



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación en Asentamientos Humanos

Informe final

**Paleoectoxicología, una herramienta para la reconstrucción del pasado reciente en el Lago de
Amatitlán, Guatemala**

Equipo de investigación

Dra. rer. nat. Claudia Suseth Romero Oliva
Licda. Ninoshka Analí López Xalí
Br. Beatriz Alejandra Aguilar
Br. Francis Mariel Santos

Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, IIQB.
Centro de Estudios de Atitlán, CEA.



Guatemala, 2019

Contraportada (reverso de la portada)

Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Dra. Sandra Herrera
Coordinadora del Programa de Investigación

Dra. rer. nat. Claudia Suseth Romero Oliva
Coordinadora del proyecto

Licda. Ninoshka Analí López Xalín
Investigadora

Br. Beatriz Alejandra Aguilar
Auxiliar de investigación II

Br. Francis Mariel Santos
Auxiliar de investigación I

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2019. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Partida Presupuestaria 4.8.63.4.41. durante el año 2019 en el Programa Universitario de Investigación de Asentamientos Humanos.



Índice

1	<i>Título del proyecto</i>	8
2	<i>Resumen</i>	8
3	<i>Palabras clave</i>	8
4	<i>Abstract and keyword</i>	9
5	<i>Introducción</i>	10
6	<i>Planteamiento del problema</i>	11
7	<i>Preguntas de investigación</i>	12
7.1	GENERAL	12
7.2	PREGUNTAS ESPECÍFICAS.....	12
8	<i>Delimitación en tiempo y espacio</i>	12
9	<i>Marco teórico</i>	14
9.1	Estado trófico	14
9.2	Eutrofización cultural/inducida	14
9.3	Paleolimnología.....	14
9.4	Paleoecotoxicología.....	14
9.5	Organismos biológicos sensibles al cambio ambiental pertenecientes al Filo Arthropoda	15
9.6	Familia Chironomidae.....	15
9.7	Parámetros No Biológicos usados en el estudio ambiental	16
9.8	Fósforo total.....	16
9.9	Nitrógeno total.....	17
9.10	Materia orgánica	17
9.11	Metales pesados.....	17
9.12	Microplásticos	18
10	<i>Estado del arte</i>	19
11	<i>Objetivos</i>	20
11.1	General:	20
11.2	Específicos:.....	20
12	<i>Hipótesis</i>	20



13 *Materiales y métodos*21

13.1 Enfoque de investigación y tipo de investigación 21

13.2 Recolección de información 21

13.3 Investigación cuantitativa 23

13.4 Técnicas e instrumentos 23

13.5 Procesamientos y análisis 26

14 *Vinculación, difusión y divulgación*.....27

15 *Productos, hallazgos, conocimientos o resultados:*28

16 *Análisis y discusión de resultados:*.....65

17 *Conclusiones*.....71

18 *Impacto esperado*.....71

19 *Referencias*.....72

20 *Apéndices*.....80



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de puntos de muestreo del Lago de Amatitlán, Guatemala.	23
Tabla 2 Características a evaluar en los potenciales de bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán.	26
Tabla 3. Secciones de sedimentos extraídos desde la superficie hasta la profundidad máxima de dos núcleos de sedimentación obtenidos en el Lago de Amatitlán, Guatemala.....	38
Tabla 4 Subfamilia, descripción, características taxonómicas y hábitat de los géneros o especies de la familia Chironomidae, presentes en sustratos verticales de los sedimentos del Lago de Amatitlán, Guatemala.....	40
Tabla 5 Riqueza, abundancias totales (número de individuos), por género y especie de los individuos de la familia Chironomidae, encontrados en los sedimentos de los núcleos Oeste y Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.....	42
Tabla 6. Valores obtenidos de las relaciones C:N:P (Carbono orgánico [ppb]: Nitrógeno inorgánico total [ppb]: Fósforo inorgánico total [ppb]) y N:P obtenidos en los dos núcleos de sedimentos obtenidos del Lago de Amatitlán.	46
Tabla 7 Concentraciones de parámetros fisicoquímicos (pH y Conductividad eléctrica), nutrientes (Ca, Zn, Cu, Fe, Mg, Mn, K, Na) y metal pesado Pb en los sedimentos de los núcleos extraídos en los lados Este y Oeste del Lago de Amatitlán; Guatemala.* representa no medido.	48
Tabla 8 Matriz de los potenciales bioindicadores de la eutrofización cultural en núcleos de sedimento.	63

INDICES DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de muestra del sistema hidrológico Amatitlán	13
Figura 2 Cápsula cefálica de Chironomus anthracinus.	16
Figura 3 Microplásticos en sedimento del lago de Amatitlán.	18
Figura 4 Mapa de puntos de muestreo en el Lago de Amatitlán, Guatemala.....	22
Figura 5 Aparato seccionador de núcleo.	24
Figura 6. A. Descripción de las fallas geológicas a lo largo del límite de la placa y localidades cercanas. B. Estructura geológica de la costa sur de Guatemala (escala 1:250,000 m)	30
Figura 7 A. Estratigrafía del Lago de Amatitlán, Guatemala, B. Distribución del flujo de los Chocoyos en la región centroamericana.	31

Figura 8. Ubicación geográfica de la Cuenca María Linda, Guatemala. Fuente: Insivumeh, 2019.	33
Figura 9 Cuencas que alimentan a la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala.	34
Figura 10 Uso actual del suelo en las cuencas asociadas con la cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. Fuente: Salguero, (2019).	36
Figura 11 Mapa con usos del suelo en cada una de las tres cuencas de influencia de la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. Fuente: Salguero (2019).	37
Figura 12. Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés) de las especies y/o géneros obtenidos en el núcleo Este de sedimentos del Lago de Amatitlán, Guatemala.	45
Figura 13 Tipos y abundancias de microplásticos obtenidos en los núcleos de sedimentación de los lados Oeste (A) y Este (B) del Lago de Amatitlán, Guatemala.	51
Figura 14 Esquematación de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas: parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]), nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno inorgánico-N [ppm], Fósforo inorgánico [ppm], relaciones C:N:P y N:P, Calcio-Ca [ppb], Magnesio-Mg [ppm], Potasio-K [ppb], Sodio-Na [ppb]), metales (Cinc-Zn [ppm], Cobre-Cu [ppm], Hierro-Fe [ppm], Manganeso-Mn [ppm] y Plomo-Pb [ppm]) a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala.	55
Figura 15 Análisis de componentes principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones indican lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeso, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.	57
Figura 16 Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) entre las variables biológicas y las no biológicas analizadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones representan lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeso, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.	58
Figura 17. Esquematación de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas: parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]), nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno inorgánico-N [ppm], Fósforo inorgánico [ppm], relaciones C:N:P y N:P, Calcio-Ca [ppb], Magnesio-Mg [ppm], Potasio-K [ppb], Sodio-Na [ppb]), metales (Cinc-Zn [ppm], Cobre-Cu [ppm], Hierro-Fe [ppm], Manganeso-Mn [ppm] y Plomo-Pb [ppm]) a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.	59
Figura 18 Análisis de componentes principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo del lado Este Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones indican lo	



siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeso, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio. 61

Figura 19 Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) entre las variables biológicas y las no biológicas analizadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones representan lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeso, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio. 62

INDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1. Extracción de núcleos de sedimento en el Lago de Amatitlán.	80
Apéndice 2 No. Filtrado de muestras para conteo de microplásticos	80
Apéndice 3 Muestra de sedimento con microplásticos tipo línea roja.	81
Apéndice 4 Secado y pesaje de muestras para calculo de porcentaje de humedad.	81
Apéndice 5 Núcleos extraído en el Lago de Amatitlán.	82
Apéndice 6 División de los núcleos en “secciones de sedimento”.	83
Apéndice 7 Cápsula cefálicas de quironómido flotando en el sedimnto	84
Apéndice 8 Pesaje y separación de muestras para múltiples análisis.	84



1 Título del proyecto

“Paleoecotoxicología, una herramienta para la reconstrucción del pasado reciente en el Lago de Amatitlán, Guatemala”.

2 Resumen

La paleoecotoxicología es una rama de la ciencia que estudia procesos de contaminación en ambientes pasados de ecosistemas naturales. Esta permite entender no solamente los efectos de contaminantes sino también de estimar las posibles fuentes de los mismos y sus efectos en comunidades biológicas, entre otras. La siguiente investigación representa un acercamiento al estudio de la eutrofización cultural en el ambiente urbano del Lago de Amatitlán, Guatemala. Los análisis paleolimnológicos de los sedimentos 80cm de profundidad de los dos lados del lago (Oeste y Este), del lago combinados con los quironómidos, realizan una aproximación para determinar que el lado Oeste y Este del Lago de Amatitlán, evidencia diferencias en las concentraciones de nutrientes y en la comunidad de especies. El Este del Lago evidencia mayor relación de Nitrógeno/Fósforo, N:P, mientras que el Oeste presento mayores valores de nutrientes como el Fósforo. Finalmente, los indicadores biológicos de la familia Chironomidae (Phylum Artropoda) evidenciaron una mayor abundancia en el Lado Este (423 ind) y más diversas (9 géneros) que en la comunidad del Oeste (20 ind y 3 géneros). Los resultados obtenidos en el Lago de Amatitlán, evidenciaron que los dos lagos presentan una eutrofización cultural, debido a procesos hidrológicos y de usos. El lado Este responde a un manejo de uso de suelo basado en actividades de agricultura con menor intercambio de agua, mientras que el lado Oeste evidencio mayor impacto de tipo industrial y doméstico. Con este presente estudio es posible determinar que con los quironómidos se puede realizar un acercamiento a la eutrofización cultural del Lago de Amatitlán, Guatemala.

3 Palabras clave

Paleolimnología, ecotoxicología, Paleoecotoxicología, eutrofización cultural, bioindicadores.



4 Abstract and keyword

This research presents via a transdisciplinary approach, the study of cultural eutrophication in a urban lake in Amatitlán, Guatemala. Paleolimnological analysis in lake sediments evaluated via a multiproxy approach determined that both east and west sides of Lake Amatitlán evidenced different concentrations of elements in parts per million (ppm), such as (Cu, Fe, Mn, Na, Zn), heavy metal in ppm (Pb), microplastics in ind/g, and nutrients in % (N, K, P and organic carbon) evidenced in sediments from both parts of the lake (east and west) at least in the last decades. East side of the lake evidences a higher concentrations of Zn, Na, Mn, %N, %K and N:P ratios; whereas the west side evidenced a higher pH with concomitant higher concentrations of Fe, microplastics, %P, and %Ca. Even though a prominent peak (14ppm) in concentration was found at the depth of 20cms in the east side sediments, a constant higher concentration of this heavy metal was found in the west side (7ppm). Finally, biological indicators from the Chironomidae family (Phylum Arthropoda) evidenced a more abundant (408 ind) and more diverse (8 species) community in the east side in comparison to the west side (40 and 3; specifically). The obtained results in Lake Amatitlán, until a depth of 80cms from lake bottom surface, evidenced that both lake sides evidenced cultural eutrophication, though from different managements. The east side has responded to a management more based in agricultural activities with lower water exchange, whereas the west side evidenced a more industrial and domestic type of activities, inferred by the high concentration of Pb and microplastics (in the first 20 cms). With the present study it is possible to determine that within an paleoecotoxicological approach cultural eutrophication from Lake Amatitlán, Guatemala, could be inferred using the combination of paleolimnological and ecotoxicological indicators in a multiproxy approach.

Keywords: Paleolimnology, ecotoxicology, paleoecotoxicology, cultural eutrophication and bioindicators.



5 Introducción

Los sedimentos en los lagos son archivos valiosos del cambio ambiental pasado (Smol, 1992), pudiéndose acumular continuamente de una manera ordenada y rápida (1-10 mm.año⁻¹). Pueden ser estudiados con respecto a las comunidades biológicas o sus estructuras prevalecientes (polen, diatomeas, organismos del Filo Arthropoda, amebas testadas, micro-moluscos, etc.), por concentraciones de compuestos importantes (isótopos estables, elementos traza, moléculas orgánicas, etc.) o bien por otras características más específicas (propiedades magnéticas, etc.). La interpretación de estos puede ser utilizada para inferir temporalidades y magnitudes de eventos climáticos o condiciones ambientales pasadas. Los estudios paleolimnológicos han servido para interpretar escenarios ambientales pasados, sin embargo en muy pocos estudios se ha considerado los efectos de contaminantes relacionados con actividades antropogénicas (Hollert et al., 2018) o bien la bioacumulación de compuestos tóxicos emergentes, tales como insecticidas en ensamblajes de chironomidos (Zeng, 2014). Eventos inducidos como la eutrofización acelerada de cuerpos límnicos en la actualidad son motivo de estudio, no obstante el conocimiento es mínimo (Costa-Böddeker, et al., 2012; Langdon, Ruiz, Brodersen & Foster, 2006; Rosenmeier, Brenner, Kenney, Whitmore & Taylor, 2004).

En países en desarrollo los recursos naturales, tal como lagos, son utilizados para actividades domésticas y agrícolas con un nivel mínimo de gobernabilidad; siendo utilizados como vertederos de aguas residuales. Tal es el caso del Lago de Amatitlán en Guatemala, el cual también es utilizado para actividades industriales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2017). En la actualidad, el Lago de Amatitlán es considerado hiper-eutrófico (División de control calidad ambiental y manejo de lagos, 2015), condiciones que han permitido la proliferación excesiva de algas cianobacterias productoras de microcistinas tóxicas, excediendo por casi nueve veces los límites permitidos para el desarrollo de vida acuática (Romero-Oliva, Contardo-Jara, Block, Pflugmacher, 2014; World Health Organization [WHO], 2003). Las condiciones actuales del Lago de Amatitlán son monitoreadas (Autoridad de Manejo Sustentable Amatitlán [AMSA], 2015); sin embargo, la historia ecológica es poco conocida: a partir de cuándo las condiciones ambientales han variado, la intensidad y sus efectos en el ambiente. Por tal motivo, es necesario realizar un estudio integral de los procesos actuales basados en los eventos pasados. Dicho primer acercamiento fue estudiado por Pérez et al., (2013). En dicho estudio se elaboró un listado de los lagos en el Neotrópico (incluyendo los lagos más importantes para Guatemala) y se corroboró en el estrato sedimentario superficial la condición de eutrófico para el Lago de Amatitlán. Dichos resultados fueron corroborados por Ellenberg, (2014). Sin embargo, no se conoce el estado trófico pasado y su posible influencia antropogénica.

La presente investigación, con la finalidad de reducir la brecha entre lo que se conoce de la actualidad del Lago de Amatitlán y su pasado reciente; estudió la eutrofización cultural/inducida



a partir del cambio en el ensamblaje de organismos sensibles a cambios ambientales y las concentraciones de indicadores no biológicos en los sedimentos (80 cm de profundidad). Esto permite reconstruir no solo el ensamblaje de organismos sensibles a cambios ambientales junto con sus características inorgánicas, sino también conocer procesos de eutrofización plasmados en los sedimentos verticales del Lago de Amatitlán. Finalmente, los resultados producidos son los primeros para el Lago de Amatitlán y los primeros en abordar el tema de eutrofización cultural/inducida a través de la paleoecotoxicología.

6 Planteamiento del problema

En la actualidad, los problemas ambientales relacionados a la calidad del agua en diversos ecosistemas son motivo de atención y estudio. En Guatemala, se considera que alrededor de 32,686 millones de metros cúbicos anuales del caudal neto disponible se encuentran accesibles para la vida acuática y el consumo humano, sin embargo, se estima que hasta el 2005, el 53% de éste se encontraba contaminado (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN] & Agencia de Cooperación Internacional del Japón[JICA], 2009). De manera que la importancia de conocer los procesos naturales sumado a los efectos de actividades antropogénicas en ecosistemas acuáticos en Guatemala es de vital importancia. Desde el punto de vista social, Guatemala en las últimas décadas ha venido desarrollando un modelo de desarrollo económico el cual es del tipo expansivo, competitivo y de corto plazo. El mismo ha conllevado al deterioro ambiental (fuentes de agua y los suelo); además de ocasionar serios problemas en el ámbito social creando un clima generalizado de inseguridad e irrespeto al sistema legal del país (Díaz, 2010). El aumento en el deterioro ambiental se traduce directamente en mayor pobreza para Guatemala.

En la actualidad, los estudios para conocer las dinámicas en ecosistemas acuáticos se basan en la medición de procesos actuales, sin embargo, dicha información no permite observar de manera integral el funcionamiento de los mismos ni mucho menos establecer patrones históricos. Mediante la emergente disciplina de la paleoecotoxicología, es posible no solamente estudiar las dinámicas pasadas de cuerpos límnicos sino también estudiar fuentes de contaminación de origen antropogénico (Hollert et al., 2018). Lo que permite documentar el estrés antropogénico al cual los cuerpos de agua, tal como en el caso del Lago de Amatitlán, han sido expuestos en el pasado reciente. Esto por medio de organismos biológicos e indicadores no biológicos sensibles a cambios ambientales que permiten establecer el estado ambiental actual y en el caso de la paleoecotoxicología en el pasado reciente de cierto ecosistema.

En la cuenca del Lago de Amatitlán, se localizan alrededor de once municipios, de los cuales siete tienen influencia directa con el lago; incluyendo a cuatro zonas de la ciudad capital (Autoridad para el manejo sustentable del Lago de Amatitlán [AMSA], 2015). Además el agua del lago es utilizada para actividades agrícolas y recreativas entre otras (Romero-Oliva, 2018). A



pesar de ya conocer que dicho lago cuenta con grandes descargas de agua contaminada proveniente de actividades industriales y domésticas (1,500-1,915 ton.día⁻¹) y por ende es considerado hiper-eutrófico (debido a la eutrofización cultural/inducida) (Autoridad para el manejo sustentable del Lago de Amatitlán [AMSA], 2015; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2017), es necesario conocer el patrón de contaminación histórico con la finalidad de poder proponer un mejor y más apropiado manejo para este cuerpo de agua.

7 Preguntas de investigación

7.1 GENERAL

- ¿Son capaces los organismos biológicos sensibles al cambio ambiental (pertenecientes al Filo Arthropoda) y los indicadores no biológicos (Nitrógeno[N], Fósforo [P] Totales [T], materia orgánica, pH, metales pesados y microplásticos) de explicar procesos de eutrofización cultural/inducida en el pasado reciente del Lago de Amatitlán, Guatemala?

7.2 PREGUNTAS ESPECÍFICAS

- ¿Cuáles son los grupos taxonómicos sensibles al cambio ambiental pertenecientes al Filo Arthropoda (Familia Chironomidae) en las secciones verticales de cada núcleo de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán?
- ¿Cuáles son las concentraciones de indicadores no biológicos (N-T, P-T, materia orgánica, pH, metales pesados [Arsénico, Cadmio, Zinc, Mercurio, Níquel y Plomo] y microplásticos) en las secciones verticales de los núcleos de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán, Guatemala?
- ¿Cuál es la relación entre los organismos biológicos sensibles a cambios ambientales y los indicadores no biológicos que explique la eutrofización cultural/inducida en el Lago de Amatitlán, Guatemala?

8 Delimitación en tiempo y espacio

- Delimitación en tiempo: El estudio se desarrolló de febrero a diciembre de 2019.
- Delimitación espacial: Lago de Amatitlán, Guatemala (1200 metros sobre el nivel del mar [m.s.n.m.]) entre la latitud N14°26'03.7'' y longitud O90°32'58.6''.



9 Marco teórico

9.1 Estado trófico

Se mide a través de variables que están directa e indirectamente relacionadas con la productividad primaria; permite conocer información básica para ser utilizada en la medición de parámetros de integridad biótica, monitoreo de la influencia antropogénica y guiar planes de restauración (Dodds & Cole, 2008). Éste se ve influenciado por factores naturales y antropogénicos (Liu, Zhang & Liu, 2010).

9.2 Eutrofización cultural/inducida

Se refiere a la degradación de los ecosistemas acuáticos generada por una excesiva producción de biomasa (plantas y algas). Esta es provocada por una sobrecarga de nutrientes (N y P) a través de la escorrentía de aguas residuales, actividades agrícolas o cualquier perturbación del ecosistema inducida por el humano (Saulnier-Talbot, 2016; Stoermer & Smol, 2001). La entrada de escorrentía doméstica, drenajes, agricultura, etc. que supere la edafología normal del cuerpo de agua puede deteriorar enormemente la biología del ecosistema (Hasler, 1947).

9.3 Paleolimnología

Ciencia multidisciplinaria que utiliza la información física, química y biológica preservada en los perfiles de sedimento que permiten la reconstrucción de las condiciones ambientales del pasado en un ecosistema acuático (Smol, 1992). Además es una herramienta indispensable para generar información acerca del estado de conservación y el enfoque del manejo que se debe aplicar a ecosistemas acuáticos. Esta ciencia contribuye a la comprensión significativa del funcionamiento a largo plazo y resiliencia de estos ecosistemas (Saulnier-Talbot, 2016) para promover un manejo ambiental sostenible e integral.

9.4 Paleoecotoxicología

La paleoecotoxicología es una nueva tendencia de investigación multidisciplinaria, que permite correlacionar paleobioindicadores con el efecto de las actividades antropogénicas en los ecosistemas del pasado (Korosi, Thienpont, Smol & Blais, 2017; Rose, Turner, Yang, Hall & Harrad, 2018). Esta integra disciplinas como: ecotoxicología, química ambiental, geoquímica y paleolimnología; permitiendo conocer la deposición histórica de contaminantes como por ejemplo: consecuencias ecológicas de la exposición a contaminantes, impactos antropogénicos



heredados y actuales, y predicción de impactos futuros en los ecosistemas acuáticos (Herkovits 2001b; Hollert et al., 2018; Korisi et al., 2017).

Asimismo, a través de la reconstrucción ambiental se pueden determinar parámetros cuantitativos tales como: niveles tróficos, pH, conductividad, temperatura y profundidad del agua, entre otros; proporcionando herramientas para evaluar la calidad del agua actual y estableciendo condiciones de referencia de un cierto momento (Hollert et al., 2018). Esto de manera que los resultados obtenidos permitan contar con argumentos importantes para la toma de decisiones en cuanto al manejo, conservación de la vida acuática y restauración de dichos ecosistemas (Hollert et al., 2018; Korisi et al., 2017). Finalmente, estudiar y comprender los efectos de contaminantes y contaminantes emergentes en el ambiente y sus efectos en el ecosistema es importante para el manejo integral de ecosistemas lacustres (Korosi et al., 2017).

9.5 Organismos biológicos sensibles al cambio ambiental pertenecientes al Filo Arthropoda

Los registros fósiles de los sedimentos en lagos son de gran importancia para evaluar los cambios ambientales relacionados a eventos naturales como erupciones, inundaciones, incendios forestales y actividades humanas (Laprida, Massaferró, Mercau & Cusminsky 2014). Dentro de estos registros fósiles se cuenta con organismos biológicos que, si bien es cierto, no se encuentran vivos; algunas de sus estructuras permanecen en dichos sedimentos permitiendo conocer y estudiar la composición de comunidades biológicas características de ciertas condiciones ambientales. De manera que dichos organismos y los cambios en su composición y abundancia permiten identificarlos como buenos paleobioindicadores. Algunas de las características que permiten darles esta clasificación son: (a) capacidad de preservarse bien en los sedimentos permitiendo ser identificados hasta morfógenos y a veces a morfoespecie, (b) ser abundantes, (c) ser altamente sensibles a los cambios ambientales, (d) contar con ciclos de vida que responden rápidamente a los cambios ambientales (Pérez et al., 2013).

9.5.1 Familia Chironomidae

Los chironomidos son hexápodos del Orden Diptera y pertenecientes al Filo Arthropoda. Estos organismos son ampliamente distribuidos, con una alta abundancia y diversidad en diferentes ambientes. Poseen larvas con hábitos acuáticos y constituyen una valiosa herramienta para la paleolimnología debido a que sus cápsulas cefálicas son fuertemente quitinizadas con caracteres morfológicos que se preservan en los sedimentos a lo largo del tiempo permitiendo así su identificación taxonómica (Laprida et al., 2014; Massaferró, Correa-Metrio & Pérez 2017;

Rosenberg, 1992). Según Araneda et al., (2007), el recambio de las especies de la Familia Chironomidae se ve afectado por cambios en la deposición del sedimento cuando variables como las siguientes son modificadas: naturaleza de la materia orgánica contenida, concentración de metales pesados y composición mineralógica.

Figura 2 Cápsula cefálica de *Chironomus anthracinus*.



9.6 Parámetros No Biológicos usados en el estudio ambiental

Los patrones de partículas y presencia de contaminantes con potencial tóxico para el desarrollo o vida de los organismos en los ecosistemas se ven influenciados por escalas temporales y espaciales (Schwarzenbach, Gschwend & Imboden, 2005). De manera que las actividades humanas quedan registradas mediante factores abióticos, que indican condiciones ambientales pasadas (Hollert et al., 2018).

9.6.1 Fósforo total

El Fósforo total es la suma de todos los componentes de fósforo naturales, en su forma particular y soluble (Howell, 2010). El estudio del Fósforo en sedimentos permite caracterizar el estado trófico en los lagos (Peters, 1986); siendo sus altas concentraciones la causa más común de la eutrofización (Kopáček, Hejzlar, Kana, Norton & Stuchlík, 2015). Asimismo, permite conocer variaciones espaciales y temporales en procesos sedimentarios en lagos (Loizeau, Span, Coppee & Dominik, 2001). Por su parte, al haber una gran cantidad de Fósforo retenido en los suelos es consecuencia de la acidificación y pedogénesis a largo plazo (Norton et al., 2011).



9.6.2 Nitrógeno total

El depósito de Nitrógeno ha causado la acidificación de los lagos (Gasiorowski & Sienkiewicz, 2013; Lepori & Keck, 2012). Asimismo, el incremento de Nitrógeno en estudios limnológicos ha demostrado tener asociación con eutrofización, disminución de la claridad del agua y cambios en la composición de especies (Fenn et al., 2003; Spaulding, Otu, Wolfe & Baron, 2015).

9.6.3 Materia orgánica

Los contenidos de materia orgánica en sedimentos incluyen elementos, isótopos e indicadores moleculares que pueden usarse en la reconstrucción ambiental de lagos y sus áreas aledañas (Das, Routh, Roychoudhury & Val, 2008). La materia orgánica conserva su fuente original y refleja las condiciones ambientales prevalecientes en la cuenca al momento de la deposición (Das et al., 2008; Meyers 1997). Para describirla, se ha utilizado la concentración total de carbón orgánico y la tasa de masa acumulada de carbón orgánico (Meyers, 2003).

9.6.4 Otros nutrientes, sales, metales y metales pesados

En las últimas décadas, las actividades antropogénicas han acelerado el ciclo de los elementos geoquímicos, aumentando la liberación de metales pesados a los cuerpos de agua por escorrentía (Wu et al., 2012; Zahra, Hashmi, Malik & Ahmed, 2014; Zeng, 2014). Muchos de ellos son tóxicos para los organismos, cambiando su estructura poblacional (Morin et al., 2008). La paleoecotoxicología ha permitido evaluar el estrés químico y físico en la evolución, y el efecto que tienen los metales pesados en diferentes organismo acuáticos (Gagliardi, Pettigrove, Long & Hoffmann, 2016; Herkovits, 2001b; Thienpont et al., 2016). Algunos de los metales pesados mayormente utilizados para monitoreo y en ecotoxicología de campo son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Zinc (Zn), Cobre, (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg) y Níquel (Ni) (Tchounwou, Yedjou, Patlolla & Sutton, 2014).

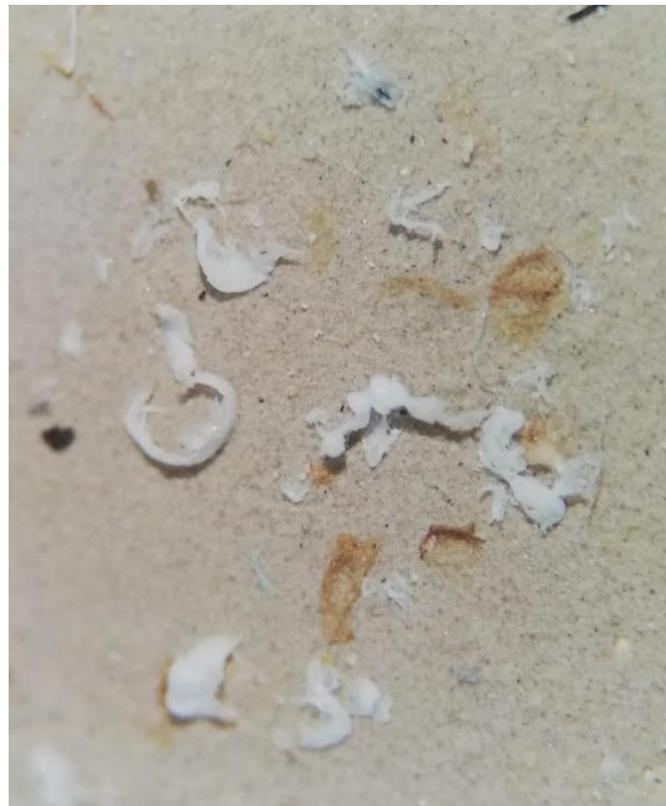


9.6.5 Microplásticos

Los microplásticos son partículas de plástico menores a 5mm de tamaño (Arthur, Baker, & Bamford, 2009), que pueden ser fabricados o derivados de la fragmentación de plástico más grande (Browne, Galloway, & Thompson, 2007; Derraik, 2002). Se han identificado como uno de los principales problemas de contaminación ambiental debido a su ingestión por organismos acuáticos, su potencial de adsorción, lixiviación de contaminantes y aditivos en el ambiente (Cole, Lindeque, Halsband, & Galloway, 2011; Gregory, 2009; Teuten et al., 2009).

El plástico es altamente persistente llevándole cientos de años su degradación, permitiendo que se deposite en los sedimentos (Andrady, 2003; Barnes, Galgani, Thompson, & Barlaz 2009). Los lagos representan sumideros de captación de microplásticos, reflejando cambios en la producción y uso de ellos a lo largo del tiempo. Así el estudio de microplásticos en núcleos de sedimentos pueden permitir la cuantificación del flujo histórico de microplásticos en ambientes terrestres, dulceacuícolas y marinos (Turner, Horton, Rose, & Hall 2019).

Figura 3 Microplásticos en sedimento del lago de Amatitlán.





10 Estado del arte

En la actualidad se habla mucho de la contaminación de las fuentes de agua y la poca calidad de ésta para el consumo humano, desarrollo de vida acuática, entre otros; como un problema latente y necesario de abordar. La limnología permite el estudio de la dinámica entre los componentes biológicos y no biológicos de un cuerpo de agua para explicar el estado ecológico del mismo. Se enfoca en comprender y explicar los procesos actuales y las interacciones entre sus componentes con la finalidad de conocer tendencias y proyectar efectos futuros de estas tendencias. Sin embargo, no considera los eventos pasados o históricos que podrían complementar dicha perspectiva. De manera que surge como ciencia relativamente reciente la paleolimnología (Korosi et al., 2017), la cual aborda las mismas temáticas, en una escala temporal más amplia, tal como durante el pasado reciente (menos de 1000 años de sedimentación) y pasado antiguo (antes del Holoceno) (Binford et al., 1987). Así integra procesos pasados con actuales y permite, de una manera más objetiva, predecir el futuro. En ambas disciplinas se evalúan indicadores que permiten entender los procesos anteriormente mencionados (Smol, 1992). Estos deben ser variados y complementarios para poder explicar de una manera integral el fenómeno de interés o estudio (Smol, 1992). Los procesos en esta ciencia son comprendidos a través del cambio, comportamiento, o ensamblaje biológico de organismos sensibles a cambios ambientales (especies recientes, fósiles o sus estructuras) o no biológicos (compuestos químicos, tal como la geoquímica) (Williamson, Saros, Vincent, & Smol, 2009). Debido a que los registros fósiles prevalecientes en el tiempo y provenientes de dichos organismos pueden explicar el estado ecológico pasado, estos también pueden indicar procesos pasados de eutrofización o intervenciones antropogénicas tales como actividades industriales en el pasado reciente de cierto cuerpo de agua (Fontana, Luiza, & Mark, 2014; Reavie, Neill, Little, & Smol, 2009).

En la actualidad el interés hacia los efectos antropogénicos en los ecosistemas, y específicamente en los acuáticos, es de suma importancia, esto también sumado a querer entender de una manera integral los procesos de cambio climático. Una nueva tendencia es entonces correlacionar paleoindicadores (de origen biológico y no biológico), que expliquen el efecto de actividades antropogénicas en una nueva línea de investigación que incluya herramientas multidisciplinarias como lo es la “Paleoecotoxicología” (Korosi et al., 2017). La Paleoecotoxicología, entonces explica los efectos del estrés antropogénico en sistemas complejos naturales y multivariados (Cairns, 2002) en ambientes pasados (Korosi et al., 2017). Sin embargo, hasta hoy pocos o casi ningún estudio ha evaluado los efectos tóxicos o influencia en el estado trófico (eutrofización cultural/inducida) de cierto compuesto proveniente de actividades antropogénicas en sedimentos del pasado reciente de cierto ecosistema (Zeng, 2014). Considerando el potencial que dichos sedimentos pueden proveer y la falta de información referente a la intervención antropogénica en procesos de eutrofización de cuerpos



de agua, el presente estudio pretende ser uno de los primeros a nivel mundial y el primero en el país que correlacione indicadores no biológicos relacionados con este fenómeno, tales como concentraciones N-T, P-T, materia orgánica, pH, metales pesados y microplásticos con organismos biológicos sensibles al cambio ambiental del filo Arthropoda en el Lago de Amatitlán, Guatemala.

11 Objetivos

11.1 General:

- Explicar la eutrofización cultural/inducida por medio de indicadores biológicos y no biológicos en los sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán, Guatemala.

11.2 Específicos:

- Identificar, describir y cuantificar los grupos de organismos biológicos sensibles al cambio ambiental del filo Arthropoda (familia Chironomidae) en las secciones verticales de cada núcleo de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán.
- Cuantificar indicadores no biológicos como las concentraciones de N-T, P-T, materia orgánica, pH, metales pesados (Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn y Pb), y microplásticos en las secciones verticales de los núcleos de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán.
- Establecer la relación entre los organismos biológicos sensibles al cambio ambiental y los indicadores no biológicos en las secciones verticales de los núcleos de sedimento del pasado reciente del Lago de Amatitlán.

12 Hipótesis

Organismos biológicos sensibles al cambio ambiental del filo Arthropoda (familia Chironomidae) junto con indicadores no biológicos (N-T, P-T, materia orgánica, pH, metales pesados [Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn y Pb] y microplásticos) explican la eutrofización cultural/inducida a partir de los sedimentos en el pasado reciente del Lago de Amatitlán, Guatemala.



13 Materiales y métodos

13.1 Enfoque de investigación y tipo de investigación

La investigación se enfocó en aspectos cuantitativos, promoviendo una investigación de tipo asociativo correlacional. A partir de ella se conoció el estado ambiental del Lago de Amatitlán durante el pasado reciente a través de indicadores biológicos y no biológicos analizados en sedimentos. Adicionalmente aportó con componentes de investigación básica (tal como la identificación taxonómica de individuos de la familia Chironomidae) que permitieron conocer mejor la composición y ensamblaje de las comunidades de organismos sensibles a cambios ambientales. Por último, exploró los inicios y desarrollo de la contaminación por plásticos a través de partículas de microplásticos en sedimentos del Lago de Amatitlán.

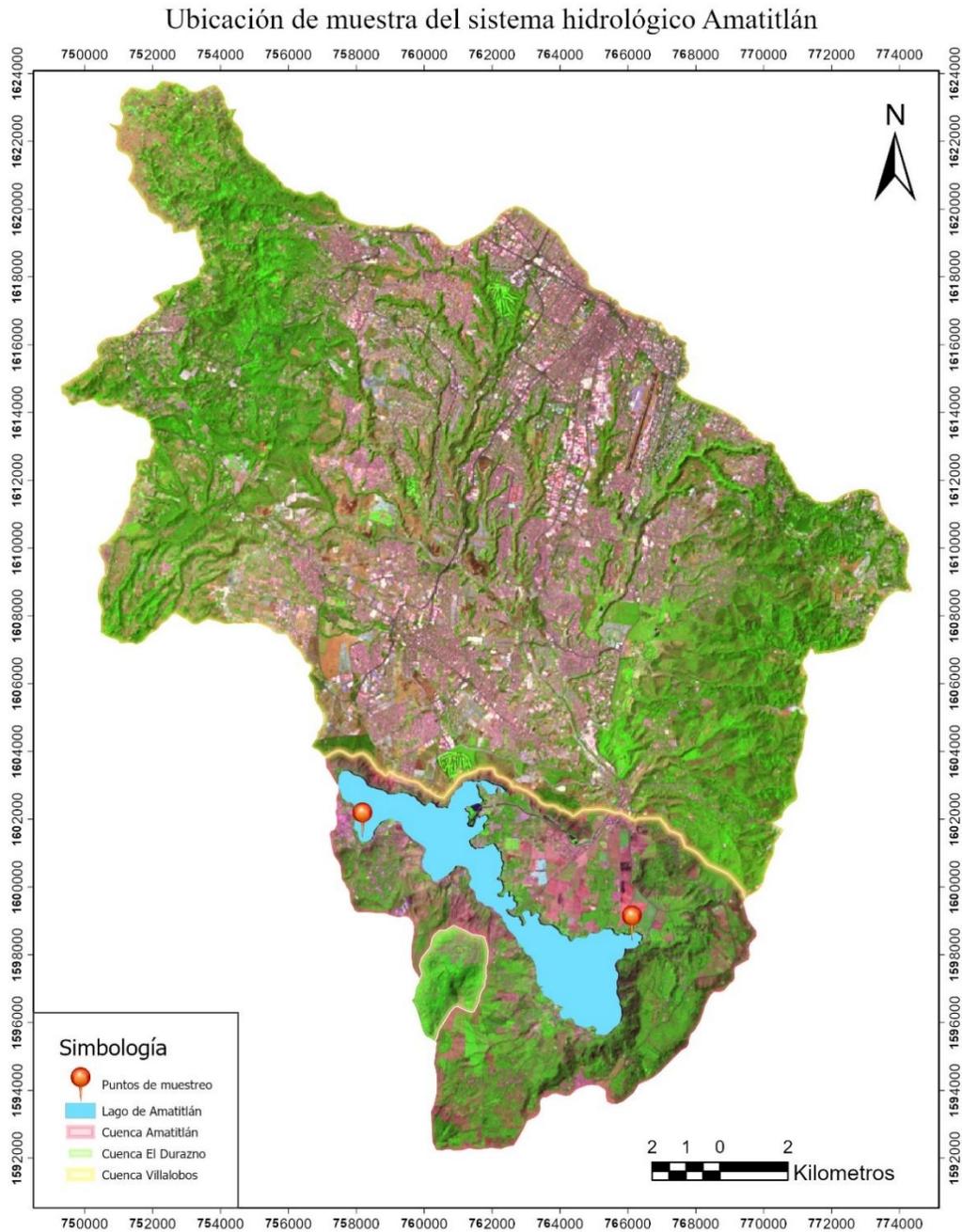
13.2 Recolección de información

Las muestras se colectaron en enero 2019, previo a la ejecución del proyecto, con ayuda del proyecto NatGeo© dirigido por investigadores de la Universidad de Alabama y Florida de Estados Unidos (Matthew Waters, Mark Brenner y Jason Curtis).

- Universo de estudio: sedimentos del Lago de Amatitlán, Guatemala.
- Población: Dos sitios de colecta: este y oeste ambos sitios determinados según el estudio de Vélez y colaboradores (2011) (Fig. 4 y Tabla 1). Los puntos poseen sedimentación característica para este tipo de estudios. Además, presentan características y condiciones diferentes que los hacen independientes y únicos.
- Muestra: dos núcleos de sedimentos de un largo entre 80 cm, obtenidos a través de un nucleador corto colectados en los dos sitios elegidos, los que mostraron las diferentes condiciones del Lago de Amatitlán. El nucleador es utilizado para estudios paleolimnológicos del pasado reciente (Binford et al., 1987; Massaferrero et al., 2017). Las muestras no son dependientes de temporalidad, ya que lo que se busca es obtener los sedimentos que se han depositado en el lago a lo largo de los años.



Figura 4 Mapa de puntos de muestreo en el Lago de Amatitlán, Guatemala.



Referencia: Topografía base: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission); Cartografía base: Imagen falso color 7,5,4 de imagen Landsat 8 de marzo de 2018. Datum: WGS 1984, Proyección: Zona 15 P; Autor: Ing. Geól. Francis E. Salguero Díaz; Fecha de elaboración: Octubre de 2019



Tabla 1. Coordenadas de puntos de muestreo del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Punto de Muestreo	Coordenadas
Este	N 14°26'45.5" O 90°31'53.7"
Oeste	N 14°28'27.1" O 90°36'17.5"

13.3 Investigación cuantitativa

En cada uno de los dos sitios, se midió la profundidad del sitio con la ayuda de un disco Secchi y se colectaron dos núcleos de sedimento. Para esto se utilizó el nucleador de sedimento "Livingstone piston corer", tal como el utilizado por Vélez y colaboradores (2011). Para esto se empleó un tubo de 85 cm de largo y 6.99 cm de diámetro según la metodología de Fisher, Brenner, y Reddy (1992).

Cada uno de los núcleos fue seccionado cada 2 cm., lo cual se definió por conveniencia y en base al conocimiento y experiencia de los investigadores del proyecto NatGeo©; dichas secciones no son réplicas ya que cada una de ellas representa una temporalidad en la historia (cada una de las secciones se denominará muestra). Posteriormente, las muestras se transportaron y almacenaron a 4 °C en la estación biológica de Amsa. De cada muestra se pesó 20 g para análisis de microplásticos, 30 g para el análisis de N-T, P-T, materia orgánica, pH, Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn; 3 g para análisis de Pb, y 3 g para análisis de indicadores biológicos.

13.4 Técnicas e instrumentos

○ Colecta de muestras

La colecta de los núcleos se hizo con un nucleador de sedimento "Livingstone piston corer", midiendo la profundidad de las áreas de colecta con un disco Secchi. Posterior a ello, se seccionó los núcleos con un aparato fabricado por los investigadores del proyecto NatGeo©, que permitió obtener las secciones de sedimento de 2 cm de sedimentos, correspondiendo a profundidad a partir de la parte superficial (0cms).

Figura 5 Aparato seccionador de núcleo.



○ Análisis de microplásticos

El análisis de microplásticos se realizó en el Laboratorio de Investigaciones Químicas y Biológicas de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La metodología se hizo en base a las metodologías de Masura y colaboradores (2015) modificada. Las muestras se tamizaron a través de un tamiz de acero inoxidable de 500 μm . Posterior, a ello se realizó la digestión orgánica con solución de Fe 0.05 M y peróxido de hidrógeno 35%. Se prosiguió con una separación por densidad con Cloruro de Sodio. Se terminó con una filtración de las muestras con un papel filtro de microporo de 0.45 μm . Las muestras se observaron bajo un estereoscopio. Adicionalmente, todas las fases de la separación, tratamiento y procesamiento fueron analizadas con blancos conteniendo solamente agua destilada como controles. Estas muestras también fueron analizadas y contabilizadas para eliminar el número encontrado en los experimentos control de las muestras de sedimento.

○ Análisis de N-T, P-T, materia orgánica, pH, Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn

Estos análisis se realizaron por el Laboratorio de Agronomía de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para ello se usó lo siguiente:

pH: método Potenciométrico, relación agua suelo 5mL:1.

C.E. Método Conductivímetro, relación suelo agua 10mL:1.

N-T: método Semi-micro Kjeldahl.

C.O. Método Walkley & Black Modificado.

Extracción de totales: Método de Combustión Seca.

Cuantificación de K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn a través de espectrofotometría de Absorción Atómica.



Cuantificación de P, por Colorimetría, Espectrofotometría UV/visible.

- Análisis de Pb

El análisis se realizó por el Laboratorio de Laboratorio de Aguas y Sólidos de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán bajo el método de digestión EPA 3050B (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation, APHA,2006).. Seguidamente se realizó un cálculo de categorías de contaminación propuestas por Wei et al., (2019), basados en la concentración obtenida en los sedimentos y la concentración geológica de la siguiente manera:

En base a este cálculo, establecieron seis categorías como se describen a continuación:

Categoría 1: aquellas concentraciones ≤ 1 ppm (ug.g-1) como sedimentos no contaminados a moderadamente contaminados.

Categoría 2: aquellas concentraciones ≤ 2 ppm como sedimentos moderadamente contaminados,

Categoría 3: aquellas concentraciones ≤ 3 ppm como sedimentos moderadamente contaminados a fuertemente contaminados,

Categoría 4: aquellas concentraciones ≤ 4 ppm como sedimentos fuertemente contaminados,

Categoría 5: aquellas concentraciones ≤ 5 ppm como sedimentos fuertemente contaminados a extremadamente contaminados y

Categoría 6: a aquellas concentraciones > 5 como sedimentos extremadamente contaminados.

- Análisis de indicadores biológicos

El análisis de indicadores biológicos de la familia Chironomidae se realizó en el Laboratorio de Investigaciones Químicas y Biológicas de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las muestras fueron de-floculadas en KOH al 10%, a 70 °C durante 10 minutos para eliminar el exceso de materia orgánica, luego se calentaron en agua a 90 °C durante 20 minutos. Posteriormente el sedimento junto con agua destilada se pasado a través de tamices de luz de malla de 212 μm y 63 μm según Massaferrro y Brooks (2002). Posteriormente, el sedimento obtenido se observó a través de un microscopio óptico con una magnificación de 25 - 40 X. Se procedió a separar las cápsulas cefálicas las cuales ser colocaron en vista ventral para ser identificadas por medio de claves dicotómicas (Massaferrro & Brooks, 2002; Pérez et al., 2010). Los organismos identificados se almacenaronn en un álbum para láminas fijas, y se depositaron en las colecciones de referencia de la Escuela de Biología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Propuesta de bioindicadores de la familia Chironomidae para la determinación de la calidad del agua



Posterior al análisis estadístico. A cada uno de estos organismos se le aplicó la herramienta generada para evaluar las especies potenciales bioindicadores de la eutrofización cultural (ver Tabla 2). Cada especie, fue evaluada para cada una de las características propuestas, según la literatura revisada. Si la especie presenta una de las características, se les asignó un valor mínimo de 1 y un valor máximo de 10. Debido a los objetivos de la investigación, para la característica de Organismos sensibles a la contaminación, se le dará una ponderación de 0-3 y para la característica de Altamente sensibles a los cambios ambientales una ponderación de 0-2. Las especies propuestas, son las que presenten un valor mayor o igual a 7.

Tabla 2 Características a evaluar en los potenciales de bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán.

N	Característica	Si/no	Punteo
1	Organismos sensibles a la contaminación		
2	Altamente sensibles a los cambios ambientales.		
3	Se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero ó morfoespecie.		
4	Especialización de hábitat.		
5	Taxonomía y ecología bien reconocida		
6	Fáciles de recolectar por ser abundantes		
7	Ciclo de vida y comunidades con respuesta a los cambios ambiental		

Fuente: (Alba-Tercedor & Sánchez-Ortega, 1986, 53; Heink & Kowarik, 2010, 3791; Noss, 2011, 362; Pearson, 1994, 78; Pérez et al., 2013, p.602).

Posteriormente se construyó una matriz para visualizar aquellos organismos que presenten las mejores características para ser bioindicadores y posteriormente se realizó una revisión bibliográfica para confirmar los organismos propuestos.

13.5 Procesamientos y análisis

Para el análisis de datos de la matriz de datos obtenidos a partir de la investigación se realizaron los siguientes pasos para representar los resultados.



Las variables biológicas de riqueza, abundancia total y abundancia por especie, fueron representadas en una tabla integrada para el lado Oeste y Este. Las variables no biológicas, clasificadas como: macronutrientes, expresadas en porcentajes o partes por billón (ppb), fueron descritas en una tabla integrada para el lado Oeste y Este.

Para representar las variables no biológicas y las biológicas de una forma descriptiva se realizaron perfiles de profundidad vertical. Se elaboro un perfil para cada lado, Oeste y Este. En el cual se integraron valores como microplásticos, nutrientes, metales, agrupadas en las variables no biológicas. Para las variables biológicas se representó la riqueza, abundancia total y abundancia por especie. Para realizar estos perfiles de profundidad se utilizó el software de uso libre llamado C2, versión 1.7.7.

Para establecer la relación a las variables no biológicas, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), para definir que eje de ordenación explicaba de mejor manera la disposición de los datos. Seguido de esto, se utilizaron los valores del eje de ordenación 1 para realizar una correlación con la matriz de datos de las variables no biológicas. Se seleccionaron las variables que tuvieron un coeficiente de correlación mayor a 0.5 en las cuales se determinó que fueron las variables que definieron el eje de ordenación para ambos lados (Oeste y Este).

Se realizo un Análisis de Correspondencia canónica (ACC) con las concentraciones no biológicas y las abundancias de las variables biológicas. Eliminando las secciones de sedimento que tenían 0 de abundancia. Se realizo para ambos lados (Oeste y Este).

Para los análisis anteriores se utilizó el software llamado Past versión 2.17 C.

14 Vinculación, difusión y divulgación

- Primer estudio para Centroamérica que integra las variables ecotoxicológicas (metales pesados, nutrientes y microplásticos) con organismos sensibles a cambios ambientales en sedimentos de un lago neotropical.
- Identificación y cuantificación por primera vez los grupos de organismos representativos del filo Arthropoda de los sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán. Reportando especies no descritas previamente, por ej. *Goeldichironomus* y *Coelotanypus*, pertenecientes a la subfamilia Chironomini de la familia Chironomidae.
- Cuantificación de las concentraciones y valores de indicadores no biológicos (T-N, T-P, materia orgánica, pH, metales pesados (Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn y Pb) y microplásticos en los sedimentos del pasado reciente (núcleos de 80 cm de profundidad) del Lago de Amatitlán.



- Con los resultados obtenidos se produjo un manuscrito para ser sometido a una revista indexada. Estas son las propuestas de revistas científicas: Aquatic Ecotoxicology, Revista de Biología Tropical, Journal of Paleolimnology.
- Se desarrolló una tesis de licenciatura en Biología como parte de los resultados producidos en el presente proyecto.
- Se elaboraron roll ups con conceptos teóricos de las ciencias paleolimnología, ecotoxicología y Paleoecotoxicología usando como ejemplo los resultados obtenidos del presente estudio en el Lago de Amatitlán.
- Se estableció un trabajo paralelo con la Autoridad del Lago de Amatitlán (Amsa) y la Escuela de Biología de la Usac; en la cual se contó con la participación de diferentes actores de la autoridad en el taller de divulgación del proyecto.
- Se realizó un taller de divulgación del proyecto de investigación, en dicho taller contamos con la presencia de tomadores de decisiones de la Cuenca de Amatitlán, encargados de laboratorios, académicos, estudiantes y público en general. Teniendo un total de 40 personas, estas personas pertenecen a las organizaciones enlistadas a continuación: El Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán, Centro de estudios ambientales y biodiversidad (CEAB-UVG), Dirección de agua y saneamiento de la municipalidad de Villa nueva, Centro Universitario de Zacapa (CUNZAC), Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (IIQB), Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia (CCQQFAR), Laboratorio de Investigación Química y Ambiental (LIQA), Escuela de Química, Facultad de Odontología, Centro de Mar y Acuicultura (CEMA), Escuela de Biología, Facultad de Ingeniería (FIUSAC).
- Se estableció intercambio académico nacional e internacional entre las siguientes instituciones: Escuela de Biología, Centro Universitario del Norte, Instituto de Investigaciones del Centro Universitario de Zacapa, Liqa -Usac, Departamento de Biología e Instituto de Investigaciones del Lago Atitlán - Universidad del Valle de Guatemala (UVG), Amsa, Department of Biological Sciences, University of Florida (UFI), Biology Department, Valdosta State University (VSU), Georgia, Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México (Unam), Programa de Conservación de la Biodiversidad del Parque Nacional Nahuel Huapi (Cenac/APN), Patagonia, Argentina y el Institute für Geosystemeund Bioindikation, Technische Universität Braunschweig (TU-Braunschweig), Alemania.

15 Productos, hallazgos, conocimientos o resultados:

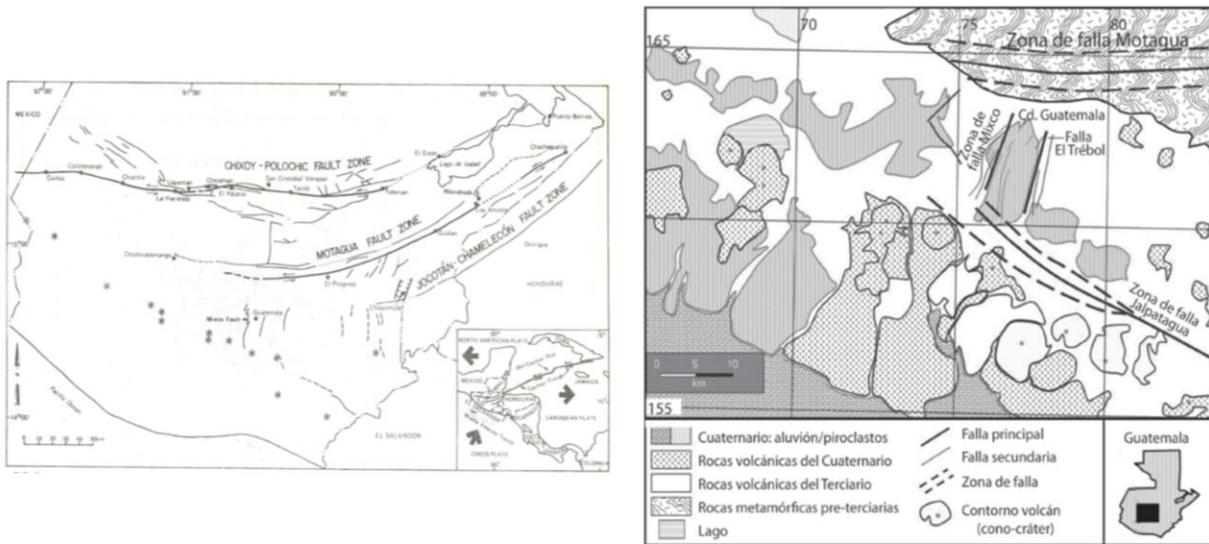
Previo a las actividades de campo, el análisis de los sedimentos y la interpretación de resultados, un análisis de la geología histórica fue efectuado, para conocer más acerca del contexto geológico, natural y de intervención humana que la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala ha sido testigo. Además en esta parte inicial, le definió el concepto de Cuenca para Amatitlán,



insumo que nos fue de mucha utilidad para la discusión posterior de los resultados obtenidos en esta investigación.

Análisis histórico geológico del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Guatemala es un país con una amplia gama de escenarios naturales que varían en condiciones para los habitantes que ocupan su territorio. Las variables geológicas a menudo condicionan el estilo de vida de muchas personas, ya sea por las propiedades y bondades que ellas aportan o por las consecuencias que pueden desencadenarse por su uso inadecuado en la planificación urbana o en el aprovechamiento de los recursos. Es de dominio público el conocimiento sobre los grandes peligros e impactos que posee el país de Guatemala debido a la interacción de 3 placas tectónicas y la alta densidad sísmica que esta produce, por lo cual los fenómenos sísmicos son muy recurrentes en el país, estas placas tectónicas son denominadas Cocos, Norteamérica y Caribe (Pérez, 2019). Esta interacción entre 3 placas tectónicas vincula 3 bloques geológicos: el bloque maya, la zona de sutura del motagua y el bloque Chortí donde cada bloque posee características litológicas y morfológicas totalmente diferentes, donde prácticamente el bloque maya y la zona de sutura son separados por la Falla Cuilco-Chixoy. Polochic y la zona de sutura es separada del bloque Chortí por la Falla Motagua en la parte central del país. El bloque Chortí se localiza al sur de la Falla Motagua y se extiende por todo Centroamérica hasta Costa Rica. Este bloque se encuentra formado principalmente por materiales volcánicos y sedimentarios regularmente con edades post mesozoicas, a excepción de algunos cuerpos metamórficos e intrusivos con edades superiores a los 66 Ma. La región central, donde se localiza el departamento de Guatemala, se encuentra vinculada y controlada tectónicamente al norte por Falla Motagua, al sur por la Falla Jalpatagua, al este por la Falla San José Pinula y al oeste por la Falla Mixco, siendo estas últimas dos las responsables de controlar el desarrollo de la estructura denominada Graben de Guatemala (Figura 6A).



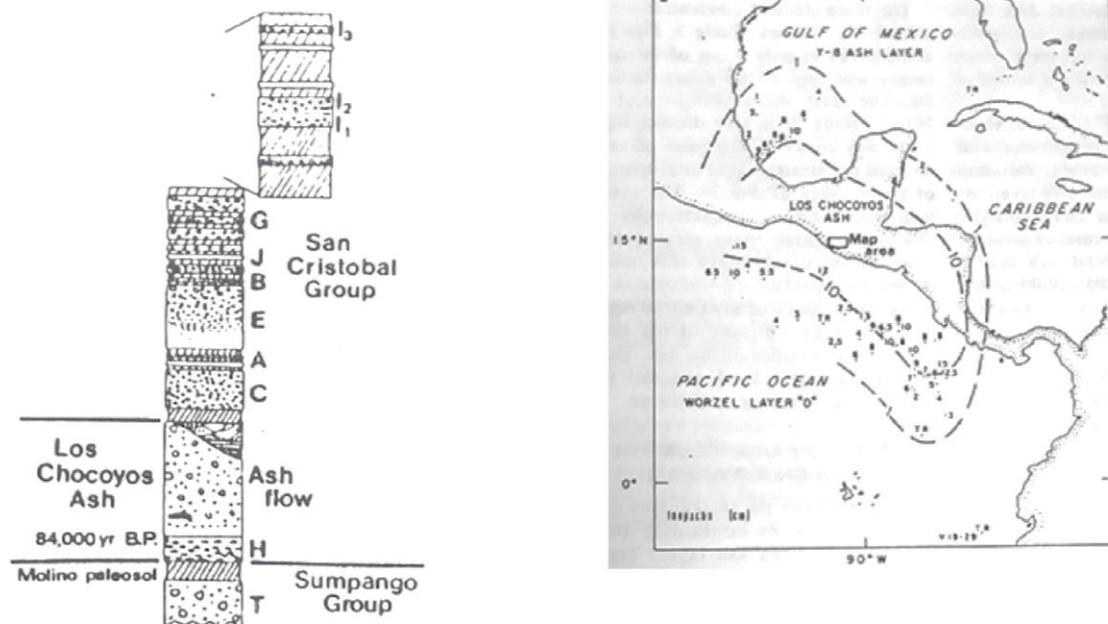
Fuente: Simposio Internacional sobre el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 y el proceso de reconstrucción. (1978)

Fuente: Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión (2009)

Figura 6. A. Descripción de las fallas geológicas a lo largo del límite de la placa y localidades cercanas. B. Estructura geológica de la costa sur de Guatemala (escala 1:250,000 m)

La estructura del valle de la Ciudad de Guatemala es una depresión de origen tectónico y está delimitada por las fallas de Mixco y Pinula. De acuerdo al relieve actual, el desnivel entre los bloques levantados y el graben donde se encuentra el valle es de 500m. Estas fallas normales son de gran ángulo, y son paralelas a 20 km de largo, con una orientación de norte a noreste. La actividad de estas fallas ha provocado la depresión tectónica que se ha rellenado por materiales procedentes de una serie de eventos de flujos de piroclastos. El graben se encuentra delimitado al norte por rocas intrusivas y metamórficas, al sur de la falla del Motagua; al sur lo limita la cordillera volcánica del Cuaternario, específicamente por los volcanes de Agua y Pacaya (Figura 6B).

La región de Amatitlán volcánica se caracteriza por ser una región bimodal, es decir que posee un conjunto de rocas volcánicas de basaltos rico en aluminio y basaltos andesíticos y grandes volúmenes de flujos de riolita y depósitos vulcano-sedimentarios (Rose et. al., 1979), estos flujos volcánicos se encuentran sobre los Paleo-suelos Molino y bajo la secuencia del grupo San Cristóbal y son denominados flujos Chocoyos. (Figura 7A) Estos flujos Chocoyos, fueron generados hace más de 62,000 años según dataciones en carbón por el método de ^{14}C y cubrieron un área aproximada 7,500 kilómetros cuadrados, esta erupción pliniana fue la que generó posteriormente lo que ahora es conocido como Lago de Amatitlán, una caldera residual del evento geológico.



Fuente: The Los Chocoyos Ash, Guatemala: A Major Stratigraphic Marker in Middel America and Three Oceans Basin, John W. Drexler; Et. al. (1979).

Figura 7 A. Estratigrafía del Lago de Amatitlán, Guatemala, B. Distribución del flujo de los Chocoyos en la región centroamericana.

El estudio realizado por Drexler et. al. (1978) explica que se realizaron muestreo de correlación en núcleos extraídos en cuencas oceánicas y se han encontrado trazas de la explosión del Chocoyos a un área de 16,000 kilómetros cuadrados y un volumen aproximado de 420 kilómetros cúbicos de material y se cree que el evento duró 24 días (Figura 7B). La formación incluye un miembro inferior denominado H-Tefra y un miembro superior llamado H-Flujo de ceniza (Knoch y Mclean, 1975).

Características del Fujo de los Chocoyos

Los flujos son de color blanco a gris no consolidados, con un espesor de 150 ms en zonas cercanas a la Ruta 1 entre Patzún y el Lago de Atitlán. La unidad es caracterizada por tener un color distintivo rosa salmón con lentes irregulares de color gris claro, el color rosa es debido a la presencia de hematita en las partículas de pómez. Los fragmentos de pómez rosada son menores a 1mm, aunque originalmente estos relictos son de color gris. Toda la evidencia sugiere que el color rosa del techo es resultado de oxidación de la parte capa superior del flujo de ceniza durante la desvolatilización y colapso, causada por la reacción con la atmósfera y superficies de agua. Fragmentos de rocas plutónicas dentro de las cenizas Chocoyos hacen que sea depósitos únicos en Guatemala. Los bloques de pómez consisten en 2 grupos: cristales pobres en biotita ricos en

potasio y cristales de cummingtonia y hornblendas pobres en potasio. Esta bimodalidad de elementos traza es evidente en fragmentos de bloques de pómez y es probable que su causa fuera un cambio en la zonación del magma. La matriz de pómez representa una mezcla homogénea de dos grupos de pómez. La distribución actual de los depósitos probablemente no es tan diferente a la distribución después de la erupción. En contraste, otros flujos más jóvenes son unidades con capas suaves alrededor de la fuente, por lo cual seguramente aún no se han vuelto depósito disperso, debido a que aún son unidades jóvenes y conservan las condiciones de la erupción. La topografía irregular fue indudablemente un factor, pero no fue el responsable de este efecto, la alta movilidad se combinó con la distancia de transporte y la baja temperatura. El modelo contempla una columna pliniana de ignimbritas (Spark and Wilson, 1976) debido a que guarda estas particularidades, la alta movilidad por mucha gravedad y un frente de baja temperatura creó la atmósfera ideal para estos flujos.

Descripción actual de la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala

El área de interés del proyecto de la presente investigación es el Lago de Amatitlán, Guatemala. Este se localiza en el municipio de con el mismo nombre y cubre un área de aproximadamente de 15.26 km². Este lago, se encuentra dentro de la cuenca “María Linda” (Figura 8), la cual pertenece al conjunto de cuencas hidrográficas que forman parte de la vertiente del pacífico.

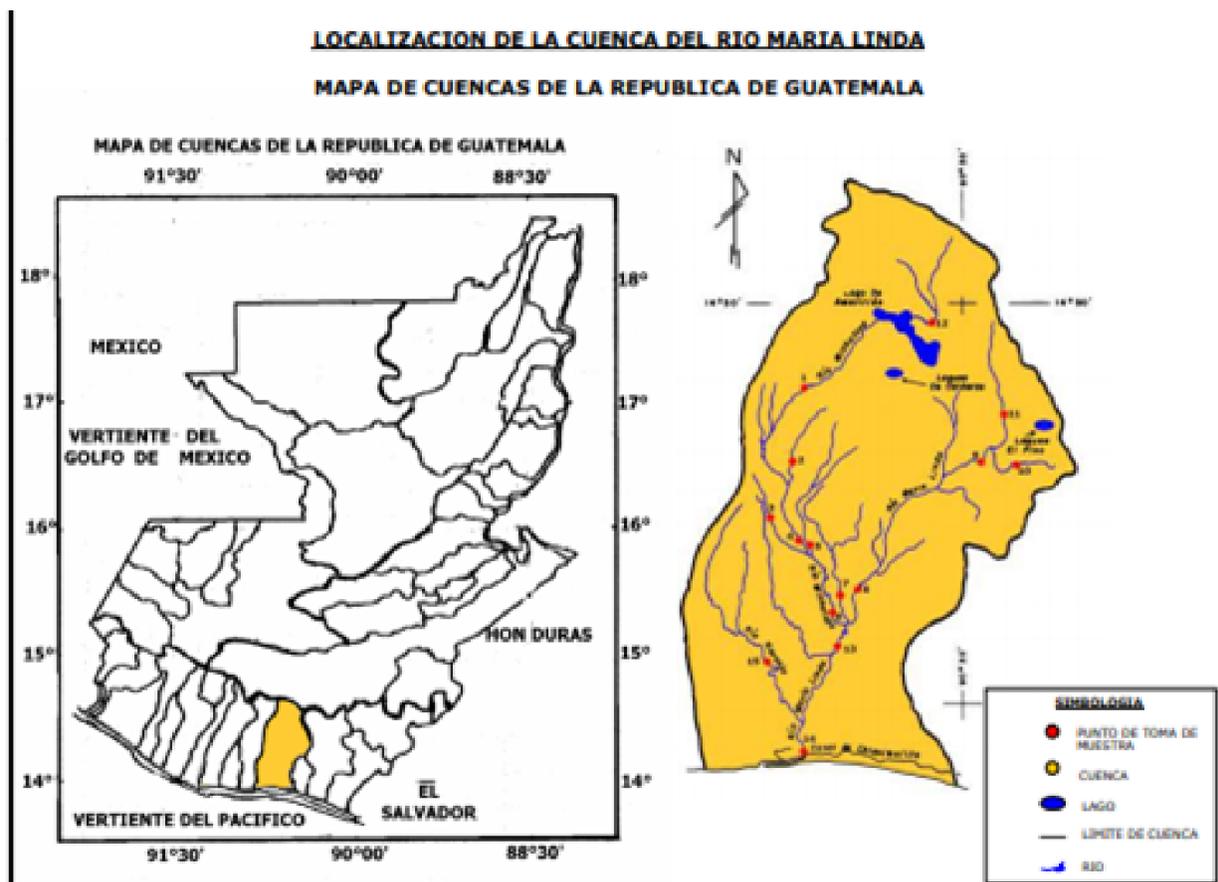




Figura 8. *Ubicación geográfica de la Cuenca María Linda, Guatemala. Fuente: Insivumeh, 2019.*

Esta cuenca, con base a la clasificación Pfafstetter se subdivide en un sistema de cuencas, entre ellas se localiza la cuenca “Michatoya”, dentro de la cual se encuentra el Lago de Amatitlán. La Cuenca del Lago de Amatitlán es una cuenca “endorreica”, la cual tiene un aporte directo de sistemas hidrológicos aguas arriba en la cuenca del “Río Villalobos”, la cuenca “El Durazno” y otros aportes dentro de los límites de su propia cuenca para luego desembocar en el Río Michatoya. La Figura 9, muestra una imagen el área de estudio, con un área de 401.59 kilómetros cuadrados y como base se localiza un imagen Landsat 8 de marzo de 2018 (utilizada para generar el mapa de uso de suelo y cobertura forestal) vista en falso color en la combinación 754 con la finalidad de crear un realce entre la zona urbanizada y la zona con cobertura forestal.

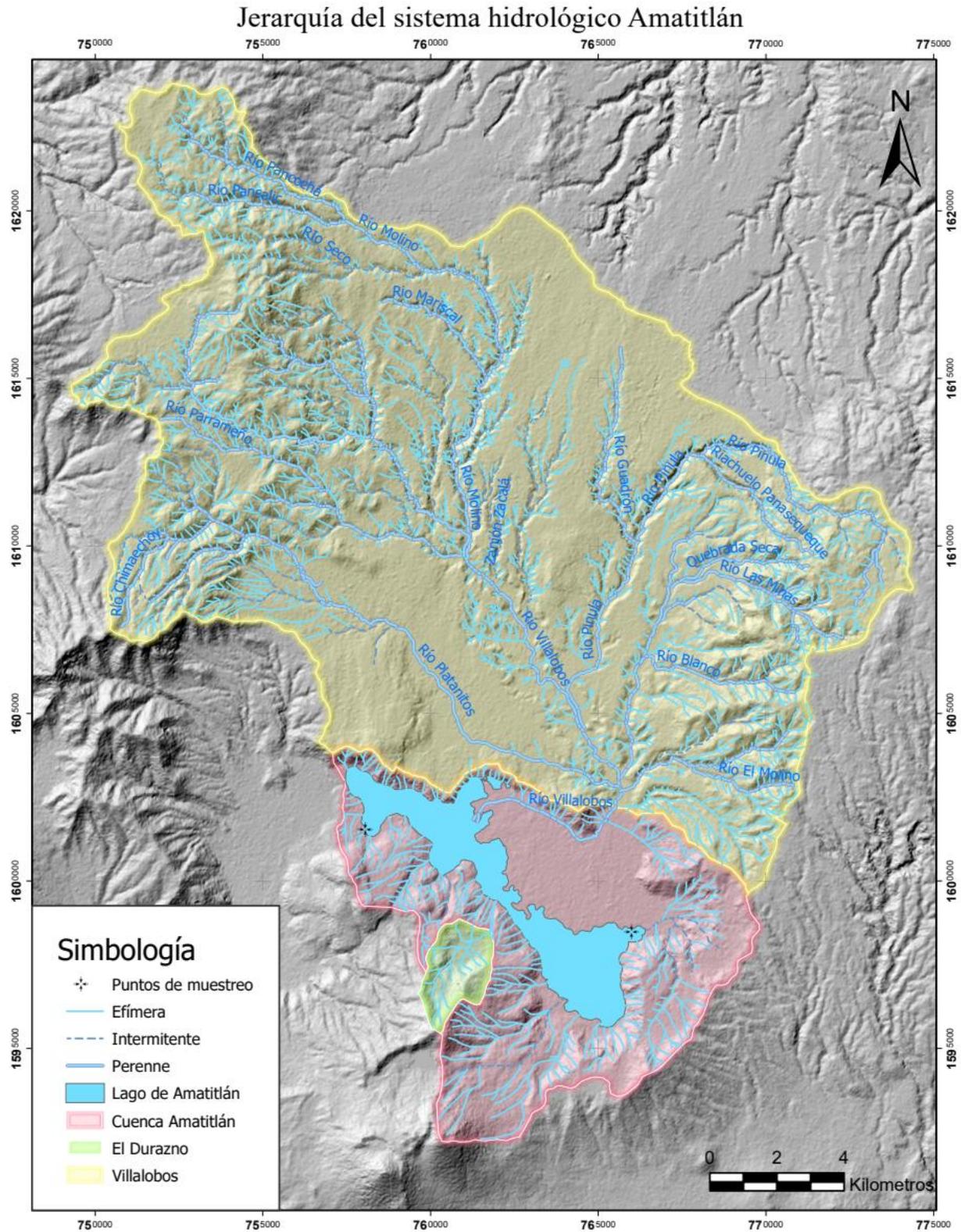


Figura 9 Cuencas que alimentan a la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala.



El Lago de Amatitlán es un cuerpo de agua que se encuentra localizado en la cuenca con el mismo nombre, este sistema hidrológico es muy complejo y tiene una estrecha relación con las cuencas del río Villalobos, y El Durazno. En general, el lago tiene un área de recolección hídrica de aproximadamente 401 km² los cuales se desglosan de la siguiente forma:

Cuenca Amatitlán

Es una cuenca endorreica la cual contiene el cuerpo de agua de interés, posee una dimensión de aproximadamente 83.91 km². Un total de 281 redes de orden 1 conforman una longitud de 125.83 km, 115 de orden 2 con una longitud de 39.11 km, 52 de orden 3 con una longitud de 16.28 km, 5 de orden 4 con una longitud de 1.90 km y 17 de orden 6 con una longitud de 5.73 km.

Cuenca Villalobos

Es una cuenca exorreica que se localiza al norte de la cuenca del Lago de Amatitlán, posee una extensión de aproximadamente 312.34 km². Un total de 2170 de orden 1 conforman una longitud de 556.16 km, 844 de orden 2 con una longitud de 182.95 km, 586 de orden 3 con una longitud de 114.36 km, 346 de orden 4 con una longitud de 73.06 km, 157 de orden 5 con una longitud de 43.10 km y 67 de orden 6 con una longitud de 16.24 km.

Cuenca El Durazno

Es una cuenca endorreica que se localiza al sur de la cuenca del Lago de Amatitlán, posee una extensión de aproximadamente 4.77 km². Esta está compuesta por 35 segmentos de una red hídrica efímera.

Con los datos anteriores, se dice que la cuenca del Río Villalobos es la que mayor aporte ofrece al sistema hidrológico del Lago de Amatitlán, la Cuenca el Durazno posee un aporte mínimo a los procesos del Lago de Amatitlán y la Cuenca del Lago de Amatitlán se encuentra poco desarrollada. Debido a su conexión con la cuenca del Río Villalobos almacena gran aporte de residuos sólidos y líquidos que alteran su estabilidad hidrológica, es decir, recibe aportes que no pueden ser controlados naturalmente y estos podrían hasta cuadruplicar la capacidad máxima de la cuenca.

Uso actual del suelo en la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala

El uso de suelo del área de interés fue clasificado por Santos (2019) con base a clasificación CORINE Land Cover y se contemplaron las unidades que son cartográficamente mapeables tomando de referencia el área de interés. La Figura 11 muestra los diversos tipos de uso de suelo que se localizaron en el área de interés, siendo predominante el suelo desnudo, el área urbanizada y el área con vegetación latifoliada, cubriendo un 71% del área de interés, otros usos de menor influencia son mixto, agrícola y conífero con un 20%, es decir entre 6 usos cubren el 91% del área de influencia. De forma sintetizada podemos establecer que el uso para cobertura forestal (vegetación conífera, vegetación latifoliada y mixta) asciende a un 27% del área, la cobertura

vegetal (compuesta por el pasto y pasto natural) que forman un 5% del área, el cuerpo de agua cubre un 4% del área, el 23% se encuentra urbanizado, un 6% se utilizado para el área agrícola y un 35% se encuentra como suelo desnudo, el cual seguramente es utilizado para agricultura a pequeña escala, ganadería, vías de acceso y construcciones rurales, otros usos de menores dimensiones son utilizados como área deportivas y una industria minera de pocas dimensiones autorizada por el Ministerios de Energía y Minas donde únicamente se extra arena de río.

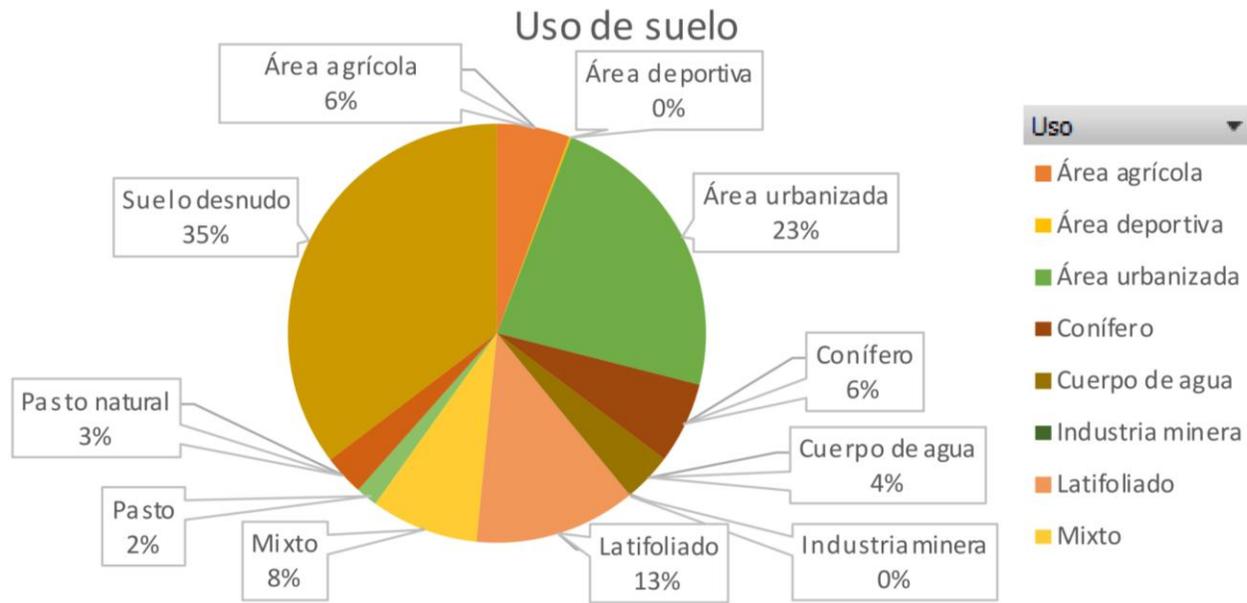


Figura 10 Uso actual del suelo en las cuencas asociadas con la cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. Fuente: Salguero, (2019).

Los usos actuales del suelo en las tres cuencas se observan en la Figura 11.

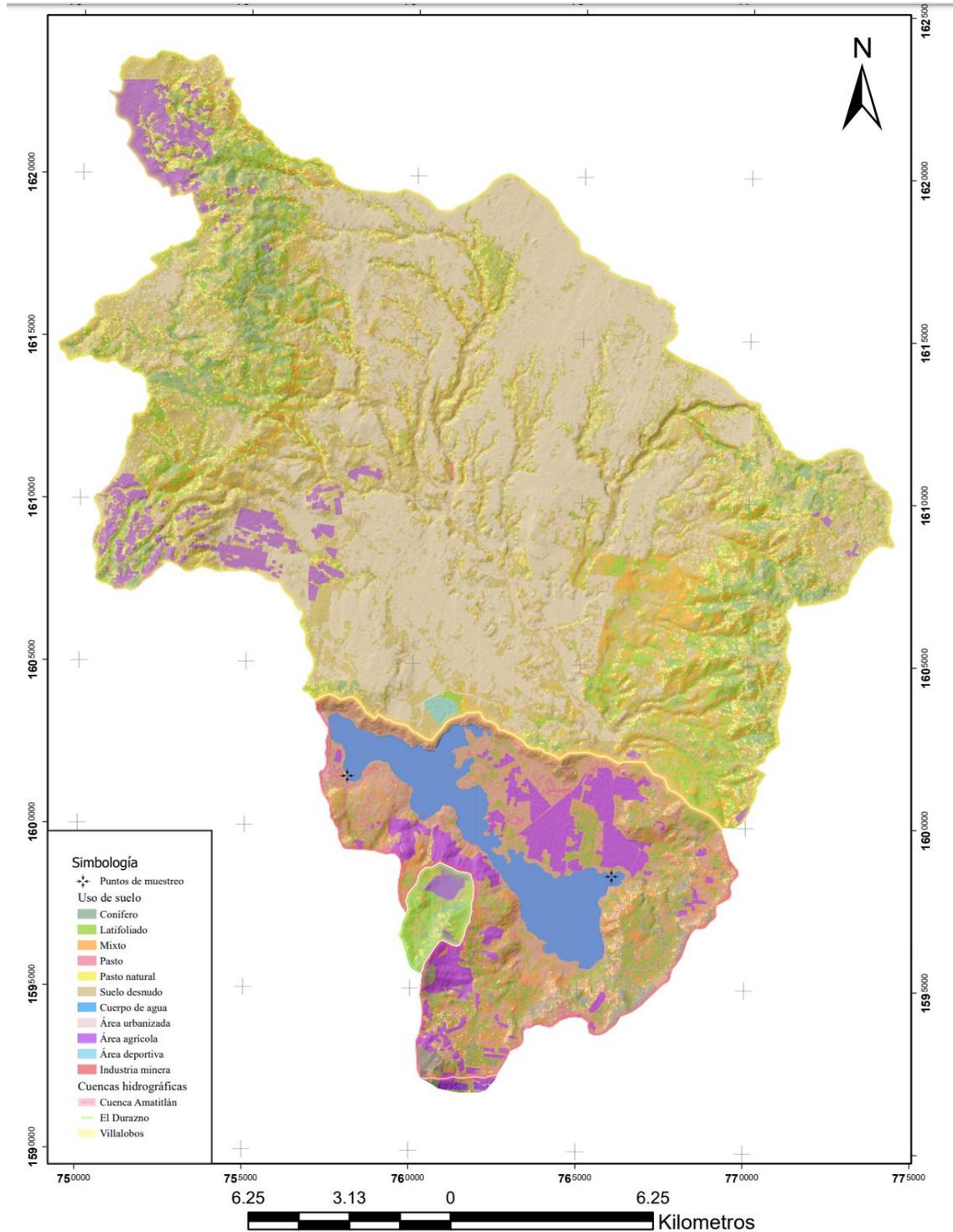


Figura 11 Mapa con usos del suelo en cada una de las tres cuencas de influencia de la Cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. Fuente: Salguero (2019).



Resultados obtenidos en campo

Durante la colecta de campo se obtuvo dos núcleos de sedimentos en dos posiciones geográficas, nombrados durante todo este reporte como Lado Oeste y Lado Este, del Lago de Amatitlán, Guatemala (Tabla 2). Cada uno de estos núcleos fue posteriormente a su colecta y transporte a las instalaciones donde se trabajaron, separado en secciones de 2 cms de profundidad (ver sección 13.4). En la siguiente tabla se presenta información con respecto a esta separación y la profundidad total de sedimentos obtenida para cada núcleo.

Tabla 3. Secciones de sedimentos extraídos desde la superficie hasta la profundidad máxima de dos núcleos de sedimentación obtenidos en el Lago de Amatitlán, Guatemala.

Oeste			Este		
No de muestra	Profundidades en cm	Nomenclatura utilizada	No de muestra	Profundidades en cm	Nomenclatura utilizada
1	0-2	0	1	0-2	0
2	2-4	2	2	2-4	2
3	4-6	4	3	4-6	4
4	6-8	6	4	6-8	6
5	8-10	8	5	8-10	8
6	10-12	10	6	10-12	10
7	12-14	12	7	12-14	12
8	14-16	14	8	14-16	14
9	16-18	16	9	16-18	16
10	18-20	18	10	18-20	18
11	20-22	20	11	20-22	20
12	22-24	22	12	22-24	22
13	24-26	24	13	24-26	24
14	26-28	26	14	26-28	26
15	28-30	28	15	28-30	28
16	30-32	30	16	30-32	30
17	32-34	32	17	32-34	32
18	34-36	34	18	34-36	34
19	36-38	36	19	36-38	36
20	38-40	38	20	38-40	38
21	40-42	40	21	40-42	40
22	42-44	42	22	42-44	42
23	44-46	44	23	44-46	44
24	49-48	46	24	49-48	46
25	48-50	48	25	48-50	48
26	50-52	50	26	50-52	50
27	52-54	52	27	52-54	52
28	54-56	54	28	54-56	54



	Oeste		Este		
	No de muestra	Profundidades en cm	Nomenclatura utilizada	No de muestra	Profundidades en cm
29	56-58	56	29	56-58	56
30	58-60	58	30	58-60	58
31	60-62	60	31	60-62	60
32	62-64	62	32	62-64	62
33	64-66	64	33	64-66	64
34	66-68	66	34	66-68	66
35	68-70	68	35	68-70	68
36	70-72	70	36	70-72	70
37	72-74	72	37	72-74	72
38	74-76	74	38	74-76	74
39	76-78	76	39	76-78	76
40	78-80	78	40	78-80	78
41	80-82	80			
42	82-84	82			
43	84-86	84			

A continuación, se presentan los resultados de la investigación conforme a los objetivos específicos para terminar en la discusión con el objetivo general. Debido a que todos los resultados obtenidos para los núcleos Oeste y Este fueron muy diferentes, a continuación los resultados serán descritos separados por localización geográfica de la obtención de cada uno de los núcleos de sedimentos. Adicionalmente, los resultados serán presentados según los objetivos específicos planteados para esta investigación.

Identificar, describir y cuantificar los grupos de organismos biológicos sensibles al cambio ambiental del filo Arthropoda (familia Chironomidae) en las secciones verticales de cada núcleo de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán.

Dentro de los organismos de la familia Chironomidae (Phylum Artropoda) identificados a lo largo de los dos núcleos de sedimento obtenidos de los lados Oeste y Este del Lago de Amatitlán, Guatemala; la subfamilia más abundante fue: Chironominae representada por tres especies y un género: *Chironomus anthracinus*, *Goeldichironomus* y *Chironomus plumosus*. Seguidamente, la sub familia más abundante observada en los núcleos de sedimento fue Tanypodinae, representada tres géneros: *Labrundinia*, *Ablabesmeyia* y *Coelotanypus*. En general, el lado Este evidencio una mayor abundancia de capsulas cefálicas (individuos) (n= 428 ind), así como también una comunidad más diversa, representada por 9 géneros que comparado al lado Oeste que solo presentó una abundancia de n=20 ind, representados por solamente 3 géneros, respectivamente.



De todas las especies y géneros identificados taxonómicamente en ambos núcleos de sedimentos, la especie *Chironomus anthracinus* (n=248), *Ablabesmeyia* fue la más abundante seguida por el género (n=69) y por último por el género *Goeldichironomus* (n=40). Características específicas de cada una de las especies y géneros identificados taxonómicamente se describen en la Tabla .A manera de simplificar la mención de las diferentes especies y/o géneros en el texto a continuación, se utilizarán las siguientes abreviaciones: *Chironomus anthracinus* (Chiant), *Chironomus plumosus* (Chiplu), *Goeldichironomus* (Goeldi), *Glyptotendipes* (Glypto), *Coelotanytus* (Coelot), *Labrundinia* (Labru), *Ablabesmeyia* (Ablasm), *Polypedilum* (Poly) y *Endotribes* (Endot).

Adicionalmente, se hizo una revisión con respecto a las características taxonómicas, de hábitat así como su clasificación científica de los géneros y especies de individuos de la familia Chironomidae encontrados en los sedimentos de ambos lados, Oeste y Este del Lago de Amatitlán, los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Subfamilia, descripción, características taxonómicas y hábitat de los géneros o especies de la familia Chironomidae, presentes en sustratos verticales de los sedimentos del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Género	Epíteto específico (especie)	Características taxonómicas	Hábitat
<i>Subfamilia: Chironominae</i>			
<i>Cladopelma</i>	No identificada	Mentum con diente mediano doble. A veces, ampliamente redondeado, flanqueado por 7 pares de dientes laterales.	Las larvas, se encuentra en lugares con arena y lodo en lagos y ríos.
<i>Endotribelos</i>	No identificada	Mentum con dorsomentum de 3 dientes medianos; 6 pares de dientes laterales en cada lado, disminuyen en tamaño, 6to diente casi ausente.	Las larvas se encuentran asociadas a macrofitas.
<i>Chironomus</i>	<i>anthracinus</i>	El diente mediano del mentum no se proyecta más allá de los dientes laterales; pecten epipharyngis a peine ancho de dientes múltiples; 1 o 2 pares de túbulos ventrales	Especie reportada en ambientes hipereutrófico, previamente ha sido reportada en el Lago de Amatitlán, Guatemala.
<i>Chironomus</i>	<i>plumosus</i>	La diferencia entre <i>C. anthracinus</i> y <i>C. plumosus</i> , es el 4 diente lateral contado desde el centro. En <i>C. plumosus</i> es mayor que el 5to y en <i>C. anthracinus</i> es menor que el 5to.	Especie reportada en ambientes hipereutróficos, previamente ha sido reportada en el Lago de Amatitlán.
<i>Goeldichironomus</i>	No identificada	Las larvas poseen un carácter único entre los Chironomini: una gran seta subdentalis en forma de hoz que tiene dientes a lo largo de su margen interior.	Las larvas se encuentran en vegetación o aguas estancadas, algunas se encuentran en sedimentos.
<i>Glyptotendipes</i>	No	Mentum con diente mediano simple, con o	Ocurren en sedimentos litorales



Género	Epíteto específico (especie)	Características taxonómicas	Hábitat
	identificada	sin frenillos laterales, 6 pares de dientes laterales a cada lado, con 4º menor que la línea de disminución lateral.	ricos en detritos y estanques, en pequeños cuerpos de agua y agua corriente.
<i>Polypedilum</i>	No identificada	Mentum negro brillante, con dorsomentum distintivo de 4 dientes medianos que sobresalen anteriormente, de los cuales 2 centrales son más bajos que el par externo.	Las larvas existen en todo tipos de aguas (flotantes o estancadas), se encuentra en el sedimento. Ha sido reportada en orillas de lagos eutróficos vinculada a deposición por vientos de algas verde azules.
<i>Subfamilia: Tanypodinae</i>			
<i>Ablabesmeyia</i>	No identificada	Palpo maxilar con 2-6 segmentos; pseudoradula no ensanchada posteriormente, no apareciendo unido a la barra transversal; con gránulos de pseudoradula a menudo dispuestos en filas longitudinales	Es una larva que vive en hábitats eutrófico y cosmopolita. Habitan en pequeñas y grandes aguas estancadas y fluidas desde zonas climáticas templadas frías hasta cálidas tropicales. Son abundante en los trópicos .
<i>Coelotanypus</i>	No identificada	Mandíbula con diente apical suavemente curvada, con diente basal bajo y redondeado; lígula generalmente con número impar de dientes, con los dientes internos más externos adheridos a los dientes externos.	Las larvas viven en sedimentos bentónicos de lagos, incluidos embalses artificiales, tramos de ríos que fluyen lentamente y en antiguos lechos de ríos.
<i>Labrundinia</i>	No identificada	La forma de la lígula (con el diente medio más largo que los dientes internos cortos) y los dientes mandibulares internos y molares grandes.	Las larvas viven en pequeños cuerpos de agua estancada, así como en arroyos y ríos.

(Cranston, 2010; Epler, Forsyth, 1981; Piaggi, 1992)

Lado Oeste

A continuación se presenta en la Tabla 5 las abundancias totales, por género o especie de los individuos de la familia Chironomidae encontrados en los dos núcleos de sedimentos obtenidos de los lados Oeste y Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Se identificaron taxonómicamente un total de 20 individuos. Una mayor riqueza y abundancia fue reportada para los sedimentos del lado Este, en comparación que para el lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala (Tabla 4). Específicamente para el lado Oeste, la comunidad biológica, solamente fue representada por una especie y dos géneros. En concordancia, también se reportaron bajas abundancias de estos organismos a todo lo largo del núcleo de sedimentos. Las mayores abundancias reportadas en un segmento de sedimento fue de n=3 individuos estos para la profundidad de 76 cms, representada por una especie y un género (*Chironomus antracinus* y *Goeldichironomus*) y en la profundidad de 16 cms con solamente un género (*Goeldichironomus*).

Tabla 5 Riqueza, abundancias totales (número de individuos), por género y especie de los individuos de la familia Chironomidae, encontrados en los sedimentos de los núcleos Oeste y Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Oeste						Este														
No de muestra	Riqueza	Abundancia total (no de individuos)	<i>Ablabesmeyia</i>	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Goeldichironomus</i>	No. de muestra	Riqueza	Abundancia total (no de individuos)	<i>Ablabesmeyia</i>	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Chironomus plumosus</i>	<i>Coelotanypus</i>	<i>Cladopelma</i>	<i>Endotribelos</i>	<i>Goeldichironomus</i>	<i>Glyptotendipes</i>	<i>Labrundinia</i>	Morfoespecie juvenil	<i>Polypedylum</i>	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	2	3	13	0	11	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	4	4	24	0	18	4	0	0	0	0	1	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	6	3	26	0	14	2	0	0	0	10	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	8	4	10	0	7	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	10	5	11	0	6	1	0	0	1	2	0	0	0	0	1
12	1	1	0	0	1	12	3	18	0	14	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
14	1	2	0	0	2	14	1	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	3	0	0	3	16	3	6	0	4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	18	2	12	0	9	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	20	3	13	0	11	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
22	1	1	0	0	1	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	24	5	19	2	8	6	0	0	0	2	1	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	26	2	8	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	28	2	10	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	30	2	7	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	32	2	8	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	1	1	1	0	0	34	2	14	0	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	36	3	13	1	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	38	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	40	5	7	1	3	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0

Oeste						Este														
No de muestra	Riqueza	Abundancia total (no de individuos)	<i>Ablasbesmeyia</i>	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Goeldichironomus</i>	No. de muestra	Riqueza	Abundancia total (no de individuos)	<i>Ablasbesmeyia</i>	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Chironomus plumosus</i>	<i>Coelotanypus</i>	<i>Cladopelma</i>	<i>Endotribelos</i>	<i>Goeldichironomus</i>	<i>Glyptotendipes</i>	<i>Labrundinia</i>	Morfospecie juvenil	<i>Polypedilum</i>	
42	0	0	0	0	0	42	3	8	1	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
44	1	2	0	2	0	44	6	31	3	20	3	0	0	0	1	0	3	0	1	
46	1	2	0	2	0	46	3	10	2	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
48	1	1	0	0	1	48	4	26	3	19	2	0	0	0	2	0	0	0	0	
50	0	0	0	0	0	50	3	8	1	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
52	0	0	0	0	0	52	1	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
54	0	0	0	0	0	54	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
56	1	1	0	0	1	56	3	7	3	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
58	0	0	0	0	0	58	3	8	3	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
60	0	0	0	0	0	60	3	8	3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	
62	1	1	0	0	1	62	4	12	5	4	0	1	0	0	0	0	2	0	0	
64	0	0	0	0	0	64	3	6	4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
66	1	1	0	0	1	66	3	4	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
68	0	0	0	0	0	68	3	15	11	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
70	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
72	0	0	0	0	0	72	2	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
74	0	0	0	0	0	74	3	9	3	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	
76	2	3	0	2	1	76	3	7	2	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
78	0	0	0	0	0	78	3	8	4	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
80	0	0	0	0	0															
82	1	1	0	1	0															
84	0	0	0	0	0															

Lado Este

Las abundancias cuantificadas e identificadas en los sedimentos del núcleo del lado Este, así como su riqueza representaron la mayoría de los organismos identificados en el total de los núcleos colectados. Con lo anterior, se refiere a que se reportó la mayor abundancia ($n=428$), correspondiendo al 91% del total de los organismos identificados en ambos núcleos de sedimentos colectados para el Lago de Amatitlán, Guatemala. En paralelo, fueron reportadas la mayor riqueza de especies, representada por un total de dos especies, ocho géneros y una morfoespecie juvenil (Tabla 4).

En cuanto a las abundancias específicas encontradas en segmentos de sedimentos del núcleo Este, se pueden observar que en la superficie entre las profundidades 2-14 cms se pudo cuantificar organismos que iban de 10 hasta 26 individuos, la mayoría de los mismos correspondiendo a la especie *C. anthracinus*. Seguidamente, se observaron mayores abundancias en el segmento de sedimentos de 18-24 cms, correspondiendo también a la misma especie, pero con pocas abundancias de otros como *C. plumosus* y *Goeldichironomus*. Seguidamente, se observó una disminución entre los los segmentos de sedimentos de 26-32 ($n=7-10$) y 38-42 ($n=3-8$) cms, respectivamente. Luego, desde la profundidad 44 cms hasta la 48 cms se observó un incremento en las abundancias correspondiendo a casi diez veces los segmentos anteriores en un rango de abundancias de 10-31, respectivamente. En los segmentos de 56-64 cms se volvió a observar una disminución en las abundancias encontrándose estas en un rango de 6-12 individuos. A partir de este punto, se observa un cambio en el ensamblaje, en donde *C. anthracinus* no representó la abundancia absoluta, pero otras como *Ablasmeyia* y *Labrundinia*, empiezan a presentar una mayor representación (Tabla 4). Similares a estas abundancias ($n=7-9$) fueron reportadas en las mayores profundidades entre 74-78 cms respectivamente. El ensamblaje en este segmento de sedimentos se vió dominada por *Labrundinia*, *Ablasmeyia* y *C. anthracinus*; con menores abundancias de *Coelotanypus*, respectivamente.

Seguidamente, se realizó un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés “Detrended correspondence analysis”) para poder determinar asociaciones entre las diferentes especies y/o géneros identificados a todo lo largo de los sedimentos obtenidos del núcleo Este. Esto a su vez aportó para obtener una ordenación de los ensamblajes de las especies y/o géneros identificados de quironómidos.

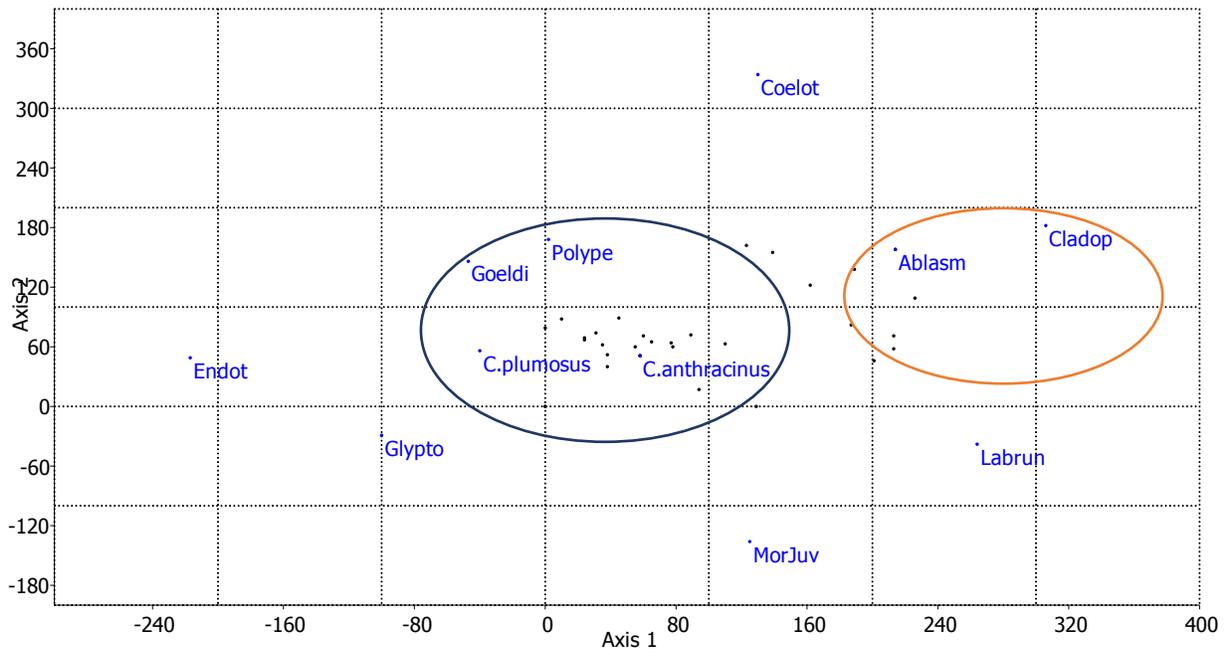


Figura 12. Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés) de las especies y géneros obtenidos en el núcleo Este de sedimentos del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Del análisis de DCA representado en la Figura 12, se observa que a todo lo largo del núcleo de sedimentos, las abundancias de especies y/o géneros formaron 2 agrupaciones evidentes. La primera agrupación (círculo de coloración oscura), se conformó de representantes pertenecientes a subfamilia Chironominae, siendo estos cuatro: *Chironomus anthracinus* y *Chironomus plumosus*; en conjunto con los dos géneros *Goeldichironmus* y *Polypedilum*. La segunda agrupación (agrupados en el círculo naranja), se conformó de solamente dos géneros pertenecientes a las subfamilias Chironominae, *Cladopelma*. y subfamilia Tanyponidae, *Ablabesmeyia*

Cuantificar indicadores no biológicos como las concentraciones de N-T, P-T, materia orgánica, pH, metales pesados (Zn, Fe, Na, Cu, Mg, Ca, Mn y Pb), y microplásticos en las secciones verticales de los núcleos de sedimentos del pasado reciente del Lago de Amatitlán.

Lado Oeste

En cuanto a las variables fisicoquímicas como conductividad eléctrica y pH, la tendencia de los datos fueron diferentes. Para pH, los valores se observaron entre 3.2 hasta 6.9 en las secciones de sedimento 10 y 18 cms para los valores más bajos y para el valor más alto a partir de 76 hasta la

84 cms, respectivamente. En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores cuantificados se encontraron en un rango de concentraciones entre 917 hasta 9645 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en las secciones de sedimento 26 y 16 cms, respectivamente (Tabla 6).

En cuanto a las *variables de nutrientes inorgánicos y orgánicos* a lo largo de todo el núcleo se encontraron concentraciones de fósforo inorgánico dentro del rango de 0.08-0.02 ppb. Los valores más elevados se cuantificaron en la sección superficial a una profundidad de 4-6 cms, mientras que las menores a la mitad del núcleo, 38-40 cms (0.07-0.08 y 0.02; respectivamente). En cuanto a nitrógeno total (ppm) las concentraciones cuantificadas se encontraron dentro del rango de 0.15 hasta 0.61-0.62 ppm que correspondieron a las profundidades de 6, 16 y 0 cms, respectivamente. Seguidamente, las concentraciones del carbono orgánico se encontraron entre el rango de valores de 4.1, 3.3 hasta 1.1-1.0 (ppm) y correspondieron a las profundidades 40, 30, 0 y 68 cms, respectivamente. Se realizó relaciones entre concentraciones de nutrientes debido a que estas relaciones son usadas para la determinación del grado de eutrofización de cuerpos de agua dulce. Las relaciones obtenidas fueron C:N:P y N:P; respectivamente. Los resultados de estas relaciones se presentan en la Tabla 3. Para el lado Oeste se observó tendencias relativamente diferentes comparando cualitativamente las relaciones C:N:P y N:P. Para las relaciones C:N:P los valores se reportaron entre el rango de 278.9, 24.3 y 3.7, 3.0, para las secciones de sedimento 38, 68, 42 y 18 cms, respectivamente. Se observaron relaciones similares en secciones de sedimento con valores entre 7.3-10.2 a partir de las profundidades 12 hasta 28 cms. Seguidamente, se observó otro grupo de relaciones con valores relativamente más altos al anterior grupo con valores que fueron desde 9.5-14 en las profundidades desde 38 hasta 40 cm de profundidad. Luego, otro grupo que fue desde las profundidades 56 hasta 72 cms con valores de relaciones entre 3.7 hasta 10.2 (Tabla 4). Con respecto a las relaciones solamente de N:P, se obtuvo un rango de valores entre 14 hasta 3.0 para las profundidades de 40 y 0 cm, respectivamente. Agrupaciones cualitativas en secciones de sedimentos fueron observadas con valores entre 9-16 en la sección de sedimento entre 4 hasta 8 cms, respectivamente. Seguidamente con valores menores entre 3-5 en las profundidades 10-16 cm, respectivamente. Relaciones mayores entre 9-15 fueron observadas en las profundidades 24-30 cms. Con valores relativamente más bajos entre 6-12 se observaron las secciones 38-48 cms. Finalmente, en las secciones más profundas del núcleo de sedimentación desde el 66 hasta la sección más profundidad, 78 cms, se observaron los valores más bajos entre 3-6, respectivamente.

Tabla 6. Valores obtenidos de las relaciones C:N:P (Carbono orgánico [ppb]: Nitrógeno inorgánico total [ppb]: Fósforo inorgánico total [ppb]) y N:P obtenidos en los dos núcleos de sedimentos obtenidos del Lago de Amatitlán.

Oeste	Este
-------	------

No de muestra	Valor C:N:P	Valores C:N:P en ppm	Valor N:P	Valores N:P en ppm	No de muestra	Valor C:N:P	Valores C:N:P en ppm	Valor N:P	Valores N:P en ppm
0	0.0	0.0:0.2:0.1	3.0	0.2:0.1	0	0	0.0:1.0:0.1	9	1.0:0.1
2	123.1	3.3:0.4:0.1	7.3	0.4:0.1	2	0	0.0:0.6:0.1	9	0.6:0.1
4	0.0	0.0:0.0:0.1	0.0	0.0:0.1	4	157	3.7:0.5:0.1	9	0.5:0.1
6	0.0	0.0:0.6:0.1	7.8	0.6:0.1	6	156	3.4:0.5:0.0	14	0.5:0.0
8	123.8	3.0:0.5:0.1	9.6	0.5:0.1	8	160	3.2:0.2:0.1	2	0.2:0.1
10	0.0	4.1:0.0:0.0	0.0	0.0:0.0	10	450	2.7:0.2:0.0	4	0.2:0.0
12	103.0	2.7:0.4:0.1	7.3	0.4:0.1	12	333	2.4:0.2:0.0	5	0.2:0.0
14	100.7	2.7:0.5:0.1	7.5	0.5:0.1	14	600	2.4:1.0:0.0	3	1.0:0.0
16	84.7	3.1:0.6:0.1	10.2	0.6:0.1	16	338	1.4:1.0:0.0	3	1.0:0.0
18	77.8	2.8:0.6:0.1	10.0	0.6:0.1	18	461	0.8:0.2:0.0	18	0.2:0.0
20	92.2	2.3:0.5:0.1	9.8	0.5:0.1	20	23	2.3:0.3:0.3	1	0.3:0.3
22	91.7	2.1:0.5:0.1	9.2	0.5:0.1	22	0	2.9:0.0:0.0	0	0.0:0.0
24	108.2	2.1:0.4:0.1	7.8	0.4:0.1	24	315	2.9:0.3:0.0	10	0.3:0.0
26	94.9	2.4:0.5:0.1	10.2	0.5:0.1	26	171	2.4:0.4:0.0	9	0.4:0.0
28	96.8	2.4:0.5:0.1	10.0	0.5:0.1	28	188	2.7:0.4:0.0	9	0.4:0.0
30	0.0	0.0:0.4:0.0	13.3	0.4:0.0	30	217	3.0:0.5:0.0	15	0.5:0.0
32	0.0	0.0:0.4:0.0	10.5	0.4:0.0	32	0	0.0:0.5:0.1	6	0.5:0.1
34	190.8	1.7:0.3:0.0	9.7	0.3:0.0	34	0	0.0:0.5:0.0	13	0.5:0.0
36	202.2	1.8:0.3:0.0	10.0	0.3:0.0	36	68	1.0:0.4:0.0	9	0.4:0.0
38	278.9	1.1:0.2:0.0	9.5	0.2:0.0	38	171	3.2:0.5:0.0	12	0.5:0.0
40	178.6	1.0:0.3:0.0	14.0	0.3:0.0	40	107	3.6:0.6:0.1	9	0.6:0.1
42	82.5	2.3:0.6:0.1	11.0	0.6:0.1	42	124	2.8:0.5:0.1	9	0.5:0.1
44	116.2	1.6:0.3:0.0	8.5	0.3:0.0	44	207	3.2:0.4:0.0	10	0.4:0.0
46	146.5	2.1:0.4:0.0	9.0	0.4:0.0	46	324	2.9:0.2:0.0	15	0.2:0.0
48	174.1	1.9:0.3:0.0	6.8	0.3:0.0	48	147	2.9:0.4:0.1	12	0.4:0.1
50	87.2	2.2:0.5:0.1	10.0	0.5:0.1	50	0	2.3:0.0:0.1	0	0.0:0.1
52	135.2	1.7:0.3:0.0	8.0	0.3:0.0	52	204	2.8:0.3:0.0	9	0.3:0.0
54	105.3	1.6:0.3:0.1	6.0	0.3:0.1	54	580	2.6:0.1:0.0	6	0.1:0.0
56	151.8	2.6:0.4:0.0	10.5	0.4:0.0	56	156	2.1:0.3:0.1	5	0.3:0.1
58	139.5	2.4:0.4:0.0	10.8	0.4:0.0	58	0	0.0:0.3:0.1	7	0.3:0.1
60	118.9	2.0:0.4:0.0	10.3	0.4:0.0	60	0	0.0:0.6:0.1	11	0.6:0.1
62	100.7	3.0:0.5:0.1	8.3	0.5:0.1	62	0	0.0:0.3:0.1	5	0.3:0.1
64	143.4	2.0:0.3:0.0	8.5	0.3:0.0	64	0	0.0:0.4:0.1	6	0.4:0.1
66	150.0	2.4:0.4:0.0	10.0	0.4:0.0	66	111	2.5:0.3:0.1	4	0.3:0.1
68	243.2	3.2:0.2:0.1	3.7	0.2:0.1	68	85	2.3:0.4:0.1	5	0.4:0.1
70	132.1	2.2:0.3:0.1	6.6	0.3:0.1	70	129	2.3:0.3:0.1	5	0.3:0.1
72	101.2	2.5:0.4:0.1	5.0	0.4:0.1	72	107	2.3:0.4:0.1	6	0.4:0.1
74	94.9	1.9:0.3:0.1	5.5	0.3:0.1	74	80	2.2:0.3:0.1	4	0.3:0.1
76	128.6	1.8:0.4:0.0	8.8	0.4:0.0	76	208	2.3:0.2:0.1	3	0.2:0.1
78	162.1	1.9:0.3:0.0	7.3	0.3:0.0	78	525	2.1:0.1:0.0	3	0.1:0.0
80	163.0	1.5:0.2:0.0	5.8	0.2:0.0					
82	180.0	1.8:0.3:0.0	6.3	0.3:0.0					
84	128.1	1.7:0.3:0.1	5.4	0.3:0.1					

Adicionalmente a los *nutrientes inorgánicos* y/o *Sales* anteriormente descritos, se cuantificaron los siguientes: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na). Las concentraciones de Ca observadas a todo lo largo del núcleo de sedimento evidenció concentraciones dentro del rango de 0.3-4.3 ppb en las profundidades 38 y 74 cm, respectivamente. Con respecto a las

concentraciones de Mn cuantificadas, el valor menor de 100 ppm fue observada en la profundidad de 72 cm, mientras que el valor mayor de 1200 ppm se observó en las profundidades 44 y 74 cm, respectivamente. Las concentraciones de K observadas a todo lo largo del núcleo de sedimentación evidenció valores dentro del rango 0.04-0.16 ppb, reportándose en varias profundidades 46, 48 y 54 cms el valor menor, y en la profundidad de 22 cms, la concentración mayor, respectivamente. Finalmente para nutrientes, las concentraciones de Na cuantificadas evidenciaron valores dentro del rango de 350-1650 ppm en las profundidades de 70 y 4 cm, respectivamente (Tabla 7).

*Tabla 7 Concentraciones de parámetros fisicoquímicos (pH y Conductividad eléctrica), nutrientes (Ca, Zn, Cu, Fe, Mg, Mn, K, Na) y metal pesado Pb en los sedimentos de los núcleos extraídos en los lados Este y Oeste del Lago de Amatitlán; Guatemala. * representa no medido.*

No de muestra	pH	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Calcio (Ca) ppb	Cinc (Zn) ppm	Cobre (Cu) ppm	Hierro (Fe) ppm	Manganeso (Mn) ppb	Magnesio (Mg) ppm	Potasio (K) ppb	Sodio (Na) ppb	Plomo (Pb) ppm
Oeste											
0	-	*	0.50	45	15	7500	0.08	510	0.13	750	2.5273
2	3.6	*	0.81	55	10	7500	0.11	585	0.13	900	9.9037
4	*	*	1.00	75	10	6950	0.12	575	0.15	1650	9.2663
6	*	*	0.94	70	10	11250	0.13	1050	0.14	1400	9.6010
8	3.8	*	0.88	50	5	6900	0.09	440	0.12	1000	9.6047
10	3.2	*	0.50	35	5	4950	0.09	490	0.06	750	10.3698
12	4.2	*	0.75	50	10	8125	0.08	690	0.13	750	7.8949
14	3.6	8765	0.81	55	10	9375	0.11	645	0.12	950	6.8173
16	3.3	9645	0.75	60	10	8125	0.12	600	0.14	1050	9.4521
18	3.2	*	0.81	75	10	12500	0.11	665	0.14	1150	8.7518
20	3.4	7810	0.88	65	10	10000	0.11	605	0.13	1100	9.6862
22	3.5	7920	0.69	55	10	10625	0.13	635	0.16	1200	12.8382
24	3.8	7035	0.63	65	5	5000	0.09	465	0.12	950	16.0094
26	3.4	917	0.69	70	10	5625	0.13	675	0.14	1250	14.8605
28	3.7	*	0.56	50	5	3750	0.08	440	0.11	900	13.4187
30	*	*	0.44	35	5	4375	0.07	560	0.15	950	12.7482
32	*	*	0.56	65	5	8125	0.09	425	0.15	1000	17.8908
34	5.1	5670	0.50	30	10	4375	0.08	460	0.11	650	12.3023
36	5.5	4195	0.50	25	10	7500	0.07	455	0.09	600	8.4519
38	5.3	5190	0.31	15	10	3950	0.06	225	0.06	900	9.0572
40	3.9	6525	0.38	20	10	4650	0.06	170	0.05	1150	6.0242
42	3.2	9025	0.75	65	5	11250	0.11	500	0.13	1250	3.0647
44	3.9	7620	0.56	35	10	10625	0.09	1200	0.06	700	9.4072
46	4.3	6920	0.63	30	5	8750	0.09	510	0.04	600	7.4700
48	4.9	7540	0.44	20	5	8125	0.08	170	0.04	550	9.0671
50	3.8	8130	0.69	35	10	5625	0.10	210	0.07	700	7.8389
52	4.9	6730	0.56	30	10	6250	0.08	150	0.06	600	7.2287
54	5.4	5370	0.50	20	5	10000	0.06	1150	0.04	1050	8.2896
56	4.7	6995	0.63	40	5	17500	0.08	1000	0.06	900	7.5951
58	4	7400	0.63	55	5	11875	0.08	1150	0.09	650	9.1706

No de muestra	pH	Conductividad eléctrica $\mu\text{S.cm}^{-1}$	Calcio (Ca) ppb	Cinc (Zn) ppm	Cobre (Cu) ppm	Hierro (Fe) ppm	Manganeso (Mn) ppb	Magnesio (Mg) ppm	Potasio (K) ppb	Sodio (Na) ppb	Plomo (Pb) ppm
60	4.4	7335	0.56	35	10	8125	0.09	950	0.08	500	10.9283
62	3.4	8045	0.69	55	10	10625	0.10	670	0.10	500	6.4034
64	5.1	5210	0.50	25	5	8125	0.08	305	0.06	450	7.7976
66	4.2	6370	2.50	40	5	10000	0.43	265	0.15	600	7.4284
68	4.3	7010	2.69	40	5	10625	0.40	245	0.14	550	10.0131
70	6.3	5585	3.69	25	5	6875	0.48	205	0.12	350	7.1383
72	6.6	5950	3.06	35	5	5600	0.25	100	0.14	1100	5.2729
74	6.8	5175	4.25	25	5	10625	0.25	1200	0.12	700	4.6092
76	6.9	6245	1.31	25	5	8750	0.09	510	0.11	600	3.6803
78	6.2	5920	0.81	20	5	8125	0.10	170	0.10	550	8.5352
80	5.1	5640	1.56	25	5	5625	0.19	210	0.13	700	5.1670
82	6.2	4980	1.13	20	5	6250	0.14	150	0.12	600	8.4389
84	6.9	3855	4.06	35	10	10000	0.13	1150	0.14	1050	6.2379
Este											
0	*	*	1.38	55	10	17500	0.25	1000	0.12	950	5.2903
2	*	*	2.50	40	5	11875	0.26	1150	0.11	650	5.2114
4	7.2	5760	2.38	35	5	8125	0.25	950	0.10	500	6.3416
6	7.3	6350	2.12	35	5	10625	0.21	670	0.09	500	6.1119
8	7.3	4495	1.25	35	10	8125	0.14	305	0.10	450	8.2314
10	7.2	4485	0.94	40	10	10000	0.11	265	0.12	600	6.7393
12	7.1	4480	0.88	40	5	10625	0.10	245	0.12	550	7.2957
14	7.1	4150	0.81	30	5	6875	0.09	205	0.08	350	6.4623
16	7.0	4005	0.63	25	5	10625	0.09	200	0.06	400	4.5411
18	7.1	4045	0.56	15	20	5600	0.06	100	0.06	1100	3.0779
20	7.3	4505	1.69	30	10	8125	0.11	240	0.10	800	4.3429
22	7.4	3865	2.38	30	5	10625	0.15	360	0.09	400	6.3548
24	7.5	3840	2.38	25	5	11250	0.16	375	0.10	400	6.3503
26	7.4	3615	2.00	35	10	13750	0.16	395	0.13	600	8.1581
28	7.1	3748	1.69	30	5	15625	0.13	380	0.12	500	7.0869
30	7.3	3375	1.31	25	5	10625	0.11	455	0.13	650	6.3645
32	7.3	3915	2.31	30	5	11875	0.14	700	0.13	650	8.2867
34	7.3	4305	2.13	30	5	14375	0.13	730	0.12	700	6.3865
36	7.1	4345	1.56	25	10	13125	0.11	630	0.12	650	6.8793
38	7.3	3675	4.25	20	10	12500	0.16	1450	0.11	650	3.9972
40	7.4	3525	10.00	20	10	13750	0.22	1550	0.11	550	4.1344
42	7.4	3140	5.00	20	10	10625	0.13	750	0.10	500	5.5528
44	7.5	3160	2.88	20	5	11875	0.12	1100	0.12	550	5.7485
46	7.5	3705	2.50	20	5	15000	0.11	1150	0.11	600	8.3267
48	7.4	4070	2.63	20	5	10000	0.12	1000	0.10	600	6.7459
50	7.5	3120	2.00	15	5	11875	0.11	745	0.08	400	9.1653
52	7.5	4115	2.44	15	5	10625	0.12	800	0.07	350	9.7105
54	7.5	3360	2.13	15	5	8125	0.11	850	0.04	250	3.2563
56	7.6	2740	1.31	15	5	8750	0.08	800	0.06	300	3.5191
58	*	*	1.13	15	5	9375	0.08	595	0.06	300	2.1865
60	*	*	1.19	15	5	10625	0.08	680	0.07	300	1.6776
62	*	*	1.19	20	5	12500	0.08	800	0.07	250	3.6330
64	*	*	1.25	15	5	11875	0.08	1000	0.06	250	2.5716
66	7.3	3540	1.06	20	5	12500	0.08	950	0.05	200	9.6973
68	7.3	4015	1.00	15	5	13125	0.08	950	0.07	300	9.4626

No de muestra	pH	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Calcio (Ca) ppb	Cinc (Zn) ppm	Cobre (Cu) ppm	Hierro (Fe) ppm	Manganeso (Mn) ppb	Magnesio (Mg) ppm	Potasio (K) ppb	Sodio (Na) ppb	Plomo (Pb) ppm
70	7.2	3685	0.88	20	10	13750	0.09	1000	0.07	300	10.1946
72	7.1	3845	0.94	20	10	13125	0.09	1200	0.09	300	6.4009
74	7.2	3340	0.94	20	10	14375	0.08	1300	0.07	300	4.5956
76	7.3	3145	1.56	15	10	15625	0.10	1150	0.08	300	5.0681
78	7.5	1995	1.13	15	5	10625	0.08	725	0.08	300	7.7239

Concentraciones del *metales* también fueron cuantificados, estos fueron: Cinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe) y Manganeso (Mn); además del *metal pesado* Plomo (Pb). Las cuantificaciones de Zn evidenciaron concentraciones en el rango de 15 ppm para la profundidad de 38 cm y el valor mayor de 75 ppm en dos profundidades 4 y 18 cm, respectivamente. Las concentraciones de Cu evidenciaron valores entre 0.5 ppm para las profundidades 20 y 54 cm hasta 15 ppm para la superficie (0 cm). Las concentraciones de Fe a todo lo largo de los sedimentos fue observada en un rango de concentraciones entre 3750 hasta 17500 ppm en las profundidades 28 y 56 cm, respectivamente. Las concentraciones de Mg observadas en los sedimentos se cuantificaron dentro del rango de 0.7-1 hasta 0.6 ppb en las profundidades de 40 y 18 cm, respectivamente.

Concentraciones de Pb se observaron relativamente más altas para el núcleo de sedimentos del lado Oeste (rango de concentraciones 22-84 ppm) que para el Este (rango de concentraciones 1.7-10.2 ppm). Para el lado Oeste las mayores concentraciones se obtuvieron en las secciones más superficiales en comparación que las más profundas (Figura 14, Tabla 7). Adicionalmente se realizó un análisis extra en donde se determinó el grado de contaminación según Wei et al., (2019). Siendo un valor de 1 aquellas concentraciones ≤ 1 ppm ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) como sedimentos no contaminados a moderadamente contaminados. Valor de 2 a aquellas concentraciones ≤ 2 ppm como sedimentos moderadamente contaminados, valor de 3, a aquellas concentraciones ≤ 3 ppm como sedimentos moderadamente contaminados a fuertemente contaminados, valor de 4, a aquellas concentraciones ≤ 4 ppm como sedimentos fuertemente contaminados, valor de 5, a aquellas concentraciones ≤ 5 ppm como sedimentos fuertemente contaminados a extremadamente contaminados y un valor de 6, a aquellas concentraciones >5 como sedimentos extremadamente contaminados. Para el Oeste, se reportaron en dos segmentos de sedimento una categoría 3 (moderadamente a fuertemente contaminados) siendo estas en la superficie, en la profundidad de 42 cms. Seguidamente, en las profundidades 40, 62, 72-76, 80 y 84 cms se reportaron sedimentos con la categoría de 2 (moderadamente contaminado). Finalmente, todos los demás segmentos de sedimentos se encontraron en la categoría 1 (no contaminados a moderadamente contaminados).

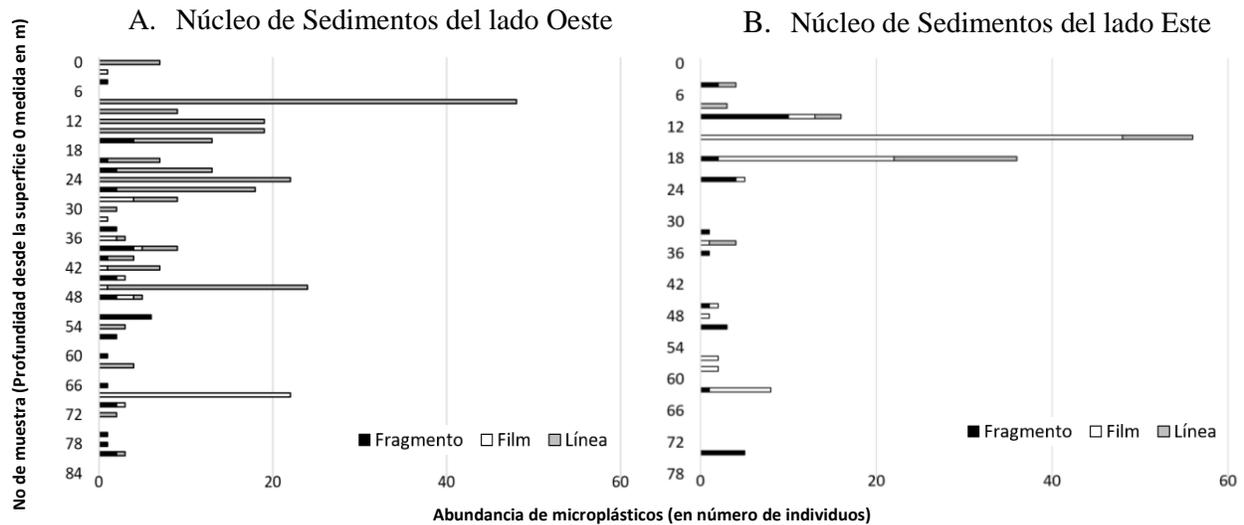


Figura 13 Tipos y abundancias de microplásticos obtenidos en los núcleos de sedimentación de los lados Oeste (A) y Este (B) del Lago de Amatitlán, Guatemala.

Adicionalmente, se cuantificaron y clasificaron los *microplásticos* (MP) presentes a todo lo largo del núcleo de todo el núcleo de sedimento, obteniendo los siguientes resultados. El total de microplásticos contabilizado fue de $n=295$ incluyendo líneas, fragmentos y films. La mayor cantidad fue observada en la profundidad de 10 cm con $n=48$ líneas, esta misma responde a la mayor cuantificación individual de tipo de MP. En cuanto a la distribución de los diferentes MP a lo largo de todo el núcleo de sedimentación, se encontró que la mayor cantidad de MP corresponden a líneas $n=221$, seguido de ambos fragmentos y films $n=37$ (Figura 13A).

Lado Este

Las *variables fisicoquímicas* como conductividad eléctrica y pH, se observó que para la primera, las concentraciones se encontraron dentro del rango de 1,995 hasta $6,350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en las profundidades de 78 y 6 cm, respectivamente. En cuanto a los valores de pH obtenidos se observaron más cercanos a su estado neutral entre 7.0 hasta 7.6 en las secciones de sedimento 16 y 56, respectivamente (Tabla 7).

En cuanto a las *variables de nutrientes inorgánicos y orgánicos* a lo largo de todo el núcleo se encontraron concentraciones de fósforo inorgánico mayores en las secciones más superficiales del núcleo. Las concentraciones se reportaron dentro del rango de 0.01-0.32 ppm en las profundidades 18 y 20 cm, respectivamente. En cuanto a nitrógeno total las concentraciones cuantificadas se encontraron dentro del rango de 0.60 hasta 0.91 ppm en las profundidades de 2 y 0 cms, respectivamente. Seguidamente, las concentraciones del carbono orgánico se encontraron

entre el rango de valores de 3.6 para las profundidades 4 y 40, mientras que las concentración más alta en la profundidad de 36 cm con un valor de 1 ppm. Al igual que para el núcleo Oeste, para el núcleo Este también se realizaron relaciones entre concentraciones de nutrientes. Los resultados para el lado Este para las relaciones C:N:P fueron relativamente mucho más altos que para el Oeste. Los valores reportados se encontraron entre el rango de 23.4 y 600, para las secciones de sedimento 20 y 14 cm, respectivamente. En diferentes secciones de sedimentos se observaron concentraciones similares, las mismas se describen a continuación. Desde la superficie hasta la mayor profundidad de sedimentos obtenida se observó la primera agrupación con valores de dicha relación entre 156-160 en las profundidades 4-8 cms. Seguidamente, con valores de 333-600 en las profundidades 10-18. Luego en las profundidades de 24-30 cms y 38-48 cms con valores dentro del rango de 107-324. Seguidamente, en las profundidades 52-54 cms con valores dentro del rango de 204-580. Luego en las profundidades de 58-64 cms en donde no se cuantificó carbono orgánico. Finalmente, en las profundidades de 66-78 cms con valores dentro del rango de 85-525 (Tabla 6). Los valores de las relaciones N:P se reportaron entre el rango de 2-15. Con respecto a las relaciones solamente de N:P, relativas agrupaciones en segmentos de sedimento fueron observados entre las profundidades de 0-4 cms con valores de 9. Agrupaciones cualitativas en secciones de sedimentos fueron observadas con valores entre 9-16 en la sección de sedimento entre 4 hasta 8cm, respectivamente. Seguidamente con valores menores entre 3-5 en las profundidades 10-16 cm, respectivamente. Relaciones mayores entre 9-15 fueron observadas en las profundidades 24-30. Con valores relativamente más bajos entre 6-12 se observaron las secciones 38-48 cm. Finalmente, en las secciones más profundas del núcleo de sedimentación desde el 66 hasta la sección más profundidad, 78 cm, se observaron los valores más bajos entre 3-6, respectivamente (Tabla 6).

Adicionalmente a los demás *nutrientes inorgánicos* las concentraciones de Ca observadas a todo lo largo del núcleo de sedimento Este los valores fueron dos veces mayores que los reportados en el núcleo de sedimentos Oeste. Las concentraciones reportadas para el núcleo Este se encontró dentro del rango de 0.3-10.0 ppb en las profundidades 20 y 40 cm, respectivamente. Con respecto a las concentraciones de Mn cuantificadas en el lado Este, el valor menor de 100 ppm fue igualmente observado en el lado Oeste, solamente una concentración relativamente mayor fue observada en el lado Este 1550 ppm. Las concentraciones entonces observadas en los sedimentos del núcleo Este se encontraron en el rango de 100-1500 ppm en las profundidades 18 y 40 cms, respectivamente. Las concentraciones de K observadas a todo lo largo del núcleo de sedimentación evidenció valores dentro del rango 0.04-0.13 ppb en las profundidades 54 y 30-32 cms, respectivamente. Finalmente para nutrientes, las concentraciones de Na cuantificadas en los sedimentos del lado Este evidenciaron valores relativamente menores que los observados en el lado Oeste. Los valores se encontraron dentro del rango de 200-1100 ppm en las profundidades de 68 y 18 cm, respectivamente (Tabla 7).

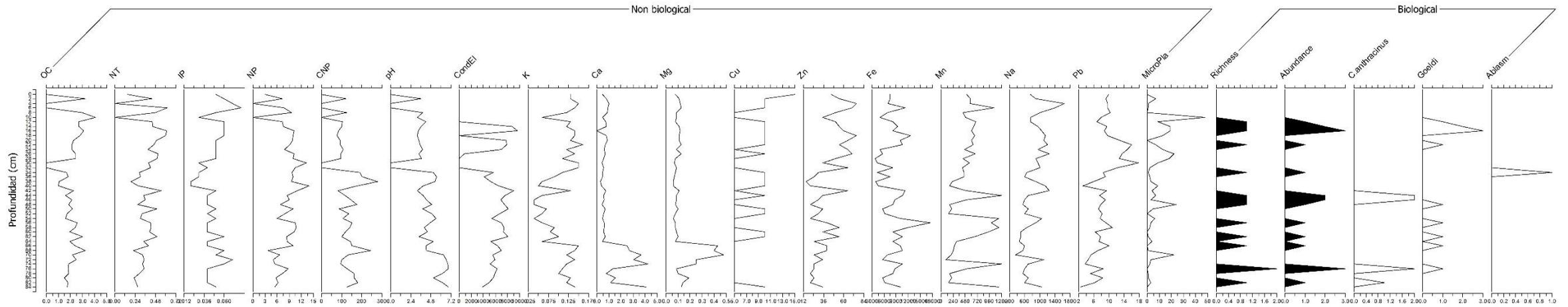
Concentraciones de *metales* también fueron cuantificados, estos fueron: Cinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe) y Manganeso (Mn); además del *metal pesado* Plomo (Pb). Las cuantificaciones de Zn en el núcleo Este fueron tres veces más altas que en el núcleo Oeste. Se evidenció concentraciones en el rango de 15-55 ppm para las profundidades de 58 y 68 cm para la menor concentración y en la superficie para la concentración mayor. Las concentraciones de Cu en ambos núcleos de sedimentación fueron bastante similares. Para el Este específicamente se evidenciaron valores entre 5-20 ppm para las profundidades 58 y 68 cms para la menor concentración y en la profundidad 10 cms para la mayor concentración. Las concentraciones de Fe para ambos núcleos de sedimentación fueron bastante similares. En el núcleo Este, se reportaron dentro del rango de concentraciones entre 5,600 hasta 17500 ppm en las profundidades 18 y 0 cm, respectivamente. Las concentraciones de Mg observadas en los sedimentos se del núcleo Este fueron para la concentración menor doce veces y para la concentración más alta cuatro veces mayor en el Oeste. Las concentraciones para el Este se cuantificaron dentro del rango de 0.025-0.25 ppb en las profundidades de 18 y 2 cms, respectivamente. Para el *metal pesado* Plomo (Pb) se observaron relativamente más altas para el núcleo de sedimentos del lado Oeste (rango de concentraciones 22-84 ppm) que para el Este (rango de concentraciones 1.7-10.2 ppm). Para el lado Este no se encontró una asociación negativa o positiva de la profundidad de los sedimentos con respecto a la concentración de este metal pesado (Figura 17 , Tabla 7). Con respecto al análisis de grado de contaminación de los sedimentos, a pesar de presentar como media, menores concentraciones que las reportadas para el lado Oeste del Lago de Amatitlán, valores más altos de categoría de contaminación fueron reportados. Con una categoría de 2 (moderadamente contaminados) se reportaron los segmentos de sedimentos: 0-6, 14-6, 20-24, 32, 38-44, 56, 62 y 72-76 cms, respectivamente. Mientras que un para la categoría 3 (moderadamente a fuertemente contaminados) se reportaron los segmentos de sedimento correspondientes a la siguientes profundidades: 18, 54, 58-60 y 64 cms, respectivamente.

Adicionalmente, se cuantificaron y clasificaron los *microplásticos* (MP) presentes a todo lo largo del núcleo de todo el núcleo de sedimento, obteniendo los siguientes resultados. El total de microplásticos contabilizado para el núcleo Este fue casi la mitad que el obtenido en el núcleo Oeste (n=149). Este conteo incluyó también líneas, fragmentos y films. La mayor cantidad fue observada fue en la profundidad de 14 cm con n=48 film y n=8 líneas. En cuanto a la distribución de los diferentes MP a lo largo de todo el núcleo de sedimentación, se encontró que la mayor cantidad de MP correspondieron a film con n=86, seguido de ambos líneas n=33 y fragmentos n=30 (Figura 13B).

Establecer la relación entre los organismos biológicos sensibles al cambio ambiental y los indicadores no biológicos en las secciones verticales de los núcleos de sedimento del pasado reciente del Lago de Amatitlán.

Lado Oeste

Las variables no biológicas cuantificadas y las variables biológicas identificadas taxonómicamente y cuantificadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste, así como sus respectivos valores evidenciaron una serie de cambios a lo largo del perfil vertical de sedimento. Estos cambios son observables en la Figura 14.



Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 14 Esquematización de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas: parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]), nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno inorgánico-N [ppm], Fósforo inorgánico [ppm], relaciones C:N:P y N:P, Calcio-Ca [ppb], Magnesio-Mg [ppm], Potasio-K [ppb], Sodio-Na [ppb]), metales (Cinc-Zn [ppm], Cobre-Cu [ppm], Hierro-Fe [ppm], Manganeso-Mn [ppm] y Plomo-Pb [ppm]) a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala.

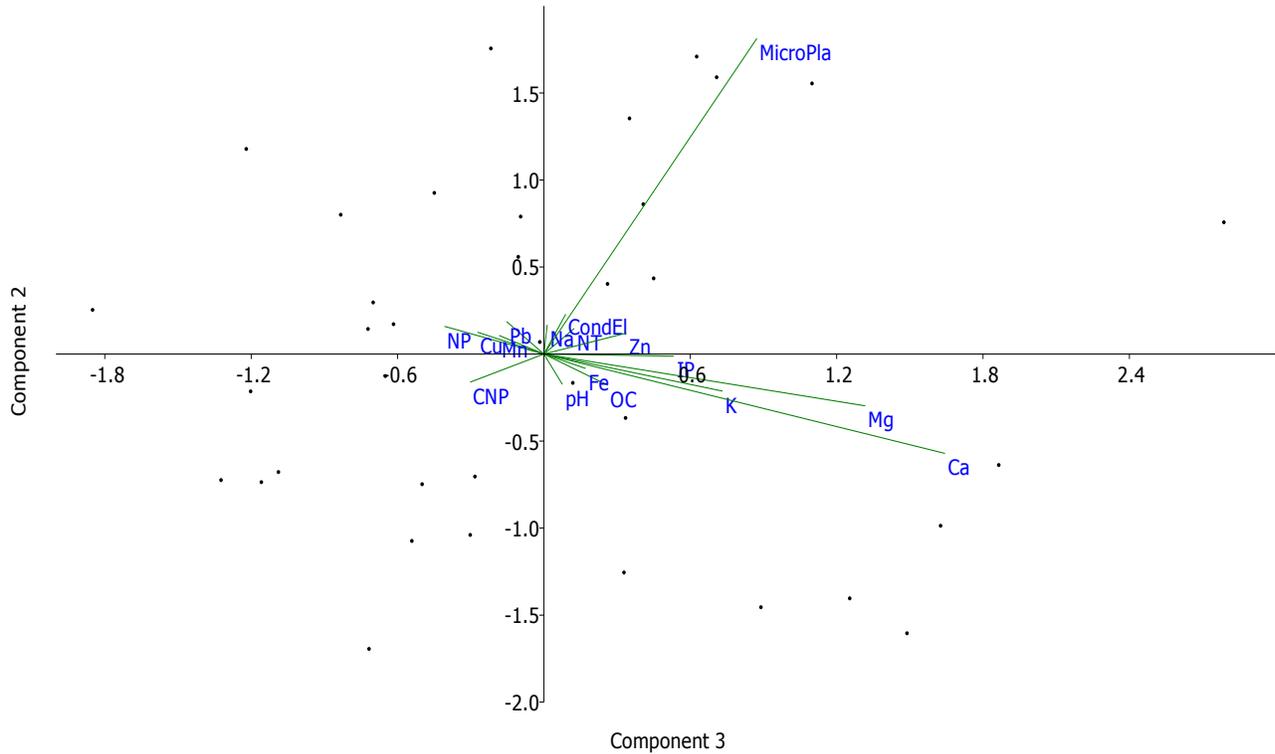
La Figura 14 presenta las concentraciones de las variables biológicas y no biológicas evaluadas en los sedimentos obtenidos del núcleo del lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala. En el eje “y” se presentan los valores de la profundidad de sedimentos obtenidos (hasta 84 cm); mientras que en el eje “x” en su parte superior se nombran las variables muestreadas y sus nombres o abreviaciones y en la parte inferior los valores cuantitativos de cada factor evaluado.

Similitudes entre las variaciones a similares profundidades pudieron ser observadas. Para variables como pH, Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), en las profundidades de 0 a 60 cms, las concentraciones son relativamente bajas hasta la profundidad de 80 cms, en donde vuelven a incrementarse.

Con relación a los nutrientes Carbono orgánico (C), Nitrógeno total (N) y Fosforo inorgánico (P) se pudo observar que con relación a la superficie, a partir de los 10 hasta los 24 cms de profundidad, se observa un ligero aumento en sus concentraciones. Seguidamente, observamos concentraciones constantes hasta la profundidad de 54 cms, hasta observar en la mayor profundidad concentraciones relativamente más altas.

Para los metales Cinc (Zn), Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn), concentraciones similares se mantienen a lo largo del perfil vertical del lado Oeste, sugiriendo que mantienen una relación en su origen. En el caso de la sección del sedimento 42 cm, podemos observar que el Zn, Fe, Sodio (Na), Plomo (Pb) y la abundancia de quironómidos presentan un incremento en concentraciones y números de individuos.

Con las concentraciones las variables no biológicas, variables fisicoquímicas (pH y conductividad eléctrica), nutrientes C, N, P y las relaciones C:N:P y N:P, Ca, Mg, K y Na; metales: Zn, Cu, Fe y Mn, además del metal pesado Pb y microplásticos del lado Oeste; se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Este con la finalidad de observar cuáles de las variables se encuentran relacionadas y cuales no. Además para entender de mejor manera cuál de las variables esté probablemente explicando ciertos comportamientos y luego relacionarlos con las abundancias de quironómidos obtenidas.



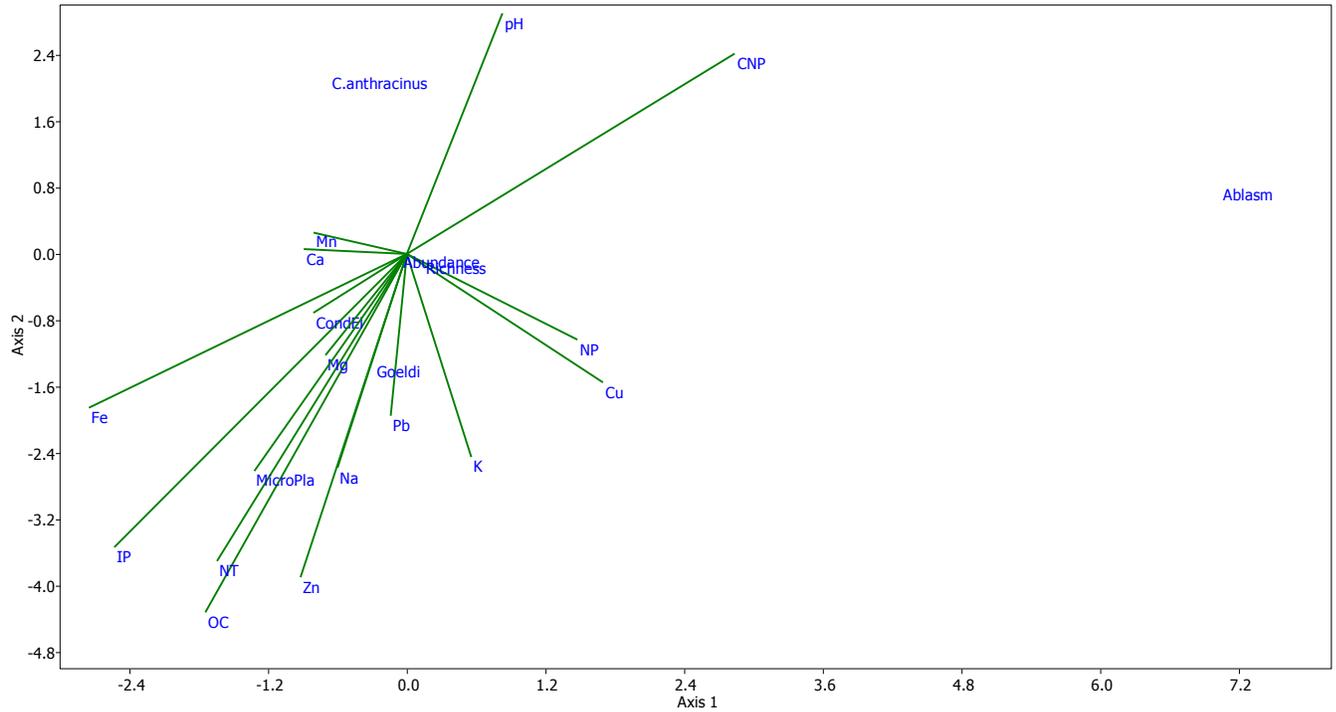
Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 15 Análisis de componentes principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones indican lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeseo, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.

En la Figura 15 se observan los ejes de ordenación componente 2 y componente 3. Los dos componentes dan un total de 88% de explicación de la ordenación de los datos. Se observan claramente relaciones en las variables Mg, Ca, K, quienes se encuentran en el mismo eje de ordenación. Así mismo se observan valores como Pb, N, Cu y Mg, también presentan alineación en el mismo eje de ordenación. CondEl, MicroPla, Zn, Na y NT, también se encuentran relacionadas en el eje de ordenación.

Las variables que explican la ordenación del eje PCA 1 son: el Magnesio (Mg) 0.75, Manganeseo (Mn), 0.59 Nitrógeno Total (NT) 0.65, y Fósforo inorgánico (IP) 0.52.

En la Figura 16, se observan los resultados del análisis de Correspondencia Canónica (ACC) realizado para los sedimentos del lado Oeste. En este análisis se incluyen tanto las variables no biológicas como las biológicas. El fin del mismo es para explicar las relaciones de las abundancias, riquezas y abundancia de especies con todas las demás variables no biológicas y ver el grado de interacción que las mismas presenten en los sedimentos analizados.



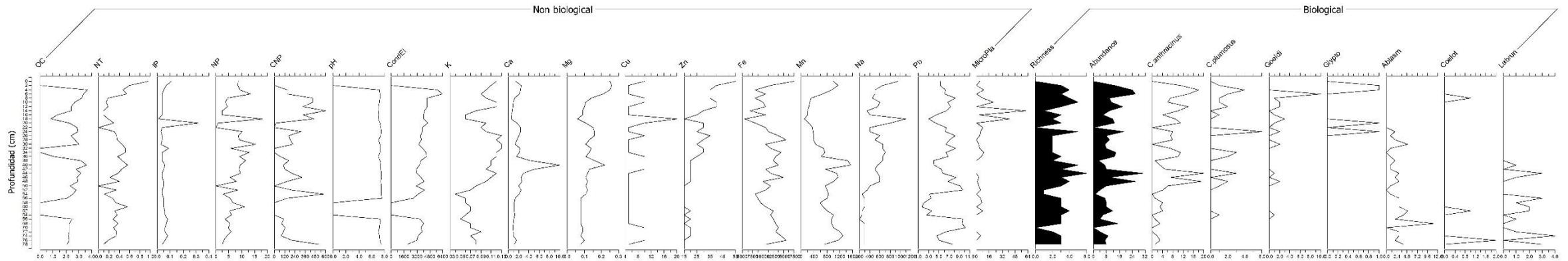
Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 16 Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) entre las variables biológicas y las no biológicas analizadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones representan lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeseo, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.

La Figura 16 muestra que los valores obtenidos a través del análisis de correspondencia canónica tienen un nivel de confiabilidad alto y que sus valores en el eje 1 representan al 49% de las variables, mientras que el eje 2 representa al 47.2% de las variables. Adicionalmente se observa la integración de las variables no biológicas y las variables biológicas. La especie *C. anthracinus* se encuentra más cercana en el eje de ordenación del pH, mientras que el género *Goeldichironomus*, presentó una relación más directa con el Plomo (Pb).

Lado Este

Las variables no biológicas cuantificadas y las variables biológicas identificadas en los sedimentos del núcleo del lado Este, así como sus respectivos valores representaron una serie de cambios a lo largo del perfil vertical de sedimento. Estos cambios son observables en la Ilustración 11 Figura 17 .



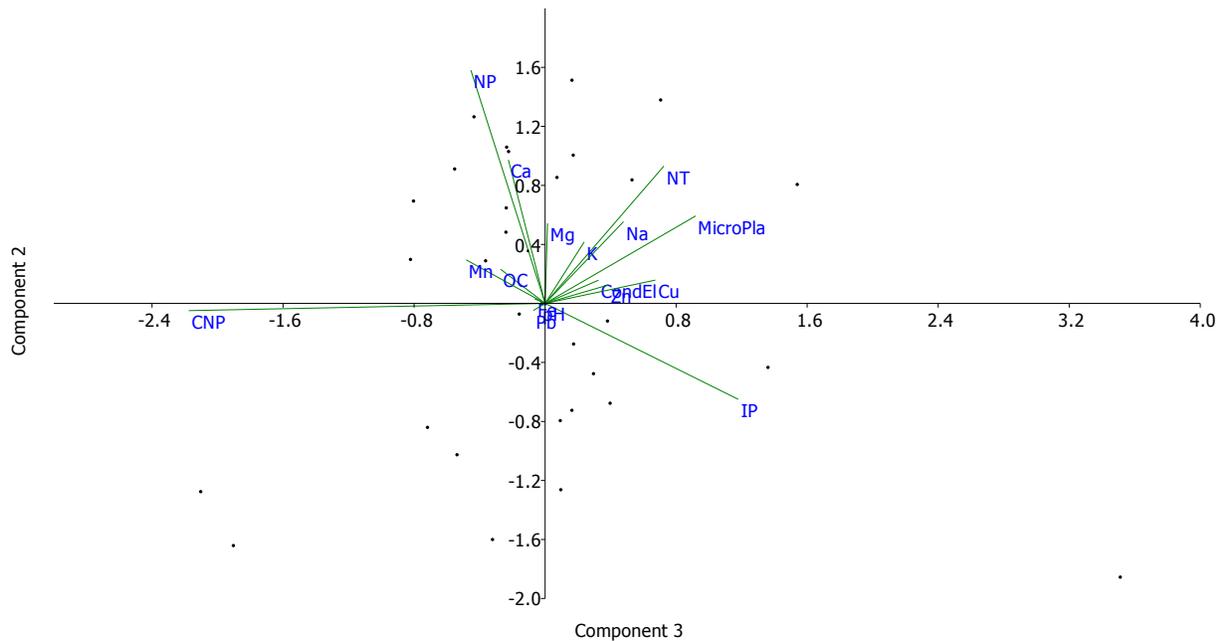
Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 17. Esquematización de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas: parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]), nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno inorgánico-N [ppm], Fósforo inorgánico [ppm], relaciones C:N:P y N:P, Calcio-Ca [ppb], Magnesio-Mg [ppm], Potasio-K [ppb], Sodio-Na [ppb]), metales (Cinc-Zn [ppm], Cobre-Cu [ppm], Hierro-Fe [ppm], Manganeso-Mn [ppm] y Plomo-Pb [ppm]) a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.

La Figura 17 presenta los valores de las variables biológicas y no biológicas evaluadas en el núcleo del lado Este del Lago de Amatitlán. En el eje “y” se presentan los valores de la profundidad de sedimentos obtenidos (hasta 78 cm); mientras que en el eje “x” en su parte superior se nombran las variables muestreadas y sus nombres o abreviaciones y en la parte inferior los valores cuantitativos de cada factor evaluado.

Se observa que en la sección de la superficie hasta los primeros 8 cms se evidencia un incremento en la concentración de OC, NT y abundancia de los quironómidos tales como *C. anthracinus*, *C. plumosus* y *Goeldichironomus*. Seguidamente en la sección de sedimentos desde 10 hasta 18 cms, se pudo observar un incremento en la relación de NP, Cu, Na y Microplásticos y en paralelo al incremento en la abundancia del quironómido *Goeldichironomus*. Luego, en el segmento de sedimentos con profundidades desde el 20 hasta los 30 cms, se pudo observar nuevamente un incremento en la concentración de C, NP, Fe, Pb, asimismo en la abundancia del género *Ablabesmeyia*. Seguidamente, específicamente en la sección de sedimento correspondiente a la profundidad de 40 cms, se observó un incremento en las concentraciones de Ca, Mg, y Mn; mientras que en paralelo se observa una disminución en la abundancia de las especies de quironómidos. Luego entre las profundidades 50 - 60 cms, se observó un aumento evidente en la relación CNP, la cual coincide con la disminución de las abundancias de quironómidos. Hacia las mayores profundidades, entre 60-78 cms, se observó el incremento de las especies *Ablabesmeyia*, *Coelotanypus* y *Labrundinia*, este incremento coincide con el incremento de las concentraciones de Pb, Mn, Fe, Cu y Ca, respectivamente.

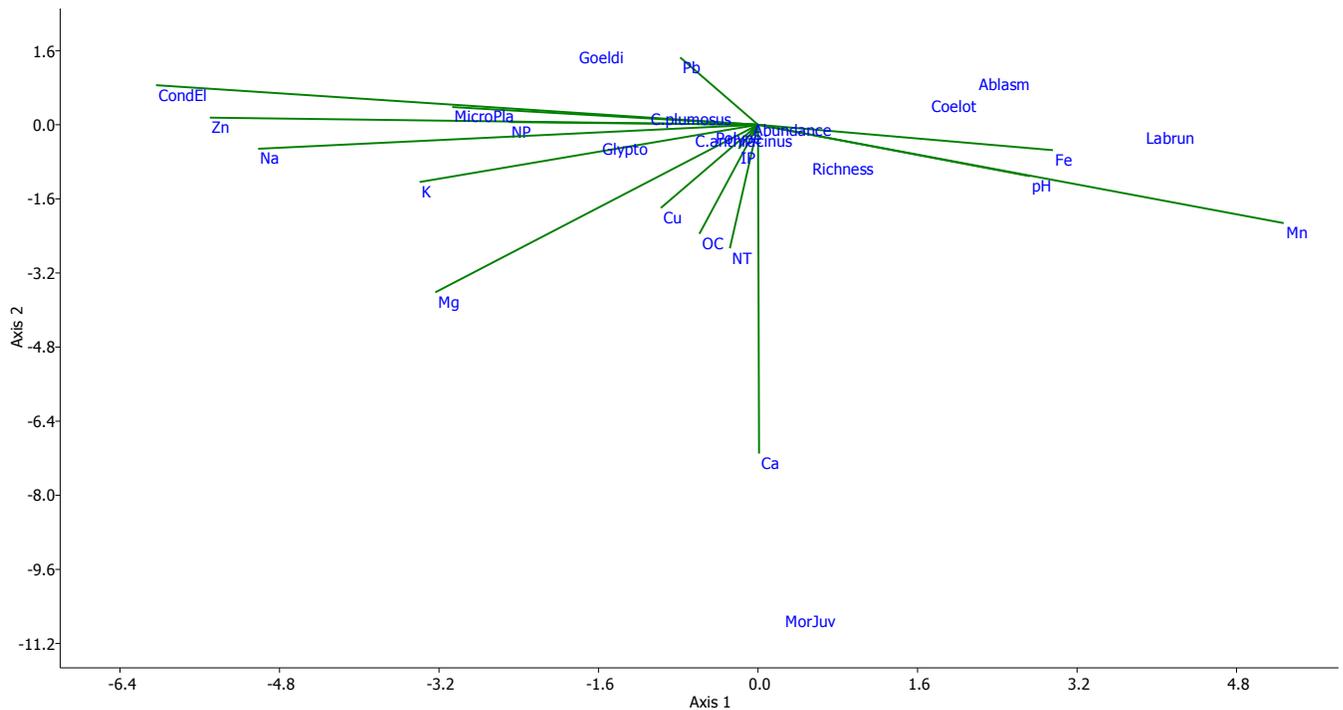
Al igual que para el núcleo Oeste, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) en el núcleo Este a fin de observar cuáles de las variables se encuentran relacionadas y cuáles no. Además para entender de mejor manera cuál de las variables esté probablemente explicando ciertos comportamientos y luego relacionarlos con las abundancias de quironómidos obtenidas. El análisis se realizó únicamente con las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo Este del Lago de Amatitlán, Guatemala.



Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 18 Análisis de componentes principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo del lado Este Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones indican lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeseo, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.

En la Figura 18, se observa los ejes de ordenación componente 2 y componente 3. Los dos componentes dan un total de 75% de explicación de la ordenación de los datos. Adicionalmente se puede observar relaciones entre variables como CondEl, Cu, K, Mg, Na, NT, MicroPla, quienes se encuentran en el mismo eje de ordenación. Así mismo podemos observar valores como CNP, Pb y pH, también presentan alineación en el mismo eje de ordenación. NP, Ca, Mn y OC, también se encuentran relacionadas en el eje de ordenación. Las variables que explican la ordenación del eje ACP 1 son: Mg, 0.61; Mn, 0.53 y NT, 0.52. Seguidamente, también se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) para los sedimentos del lado Oeste. En este análisis se incluyeron tanto las variables no biológicas como las biológicas. El fin del mismo nos permitió explicar las relaciones de las abundancias y riquezas de especies con todas las demás variables no biológicas y ver el grado de interacción que las mismas presenten en los sedimentos analizados.



Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 19 Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) entre las variables biológicas y las no biológicas analizadas en los sedimentos del núcleo del lado Oeste del Lago de Amatitlán, Guatemala. Las abreviaciones representan lo siguiente: Ca: Calcio, CNP: relación Carbono, Nitrógeno, Fósforo, CondEl: conductividad eléctrica, Cu: Cobre, Fe: Hierro, IP: Fósforo Inorgánico, Na: Sodio, Mg: Magnesio, Mn: Manganeso, NP: relación Nitrógeno, Fósforo, NT: Nitrógeno total, OC: Carbono orgánico, Pb: Plomo, K: Potasio.

La Figura 19 muestra que los valores obtenidos a través del análisis de correspondencia canónica tienen un nivel de confiabilidad alto y que sus valores en el eje 1 representan al 42% de las variables, mientras que el eje 2 representa al 18% de las variables. A medida de aclaración, para este análisis, las abundancias de los géneros de quironómidos *Endotribelos* y *Cladopelma*, no fueron incluidos en el análisis estadístico, debido a que únicamente contaban con presencia en una sección de sedimento. Adicionalmente, esto se realizó para la variable no biológicas de CNP, para poder procesar la base de datos en el programa de estadística. Los resultados obtenidos demuestran que las especies de *Ablabesmeyia*, *Coelotanypus* y *Labrundinia*, tienen una relación con el Fe y pH. Mientras que el género *Goeldichironomus* presenta una relación con el Pb. Finalmente, el género de *Glyptotendypes* presentó una relación con el K, respectivamente.

A manera de poder utilizar a los bioindicadores quironómidos como una herramienta útil para predecir los hábitats y su estado de eutroficación, se elaboró una matriz. Para esta, con la ayuda de una revisión bibliográfica extensiva, así como comentarios personales de expertos (Dra. Pérez

y Dra Massafarro) se desarrolló la misma ponderando características de los organismos y su relación con la calidad del ambiente en la que se distribuyen. Dependiendo si la especie o género presenta cierta característica, se le atribuye una ponderación que va de 3-1, siendo 3 más cercana a la característica que 1. Debido a que algunas de las características tienen una mayor relevancia que otras, se dieron diferentes valores para cada una de ellas. El valor máximo que una especie podría llegar a ponderar y constituirlo como un bioindicador óptimo para eutrofización cultural es de 3, mientras que el menor es de 1. Las características se ponderaron entonces de la siguiente manera:

- Característica 1: Organismos sensibles a la contaminación ambiental: se le dio un grado de ponderación de 3 puntos.
- Característica 2. Organismos altamente sensibles a los cambios ambientales. Se le asignó un valor de 2 puntos.
- Característica 3: Organismos que se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero o morfoespecie. Se le asignó un valor de 1 punto.
- Característica 4: Organismos que son especialistas de cierto hábitat (litoral, zona bentónica, etc.). Se le asignó un valor de 1 punto.
- Característica 5: Organismos que cuentan con una taxonomía y ecología bien reconocida. Se le asignó un valor de 1 punto.
- Característica 6: Organismos fáciles de recolectar por ser abundantes. Se le asignó un valor de 1 punto.
- Característica 7: Organismos con ciclos de vida y comunidades con respuesta a las variables biológicas inmediata. Se le asignó un valor de 1 punto.

Además se eligieron solamente las especies y géneros: debido a las abundancias que representaron una abundancia de 4 o más organismos.

Tabla 8 Matriz de los potenciales bioindicadores de la eutrofización cultural en núcleos de sedimento.

Características	Género o especie						
	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Chironomus plumosus</i>	<i>Goeldi-chironomus</i>	<i>Glyptotendipes</i>	<i>Coelotanytus</i>	<i>Labrundinia</i>	<i>Ablabesmyia</i>
1 Organismos sensibles a la contaminación ambiental	0	0	3	1	1	3	0
2 Altamente sensibles a los cambios ambientales.	2	2	2	1	2	2	2
3 Se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero o morfoespecie.	1	1	0	1	1	1	1

Características	Género o especie							
	<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Chironomus plumosus</i>	<i>Goeldi-chironomus</i>	<i>Glyptotendypes</i>	<i>Coelotanypus</i>	<i>Labrundinia</i>	<i>Ablabesmyia</i>	
4 Especialización de hábitat.	1	1	1	0	1	1	1	
5 Taxonomía y ecología bien reconocida	1	1	0	0	0	0	1	
6 Fáciles de recolectar por ser abundantes	1	1	0	0	0	1	0	
7 Ciclo de vida y comunidades con respuesta a las variables biológicas inmediata.	1	1	1	1	1	1	1	
Total	7	7	7	4	6	9	6	

Fuente: Broedersen & Quilan, 2005; Cranston, 2010; Piaggi, 1999.

Dentro de las especies que observamos con valores mayores o igual a 7, según lo propuesto en la metodología para evaluar su potencialidad como indicadores sensibles a los cambios ambientales encontramos que las especies y géneros que obtuvieron los valores mayores fueron: *Labrundinia*, representando un valor de 9, seguida de 3 organismos, 2 especies: *Chironomus anthracinus* y *Chironomus plumosus*, y 1 género: *Goeldichironomus* con un valor de 7.

16 Análisis y discusión de resultados:

Los dos núcleos de sedimento colectados en el Lago de Amatitlán (Oeste y Este) evidencian diferentes ambientes y probablemente actividades a nivel de cuenca que influyen sus características geológicas, fisicoquímicas y biológicas. (ver tabla 4). Estos cambios en el lago pueden ser explicados a través de diferentes perspectivas: hidrológica, historia de desastres naturales, cambio de uso de suelo e impactos antropogénicos (Michels, Lloyd, Woeller, Dionne, Grande, Sorto, Suarez & Basterrechea, 2014).

La hidrología del lago de Amatitlán (ver Figura 10), permite explicar la variabilidad en los resultados obtenidos. El lado Oeste, recibe directamente el afluente de la Cuenca del Río Villalobos, que carga con nutrientes (de origen municipal, industrial y agrícola, entre otros) y desechos sólidos de la cuenca del Río Villalobos, esta cuenca transporta la carga de 8 municipalidades (AMSA, 2015). Este mismo lado tiene un efluente a través del río Michatoya, ya que el Lago de Amatitlán, es clasificado como un lago exorreico (AMSA, 2015). En el caso del lado Este, podemos observar que debido a la construcción de un puente en el año 1,881 (Fajardo, 2010) se creó una división en el mismo, limitando el flujo natural de sus aguas y el intercambio de sedimentos. En ambos lados del lago ha sido reportado el florecimiento de algas cianobacterias (Romero-Oliva, et al. 2014), esto evidencia un problema de eutrofización y contaminación en el lago producto de la contaminación doméstica, agrícola e industrial (Bastarrechea, 1997).

Históricamente la Cuenca del Lago de Amatitlán se ha visto impactada por una serie de inundaciones, terremotos y huracanes. Estas han sido documentadas a lo largo del tiempo en el libro de Fajardo (2010), por ej. El Huracán Francia en el año 1969, el terremoto de San Gilberto en el año 1976, huracán Mitch 1998, Tormenta Stan 2005, y una de las tormentas reportadas en los estudios de sedimento realizados por Michaels, et al. (2014), la tormenta de Agata y la erupción del Pacaya en el año 2010, en el cual incrementa el lago de Amatitlán y arrastra arena, rocas, ramas, basura e incluso vehículos de la vía pública. Estos eventos geoclimáticos construyen a la historia geológica y natural del Lago de Amatitlán, Guatemala.

La Cuenca del Lago de Amatitlán y la cuenca del Río Villalobos presenta un uso de suelo distribuido de la siguiente forma: cobertura forestal (vegetación conífera, vegetación latifoliada y mixta) asciende a un 27% del área, la cobertura vegetal (compuesta por el pasto y pasto natural) que forman un 5% del área, el cuerpo de agua cubre un 4% del área, el 23% se encuentra urbanizado, un 6% es utilizado para el área agrícola y un 35% se encuentra como suelo desnudo, el cual seguramente es utilizado para agricultura a pequeña escala, ganadería, vías de acceso y construcciones rurales (Salguero 2019).

El área urbanizada de la cuenca de estudio, tiene un porcentaje de 23% representando un total aproximado de 3,257,616 habitantes según estadísticas del 2013 (INE, 2013; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2017). Esto se evidencia en el volumen de sedimentos con valores mayores de erosión del suelo y de ingreso de nutrientes, tales como nitrógeno (165 mg/L), fósforo (540 g/L) y carbono orgánico provenientes de la Cuenca del río Villalobos. Estos tributarios ingresan un volumen total de 437.5 millones de litros de agua contaminada (conjunto de aguas industriales y domésticas) (AMSA, 2015). Estos cambios han incrementado los valores

de nutrientes, que a su vez son recurso para la cianobacteria, generando características eutróficas en el Lago de Amatitlán reportado desde el año 1950 (Brezonik & Fox, 1974)

Dentro de los organismos identificados, la subfamilia Chironominae, es la más abundante. De las especies identificadas de la subfamilia, la especie *Chironomus anthracinus*, fue la más abundante seguida por *Goelchironomus* y por último *Chironomus plumosus*. Los ensamblajes observados, pertenecen a una biota de hipereutrofización, tal y como lo reporta Pérez et al., (2017). Es importante resaltar que la especie *Goeldichironomus*, no había sido reportada previamente en los estudios realizados con anterioridad en el Lago de Amatitlán, Guatemala; de manera que el presente estudio es el primero en reportarlo.

Existe un cambio de especies y subfamilias del Núcleo Oeste al Este en donde se evidencia que las condiciones ambientales también son diferentes, esto puede llegar a sugerir que el Lago está presentando dos diferentes tipos de proceso de eutrofización. Fortaleciendo la hipótesis propuesta por Michels, Lloyd, Woeller, Dionne, Grande, Sorto, Suarez, & Basterrechea (2014) en la cual se propone que la tasa de sedimentación del Lado Oeste es mayor comparada con la tasa de sedimentación del Este. Esto está relacionado directamente con el afluente del río Villalobos quien presenta una tasa de sedimentación anual constante. Los resultados obtenidos con el presente estudio, nos permiten aportar con variables no solamente fisicoquímicas, inorgánicas e orgánicas, pero también nos permite observar que la diferenciación de los dos lados del lago de Amatitlán, es evidente también en su biota, lo anterior representado por los ensamblajes de quironómidos observados.

Riquezas y abundancias de quironómidos, como las observadas para el lado *Oeste*, con solamente tres representantes y un total de 20 individuos, en contraste con los 428 individuos y 9 representantes observados para el lado *Este* del Lago de Amatitlán, Guatemala; nos permite evidenciar que intervenciones antropogénicas podrían ser la mayor influencia en las condiciones ambientales observadas en ambos lados del lago. Adicionalmente, la presencia predominante de la especie *C. anthracinus* en los dos lados del lago, siendo una especie reportada anteriormente y característica de condiciones de hipereutrofización, bastante tolerante a perturbación ambiental y ubicua, nos indican que en ambos lados del lago se encuentran en un grado alto de deterioro ambiental del cuerpo de agua. Lo anterior ya ha sido reportado con otros taxones o mediciones tales como cianobacterias, compuestos orgánicos, nutrientes inorgánicos y clorofila (AMSA, 2015; Pérez et al., 2013). Algo característico de esta especie es su preferencia por ambientes con sedimentos de aproximadamente 20 μm , con un alto recambio de material orgánico, relacionada positivamente con carbono orgánico y nitrógeno inorgánico y bajas concentraciones de clorofila (Johnson 1984). Estas son condiciones descritas para zonas neárticas, sin embargo, para el Lago de Amatitlán, estas condiciones también pudieron sustentar la presencia predominante de esta especie, indicando su carácter adaptativo aun en condiciones de estrés y contaminación como ya ha sido reportado con anterioridad (Broederssen & Quilan, 2005; Cranston, 2010; Piaggi, 1999). A pesar de que al analizar a esta especie dentro de la ponderación de indicadores no fue la que presentó el mayor puntaje, específicamente por no ser una especie que indique cambios ambientales inmediatos, su presencia puede indicar las condiciones del ambiente en la que se encuentra y mayormente si es la única que se encuentra presente.

En donde se reportó mayor abundancia y riqueza de especies y/o géneros de quironómidos fue en el lado Este del Lago de Amatitlán. Esto muy probablemente por la características de la cuenca

del lago, sumado al ingreso mayor de contaminantes provenientes del Río Villalobos, que hace al lado Oeste un ambiente más hostil y con mayores cambios a nivel de sedimentación. En el lado Este, debido a su independencia artificial creada en 1881, a partir de la creación de un puente cerrando el acceso natural de agua y conectividad natural entre las dos partes del lago; presenta otras dinámicas ambientales, en donde se reportan en los años recientes florecimientos de cianobacterias recurrentes y más prolongados que en el lado Oeste (AMSA, 2015; Cano 2018; Engelbert, 2015; Romero-Oliva, et al., 2014). Según Johnson (1984) y Sokolowa (1968), la presencia de quironómidos en sedimentos en donde existen florecimientos de cianobacterias o bien una alta producción de materia orgánica es positiva. Los resultados obtenidos en la presente investigación respaldan este argumento, ya que para el lado Este concentraciones altas de carbono orgánico son evidentes desde la superficie hasta la profundidad de 20 cms con valores que van desde 0.8-3.7 ppm, luego en el segmento de sedimentos a la profundidad de 38-56 cms con valores en el rango de 2.1-3.6 ppm y finalmente en la profundidad 66-78 cms con valores en el rango de 2.1-2.5 (Tabla 4 y Figura 17). Es conocido que los florecimientos de cianobacterias se han incrementado en los años más recientes y esto a su vez se ve evidenciado en la cantidad de carbono orgánico presente en los sedimentos analizados. Esto a su vez puede que haya influenciado también positivamente la presencia de quironómidos.

Indicadores de deterioro ambiental no solo presente pero pasado son los observados a través de las variables no biológicas. Específicamente valores de pH muy ácidos reportados para los sedimentos del núcleo *Oeste* del Lago de Amatitlán. Especialmente ácidos, entre 3.2-4.2 fueron observados en la superficie hasta los 28 cms, aumentando entre el segmento de sedimentos entre 34-68 cms con valores de 3.2-5.5 y finalmente los valores más altos en los sedimentos más profundos entre 70-84 cms con valores de 5.1-6.9, respectivamente. Estos valores tan bajos en comparación con el lado Este (7-7.6), en donde los valores se reportan bastante más estables a todo lo largo de los sedimentos, históricamente representan claramente el ingreso de sustancias alóctonas con potencial de contaminación ambiental para el lado Oeste en comparación del lado Este. En el estudio de Zhang y colegas (2018) se establece que mucha de la contaminación que acidifica los cuerpos de agua y los sedimentos de los mismos proviene de contaminación industrial y de aguas residuales. Las especies de compuestos o sustancias inorgánicas que contribuyen a esto son las sulfatadas (SO_x) y del ion nitrato (NO_3^-), específicamente. Para el lado Oeste, esto es bastante probable considerando que los ingresos mensuales de contaminantes a través del río Villalobos asciende a los 22,191,728 m³ hacia el lago (Calderón 2010), sin embargo la porción atmosférica no fue calculada en el presente estudio. Esta cantidad es muy alarmante, pero lo más interesante es que la acidificación del lago se viene observando desde hace muchos años atrás. Similares patrones fueron observados para otras variables no biológicas como para Hierro con picos (10625-12500 ppm) en secciones superficiales (18-20 cms), Manganeseo con picos desde la superficie hasta los primeros 6 cms (670-1150 ppb), Magnesio con picos igualmente hasta los 8 cms (0.21-0.26 ppm) y finalmente para Plomo, valores más altos reportados en la sección intermedia a final (66-70 cms) con los mayores valores reportados (9.46-10.19 ppm). La acidificación del medio tiene mucho que ver con la liberación, disponibilidad o lixiviación de metales en los diferentes medios (Wei et al., 2019; Zhang et al., 2018). Los reportes de pH en los sedimentos del lado Oeste, podrían influenciar las concentraciones de metales encontrados en los sedimentos incluyendo las concentraciones reportadas de Plomo (más bajas para el lado Oeste que para el Este). En el estudio de Ellenberg, (2015) se reporta que muy probablemente la acidificación tiene que ver con la falta de fijación de fósforo en los sedimentos de ciertas áreas del Lago de Amatitlán y por ende concentraciones más altas reportadas en el agua

a lo esperado. Adicional a lo reportado por Ellenberg (2015), el presente estudio evidencia que concentraciones altas no solo de fósforo inorgánico, pero de otros nutrientes y hasta metales se cuantifican a lo largo del núcleo Oeste y representa contaminación de muchos años atrás. Según datos aun no publicados de Waters y colegas, de la Universidad de Auburn en Alabama, quienes actualmente se encuentran haciendo datación por medio de la cuantificación del radionucleótido ²¹⁰Plomo (Waters et al., 2019) en los sedimentos obtenidos de núcleos replica de los que se usaron en este estudio, establecen que para el lado Oeste, por lo menos hasta la profundidad de 34 cms el año correspondiente es 1840, ósea 180 años atrás. Habría que correlacionar acciones y mandatos nacionales para la protección del ambiente para identificar ciertas acciones que pudieron aumentar o mitigar los efectos negativos de acciones antropogénicas en este lado de lago. Un contaminante relativamente reciente e inusual de ser encontrado a profundidades fueron los microplásticos (Mintenig, INT-Veen, Loder, Primpke & Gerdt, 2017).. Para el lado Oeste, se encontraron fragmentos y líneas en la profundidad 80 cms, que son de origen secundario. Estos tipos vienen de la degradación y descomposición de plástico de origen doméstico, proveniente de los desechos sólidos que ingresan al lago. Los resultados coinciden con lo encontrado en lagos como: Michigan, Hovsgol, Geneva y Atitlán (Free et al., 2014; Imhof et al., 2013 y López-Xalín, 2018). A pesar de encontrar tal y como se esperaba mayores abundancias en la superficie, los microplásticos en las mayores profundidades podrían ser explicados por su posible migración vertical a través del tiempo y no necesariamente que hayan sido depositados hace más de 200 años atrás. Aunque no se cuenta con información de sedimentos lacustrinos, el estudio de O'Connor y colegas (2019) indican la migración vertical de microplásticos en sedimentos arenosos hasta unos 3.5 cm dependiendo de sus características y tamaño. También presentaron una proyección de lo que las partículas de microplástico podrían migrar en el lapso de 100 años para las zonas costeras estudiadas y establecieron que podrían migrar de 1.48 hasta 7.42 mt (O'Connor et al., 2019). Esta podría ser una posible explicación para la presencia de microplásticos a profundidades de 80 cms para el Oeste y 74 cms para el Este. Lamentablemente, mucho de la ecología y comportamiento de los mismos es aun desconocido.

Al evaluar el lado *Este* sin embargo, la dinámica ambiental según todas las variables estudiadas, se desarrolla de diferente manera. En este lado se observa un ambiente natural que interactúa desde sus componentes inorgánicos, fisicoquímicos hasta biológicos. Para el lado Este con respecto a las variables no biológicas estudiadas se puede observar que primeramente el pH responde a cuerpos de agua ligeramente contaminados y podrían estar influenciados por condiciones autóctonas y no alóctonas como para el lado Oeste del Lago de Amatitlán. En concomitancia, se observan concentraciones mayores de todas las sales, nutrientes inorgánicos, metales y metal pesado, evidenciando que mucho de estos es fijado en los sedimentos y no liberado de nuevo a la fracción acuosa como lixiviado. Concentraciones altas de Hierro (10000-15000 ppm) son observadas no en la superficie pero a partir de las profundidades de 22-52 cm, sumadas a las concentraciones de Cinc con valores entre 35-55 y 20-25 ppm en las profundidades de 0-12 cms y 36-48 cms, respectivamente. Adicionalmente, los valores altos de Magnesio y Plomo, respectivamente. Indicadores de actividad agrícola por el alto uso de fertilizantes y su escurrimiento hacia el lago son concentraciones altas de Mg (Montalvo et al., 2014). Este tipo de actividades son observadas aun en el área con cultivos de tomate, cana de azúcar, cebollas, chile pimiento, entre otros.

Sin embargo, para estudios limnológicos han determinado que las concentraciones en donde no existe una sobreproducción de productores primarios tales como cianobacterias y que ocurran cambios de vegetación acuática gobernada por macrófitas; las concentraciones de nutrientes deben respetar el límite definido por Redfield (Referencia). Este límite está dado por la combinación de tres de los componentes limitantes para cambios en las comunidades acuáticas. Se definieron tres, siendo estos el carbono, nitrógeno y fósforo. Estos poseen muchas formas entre las inorgánicas, orgánicas (en detritos) y particuladas (dentro de organismos vivos). En conclusión para que existan condiciones oligotróficas y mesotróficas en los cuerpos de agua, la relación entre las concentraciones de estos debe ser: 106 partes de Carbono, por 16 partes de Nitrógeno, por 1 parte de Fósforo (Redfield, 1968). En el presente estudio se evaluaron estas relaciones C:N:P y N:P para los sedimentos de ambos lados del Lago de Amatitlán. Los resultados evidenciaron que ambos lados del lago se encuentran encima de los valores planteados por Redfield específicamente cuando se realizaron las relaciones C:N:P, pero esto no fue generalizado para la relación N:P. Específicamente en el Oeste, se observaron valores más estables de la relación C:N:P y para el lado Este valores más fluctuantes, pero con los mayores de todos los sedimentos (p.ej. 324 [46 cms], 450 [10 cms], 461 [18 cms], 525 [78 cms], 580 [54 cms], 600 [14 cms]). Esto evidencia claramente que procesos biológicos han influido históricamente en la eutrofización de este lado del lago. Debido a que relaciones muy altas fueron observadas en las mayores profundidades, se puede especular que el origen de la eutrofización del lado Este del Lago de Amatitlán, no responde a actividades netamente antropogénicas, pero más a fenómenos ambientales naturales como lo es el caso de los florecimientos de cianobacterias entre otros. Esto explicaría también la presencia de una mayor abundancia y riqueza de especies de quironómidos, que como anteriormente ya se explicó, podrían verse beneficiados de la materia orgánica resultante después del período de senescencia de un florecimiento de este tipo. Los resultados a ser obtenidos por Waters y colegas, con respecto a pigmentos fotosintéticos provenientes de cianobacterias en los mismos sedimentos analizados en la presente investigación podrán corroborar esta aseveración.

Uno de los contaminantes que menos se esperó encontrar elevado en este lado del lago en comparación del lado Oeste fue el Plomo. El plomo en el ambiente, es un metal pesado que tiene diferentes fuentes de origen, siendo las gasolinas con plomo, uno de los principales contribuidores (Silver & Wozniak, 2001). Para Guatemala, en los años 1950-1970, se permitía una concentración de aproximadamente en 1990-2000 ppm en combustibles comerciales. A partir de 1970, este tipo de gasolinas fueron prohibidas. Por lo que se esperaba observar un incremento histórico de plomo seguido de una disminución de sus concentraciones en los sedimentos de ambos lados del Lago de Amatitlán. Específicamente para el lado Este, la sección del sedimento de 40 cms, se observa un incremento en la concentración de Plomo, seguida por la sección de sedimento 16 cms en donde se observa una disminución abrupta del mismo. Debido a que no se cuenta con la datación de los sedimentos de este lado del lago, será necesario complementarla para afirmar esta argumentación y generar una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

En general, los resultados obtenidos del presente estudio aportan desde la perspectiva ambiental, así como también como herramienta para el abordaje de la historia natural de contaminación presente en el Lago de Amatitlán, Guatemala a través de una propuesta interdisciplinaria como lo es la combinación de las ciencias de la Paleolimnología y la Ecotoxicología.

Específicamente los resultados obtenidos nos permiten demostrar que el Lago de Amatitlán, Guatemala presenta condiciones de eutrofización cultural, pero que su origen es diferente teniendo como consecuencia cambios visibles en la composición, ensamblaje y dinámica ambiental. Este estudio es el primero para Guatemala y Mesoamérica en usar herramientas actuales como lo es la Ecotoxicología a través de la cuantificación de variables no biológicas, y la Paleolimnología con su énfasis en el uso de indicadores biológicos importantes. Mediante este estudio, se logró determinar que el uso de proxies comúnmente utilizados en ambas ciencias, al ser combinados nos permite conocer de mejor manera la intervención humana en procesos de eutrofización, tal como la eutrofización cultural. Los grandes hallazgos de la presente investigación es que todas las variables estudiadas, no biológicas (nutrientes, sales y/o nutrientes inorgánicos, metales y microplásticos) y biológicas (organismos de la Familia Chironomidae, Orden Diptera) evidenciaron que a través del tiempo, los lados Oeste y Este del Lago de Amatitlán, Guatemala presentan dinámicas ambientales y orígenes de contaminación diferentes. El origen de contaminación ambiental es claramente de tipo antropogénico, basado en los valores altos de Manganeso, Plomo, Cinc, una comunidad biológica de quironómidos baja en abundancia y riqueza y especialmente grados de acidez a todo lo largo de los sedimentos analizados. Adicionalmente, se observaron las mayores abundancias de microplásticos, los cuales son evidentemente contaminación antropogénica. Seguidamente, para el lado Este, se observa también claros indicios de eutrofización, sin embargo, este podría en los sedimentos más recientes ser de origen cultural, pero en los sedimentos más profundos responder a dinámicas ambientales naturales del lago mismo.

Los resultados obtenidos con la presente investigación muestra claramente que la combinación de ciencias a partir de estudios interdisciplinarios nos permiten proponer con mayor autoridad eventos y dinámicas ambientales de importancia para los recursos naturales y especialmente como herramientas para el manejo a nivel de cuenca. En países como Guatemala, la información de procesos ecológicos y deterioro ambiental de nuestros cuerpos de agua no es estudiada con propiedad y específicamente, con esta investigación se trae a luz el potencial de toxicidad que contaminantes como los microplásticos al entrar en combinación con metales pesados ya que los microplásticos tienen la capacidad de adsorber cualquier contaminante que se encuentre en el ambiente (Mason et al., 2016). Los microplásticos se han convertido en un contaminante urgente a tratar y que a largo plazo puede tener efectos negativos en el ambiente. Por lo que conocer su historia de contaminación y estado actual, permite realizar planes de manejo integrales para el

Lago de Amatitlán que permitan tomar acciones que mitiguen la contaminación y contrarresten su eutrofización cultural/inducida.

17 Conclusiones

- El Lago de Amatitlán, Guatemala presenta condiciones de eutrofización cultural, basado en las variables biológicas y no biológicas estudiadas.
- Con respecto a la variable biológica estudiada, los sedimentos del Lago de Amatitlán reportaron la presencia de 2 subfamilias de la familia Chironomidae, la subfamilia Chironominae y Tanypodinae, estas fueron representados a lo largo del núcleo. La subfamilia chironominae fue la más abundante con la especie de *Chironomus anthracinus*, seguida por *Goeldichironomus*.
- Se observó para el lado Este del Lago de Amatitlán una mayor abundancia y riqueza de quironómidos en comparación con el lado Oeste, lo cual evidencia dos procesos diferentes de eutrofización natural y/o cultural.
- Se observó una diferencia en los sedimentos del lado Oeste y Este, esto acompañado con la información del uso de suelo de la cuenca, podemos observar que el Lado Oeste, recibe mayor influencia urbana (basada en las concentraciones y tipos de contaminantes), a través de río Villalobos. Mientras que el Lado Este, recibe mayor influencia de uso de suelo vinculado a la agricultura.
- Con respecto a las variables no biológicas estudiadas, se logró determinar que los orígenes de contaminación ambiental de ambos lados del Lago de Amatitlán, responden a diferentes actividades antropogénicas, siendo para el Oeste actividades domésticas e industriales y para el Este predominantemente natural con un menor grado de actividades domésticas e industriales.
- El Lago de Amatitlán, presenta una mayor abundancia y diversidad de tipos de microplásticos en el lado Oeste en comparación con el lado Este.

18 Impacto esperado

Esta investigación pretende ser una de las primeras a nivel mundial (Korosi et al., 2017) y para Latinoamérica en relacionar herramientas de la paleolimnología con la ecotoxicología específicamente para entender procesos de cambio ambiental derivado de actividades antropogénicas. La paleoecotoxicología, siendo una línea de estudio emergente, complementa directamente lo potente de entender procesos ambientales pasados con las posibles fuentes de contaminación emergentes estudiados que se tratan dentro de la rama de la ecotoxicología. Lo anterior con la finalidad de reducir la brecha entre el pasado y el presente para entender de manera integral los procesos que han llevado al cambio del estado ambiental. Con la presente investigación, entonces, se pretende abordar el tema del cambio en el estado trófico de uno de los lagos de origen volcánico más importantes de Guatemala, el cual en sus últimas décadas ha

experimentado un acelerado proceso de eutrofización cultural/inducida. Esto no solo por medio del estudio de indicadores no biológicos, como convencionalmente se trabaja en la toxicología clásica, sino que incorporando organismos biológicos sensibles ante los cambios en el ambiente. En la presente investigación asociamos dos componentes importantes para entender de una mejor manera el comportamiento pasado y actual en función de la contaminación del Lago de Amatitlán.

Hasta el día de hoy varias iniciativas de monitoreo del Lago de Amatitlán se han llevado a cabo, tales como las realizadas por Amsa desde 1969 (Ellenberg, 2014) o estudios variados (Amsa, 2015; Basterrechea, 1983, 1997; Cabrera, 2011). Sin embargo, muy poco se analiza en cuestión de tendencias a largo plazo. Esto en parte porque no se conoce de la calidad de los datos o no son comparables debido a las diferentes metodologías empleadas, tal y como lo establece Ellenberg (2014). Es por esto que este estudio pretende entender dinámicas pasadas para identificar posibles patrones ambientales expresados por medio de organismos biológicos sensibles a estos cambios e indicadores no biológicos. Con esta información será más accesible el entendimiento de procesos actuales y en el futuro con el complemento de subsiguientes estudios establecer o predecir escenarios futuros. Finalmente, este estudio responde a la iniciativa de “Restauración del Lago de Amatitlán” planteado durante el taller titulado: Taller para la definición de estrategias metodológicas para la restauración del Lago de Amatitlán, Guatemala; llevada a cabo del 4-8 de junio de 2012 en donde varios expertos de diferentes instituciones plantearon como recomendación primordial que el esfuerzo debe ser dedicado a la interpretación de datos pasados y actuales, permitiendo un mejoramiento crítico para entender los procesos dentro del lago y poder cuantificar las reservas de nutrientes y flujos. Con esta información se estará fortaleciendo grandemente a AMSA, proveyendo de información integral para la mejor toma de decisiones en temas de manejo, a la población en general dando el primer paso hacia un manejo integral y sustentable del lago y tercero contribuyendo a la ciencia por medio del aporte de uno de los primeros estudios paleoecotoxicológicos a nivel mundial.

19 Referencias

- Autoridad de Manejo Sustentable Amatitlán. (2015). Calidad de agua de la Cuenca y Lago de Amatitlán. División de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos. Guatemala: Gobierno de Guatemala.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2006). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 ed. APHA, Washington, DC. Recuperado de: <https://www.standardmethods.org/>
- Andrady, A. (2003). Plastics and the environment. U.S.A.: Wiley-Interscience A John Wiley & Sons Publication.

- Araneda, A., Cruces, F., Torres, L., Bertrand, S... & Urrutia, R. (2007). Changes of sub-fossil chironomid assemblages associated with volcanic sediment deposition in an Andean lake (38°S), Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(2), 141–156. Doi:10.4067/S0716-078X2007000200002
- Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. (2009). Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects and fate of microplastic marine debris. Sept. 9-11, 2008. NOAA Technical Memorandum NOS-OF&R-30.
- Barnes, D., Galgani, F., Thompson, R., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transaction of the Royal Society B*, 364:1985–1998. Doi: 10.1098/rstb.2008.0205.
- Basterrechea, M. (Septiembre, 1983). Modelo para Estimar la Calidad del Agua en los Lagos: El Lago de Amatitlán. En Tegucigalpa. Hydromath symposium. Symposium llevado a cabo en: *Hydrology and Water Resources in Latin America*, Honduras.
- Basterrechea, M. (1997). El Lago de Amatitlán: Década de Estudios Limnológicos. Guatemala: Procter & Gamble.
- Binford, M. W., Brenner, M., Whitmore, T. J., Higuera-Gundy, A., Deevey, E. S., & Leyden, B. (1987). Ecosystems, paleoecology and human disturbance in subtropical and tropical America. *Quaternary Science Reviews*, 6(2), 115–128. Doi: 10.1016/0277-3791(87)90029-1.
- Browne, M., Galloway, T., & Thompson, R. (2007). Microplastic - an emerging contaminant of potential concern? *Integrated Environmental Assessment and Management*, 3: 449–561. Doi: 10.1002/ieam.5630030412.
- Cairns, J. (2002). Ecotoxicology and sustainable use of the planet. *Toxicology and Industrial Health*, 18,162-170. Doi: 10.1191/0748233702th143rr
- Cabrera, D. (2011). Evaluación de la relación entre las densidades poblacionales de cianobacterias (*Mycrocystis* sp., *Anabaena* sp, *Oscillatoria* sp.) y las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos: Nitratos y Fosfatos en el Lago de Amatitlán, Guatemala durante los meses de mayo a octubre de 2009. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Cano, M. (2018). Diagnóstico de los cuerpos de agua de la cuenca del Lago de Amatitlán. Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA). 60 pp.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62 (12): 2588–2597. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- Costa-Böddeker, S., Bennion, H., de Jesus, T. A., Albuquerque, A. L. S., Figueira, R. C. L., & de C. Bicudo, D. (2012). Paleolimnologically inferred eutrophication of a shallow, tropical, urban reservoir in southeast Brazil. *Journal of Paleolimnology*, 48(4), 751–766. Doi: 10.1007/s10933-012-9642-1.

- Dai, Z.; Zhang, H., Zhou, Q., Tian, Y., Chen, T., Tu, C., Fu, C. & Luo, Y. (2017). Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities. *Environmental Pollution*, 242B: 1557 – 1565. Doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.131
- Das, S.; Routh, J., Roychoudhury, J., & Val, J. (2008). Elemental (C, N, H and P) and stable isotope ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) signatures in sediments from Zeekoevlei, South Africa: a record of human intervention in the lake. *Journal of Paleolimnology*, 39, 349–360. Doi: 10.1007/s10933-007-9110-5.
- Derraik, J. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 842–852. Doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
- Díaz, L. A. (2010). El impacto global de la degradación ambiental de Guatemala en su desarrollo económico. Tesis de Licenciado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- División de control calidad ambiental y manejo de lagos. (2015). Calidad de agua de la Cuenca y Lago de Amatitlán,
- Dodds, W., & Cole, J. (2008). Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs. *Aquatic Science*, 69(4), 427-439. Doi: 10.1007/s00027-007-0922-1.
- Ellenberg, R.L. (2014). Limnology of Lake Amatitlán in Guatemala and its eutrophication process. Diploma Thesis. Technical University of Berlin. Germany.
- Fenn, M., Baron, J., Allen, E.; Rueth, H..., & Neitlich, P. (2003). Ecological effects in nitrogen deposition in the Western United States. *BioScience*, 53 (4), 404–420.
- Fisher, M., Brenner, M., & Reddy, K. (1992). A simple, inexpensive piston corer for collecting undisturbed sediment/water interface profiles. *Journal of Paleolimnology*, 7, 157–161. Doi: 10.1007/BF00196870
- Fontana, L., Luiza, A., & Mark, S. A. (2014). The eutrophication history of a tropical water supply reservoir in Brazil. *Journal of Paleolimnology*, 51, 29–43. Doi: 10.1007/s10933-013-9753-3
- Free, C., Jensen, O., Mason, S., Eriksen, M., Williamson, N. & Boldgiv, B. (2014). High - levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, 85 (1): 156–163. Doi: 10.1016/j.watres.2016.11.015
- Gagliardi, B., Pettigrove, V., Long, S. & Hoffmann, A. (2016). A meta-analysis evaluating the relationship between aquatic contaminants and chironomidlarva deformities in laboratory studies. *Environmental Science & Technology*, 50 (23), 12903 – 12911. Doi: 10.1021/acs.est.6b04020.
- Gasiorowski, M., & Sienkiewicz, E. (2013). The Sources of Carbon and nitrogen in mountain lakes and the role of human activity in their modification determined by tracking stable isotopes composition. *Water Air Soil Pollution*, 224, 1498 – 1506. Doi:10.1007/s11270-013-1498-0.

- Gregory, M. (2009). Review: environmental implication of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364: 2013–2025. Doi: 10.1098/rstb.2008.0265.
- Hasler, A. (1947). Eutrophication of lakes by domestic drainage. *Ecological Society of America*, 28(4), 383–395. Doi: 10.2307/1931228.
- Heiri, O., & Lotter, A. F. (2001). Effect of low count sums on quantitative environmental reconstructions: An example using subfossil chironomids. *Journal of Paleolimnology*, 26(3), 343–350. Doi: 10.1023/A:101756891.
- Herkovits, J. (2001). Paleoecotoxicology: extending environmental toxicology and chemistry to interpretation of the fossil record. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20 (8), 1623–1624. Doi: 10.1002/etc.5620200801.
- Hollert, H. S., Crawford, W., Brack, M., Brinkmann, E., & Schwalb, A. (2018). Looking back – looking forward: a novel multi-time slice weight-of-evidence approach for defining reference conditions to assess the impact of human activities on lake systems. *Science for the Total Environment*, 626, 1036–1046. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.113
- Howell, J. (2010). The distribution of phosphorus in sediment and water downstream from a sewage treatment works. *Bioscience Horizons*, 3 (2), 113 – 123. Doi: doi.org/10.1093/biohorizons/hzq015.
- Imhof, H.; N. Ivleva, J. Schmid, R. Niessner y C. Laforsch. (2013). Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. *Current Biology*, 23 (19): R867–R868. Doi: 10.1016/j.cub.2013.09.001.
- Korosi, J. B., Thienpont, J. R., Smol, J. P., & Blais, J. M. (2017). Paleo-ecotoxicology: What Can Lake Sediments Tell Us about Ecosystem Responses to Environmental Pollutants? *Environmental Science & Technology*, 51 (17), 9446–9457. Doi: 10.1021/acs.est.7b02375.
- Kopáček, J., Hejzlar, J., Kana, J., Norton, S., & Stuchlík, E. (2015). Effects of acidic deposition on in-lake phosphorus availability: a lesson from lakes recovering from acidification. *Environmental Science & Technology*, 49 (5), 2895–2903. Doi: 10.1021/es5058743
- Langdon, P., Ruiz Z., Brodersen, P., & Foster, I. (2006). Assessing lake eutrophication using chironomids: understanding the nature of community response in different lake types. *Freshwater Biology*, 51, 562–577. Doi: 10.1111/j.1365-2427.2005.01500.
- Laprida, C., Massaferró, J., Mercáu, M. J., & Cusminsky, G. (2014). Paleobioindicadores del fin del mundo: Ostrácodos y quironómidos del extremo sur de sudamérica en ambientes lacustres cuaternarios. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), 97–117. ISSN 1851-4979.
- Legendre, P., & Legendre, L. (1998) Numeral ecology. 2° ed. Canadá: Edit. Elsevier.
- Lepori, F., & Keck, F. (2012). Effects of atmospheric nitrogen deposition on remote freshwater ecosystems. *AMBIO*, 41, 235–246. Doi: 10.1007/s13280-012-0250-0.

- Liu, W., Zhang, Q., & Liu, G. (2010) Lake eutrophication associated with geographic location, lake morphology and climate in China. *Hydrobiologia*, 644, 289-299. Doi: 10.1007/s10750-010-0151-9.
- Loizeau, J., Span, D., Coppee, V., & Dominik, J. (2001). Evolution of the trophic state of Lake Annency (eastern France) since the last glaciation as indicated by iron, manganese and phosphorus speciation. *Journal of Paleolimnology*, 25, 205–214. Doi: 10.1023/A:1008100432461.
- López-Xalín, N. (2018). Contaminación por microplásticos en la superficie del Lago Atitlán, Sololá.. Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.
- Mason, S., Kammin, L., Eriksen, M., Aleid, G., Wilson, S., Box, C., Williamson, N. & Riley, A. (2016). Pelagic plastic pollution within the surface waters of Lake Michigan, USA. *Journal of Great Lakes Research*, 30: 1–7. Doi: 10.1016/j.jglr.2016.05.009.
- Massaferró, J., & Brooks, S. (2002). Response of chironomids to Late Quaternary environmental change in the Taitao Peninsula, southern Chile. *Journal of Quaternary Science*, 17 (2), 101–111. Doi: 10.1002/jqs.671.
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., & Herring, C. (2015). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendation of quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA, Estados Unidos.
- Matarraña. (2009). Carbono, fósiles y logaritmos. Boletín de matemáticas del L.E.S. Matarraña: no. 11. España. Matarraña.
- Mejía, A. (2019). Contaminación por microplástico en un lago endorreico de tierras bajas: el caso de Petén Itzá. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (2009). Manual de Educación Ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala. Agencia de Cooperación Internacional del Japón. Guatemala. Guatemala, 80pp.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2017). Informe Ambiental del Estado 2016-Guatemala. Guatemala. Guatemala. 247pp.
- Mintening, S., Int-Veen, I., Loder, M., Primpke, S. & Gerdts, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108: 365 – 372. Doi: 10.1016/j.watres.2016.11.015.
- Meyers, P. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27 (5/6): 213–250. Doi: 10.1016/S0146-6380(97)00049-1.
- Meyers, P. (2003). Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 34, 261–289.

- Montalvo, C., Aguilar, C., Amador, L., Cerón, J., Anguebes, F., Córdova, V., 2014. Metal content in sediments (Cd, Cu, Mg, Fe, Mn) as indicators of pollution of Palizada River, Vexico. *Environment and Pollution*. Vol 3. No. 2014. Doi: 10.5539/ep.v3n4p89
- Morin, S., Dugong, T., Dabrin, A., Coynel, A..., & Coste, M. (2008). Long-term survey of heavy-metal pollution, biofilm contamination and diatom community structure in the Riou Mort watershed, South-West France. *Environmental Pollution*, 151, 532–542. Doi: 10.1016/j.envpol.2007.04.023.
- Norton, S., Perry, R.; Saros, J., Jacobson, G..., & SanClements, M. (2011). The controls on phorsphorus availability in a Boreal lake ecosystem since deglaciation. *Journal of Paleolimnology*, 46: 107–122. Doi: 10.1007/s10933-011-9526-9.
- O’Connor, D. Pan, S., Shen, Z., Song, Y., Jin, Y., Wu, W.-M., Hou, D. (2019). Microplastics underfo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*. Doi: 10.1016/j.envpol2019.03.092
- Pérez, L., Lorenschat, J, Bugja, R., Brenner, M., Scharf, B., & Schwalb, A. (2010). Distribution, diversity and ecology of modern freshwater ostracodes (Crustacea), and hydrochemical characteristics of Lago Petén Itzá, Guatemala. *Journal of Limnology*, 69: 146–159. Doi: 10.4081/jlimnol.2010.146.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Massafarro, J., Pailles, C..., & Schwalb, A. (2013). Bioindicators of climate and trophic state in lowland and highland aquatic ecosystems of the Northern Neotropics. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 603–644.
- Pérez, L., Massafarro, J., & Correa-Metrio, A., (2017). Paleobioindicadores lacustres neotropicales. México: UNAM.
- Peters, R. (1986). The role of prediction in limnology. *Limnology and Oceanography*, 31 (5): 1143–1159. Doi: 10.4319/lo.1986.31.5.1143.
- Reavie, E. D., Neill, K. E., Little, J. L., & Smol, J. P. (2009). Lake and Reservoir Management Cultural Eutrophication Trends in Three Southeastern Ontario Lakes: A Paleolimnological Perspective. *Lake and Reservoir Management*, 22, 44–58. Doi: 10.1080/07438140609353883.
- Romero-Oliva, C. S. (2018) Metabolism and phytoremediation potential of macrophytes exposed to microcystins: Study Case: Lake Amatitlán, Guatemala. Tesis Doctoral. Technische Universität, Berlin.
- Romero-Oliva, C.S., Contardo-Jara, V., Block, T., & Pflugmacher, S. (2014). Accumulation of microcystin congeners in different aquatic plants and crops—a case study from lake Amatitlán, Guatemala. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 102 (2014): 121–128. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.01.031
- Rose, N., Turner, S., Yang, H., Yang, C., Hall, C., & Harrad, S. (2018). Palaeotoxicity: reconstructing the risk of multiple sedimentary pollutants to freshwater organisms. *Environmental Geochemical Health*. 40(4): 1667–1682. Doi: 10.1007/s10653-018-0080-5.

- Rosenberg, D. M. (1992). Freshwater biomonitoring and Chironomidae. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 26(2–4): 101–122. Doi: 10.1007/BF02255231.
- Rosenmeier, M., Brenner, M., Kenney, W., Whitmore, T., & Taylor, C. (2004). Recent eutrophication in the Souther Basin of Lake Petén Itzá, Guatemala: human impact on a large tropical lake. *Hydrobiologia*, 511, 161–172. Doi: 10.1023/B:HYDR.0000014038.64403.4d.
- Saulnier-Talbot, É. (2016). Paleolimnology as a Tool to Achieve Environmental Sustainability in the Anthropocene: An Overview. *Geosciences*, 6(2), 26. Doi: 10.3390/geosciences6020026.
- Schwarzenbach, R., Gschwend, P., & Imboden, D. (2005). *Environmental Organic Chemistry*. 2a. ed. U.S.A.: John Wiley & Sons.
- Skolowa, N. (1968). Über die Ökologie der Chironomiden im Utscha-Stausee. *Annales Zoologici Fennici*, Vol 5. No. 1: 139-143.
- Smol, J. P. (1992). Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1(1), 49–58. Doi: 10.1007/BF00044408.
- Solorzano, L., & Sharp, J. (1980a). Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 24 (4),754-758. Doi: 10.4319/lo.1980.25.4.0754.
- Solorzano, L., & Sharp, J. (1980b). Determination of total dissolved nitrogen in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 24 (4),751-754. Doi:10.4319/lo.1980.25.4.0754.
- Stoermer, E. F., & Smol, J. P. (2001). *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*. U.S.A.: John Wiley & Sons.
- Spaulding, S., Otu, M., Wolfe, A., & Baron, J. (2015). Paleolimnological records of nitrogen deposition in shallow, high-elevation lakes of Grand Teton National Park, Wyoming, U.S.A. *Artic, Antartic and Alpine Research*, 47 (4), 703–717. Doi: 10.1657/AAAR0015-008.
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., & Sutton, D. (2014). Heavy Metals Toxicity and Environment. *EXS*, 101:133-164. Doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Teuten, E., Saquing, J., Knappe, D., Barlaz, M..., & Takada, H. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364: 2027–2045. Doi: 10.1098/rstb.2008.0284.
- Thienpont, J., Korosi, J., Hargan, K., Williams, T..., & Blais, J. (2016). Muti-trophic level response to extrem metal contamination from gold mining in a subartic lake. *Proceedings Royal Society*, 283 (1836). Doi: 10.1098/rspb.2016.1125.
- Turner, S., Horton, A., Rose, N., & Hall, C. (2019). A temporal sediment record of microplastics in an urban lake, London, UK. *Springer*. Doi: 10. 1007/s10933-019-00071-7.

- Vélez, M. I., Curtis, J. H., Brenner, M., Escobar, J., Leyden, B. W., & Popenoe de Hatch, M. (2011). Environmental and cultural changes in highland Guatemala inferred from Lake Amatitlán sediments. *Geoarchaeology*, 26(3), 346–364. Doi: 10.1002/geo.20352.
- Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., & Smol, J. P. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2273–2282. Doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- World Health Organization WHO. (2003). Algae and cyanobacteria in fresh water. En: Guidelines for safe recreational water environments: Coastal and Fresh Waters, col. I. Geneva, pp. 136-158.
- Waters, M. Kenney, W., Brenner, M., Webster, B. (2019). Organic Carbon sequestration in sediments of subtropical Florida lakes. *PLoS ONE* 14 (12): e0226273. Doi:10.1371/journal.pone.0226273.
- Wei, J. Duan, M. Li, Y. Nwanjwegu, A., Ji, V., & Zhang, J. (2019). Concentration and pollution assessment of heavy metals within surface sediments of the Raohe Basin, China. *Scientific Reports* 9:13100 Doi: 10.1038/541598-019-49724-7.
- Wu, J., Zeng, H., Yu, H., Ma, L., Xu, L., & Qin, B. (2012). Water and sediment quality in lakes along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China. *Water Source Management*, 26, 3601 – 3618. Doi: 10.1007/s11269-012-0093-2.
- Zahra, A., Hashmi, M., Malik, R., & Ahmed, Z. (2014). Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the KurangNallah—Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Science of the total environment*, 470-471, 925–933, Doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.017.
- Zeng, D. M. (2014). Using Paleolimnology to Assess the Impacts of Historical Insecticide Use on Chironomid Assemblages in the St. Lawrence River, Montreal, Quebec, Canada. Undergraduate Thesis of Queen’s University, Kingston, Ontario.
- Zhang, Y. Zhang, H. Zhang, Z. Liu, C. Sun, C. Zhang, W. Marhaba, T. (2018). pH effect on Heavy Metal Release from polluted sediment. *Journal of Chemistry*. Article ID 7597640. Doi: 10.1155/2018/7597640.

20 Apéndices

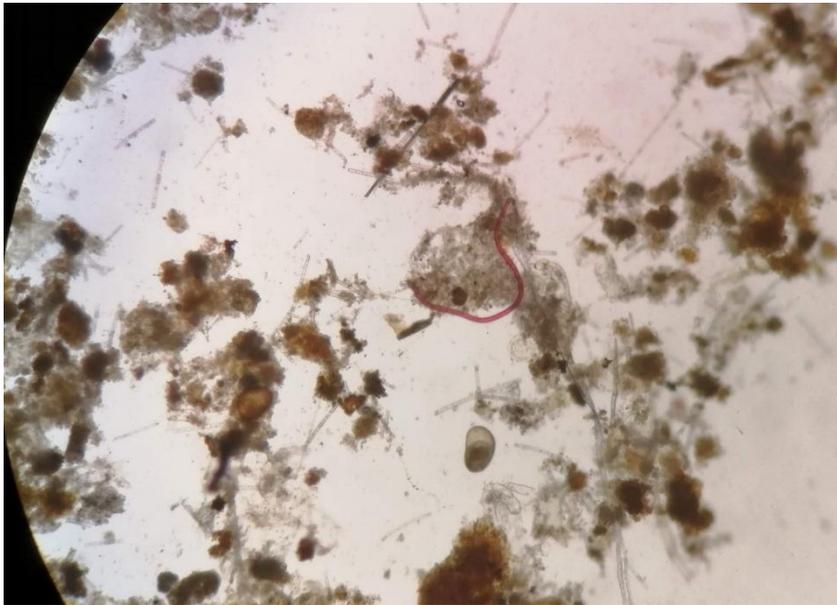
Apéndice 1. Extracción de núcleos de sedimento en el Lago de Amatitlán.



Apéndice 2 No. Filtrado de muestras para conteo de microplásticos



Apéndice 3 Muestra de sedimento con microplásticos tipo línea roja.



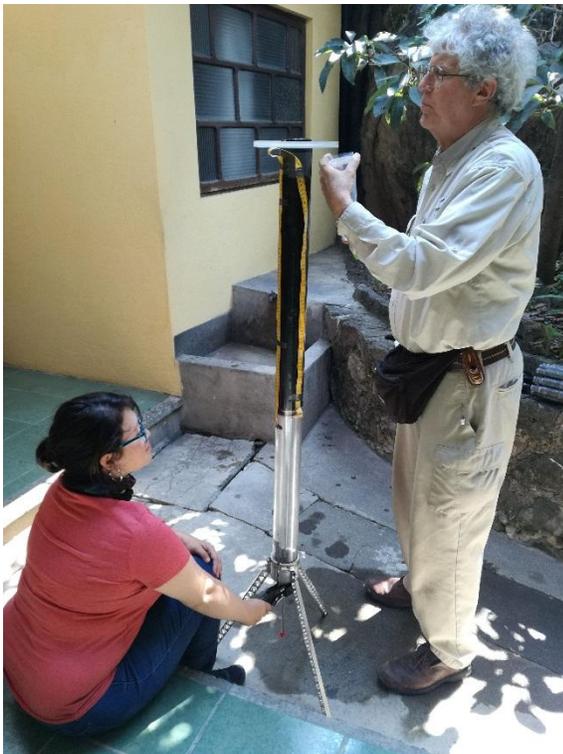
Apéndice 4 Secado y pesaje de muestras para cálculo de porcentaje de humedad.



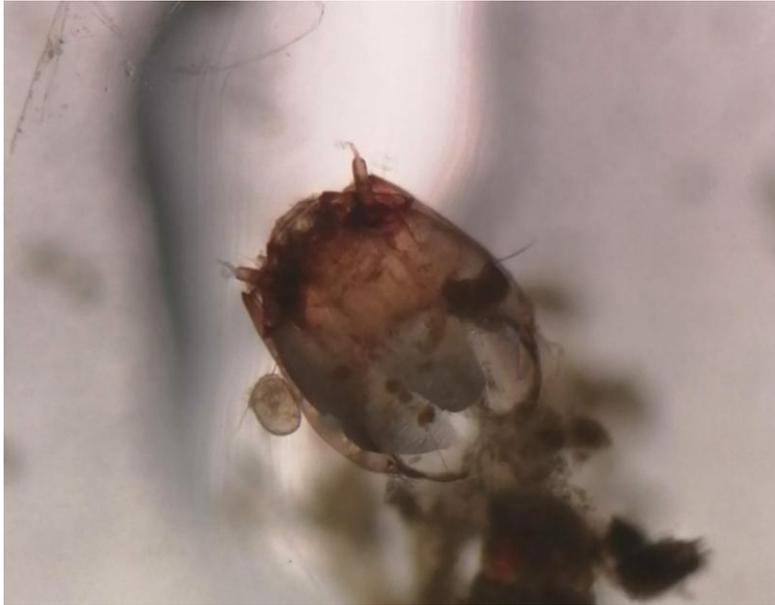
Apéndice 5 Núcleos extraído en el Lago de Amatitlán.



Apéndice 6 División de los núcleos en “secciones de sedimento”.



Apéndice 7 Cápsula cefálicas de quironómido flotando en el sedimento .



Apéndice 8 Pesaje y separación de muestras para múltiples análisis.



Guatemala, 28 de noviembre, 2019

Señor Director
Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Adjunto a la presente el informe final **“Paleoecotoxicología, una herramienta para la reconstrucción del pasado reciente en el Lago de Amatitlán, Guatemala”**. con partida presupuestal 4.8.63.9.40, coordinado por el PhD Claudia Suseth Romero Oliva y avalado por el Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (IIQB) de la Facultad de Ciencias Químicas y Biológicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este informe final fue elaborado con base en la guía de presentación de la Dirección General de Investigación, el cual fue revisado su contenido en función del protocolo aprobado, por lo que esta unidad de investigación da la aprobación y aval correspondiente.

Así mismo, el coordinador(a) del proyecto, se compromete a dar seguimiento y cumplir con el proceso de revisión y edición establecido por Digi del **informe final y del manuscrito científico**. El manuscrito científico debe enviarse, por el coordinador(a) del proyecto, para publicación al menos en una revista de acceso abierto (*Open Access*) indexada y arbitrada por expertos en el tema investigado.

Sin otro particular, suscribo atentamente.

“Id y enseñad a todos”



Firma

Claudia Suseth Romero Oliva
Coordinadora del proyecto de investigación

Firma y sello

Dra. Eunice Enriquez
Directora del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (IIQB)
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

