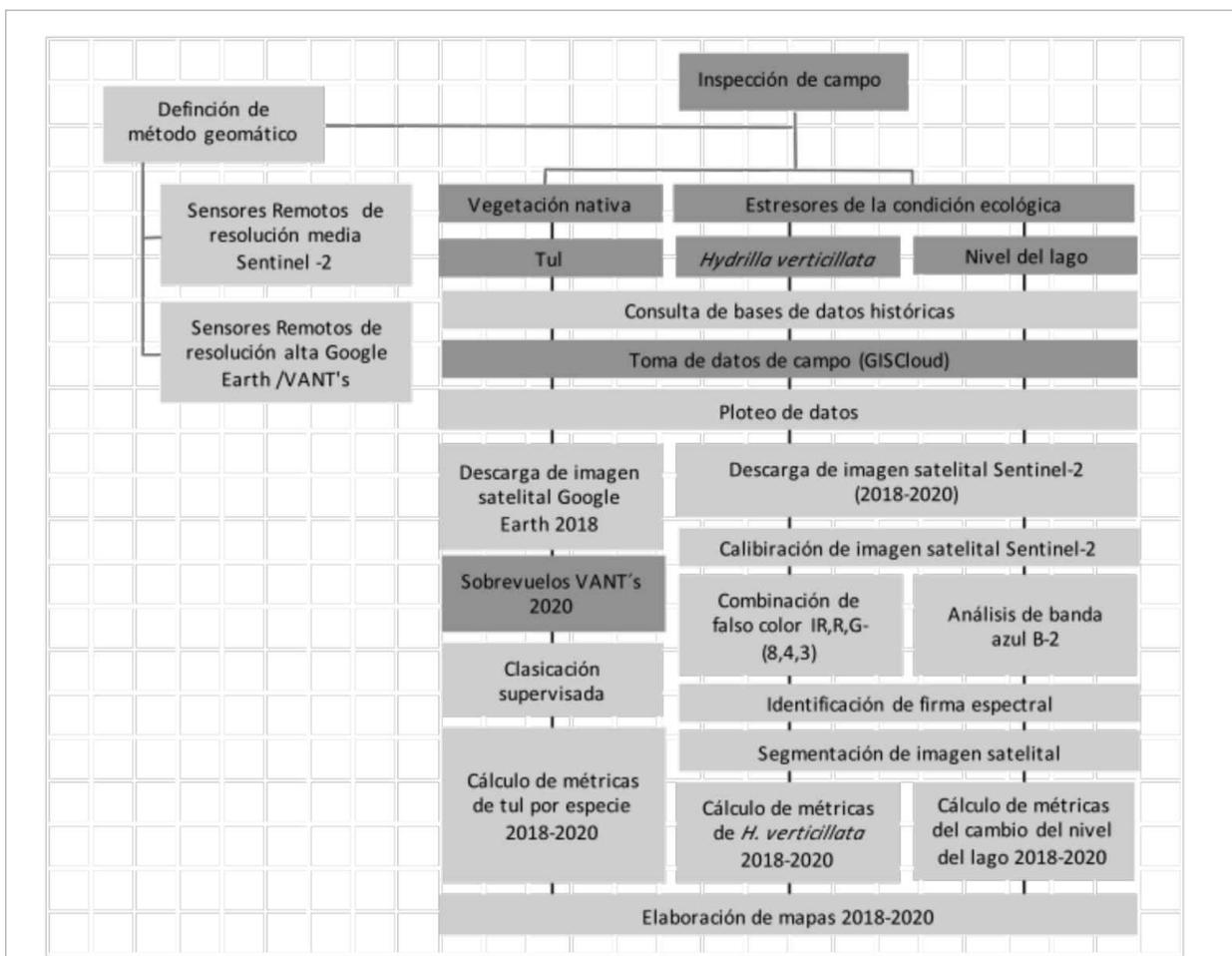
Área de estudio

El lago de Atilán está ubicado en el altiplano guatemalteco en el Departamento de Sololá a una altitud de 1,562 m.s.n.m. El área del lago es de 125 km² y la profundidad máxima mayor a 327 m con una media de 202.40 m de profundidad (Reyes Morales et al., 2018). Las coordenadas del centro del lago establecidas por Weiss (1971) son Latitud 14 ° 41.943 y Longitud 91 ° 11.076 W. La cuenca del lago ha sido definida como una de las áreas con mayor diversidad cultural en toda Mesoamérica. Dix et al., (2003) describen la cuenca del Lago Atilán del tipo endorreica, que no posee un drenaje superficial, y se ha estimado un tiempo de retención de 80 a 120 años. La cuenca del lago abarca 15 municipios y aldeas de Nahualá, Departamento de Sololá y algunas aldeas de Totonicapán y Chichicastenango, con una población para el año 2018 de 256,039 habitantes (AMSCLAE 2020).

Tres grupos étnicos mayas viven en la cuenca del lago: Tz'utujil, Kaqchikel y K'iche' (CONAP, 2018; Dix et al., 2003). Tres



Gráfica 1. Mapa de localización de sitio de estudio, municipios de habla Tz'utujil en la cuenca del Lago Atilán, Guatemala. Límites municipales del IGN actualización 2016.



Gráfica 2. Mapa de localización de sitio de estudio, municipios de habla Tz'utujil en la cuenca del Lago Atitlán, Guatemala. Límites municipales del IGN actualización 2016.

pueblos Tz'utujiles (Santiago Atitlán, San Juan La Laguna y San Pablo La Laguna) son conocidos por tener una relación cercana de uso tradicional del tul, y San Pedro La Laguna también una comunidad Tz'utujil, parece no tener relación con la vegetación del litoral (JGP, observaciones personales). Por lo tanto, el área de estudio se centró en los litorales de estos cuatro municipios: Santiago Atitlán, San Pedro La Laguna, San Juan La Laguna y San Pablo La Laguna (gráfica 1).

Procedimientos para la recolección de datos

Se realizó trabajo de campo colaborativo junto con el Comité de Tuleros de Santiago Atitlán, que inició con el reconocimiento e inspección de campo, como se muestra en el diagrama de flujo (gráfica 2), posteriormente se definió el método geomático a ser utilizado sensores remotos Sentinel-2, Google Earth o VANT's dependiendo de la resolución requerida. A continuación, se describen las siguientes etapas del proceso metodológico.

Medición de la cobertura de la vegetación nativa litoral

Se confirmó que el sensor remoto Sentinel-2 es menos útil para la clasificación e identificación de los tulares debido su escala espacial. Para identificar en campo las zonas con cobertura del tul (*S. californicus* y *T. domingensis*) se elaboró una boleta digital móvil con la aplicación GIS Cloud ¹ (Mobile Data Collection), la cual permite a través de datos de coordenadas GPS capturar datos de objetos del mundo real en un formulario o boleta de campo. El propósito de la boleta fue para almacenar los datos de la presencia de tul, su condición por medio de inspección visual, presencia de otra vegetación que podrían mostrar confusión al momento de mapear la cobertura del tul, como macrófitas exóticas (e.g.: *H. verticillata*) y cualquier tipo de prácticas agrícolas cercanas a la orilla del lago. Estos datos se colectaron por medio de recorridos caminando en la orilla del lago o en lancha, de febrero a mayo de 2020 (anexo 1). Se realizó el sobrevuelo del VANT Phantom 3 Advanced en febrero de 2020, iniciando en la bahía de Santiago Atitlán con el consentimiento y

¹ <https://www.giscloud.com>

participación del Comité de Tuleros (anexo 1). Las restricciones de locomoción durante los primeros meses de la pandemia de COVID-19 no permitieron completar los sobrevuelos en los cuatro municipios (Santiago Atitlán, San Pedro, San Juan y San Pablo La Laguna), esto si fue posible con la fotografía de Google Earth (8 dic. 2018) para la identificación del tul del año 2018. La resolución fue comparable con la información capturada por el equipo fotogramétrico del VANT en la bahía de Santiago Atitlán. Haciendo uso de las técnicas de fotointerpretación visual y aprovechando la alta resolución de la información del equipo fotogramétrico y Google Earth, fue posible a través de la clasificación supervisada determinar la cobertura de los tulares, las características de coloración verde, la diferencia de textura, los patrones de forma y su ubicación cercana a la orilla permitió fácilmente la diferenciación por especie. Además, conociendo las prácticas agrícolas que se realizan cercanas a la bahía fue posible delimitar de una manera más fácil las zonas agrícolas de los tulares. Los datos de campo fueron utilizados para la validación de los productos cartográfico.

Factores estresores de la condición ecológica litoral

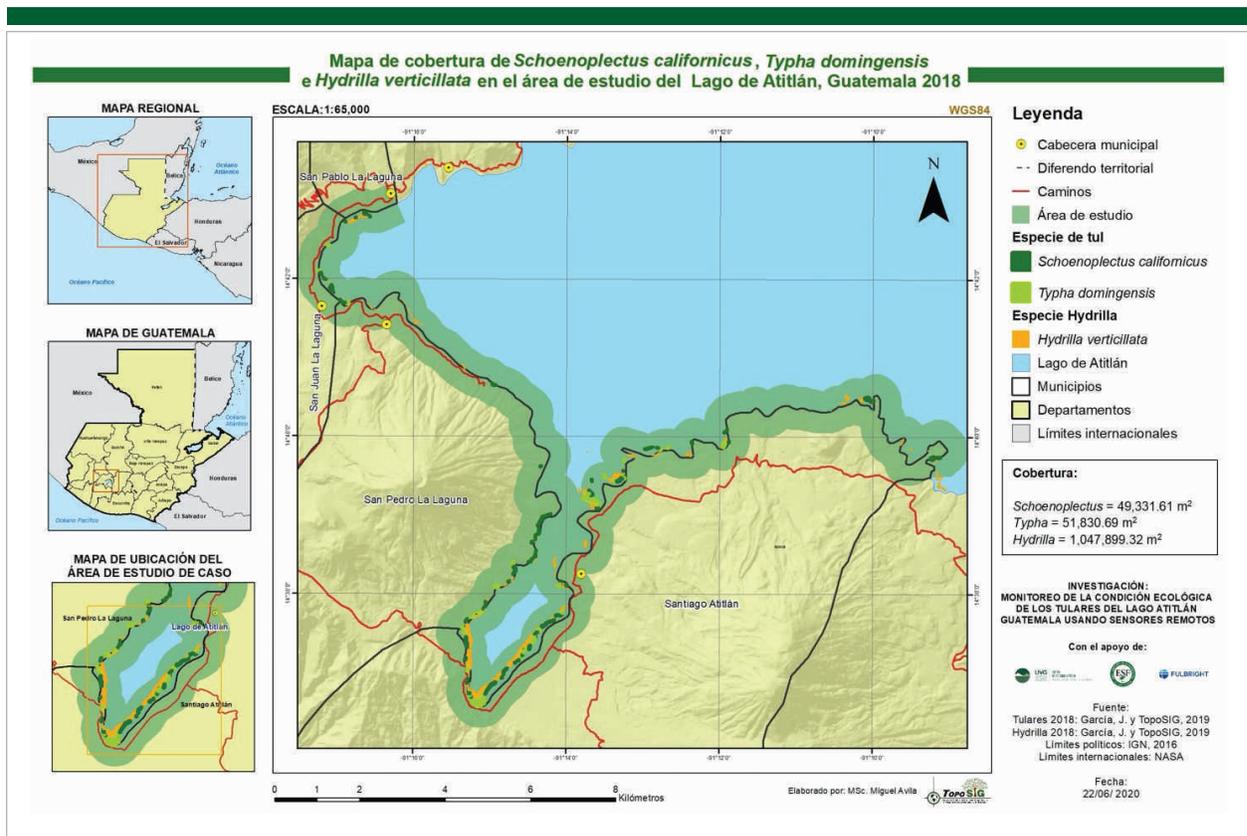
La cobertura de la macrófita exótica *H. verticillata* fue mapeada con sensores remotos Sentinel-2, analizando las imágenes satelitales de 2018 y 2020. La respuesta de la combinación de bandas R, G, B e IR (8,4,3) de 10 metros de resolución, permitió identificar la presencia de *H. verticillata* en un valor espectral

fácil de clasificar. En el caso del nivel del lago, se utilizaron las mismas imágenes satelitales de Sentinel-2 pero únicamente se realizó el análisis de la banda 2, la cual presenta valores espectrales bajos. Los datos de campo fueron utilizados para la validación de los productos cartográficos, en el caso de los sensores remotos Sentinel-2 se utilizaron para validar la teledetección de *H. verticillata* y para determinar los cambios de nivel del Lago de Atitlán. El análisis de la dinámica se realizó comparando las áreas de cobertura de 2018 y 2020 únicamente para la bahía de Santiago Atitlán donde se realizaron los vuelos de VANT's en 2020 para documentar la relación entre estos estresores y el cambio en la cobertura de tul.

Resultados y discusión

Cobertura de la vegetación litoral de 2018

La distribución de vegetación nativa (*S. californicus* y *T. domingensis*) en el litoral de área de estudio en el Lago Atitlán (Santiago Atitlán, San Pedro, San Juan y San Pablo La Laguna) así como la distribución de *H. verticillata*, se muestra en el mapa de cobertura de 2018 a base de sensores remotos (gráfica 3). Reportes previos que han presentado mapas de la distribución y datos de cobertura de tul han utilizado diferentes técnicas de medición en campo (AMSCLAE, 2015; Dix et al., 2003; LaBastille, 1974).



Gráfica 3. Cobertura de las macrófitas dominantes *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata* en cuatro municipios en 2018, Lago Atitlán, Guatemala. Mapa de cobertura del análisis manual de la imagen satelital de Google Earth.

Cuadro 1. Cobertura de las macrófitas dominantes en cuatro municipios en 2018, Lago Atitlán, Guatemala. Área y porcentaje por especie *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata*.

Especies	Santiago Atitlán		San Pedro		San Juan		San Pablo	
	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%
<i>S. californicus</i>	39,967.80	81.0	1,592.47	3.2	5,129.43	10.4	2,641.92	5.4
<i>T. domingensis</i>	50,859.90	98.1	432.93	0.8	537.86	1.0	0.00	0.0
<i>H. verticillata</i>	937,899.32	89.5	35,000.00	3.3	35,700.00	3.4	39,300.00	3.8

Como resultado del análisis espacial utilizando Google Earth, se presenta en la gráfica 3 la cobertura de total de tul de 2018 en el sitio de estudio, donde se calcularon 49,331.61 m² de *S. californicus* y 51,830.69 m² de *T. domingensis* sumando un total de 101,162.30 m². El análisis de la cobertura de *H. verticillata* con sensores remotos Sentinel-2 resultó en un área de 1,047,899.32 m² para el área de estudio. La alta cobertura de *H. verticillata* confirma que el tul es vulnerable ante esta macrofita invasora ampliamente distribuida en el lago.

LaBastille (1974) no reportó la presencia de *H. verticillata* ya que el primer registro de esta especie de macrofita invasora se registró en Guatemala en el año 2000 en el Lago Izabal (Haller, 2002). Dix y colaboradores (2003) indicaron la presencia de pequeños focos de *H. verticillata* en los muelles de San Juan La Laguna y San Lucas Tolimán. Estudios recientes de monitoreo de la vegetación acuática indican la presencia de *H. verticillata* desde 2014, en 2020 estuvo presente en los 10 sitios muestreados con cobertura mayor a 70% (AMSCLAE, 2020b). *H. verticillata* puede brindar servicios ecosistémicos como hábitats esenciales para la cría y reproducción de peces, pero puede tener efectos adversos en la pesca, dificultando el acceso a sitios de pesca y reduciendo el valor estético del paisaje lacustre (Barrientos & Allen, 2008). Así como afectar el crecimiento y propagación de la vegetación nativa en el litoral (Rejmánková, Sullivan, et al., 2018). *H. verticillata* es una macrofita sumergida que se desarrolla comúnmente a < 3 m de profundidad (Barrientos y Allen, 2008), similar al tul que su profundidad promedio reportada para el Lago Atitlán es de 2.6 m (AMSCLAE, 2015). Es por esto por eso que consideramos a *H. verticillata* un estresor de la condición ecológica del litoral.

El cuadro 1 presenta los cálculos de cobertura del 2018 de tul e *H. verticillata* por municipio. Se determinó la mayor cobertura de tul en 2018 fue en Santiago Atitlán con 81% de *S. californicus* (39,967.80 m²) y 98% de *T. domingensis* (50,859.90 m²) del total de cobertura de cada especie en los cuatro municipios. Seguido por San Juan La Laguna con cobertura de *S. californicus* de 10% (5,129.43 m²) y San Pablo La Laguna con 5% (2,641.92 m²). San Pedro La Laguna registró la menor cobertura de *S. californicus* con 1,592.47 m² equivalente al

3%. Después de Santiago Atitlán, el segundo municipio con mayor cobertura de *T. domingensis* fue San Juan con 1% (537.86 m²), seguido de San Pedro con 0.8% (432.93) y no se registro *T. domingensis* en el litoral de San Pablo La Laguna. La mayor cobertura de *H. verticillata* en 2018 (cuadro 1) también fue mayor en Santiago Atitlán con un 89.5% comparado al resto de los municipios en estudio, en los otros tres municipios, San Pablo, San Juan y San Pedro La Laguna se reportó con el y 3.8%, 3.4% y 3.3%, respectivamente.

La mayor cobertura en Santiago Atitlán de las tres especies, *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata* en 2018 se podría explicar por la longitud de su litoral que es mayor comparado a los otros tres municipios, sin embargo, hay dos factores determinantes que se deben considerar. Primero, un factor geofísico que determina el crecimiento de la vegetación acuática es la geomorfología del litoral. La batimetría del Lago Atitlán medida en 1975 y 2014 muestran zonas de baja pendiente en el litoral de Santiago Atitlán y por el contrario, el litoral de San Pedro La Laguna tiene mayores pendientes (Reyes Morales et al., 2018). El segundo es un factor sociocultural, es la práctica tradicional de cultivo y manejo del tul (principalmente de *S. californicus*) que realiza el Comité de Tuleros de Santiago Atitlán, que incluye el cuidado y siembra constante del tul. San Juan La Laguna, fue el segundo municipio con la mayor cobertura de tul donde también se ha documentado la presencia de orillas someras y la tradición de siembra de tul (Ivic de Monterros y Azurdia Bravo, 2008).

Relación entre la cobertura del tul y estresores de la condición ecológica del litoral

Para este análisis los factores que afectan la condición ecológica del litoral fueron la cobertura de la macrofita invasora *H. verticillata* y el cambio del nivel del lago. La gráfica 4 presenta los resultados de la cobertura de tul del análisis de las imágenes tomadas por VANT's en 2020 en la bahía de Santiago Atitlán, así como los resultados de la cobertura de *H. verticillata* del análisis de las imágenes de Sentinel-2 para la misma zona.

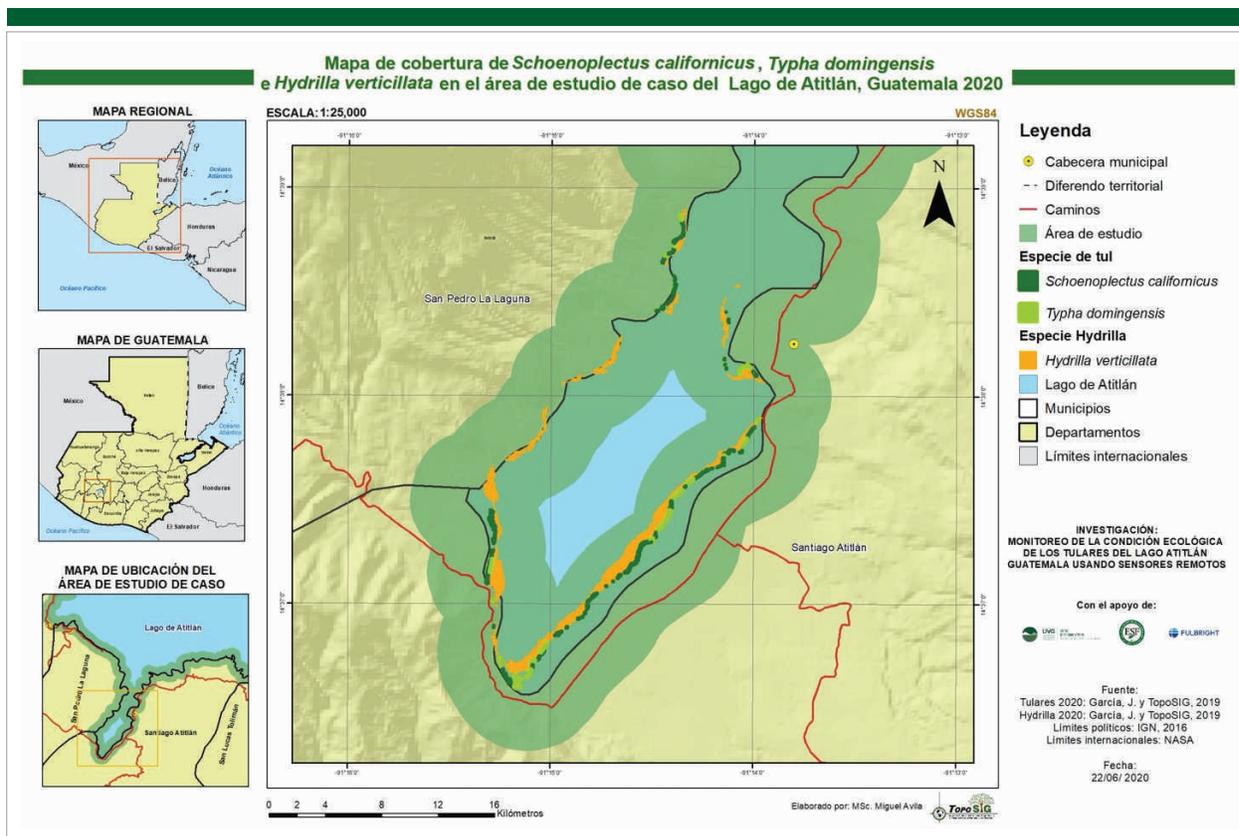
Cuadro 2. Cobertura de macrófitas *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata* en 2018 y 2020. Porcentaje de cambio de cobertura en la bahía de Santiago Atitlán.

Especie de macrófita	Cobertura (m ²)		Cambio (%)
	2018	2020	
<i>Schoenoplectus californicus</i>	25,423.66	20,611.64	-19
<i>Typha domingensis</i>	33,715.93	14,017.70	-58
<i>Hydrilla verticillata</i>	565,200.00	411,500.00	-27

El cuadro 2 presenta la diferencia de la cobertura 2020 menos la cobertura de 2018 de cada especie en la bahía de Santiago Atitlán, donde indicó una disminución de *S. californicus* del 19%. La cobertura de *T. domingensis* disminuyó un 58% y la cobertura de *H. verticillata* disminuyó un 27%. Las tres macrófitas disminuyeron por lo que se considera un impacto generalizado en el litoral durante este periodo (2018-2020), *H. verticillata* a pesar de ser una macrófita invasora tuvo pérdida de cobertura, pero no fue más afectada que *T. domingensis*, probablemente por no tener ningún manejo.

La macrófita que registró menos pérdida fue *S. californicus*, y puede estar relacionado con larga historia de manejo por la cultura Maya en el Lago Atitlán, basado en el conocimiento ecológico tradicional para la siembra, cosecha y uso para la

fabricación de artesanías como petates o esteras (Ivic de Monterros y Azurdia Bravo, 2008; LaBastille, 1974). *S. californicus* es cuidado y crecido en Santiago Atitlán por los miembros del Comité de Tuleros de Santiago Atitlán; conservar esta práctica ancestral del tul tiene una importante influencia en reducir la pérdida de *S. californicus* y los servicios ecosistémicos que provee (García-Polo et al., 2021). Sin embargo, puede surgir la pregunta al existir un manejo y cultivo del tul ¿Por qué disminuyó el tul? LaBastille (1989) dio algunas posibles respuestas a esta pregunta, publicando que los factores principales de la degradación del tul en la orilla del Lago Atitlán son el desarrollo inmobiliario sin regulaciones ambientales y las fluctuaciones del nivel del lago como la disminución de 4.5 metros en 6 años, que causó la pérdida de más del 50% de los tulares.



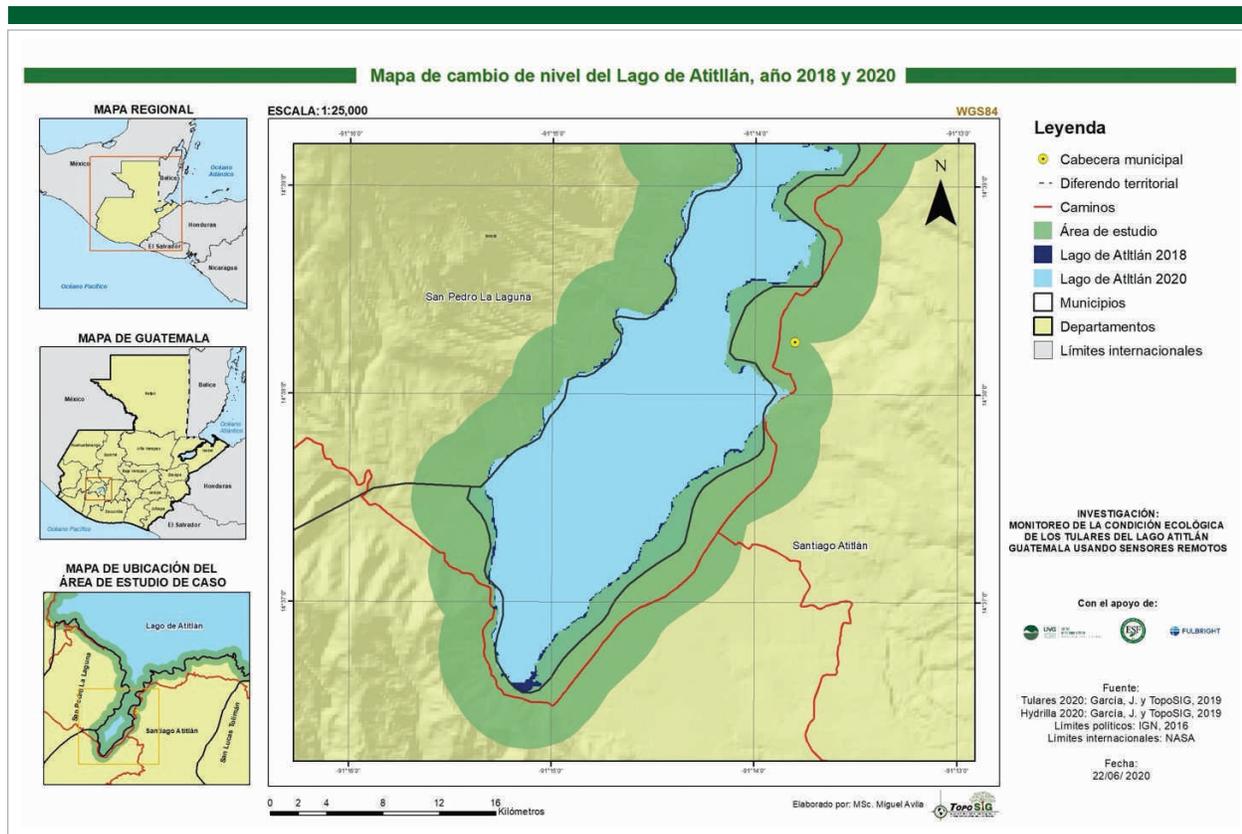
Gráfica 4. Cobertura de la vegetación litoral *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata* en 2020 calculado de la imagen aérea tomada con VANT's en la bahía de Santiago Atitlán.

La gráfica 5 muestra la zona de cambio del nivel del lago de 2018 a 2020 generado por el análisis de las imágenes Sentinel-2. Como se ha reportado las fluctuaciones del nivel del Lago Atitlán pueden ser muy dañinas para macrófitas nativas como el tul, *S. californicus* y *T. domingensis*. Los datos del nivel del lago han sido registrados por la Capitanía Lacustre Atitlán y AMSCLAE desde el año 2014 y han determinado una disminución del nivel del lago 3.42 m verticales (AMSCLAE, 2020a). Los resultados del análisis espacial con sensores remotos Sentinel-2 realizado para la bahía de Santiago Atitlán comparando el nivel del lago de 2018 a 2020 (gráfica 5), sugiere que algunas partes fueron más afectadas por la disminución del nivel del lago. Los litorales con baja pendiente donde el nivel del lago disminuyó hasta 10 m lineales, zonas idóneas para el crecimiento de las macrófitas.

Ante estos impactos, resalta el manejo del Comité de Tuleros de Santiago Atitlán que incluye el esfuerzo y valores morales, la responsabilidad al cuidado del tul y a los seres (humanos y no humanos) que dependen del tul, y según palabras del presidente del comité:

“Si el lago baja, el tul se queda afuera y se seca. Hay que mover. Y si el lago sube el tul se ahoga, también hay que mover a la orilla”.

En el periodo 2018-2020 evidenciamos que la condición ecológica del litoral del Lago Atitlán esta siendo afectada por la disminución del nivel del lago, aunque hay reportes que los huracanes y tormentas tropicales pueden cambiar la situación e incrementar el nivel del lago. Según lo reportado por Rejmánková, Sullivan, et al. (2018) el aumento del nivel del lago también puede causar la disminución de los tulares, dando paso a macrófitas invasoras a colonizar las playas según lo registrado en el año 2014 en San Juan La Laguna donde la orilla fue dominada por *H. verticillata*. Esto confirma la magnitud actual del impacto causado por la fluctuación del nivel del agua en la orilla del Lago Atitlán y la vulnerabilidad de las macrófitas nativas antes estos cambios denominados pulsos de inundación que se verán más marcados con el impacto del cambio climático (Wantzen et al., 2008).



Gráfica 5. Cambio del nivel del Lago Atitlán. Basado en el análisis de sensores remotos en la bahía de Santiago Atitlán del año 2018 al 2020.

Conclusiones y recomendaciones

- Santiago Atitlán presentó la mayor cobertura de las macrófitas *S. californicus*, *T. domingensis* e *H. verticillata* en 2018 comparado con los otros tres municipios de habla Tz'utujil, San Pedro, San Juan y San Pablo La Laguna. Santiago Atitlán posee mayor longitud de orilla del lago comparado con los otros municipios, además tiene mayores zonas de litoral somero y el manejo y cuidado de sus habitantes miembros del Comité de Tuleros de Santiago Atitlán.
- El análisis espacial piloto en la bahía de Santiago Atitlán mostró un proceso general de pérdida de la cobertura de 2018 a 2020 de las tres especies de macrófitas estudiadas. El tul, *S. californicus* presentó menor disminución (pérdida de 19% de cobertura de 2018) comparado con las otras macrófitas *H. verticillata* 27% y *T. domingensis* 58%. Esto sugiere que el manejo del tul en la bahía de Santiago Atitlán ha conservado los tulares como sistemas resilientes ante los cambios y perturbaciones.
- Con el análisis espacial se evidenció que la dinámica del nivel del lago junto con la cobertura de *Hydrilla* parecen influir los patrones de distribución hacen que los parches de cobertura de tul cambien de forma, presentando una dinámica irregular en el cambio del tipo de ecosistema del litoral.
- La práctica de uso y manejo del tul, basado en el conocimiento ecológico tradicional del Comité de Tuleros de Santiago Atitlán, es restauración. Sin embargo, otras presiones económicas, sociales y ecológicas en conjunto reducen la capacidad de adaptación del manejo de los tulares. Es necesario continuar con análisis socio-ecológicos profundos para diseñar los lineamientos de una restauración biocultural, recuperando la condición ecológica de los tulares y al mismo tiempo revitalizando la cultura Maya y el manejo y uso tradicional del tul.

Aporte de autores

JGP y SAWD diseñaron el proyecto de investigación. MC y MA realizaron el análisis espacial, vuelo de dron y elaboración de mapas. JGP realizó la colecta de datos de campo. El Comité de Tuleros de Santiago Atitlán dieron acceso a sus tulares y a su conocimiento ecológico tradicional. JGP, SAWD, MC, MA redactaron y editaron el manuscrito.

Bibliografía

- AMSCLAE (2020a) *Informe Anual monitoreo de nivel del lago Atitlán*.
- AMSCLAE (2020b) *Monitoreo de la vegetación acuática en el Lago Atitlán*.
- AMSCLAE (2015) *Diagnóstico del estado actual del tul en el Lago de Atitlán*.

- Avila, M. (2018) *Parámetros fotogramétricos y de fotointerpretación para el monitoreo del ecosistema de manglar Pacífico de Guatemala con el VANT Phantom 3 Advanced* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/15085/1/Miguel Antonio Avila Mora.pdf>
- Barrientos, C.A., Allen, M.S. (2008) *Fish abundance and community composition in native and non-native plants following hydrilla colonisation at Lake Izabal, Guatemala* *Fisheries Management and Ecology*, 15(2): 99-106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2007.00588.x>
- Carpenter, H.M. (2009) *Caballitos and Totoro: The story of the sedge *Schoenoplectus californicus** [University of California, Davis]. <https://search.proquest.com/openview/734fe2b2e6896c16e45ee75b48cd8680/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Castellanos, E., Regalado, O., Pérez, G., Rolando, M., Ramos, V.H., Incer, D. (2011) *Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2006 y dinámica de la cobertura forestal 2001-2006*.
- Cifuentes, M., Catalán, M. (2019) *Experiencias de monitoreo forestal en Guatemala*.
- CONAP. (2014) *Monitoreo de áreas protegidas del Nororiente: utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANTS) y sistemas de información geográfica*.
- CONAP. (2018) *Plan Maestro Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán (RUMCLA) 2018 - 2022*.
- Dix, M., Fortín, I., Medinilla, O., Ríos, L. E. (2003) *Diagnóstico Ecológico Social en la cuenca de Atitlán* http://uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/doc/otras_publicaciones/Diagnostico_ecologico_social_Atittlan.pdf
- Falkowski, T.B., Martínez-Bautista, I., Diemont, S.A.W. (2015) *How valuable could traditional ecological knowledge education be for a resource-limited future? An energy evaluation in two Mexican villages* *Ecological Modelling* 300: 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.12.007>
- Flores-Anderson, A.I., Griffin, R., Dix, M., Romero-Oliva, C.S., Ochoaeta, G., Skinner-Alvarado, J., Ramirez Moran, M.V., Hernandez, B., Cherrington, E., Page, B., Barreno, F. (2020) *Hyperspectral Satellite Remote Sensing of Water Quality in Lake Atitlán, Guatemala* *Frontiers in Environmental Science*, 8: 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00007>
- García-Polo, J., Falkowski, T.B., Mokashi, S.A., Law, E.P., Fix, A. J., Diemont, S.A.W. (2021) *Restoring ecosystems and eating them too: guidance from agroecology for sustainability* *Restoration Ecology Online* version e13509. <https://doi.org/10.1111/rec.13509>
- Haller, W.T. (2002) *Hydrilla in Lake Izabal, Guatemala Status and Future Prospects*.
- Ivic de Monterros, M., Azurdia Bravo, I. (2008) *Ciencia y Técnica Maya* Fundación Solar.
- Juday, C. (1915) *Limnological studies on some lakes in Central America* *Wisconsin Academy Arts Science Letters Transactions* 18: 214- 50. <http://images.library.wisc.edu/WI/EFacs/transactions/WT1915/reference/wi.wt1915.cjuday.pdf>
- LaBastille, A. (1974) *Ecology and Management of the Atitlán Grebe, Lake Atitlán, Guatemala* *Wildlife Monographs* 3-66. <https://doi.org/10.2307/3830373>
- LaBastille, A. (1989) *Drastic Decline in Guatemala's Giant Pied-billed Grebe Population* *Environmental Conservation* 10(4): 346-348.
- López, J. (1990) *Análisis del aprovechamiento de tul *Scirpus californicus* and *Typha domingensis* en la bahía de Santiago Atitlán, Departamento de Sololá* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_1242.pdf
- Martin, J.F., Roy, E.D., Diemont, S.A.W., Ferguson, B.G. (2010) *Traditional Ecological Knowledge (TEK): Ideas, inspiration, and designs for ecological engineering* *Ecological Engineering* 36: (7) 839-849. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.001>

Palmer, M.A., Zedler, J.B., Falk, D.A. (2016) *Foundations of restoration ecology* (Second). Island Press.

Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J., Girón, N. (2011) *Cyanobacterial blooms in Lake Atitlán, Guatemala* *Limnologia* 41: 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2010.12.003>

Rejmánková, E., Sirová, D., Castle, S.T., Bárta, J., Carpenter, H. (2018) *Heterotrophic N₂-fixation contributes to nitrogen economy of a common wetland sedge, *Schoenoplectus californicus** *PLoS ONE* 13(4): 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195570>

Rejmánková, E., Sullivan, B.W., Ortiz Aldana, J.R., Snyder, J.M., Castle, S.T., Reyes Morales, F. (2018) *Regime shift in the littoral ecosystem of volcanic Lake Atitlán in Central America: Combined role of stochastic event and invasive plant species* *Freshwater Biology* 63 (9): 1088-1106. <https://doi.org/10.1111/fwb.13119>

Reyes Morales, F., Ujpan, D., Valiente, S. (2018) *Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala)* *Revista Científica Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*. USAC 27 (2): 48-58.

Russi, D., Ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T. (2012) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands* https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/TEEB/TEEB_Water-Wetlands_Final-Consultation-Draft.pdf

SERVIR (2011a) *Cambios en la superficie de área del Lago Atitlán, Guatemala 1986-2011* <https://www.servir.net/index.php/servir-en-accion/analisis-ambientales/529-cambios-en-la-superficie-de-area-del-lago-atitlan,-guatemala-1986-2011>

SERVIR (2011b) *Reappearance of pollution in Lake Atitlán, Sololá, Guatemala May 2011.*

SERVIR (2015) *Algal Bloom returns to Lake Atitlan* <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/1457/algal-bloom-returns-to-lake-atitlan-guatemala>

Skinner, J. (2009) *Indigenous Peoples and Lake Basin Management - Lessons from Lake Atitlán, Guatemala* <http://wldb.ilec.or.jp/ILBMTrainingMaterials/resources/Atitlan.pdf>

Villavicencio, H.A. (2020) *Trophic Ecology and Bioaccumulation of Toxic Metals* M.Sc. Thesis, University of Alaska, Anchorage.

Weiss, C. (1971) *Water quality investigations, Guatemala* [s.n.]. <http://www.worldcat.org/title/water-quality-investigations-guatemala/oclc/836624355?referer=di&ht=edition>

Anexos



Anexo 1. Actividades del trabajo de campo para el monitoreo de la vegetación de la región litoral del Lago Atitlán. a) sobrevuelos de VANT's en Santiago Atitlán junto con el Comité de Tuleras. b) Fotografía tomada con VANT's (Phantom 3 Advanced), la vegetación señalada en la superficie del lago corresponde a *Hydrilla verticillata*, macrófita exótica. c) Revisión de las fotografías tomadas con VANT'S. Toma de datos en diferentes localidades del lago para validación utilizando la aplicación GIS Cloud en d) Santiago Atitlán, e) Panajachel, f) San Juan La Laguna.