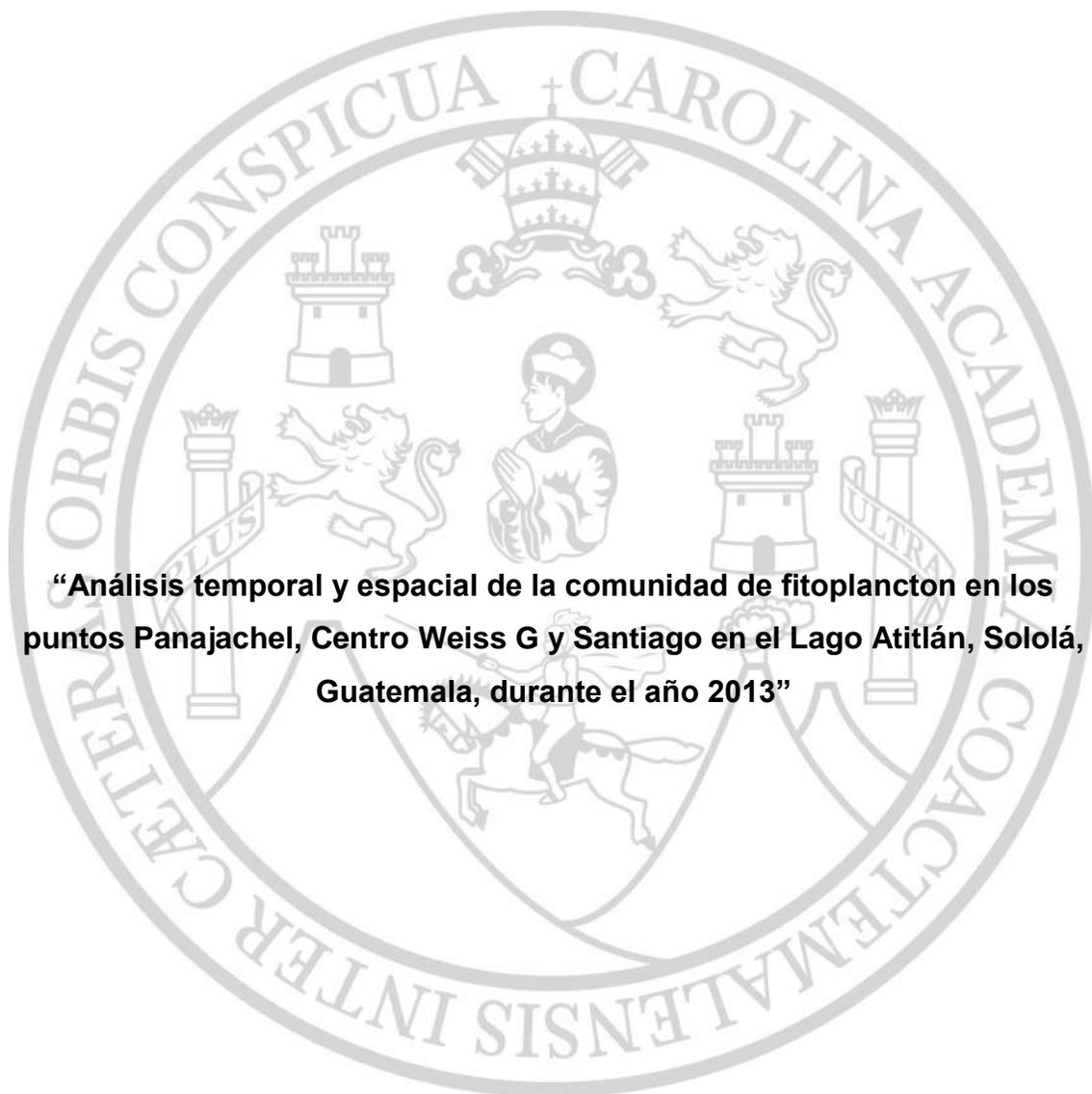

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



“Análisis temporal y espacial de la comunidad de fitoplancton en los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán, Sololá, Guatemala, durante el año 2013”

Gerson Renato Gabriel Ochaeta Constanza

Biólogo

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



“Análisis temporal y espacial de la comunidad de fitoplancton en los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán, Sololá, Guatemala, durante el año 2013”

INFORME DE TESIS

Presentado por

Gerson Renato Gabriel Ochaeta Constanza

Para optar al título de

Biólogo

Guatemala, noviembre de 2014

JUNTA DIRECTIVA

Oscar Manuel Cóbar Pinto, Ph.D.

Decano

Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto, M.A.

Secretario

Licda. Liliana Vides de Urizar

Vocal I

Dr. Sergio Alejandro Melgar Valladares

Vocal II

Lic. Rodrigo José Vargas Rosales

Vocal III

Br. Lourdes Virginia Nuñez Portales

Vocal IV

Br. Julio Alberto Ramos Paz

Vocal V

DEDICATORIA

A DIOS, A MARIA AUXILIADORA Y SAN JUAN BOSCO

Por mostrarme el camino, llenarme de sabiduría y guiarme a través de la vida.

A MIS PADRES

Por sus consejos, valores, amor, comprensión y sobre todo el ejemplo que me han dado, los amo con todo mi corazón.

A MIS HERMANOS

Por las risas, las peleas y por los juegos que hemos compartido a lo largo de esta vida.

A MI ESPOSA, ANDREA

Por ser esa amiga incondicional, por todo el apoyo y por el amor que compartimos.

A CHELSEA ANNELISSE

Por ser la personificación del amor más puro, por enseñarme a ser padre y por toda la alegría que le aportas a mi corazón.

A MIS SOBRINOS, TIOS, PRIMOS, ABUELITOS Y DEMÁS FAMILIA

Gracias por estar ahí siempre para compartir una sonrisa conmigo y enseñarme que la vida es más fácil vivirla estando juntos.

A LOS HERMANOS QUE LA VIDA ME BRINDO, AXEL, VALLE, MIGUEL, CAMPO, HELBER, PEREZ, J.R.

Por estar siempre ahí para levantar la mano.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser la casa de estudios que me abrió las puertas del conocimiento.

Al pueblo de Guatemala, al cual como egresado de esta casa de estudio debo de retribuir con mis servicios como profesional.

A la Escuela de Biología, por enseñarme que la investigación es la clave para la solución de los problemas ambientales en el país.

A la Dra. Margaret Dix, por toda la paciencia y el conocimiento que me compartió a lo largo de este proceso.

Al Centro de Estudios Atitlán, especialmente a Heidy Ajcalón, David Coroxón, Estuardo Bocel y el Dr. Michael Dix, por todo el apoyo que me brindaron en este proceso.

A la Licenciada Rosalito Barrios, por los consejos y aportes a este trabajo.

A Samanta y Yorik, por toda la ayuda que me brindaron en este proceso.

A Yovany Chumil, por el apoyo en la traducción del resumen al Kaqchikel.

Índice

1. RESUMEN.....	1
Ri ch'utirisanem (Resumen)	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. ANTECEDENTES	5
3.1 Fitoplancton	5
3.2 Comunidades fitoplanctónicas	5
3.3 Sucesión estacional del fitoplancton	6
3.4 Importancia del fitoplancton como bioindicador	7
3.5 Producción primaria	8
3.6 Estratificación térmica	8
3.7 Eutrofización	10
3.8 Cambio climático	11
3.9 Lago Atitlán	12
3.10 Trabajos Previos en el Lago Atitlán	13
4. JUSTIFICACION	17
5. OBJETIVOS	19
5.2 General	19
5.3 Específicos	19
6. HIPOTESIS	20
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
7.1 Universo	21
7.1.1 Población	21
7.1.2 Muestra	21
7.2 Materiales	21
7.2.1 Equipo	21
7.2.2 Reactivos	22
7.2.3 Instrumentos	22
7.2.4 Cristalería	22
7.3 Métodos	23

7.3.1 Ejecución del experimento y/o fase de Campo	23
7.4 Análisis de las muestras.....	26
7.4.1 Clorofila a	26
7.4.2 Fitoplancton	26
7.4.3 Análisis físicos del agua	27
7.4.4 Análisis químico en el laboratorio	27
7.5 Análisis estadístico	28
8. RESULTADOS	30
8.1 Especies del Lago Atitlán para el año 2013.....	30
8.2 Biovolumen de Fitoplancton para el Lago Atitlán, 2013.	32
8.3 Biovolumen relativo de taxones de Fitoplancton	35
8.4 Biovolumen de organismos de fitoplancton más abundantes.....	37
8.5 Diversidad, Riqueza y Similitud de Fitoplancton	40
8.6 Parámetros Físicos y Químicos.....	42
8.7 Análisis de Correspondencia Canónica	50
8.8 Correlación de Pearson	53
9. DISCUSIÓN.....	55
9.1 Distribución espacial del Fitoplancton	55
9.2 Variación espacial vertical	55
9.3 Variación espacial horizontal	56
9.4 Variación temporal	56
9.5 Análisis de Correspondencia Canónica	60
10. CONCLUSIONES.....	62
11. RECOMENDACIONES	63
12. BIBLIOGRAFÍA.....	64
10. ANEXOS	69
Anexo 1: Localización de los puntos representativos establecidos para la investigación y sitios para la toma de parámetros físico químicos y muestras de agua.....	69
Anexo 2: Dimensionales de las variables.....	70

1. RESUMEN

El lago Atitlán ha sufrido cambios en la composición y estructura de su fitoplancton en los últimos años debido a la eutrofización cultural. Para poder entender los fenómenos (físicos y/o químicos) que influyen en la dinámica del fitoplancton en el lago, en el presente trabajo se estudiaron las variaciones espaciales y temporales de la comunidad de fitoplancton en función de los factores abióticos en el Lago Atitlán durante el año 2013.

Se colectaron muestras de enero a diciembre del 2013 en los sitios Panajachel, Santiago y Centro, en 4 profundidades diferentes (0, 5, 10 y 20m) y se realizaron análisis químicos, biológicos y físicos. Para los 3 sitios se reportan en total 19 especies pertenecientes a cuatro taxones principalmente, Dinophyta, Bacillariophyta, Chlorophyta y Cyanophyta. Se observó una dominancia de las Bacillariophytas (diatomeas) de enero a marzo; en abril y mayo las Chlorophytas (algas verdes) fueron dominantes y de junio a diciembre las Cyanophytas (cianobacterias).

El análisis de correspondencia canónica que se realizó explica en un 56% la variación de la distribución del fitoplancton de acuerdo a las variables abióticas que se utilizaron. La lluvia es la variable abiótica que se correlacionó significativamente con la biomasa total de fitoplancton, con un coeficiente de correlación de 0.329, lo que significa que la distribución de fitoplancton para el lago Atitlán en el año 2013 se vio fuertemente influenciada por la lluvia en la cuenca.

De acuerdo al índice de similitud de Sorensen, los sitios más similares entre si eran Panajachel y el Centro, comparados con Santiago. De igual forma no se encontró una diferencia marcada entre las cuatro profundidades analizadas en cada sitio en el presente estudio.

Las 3 especies más comunes para el presente trabajo fueron *Aulacoseira granulata* (diatomea), *Coelastrum* sp. (alga verde) y *Limnographis robusta* (cianobacteria), aunque es importante mencionar que la cianobacteria

Aphanizomenon sp. fue abundante en los meses de junio y agosto en los tres sitios.

RI CH'UTIRISANEM (RESUMEN)

Ri Choy Atitlán kan ru jalón ri' chi ri nuk'uj chuqa cholajem chera ri Fitoplancton pa ri täq k'isb'äl juna' xa ruma k'a ri eutrofización b'anob'äl. Ruma k'a chi xtz'ët ri ch'ewe' (retamab'alil chuqa'/o xanil) chi niya' ri etz'anem chi rij ri fitoplancton chupam ri choy Atitlán, chupam re jun samaj re' xetax ri nimakajül chuqa ri q'ijul chi ri motzaj ri fitoplancton chi rij ri jalajoj k'aslemal k'o chupam ri qachoy Atitlán pa ri juna 2013.

Xesax pa ri tz'eteb'äl pa nab'ey ik' chaqa' rukab'laj ik' chupam ri juna' 2013 pa kojlib'äl Panajachel, Santiago chuqa' pa ruk'ajal, pa kaji rupam (0,5,10, chuqa' 20 m) chuqa' kan xub'an ch'ob'onik' chij ri xanil, k'aslemalil chuqa' retamab'alil (química, biológica y físicos). Chupam ri oxí' kojlib'äl xi'ox k'a pa b'elejlajuj ruwach ichinal chuqa' pa kaji' Taxones la'il, Dinophyta, Bacillariophytas, Chlorophyta chuqa' cyanophyta. Kan xtz'et k'a jun tz'etenik' chi rij ri Bacillariophytas (diatomeas) pa nab'ey ik' chuqa' pa rox ik'; chupam rukaj ik' chuqa' pa ro' ik' ri Chlorophytas (rax q'ayis) kan xb'an che ra ruwaq ik' chuqa' rukab'laj ik' chi ri Cyanophytas (cianobacterias).

Ri ch'ob'onik' xub'an chij kan üt'z k'a xub'an che re' kan xi'ox k'a jun 56% ri jalajoj jachoj xub'an k'a ri fitoplancton chij ri cholb'äl k'aslemal chi xkisax. Ri jab' ya ri k'a ri jalajoj k'aslemal chi xinük rik'in ri jaru'il ri ulewal chi ri fitoplancton, rik'in jun ajilab'äl che ra' 0.329, ri jachoj fitoplancton pa Choy Atitlán chupan ri juna' 2013 xtz'et k'a kan ním ruchuq'a ri jäb' k'o chupam ri Choy

Ruma k'a xkitun qi chi kan junan k'a ri Sorensen, ri jalajoj k'ojlib'äl kan junan jub'a pa Panajachel chuqa' pa ruk'ajal, kan junan b'a rik'in ri Santiago. Kan majun ta' xkil ta' ru kojol ri kaji' rupam xupaj pa' chuqa' pa jalajoj k'ojlib'äl xub'an pa chi rij ri tijonik'.

Ri oxí' ruwach ri ichinal kan ye k'o chupam re jun samaj re' ya ri k'a ri Aulacoseira, granulata (diatomeas), coelastrum sp. (rax q'ayis) chuqa' ri Limnoraphis robusta (cianobacteria) kan ruma k'a rujawaxik nqanataj chi ri cianobacteria Aphanizomenon sp. Kan k'iy xkil pa ruwaq ik' chuqa' ruwaqxaq ik' pa oxí' k'ojlib'äl chupam ri Choy Atitlán.

2. INTRODUCCIÓN

Los lagos representan importantes reservorios de agua para los humanos, además de ser sistemas especializados y muy complejos en cuanto a diversidad y funcionamiento. En los lagos, como en los océanos, la mayor parte de la producción primaria la realizan los microorganismos foto sintetizadores que forman parte del fitoplancton; ellos son los responsables de sostener las cadenas alimenticias acuáticas. Por su parte el lago Atitlán es uno de los ecosistemas acuáticos que mayor atención tiene en Guatemala por su relación estrecha con las actividades humanas de la región y por su belleza escénica.

Se tiene buena evidencia de los impactos ecológicos en los ecosistemas alrededor del mundo debido a los recientes efectos del calentamiento global y del cambio climático en el planeta (Lewandowska, 2011, pág. 3). De la misma forma se tienen registros de las consecuencias ecológicas en los ecosistemas por las cargas de nutrientes derivadas de actividades del ser humano, ya sea por descargas de aguas residuales, como de los abonos utilizados en la agricultura y detergentes fosfatados dentro de las cuencas hidrográficas (Michalak, y otros, 2013). Un mayor reto en las investigaciones sobre cambio climático es el impacto de estas alteraciones sobre las comunidades de fitoplancton, debido a que estos efectos dependen de una gran cantidad de variables bióticas y abióticas (Lewandowska, 2011, pág. 12).

Algunos efectos del cambio climático se manifiestan o evidencian en la fenología del plancton. En lagos templados, dicha fenología ha sido alterada por variaciones en las condiciones meteorológicas debido a algunos efectos del cambio climático, conllevando estas alteraciones a la modificación de ciclos biológicos en algunos organismos (Adrian, Wilhelm, & Gerten, 2006, pág. 652). En 2011 se registró un *bloom* (afloramiento) de algas en el lago Erie entre Estados Unidos y Canadá con una magnitud 3 veces mayor que la más grande registrada hasta esa fecha, debido a la acumulación y sobrecarga de nutrientes al sistema por décadas, producto del mal uso de agroquímicos en el suelo, mediante la adición de fósforo principalmente, así como la manifestación de condiciones meteorológicas extremas como poco viento y temperatura alta provocadas por el cambio climático (Michalak, y otros,

2013, págs. 2-3). En el Lago Atitlán desde el año 2008 se han presentado afloramientos de cianobacterias, atribuidos en gran medida a las cargas de nutrientes por la descarga de aguas residuales sin tratamiento, a la erosión de suelos y a la agricultura (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011, pág. 300).

Existen tres factores principales que influyen en la dinámica de las comunidades de fitoplancton: la disponibilidad de alimento (nutrientes), la cantidad de luz o radiación que reciben y la temperatura del medio en el que se encuentran (Lewandowska, 2011, pág. 12), aunque la dinámica puede responder además a otras variables como, la turbidez en el agua y aspectos meteorológicos tales como viento y lluvia. La alta contaminación por nutrientes en los lagos sumado a altas temperaturas e intensidades de luz pueden provocar desequilibrios en los ecosistemas acuáticos, produciendo afloramientos de algunas especies de fitoplancton, reduciendo el valor ecológico de los sistemas naturales (Cai, Zhu, Zhu, Xu, & Qin, 2012, pág. 361).

El estudio del fitoplancton en Guatemala ha venido incrementando en los últimos años, especialmente en los lagos Amatitlán y Atitlán, aunque por el momento se tiene poca información de la dinámica ecológica de los organismos fitoplanctónicos (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011) (Dix, y otros, 2012).

El objetivo principal de este trabajo es determinar las variaciones espaciales y temporales de la comunidad de fitoplancton en función de las variables de temperatura del agua y disponibilidad de nutrientes en los sitios Panajachel, Centro Weiss G y Santiago, del Lago Atitlán, Sololá Guatemala durante el año 2013. El propósito de esto es obtener información que ayude a entender la dinámica del fitoplancton del Lago Atitlán, proporcionando una fuente de información científica que ayude a tomar medidas de mitigación en relación a la conservación del lago.

3. ANTECEDENTES

3.1 FITOPLANCTON

Los productores primarios que conforman el plancton reciben el nombre de fitoplancton. La mayoría son organismos microscópicos que flotan en el agua a merced de su movimiento; de ahí el significado de la palabra plancton “errante”. El fitoplancton es quizá el grupo de organismos acuáticos mejor conocidos y estudiados. Roldán Pérez (2008) resume varios conceptos, y define el fitoplancton como un ensamble de organismos planctónicos en su mayoría fotoautotróficos, adaptados a la suspensión en las aguas abiertas (zona limnética) de los sistemas lenticos, en la zona pelágica del mar, o en los ríos, sometidos a movimientos pasivos por el viento y las corrientes, que comúnmente se presentan en la superficie del agua (en la zona fótica), o completan una porción significativa de sus ciclos vitales en dicha zona (Roldán, 2008, págs. 257-258); (Wetzel, 2001, págs. 331-332).

Las algas no representan un grupo taxonómico formal de organismos, pero a menudo constituyen una colección de divisiones y filos con representantes que comparten muchas de las características que mencionamos anteriormente. Las divisiones son distinguidas unas de otras basado en combinaciones de características, incluyendo pigmentos fotosintéticos, productos de reserva, cubierta celular, y otros aspectos como la organización celular (Wehr & Sheath, 2003, pág. 5).

3.2 COMUNIDADES FITOPLANCTÓNICAS

Una característica sobresaliente de las comunidades de fitoplancton en los hábitats lacustres es la coexistencia entre algas de diferentes especies. En algunos casos, una especie es encontrada en mayor abundancia que las otras, más a menudo, dos o más especies de algas son codominantes en el ensamble de fitoplancton. Un gran número de especies raras pueden en ocasiones ser encontradas como

especies dominantes o sub dominantes. Esta codominancia de las algas puede existir debido a que cada una tiene un nicho específico basado en sus necesidades fisiológicas y las limitantes del ambiente. Las variaciones en el tipo de dominancia dentro del ensamble de fitoplancton a menudo pueden explicarse por el nivel trófico en el que se encuentre el sistema; es decir en un lago muy eutrofizado (abundancia de nutrientes) puede darse una dominancia por una sola especie, mientras que en un lago híper oligotrófico (pocos nutrientes) puede darse una dominancia o codominancia entre más de una especie (Hutchinson, 1961, pág. 138); (Reynolds, 2006, pág. 152). Teóricamente, el traslape de nicho puede liderar una exclusión competitiva pudiendo resultar en una dominancia por una sola especie (Wetzel, 2001, págs. 339-340). Este problema ha sido formalmente llamado “la paradoja del plancton”: donde ocurre un aparente equilibrio multi específico, en lugar de un equilibrio uni específico en las condiciones físicas uniformes de las aguas turbulentas lacustres (Hutchinson, 1961, pág. 137).

Algunas especies de algas son exclusivamente planctónicas. Hasta donde se conoce, estas poblaciones tienen una oscilación temporal en abundancia, dominan durante un periodo y luego se tornan escasas, sin embargo, se mantienen como planctónicas. Alternamente, algunas especies entran en periodos de latencia dejando así por un período de tiempo la competencia por los recursos, algunas de estas especies se mantienen inactivas en los sedimentos de los litorales como *Limnographis robusta* en Atitlán (Komarék, y otros, 2013, pág. 40) y posteriormente se desarrollan suficientemente como para formar parte importante de la comunidad de fitoplancton (Wetzel, 2001, pág. 340).

3.3 SUCESIÓN ESTACIONAL DEL FITOPLANCTON

Distintos patrones estacionales y de periodicidad en la biomasa de fitoplancton se ha observado en aguas dulces polares y de zonas templadas. Las sucesiones de fitoplancton a menudo son

correlacionadas con cambios en los parámetros ambientales particularmente con la temperatura, la luz, disponibilidad de nutrientes, y factores de mortalidad como la depredación o el parasitismo. Debido a que la sucesión estacional está fuertemente ligada a procesos meteorológicos y procesos de estratificación y mezcla, los patrones en los ecosistemas templados difieren grandemente de los sistemas de aguas en los trópicos (Wetzel, 2001, págs. 358-359). Es difícil realizar generalizaciones debido a la gran variabilidad observada de la biomasa del fitoplancton entre un lago y otro, sin embargo podemos mencionar estas:

- La periodicidad de la biomasa del fitoplancton es razonablemente constante de un año al otro. Si el ecosistema acuático no es perturbado por influencias externas, tales como modificaciones humanas en la cuenca, carga de nutrientes, etc, los cambios estacionales deberían de ser similares de un año a otro.
- La magnitud de cambio del número y biomasa de fitoplancton entre estaciones es usualmente muy grande, en zonas templadas los cambios suelen ser muy significativos, mientras que en aguas tropicales suelen ser más bajos. Los máximos y mínimos en el número y la biomasa de fitoplancton a menudo suelen estar desfasados de las tasas de producción primaria.

3.4 IMPORTANCIA DEL FITOPLANCTON COMO BIOINDICADOR

Se sabe que los cambios en las comunidades algales delatan el inicio de contaminación que pueda existir en un sistema acuático, lo cual se refleja en las modificaciones de la estructura poblacional y en la proliferación de especies asociadas a determinados aportes. Las respuestas de estos organismos frente a los cambios de las condiciones del medio los convierten en finos sensores de la calidad

del agua en referentes del estado ecológico del ambiente (Luján de Fabricius, 2000, pág. 2)

El fitoplancton representa el primer eslabón de la cadena alimenticia; junto con las plantas superiores que habitan las aguas dulces, constituyen los organismos productores primarios. La importancia del fitoplancton para la vida es comparable (cuando menos) a la del revestimiento vegetal de la tierra; pues además del recurso alimenticio que es, elimina el anhídrido carbónico y oxigena el agua (Dobson & Frid, 2009, pág. 220), las células vegetales retiran la materia mineral disuelta en el agua, particularmente los nitratos y los fosfatos (Luján de Fabricius, 2000, pág. 2)

3.5 PRODUCCIÓN PRIMARIA

La producción primaria neta permite evaluar la capacidad de captación de energía de los organismos autótrofos. En los sistemas acuáticos es equivalente a la tasa de incorporación del carbono inorgánico durante la fotosíntesis por parte del fitoplancton. La productividad de un cuerpo de agua depende de la que se origina en él (producción primaria autóctona) más la que llega al sistema luego de ser sintetizada fuera de él (producción primaria alóctona). Por ejemplo la distribución vertical de la productividad fitoplanctónica es controlada principalmente por la intensidad de la radiación luminosa, la disponibilidad de nutrientes, la transparencia y la estratificación (Montoya & Aguirre, 2010, pág. 77).

3.6 ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA

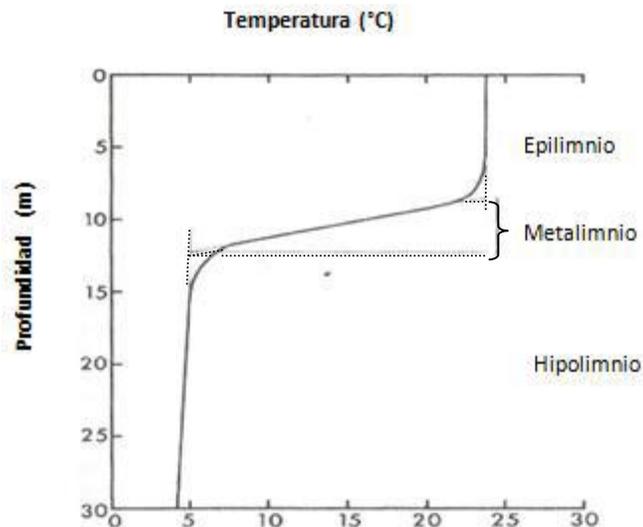
La estratificación térmica es un término que hace referencia a la estratificación o formación de estratos (capas) de las masas de agua por la acción de la temperatura sobre ellas (ver Figura No. 1). Esto debido a que la temperatura altera características físicas como la densidad del agua, por ello se generan diferentes estratos en la masa de agua, la estratificación térmica suele ser estacional obteniendo regularmente en lagos templados durante el verano una estratificación

completa del agua y durante los inviernos una mezcla completa en la columna de agua. En el trópico es común observar lagos estratificados durante todo el año debido a las altas temperaturas cálidas que existen pero, en algunos lagos, se dan mezclas durante el invierno (Lewis, 1987, pág. 168).

Generalmente se forman 3 capas; el epilimnio que es la capa más superficial, regularmente posee aguas más cálidas que los otros dos estratos. Posee una circulación de sus aguas por la acción del viento en el estrato, altas cantidades de oxígeno disuelto por la producción primaria que se lleva a cabo en él y se presentan en esta capa grandes cantidades de luz. La capa más profunda es el hipolimnio, el cual posee aguas más frías y más densas, luz reducida así como altas concentraciones de nutrientes. El estrato que se forma entre el epilimnio y el hipolimnio es conocido como metalimnio y se caracteriza por presentar una marcada discontinuidad térmica (Wetzel, 2001, págs. 74-75). Cuando el lago está estratificado se da una separación entre el epilimnio y el hipolimnio (ver figura 1) que es trascendente, ya que durante este tiempo no se da un intercambio de nutrientes y oxígeno entre ambas zonas, teniendo alta importancia entre las comunidades de plancton ya que su dinámica depende altamente de los nutrientes que se pueden ver limitados (Lewis, 1987, págs. 168, 180).

Figura No. 1

Estratificación térmica en un lago.



Fuente: Modificado de (Wetzel, 2001, pág. 75)

En la figura No. 1 Observamos la típica estratificación térmica en donde se observa la estratificación epilimnética, metalimnética e hipolimnética del agua. Las líneas punteadas determinan aproximadamente los límites de la zona del metalimnio.

3.7 EUTROFIZACIÓN

La eutrofización es un proceso que resulta del aumento de nutrientes a cuerpos de agua, principalmente nitratos y fosfatos, que proporcionan un desarrollo acelerado de fitoplancton y plantas acuáticas. La eutrofización natural ocurre normalmente en cualquier sistema acuático continental o de aguas costeras. Este proceso se ve acelerado por las actividades agrícolas y vertimientos industriales y domésticos en los ecosistemas acuáticos (Roldán, 2008, pág. 139).

Este proceso ocasiona:

- Aumento de la producción en términos de biomasa;
- Disminución de diversidad de especies;

- Fuertes fluctuaciones de oxígeno disuelto, dióxido de carbono y pH en el ciclo día-noche;
- Alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el fondo y;
- Aparición de densas masas de algas y vegetación acuática (afloramientos o *blooms*) que impiden el paso de la luz, aumenta la materia orgánica en descomposición y llevan al lago o embalse a una “distrofia” o desaparición del mismo (Roldán, 2008, pág. 139).

3.8 CAMBIO CLIMÁTICO

Se define como la variación del valor medio del estado del clima que ha persistido durante largos períodos, generalmente decenios o más años, y que es identificable mediante pruebas estadísticas. El cambio climático en la tierra puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos constantes en la composición de la atmósfera o cambio de uso del suelo (IARNA-URL, 2011, pág. 11).

La temperatura media anual en la superficie de los océanos ha aumentado 0.6 ± 0.2 °C desde finales del siglo XIX (IPCC, 2001, pág. 22). Se prevé que la temperatura promedio anual de la superficie de la Tierra aumente de 1.4 a 5.8 °C durante el período de 1990-2100 (IPCC, 2001, pág. 10)

Existe evidencia que demuestra que tanto las aguas continentales como las aguas del mar se han venido calentando en las últimas décadas, sumado a cambios en los patrones de lluvias haciendo más corta y más intensa la época de lluvia, así como más larga la época de sequía (Paul, 2008, pág. 240). Todas estas alteraciones climatológicas sumadas a las cargas de nutrientes por actividades antropogénicas, presentan escenarios donde las dinámicas del plancton y las dinámicas en las cadenas alimenticias en los ecosistemas acuáticos se verán afectadas (Caron & Hutchins, 2013, pág. 236).

3.9 LAGO ATITLÁN

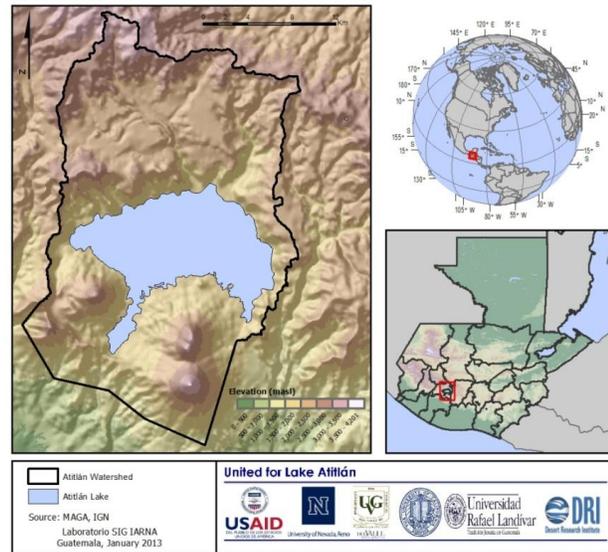
El Lago Atitlán, está situado en el departamento de Sololá a 1,565 metros sobre el nivel del mar (msnm) (ver figura 2). El lago está dominado por tres volcanes, al sur oeste el volcán San Pedro, y al sur por los volcanes Tolimán y Atitlán con elevaciones de 2,995m, 3,158m y 3,587m, respectivamente. Al norte, las montañas más antiguas, como la divisora de María Tecun, tienen una edad de más de 11 millones de años y elevaciones de hasta 3,403m. Más cerca al lago, de oeste al norte, se encuentran los restos de los volcanes de Paquisís, Tecolote y San Marcos con edades cerca de un millón de años (Dix, y otros, 2012, pág. 35) (Dix, Fortin, Medinilla, & Rios, 2003, pág. 83).

La cuenca tiene una extensión de 541 Km² y forma parte del área protegida “Reserva de Usos Múltiples de la Cuenca del Lago Atitlán”. La entidad rectora es la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE). El volumen de agua es de 24 Km³, con la profundidad máxima mayor a 350 m, y la profundidad promedio de 188 m., su área superficial es de 137 Km² (Dix, y otros, 2012, pág. 35). La mayoría del agua recibida proviene de precipitación pluvial y de dos ríos principales permanentes, San Francisco y Quiscab, ambos situados en el norte del lago, respectivamente al este y oeste de Panajachel. Es un lago endorreico, sin salida obvia, aunque se supone que en la parte sur del lago, en las Bahías de San Lucas Tolimán y Santiago Atitlán, existen sitios de infiltración y flujo hacia la cuenca del río Madre Vieja (Weiss, 1971, pág. 130).

El Lago Atitlán es una caldera volcánica, formado a partir del hundimiento del techo de una cámara magmática parcialmente vaciada (Wetzel, 2001, pág. 25), actualmente ocupa la caldera Atitlán III (Newhall, y otros, 1987, pág. 81) que se formó hace 84 000 años (Hodell, y otros, 2008, pág. 1155). Dado que estos lagos tienden a tener áreas de drenaje limitadas, usualmente tienen una baja

concentración de nutrientes y presentan baja productividad (Wetzel, 2001, págs. 24-25).

Figura No. 2
Ubicación del Lago Atitlán



Fuente: Proyecto Unidos Por el Lago Atitlán (2013)

En la figura No. 2 se observa la ubicación del Lago Atitlán, y la delimitación de su cuenca hidrográfica.

3.10 TRABAJOS PREVIOS EN EL LAGO ATITLÁN

En 1908 Meek hizo un estudio ictiológico en el Lago Atitlán, es el primer estudio que se tiene en relación al Lago Atitlán, en el cual él describe aguas muy cristalinas con cantidades de plancton escaso (Meek, 1908, pág. 173). Las mediciones para el disco Secchi que obtuvo fueron de 13.7 metros (45 pies) (Meek, 1908, pág. 180). En este trabajo se presentaron una serie de recomendaciones, entre ellas la introducción de especies de peces exóticas al lago para el consumo de las familias de Atitlán. Menciona 3 especies presentes en el lago: *Cichlasoma nigrofasciantum*, *Poecilia sphenops* y *Fundulus guatemalensis*, las cuales eran utilizadas mayormente para alimento de las comunidades (Meek, 1908, págs. 180-183). En 1908, Tilden analizó muestras de agua de Amatitlán y Atitlán reportando 16

especies de algas, la mayoría de ellas presentes en Amatitlán (Tilden, 1908, págs. 153-156). No fue sino hasta 1915 que Juday, realizó el primer estudio limnológico como tal en el Lago de Atitlán y es el que permitió establecer los primeros puntos para poder ser comparados más adelante, para medir los cambios en el ecosistema del lago (Weiss, 1971, pág. 1).

En 1950 Holloway recomendó la introducción de dos especies; la lobina negra y la perca de boca grande al lago para tratar de abastecer con alimento a las comunidades (Holloway, Saunders, & Handley, 1950, pág. 100).

Deevey (1957) describió algunas características hidrográficas y químicas del Lago Atitlán y los comparó con otros lagos de Centro América. Para el año de 1967 Powers y Bowes citado por (Weiss, 1971), revelan el gran peligro que corría el Pato Poc (*Podilymbus gygas*) ya que la lobina negra se convirtió en un serio depredador de sus polluelos y se recomendaba la acción inmediata para detener el deterioro de esta especie (Weiss, 1971, pág. 2). La especie fue declarada extinta en años posteriores.

El estudio más completo realizado en el siglo pasado fue Weiss (1971) entre los años de 1968 y 1970; el enfoque principal de este estudio era medir la viabilidad del Lago Atitlán para la producción de energía (Weiss, 1971, págs. 2-3). El estudio describe la estratificación temporal y mezcla del agua en el Lago Atitlán, asocia las temperaturas superficiales máximas con el final de la época seca, indicando que el lago alcanza su máxima temperatura en el agua en el mes de mayo. Para el mes de junio, describe el inicio de la época lluviosa, en donde las lluvias han enfriado la superficie del lago para el mes de agosto. La estratificación máxima del lago se logró en marzo, manteniéndose así hasta inicios del mes de diciembre, en diciembre reportó una mezcla

completa de la columna de agua en el lago que se iniciaba a estratificar de nuevo hacia finales de febrero (Weiss, 1971, págs. 14-18).

Durante la época lluviosa Weiss reportó que existían leves cambios en la claridad medida con el disco Secchi, en transparencias entre los 8m y 20m. Demostró que mientras menos transparencia, la luz verde penetraba más profundamente, mientras que una mayor transparencia mejoraba la penetración de menores longitudes de onda, la luz azul penetraba más profundamente que la luz verde dándole ese color azul característico del lago (Weiss, 1971, págs. 41-57).

Las mayores densidades de plancton ocurrían a final de la época lluviosa y por debajo de la superficie, es decir, en la zona del epilimnio (Weiss, 1971, pág. 75). El zooplancton presentó mayor población en zonas más profundas que el fitoplancton, esto asociado a las migraciones verticales características de estos organismos, presentó tablas de la estructura y/o distribución vertical de algunas especies de fitoplancton como *Melosira* sp. o *Closteriopsis* sp. y como esta cambiaba durante el año (Weiss, 1971, págs. 71-73). Weiss indica que de acuerdo a los valores medidos de productividad primaria, concentraciones de nutrientes, transparencia y fitoplancton presente Atitlán debe ser considerado como un lago Oligotrófico (Weiss, 1971, págs. 110-112).

Dix reporta por primera vez la cianobacteria, del género *Microcystis* en el lago para 1976. Para el año 2001 y 2006, Preston y Romero observaron el mismo género de cianobacteria, en San Lucas Tóliman (Castellanos & Dix, 2009, págs. 5-8).

Dentro de los años 2007 a 2009 empezaron a aparecer señales de alarma relacionadas al deterioro ambiental y la pérdida de la salud del ecosistema en el lago, debido a la identificación con mayor frecuencia y abundancia de cianobacterias (Dix, y otros, 2012, pág. 37).

Limnographis robusta (cianobacteria filamentosa) es la especie que empezó a tener abundancias cada vez mayores, entre octubre y diciembre del 2009 presento el mayor afloramiento en el lago que llego a cubrir hasta el 40% de la superficie del lago para el mes de noviembre (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011, pág. 299). Recientemente la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), con el apoyo de muchas instituciones nacionales e internacionales ha implementado un programa de monitoreo y se ha dado seguimiento a las dinámicas del lago, midiendo cuál es su estado físico, químico y biológico desde el año 2009.

Toledo (2013), para el Lago Atitlán con datos entre el 2010 y 2012, encontró una correlación del 70% entre la clorofila *a* y las concentraciones de ortofosfatos (Toledo, 2013, pág. 65). Además, describe el estado trófico del lago como oligotrófico-mesotrófico de acuerdo al índice de Carlson (Toledo, 2013, pág. 67) Encontró niveles de fósforo en exceso durante el período muestreado por lo que sugiere al nitrógeno como el nutriente limitante para el lago.

4. JUSTIFICACION

El Lago Atitlán es una fuente de recursos económicos, alimenticios y de trabajo, además de ser uno de los destinos turísticos más visitados en Guatemala, así como sitio sagrado para las poblaciones locales. Muchas de las comunidades establecidas alrededor del lago lo utilizan como fuente de agua, tanto para limpieza como para su consumo. El agua del lago para algunas comunidades (San Lucas Tolimán, Santiago Atitlán, San Pedro la Laguna y Panajachel) representa hasta el 95% del agua que los pobladores consumen, muchas veces con una potabilización mínima (Dix, y otros, 2012, pág. 36).

El crecimiento poblacional en la cuenca del Lago Atitlán y las diferentes actividades humanas relacionadas con ese crecimiento, han resultado en un aumento de las concentraciones de nutrientes, específicamente de nitrógeno y fósforo (N y P) en el lago, ya sea mediante descargas de aguas residuales, por deforestación excesiva de los bosques de la cuenca, provocando que se aflojen los suelos y causando deslizamientos de tierra hacia el lago, o por el uso no racional de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura, causando un proceso de eutrofización cultural acelerado para el lago (Castellanos & Dix, 2009, pág. 5). Esta adición de nutrientes en los cuerpos de agua debe ser observada y monitoreada constantemente debido a que la productividad primaria en los lagos está influenciada y limitada a menudo por los nutrientes nitrógeno y fósforo (N y P) (Roldán, 2008, pág. 259).

Desde el año 2008 se han observado altas densidades de la cianobacteria *Limnographis robusta* (*Lyngbya robusta*) en el lago, incluyendo un afloramiento fuerte en 2009 y otros de menor tamaño en 2011 y 2012 (Dix, y otros, 2012, pág. 37). Además se han reportado otras especies potencialmente peligrosas para la salud humana como *Microcystis aeruginosa* y *Aphanizomenon* sp., que pueden producir toxinas. Otros factores que favorecen el crecimiento de las cianobacterias son los aspectos fisicoquímicos, tales como aumento de concentraciones de nutrientes, intensidades de luz y el aumento de la temperatura del agua (Roldán, 2008, pág. 258).

Al menos existen dos razones básicas e íntimamente relacionadas que justifican el estudio de la estructura y el funcionamiento de las comunidades fitoplanctónicas. La primera, netamente teórica: el fitoplancton ocupa una posición pivotante en la cadena trófica pelágica ya que allí inician las cadenas tróficas en los sistemas acuáticos. Y la segunda: la calidad del agua es el resultado de impactos externos sobre los ecosistemas y de sus transformaciones, a través de interacciones complejas, en el seno del ecosistema acuático (Fabian & Cruz-Pizarro, 1997, pág. 55).

Ante los cambios que se han venido dando en la cuenca del Lago Atitlán, los cuales han producido afloramientos de cianobacterias, y existiendo la posibilidad futura de que se produzcan toxinas, es importante realizar estudios para entender la dinámica del fitoplancton del lago y qué variables abióticas son las que influyen en estas dinámicas. Se conoce, por ejemplo, que las cianobacterias han exhibido estrategias eco fisiológicas que les permite explotar las modificaciones antropogénicas en los ecosistemas acuáticos; específicamente el enriquecimiento por nutrientes y las alteraciones hidrológicas (desvío de efluentes o extracciones de agua) (Paerl & Otten, 2013, pág. 1).

Por todo lo anteriormente citado, considero que este trabajo es necesario para entender mediante el análisis de los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago, la dinámica ecológica del Lago Atitlán, ya que proporcionará información en cuanto a los cambios temporales en las condiciones abióticas del lago y cómo estos cambios influyen en la composición y distribución espacial y temporal del fitoplancton en el Lago Atitlán.

5. OBJETIVOS

5.2 GENERAL

Determinar las variaciones espaciales y temporales de la comunidad de fitoplancton en función de las variables temperatura del agua y disponibilidad (concentración) de nutrientes en los sitios Panajachel, Centro Weiss G y Santiago, del Lago Atitlán, Sololá Guatemala durante el año 2013.

5.3 ESPECÍFICOS

- 5.3.1 Determinar y describir los patrones de variación temporal y espacial de la comunidad de fitoplancton del Lago Atitlán en los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el año 2013, y cómo estos patrones se relacionan con las variables físicas y químicas.
- 5.3.2 Determinar y describir la dinámica de las variables físicas (temperatura del agua, temperatura ambiental, exposición a la luz, profundidad en la columna de agua, velocidad del viento, precipitación, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) y químicas (concentración de nitratos, amonio y ortofosfatos) a través del tiempo (diferentes épocas) y espacio (diferentes puntos) en los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán en el año 2013.

6. HIPOTESIS

La disponibilidad de nutrientes, que a su vez está determinada por factores físicos (temperatura del agua, temperatura ambiental, exposición a la luz, profundidad en la columna de agua, velocidad del viento, precipitación, potencial de hidrogeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) y químicos (concentración de nitratos, amonio y ortofosfatos) determina la dinámica poblacional del fitoplancton en los sitios Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán, Guatemala.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 UNIVERSO

Lago Atitlán, Guatemala.

7.1.1 POBLACIÓN

Fitoplancton del Lago de Atitlán.

7.1.2 MUESTRA

2 litros de agua de las profundidades 0, 5, 10 y 20 metros de los puntos Centro Weiss G, Santiago y Panajachel por mes, durante el año 2013.

7.2 MATERIALES

7.2.1 EQUIPO

- Botella de Van Dorn y su mensajero (colecta agua a diferentes profundidades)
- Red de plancton de 80 μ m (concentra fitoplancton de la columna de agua).
- Disco Secchi (mide transparencia del agua).
- Cuerdas.
- Lancha con motor fuera de borda.
- Botellas plásticas con tapadera de 1L (para muestras de análisis químico).
- Botellas plásticas con tapadera de 0.500 L (para muestras de fitoplancton).
- Botellas plásticas con tapadera de 0.250 L (para muestras filtradas).
- Cámara de Sedgewick Rafter (conteo de fitoplancton)
- Micropipetas de 1 ml
- Jeringas de 60 ml
- Porta filtros
- Filtros de microfibra de vidrio GF/F de 25 mm (filtrado de muestras en laboratorio)
- Hielera
- Sobres de papel aluminio (para almacenar los filtros con fitoplancton)
- Pinzas
- Frascos oscuros (para realizar la extracción de clorofila *a*)

7.2.2 REACTIVOS

- Metanol
- Etanol
- Fenol
- Citrato de Sodio
- Hidróxido de Sodio
- Agua Desmineralizada
- Hipoclorito de Sodio
- Ferrocianuro de Potasio
- Nitrato de Amonio
- Sulfato de Hidrazina
- Sulfato de Cobre
- Sulfanilamida
- Ácido Clorhídrico
- Naftil-etilendiaminadicloro
- Ácido Sulfúrico
- Molibdato de antimonio y potasio
- Ácido ascórbico
- Fosfato de Sodio Dihidrogenado
- Acetona al 90%
- Formol
- Lugol

7.2.3 INSTRUMENTOS

- Fluorómetro Turner Modelo FM 109525
- Microscopio Trilocular Labomed LX 400
- Cámara UV
- Espectrofotómetro Spectroquant Pharo 300
- Refrigerador
- GPS
- Sonda multiparamétrica YSI modelos 85-100FT y 51B
- Cámara fotográfica
- Equipo de cómputo (Personal)

7.2.4 CRISTALERÍA

- Vaso de precipitar de 50, 100 y 125 ml
- Tubos de ensayo de 10 x 1.2 cms y 20 x 2 cms
- Gradillas para tubos de ensayo
- Erlenmeyer de 125 ml
- Agitadores

- Balones aforados de 100 ml

7.2.5 Recurso Humano

- Br. Gerson Renato Gabriel Ochaeta Constanza (tesista)
- PhD Margaret Dix (asesora)
- Br. Heidy Ajcalón (apoyo en análisis químico)
- PhD Michael Dix (apoyo en análisis de datos)
- TU. Estuardo Bocel, TU. David Coroxon, Sr. Juan Gabriel Cuc (apoyo en colecta y procesamiento de muestras).
- Licda. Rosalito Barrios (revisora)

7.3 MÉTODOS

7.3.1 EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO Y/O FASE DE CAMPO

- Las observaciones y los análisis respectivos se hicieron en tres puntos del lago previamente establecidos como puntos de monitoreo por el Centro de Estudios Atitlán (Ver anexo 1), para tener una representatividad de tres tipos de influencia humana en el lago. Los puntos son identificados como Centro Weiss G, Panajachel y Santiago. Los puntos se seleccionaron por diferentes motivos. En el Centro Weiss G se han realizado varios estudios (Weiss, 1971) (Dix, Fortin, Medinilla, & Rios, 2003) (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011) (Corman, y otros, 2011) (Dix, y otros, 2012) y se cuenta con información física, química y biológica de esta zona del lago desde la década de 1960. Por otro lado, es el punto más profundo del lago (aprox. 320 mts) y el más alejado de entradas de descargas de aguas de los pueblos en sus alrededores. El Punto Panajachel es el que tiene mayor influencia de los dos tributarios permanentes de Lago Atitlán, el Río San Francisco y el Río Quiscab. Estos dos ríos mantienen un continuo enriquecimiento por nutrientes en el lago (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011, pág. 297). El punto Santiago está ubicado sobre la Bahía de Santiago Atitlán, frente a un pueblo que recibe su agua de consumo humano del lago. Por sus características particulares como regímenes de viento y corrientes, representa un ecosistema más eutrófico que el resto

del lago (Weiss, 1971, págs. 68-104); (Dix, y otros, 2012, pág. 37). Con la elección de estos 3 puntos se pretendió obtener una importante representación del lago, y poder comparar los resultados obtenidos en este trabajo con trabajos históricos que se han realizado en el pasado, ecológicamente es importante observar si existe un comportamiento heterogéneo entre los 3 puntos a trabajar debido a las diferentes influencias, tanto físicas como humanas a las cuales están sometidos.

- Para el análisis espacial vertical se colectaron muestras en 4 diferentes profundidades para cada punto (Centro Weiss G, Panajachel y Santiago), por conveniencia en el estudio para tener representación de la zona fótica, por mes se colectaron 12 muestras y 144 muestras totales. Las profundidades que se trabajaron fueron 0, 5, 10 y 20 metros debido a que durante la mayor parte del año la zona fótica del lago se encuentra en el rango de 0 a 20 metros de profundidad aproximadamente (Dix, y otros, 2012, pág. 39). Esto con el fin de obtener mediciones físico-químicas y biológicas en el tiempo y en el espacio (horizontal en el lago y vertical por punto a diferentes profundidades).
- Por cada punto y profundidad se utilizaron muestras de agua, colectadas con una botella de Van Dorn de 2L de capacidad, se tomó una muestra de agua de 1L para los análisis físico-químicos (ortofosfatos, nitratos, amonio, clorofila *a* (Chl-*a*), y pH (potencial de hidrógeno)) y dos muestras de 0.5L fijadas con Lugol para llegar a una concentración final de 2% y formaldehído para llegar a una concentración final de 10% para el análisis cualitativo y cuantitativo de fitoplancton. Esto con el fin de obtener la dinámica de las concentraciones de nutrientes y pH durante el año 2013. Las muestras fijadas en Lugol y formaldehído fueron utilizadas para estimar la concentración de fitoplancton así como su determinación taxonómica.
- Para los análisis de nutrientes se tomaron las muestras en frascos de HDPE (polietileno de alta densidad) previamente lavados con una solución de ácido clorhídrico de 0.1 N en agua desmineralizada, esto para

evitar contaminación externa por nutrientes que pudieran existir en los frascos. Las muestras de agua se colectaron por medio de una botella de Van Dorn a varias profundidades en los 3 sitios de colecta. Las muestras se almacenaron a 4°C en hieleras con hielo y se trasladaron a refrigeradores en el laboratorio (Dix, y otros, 2012, pág. 38). La temperatura se mantuvo baja para evitar degradación de los nutrientes en las muestras.

- Se tomaron medidas de parámetros *in situ* como la temperatura, oxígeno disuelto, conductividad específica y transparencia (medida con disco Secchi), con el fin de entender su comportamiento a través del año y en los tres puntos estudiados.
- Las variables meteorológicas utilizadas son: velocidad del viento, precipitación mensual, temperatura media mensual y radiación solar promedio mensual. Estos datos fueron proporcionados por las estaciones climatológicas del INSIVUMEH ubicadas en Santiago Atitlán, y El Capitán, estación climatológica de la Universidad del Valle campus Altiplano, y la de AMSCLAE ubicada en Panajachel. Las variables meteorológicas como el viento, la lluvia, la temperatura ambiental y la radiación solar, pueden alterar las condiciones de disponibilidad de nutrientes en el lago, para ello se analizaron durante el año 2013 con el fin de evaluar el comportamiento de éstas y buscar una posible relación con la distribución del plancton en la misma temporalidad.
- La temporalidad del experimento fue de enero a diciembre del año 2013, para abarcar las dos estaciones del año (seca y lluviosa), en el punto Panajachel por el clima no se pudo realizar la colecta en el mes de diciembre, por lo que solo se trabajó de enero a noviembre en este sitio. Todas las muestras fueron colectadas en conjunto con el equipo del Centro de Estudios Atitlán, utilizando la metodología anteriormente descrita. Abarcar las dos estaciones es importante ya que la dinámica del plancton se puede ver alterada por nutrientes traídos por la lluvia por ejemplo, o cambios en la temperatura.

7.4 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

7.4.1 CLOROFILA A

El análisis de clorofila *a* se utilizó como una medida indirecta de la concentración de fitoplancton en el lago, para ello se filtraron 180 ml de la muestra de agua mediante la utilización de filtros de microfibras de vidrio GF/F de 25mm, posteriormente estos filtros eran congelados dentro de recipientes de papel aluminio durante 24 horas (tiempo de incubación). Después del período de incubación se procedió a extraer la clorofila *a* sumergiendo el filtro en 20 ml de metanol como solvente en un contenedor oscuro y tapado, y previamente lavado con acetona, durante un tiempo de 12-48 horas en un refrigerador a 4 °C. Posteriormente, la lectura de la clorofila *a* se realizó mediante la utilización de un fluorómetro Turner, basado en: *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater* (Eaton, 2005, págs. 10-20); *Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents* (Ritchie, 2006, págs. 28-35) y *Métodos de Análisis de Laboratorio de Análisis y Monitoreo del CEA* (CEA, 2010, págs. 25-30).

7.4.2 FITOPLANCTON

Cada muestra colectada y fijada en Lugol o formol se filtró por gravedad usando papel filtro analítico fino y luego fue re suspendido en 10 ml de la solución fijadora (Dix, y otros, 2012, pág. 38).

- Estimación cualitativa de grupos taxonómicos

Se identificaron las especies presentes en las muestras mediante la utilización de un microscopio óptico, cubre y porta objetos. Para ellos se utilizaron guías de campo tales como: (Smith, 1950) (Prescott, 1970); (Van Den Hoek, Mann, & Jahns, 1998); (Wehr & Sheath, 2003); (UNESCO, 2009); (Dix, y otros, 2012); (Komárek & Hauer, 2013).

- Estimación de Abundancia

Las muestras se analizaron mediante conteos en una celda Sedgewick Rafter para obtener abundancias relativas (el volumen de la celda es 1 ml), se contó hasta obtener un mínimo de 100 organismos, por medio de la utilización de un microscopio, a una magnificación de 100x. Estos conteos se realizaron 3 veces por muestra para evitar variaciones significativas (Eaton, 2005, págs. 10-24). Si hubo duda de identificación de un organismo se examinó a 400X. Posteriormente las abundancias relativas fueron transformadas de organismos/L a unidades de biovolumen (mm^3/L).

Se consideró como un organismo a una colonia, filamento o una célula, dependiendo de la morfología del sujeto de estudio. En base a esto se obtuvieron los valores de abundancia relativos en organismos/Litro (Eaton, 2005, págs. 10-24). Para calcular el biovolumen se creó un cuadro de volumen por especie encontrada, el cual fue relacionado con la abundancia de cada especie en particular.

7.4.3 ANÁLISIS FÍSICOS DEL AGUA

Para la medición de los análisis físicos *in situ* se tomaron perfiles verticales de oxígeno disuelto, temperatura y conductividad específica (25 °C) con la ayuda de sondas medidoras marca YSI modelo 51B y 85. El pH se midió con un potenciómetro y la transparencia en la columna de agua con un disco Secchi blanco y negro de 20 cm de diámetro (Dix, y otros, 2012, pág. 37).

7.4.4 ANÁLISIS QUÍMICO EN EL LABORATORIO

Para el análisis de amonio $\text{NH}_4^+\text{-N}$ se utilizó el método de indofenol con análisis dentro de 24 horas (Liddicoat, Tibbits, & Butler, 1975); (CEA, 2010, págs. 7-10), para nitrato $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-\text{-N}$ se utilizó el método de hidrazina (Eaton, 2005); (CEA, 2010, págs. 11-15) y para el ortofosfato PO_4^{3-} el método del

ácido ascórbico (Murphy & Riley, 1962); (CEA, 2010, págs. 16-19). Las lecturas fueron realizadas con un espectrofotómetro.

7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un análisis de diversidad (Índice Shannon Wiener) y de similitud (Índice Sorensen) (Gómez, Rivera, Duque Escobar, Andrade, & Rodriguez, 2011, pág. 11), para cada uno de los sitios y sus respectivas profundidades; esto con el fin de establecer diferencias y similitudes entre los sitios de muestreo y las profundidades. Se tomó como un individuo u organismo a los filamentos, colonias, cenobios y algas unicelulares. El índice de diversidad de Shannon Wiener se calculó mediante la siguiente expresión:

$$H = - \sum_{i=1}^s (P_i \cdot \ln P_i)$$

Donde P_i es la proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos (es decir la abundancia relativa de la especie i), entonces $P_i = n_i/N$ en donde n_i es igual al número de individuos de la especie i y N es el número de todos los individuos de todas las especies, en donde “ S ” es el número total de especies presentes en la muestra (Wetzel, 2001, pág. 142). De esta forma, el índice contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies), y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia).

El índice de similitud de Sorensen se calculó mediante la expresión:

$$I_s = \frac{2c}{a+b}$$

En donde:

a= número de especies en la estación 1

b=número de especies en la estación 2

c=número de especies presentes en ambas estaciones
(Alvarez, 2004, pág. 202).

Se realizó un análisis de correspondencia canónica (utilizando el paquete R), ya que este permite ordenar en un espacio de pocas dimensiones (ejes canónicos) los puntos de muestreo, especies y las variables que provocan tal ordenación (en este caso las variables abióticas) (Pinilla Agudelo, 2005, pág. 158) utilizando las variables abióticas y las variables biológicas (ver Anexo 2). Esto con el fin de establecer cuáles variables explicaban la dinámica del fitoplancton en los tres puntos del lago en el año 2013. Este procedimiento permite posicionar los grupos de organismos con los sitios y factores ambientales en un sistema sintético de coordenadas.

Se realizó un análisis de Correlación de Pearson (utilizando el programa SPSS 18) con el fin de establecer posibles relaciones, entre el total de biomasa de fitoplancton con las variables abióticas analizadas en el presente estudio. De igual forma se realizó la correlación entre los taxones Dinophyta, Bacillariophyta, Chlorophyta y Cyanophyta con las variables abióticas.

8. RESULTADOS

8.1 ESPECIES DEL LAGO ATITLÁN PARA EL AÑO 2013

Cuadro No. 1

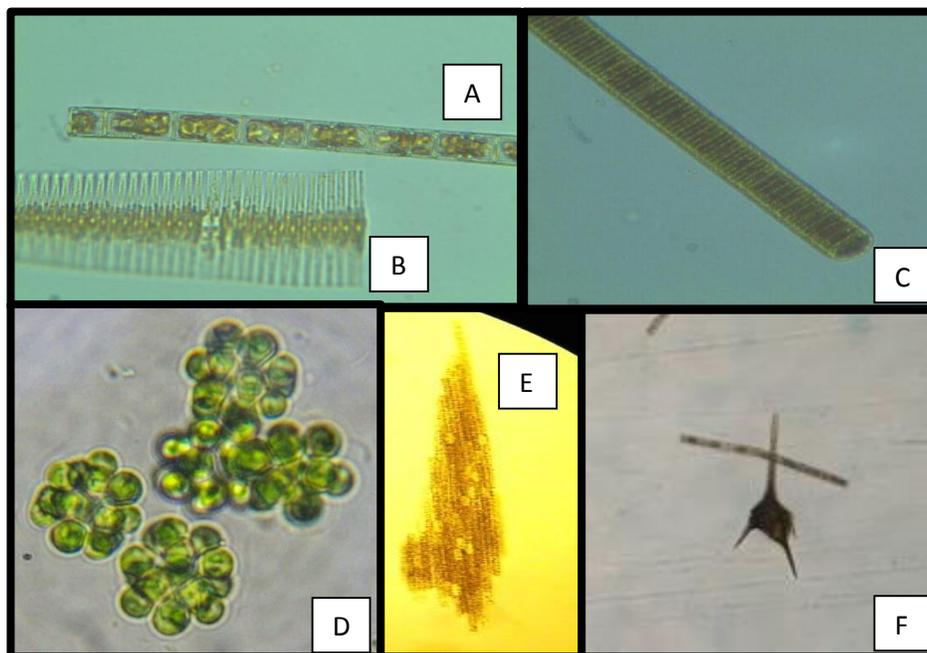
Presencia de especies de fitoplancton en (0-20m) en los puntos Centro Weiss G, Santiago y Panajachel durante el año 2013

Mes/Especie	Centro Weiss G												Santiago												Panajachel											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
<i>Ceratium hirundinella</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Fragilaria crotonensis</i>	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
<i>Cymbella mexicana</i>													X	X			X	X						X	X	X										
<i>Navicula sp.</i>													X	X			X							X												
<i>Synedra ulna</i>			X																																X	
<i>Nitzschia sp.</i>	X								X							X	X		X					X	X										X	X
<i>Aulacoseira granulata</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Staurastrum sp.</i>	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X												
<i>Sphaerocystis sp.</i>		X	X			X	X				X				X				X						X											X
<i>Botryococcus braunii</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X		X	X	X	X	X
<i>Mougeotia sp.</i>					X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X						X	X	X	X	X	X	X
<i>Coelastrum sp.</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Volvox sp.</i>							X				X																									X
<i>Pediastrum sp.</i>	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X	X			X	X		X	X	X	X	X		X					
<i>Oocystis sp.</i>	X	X	X			X		X	X	X	X		X	X	X		X					X			X	X		X	X	X	X	X			X	X
<i>Limnorphis robusta</i>	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X	X
<i>Chroococcus sp.</i>																									X											
<i>Microcystis aeruginosa</i>						X	X	X	X	X		X					X			X	X										X	X			X	
<i>Aphanizomenon sp.</i>				X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X						X	X	X	X	X	X	X
TOTAL	10	9	10	9	8	13	12	11	12	13	11	10	9	8	11	7	13	12	13	10	10	11	11	10	8	8	8	6	7	9	9	10	10	12	10	

En el cuadro No.1 se observan las especies presentes en cada uno de los sitios durante el año 2013, en total se registraron 19 especies pertenecientes a 4 taxones principalmente, *Ceratium hirundinella* (Dinophyta), *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira granulata*, *Cymbella mexicana*, *Navicula* sp., *Synedra ulna* y *Nitzschia* sp. (Bacillariophyta), *Staurastrum* sp., *Botryococcus braunii*, *Sphaerocystis* sp., *Mougeotia* sp., *Coelastrum* sp., *Volvox* sp., *Pediastrum* sp. y *Oocystis* sp. (Chlorophyta) y *Chroococcus* sp., *Limnoraphis robusta*, *Microcystis aeruginosa* y *Aphanizomenon* sp. (Cyanophyta). *Ceratium hirundinella*, *A. granulata* y *Coelastrum* sp. se registraron durante todo el año en los tres puntos de muestreo. Las algas verdes (Chlorophytas) presentaron 8 especies, seguido por las diatomeas (Bacillariophytas) con 6 especies, luego las cianobacterias (Cyanophytas) con 4 especies y por último los dinoflagelados (Dinophyta) con 1 especie.

Figura No. 3

Fotografías de especies de fitoplancton dominantes



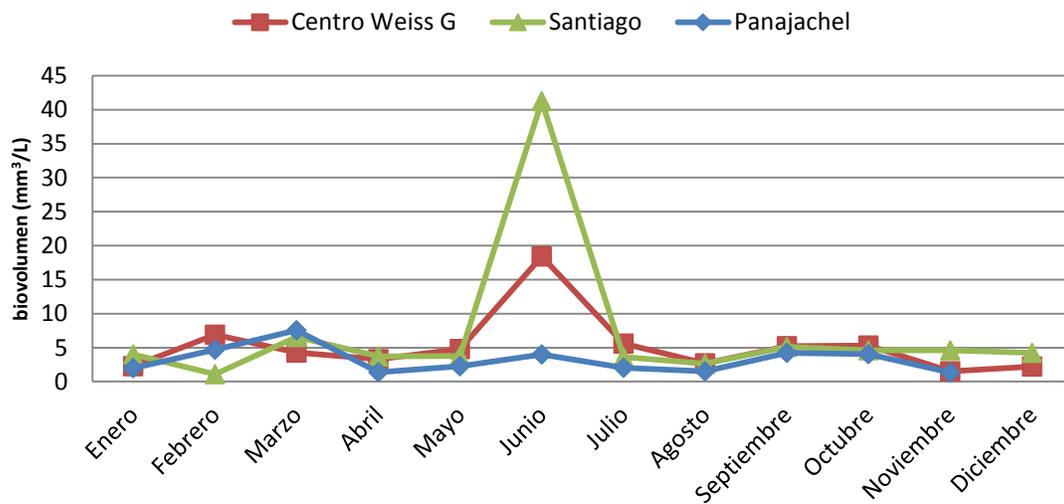
Fuente: Fotografías tomadas en el laboratorio por M. Dix y G. Ochaeta

En la figura 3 observamos fotografías de las especies dominantes en el estudio. *Aulacoseira granulata* (A), *Fragilaria crotonensis* (B), *Limnoraphis robusta* (C), *Coelastrum* sp. (D), *Aphanizomenon* sp. (E) y *Ceratium hirundinella* (F).

8.2 BIOVOLUMEN DE FITOPLANCTON PARA EL LAGO ATITLÁN, 2013.

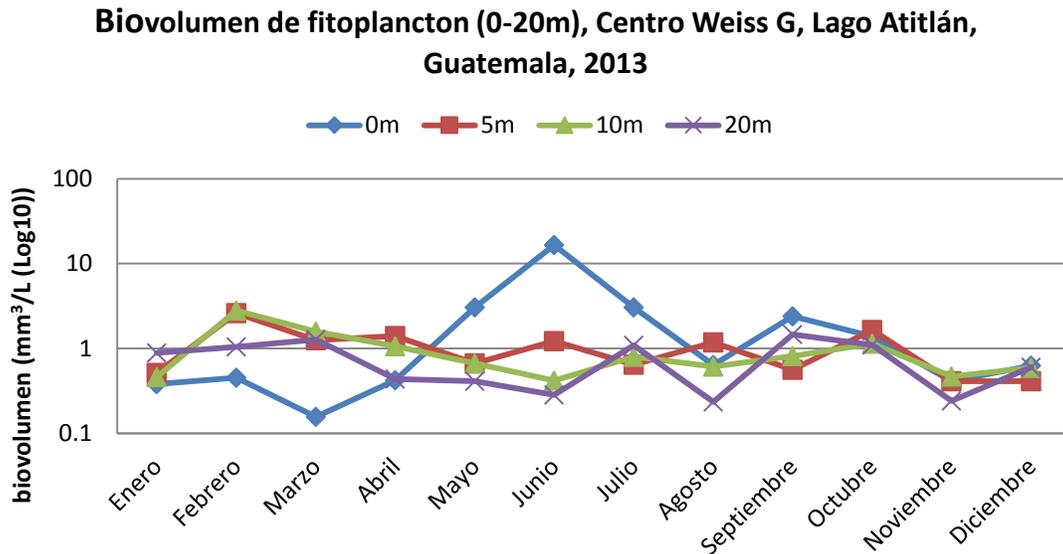
Figura No. 4

Biovolumen de fitoplancton sumatoria (0-20m), Centro, Santiago y Panajachel, Lago Atitlán, Guatemala, 2013



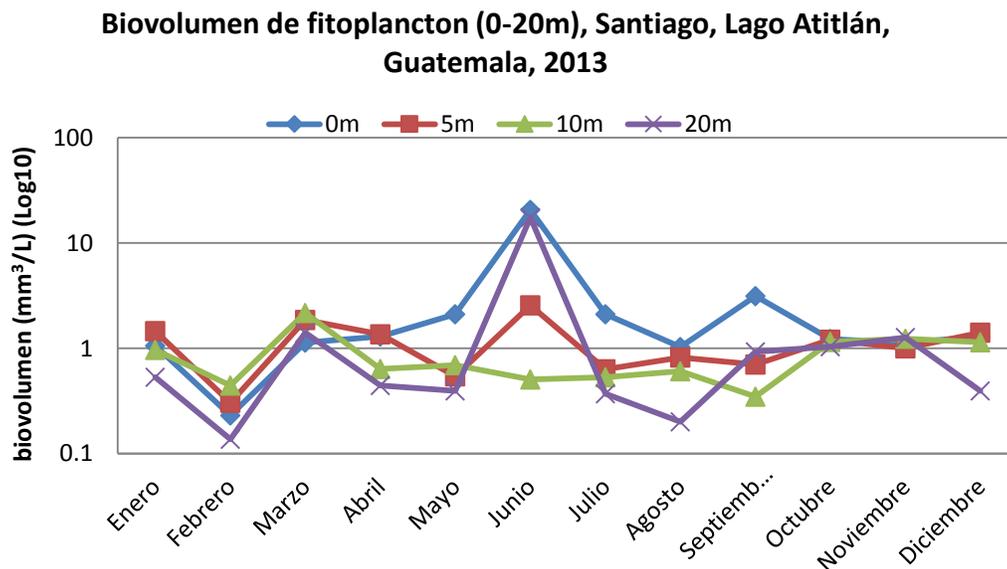
En la figura No. 4, se observan las sumatorias de las concentraciones de biovolumen en mm^3/L entre 0 y 20 metros para cada uno de los puntos a través del tiempo. En donde se aprecia el mes con mayor biovolumen para Centro Weiss G se registró en el mes de junio con $18.41 \text{ mm}^3/\text{L}$, para Santiago en el mes de junio con $41.24 \text{ mm}^3/\text{L}$ y en Panajachel en el mes de marzo con $7.57 \text{ mm}^3/\text{L}$. Las concentraciones más bajas se registraron en el Centro Weiss G en el mes de noviembre con $1.53 \text{ mm}^3/\text{L}$, en Santiago en febrero con $1.12 \text{ mm}^3/\text{L}$ y en Panajachel en el mes de noviembre con $1.32 \text{ mm}^3/\text{L}$. Lo reportado en Santiago en el mes de junio fue el pico más alto registrado para el lago y la concentración más baja fue la reportada para Panajachel en el mes de noviembre.

Figura No. 5



En la figura 5, se muestran las concentraciones de biovolumen transformadas a logaritmo de base 10 para Centro Weiss G en 4 profundidades (0, 5, 10 y 20m). Se observa que la concentración más alta fue en junio en superficie (0m) con una concentración de $16.49 \text{ mm}^3/\text{L}$, en el mismo mes a 5m se obtuvo un aumento en el biovolumen de fitoplancton en relación a los 10 y 20m que mostraron una leve disminución. Entre enero y marzo la superficie presentó niveles inferiores de biovolumen en relación a las zonas más profundas (5-20m), en febrero se registró un pico en 10 y 5m.

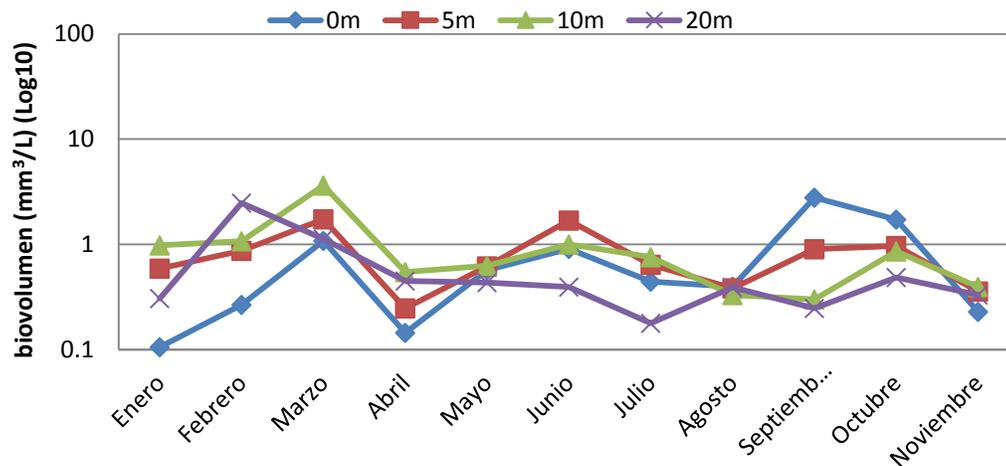
Figura No. 6



En la figura 6, se observa los valores de biovolumen transformados a logaritmos de base 10 para Santiago. Durante la mayor parte del año el biovolumen se comportó de manera similar en las 4 profundidades analizadas en la columna de agua, a excepción del mes de junio. En junio se tuvo valores mayores en superficie y en 20m con valores de $20.70 \text{ mm}^3/\text{L}$ en 0m y $17.50 \text{ mm}^3/\text{L}$ en 20m; entre mayo y octubre los valores más altos de biovolumen se registraron en la superficie.

Figura No. 7

Biovolumen de fitoplancton (0-20m), Panajachel, Lago Atitlán, Guatemala, 2013



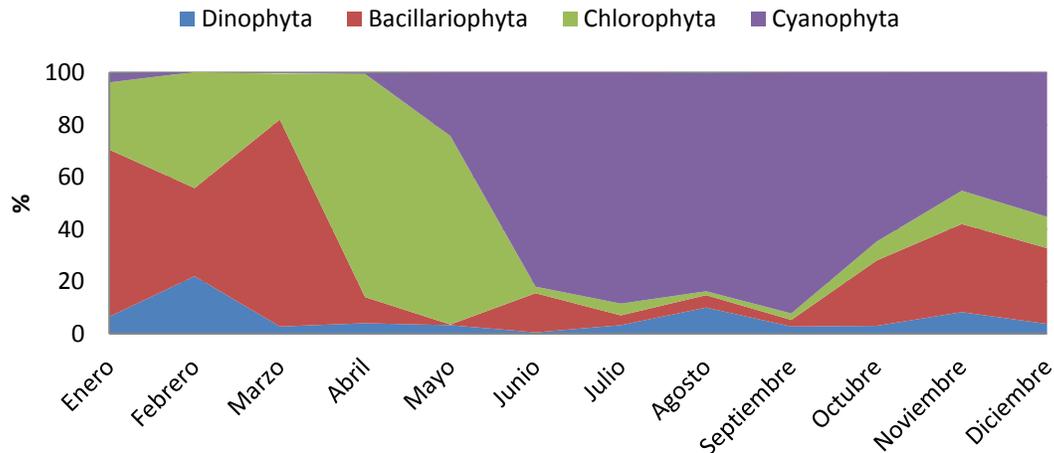
En la figura No. 7, se observa los valores de biovolumen transformados a logaritmo de base 10 para Panajachel. En febrero se obtuvo un pico de $2.47 \text{ mm}^3/\text{L}$ en 20m, en el mes de marzo se registró el pico mayor para el sitio con $3.62 \text{ mm}^3/\text{L}$ en 10m, en abril se observó una caída en los niveles de biovolumen en todas las profundidades, en el mes de septiembre se observa un nuevo pico en superficie con concentraciones de $2.79 \text{ mm}^3/\text{L}$.

En los sitios Centro y Santiago, se obtuvieron concentraciones de biovolumen altas en el mes de junio en superficie, coincidiendo con los mayores picos de biovolumen durante el año para estos sitios, provocados principalmente por florecimiento de las cianobacterias, *Limnoraphis robusta* y *Aphanizomenon* sp. En Panajachel, el comportamiento de las concentraciones de biovolumen fue más homogéneo en las cuatro profundidades analizadas durante el año.

8.3 BIOVOLUMEN RELATIVO DE TAXONES DE FITOPLANCTON

Figura No. 8

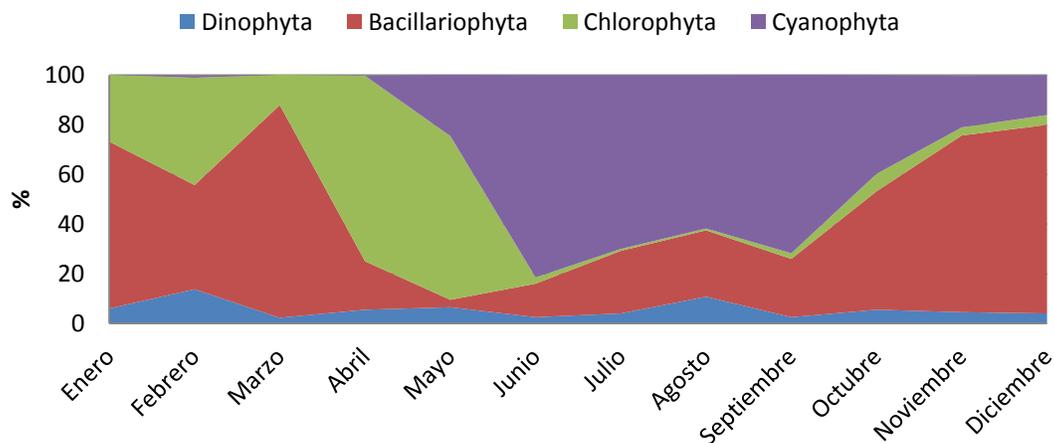
Biovolumen relativo de taxones de fitoplancton (0-20m), Centro Weiss G, Lago Atitlán, Guatemala, 2013.



En la figura 8, se observa la dominancia relativa en términos de biovolumen por taxones para Centro Weiss G, observamos que entre enero y marzo dominan las diatomeas, posteriormente entre abril y mayo dominan las algas verdes, entre los meses de junio a octubre hay una dominancia de las cianobacterias y en noviembre existe una codominancia entre las cianobacterias y las diatomeas.

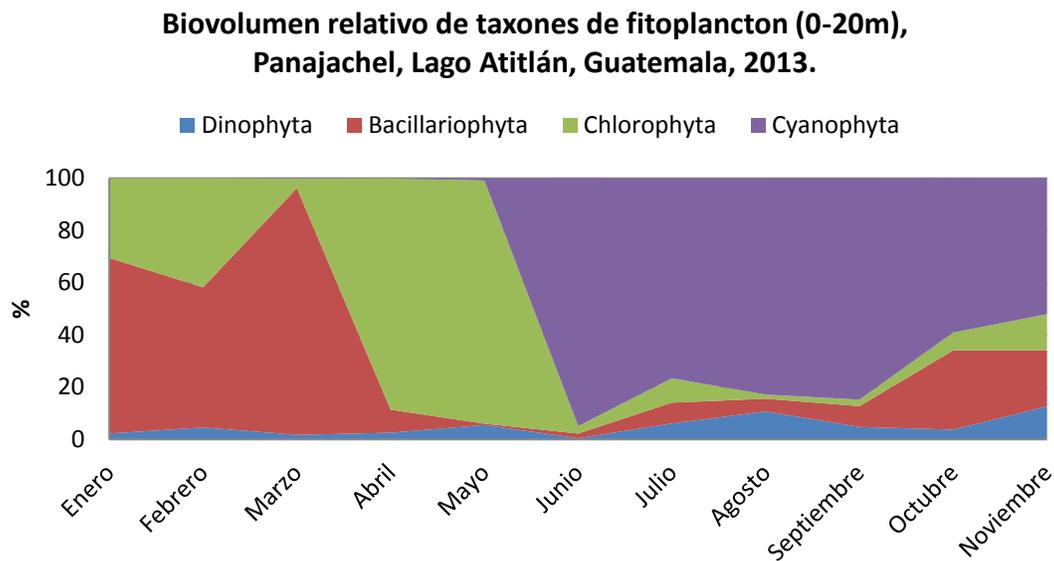
Figura No. 9

Biovolumen relativo de taxones de fitoplancton (0-20m), Santiago, Lago Atitlán, Guatemala, 2013.



En la figura 9, se observa la dominancia relativa por taxones en términos de biovolumen para Santiago. Observamos que de enero a marzo hay una dominancia de diatomeas, entre abril y mayo se registró una dominancia de algas verdes, de junio a septiembre dominaron las cianobacterias, mientras que en octubre, noviembre y diciembre existió una dominancia de diatomeas. El comportamiento de la estructura del plancton entre Santiago y Centro es muy similar hasta el mes de septiembre.

Figura No. 10

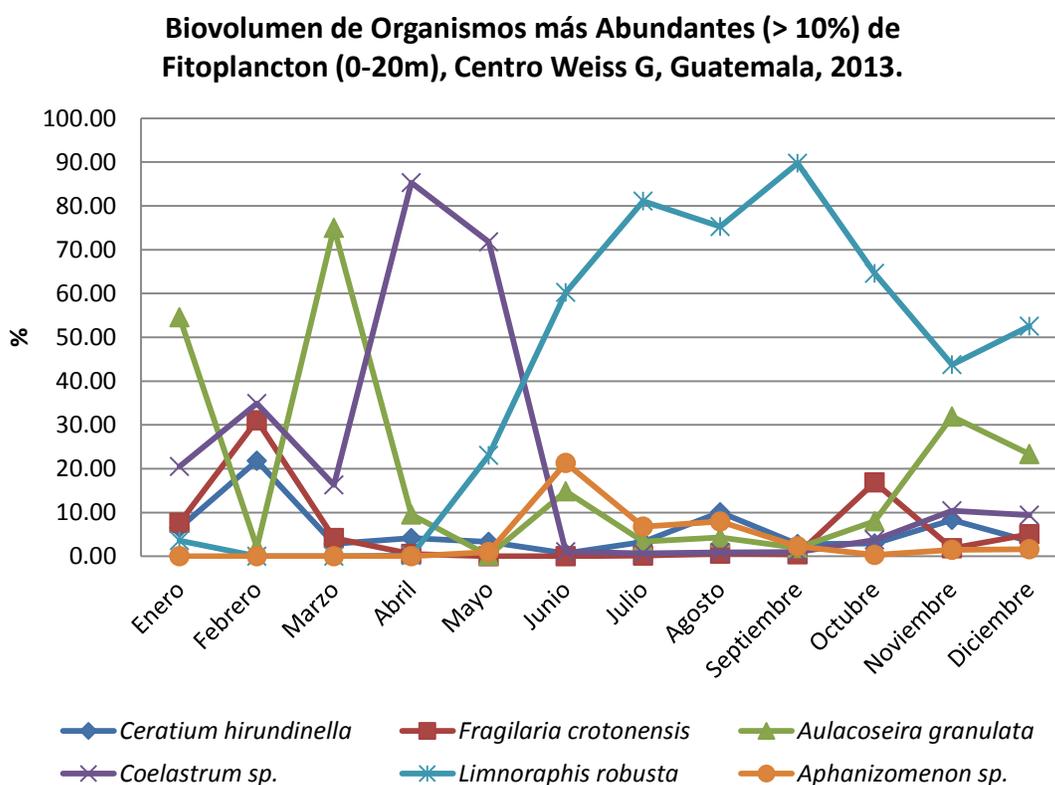


En la figura 10, se observa la dominancia relativa en términos de biovolumen por taxones para Panajachel. Para los meses de enero a marzo una dominancia de diatomeas, entre abril y mayo el sitio estaba dominado con casi 90% de su composición por algas verdes, mientras que de junio a diciembre se observó una dominancia de cianobacterias en el sitio.

8.4 BIOVOLUMEN DE ORGANISMOS DE FITOPLANCTON MÁS ABUNDANTES

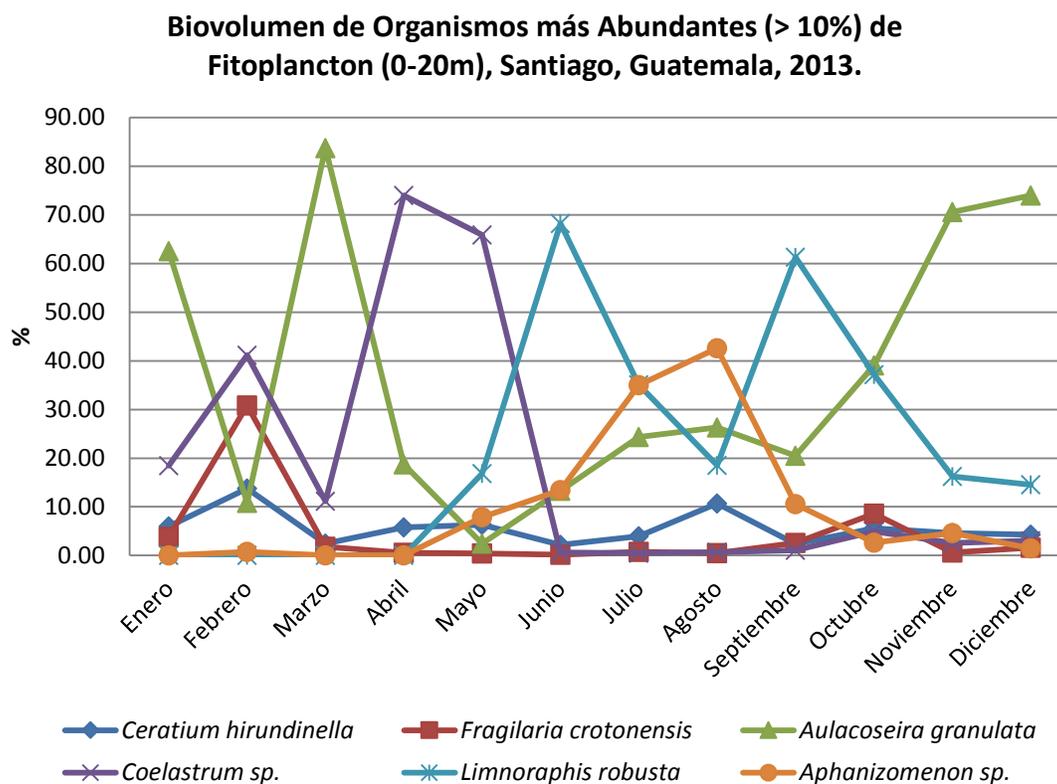
En las figuras No. 11, 12 y 13 se presentan los promedios de biovolumen relativo entre 0 y 20m de los organismos fitoplanctonicos más abundantes en los tres sitios del trabajo, se consideraron como abundantes a los organismos que presentaron en algún mes del año una abundancia relativa mayor al 10 % de la abundancia total en la estructura poblacional del fitoplancton. Para los 3 sitios, fueron 6 especies, *C. hirundinella* (dinoflagelado), *F. crotonensis* y *A. granulata* (diatomeas), *L. robusta* y *Aphanizomenon* sp. (cianobacterias) y *Coelastrum* sp. (alga verde)

Figura No. 11



En la figura 11, observamos la distribución para el Centro Weiss G. La especie, *A. granulata* dominó en los meses de enero y marzo, mientras que en febrero se registró una codominancia entre *Coelastrum* sp. y *F. crotonensis*; entre abril y mayo, *Coelastrum* sp. dominó en el sitio; de junio a octubre y en diciembre, *L. robusta* fue dominante, mientras que en noviembre fueron codominantes *A. granulata* y *L. robusta*. En junio se observó el biovolumen mayor para *Aphanizomenon* sp. representando el 21% en la estructura poblacional.

Figura No. 12



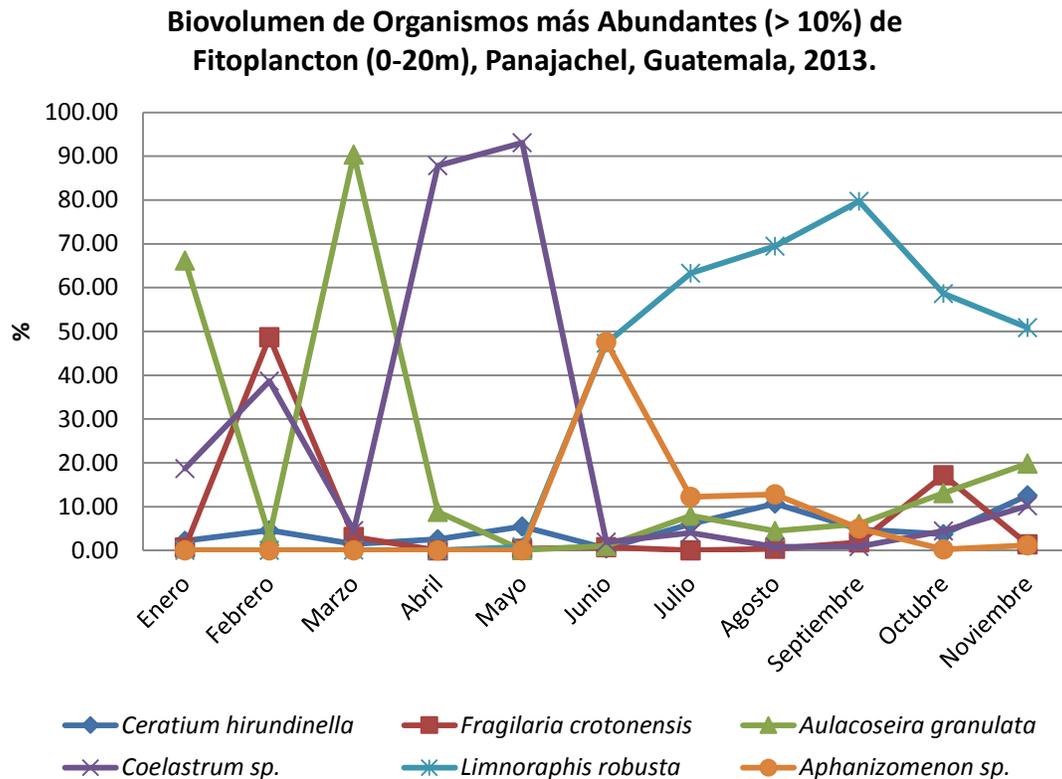
En la figura 12, se observa la dinámica de biovolumen de las especies fitoplanctónicas para Santiago, donde se tuvo un patrón de alternancia en el biovolumen relativo; *A. granulata* dominó la estructura poblacional en los meses de enero, marzo, noviembre y diciembre, y fue codominante en julio, agosto y octubre.

Coelastrum sp dominó en los meses de abril y mayo, así como presentó una codominancia junto con *F. crotonensis* en el mes de febrero.

L. robusta presentó dos picos de dominancia, en los meses de junio y septiembre, así como una codominancia en octubre con *A. granulata*, y en julio con *Aphanizomenon sp*.

Aphanizomenon sp presentó codominancia en la comunidad en el mes de agosto, junto con *A. granulata* y *L. robusta*, y presentó una codominancia en el mes de julio con *L. robusta*.

Figura No. 13

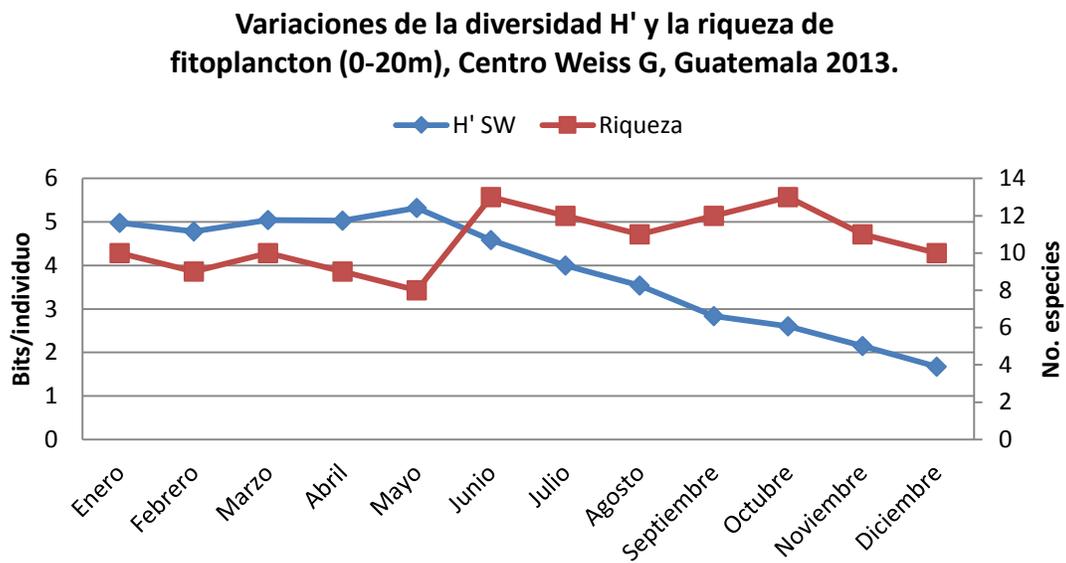


En la figura No. 13, se observa la dinámica en términos de biovolumen de las especies fitoplanctónicas para Panajachel. Se observó una dominancia de *A. granulata* en los meses de enero y marzo, una codominancia en febrero entre *F. crotonensis* y *Coelastrum sp.*, en abril y mayo, una dominancia de *Coelastrum sp.*, mientras que en junio se registró una codominancia entre las cianobacterias *Aphanizomenon sp* y *L. robusta*. De julio a diciembre, el sitio fue dominado por *L. robusta*.

8.5 DIVERSIDAD, RIQUEZA Y SIMILITUD DE FITOPLANCTON

En las figuras No. 14, 15 y 16 se presentan los valores del índice de diversidad de Shannon Wiener (H') medido en bits/individuo y la riqueza de especies para cada uno de los 3 sitios muestreados, a través del tiempo durante el año 2013.

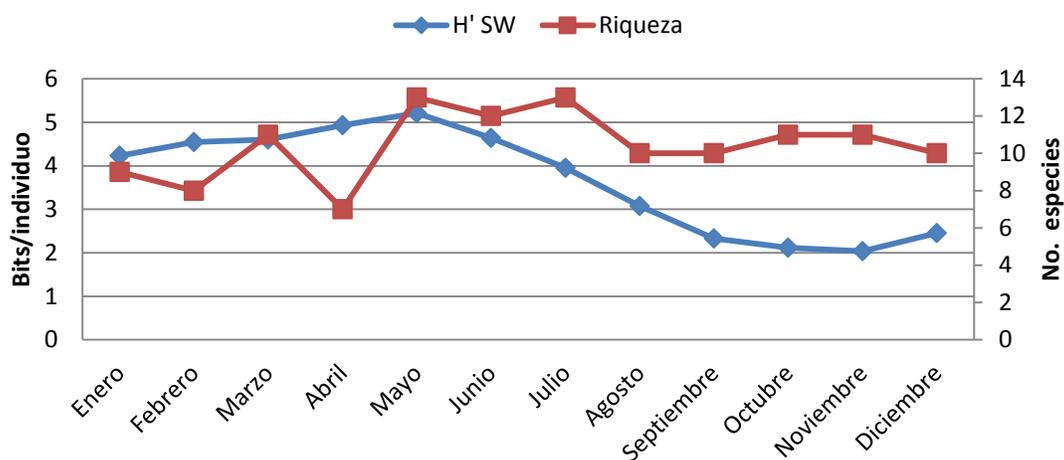
Figura No. 14



En la figura 14, se observa la diversidad y riqueza para Centro Weiss G. El mes con mayor diversidad fue mayo con un valor de 5.33 bits/individuo, mientras que el valor más bajo se presentó en el mes de diciembre con 1.68 bits/individuo. Los valores de la diversidad caen en los últimos 7 meses del año. Al inverso la riqueza es mayor durante los meses de junio a noviembre. El valor mayor de riqueza (13 especies) se presentó en los meses de junio y octubre.

Figura No. 15

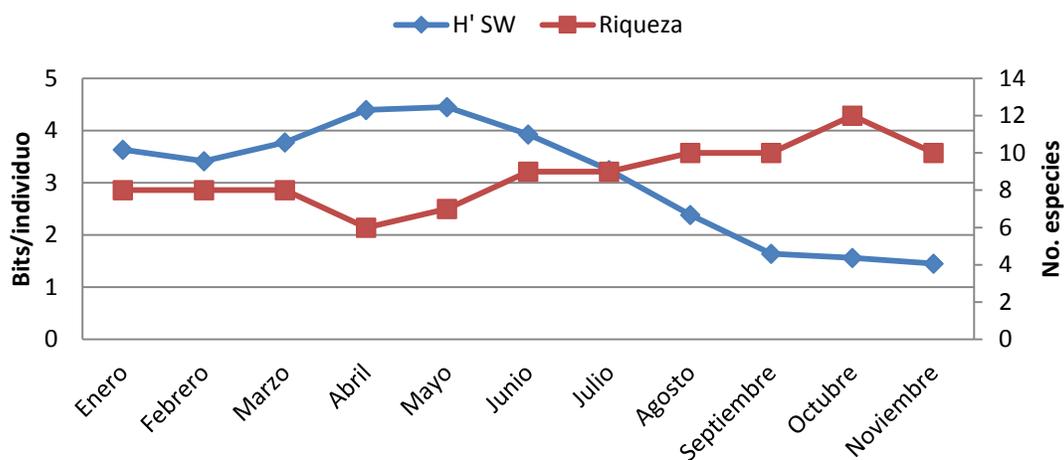
Variaciones de la diversidad H' y la riqueza de fitoplancton (0-20m), Santiago, Guatemala 2013.



Para Santiago (figura 15), el mes con el índice de diversidad más alto fue mayo con 5.21 bits/individuo mientras que el más bajo se observó en el mes de noviembre con 2.04 bits/individuo. La mayor riqueza se registró en los meses de mayo y julio con 13 especies, y el menor valor de riqueza se observó en abril con 7 especies. La diversidad empieza a declinar en la última parte del año a partir del mes de junio.

Figura No. 16

Variaciones de la Diversidad H' y la Riqueza de Fitoplancton (0-20m), Panajachel, Guatemala 2013.



Se presenta en la figura 16 la diversidad y riqueza para Panajachel. El mes con el índice de diversidad más alto fue mayo con 4.45 bits/individuo, el más bajo se

observó en el mes de noviembre con 1.45 bits/individuo. De junio a noviembre, la riqueza se mantuvo entre 10 y 12 especies. La mayor riqueza se registró en el mes de octubre con 12 especies y el menor valor, 6 especies, se observó en abril. La diversidad empieza a declinar en la última parte del año a partir del mes de junio.

El comportamiento en los tres sitios fue similar entre sí. La diversidad alcanzó su mayor valor en los tres sitios en el mes de mayo, a partir del mes de junio se observó una caída en los valores de diversidad para los tres sitios. Este período de junio a diciembre con niveles de diversidad bajos, coincidió con valores de riqueza entre 10 y 12 especies en promedio para los tres sitios (valores altos).

Los resultados para el índice de Sorensen que se obtuvieron son:

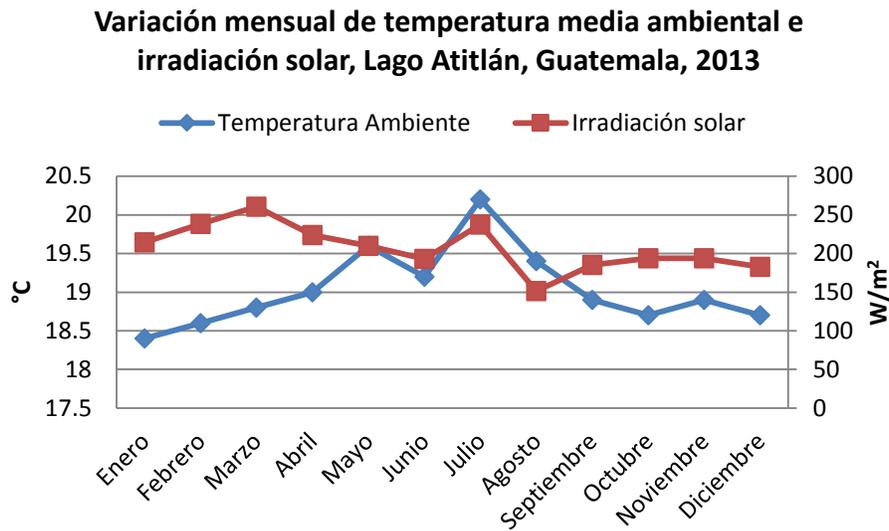
- Entre el Centro Weiss G y Santiago: 0.8750
- Entre el Centro Weiss G y Panajachel: 0.9375
- Entre Santiago y Panajachel: 0.8750

Los valores del índice de Sorensen, muestran que hay una mayor similitud entre los sitios Centro Weiss G y Panajachel en relación a la riqueza de especies presentes durante el estudio, y el sitio Santiago, de acuerdo a estos índices, es menos similar a estos.

8.6 PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

En las figuras No. 17 y 18 se presentan los valores de los datos meteorológicos (temperatura media ambiental, irradiación solar, precipitación y velocidad del viento) para el Lago Atitlán en el año 2013, la información meteorológica fue obtenida de las estaciones meteorológicas del INSIVUMEH en Santiago, El Capitán (San Lucas Tóliman) y la estación meteorológica de la Universidad del Valle de Guatemala Campus Altiplano (Aldea el Tablón, Sololá).

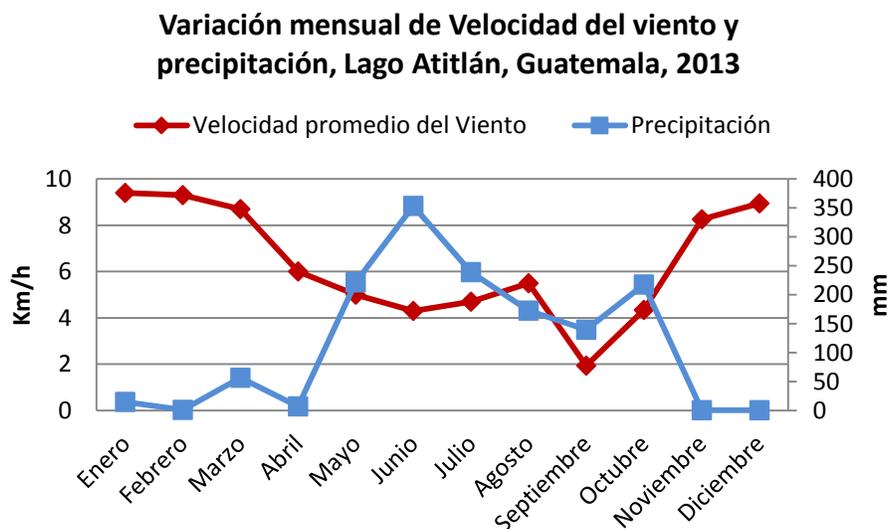
Figura No. 17



Fuente: elaboración propia con datos del INSIVUMEH (Irradiación solar estación de UVG Altiplano El Tablon y Temperatura ambiente estación Santiago de enero a noviembre y el Capitán para diciembre)

En la figura No. 17, se observa las variaciones anuales de la temperatura ambiente y la irradiación solar para el Lago Atitlán. La temperatura ambiente media más alta se registró en julio con 20.2 °C, la más baja en el mes de enero con 18.4 °C. El valor más alto de irradiación se registró en marzo con 260.5 Vatio/m² (W/m²) y el menor en agosto con 151.46 (W/m²).

Figura No. 18



Fuente: Elaboración propia con datos del INSIVUMEH (Estación Santiago)

En la figura 18, se observa las variaciones mensuales de la velocidad del viento y la precipitación pluvial para el Lago Atitlán en el 2013. Los meses con más lluvia registrada fueron mayo, junio, julio y octubre, llegando en junio a los 353 milímetros (mm) de lluvia, la temporada de lluvias fue de mayo a octubre, reportándose valores menores a 60 mm de lluvia, en los meses enero hasta abril, noviembre y diciembre.

Los vientos más fuertes se registraron en enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre alcanzando los 9.4 km/h en enero; el mes de septiembre presentó las menores velocidades promedio durante el año con 1.93 Km/h.

Cuadro No. 4

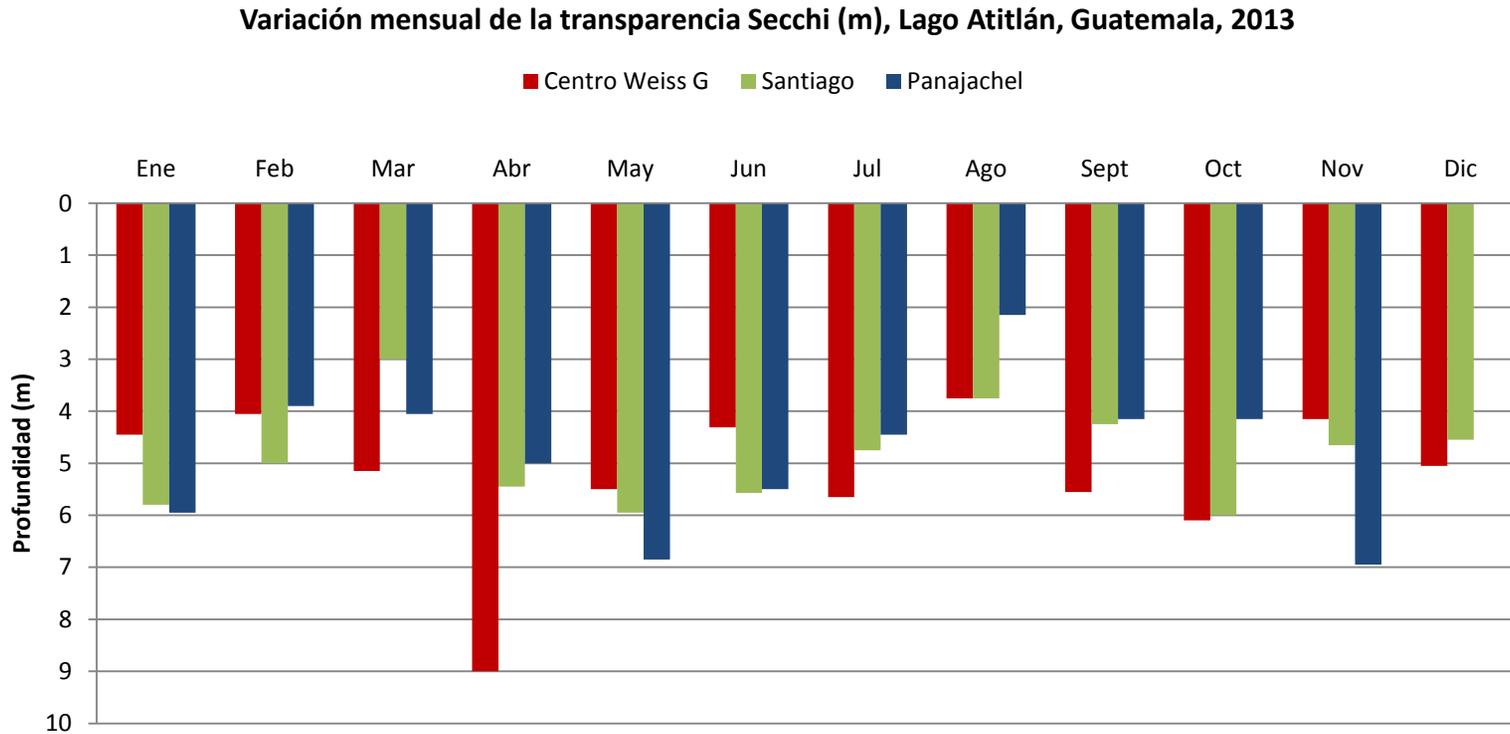
Promedios y desviaciones estándar de los parámetros físicos medido *in situ* durante el año 2013 en los puntos Centro Weiss G, Santiago y Panajachel.

Sitio	Profundidad (m)	Temperatura del agua (°C)		Oxígeno disuelto (mg/L)		Conductividad específica 25 °C (µs/cm ²)		pH	
		\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s
Centro Weiss G	0	22.8	1.2	7.1	0.7	474.6	10.9	8.81	0.19
	5	22.6	1.2	7.2	1.2	473.3	10.2	8.87	0.13
	10	22.4	1.2	7.2	1.1	465.7	29.9	8.86	0.12
	20	22.1	1.1	6.3	1.0	475.5	11.1	8.81	0.14
Santiago	0	22.6	1.2	7.2	1.0	457.6	72.4	8.75	0.15
	5	22.3	1.3	6.8	0.8	460.2	53.0	8.76	0.16
	10	22.1	1.2	6.5	0.9	454.1	70.9	8.75	0.15
	20	21.9	1.1	5.6	1.0	457.6	77.4	8.62	0.25
Panajachel	0	22.6	1.3	7.3	1.1	468.2	34.5	8.82	0.15
	5	22.7	1.2	7.3	1.0	467.8	17.3	8.87	0.15
	10	22.6	1.3	7.0	0.9	468.1	16.6	8.86	0.16
	20	22.0	1.3	5.9	0.6	468.6	19.1	8.78	0.16

En el cuadro No. 4, se presenta un resumen de los promedios y desviaciones estándar anuales por profundidad para los tres sitios (Centro Weiss G, Santiago y Panajachel). La mayor temperatura promedio del agua se registró en el Centro con 22.8 °C a 0m y la menor en Santiago 20m con 21.9 °C. La concentración promedio más alta de oxígeno disuelto se registró en Panajachel a 0 y 5m con 7.3 mg/L, mientras que la menor en Santiago a 20m con 5.6 mg/L. El valor promedio mayor de conductividad específica se registró en el Centro a 0m con 474.6 µs/cm² y el más bajo en Santiago 10m con 454.1 µs/cm², y los valores promedio de pH variaron entre 8.87 en Centro y Panajachel 5m a 8.62 en Santiago 20m.

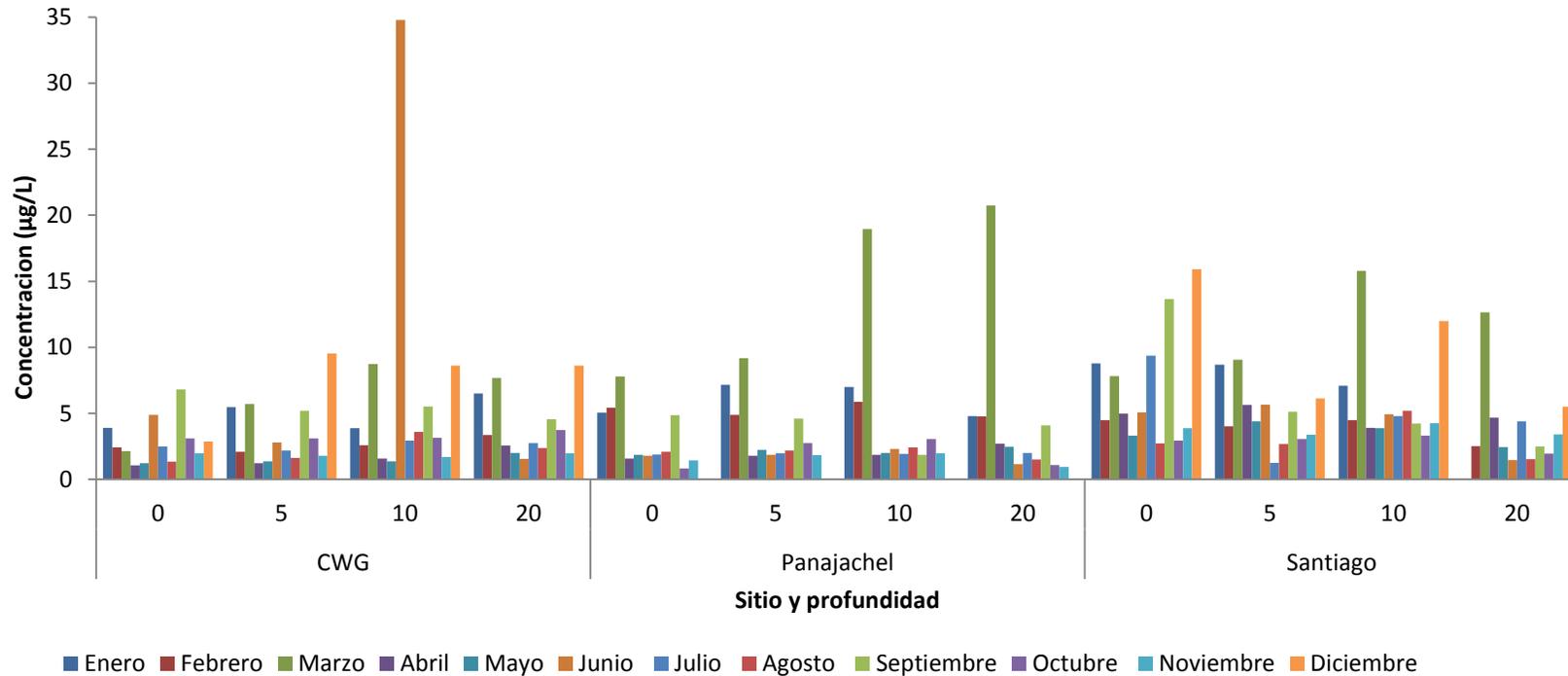
En el Centro en el mes de agosto a 0m se registró la mayor temperatura del año para el sitio con 24.2 °C, en Santiago en el mes de agosto a 0m con 24.1°C y en Panajachel las mayores temperaturas del agua se registraron en el mes de agosto a 5 y 10m con 24.0 °C.

Figura No. 19



En la figura No. 19, se presenta la variación del disco Secchi (transparencia) en metros para los 3 sitios durante el año 2013. La mayor transparencia (9m) se registró en el mes de abril en el Centro Weiss G, la menor (2.15m) se registró en Panajachel en el mes de agosto. En el Centro Weiss G, la lectura más baja fue en el mes de agosto con 3.75 metros. En Santiago, las lecturas presentaron un rango de 3 metros en marzo (menor) y 6 metros en octubre (mayor). En Panajachel, el valor mayor observado (6.95m) fue en el mes de noviembre.

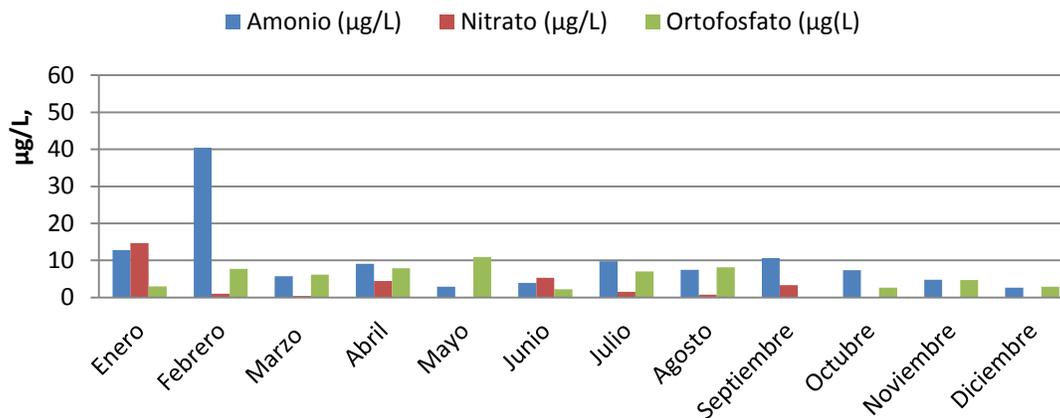
Figura No. 20

Concentracion de clorofila α ($\mu\text{g/L}$). Lago Atitlan 2013.

En la figura No. 20, se observa los cambios en la concentración de clorofila a para los sitios estudiados en el 2013. Para el Centro Weiss G, se registró la mayor concentración en el mes de Junio en 10 metros con 34.78 $\mu\text{g/L}$. En Santiago, las mayores concentraciones se reportaron en el mes de marzo a 10 metros con 15.79 $\mu\text{g/L}$ y en diciembre a 0m con 15.91 $\mu\text{g/L}$. En Panajachel, las mayores concentraciones se reportaron en marzo a 20m y 10m con concentraciones respectivamente de 20.74 $\mu\text{g/L}$ y 18.96 $\mu\text{g/L}$.

Figura No. 21

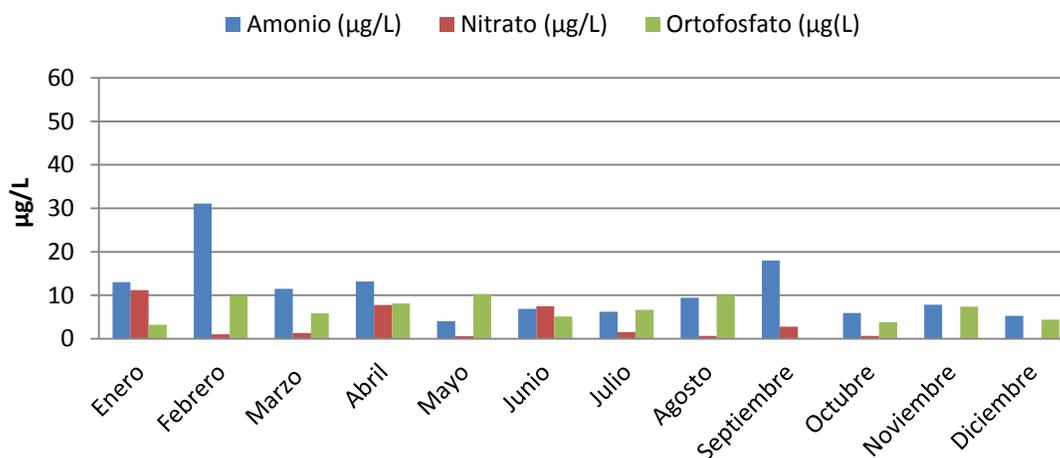
Promedio de valores, Amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), Nitrato ($(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$) y Ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) ($\mu\text{g/L}$) Centro Weiss G (0-20m), Guatemala, 2013



En la figura No. 21, se presenta el perfil químico (promedios de 0-20m) de los nutrientes, amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrato ($(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$) y ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) para el Centro Weiss G durante el año 2013. Se observa que el mayor valor de amonio se registró en el mes de febrero con una concentración de 40.43 $\mu\text{g/L}$, el valor mayor de nitrato en enero con 14.67 $\mu\text{g/L}$ y el valor mayor de ortofosfatos en el mes de mayo con una concentración de 10.92 $\mu\text{g/L}$. En general, los valores se mantuvieron debajo de 10 $\mu\text{g/L}$ durante el año.

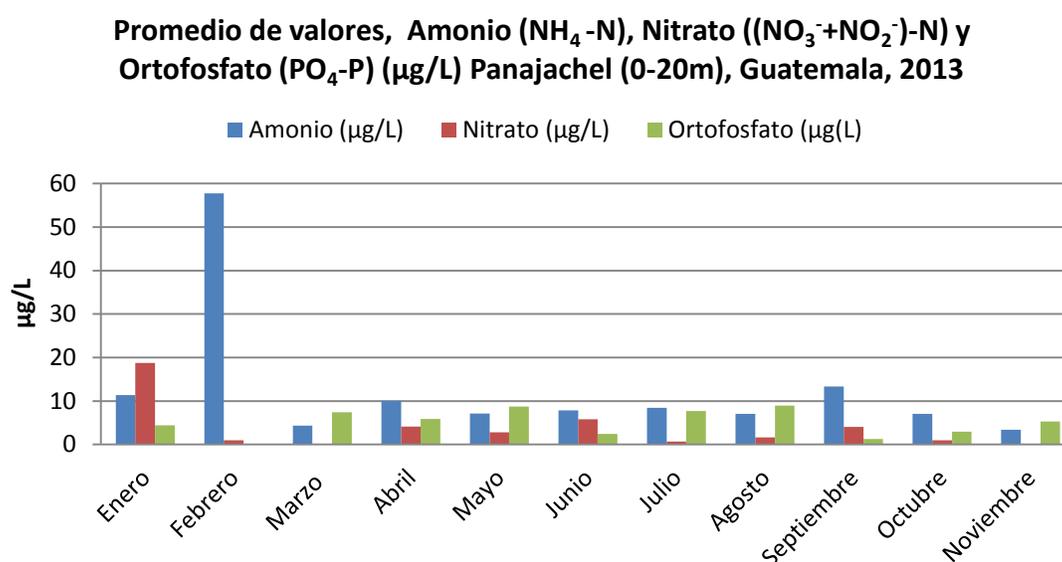
Figura No. 22

Promedio de valores, Amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), Nitrato ($(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$) y Ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) ($\mu\text{g/L}$) Santiago (0-20m), Guatemala, 2013



En la figura No. 22, se presenta el perfil químico (promedios de 0-20m) de los nutrientes, amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrato ($(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$) y ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) para Santiago durante el año 2013. Se observa que el valor mayor de amonio se registró en el mes de febrero con una concentración de $31.11\ \mu\text{g/L}$, el valor mayor de concentración de nitrato en enero con $11.19\ \mu\text{g/L}$ y el valor mayor de ortofosfatos en el mes de mayo con una concentración de $10.22\ \mu\text{g/L}$.

Figura No. 23



En la figura No. 23, se presenta el perfil químico (promedios de 0-20m) de los nutrientes, amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrato ($(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$) y ortofosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) para el sitio de Panajachel durante el año 2013. Se observa que la mayor concentración de amonio se registró en el mes de febrero con una concentración de $57.76\ \mu\text{g/L}$, la concentración mayor de nitrato se reportó en enero con $18.79\ \mu\text{g/L}$ y el valor más alto de ortofosfatos en el mes de agosto con una concentración de $8.94\ \mu\text{g/L}$.

En general, para los 3 sitios, la mayor cantidad de amonio se reportó en el mes de febrero y el nitrato se reportó más abundante en el mes de enero, mientras que, en mayo, se reportó más ortofosfato para Centro y Santiago y en agosto para Panajachel.

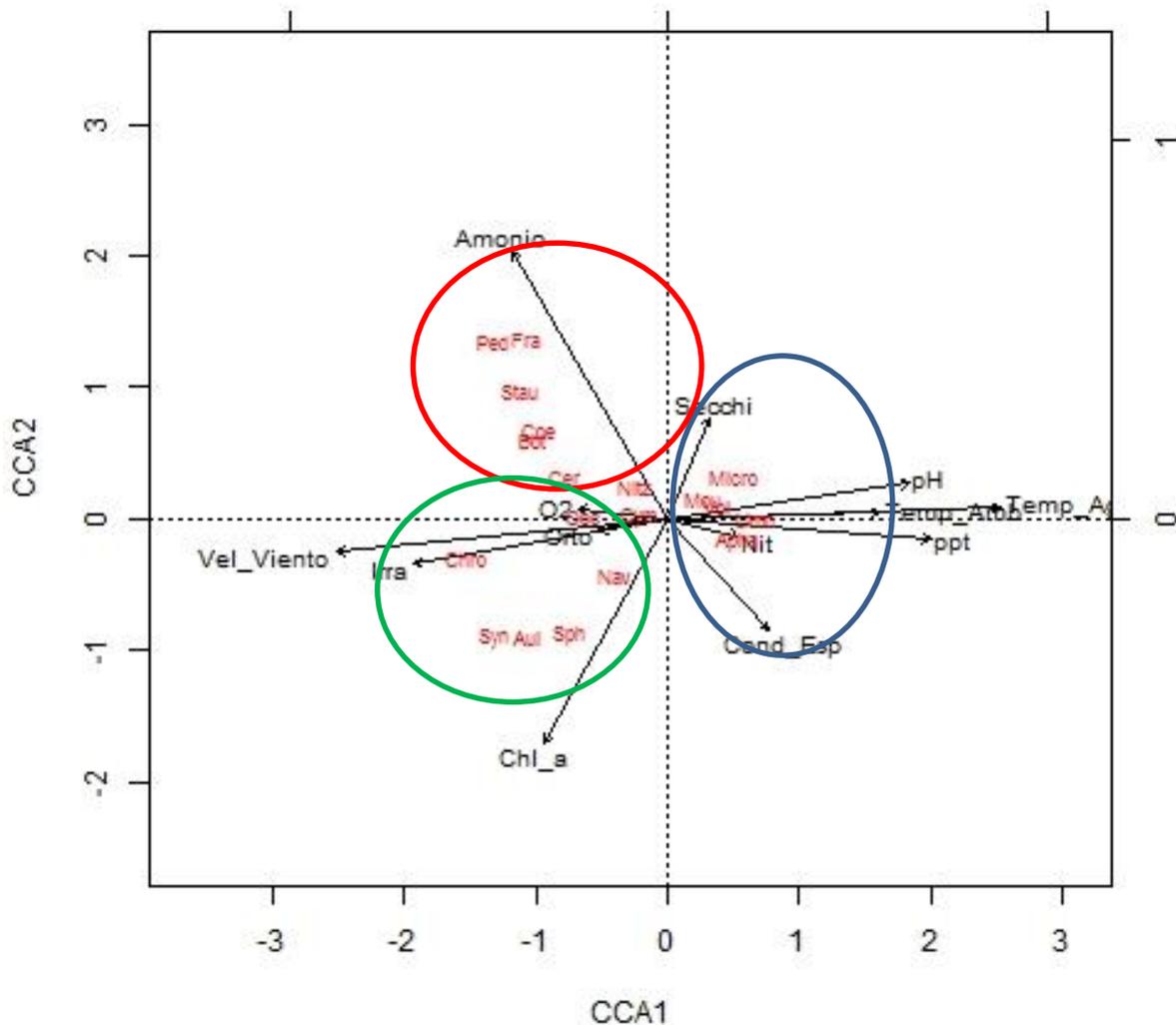
Los valores faltantes en los gráficos, se debe a concentraciones por debajo del límite de detección de las metodologías empleadas.

8.7 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA

En las figuras No. 24 y 25 se presentan las proyecciones del análisis de correspondencia canónica (ACC) entre el fitoplancton y las variables abióticas para el Lago Atitlán en el año 2013. Se separaron los dos plots (figura 23 y 24), para que la visualización fuera mejor, en la figura 23 se dejaron las especies con su ordenación y en la figura 24 los sitios y sus profundidades con su ordenación.

Figura No. 24

Proyección del análisis de correspondencia canónica (ACC) del fitoplancton y las variables abióticas.



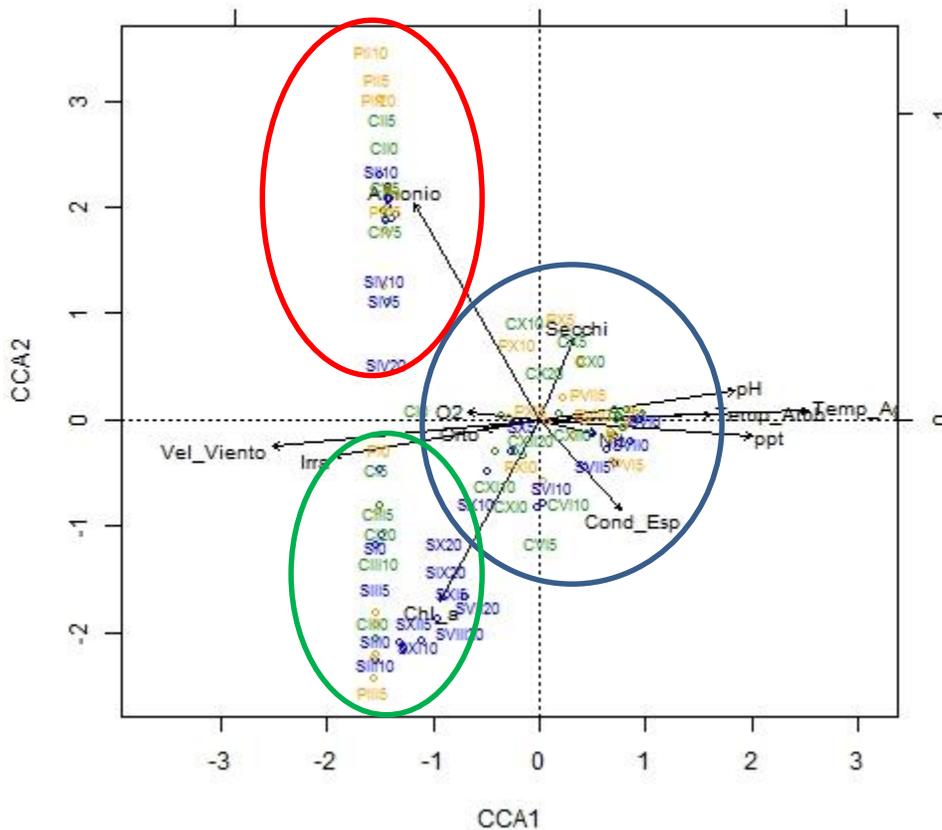
El análisis de correspondencia canónica explica para el año 2013 en el Lago Atitlán en un 56% la varianza de la matriz de fitoplancton. Los ejes canónicos 1 y 2 explican en un 80% la ordenación conjunta de la comunidad de fitoplancton en los sitios estudiados en el lago.

Las variables ambientales que estaban más relacionadas con el eje 1 fueron nitratos (Nit), ortofosfatos (Orto), velocidad del viento (Vel_viento), precipitación (ppt), temperatura ambiente (Temp_Amb), temperatura del agua (Temp_agua), potencial de hidrogeno (pH), irradiación solar (Irra) y el oxígeno disuelto (O2). Las más relacionadas con el eje dos fueron la clorofila a (Chl_a), amonio (Amonio), Secchi (Secchi) y la conductividad específica (Cond_esp). Por otro lado, las especies más relacionadas con el eje 1 fueron *Ceratium hirundinella* (Cer), *Cymbella* sp. (Cym), *Synedra ulna* (Syn), *Nitzschia* sp. (Nitz), *Aulacoseira granulata* (Aul), *Staurastrum* sp. (Stau), *Sphaerocystis* sp. (Sph), *Botryococcus braunii* (Bot), *Mougeotia* sp. (Mou), *Coelastrum* sp. (Coe), *Volvox* sp. (Vol), *Oocystis* sp. (Ooc), *Limnographis robusta* (Lim), *Microcystis aeruginosa* (Mic), *Aphanizomenon* sp. (Aph). Para el eje secundario se encontraban más relacionadas las especies *Fragilaria crotonensis* (Fra), *Navicula* sp (Nav) y *Pediastrum* sp. (Ped).

En la figura No. 24, se observa la ordenación entre las especies y las variables abióticas, en el sector positivo del eje 1 se ordenan *M. aeruginosa*, *L. robusta*, *Aphanizomenon* sp., *Volvox* sp. y *Mougeotia* sp., las cuales se ven altamente influenciadas por las variables precipitación, temperatura ambiental, temperatura del agua y el pH (circulo azul). En el cuadrante negativo, tanto del eje 1 como en el del eje 2, se ordenan las especies relacionadas con la variable amonio entre estas; encontramos *Pediastrum* sp., *F. crotonensis*, *Coelastrum* sp., *Staurastrum* sp. y *B. braunii*. *Aulacoseira granulata*, *Sphaerocystis* sp., *Synedra ulna* y *Navicula* sp. son influenciadas por las variables, irradiación solar y velocidad del viento (círculo rojo); estas mismas especies se relacionan con la variable clorofila a. *Oocystis* sp. y *Cymbella* sp. se ven influenciadas por las variables velocidad del viento y amonio, mientras que *Chroococcus* sp. es influenciada por la Irradiación solar y la velocidad del viento (circulo verde).

Figura No. 25

Proyección del análisis de correspondencia canónica (ACC) de los sitios y sus profundidades con las variables abióticas.



En la figura No. 25, se observa la ordenación de los diferentes sitios y sus profundidades. Se forman 3 grupos, el primer grupo con los sitios que están altamente relacionados con el amonio, donde encontramos agrupados muestras de los tres sitios, Centro, Santiago y Panajachel con sus 4 profundidades para los meses de febrero, abril y mayo (círculo rojo). Correlacionados con la clorofila a se tiene la ordenación de los 3 sitios, para el mes de marzo en todas sus profundidades, así como el sitio Santiago para los meses de septiembre, octubre, diciembre, julio y agosto para 20 metros (círculo verde); el resto de muestras (Centro, Santiago y Panajachel en los meses de julio a noviembre) están agrupados en el centro de la ordenación lo que indica que no hay una variable que explique principalmente la ordenación de los sitios (círculo azul).

8.8 CORRELACIÓN DE PEARSON

Cuadro No. 5

Coeficientes significativos de correlación de Pearson entre las variables abióticas y el biovolumen de fitoplancton.

Variable/Grupo	Total Fitoplancton	Dinophyta	Chlorophyta	Bacillariophyta	Cyanophyta
Lluvia	0.329*	-0.181*		-0.257**	0.390**
Amonio		0.358**	0.372**		
Ortofosfato			0.197*		
Velocidad del viento		0.235**	0.188*	0.460**	-0.242**
T. ambiente		-0.198*		-0.323**	
T. agua			-0.339**	-0.295**	
Irradiación solar			0.272**	0.335**	-0.168*
Cond. Especifica			-0.180*		
Oxígeno disuelto			0.208*		
pH			-0.315**	0.297**	
Secchi			0.298**	-0.233**	
Clorofila <i>a</i>				0.507**	

* Nivel de significancia 0.01, ** nivel de significancia 0.05

En el cuadro No. 5, se observan los coeficientes de correlación significativos que se obtuvieron del análisis de correlación de Pearson. En donde, se obtuvo un coeficiente de correlación significativa entre el total de biovolumen y la lluvia de 0.329 (relación significativa a un nivel 0.01). Se corrió análisis para *Ceratium hirundinella* (Dinophyta), obteniéndose coeficientes de correlación significativo con las variables abióticas, amonio de 0.358 (significativa a un nivel 0.05), velocidad del viento de 0.235 (significativa a un nivel 0.05), lluvia de -0.181 (significativa a un nivel 0.01) y temperatura ambiente de -0.198 (significativa a un nivel 0.01). Para las Bacillariophyta (diatomeas) se obtuvieron valores de coeficiente de correlación significativos para clorofila (0.507), irradiación solar de (0.335), velocidad del viento (0.460), lluvia (-0.257), temperatura ambiente (-0.323), temperatura del agua (-0.295), pH (-0.297) y Secchi (-0.233) todos significativas a un nivel 0.05. Para las Chlorophyta (algas verdes) se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.372 con el amonio (significativa a un nivel 0.05); de 0.197 con los ortofosfatos (significativa a

un nivel 0.01); de 0.272 con la irradiación solar (significativa a un nivel 0.05); de 0.188 con la velocidad del viento (significativa a un nivel 0.01); de -0.339 con la temperatura del agua (significativa a un nivel 0.05); de 0.208 con el oxígeno disuelto (significativa a un nivel 0.01); de -0.180 con la conductividad específica (significativa a un nivel 0.01); de -0.315 con el pH (significativa a un nivel 0.05) y de 0.298 con el Secchi (significativa a un nivel 0.05). Para las Cyanophyta (cianobacterias) se obtuvieron coeficientes de correlación de -0.168 con la irradiación solar (significativa a un nivel 0.01); de -0.242 con la velocidad del viento y de 0.390 con la lluvia (significativa a un nivel 0.05 en ambos casos).

9. DISCUSIÓN

En el presente estudio se registraron 19 especies de fitoplancton pertenecientes a 4 taxones principales (Dinophyta, Bacillariophyta, Chlorophyta y Cyanophyta), siendo las especies *Ceratium hirundinella* (Dinophyta), *Aulacoseira granulata* (Bacillariophyta) y *Coelastrum* sp. (Chlorophyta), las presentes durante todo el año en los 3 sitios de muestreo dentro del Lago Atitlán. Weiss (1971) reportó como especies dominantes a *Dinobryon* sp. (Chrysophyta), *Melosira granulata* (*Aulacoseira granulata*) (Bacillariophyta) y a *Closteriopsis* sp. (Chlorophyta) (las colectas las realizó en los meses de julio de 1968 y noviembre y enero 1969). Reportó que el mayor biovolumen de fitoplancton se localizaba por debajo de la superficie (Weiss, 1971, pág. 73 y 75), similar al encontrado en el presente estudio. Es de mencionar que *Dinobryon* sp. se tiene como un indicador de aguas oligotróficas (Castellanos & Dix, 2009, pág. 16), se tenía reportada para el lago en estudios anteriores (Weiss, 1971) (Dix, y otros, 2012) (Toledo, 2013) pero no se encontró en el presente año, lo que podría sugerir que el Lago Atitlán ya no se encuentra en un estado oligotrófico. Otros estudios demuestran el avance en el proceso de eutrofización en el lago, Toledo (2013, pág. 68) menciona que el lago se encuentra en una transición hacia mesotrofia, Dix y otros (2014, pág. 57) mencionan que para el año 2012 el proceso de eutrofización era más que evidente en el lago, con niveles de anoxia en las profundidades, aumento en las concentraciones de clorofila, así como el aumento en la dominancia de cianobacterias en periodos más largos.

9.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL FITOPLANCTON

La distribución del fitoplancton fue muy similar en los tres puntos muestreados, en la figura No. 4 se observa que los promedios de 0 a 20m de biomasa tuvieron sus picos en diferentes épocas del año para cada sitio. En el Centro Weiss G, fue en el mes de febrero; en Santiago, en el mes de Junio y en Panajachel, en el mes marzo. El biovolumen (sumatoria) más alta de fitoplancton se registró en Santiago en el mes de junio (figura No. 4), cuando la cianobacteria *Limnorphis robusta* dominaba con un 68% (figura No. 12) la estructura poblacional.

9.2 VARIACIÓN ESPACIAL VERTICAL

En general, no se observaron diferencias marcadas entre las concentraciones de fitoplancton entre las diferentes profundidades en los tres sitios de muestreo, salvo algunas excepciones como en el mes de junio en el Centro Weiss G (CWG) que en superficie (ver figura 4) el biovolumen era mayor que en las muestras más profundas, de igual forma en Santiago (SA) en el mes de Junio en superficie y en 20 metros se obtuvieron las mayores concentraciones de biovolumen (ver figura 5),

y en Panajachel (P) (ver figura 6) las concentraciones fueron muy similares en las cuatro profundidades. En El Centro y Santiago, el biovolumen en superficie se debe a que la especie *Limnoraphis robusta*, dominante en la población en este mes para ambos sitios (ver figuras 11 y 12), se desplaza hacia la superficie en donde fija nitrógeno atmosférico (Komarék, y otros, 2013, pág. 44).

9.3 VARIACIÓN ESPACIAL HORIZONTAL

No se encontró diferencia en riqueza y diversidad que posee cada sitio, ya que las mismas especies se registraron en todos los sitios (13 especies), y los índices de diversidad que se midieron mantuvieron la misma dinámica en los 3 sitios (ver figuras 14, 15 y 16) durante todo el año.

En el análisis de similitud de Sorensen (riqueza de especies) no se encontró una diferencia marcada entre los sitios Centro, Santiago y Panajachel en el año 2013 Lago Atitlán. Los sitios más similares entre si son Panajachel y Centro Weiss G ($I_s=0.9375$), Santiago es el más diferente en relación a los otros dos sitios ($I_s=0.8750$). Esto puede deberse a la forma del lago, y el régimen de vientos que se tiene en él, haciendo que la disponibilidad de nutrientes y las variables ambientales sean homogéneas para todo el lago, a excepción de las Bahías (Weiss, 1971, pág. 72). En Santiago, se da una mezcla completa en la columna de agua, a diferencia de lo que se sabe del Centro y Panajachel. Más adelante se discute la diferencia entre las dinámicas y la composición de la estructura poblacional del fitoplancton entre los puntos.

9.4 VARIACIÓN TEMPORAL

Tres de los cuatro taxones principales reportados en el presente trabajo fueron dominantes durante el año 2013, en los primeros meses de enero a marzo la población fue dominada por las Bacillariophytas (diatomeas) hasta en un 80 % en los tres sitios de muestreo, esto probablemente se debe a que las condiciones físicas del lago eran las preferidas generalmente por este grupo. El lago estaba mezclado completamente en Santiago, y parcialmente en el Centro (Dix, y otros, 2014) (no se tiene evidencia para Panajachel). La temperatura ambiental (ver figura 17) y la temperatura del agua eran más bajas (ver cuadro 4), así como soplaban fuertes vientos (ver figura 18). La mezcla de la columna de agua permitió que los nutrientes secuestrados en el fondo del lago pudieran ser accesibles en la capa superior (epilimnio) aumentando sus concentraciones.

Por ello, en el mes de febrero, se reportaron las concentraciones de amonio más altas para los tres sitios (ver figuras 21-23), coincidiendo esto con una gran productividad en el fitoplancton alcanzándose niveles altos de biovolumen

(sumatoria 0-20) para el Centro (ver figura 4). Esto se ve reflejado en las lecturas de las concentraciones de clorofila *a*. En febrero, se dio un cambio notable de dominancia en los 3 sitios, en donde la especie *Fragilaria crotonensis* desplazó casi por completo a *A. granulata* como la diatomea dominante. Esto posiblemente se dio por alguna deficiencia de un nutriente esencial (tal como silicatos) en el lago en este mes, ya que las diatomeas presentan altos requerimientos de sílice (Reynolds, 2006, págs. 173-174) siendo *F. crotonensis* menos sensible a la falta de este nutriente que *A. granulata* (Reynolds, Huszar, Kruk, Naselli-Flores, & Melo, 2002, p. 420). En los días 3 y 7 de marzo se presentaron lluvias en la cuenca alcanzando 12.8 mm de lluvia, lo que pudo haber arrastrado de nuevo los nutrientes requeridos por *A. granulata*, permitiéndole recuperar la dominancia en el mes de marzo (colecta del mes de marzo fue el día 13) respecto a *F. crotonensis*. En Panajachel, la mayor concentración de biovolumen se reportó en el mes de marzo. La especie dominante en este periodo de tiempo fue *A. granulata* la cual llegó a representar hasta el 80% de la estructura poblacional en los 3 puntos en dicho período.

En la correlación de Pearson (ver cuadro 5) que se corrió se obtuvieron valores importantes de correlación entre las concentraciones de las diatomeas y la velocidad del viento (46%), la clorofila (51%) y la irradiación solar (34%). Además se obtuvieron correlaciones negativas para la lluvia (26%) pH (30%), temperatura ambiente (32%), temperatura del agua (30%) y el Secchi (23%). Con esto, podríamos decir que las diatomeas, prefieren aguas más frías y con vientos mayores, así como que a mayor concentración de diatomeas obtendríamos menores lecturas Secchi.

El siguiente período de dominancia se dio para las Chlorophytas (algas verdes) entre los meses de abril y mayo, cuando este grupo dominó la estructura de la población hasta en un 85% en los sitios estudiados (ver figuras 8-10). En este período, el lago se estratificó térmicamente (Dix, y otros, 2014). Además, en el mes de mayo se alcanzó la diversidad más alta en los 3 sitios, posiblemente debido a que la estratificación condujo a condiciones más homogéneas en el epilimnio para todos los grupos fitoplanctónicos en los sitios estudiados en el lago. Este período estuvo dominado por completo por *Coelastrum* sp. en los tres sitios (ver figuras de 11-13). A mediados del mes de mayo dio inicio la época lluviosa en la región (ver figura 18) y al mismo tiempo se observó una disminución en la concentración de nitratos, principalmente en Santiago y el Centro (ver figuras 21 y 22). *Coelastrum* es un género que regularmente se encuentra en sistemas muy enriquecidos (Reynolds, Huszar, Kruk, Naselli-Flores, & Melo, 2002, p. 423). En Panajachel, no se observó disminución de ningún nutriente analizado probablemente debido a que

podieron estar ingresando por las cargas de los ríos tributarios del Lago Atitlán, el San Francisco y el Quiscab.

En la correlación de Pearson (ver cuadro 5) que se realizó, se obtuvieron correlaciones positivas con el amonio (37%), ortofosfatos (20%), irradiación solar (19%), temperatura del agua (34%), oxígeno disuelto (21%), y correlaciones negativas con la conductividad específica (18%) y Secchi (30%); por lo que podríamos decir que las algas verdes prefieren escenarios con concentraciones de amonio y ortofosfatos disponibles, irradiación solar y temperatura del agua mayor, justo las que encontramos en el lago durante abril y mayo. Es probable que las algas verdes sean responsables de un buen porcentaje del oxígeno disuelto generado en el sistema en este período. De igual forma, podemos mencionar que a altas concentraciones de algas verdes obtendríamos lecturas de Secchi más bajas.

El período más largo de dominancia por un taxón mayor, fue el comprendido entre los meses de junio a octubre para los 3 sitios, el cual fue dominado por las Cyanophytas (cianobacterias). Este periodo está caracterizado por el ingreso de nutrientes al lago por escorrentía y la precipitación. El lago se encontraba estratificado y con temperaturas altas, tanto ambientales como en el agua, justo las condiciones preferidas por las cianobacterias (Roldán, 2008, pág. 262). En el Centro y Panajachel, formaron casi el 85% de la población durante este periodo mientras que, en Santiago, cerca del 80%. Dos especies fueron las dominantes en este periodo *Limnoraphis robusta* y *Aphanizomenon* sp. En cuanto a la composición de las especies en este periodo se observó comportamientos distintos para cada sitio. En el Centro, existió una dominancia completa de *L. robusta*. En Santiago, en los meses de junio y septiembre existió dominancia de *L. robusta*, mientras que en julio existió una codominancia entre las dos especies (35% para cada una), y en el mes de agosto una dominancia de *Aphanizomenon* sp. con 43% comparada con el 18% de *L. robusta*. Esta dominancia de *Aphanizomenon* sp. puede responder a las características particulares del sitio Santiago, ya que este se encuentra en una bahía por lo que los nutrientes suelen concentrarse en mayor medida que en el resto del lago el cual es más abierto y más homogéneo en cuanto a sus características.

Aphanizomenon sp. es una especie que está adaptada a sistemas más eutróficos, además tiene la capacidad de fijar nitrógeno (al igual que *L. robusta*) (Reynolds, Huszar, Kruk, Naselli-Flores, & Melo, 2002, p. 421) y, en esta época del año se registra para los 3 sitios una disminución casi por completo de nitratos pudiendo estas dos especies tener una ventaja adaptativa por la fijación de nitrógeno. Toledo (2013), determinó que el nitrógeno es el nutriente limitante para el Lago Atitlán, por lo que las especies con capacidad para fijar nitrógeno pueden verse beneficiadas

en este sistema. En Panajachel, en el mes de junio, se tuvo una codominancia entre las dos especies (47% para cada una) y en los meses de julio a septiembre una dominancia de *L. robusta* con más del 63%.

En el mes de junio, se reporta el mayor pico de biovolumen para Santiago (ver figura 3), debido esencialmente al crecimiento exponencial de *L. robusta* en este mes, principalmente en la superficie (ver figuras 5 y 6). En el mes de agosto, se registraron las medidas Secchi más bajas de todo el año (ver figura 19) debido a las grandes cantidades de cianobacterias que formaban cúmulos o masas en la columna de agua. En esta época, la diversidad bajó (ver figuras 14-16), concordando con lo reportado en lagos eutrofizados, en donde a mayor grado de eutrofización menor diversidad de organismos (Wetzel, 2001, pág. 341). Esta disminución de la diversidad puede deberse a la falta de competencia de otros organismos ante estas dos especies de cianobacterias, que no se ven limitadas por el nitrógeno como el resto de organismos en ese momento. En otros estudios se reporta la disminución de la diversidad en los momentos en que ocurre un florecimiento (Amblard, 1988, pág. 1191), así como se sabe que la diversidad se ve reducida por disturbios en el sistema, como lo es el aumento en los niveles de contaminación (Figueredo & Giani, 2001, pág. 166).

Existen varios factores que pueden hacer que varíe o cambie la riqueza en un sistema, como lo puede ser la temperatura, el área del lago o la profundidad del lago (Stomp, Huisman, Mittelbach, Litchman, & Klausmeier, 2011, pág. 2099). En el caso del lago Atitlán, el aumento de la riqueza (ver figuras 14-16) en este periodo se puede deber al aumento de nutrientes debido a la lluvia.

En el análisis de correlación de Pearson (ver cuadro No. 5), se obtuvieron correlaciones positivas con la lluvia (40%), probablemente relacionadas al aporte de nutrientes durante las lluvias, y correlaciones negativas con la irradiación solar, (17%), sugiriendo esto que el aumento de la irradiación pueda provocar foto inhibición en superficie en este grupo. La correlación negativa de la cianobacteria con el viento fue de 40%, esto debido a que las cianobacterias prefieren aguas poco turbulentas. En junio, se registraron los valores mayores de concentración de clorofila *a* para el Centro (ver figura 20), debido a las grandes concentraciones de cianobacterias. *Limnorphis robusta* es una especie característica de lagos mesotróficos (Komarék, y otros, 2013, pág. 299) y *Aphanizomenon* sp. es considerada una especie de sistemas eutrofizados (Rawson, 1956, pág. 19) y ambas son sensibles a bajas concentraciones de fosforo (Reynolds, Huszar, Kruk, Naselli-Flores, & Melo, 2002, p. 421).

El último periodo del año, de noviembre a diciembre, se caracterizó por el fin de las lluvias y el inicio de la época seca (ver figura 18), así como el inicio de la época fría (ver figura 17). Durante este periodo de transición de nuevo se diferencian los sitios Centro y Panajachel (datos únicamente de noviembre) de Santiago. En los primeros dos, se da una codominancia entre las cianobacterias y las diatomeas, principalmente por las especies *L. robusta* y *A. granulata* mientras que en Santiago, se da una dominancia de hasta el 80% de *A. granulata*, posiblemente por el aumento de los vientos que azotan la Bahía de Santiago, y un aumento leve en la concentración de los nutrientes presentes. Estas condiciones son preferidas por las diatomeas, además, estos vientos fuertes provocan la mezcla y pérdida de estratificación en la Bahía, homogenizando la columna de agua en temperaturas más bajas.

9.5 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA

El análisis de correspondencia canónica muestra una ordenación en 3 grupos principalmente de las especies de fitoplancton que se registraron en el periodo de estudio. Un 56% de la varianza de la distribución se puede explicar con este análisis (ver figuras 24 y 25).

En el primer grupo, ubicamos a 3 cianobacterias (*L. robusta*, *M. aeruginosa* y *Aphanizomenon* sp.) y dos algas verdes (*Volvox* sp. y *Mougeotia* sp.). Estas se ordenan de acuerdo a las variables pH, lluvia, temperatura ambiental, temperatura del agua, es decir que estas variables las influyen positivamente, y son influenciadas negativamente por la velocidad del viento y la irradiación. Este resultado es similar al encontrado en la correlación de Pearson para las cianobacterias y las algas verdes, ya que prefieren aguas cálidas, la lluvia (probablemente como fuente de nutrientes) y pocos vientos que permiten estabilizar las aguas del lago.

En el segundo (figura No. 24 círculo rojo), identificamos a las especies *Pediastrum* sp., *Nitzschia* sp., *F. crotonensis*, *Coelastrum* sp., *Staurastrum* sp., *B. braunii* y *C. hirundinella*, todas ellas algas verdes a excepción de las diatomeas, *F. crotonensis* y *Nitzschia* sp. y *C. hirundinella*, un dinoflagelado. Se ven altamente influenciadas por el amonio. De igual forma que en la correlación de Pearson (ver cuadro 5) las algas verdes prefieren el amonio como fuente de nitrógeno.

El tercer grupo observado está conformado por *A. granulata*, *S. ulna*, *Navicula* sp. y *Sphaerocystis* sp., especies influenciadas positivamente por la velocidad del viento, la irradiación solar y clorofila *a*. Esto es característico de las diatomeas ya que les favorecen vientos fuertes, que provocan turbulencia y es similar al resultado obtenido en la correlación de Pearson en relación al viento y a la irradiación solar.

En el *plot* de ordenación (ver figura No. 23 círculo verde) también observamos que este grupo principalmente *A. granulata* se asocia negativamente con las lecturas del disco Secchi, probablemente debido a la cantidad de biomasa que forma esta especie en la columna de agua.

En la figura No. 25, observamos la ordenación para los 3 sitios de muestreos y sus profundidades a lo largo del año 2013, en la cual, no se observa una diferencia entre las distintas profundidades en cada sitio. Se puede observar una pequeña diferencia entre Santiago y los sitios Centro y Panajachel en los meses de agosto a noviembre, lo que probablemente se deba a la estructura poblacional de Santiago que presentó codominancia de *Aphanizomenon* sp y *A. granulata*, a diferencia de los otros dos sitios en donde fue dominante *L. robusta* en esta época.

Las especies *A. granulata*, *Coelastrum* sp. y *L. robusta* fueron las dominantes en el presente estudio, sin embargo *Aphanizomenon* sp. se reportó en grandes cantidades en los meses de junio y agosto. De acuerdo a Rawson (1956), este grupo de especies de fitoplancton en un sistema representan un estado eutrófico. Mientras que Reynolds (2002), menciona que especies como *Aphanizomenon* sp se localizan en hábitats mesotróficos, o que la especie *A. granulata* prefiere hábitats con epilimnio eutrófico. En los procesos de sucesión de sistemas oligotróficos a mesotróficos, las algas verdes sin movilidad, como *Coelastrum* sp, son restringidas a espacios cortos de crecimiento, que a menudo se da en las primeras etapas de estratificación en los lagos (Wehr & Sheath, 2003, pág. 258) (abril y mayo en el caso de Atitlán). En base a la composición de especies que se encontró en este estudio y lo citado en la literatura, podemos mencionar que el lago se encuentra en un estado mesotrófico.

10. CONCLUSIONES

- La dinámica temporal del fitoplancton en el año 2013 para los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán, en los primeros meses del año (enero a marzo) presenta una dominancia de Bacillariophytas, influenciadas principalmente por condiciones de vientos fuertes, la columna de agua parcial o totalmente mezclada y temperaturas bajas del agua. Posteriormente (abril y mayo), se da una dominancia por las Chlorophytas, influenciadas por temperaturas mayores del agua, estratificación de la columna de agua y concentraciones mayores de nutrientes. De junio a octubre, se observa una dominancia por las Cyanophytas influenciadas por temperaturas altas en el agua, estratificación de la columna de agua, lluvia (posiblemente como fuente de nutrientes) y poco viento. En los últimos meses del año (noviembre y diciembre) en Panajachel y Centro Weiss G se da una codominancia entre las Cyanophytas y Bacillariophytas, y, en Santiago, se dio una dominancia por las Bacillariophytas.
- Las especies dominantes para el periodo de tiempo del estudio fueron *Aulacoseira granulata* (Bacillariophyta), *Coelastrum* sp. (Chlorophyta) y *Limnographis robusta*.
- No se encontró diferencias marcadas entre la estructura y dinámica espacial del fitoplancton entre las 4 profundidades medidas. Los sitios Panajachel y Centro Weiss G son más similares entre sí, tanto en la riqueza y diversidad de especies, como en la dinámica de estos a través del tiempo, en relación al sitio Panajachel.
- El estado trófico del lago se puede clasificar como mesotrófico de acuerdo a las diferentes especies que dominan la población de fitoplancton.

11. RECOMENDACIONES

- Es importante realizar estudios de la dinámica del plancton a largo plazo, ya que las condiciones físicas como las ambientales en ocasiones tienen dinámicas mayores a 1 año, y es necesario conocer los cambios para predecir futuros escenarios
- Incluir el análisis de silicatos en los trabajos de monitoreo e investigación relacionados con fitoplancton ya que este elemento es vital en el ciclo de vida de estos organismos, principalmente para las Bacillariophytas.
- Seguir con el análisis del zooplancton ya que la dinámica del fitoplancton se ve influenciada por interacciones con este grupo, principalmente por la depredación a las que pueden ser sometidos.
- Realizar estudios en condiciones controladas (Bioensayos) en el laboratorio, en donde se manipulan diferentes variables abióticas, para medir el impacto de estas variables en la dinámica del fitoplancton del lago.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, R., Wilhelm, S., & Gerten, D. (2006). Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate change. *Global Change Biology*(12), 652-661.
- Alvarez, M. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. (I. d. Humboldt, Ed.) Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Inventarios de Biodiversidad, Grupo de Exploración y Monitoreo Ambiental (GEMA).
- Amblard, C. (1988). Seasonal succession and strategies of phytoplankton development in two lakes of different trophic states. *Journal of Plankton Research*, 10(6), 1189-1208.
- Cai, L.-L., Zhu, G.-w., Zhu, G.-y., Xu, H., & Qin, B.-q. (2012). Effects of temperature and nutrients on phytoplankton biomass during bloom seasons in Taihu Lake. *Water Science and Engineering*, 5(4), 361-374.
- Caron, D. A., & Hutchins, D. A. (2013). The effects of changing climate on microzooplankton grazing and community structure: drivers, predictions and knowledge gaps. *Journal of Plankton Research*, 0(0), 235-252.
- Castellanos, E., & Dix, M. (2009). *Levantamiento de la Línea Base del Lago Atitlán*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- CEA. (2010). *Métodos de Análisis de Laboratorio de Análisis y Monitoreo del CEA*. Sololá: Universidad del Valle de Guatemala.
- Corman, J. R., Carlson, E., Chandra, S., Dix, M., Rejmánková, E., Roegner, A., y otros. (2011). Temporal dynamics of phytoplankton resource limitation, community composition, and toxin production in a large tropical lake. *Ecological Society of America 96th annual meeting* (pág. 42). Austin: ESA.
- Deevey, E. J. (1957). Limnological Studies in Middle America with a chapter on Aztec limnology. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 39, 213-328.
- Dix, M., Dix, M., Orozco, M., Cabrera, D., Bocel, E., Toledo, A., y otros. (2012). El Lago Atitlán, Guatemala: su estado ecológico octubre 2009 - diciembre 2011. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*, 35-50.

-
- Dix, M., Fortin, I., Medinilla, O., & Rios, L. (Edits.). (2003). *Diagnóstico ecológico social en la cuenca de Atitlán*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy.
- Dix, M., Toledo, A., Ochaeta, G., Komarek, J., Dix, M., van Tuylen, S., y otros. (2014). Lake Atitlan Eutrophication: Impacts on phytoplankton dynamics and cyanobacterial blooms 1968 to 2013. *Joint Aquatic Science meeting*. Oregon.
- Dix, M., van Tuylen, S., Ochaeta, G., Bocel, J., Coroxon, D., Dix, M., y otros. (2014). *Estado Físico, Químico y Biológico del Lago Atitlán y su Cuenca 2012*. Sololá: Universidad del Valle de Guatemala.
- Dobson, M., & Frid, C. (2009). *Ecology of Aquatic Systems*. New York: Oxford University Press.
- Eaton, A. D. (Ed.). (2005). *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater* (21 ed.). Washington: American Public Health Association.
- Fabian, D., & Cruz-Pizarro, L. (1997). Variaciones Espaciales y Temporales del Zooplancton en un Lago Monomítico Eutrófico (Lago Ton-Ton, Uruguay). *Limnética*, 13(1), 55-68.
- Figueredo, C. C., & Giani, A. (2001). Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 445, 165-174.
- Gómez, M., Rivera, R., Duque Escobar, C., Andrade, C., & Rodríguez, C. (Junio de 2011). Análisis Temporal y Espacial del Fitoplancton en el sistema de Lagos Yuharcaca, Planicie de inundación del Río Amazonas (Leticia-Colombia). *Investigación y Ciencia del Gimnasio Campestre*, 10(1), 7-27.
- Hodell, D. A., Anselmetti, F. S., Ariztegui, D., Brenner, M., Curtis, J. H., Gilli, A., y otros. (2008). An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quaternary Science Review*, 27, 1152-1165.
- Holloway, A. D., Saunders, G. B., & Handley, C. J. (1950). *Special Scientific Report No. 5: A fish and wildlife survey of Guatemala*. United State Department of the Interior, Fish and Wild Life Service. Washington: United State Department of the Interior.
- Hutchinson, G. E. (1961). The Paradox of the Plankton. *The American Naturalist*, 95(882), 137-145.

-
- IARNA-URL. (2011). *Cambio Climático y Biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. (C. Cleaves, J. Gálvez, & I. Monrroy, Edits.) Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- IPCC. (2001). *Tercer Informe de Evaluación "Cambio Climático" La base Científica*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra: Cambridge University Press.
- Komárek, J., & Hauer, T. (15 de Abril de 2013). *CyanoDB.cz*. Recuperado el 13 de Abril de 2013, de <http://www.cyanodb.cz/main>
- Komarék, J., Zapomelova, E., Smarda, J., Kopecky, J., Rejmankova, E., Woodhouse, J., y otros. (2013). Polyphasic evaluation of *Limnographis robusta*, a water-bloom forming cyanobacterium from Lake Atitlán, Guatemala, with a description of *Limnographis* gen. nov. *Fottea*, 13(1), 39-52.
- Lewandowska, A. M. (2011). *Effects of Warming on the Phytoplankton Succession and Trophic Interaction (Tesis de Doctorado)*. Kiel: Kiel University.
- Lewis, W. M. (1987). Tropical Limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 159-184.
- Liddicoat, M. I., Tibbits, S., & Butler, E. (1975). The determination of ammonia in sea water. *Limnol Oceanogr*(20), 131-132.
- Luján de Fabricius, A. (2000). Las Algas, Indicadores de la calidad del agua. *Interciencia*, 4(4), 1-4.
- Meek, S. E. (Abril de 1908). The zoology of lakes Amatitlan and Atitlan, Guatemala, with special reference to ichthyology. *Field Columbian Museum, Zoological Series*, 7(6), 159-206.
- Michalak, A. M., Anderson, E. J., Beletsky, D., Boland, S., Bosch, N., Bridgeman, T., y otros. (2013). Record-setting algal bloom in lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future condition. *PNAS*, 110(16), 1-5.
- Montoya, Y., & Aguirre, N. (2010). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. *Rev.fac.ing.univ. Antioquia*, 55, 76-89.

-
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- Newhall, C. G., Paull, C. K., Bradbury, J. P., Higuera-Gundy, A., Poppe, L., Self, S., y otros. (1987). Recent Geologic History of Lake Atitlán, a Caldera Lake in Western Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 81-107.
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. *Environmental Microbiology*, 65(4), 995-1010.
- Paul, V. J. (2008). Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms, Chapter 11. (H. K. Hudnell, Ed.) *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 619, 239-257.
- Pinilla Agudelo, G. A. (2005). *Ecología del Fitoplancton en un Lago Amazónico de Aguas Claras (Lago Boa, Coquetá Medio República de Colombia)*. (J. T. Lozano, Ed.) Bogotá: Facultad de Biología Marina.
- Prescott, G. W. (1970). *How to know the freshwater algae*. Dubuque, Iowa, Estados Unidos: Brown.
- Rawson, D. S. (1956). Algal Indicators of Trophic Lake Types. *Limnology and Oceanography*, 1(1), 18-25.
- Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J., & Girón, N. (2011). Cyanobacterial blooms in Lake Atitlan, Guatemala. *Limnologica*, 41, 296-302.
- Reynolds. (2006). *The Ecology of Phytoplankton*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Reynolds, C. S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L., & Melo, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton research*, 24(5), 417-428.
- Ritchie, R. J. (2006). Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. *Photosynthetic research*, 89, 27-41.
- Roldán, G. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquía.

-
- Smith, G. (1950). *The fresh-water algae of the United States*. New York, USA: McGraw-Hill Book.
- Stomp, M., Huisman, J., Mittelbach, G. G., Litchman, E., & Klausmeier, C. A. (2011). Large-scale biodiversity patterns in freshwater phytoplankton. *Ecology*, 92(11), 2096-2107.
- Tilden, J. E. (Junio de 1908). Notes on a collection of algae from Guatemala. *Biological Society of Washington*, 21, 153-156.
- Toledo, M. A. (2013). *Dinámicas de fitoplancton y su relación con factores fisicoquímicos (Tesis de Licenciatura)*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- UNESCO. (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión*. (S. Bonilla, Ed.)
- Van Den Hoek, C., Mann, D. G., & Jahns, H. M. (1998). *Algae An Introduction to Phycology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wehr, J. D., & Sheath, R. G. (2003). *Freshwater Algae of North America Ecology and Classification*. San Diego: Elsevier.
- Weiss, C. (1971). *Water quality investigations in Guatemala, Lake Atitlan 1968-1970*. University of North Carolina and ERIS.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecology*. San Diego: Elsevier.

10. ANEXOS

ANEXO 1: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS REPRESENTATIVOS ESTABLECIDOS PARA LA INVESTIGACIÓN Y SITIOS PARA LA TOMA DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS Y MUESTRAS DE AGUA.



- Centro Weiss-G
14° 42' 23.182" N 91° 11' 13.901" O
- Panajachel
14° 44' 1.289" N 91° 9' 36.979" O
- Santiago Atitlán
14°38'59.06 N 91°13'59.94 O

ANEXO 2: DIMENSIONALES DE LAS VARIABLES

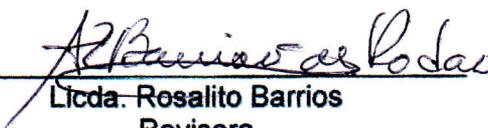
Variable	Dimensional
Clorofila <i>a</i>	µg/L
Fitoplancton	Org/L
Índice de diversidad	Bits/individuo
Nitrato	µg/L
Amonio	µg/L
Ortofosfato	µg/L
Irradiación solar	W/m ² (Vatio/metro ²)
Velocidad del viento	Km/h
Precipitación media mensual	Milímetros
Temperatura ambiente media mensual	°C
Conductividad especifica	µs/cm ²
Oxígeno disuelto	mg/L
Temperatura (del agua)	°C
pH (Potencial de hidrogeno)	Unidades de pH



Gerson Renato Gabriel Ochaeta Constanza
Autor



Dra. Margaret Dix
Asesora



Licda. Rosalito Barrios
Revisora



Dr. Sergio Melgar
Director
Escuela de Biología



Dr. Óscar Manuel Cobar Pinto
Decano
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia